EBC

Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono

Modelo de Equilíbrio Geral

Prof. Dr. Angelo Costa Gurgel

Ribeirão Preto

2012

Equipe de Coordenação do Projeto Economia de Baixo Carbono

Coordenação Geral – Rudinei Toneto Junior
Coordenação Geral Adjunta – Marcelo Pinho

Coordenação do Modelo de Equilíbrio Geral: Angelo Costa Gurgel

Coordenação SASTEC – Banco de Dados de Tecnologias: Geciane Silveira Porto e Sérgio Kannebley

Coordenação de Estudos Setoriais
Uso do Solo, Pecuária e grãos - Geraldo Bueno Martha Junior e Elísio Contini
Biocombustíveis – André Luis Squarize Chagas
Siderurgia - Germano Mendes de Paula
Alumínio – Clésio Lourenço Xavier
Cimento – Marcelo Pinho
Petróleo e Petroquímico – Eduardo Luiz Machado
Automobilístico e Aeronáutica – Cláudio Ribeiro de Lucinda

Consultores Temáticos: Energia, Eficiência Energética e Tecnologias Verdes
Paulo Seleghim Junior
Oswaldo Baffa

Auxiliares de Coordenação
Beatriz Selan
Gabriela Eusébio

Este projeto foi realizado com recursos do Fundo de Estruturação de Projetos (FEP) do BNDES. O conteúdo é de exclusiva responsabilidade dos autores, não refletindo, necessariamente, a opinião do BNDES. Informações sobre o FEP encontram-se em HTTP://www.bndes.gov.br.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE DE RIBEIRÃO PRETO
CONTRATO DE COLABORAÇÃO FINANCEIRA NÃO-REEMBOLSÁVEL
N° 11.2.0488.1
FUNDACE – BNDES

ECONOMIA DE BAIXO CARBONO: AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DE RESTRIÇÕES E PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS

SUBPROJETO 1 – MODELO DE EQUILÍBRIO GERAL

Equipe:
Angelo Costa Gurgel (Coordenador)
Sergey Paltsev
Franklin França
Caroline de Souza Rodrigues Cabral
Maria Juliana Iorio de Moraes

RIBEIRÃO PRETO
Dezembro 2012

SUBPROJETO 1 - MODELO DE EQUILÍBRIO GERAL

Relatório 4 – Resultados baseados em cenários de reduções de emissões pela adoção de mercados de carbono e impostos às emissões por diferentes países e cenários de adoção de tecnologias de redução de emissões

Objetivos do subprojeto 1

Objetivo Geral:

- Avaliar como a adoção de novas tecnologias de baixo carbono e a introdução de restrições a emissões de GEE podem alterar a estrutura de preços relativos e a competitividade dos produtos e setores brasileiros.

Objetivos específicos:

- Desenvolvimento de um modelo econômico de equilíbrio geral para o estudo de mercados de carbono e impostos às emissões;
- Simulação de cenários de adoção de mercados de carbono e impostos às emissões em países desenvolvidos;
- Simulação de cenários de adoção de tecnologias de menor intensidade de emissões (aumento da eficiência e estímulo de fontes de energia renováveis e de baixas emissões) de acordo com os resultados dos estudos setoriais.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O propósito da presente revisão é apresentar e discutir estudos sobre políticas e ações de mitigação das mudanças climáticas, considerando os modelos empíricos que investigam os aspectos econômicos relacionados às políticas de mitigação. Pretende-se relacionar os principais trabalhos sobre o tema, bem como discutir alguns dos trabalhos e resultados sobre impactos de políticas visando à redução de gases de efeito estufa e o desenvolvimento recente da literatura nacional sobre o tema.

1.1. Mudanças Climáticas e Ações de Mitigação

As mudanças climáticas têm sido identificadas nos últimos anos como consequência do aumento das concentrações dos chamados gases de efeito estufa (GEE). Atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis; o desmatamento; a utilização de insumos com alta concentração de nitrogênio na agricultura; a produção de gases refrigerantes (HFCs) e a criação de rebanhos, em que os dejetos são fonte de metano, entre outros, são as fontes mais comuns de emissões de GEE (KARL; TRENBERTH, 2003).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), responsável por avaliar e sintetizar os principais trabalhos científicos sobre esse tema, afirma em seu relatório mais recente que as emissões globais de gases de efeito estufa aumentaram 70% entre 1970 e 2004, e 24% entre 1990 e 2004 (SOLOMON et al., 2007). O aumento mais pronunciado em emissões globais de GEE ocorre em setores relacionados à oferta de energia, de cerca de 145%, enquanto as emissões diretas dos setores de transportes, da indústria e das mudanças no uso da terra e florestas aumentaram em 120%, 65% e 40% no período citado, respectivamente. Segundo o IPCC, as temperaturas médias na superfície do globo terrestre devem elevar-se entre 1,1 e 6,4 °C entre 1990 e 2100 como consequência do aumento na concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera.

De acordo com Hansen et al. (2006), um aumento na temperatura média global superior a 1°C seria o mais alto observado no último milhão de anos. Diversas consequências negativas são esperadas como consequência de uma elevação na

temperatura média da terra, como a redução do gelo nas áreas de altas latitudes e altitudes, elevação dos níveis dos oceanos e inundação de áreas e cidades costeiras, mudanças em padrões regionais de precipitação com agravamento de secas e enchentes, alterações nas frequências e intensidades de eventos de temperaturas extremas como as ondas de calor, migração e extinção de espécies animais e vegetais, alterações na produtividade agrícola e aumento em vetores de doenças. De acordo com o IPCC, alguns desses efeitos já são observáveis e possíveis de serem atribuídos às mudanças climáticas registradas nos últimos 50 anos (PARRY et al., 2007).

A Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS, 2009) afirma que os impactos das mudanças do clima sobre a saúde podem ser verificados de forma direta, como no caso das ondas de calor, ou mortes causadas por outros eventos climáticos extremos. Ainda destaca que impactos indiretos seriam aqueles mediados por mudanças no ambiente, como a alteração de ecossistemas. Nesse caso, elevações da temperatura podem impactar na distribuição de vetores de doenças infecciosas e endêmicas, como malária, dengue e febre amarela, bem como afetar a produção agrícola prejudicando o abastecimento e a segurança alimentar.

De acordo com o IPCC, as mudanças climáticas afetariam a produção de alimentos no mundo através de alterações na produtividade das plantas cultivadas, que tende a elevar-se com um aumento médio da temperatura local de 1 a 3ºC, mas diminui para valores acima desses níveis (PARRY et al., 2007). Mudanças previstas nos padrões de precipitação devem aumentar a frequência de secas e inundações, comprometendo a produção agrícola regional, principalmente aquela voltada à subsistência em baixas latitudes. No caso do Brasil, estudo desenvolvido pela EMBRAPA estimou perdas em safras de grãos da ordem de R$ 7,4 bilhões já em 2020, podendo atingir R$ 14 bilhões em 2070, como consequência do aquecimento global, o que significa uma profunda alteração na capacidade de produção e na localização das atividades agropecuárias no Brasil (EMBRAPA, 2008).

Além da mudança na geografia do setor agrícola, pode-se prever uma alteração na distribuição espacial das indústrias, das populações e das sociedades em geral, uma vez que, muitos dos assentamentos humanos e os principais centros urbanos do mundo estão localizados em planícies de inundação costeiras e de rios, áreas propensas a eventos climáticos extremos. A intensificação da ocorrência destes fenômenos, como chuvas intensas, vendavais e furacões, inundações, marés

meteorológicas e secas prolongadas, tem sido associada às mudanças globais em temperatura. Considerando-se o poder de destruição e forte impacto econômico e social destes eventos, torna-se um desafio para as autoridades e demais gestores públicos o gerenciamento de planos de prevenção, adaptação e atenuação de seus efeitos, devido à impossibilidade de prevê-los com exatidão. Um exemplo disso é o caso dos EUA, que sofreram 70 desastres relacionados ao clima nos últimos 27 anos. Destes desastres, 61 ocorreram durante o período de 1988-2006, com custos estimados em mais US$ 430 bilhões (LOTT; ROSS, 2007).

As conclusões do IPCC sobre mudanças climáticas e suas relações com as emissões de gases de efeito estufa oriundas das atividades humanas têm sido reconhecidas pelas diversas comunidades científicas, incluindo as academias científicas nacionais dos principais países industrializados, bem como pela sociedade em geral. Contudo, a discussão sobre mudanças climáticas já se tornara relevante durante a década de 1980, culminando, na década seguinte, em pressão para se criar um tratado internacional que abordasse o tema. Nesse contexto, foi adotada, em maio de 1992, a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), que entrou em vigor em março de 1994. Esse passo significou o reconhecimento das mudanças climáticas como um problema global, cuja mitigação requer cooperação internacional. A partir de então, os 192 países signatários da Convenção do Clima, como é conhecida, passaram a reunir-se periodicamente em discussões da Conferência das Partes (COPs) (UNFCCC, 1998). Em 1997 na terceira reunião da COP realizada na cidade de Quioto decidiu-se pela adoção do Protocolo de mesmo nome, que estabelece metas de redução dos gases de efeito estufa para os principais países emissores.

O Protocolo de Quioto entrou em vigor em 2005, estabelecendo que os países industrializados reduzissem as emissões de gases de efeito estufa (GEE) com relação aos níveis de 1990 em 5,2%, em média, entre os anos de 2008 e 2012. A cada país do grupo denominado “Anexo I”[1] foi atribuída uma meta, calculada com base na sua própria contribuição para as emissões totais desde a Revolução

[1] Os países do Anexo I são aqueles que se comprometeram em reduzir de emissões de gases de efeito estufa durante as reuniões que definiram o Protocolo de Kyoto. As metas de reduções foram descritas no Anexo B do protocolo, e por isso os países do Anexo I são comumente denominados também como países do Anexo B. As listas de países que fazem parte do grupo Anexo I e os não-Anexo I encontram-se no Anexo A do presente trabalho.

Industrial (UNFCCC, 1998). Os países em desenvolvimento foram desobrigados de qualquer meta, uma vez que seu processo de industrialização foi tardio em relação aos países do Anexo I, admitindo-se que suas prioridades seriam a conquista de um nível de crescimento sustentado e a erradicação da pobreza (DINIZ, 2007).

No âmbito do Protocolo de Quioto, foram discutidos e criados três mecanismos para implementar as reduções em gases de efeitos estufa, conhecidos como mecanismos de flexibilização: o comércio de emissões (*Emissions Trading* – ET); a implementação conjunta (*Joint Implementation* – JI); e os mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL). Estes mecanismos visam facilitar a redução nos níveis de emissões dos países signatários do acordo no período de compromisso, bem como fomentar o desenvolvimento de políticas de redução de emissões dos GEE nos países em desenvolvimento.

O Comércio de Emissões, estabelecido no Artigo 17 do Protocolo de Quioto, permite que países que tenham créditos ou permissões de emissão em excesso possam vender esses créditos a países cujas emissões ultrapassam suas metas. Esse mecanismo estende os mercados de carbono para os níveis supra-nacionais, criando uma nova *commodity* na forma de créditos de emissão.

Já o mecanismo de Implementação Conjunta foi proposto pelos EUA e aplica-se exclusivamente aos países considerados Anexo I. Através deste mecanismo, qualquer país incluído nesse grupo pode transferir para ou adquirir de qualquer outro país créditos ou unidades de redução de emissões que tenham sido oriundos de projetos de redução ou remoção de emissões antrópicas em qualquer setor da economia.

O MDL, por sua vez, é um mecanismo de flexibilização que tem por objetivo assistir aos países não constantes no Anexo I, os países em desenvolvimento. Através desse mecanismo, um país que faz parte do Anexo I que não tenha atingido sua meta de redução de emissões pode adquirir Certificados de Reduções de Emissões (CREs), ou créditos de carbono, de países em desenvolvimento. Esses créditos, por sua vez, são gerados por projetos capazes de reduzir emissões nos países em desenvolvimento.

Esses mecanismos estabelecem regras e incentivos para que a redução de gases de efeito estufa possa ser realizada através de mercados de créditos de carbono de alcance internacional e mesmo global, reduzindo assim os custos econômicos de medidas de mitigação das mudanças climáticas. Menores custos são esperados

uma vez que mercados globais permitem que indústrias e projetos mais eficientes em reduzir emissões sejam priorizados, contribuindo para maior eficiência e menores custos da mitigação.

O estabelecimento de mercados de permissões ou de créditos para emissão de poluentes já faz parte da rotina de algumas nações. Pode-se destacar a experiência norte-americana com os mercados de controle de emissões de diversos gases relacionados à formação de chuva ácida na década de 1970, conhecidos hoje como *Emissions Trading Program* (ROCHA, 2003).

Percebe-se, portanto, que governos, sociedade civil e organizações não-governamentais de muitos países vêm demonstrando grande preocupação com os impactos negativos das mudanças climáticas. Diversas políticas e medidas para redução de emissões de gases de efeito estufa vêm sendo formuladas, discutidas e até mesmo implementadas por países, blocos econômicos e estados. Entre essas medidas destacam-se os mercados de créditos de carbono, nos moldes estabelecidos no âmbito da UNFCCC e pelo Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 1998). Tais mercados vêm sendo implementados pela União Europeia (UE) (EUROPEAN COMMUNITY, 2003; EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, 2006) e encontram-se em discussão no Congresso Norte-Americano (US HOUSE OF REPRESENTATIVES 2006a, 2006b; US SENATE 2007a, 2007b, 2007c).

Os impostos à emissão de gases de efeito estufa são outro instrumento em discussão e em prática para a redução de emissões desses gases. Estes foram introduzidos em países como Suécia e Noruega (BRANNLUND; GREN, 1999) e no Canadá nas províncias de Quebec (DOUGHERTY, 2007) e British Columbia (FOWLIE; ANDERSON, 2008). Outras políticas e medidas sendo discutidas e implementadas dizem respeito a investimentos em tecnologias de produção de energia de baixa emissão de gases de efeito estufa, como a queima de carvão com captura e armazenagem de emissões de carbono (HOLLOWAY; BENTHAM; KIRK, 2006; EUROPEAN COMMISSION, 2007; MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT), 2007), o aumento de eficiência no uso de energia em veículos (US NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2002), construções urbanas e plantas industriais (THE PEW CENTER ON GLOBAL CLIMATE CHANGE, 2005), medidas mandatórias de uso de biocombustíveis e misturas destes aos combustíveis fósseis (EUROPEAN COMMISSION, 2004; COYLE, 2007), entre outras.

No âmbito das discussões internacionais sobre estabilização das concentrações de gases de efeitos estufa destacam-se também, além dos mercados de carbono, os já mencionados MDLs, nos quais projetos de redução de emissões de gases de efeito estufa em países em desenvolvimento podem ser utilizados para atingir metas de redução de emissões em países desenvolvidos. Esses projetos incluem investimentos em tecnologias, substituição de energia de fonte fóssil por renovável, florestamento e reflorestamento (LOPES, 2002). Ainda, estão em andamento na UNFCCC desde 2003 discussões para a criação de mecanismos de incentivo à redução das emissões de gases de efeito estufa advindos do desflorestamento e da degradação dos ecossistemas florestais nos países em desenvolvimento, como o programa REDD (*Reduction in Emissions from Deforestation and Forest Degradation*), que prevê créditos de carbono para proteção das florestas tropicais (SCHLAMADINGER et al., 2007a, 2007b).

Os Estados Unidos, apesar de uma participação controversa e tumultuada nas negociações do Protocolo de Quioto e da recusa em retificar o mesmo, desponta como uma referência quando se trata de legislações ambientais e climáticas, uma vez que alguns estados como a Califórnia e os da Nova Inglaterra[2] possuem ativa posição no debate climático. Esses estados adotaram uma série de dispositivos legais de combate às mudanças climáticas, que agora sob a gestão Obama têm alcançado força a nível nacional e influenciado outros estados a seguirem na mesma direção. A Califórnia, por exemplo, estabeleceu o primeiro programa de mecanismos regulatórios e de mercado para redução de GEE dos EUA, o *California Global Warming Solutions Act of 2006* (STATE OF CALIFORNIA, 2006). Este programa trata de temas como sequestro de carbono, eficiência no uso da água em propriedades públicas, energia solar térmica e combustíveis de baixas emissões. Com as regulamentações adotadas desde 2006, a Califórnia pretendia em 2010 reduzir seus níveis de emissões para os mesmos observados no ano de 2000, em 2020 atingir os níveis de emissões de 1990, e por fim, alcançar em 2050 os níveis de emissões de 1990 reduzidos de 80%.

Diante desse quadro de esforços internacionais e regionais para redução de emissões de gases de efeito estufa e mitigação dos impactos negativos das

---

[2] Connecticut, New Hampshire, Maine, Massachussetts, Rhode Island e Vermont.

mudanças climáticas, diversos desafios e oportunidades se apresentam às nações e aos organismos internacionais. Esforços de controle e redução de emissões de gases por nações individuais ou blocos geralmente possuem alcance limitado no que diz respeito à contribuição para estabilização global das concentrações de gases em níveis adequados e/ou desejáveis. Contudo, podem representar um importante passo em termos de assumir responsabilidades, desenvolver mecanismos internacionais de controle e de convencer outros países a adotar políticas para reduzir suas emissões. O conhecimento dos impactos econômicos de tais esforços é fundamental para que as nações conheçam os custos e o alcance das medidas de mitigação.

O objetivo deste trabalho é contribuir para o entendimento e mensuração dos impactos econômicos de políticas de redução dos gases de efeito estufa através do desenvolvimento e aplicação de modelos econômicos dinâmicos da economia global, que sejam capazes de simular a adoção de políticas de redução de gases de efeito estufa e suas especificidades.

1.2 Modelos Econômicos para o Estudo das Mudanças e Políticas Climáticas

Muitos modelos vêm sendo desenvolvidos para estudar os impactos das mudanças climáticas e para simular políticas econômicas que lidam com o problema de externalidade associado às emissões de gases de efeito estufa.

No estudo das mudanças climáticas, os exercícios de modelagem de avaliação integrada (*integrated assessment*) têm-se mostrado como mais apropriados, uma vez que combinam modelos de diferentes áreas do conhecimento para representar sistemas socioeconômicos e naturais, e suas relações. A construção desses sistemas tem sido estimulada pelo reconhecimento de que o estudo de questões ligadas ao aquecimento global necessita do entendimento e representação de aspectos de diferentes disciplinas, uma vez que envolvem diversas dimensões, como a social (demografia, urbanização), a econômica (produção, consumo, capital e trabalho), a ambiental (transformações físicas, biológicas e químicas) e a institucional (opções políticas e de pesquisa e desenvolvimento).

Contudo, as limitações das modelagens de avaliação integrada residem nas suas próprias vantagens, uma vez que a comunicação entre os modelos de diferentes

áreas do conhecimento, apesar de constituir um avanço em termos de capacidade de investigar o problema, não possui um paradigma ou caminho teórico universalmente desenvolvido ou aceito (ROTMANS; DOWLATABADI, 1998). Exemplos de exercícios de modelagens de avaliação integrada para o estudo de mudanças climáticas são os desenvolvidas por Rotmans (1990), Nordhaus (1992), Dowlatabadi e Morgan (1993), Edmonds et al. (1994), Prinn et al. (1999) e Sokolov et al. (2005).

Além dos exercícios de avaliação integrada, existem modelos econômicos individualizados, geralmente mais direcionados para o estudo das políticas de mitigação de gases de efeito estufa. Entre esses, podem-se destacar modelos como WW (WHALLEY; WIGLE, 1991), GREEN (BURNIAUX; NICOLETTI; OLIVEIRA MARTINS, 1992), DICE (NORDHAUS, 1992), CRTM (RUTHERFORD, 1992), RICE (NORDHAUS; YANG, 1996), MS-MRT (BERNSTEIN; MONTGOMERY; RUTHERFORD, 1999), GTAP-E (BURNIAUX; TRUONG, 2002), MERGE (RICHELS; MANNE; WIGLEY, 2007), ENTICE (POPP, 2004), EPPA (PALTSEV et al., 2005; BABIKER et al., 2008) e WITCH (BOSETTI et al., 2006).

As análises econômicas de mudanças climáticas, seja por modelos econômicos individualizados ou através de modelagens de avaliação integrada, levam em conta economias de diversos países e costumam apresentar certo grau de detalhe na caracterização das tecnologias energéticas de regiões específicas do globo. Diversas aplicações desses modelos no estudo de políticas e medidas para redução de emissões de gases de efeito estufa podem ser encontradas na literatura. Exemplos dessas aplicações incluem: mensuração dos impactos do Protocolo de Quioto sobre a economia europeia (VIRGUIER et al., 2003), sobre a economia japonesa (PALTSEV et al., 2004), sobre os países em desenvolvimento (BABIKER; REILLY; JACOBY, 2000) e a respeito do papel da Rússia no mesmo (BERNARD et al., 2003); análises sobre propostas recentes de implementação de restrições quantitativas e impostos às emissões de carbono nos EUA (PALTSEV et al., 2008, 2009; JORGENSON et al., 2008; METCALF et al., 2008), no Japão (KASAHARA et al., 2007) e na UE (REILLY; PALTSEV, 2006); mensuração dos efeitos distributivos de políticas adotadas ao mesmo tempo por vários países do mundo (BABIKER; JACOBY, 1999; BABIKER; ECKAUS, 2002; JACOBY et al., 1997, 2009); análises de efeitos das mudanças climáticas sobre a agricultura (REILLY et al., 2007); mensuração de impactos de políticas climáticas sobre o emprego (BABIKER;

ECKAUS, 2007); estudo do papel dos diferentes tipos de gases de efeito estufa e sumidouros de carbono nas discussões de políticas (MANNE; RICHELS, 2004, REILLY et al., 2006); considerações sobre os papéis dos biocombustíveis na redução das emissões de gases de efeito estufa (GURGEL; REILLY; PALTSEV, 2007; MELILLO et al., 2009; HERTEL et al., 2010); investigações sobre o papel dos avanços tecnológicos e da pesquisa e desenvolvimento na avaliação das políticas de redução de gases de efeito estufa (GOULDER; SCHNEIDER, 1999; POPP, 2006; BOSETTI; TAVONI, 2009); análises do uso de receitas de impostos de carbono para redução de outras distorções nas economias (GOULDER, 1995; BABIKER; METCALF; REILLY, 2003); estimação dos custos de uma política climática nos Estados Unidos sob a gestão Obama (PALTSEV et al., 2009), entre outros.

Entre esses estudos, é possível destacar alguns que se aproximam mais do tema da presente pesquisa, de modelagem de políticas climáticas e seus impactos econômicos. Nordhaus (2007), por exemplo, avalia abordagens alternativas para a redução do aquecimento global de forma eficiente, considerando um enfoque de custo-benefício. Para tal, utiliza um modelo de equilíbrio geral computável global, o modelo DICE, construído com base na teoria neoclássica de crescimento econômico, para avaliar os impactos econômicos das mudanças climáticas. O Modelo DICE assume um recurso intitulado “capital natural” como um tipo adicional de estoque de capital, reduzido pelas concentrações de GEE, e tem no controle de emissões um investimento que aumenta a quantidade de capital natural. O autor explicita o papel dos preços dos combustíveis fósseis como indicador mais eficiente em incentivar mudanças no uso de energia pelas firmas e domicílios e incentivar o desenvolvimento de novas tecnologias.

Babiker e Eckaus (2002), por sua vez, utilizaram o modelo EPPA para analisar os custos econômicos de restrições em emissões não compartilhadas entre todos os países, como as metas do Protocolo de Quioto. Os resultados sugerem que os países do Anexo I deveriam pagar compensações monetárias aos demais por suas emissões. Como conclusão, a distribuição das restrições de emissões de GEE entre países definidas naquele acordo não teve um princípio econômico lógico, mas sim arbitrário. Isso implica em diferentes níveis de custos entre os países participantes, não relacionados com a renda atual ou à responsabilidade histórica na contribuição para o problema climático. Finalmente, o artigo afirma que os países não incluídos

no Anexo I devem ser persuadidos a reduzir suas próprias emissões, permitindo que os custos sejam distribuídos de maneira mais equitativa.

Paltsev et al. (2008) analisaram propostas de mercados de carbono (*cap and trade*) em discussão nos últimos anos no congresso dos Estados Unidos. Estes autores estimaram perdas de bem estar entre 1,5 e 2% do PIB norte-americano até 2050 devido às políticas climáticas em discussão. Esses autores também concluem que cumprir as metas propostas de mudança climática deve requerer esforços globais. Segundo este trabalho, com o rápido crescimento dos países em desenvolvimento, se estes não controlarem suas emissões, pode haver um aumento substancial da temperatura global, mesmo que os Estados Unidos e outros países desenvolvidos tenham políticas bastante restritivas. Tal conclusão está de acordo com a análise anterior de Barbiker e Eckaus (2002).

Seguindo um propósito semelhante, o trabalho de Metcalf et al. (2008) analisa as propostas de tributação sobre emissões utilizando o mesmo modelo do estudo de Paltsev et al. (2008). Os autores concluem que os níveis de alíquotas de impostos ao carbono propostos não devem provocar reduções pronunciadas nas emissões. A inclusão de outros GEEs além do dióxido de carbono (CO_2) no esquema de tributação permite reduzir os custos de emissão. Por fim, afirmam que a escolha entre impostos às emissões ou mercados de carbono deve ser feita de acordo o critério de custo-efetividade, uma vez que ambas as abordagens (ou uma combinação delas) podem ser igualmente eficientes para a redução de emissão de GEEs.

Jacoby et al. (2009) investigam tanto as políticas de mercados de carbono como as de tributações sobre emissões, propondo que suas análises devem ajudar a ter uma visão sobre os desafios a serem enfrentados. Os autores aplicam o modelo EPPA sob um cenário de redução de 50% de emissões entre 2000 e 2050, meta a qual o G8 se propusera. Chegam à conclusão de que, sem a participação quase universal dos países, tal nível de redução não pode ser atingido, considerando a projeção de crescimento econômico de todas as regiões do mundo. Outra conclusão obtida é de que regras de redução simples não podem conciliar as circunstâncias de diferentes países, uma vez que os resultados podem ser perversos em termos da distribuição da renda mundial, com países em desenvolvimento com custos substancialmente elevados em relação a países ricos. Sob condições ideais em que os países desenvolvidos dividissem as responsabilidades da mitigação, os custos de bem

estar para os países desenvolvidos representaria cerca de 2% do PIB em 2020 e 10% em 2050.

Em um estudo mais recente, Paltsev et al. (2009) retomam o estudo de Paltsev et al. (2008), atualizando hipóteses econômicas, tecnológicas e de políticas para melhor refletir o cenário de opções tecnológicas futuras. As atualizações permitem concluir que as incertezas tecnológicas, apesar de terem grande efeito sobre o mix de tecnologias a serem desenvolvidas sob uma política de redução de emissões, afetam apenas moderadamente o preço das permissões de GEEs e o custo de se atingir as metas de reduções em emissões. Ainda, a forma de implementação da política importa, ou seja, se a credibilidade da meta para longo prazo for fraca, os preços e os custos em bem-estar serão consideravelmente afetados.

Os estudos comentados anteriormente possuem em comum o uso da modelagem quantitativa para o estudo empírico de impactos de políticas de mitigação das mudanças climáticas. Apesar de não ser exaustiva, a relação de estudos aqui apresentadas demonstra a importância dos mesmos em apresentar estimativas dos impactos de medidas redução de gases de efeito estufa e o contínuo desenvolvimento do tema. Apresentar-se-á em capítulos posteriores outros estudos que tratam mais especificamente dos aspectos de modelagem que serão investigados no presente trabalho.

1.3 Literatura Nacional sobre o Tema

No Brasil, a literatura sobre estudos econômicos de mudanças climáticas e políticas de mitigação é relativamente nova e vem desenvolvendo-se rapidamente. Alguns trabalhos trazem análises e reflexões qualitativas em torno das discussões sobre o papel do Brasil e da política ambiental nas discussões sobre mudança climática bem como no Protocolo de Quioto (VIOLA, 2002, 2004; DINIZ, 2000, 2003, 2007). Outros estudos investigam as possibilidades para o setor energético brasileiro advindas dos projetos de MDL (MOREIRA; GIOMETTI, 2008) e aspectos quantitativos e estimativas de potenciais e impactos de créditos de carbono na região amazônica ligados ao REDD (DIAZ; SCHWARTZMAN, 2005).

Em relação às estimativas de emissões e impactos ambientais, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos no Brasil, porém não diretamente relacionados às

discussões em torno das mudanças climáticas. Entre eles pode-se citar Seroa da Motta (2005), que estimou os impactos ambientais das indústrias brasileiras em cenários de acordos comerciais e Guilhoto, Lopes e Seroa da Motta (2002), que avaliaram possíveis impactos ambientais e regionais do crescimento da economia. Em outro estudo, Hilgemberg e Guilhoto (2006) quantificaram emissões de gás carbônico (CO_2) pelas indústrias brasileiras, utilizando um modelo de insumo-produto.

Tourinho, Seroa da Motta e Alves (2003) também investigaram os volumes de emissão de CO_2 para a economia brasileira. Ainda, implementaram um experimento de redução das emissões industriais de CO_2 através de diferentes níveis de impostos às emissões de carbono. O trabalho mostrou que, com a adoção das políticas, houve uma redução no nível de recursos de setores mais intensivos em emissões para setores menos intensivos, com alterações nos níveis de preços acompanhando esta tendência.

Lopes (2003), por sua vez, desenvolveu um modelo de equilíbrio geral para avaliar a economia brasileira no caso de adoção de impostos às emissões de GEEs no país, conhecido como BR-Green. O autor conclui que os impostos às emissões permitiriam uma efetiva redução na emissão de CO_2, mas provocariam um desaquecimento na economia nacional, em especial nos setores exportadores que apresentam a maior demanda de derivados de petróleo.

Quanto aos mercados de carbono no Brasil, Rocha (2003) utilizou a abordagem do CERT (*Carbon Emission Reduction Trade*), que é um “metamodelo” baseado em informações e resultados de outros modelos, para estimar resultados da aplicação de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo no país averiguando a participação do Brasil no mercado de Certificados de Emissões Reduzidas, sem considerar os efeitos de políticas climáticas adotadas em outros países.

Ferreira Filho e Rocha (2007) também avaliaram os efeitos de impostos às emissões de GEE sobre a economia brasileira, através do modelo de equilíbrio geral MOSAICO-GEE. Os autores concluem que a aplicação de impostos às emissões seria mais eficiente no Brasil se aplicada ao nível de atividade dos setores do que se aplicada apenas ao uso de energia, uma vez que setores como agricultura e pecuária possuem grande contribuição para as emissões agregadas, não relacionadas ao uso de combustíveis fósseis.

Já Feijó e Porto Jr. (2009) analisaram os efeitos de reduções de emissão de CO_2 sugeridas pelo Protocolo de Quioto sobre a economia brasileira. Os autores construíram cenários alternativos para as reduções do gás pelos signatários do Protocolo, admitindo também a possibilidade de comércio de emissões. Utilizaram a modelagem de equilíbrio geral GTAP-E, uma versão modificada do GTAP (*Global Trade Analysis Project*). Os autores concluíram que há um dilema econômico entre eficiência alocativa e meio-ambiente limpo. Entre os cenários considerados, a melhor posição estratégica do Brasil seria participar diretamente do processo de redução de emissões.

Silva (2010) utilizou o modelo EPPA para estimar os impactos da implementação de metas de redução de gases de efeito estufa pelo Brasil, incluindo explicitamente a redução das emissões por desmatamento. O autor conclui que uma expressiva redução nas emissões brasileiras pode ser atingida com pequenos impactos negativos sobre o crescimento econômico do país e o bem-estar agregado.

Lima (2011), por sua vez, procurou mensurar como políticas climáticas em países desenvolvidos afetariam a economia brasileira, utilizando também o modelo EPPA. Os resultados encontrados pela autora sugerem que o Brasil se tornaria o principal fornecedor de biocombustíveis avançados para os países implementando políticas de reduções de gases de efeito estufa, o que traria consequências positivas para o mundo. Contudo, os impactos para o bem-estar do país poderiam ser negativos, devido ao desvio de recursos primários de outros setores da economia para a produção de biocombustíveis em larga escala e deterioração dos termos de troca.

Quanto aos impactos das mudanças climáticas sobre a economia brasileira, o estudo Economia da Mudança do Clima no Brasil (MARGULIS; DUBEUX, 2010) buscou mensurar tais impactos através da integração de diferentes modelos, ao estilo dos exercícios de avaliação integrada. O núcleo central do sistema de modelagem foi o modelo de equilíbrio geral EFES. Os resultados do estudo revelaram que os impactos da mudança do clima na economia brasileira levarão a uma perda acumulada no período de 2008 a 2050 entre 0,7 a 1,5 vezes o equivalente ao PIB de 2008, com mudanças na distribuição regional da agricultura e possíveis aumentos nas disparidades regionais.

Os trabalhos comentados mostram que a literatura nacional vem desenvolvendo-se rapidamente no uso de modelos quantitativos para a avaliação das questões climáticas relacionadas ao Brasil. O presente trabalho pretende contribuir com essa

literatura no sentido de desenvolvimento da modelagem dinâmica para avaliação quantitativa de políticas climáticas, considerando as abordagens alternativas dinâmico-recursiva e de otimização intertemporal, sem, contudo, analisar o caso brasileiro em particular.

2. O MODELO EPPA

Apresenta-se aqui uma descrição do modelo que se pretende utilizar no presente estudo, o *Emissions Prediction and Policy Analysis* (EPPA) *Model* (PALTSEV et al., 2005). O modelo EPPA é um modelo dinâmico recursivo de equilíbrio geral computável desenvolvido para o estudo de políticas climáticas. O modelo EPPA tem sido empregado em diversos estudos relacionados às mudanças climáticas e apresenta-se documentado em detalhes em Paltsev et al. (2005) na sua 4ª versão. Pretende-se utilizar a versão mais atual do modelo (versão 5), detalhando-se no decorrer do texto os avanços desta versão. Por tratar-se de um modelo de equilíbrio geral, inicia-se com uma breve apresentação dessa classe de modelos econômicos, com enfoque para a aplicação no tema de políticas climáticas.

2.1 Modelos computáveis de equilíbrio geral para o estudo de políticas climáticas

A presente pesquisa propõe investigar efeitos de políticas de redução de gases de efeito estufa a partir de um modelo econômico quantitativo. Escolheu-se a modelagem computável de equilíbrio geral (CGE), que utiliza a teoria econômica de equilíbrio geral como uma ferramenta operacional em análises de orientação empírica sobre questões relacionadas a economias de mercado, como alocação de recursos, fluxos comerciais, mudança tecnológica, distribuição de renda, entre outras.

Shoven e Whalley (1998) destacam os modelos de equilíbrio geral como aqueles representados pelas interações entre múltiplos agentes que buscam a otimização individual e interagem através dos mercados de bens e fatores de produção. O equilíbrio em um modelo desta classe é obtido quando todas as variáveis endógenas (preços e quantidades) ajustam-se de forma que os agentes não podem melhorar

sua situação alterando seu comportamento. Dessa forma, oferta e demanda se igualam em todos os mercados, firmas sob retornos constantes à escala auferem lucros normais e despesas dos agentes se ajustam às suas receitas. Sadoulet e De Janvry (1995) descrevem as aplicações deste tipo de modelagem no exame dos efeitos diretos e indiretos advindos de alterações nas políticas públicas, como choques tarifários, modificações nas alíquotas de impostos e, ou, subsídios e mesmo alterações de natureza tecnológica. Desde a década de 1990, tal modelagem vem sendo utilizada também para análises de políticas ambientais e de alocação de recursos naturais.

Modelos computáveis de equilíbrio geral determinam endogenamente preços e níveis de produção relativos. Dessa forma, são úteis em elucidar alocações de recursos de equilíbrio e trajetórias de crescimento, ao invés de ciclos de negócios ou fenômenos em desequilíbrio. A aplicação de modelos de equilíbrio geral é justificada quando se espera que medidas ou políticas exógenas sejam capazes de gerar efeitos de equilíbrio geral na economia. Esse é o caso de políticas de controle de emissões de gases de efeito estufa, que apresentam um alcance amplo em termos de dimensões geográficas (diversas regiões e países do globo) e econômicas (diversos setores e agentes da economia), com efeitos consideráveis esperados na alocação de recursos nas economias regionais, nacionais e global.

Modelos representando uma economia real complexa são úteis em auxiliar na identificação de efeitos de equilíbrio geral advindos das mudanças exógenas, que não seriam facilmente percebidos ou identificados a *priori*, independentemente do conhecimento ou certeza em torno de parâmetros chaves. Mesmo que exista elevado grau de incerteza em torno dos valores de parâmetros do modelo, o uso de modelos de equilíbrio geral permite concluir sobre direções e magnitudes relativas dos choques exógenos, bem como uma comparação consistente e ordenamento de resultados de cenários alternativos. Por vezes, o processo de entendimento e explicação dos resultados dos modelos permite identificar as relações relevantes entre setores e agentes econômicos por trás do processo estudado, que não seriam possíveis de ser identificadas em modelos teóricos ou analíticos.

Para o estudo de políticas que lidam com a redução dos gases de efeito estufa é necessário a representação detalhada dos fenômenos econômicos geradores desses gases, quais sejam: o consumo e produção de energia e as atividades agrícolas e de mudanças no uso da terra. Deve-se representar, em particular, a

possibilidade de substituição entre diferentes fontes de energia, renováveis e fósseis, e a relação física entre quantidades dos diferentes tipos de gases emitidos e as quantidades de energia produzida/consumida. A dinâmica temporal da economia também é importante, uma vez que as políticas e medidas de controle procuram, em última instância, a estabilização de concentrações de gases ou reduções gradativas de emissões por várias décadas seguidas.

Outro aspecto importante das análises de políticas de redução de gases de efeito estufa diz respeito à capacidade e necessidade de representação dos benefícios associados à redução das emissões. Dentro desse aspecto, as análises de políticas climáticas podem ser classificadas em dois grupos distintos: custo-benefício e custo-efetividade. Análises de custo-benefício necessitam representar os benefícios ambientais de reduções em poluentes em valores monetários. Tais benefícios são teoricamente simples de serem incorporados, contudo, carecem da formulação de funções que convertam emissões em danos ou em benefícios ambientais físicos, cujo escopo exige conhecimentos das ciências naturais que fogem ao alcance da economia, e ainda funções que definam o valor monetário das mudanças físicas no meio-ambiente.

As dificuldades e controvérsias em estimar ambos os conjuntos de funções, bem como a falta de consenso nos resultados de tais estimativas em termos de avaliação adequada dos efeitos ambientais de níveis de concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, têm incentivado o uso do outro tipo de abordagem em análises que procuram orientar as decisões políticas, a análise de custo-efetividade. Tal abordagem ignora os possíveis benefícios ambientais, procurando mensurar apenas os custos de objetivos ambientais determinados pelas políticas domésticas ou acordos internacionais de reduções de emissões, ignorando dessa forma as incertezas por trás das funções de benefícios ambientais.

Como discutido por Manne e Richels (1995), o enfoque de custo-efetividade é estimulado pela UNFCCC, na medida em as políticas e medidas para enfrentamento das mudanças climáticas devem ser efetivas no sentido de assegurar o menor custo possível para a estabilização das concentrações de gases de feito estufa em níveis pré-determinados. Tais níveis são estipulados com base no conhecimento científico sobre riscos e danos das mudanças climáticas para a humanidade. No presente estudo opta-se pelo enfoque da UNFCCC de análises de custo-efetividade, em que objetivos de políticas de redução de gases são escolhidos e os custos de se atingir

tais objetivos são determinados pelos modelos, sem considerar, contudo, os possíveis benefícios ambientais traduzidos em valores econômicos. Essa escolha reconhece a dificuldade e falta de consenso na mensuração monetária dos benefícios ambientais.

Quanto às limitações dos exercícios de modelagem, os modelos de equilíbrio geral são construídos a partir da teoria econômica para a representação e entendimento dos impactos de políticas na alocação e equilíbrio de recursos e preços relativos de bens e fatores produtivos. Como tal, as estimativas de custos das políticas de mitigação de mudanças climáticas em modelos de equilíbrio geral devem ser consideradas com cautela e senso crítico quanto à capacidade de serem extrapolados para os eventos reais da economia. A utilização dos resultados do modelo para recomendações de políticas deve basear-se nas direções dos resultados observados e magnitudes relativas, bem como no entendimento dos mecanismos e pressuposições do modelo que geram os resultados observados.

Deve-se ressaltar que diversos aspectos influenciam os resultados de políticas climáticas em estudos quantitativos. Como destacado por Weyant (2001), os principais fatores que afetam os resultados são: a definição do cenário de referência e projeção de emissões na ausência de políticas e medidas de controle; o cenário de política considerado; a representação das possibilidades de substituição nos processos produtivos e no consumo; as pressuposições sobre custos de tecnologias alternativas e de quando se acredita que essas estarão disponíveis, bem como as taxas de penetração das mesmas. Esses fatores indicam a necessidade de extensivas análises de sensibilidade nos estudos de equilíbrio geral aplicados às mudanças climáticas, como os desenvolvidos por Webster et al. (2003).

2.2 O Modelo EPPA

Na presente pesquisa utiliza-se o modelo conhecido como *Emissions Prediction and Policy Analysis* (EPPA) *Model* (PALTSEV et al., 2005), desenvolvido pelo *MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change*. Tal modelo vem sendo amplamente utilizado para o estudo de aspectos ligados à agricultura, energia e

políticas climáticas[3]. O modelo EPPA é dinâmico recursivo, multi-regional e multi-setorial.

Os dados econômicos que alimentam o modelo são formados principalmente por matrizes de contabilidade social e de insumo-produto que representam as estruturas das economias das regiões, provenientes do *Global Trade Analysis Project* - GTAP (HERTEL, 1997; DIMARANAN; MCDOUGALL, 2002; NARAYANAN; WALMSLEY, 2008), um banco de dados consistente sobre consumo macroeconômico regional, produção e fluxos de comércio bilateral. Dados sobre produção e uso de energia em unidades físicas são provenientes tanto da base de dados do GTAP quanto da Agência Internacional de Energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA, 1997, 2004a, 2005). Já as estatísticas sobre os gases de efeito estufa (dióxido de carbono, CO2; metano, CH4; óxido nitroso, N20; hidrofluorcarbonos; HFCs; perfluorcarbonos, PFCs; e hexafluoreto de enxofre; SF6) foram obtidos de inventários mantidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Informações sobre outros poluentes urbanos (dióxido sulfúrico – SO2; óxidos de nitrogênio – NOx, carbono negro – BC, carbono orgânico – OC; amônia – NH3; monóxido de carbono – CO, e compostos orgânicos voláteis não-metano – VOC) foram obtidas junto ao banco de dados desenvolvido por Olivier e Berdowski (2001).

Considerando o foco do modelo EPPA no estudo de políticas climáticas, este utiliza informações adicionais para desagregar os setores do GTAP de forma a distinguir o transporte comercial do transporte de passageiros em automóvel próprio, o setor de geração de eletricidade para representar tecnologias correntes (como hidroelétrica, nuclear e fóssil) e fontes alternativas (como eólica, solar e biomassa) não usadas extensivamente, mas com potencial de oferta em larga escala no futuro, e de políticas nos mercados de energia. Para representar tais tecnologias, informações do tipo “bottomp-up” sob parâmetros de engenharia são consideradas (PALTSEV et al., 2005).

---

[3] Algumas aplicações do modelo incluem Babiker, Metcalf e Reilly (2003), Reilly e Paltsev (2006), US CCSP (2007), Gurgel, Reilly e Paltsev (2007), Jacoby et al. (2009) e Paltsev et al. (2008, 2009). Diversos outros estudos que usam o modelo EPPA foram citados e, ou, comentados na revisão bibliográfica.

O modelo simula a evolução da economia mundial em intervalos de cinco anos entre 2000 e 2100. Funções de produção para cada setor da economia descrevem as combinações de capital, trabalho, terra, energia e insumos intermediários para gerar os bens e serviços. O consumo é representado pela presença de um consumidor representativo em cada região que busca a maximização do seu bem-estar pelo consumo de bens e serviços. A representação da habilidade dos indivíduos em realizar escolhas entre diferentes insumos e bens, tanto na produção quanto no consumo, é fundamental no modelo EPPA. Para os setores, isso reflete a tecnologia utilizada, ou seja, a possibilidade de substituir diferentes fatores produtivos e insumos intermediários no processo produtivo. Para o consumidor representativo, a substituição entre bens e serviços ilustra as preferências dos consumidores. Tais escolhas são determinadas pelos parâmetros de elasticidades de substituição nas funções de produção e de utilidade do consumidor.

A evolução do modelo no tempo é baseada em cenários de crescimento econômico resultantes do comportamento de consumo, poupança e investimentos, além de pressuposições exógenas sobre o aumento da produtividade do trabalho, da energia e da terra. O crescimento na demanda por bens e serviços produzidos por cada setor, incluindo alimentos e combustíveis, ocorre à medida que a renda e o produto aumentam. Os estoques de recursos limitados, como combustíveis fósseis, diminuem à medida que estes são utilizados, forçando o aumento no custo de extração e beneficiamento dos mesmos. Setores que usam recursos renováveis, como a terra, competem pela disponibilidade de fluxos de serviços fornecidos pelos mesmos. Todos esses fenômenos, aliados às políticas simuladas, como impostos e subsídios ao uso de energia, controle nas emissões de poluentes e imposição de mandatos de percentuais mínimos de misturas de combustíveis, determinam a evolução das economias e alteram a competitividade e participação das diferentes tecnologias ao longo do tempo e entre cenários alternativos. O desenvolvimento ou declínio de uma tecnologia em particular é determinado de forma endógena, de acordo com a competitividade relativa do mesmo.

O modelo fornece estimativas e previsões sobre o crescimento do Produto Interno Bruto nos países e regiões, consumo agregado e produção setorial, consumo e produção de energia em unidades físicas, preços de bens e serviços, fluxos comerciais, emissões de gases de efeito estufa e de outros poluentes, e custos econômicos das políticas simuladas.

O modelo EPPA é construído como um problema de complementaridade não-linear em linguagem de programação GAMS (*General Algebraic Modeling System*, BROOKE et al., 1998), utilizando a syntax do algoritmo MPSGE (*Modeling Programing System for General Equilibrium*), desenvolvida por Rutherford (1999a). O MPSGE constrói equações algébricas que caracterizam as condições de lucro econômico zero para a produção, equilíbrio entre oferta e demanda nos mercados de bens e fatores de produção e equilíbrio entre renda e despesas para os consumidores.

2.2.1 Agregação do modelo EPPA

A principal fonte de dados para construção do EPPA, como mencionado, é oriunda da base de dados do GTAP (HERTEL, 1997; DIMARANAN; MCDOUGALL, 2002; NARAYANAN; WALMSLEY, 2008), em sua versão 7. A base de dados do GTAP7 apresenta matrizes de insumo-produto para 113 países e regiões do mundo e 57 setores de suas economias, com representação consistente da produção, consumo, fluxos bilaterais e medidas de proteção comercial. Ainda, inclui a representação detalhada dos mercados de energia em unidades físicas. O GTAP foi construído na linguagem de programação conhecida como GEMPACK (HARRISON; PEARSON, 1996), enquanto o EPPA utiliza a plataforma do GAMS (BROOKE et al., 1998). Para tal, os dados do GTAP são convertidos e rearranjados a partir do programa GTAPinGAMS (RUTHERFORD; PALTSEV, 2000).

A versão do modelo a ser utilizada no presente estudo é a quinta versão do EPPA, calibrada para o ano base de 2004, sendo resolvido de forma endógena para o ano de 2005 e após, a cada cinco anos. No EPPA5 os dados do GTAP para a economia mundial foram organizados em dezesseis países e regiões, bem como em diversos setores de produção, como apresentado na Tabela 1. O Anexo B apresenta o mapeamento da base de dados do GTAP para os setores e regiões do EPPA. Foram também representados na construção do modelo novos setores que ofertam tecnologias energéticas, considerados potencialmente relevantes no futuro, mas que ainda possuem custos muito elevados no presente (tecnologias *backstop*). O EPPA também considera a desagregação do consumo das famílias em compras de

serviços de transporte, uso de transporte próprio (automóveis particulares) e consumo de outros bens e serviços.

Tabela 1 - Agregação de regiões, setores e fatores no modelo EPPA

Regiões	Setores	Fatores
Estados Unidos (USA)	**Não Energia**	Capital
Canadá (CAN)	Agricultura - Culturas (CROP)	Trabalho
México (MEX)	Agricultura - Pecuária (LIVE)	Petróleo cru
Japão (JPN)	Agricultura - Florestal (FORS)	Petróleo xisto
União Europeia (EUR)	Alimentos (FOOD)	Carvão
Austrália & N. Zelândia (ANZ)	Serviços (SERV)	Gás natural
Federação Russa (RUS)	Químicos,borracha,plásticos,papel (CRP)	Hidráulica
Leste Europeu (ROE)	Siderurgia e metalurgia (IRON)	Nuclear
China (CHN)	Metais não ferrosos (ALUM)	Eólica & Solar
Índia (IND)	Minerais não metálicos (CIME)	Terra:
Brasil (BRA)	Outras Indústrias (OTHR)	- de culturas
Leste Asiático (ASI)	Serviços de transporte (TRAN)	- pastagens
Oriente Médio (MES)	Transporte próprio das famílias (FTRAN)	- florestal
África (AFR)	**Energia**	Florestas naturais
América Latina (LAM)	Carvão (COAL)	Pastagens natur.
Resto da Ásia (REA)	Petróleo bruto (OIL)	
	Petróleo refinado (ROIL)	
	Gás natural (GAS)	
	Eletricidade: Fóssil (ELEC)	
	Eletricidade: Hidráulica (H-ELE)	
	Eletricidade: Nuclear (A-NUC)	
	Eletricidade: Eólica (W-ELE)	
	Eletricidade: Solar (S-ELE)	
	Eletricidade: Biomassa (biELE)	
	Eletricidade: NGCC[1] (NGCC)	
	Eletricidade: NGCC – CCS[2]	
	Eletricidade: IGCC[3] – CCS	
	Gás sintético (SGAS)	
	Biocombustível (2ª geração) (BOIL)	
	Petróleo de xisto (SOIL)	
	Biocombustível (1ª geração)	

Fonte: Paltsev et al. (2005).

[1] NGCC: conversão de gás natural em eletricidade a partir de ciclo combinado de geração
[2] CCS: captura e seqüestro de carbono
[3] IGCC: tecnologia de geração de gás natural a partir do carvão pelo ciclo combinado de geração

Algumas modificações e adaptações foram introduzidas na versão do modelo utilizada na presente pesquisa, de forma a atingir os objetivos propostos. A principal modificação diz respeito à desagregação dos setores intensivos em energia, originalmente agrupados em apenas um setor. Esses setores foram desagregados nos seguintes: químicos, borracha, plásticos e papel (CRP), siderurgia e metalurgia (STEEL), de manufatura de metais não ferrosos como alumínio, zinco e cobre (ALUM) e de manufatura de minerais não metálicos como o cimento e o vidro (CIME).

2.2.2 Estrutura de equilíbrio do modelo[4]

O modelo EPPA encontra-se formulado como um Problema de Complementaridade Mista (*Mixed Complementarity Problem* – MCP), conforme descrito por Mathiesen (1985) e Rutherford (1995). O MCP é solucionado numericamente através do software *General Algebraic Modeling System*, GAMS (BROOKE et al., 1998). O problema econômico de equilíbrio geral em MCP envolve três desigualdades que precisam ser satisfeitas: lucro zero, equilíbrio dos mercados (*market clearing*) e equilíbrio ou balanceamento da renda. Essas condições de desigualdades estão associadas a um conjunto de três variáveis não-negativas, quais sejam preços, quantidades e níveis de renda.

A condição de lucro zero requer que qualquer atividade em operação obtenha lucro zero, ou seja, o valor dos insumos deve ser igual (ou maior) que o valor da produção. A variável associada a essa condição é o nível de atividade *y* para os setores de produção com retornos constantes de escala. Tal condição significa que há atividade econômica e o lucro econômico é zero, ou então não há atividade econômica, pois o lucro seria negativo. Na notação de MCP, essa condição é representada como na equação (1), que deve ser satisfeita para todos os setores de uma economia.

$$lucro \geq 0,\ y \geq 0,\ produto^T(-lucro) = 0 \qquad (1)$$

Já a condição de equilíbrio nos mercados estabelece que qualquer bem com preço positivo deve manter o equilíbrio entre oferta e demanda, e qualquer bem com excesso de oferta terá seu preço igual a zero. O vetor preço *p* é a variável associada. Utilizando a abordagem de MCP, a condição (2) deve ser satisfeita para cada bem e cada fator de produção.

$$oferta - demanda\ \geq 0;\ p \geq 0;\ p^T(oferta - demanda) = 0 \qquad (2)$$

---

[4] O Apêndice A apresenta maiores detalhes sobre a notação algébrica do modelo EPPA.

A condição de balanceamento da renda requer que, para cada agente (incluindo entidades do governo), o valor da renda deve ser igual ao valor das dotações de fatores e das receitas de impostos:

$$renda = dotações\ de\ fatores + receitas\ de\ impostos \tag{3}$$

As funções de produção e consumo utilizadas pelo modelo EPPA são caracterizadas como funções de elasticidade de substituição constante (*constant elasticity of substitution* – CES), e como tal, todos os insumos são necessários. Isso significa que, para a maioria dos mercados, as condições de MCP são satisfeitas com preços, produto, renda e consumo dos bens estritamente maiores que zero e oferta igual à demanda. Uma redução na demanda de um bem significa que o seu preço será reduzido. A exceção são aqueles bens considerados substitutos perfeitos, como algumas das tecnologias *backstop*. Seus preços e níveis de produção são nulos até que a tecnologia se torne economicamente competitiva.

O comportamento das firmas segue a formulação microeconômica de maximização do lucro. Em cada região (*r*) e em cada setor (*i*), uma firma representativa escolhe o nível de produto (*y)*, a quantidade de fatores primários (*k*) e insumos intermediários (*x*) de outros setores (*j*), para maximizar os lucros sujeito à sua restrição tecnológica. O problema da firma é dado por:

$$max_{y_{ri,}\, x_{rji,}\, k_{rfi}}\, \pi_{ri} = p_{ri}y_{ri} - C_{ri}\left(p_{ri}, w_{rf,}y_{ri}\right)\ \text{tal que}\ \ y_{ri} = \varphi_{ri(x_{rji},k_{rfi})} \tag{4}$$

em que *π* e *C* denotam as funções lucro e custo, respectivamente; e *p* e *w* são os preços dos bens e fatores, respectivamente.

No EPPA assume-se que a produção é representada por tecnologias com elasticidade de substituição constante (CES), que apresentam retornos constantes de escala. Como as funções CES geram funções de custo linearmente homogêneas pela teoria da dualidade, é possível reescrever a equação (4) em termos de funções de custo unitário e de lucro unitário. Ainda, retornos constantes de escala estão associados a lucro econômico zero para a firma no equilíbrio. Dessa forma, o comportamento otimizador da firma implica na condição de equilíbrio representada pela equação (5):

$$p_{ri} = c_{ri}(p_{ri,}w_{rf}) \tag{5}$$

em que *c* é a função de custo unitário.

Pelo Lema de Shephard, a demanda intermediária pelo bem *j* no setor *i* é dada pela equação (6),

$$x_{rji} = y_{ri}\frac{\partial c_{ri}}{\partial p_{rj}} \tag{6}$$

enquanto a demanda pelo fator *f* é dada pela equação (7).

$$k_{rfi} = y_{ri}\frac{\partial c_{ri}}{\partial w_{rf}} \tag{7}$$

Quanto ao comportamento dos domicílios, um agente representativo em cada região possui dotações de fatores de produção, cujos serviços podem ser vendidos às firmas. Em cada período, o agente representativo escolhe os níveis de consumo e poupança que maximizam sua função de utilidade sujeita à restrição orçamentária para o nível de renda *M,* como no problema representado em (8):

$$max_{d_{ri,}s_r} W_{ri}(d_{ri,}s_r) \text{ tal que } M_r = \sum_f w_{rf}K_{rf} = p_{rs}s_r + \sum_i p_{ri}d_{ri,} \tag{8}$$

em que: *s* é a poupança, *d* é a demanda final por mercadorias e *K* é a dotação agregada de fatores do agente representativo na região *r*.

Assim como a produção, as preferências também são representadas por funções CES. Pela teoria da dualidade e pela propriedade da homogeneidade linear, para cada região há uma função dispêndio unitária ou índice de preço do bem-estar que corresponde à configuração da equação (8), dada pela expressão (9).

$$p_{rw} = E_r(p_{ri,}p_{rs}) \tag{9}$$

Pelo Lema de Shephard, a demanda final compensada por bens é dada pela equação (10), enquanto para a poupança é dada pela equação (11):

$$d_{ri} = \overline{m}_r \frac{\partial E_r}{\partial p_{ri}} \tag{10}$$

$$s_r = \overline{m}_r \frac{\partial E_r}{\partial p_{rs}} \tag{11}$$

em que: $\overline{m}_r$ é o nível inicial de renda (ou despesa) em cada região.

O sistema é fechado com um conjunto de equações que determinam os preços de equilíbrio nos diferentes mercados de bens e fatores, como expresso em (12) para cada bem e (13) para cada fator primário.

$$y_{ri} = \sum_j y_{rj} \frac{\partial C_{rj}}{\partial p_{ri}} + \overline{m}_r \frac{\partial E_r}{\partial p_{ri}} \tag{12}$$

$$K_{rf} = \sum_j y_{rj} \frac{\partial C_{rj}}{\partial w_{rf}} \tag{13}$$

2.2.3 Estruturas das Funções de Produção

As tecnologias de produção no modelo EPPA são representadas por funções CES com diversos níveis de desagregação, através de estruturas aninhadas que permitem apresentar maiores possibilidades de substituição de insumos, principalmente energéticos. Ainda, permite a flexibilidade na escolha das elasticidades de substituição e em particular, no que diz respeito aos combustíveis e eletricidade, e aquelas elasticidades cujas emissões e custos de abatimento são especialmente sensíveis. As elasticidades de substituição usadas no modelo são apresentadas na Tabela 2.[5]

Uma estrutura das funções CES aninhadas comum entre os setores de serviços (SERV), transportes (TRAN), intensivos em energia (CRP, IRON e EINT) e outras indústrias (OTHR) é apresentada na Figura 1. Insumos intermediários são considerados complementares perfeitos (Leontief), juntos com uma cesta de capital-trabalho-energia (KLE), que por sua vez consiste em uma agregação de valor adicionado e energia. Um único ramo de combinação para combustíveis fósseis

[5] Análises de sensibilidade dos parâmetros do EPPA foram conduzidas por Webster et al. (2002) e Cossa (2004). As elasticidades utilizadas no EPPA foram baseadas em extensa revisão de literatura e consulta a especialistas, como descrito em Cossa (2004).

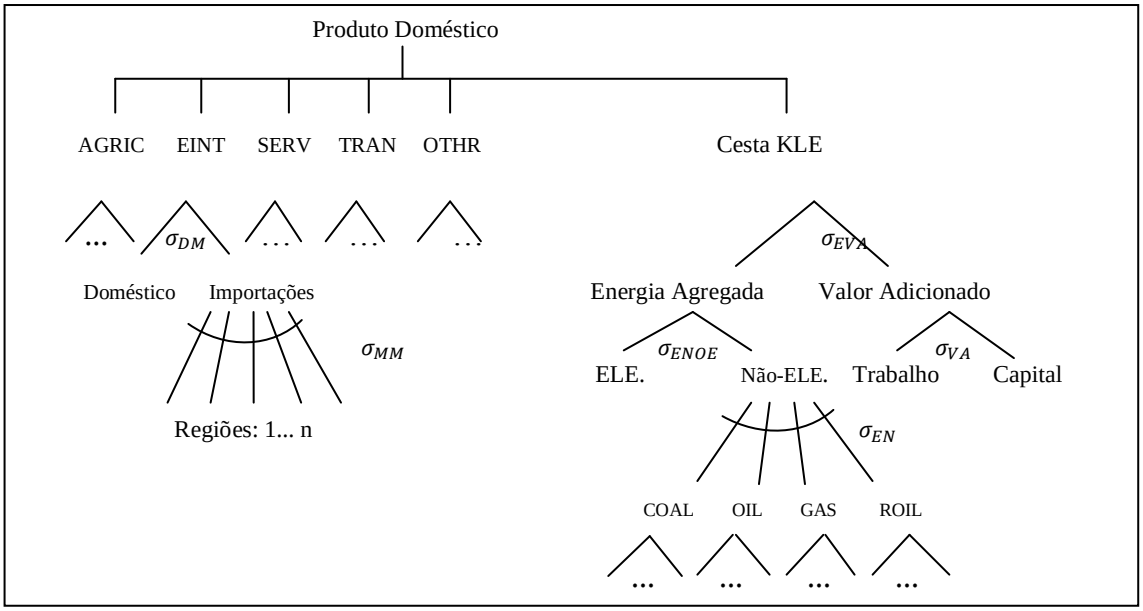
(carvão, petróleo e gás) e petróleo refinado aparenta limitar a flexibilidade. Contudo, como petróleo bruto não é utilizado diretamente em nenhum setor, exceto na produção de petróleo refinado, bem como carvão é utilizado expressivamente apenas no setor de produção de bens intensivos em energia (EINT) em muitos países, a elasticidade σ_{EN} é importante em determinar a substituição entre ROIL e GAS, permitindo flexibilidade entre esses insumos. No setor de transporte, em que a maior parte da energia é proveniente do setor de petróleo refinado (ROIL), a elasticidade σ_{EVA} entre o agregado energético e o valor adicionado é mais importante, o que significa que há pouca possibilidade de substituição direta entre eletricidade, gás e produtos do petróleo.

Tabela 2 - Elasticidades de substituição utilizadas nos setores produtivos no Modelo EPPA.

Símbolo	Descrição	Valor	Comentários
σ_{EVA}	Energia - valor adicionado	0,4 - 0,5	Aplicado na maior parte dos setores, 0,5 para EINT, OTHR
σ_{ENOE}	Eletric.- combustíveis agregados	0,5	Todos os setores
σ_{EN}	Entre combustíveis	1,0	Todos os setores exceto ELEC
σ_{EVRA}	Energia/materiais/terra-valor adic.	0,7	Aplicado somente em AGRI(1)
σ_{ER}	Energia/materiais- terra	0,6	Aplicado somente em AGRI
σ_{AE}	Energia – materiais	0,3	Aplicado somente em AGRI
σ_{CO}	Carvão-petróleo	0,3	Aplicado somente em ELEC
σ_{COG}	Carvão/petróleo-gás	1,0	Aplicado somente em ELEC
σ_{VA}	Trabalho-capital	1,0	Em todos os setores
σ_{GR}	Recursos - todos outros insumos	0,6	Aplicado em OIL, COAL,GAS
σ_{NGR}	Recursos Nucleares – valor adicionado	0,04 - 0,4	De acordo com a região
σ_{DM}	Doméstico – importados (Armington)	2,0 – 3,0 0,3	De acordo com o bem Eletricidade
σ_{MM}	Entre importações de diferentes regiões (Armington)	5,0 4,0 6,0 0,5	Bens não energéticos Gás, carvão ROIL Eletricidade

Fonte: Paltsev et al. (2005).

É importante destacar a estrutura aninhada para os bens importados. As importações de um determinado bem com origem em diferentes regiões são primeiramente combinadas como bens Armington sob a elasticidade σ_{MM}, ou seja, bens da mesma indústria provenientes de diferentes regiões são considerados substitutos imperfeitos, e posteriormente, o agregado de importados é combinado com a produção doméstica do mesmo bem, sob a elasticidade σ_{DM}, de forma a criar uma cesta de bens ofertados dentro da região.



Fonte: Paltsev et al. (2005).

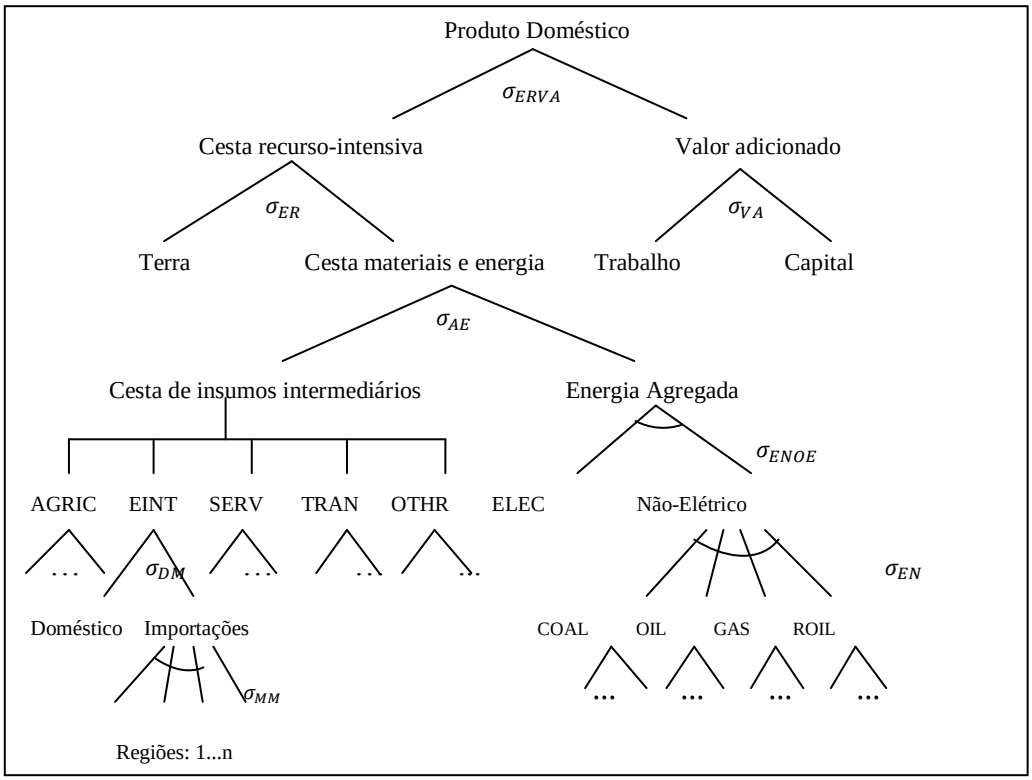
Figura 1 - Estrutura aninhada dos setores de serviços, transporte, intensivos em energia e outras indústrias

O modelo EPPA considera a desagregação do setor de transporte em duas atividades: o setor de transporte industrial (TRAN) e o setor de transporte das famílias, que consiste em uso de veículo próprio combinado com gastos de combustíveis, seguros e manutenção. O setor TRAN fornece serviços de transporte para os demais setores, bem como para as famílias, na forma de serviços de transporte aéreo, ferroviário, rodoviário e hidroviário.

A árvore tecnológica para os setores da agricultura (CROP, LIVE e FORS) é representada na Figura 2, a qual possui uma estrutura aninhada distinta dos demais setores, pois inclui a terra explicitamente e apresenta uma possibilidade de substituição entre terra e uma cesta de materiais e energia. Como o fator de produção terra é um insumo específico para a agricultura, a estrutura aninhada para este setor permite a possibilidade de substituição entre a terra e outros insumos.

A estrutura de produção para a geração de eletricidade é a mais detalhada entre os setores, como apresentado na Figura 3. Os níveis do topo da árvore tecnológica permitem o tratamento de diferentes tecnologias de geração. Dentre essas, incluem-se as tecnologias existentes nos dados do ano base (energia fóssil convencional, nuclear e hidráulica) e as tecnologias mais avançadas que não existem no ano base. Muitas dessas tecnologias avançadas entram como substitutos perfeitos para as

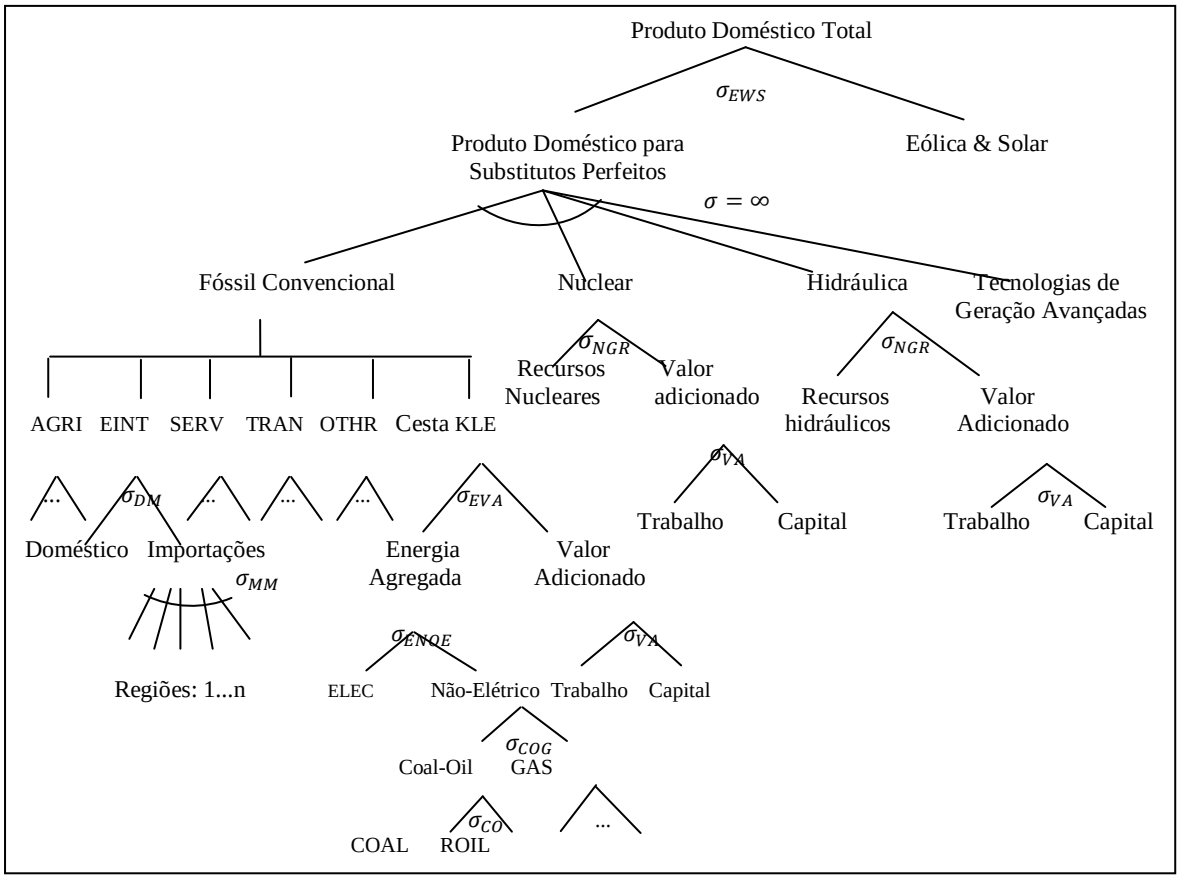
tecnologias existentes, o que significa $\sigma = \infty$ para este nível. As exceções são as energias eólica e solar, que entram no topo da árvore tecnológica, e substituem outras tecnologias controladas por σ_{EWS}. A elasticidade σ_{EWS} permite a representação de substituição limitada entre este tipo de energia elétrica e as demais, uma vez que essas são fontes intermitentes. Ainda, a elasticidade permite uma penetração gradual quando os preços de outras fontes de energia se elevam continuamente, tendendo a limitar a parcela de participação das energias eólica e solar na matriz energética.



Fonte: Paltsev et al. (2005).

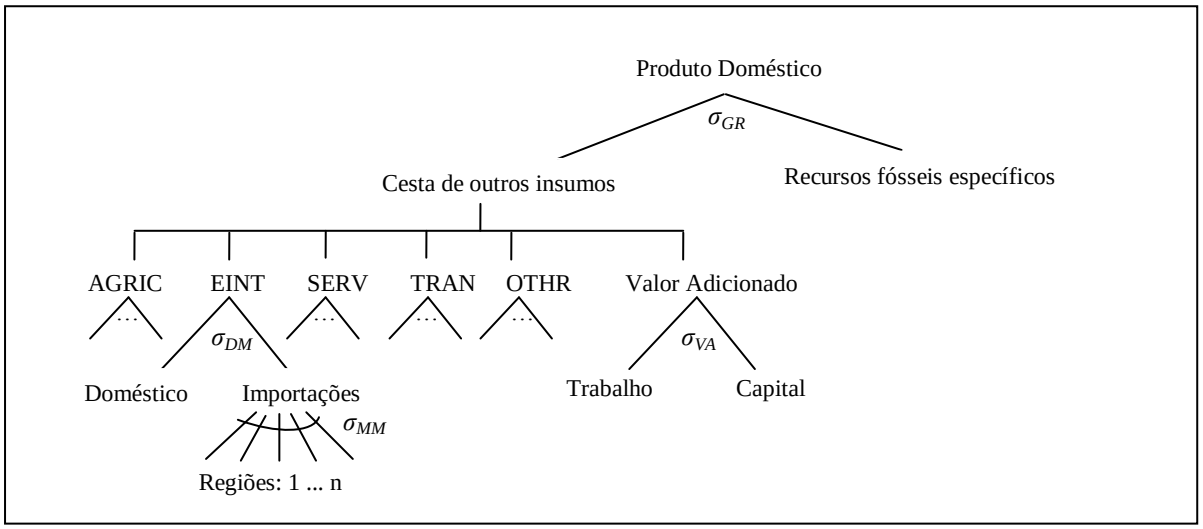
Figura 2 - Estrutura aninhada do setor agrícola

Os setores primários de energia (Figura 4) possuem uma estrutura similar ao dos outros setores da Figura 3, com exceção de que incluem os recursos fósseis específicos do setor, com a elasticidade σ_{GR} controlando a oferta do recurso de curto prazo, ou seja, a taxa de extração do recurso. Os setores também não utilizam combustíveis ou eletricidade, uma simplificação causada pela limitação de dados.



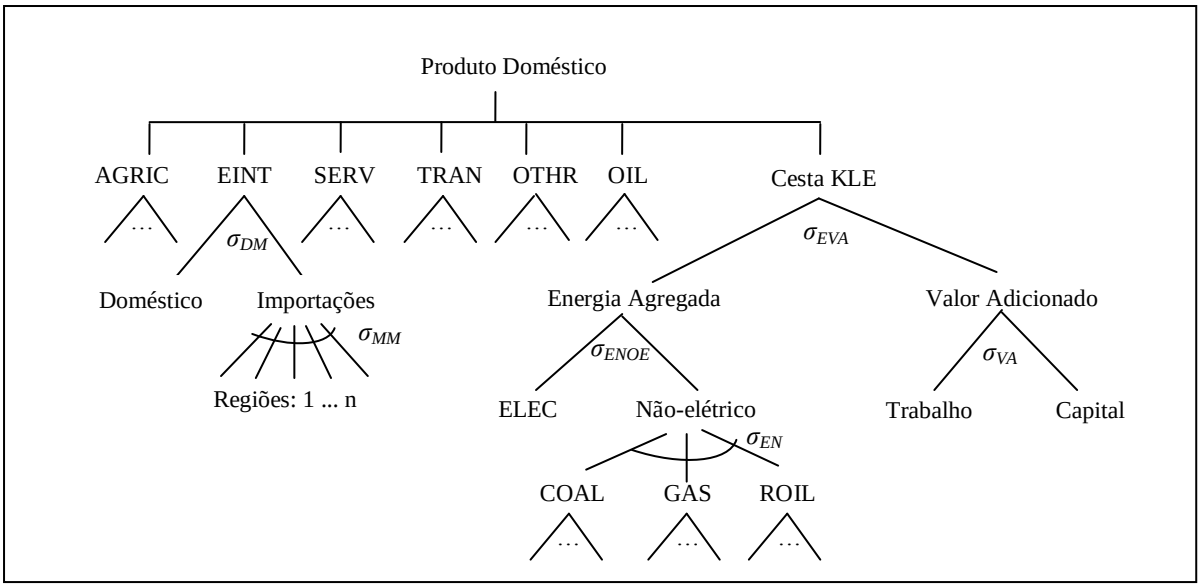
Fonte: Paltsev et al. (2005).

Figura 3 - Estrutura aninhada do setor de geração de eletricidade



Fonte: Paltsev et al. (2005).

Figura 4 - Estrutura aninhada dos setores primários de energia fóssil (carvão, petróleo e gás)



Fonte: Paltsev et al. (2005). Elaboração própria

Figura 5 - Estrutura aninhada do setor de petróleo refinado

O setor de petróleo refinado é único por considerar o petróleo como um insumo para a geração de produtos de petróleo refinado, que entra na função como um insumo intermediário complementar, e não como parte da demanda por energia (Figura 5). Essa estrutura tem por objetivo representar de forma mais apropriada políticas de emissão direcionadas à refinaria.

Por fim, as fontes de energia hidráulica e nuclear possuem estruturas mais simples, com enfoque nos recursos mais relevantes (capital e trabalho). Para estas tecnologias, os recursos têm dotações de fatores fixos específicas às regiões, que permitem representar os limites regionais de capacidade de expansão dessas tecnologias. Capital e trabalho são combinados com uma elasticidade de substituição igual a 1 (Cobb-Douglas), enquanto o valor adicionado e o fator fixo específico possuem substituição controlada pela elasticidade σ_{NGR}. Não são considerados insumos intermediários na produção dessas tecnologias.

2.2.4 Comércio Internacional

Petróleo bruto é tratado como um produto homogêneo no comércio internacional, estando sujeito a tarifas, impostos às exportações e margens de transporte. Por ser um bem homogêneo, todos os países e regiões se deparam com um único preço no

mercado mundial. Carvão, gás e petróleo refinado são considerados bens Armington, devido à diferenciação de produtos e qualidade. A pressuposição de Armington é menos adequada no caso do gás. Contudo, historicamente os mercados de gás natural têm sido nacionais ou regionais, uma vez que existem limites ao transporte por gasodutos e os preços em diferentes mercados tendem a divergir.

Todos os bens produzidos são comercializados nos mercados mundiais. O comércio de eletricidade, apesar de ser representado, é pouco comum na base de dados e apenas acontece entre regiões fronteiriças. Como as funções CES possuem como característica a tendência a preservar a parcela de participação de cada insumo, isso limita a expansão do comércio internacional de eletricidade e limita o surgimento de comércio entre regiões onde este não ocorre na base de dados, o que representa a dificuldade de instalação de linhas de transmissão fora das fronteiras de um país.

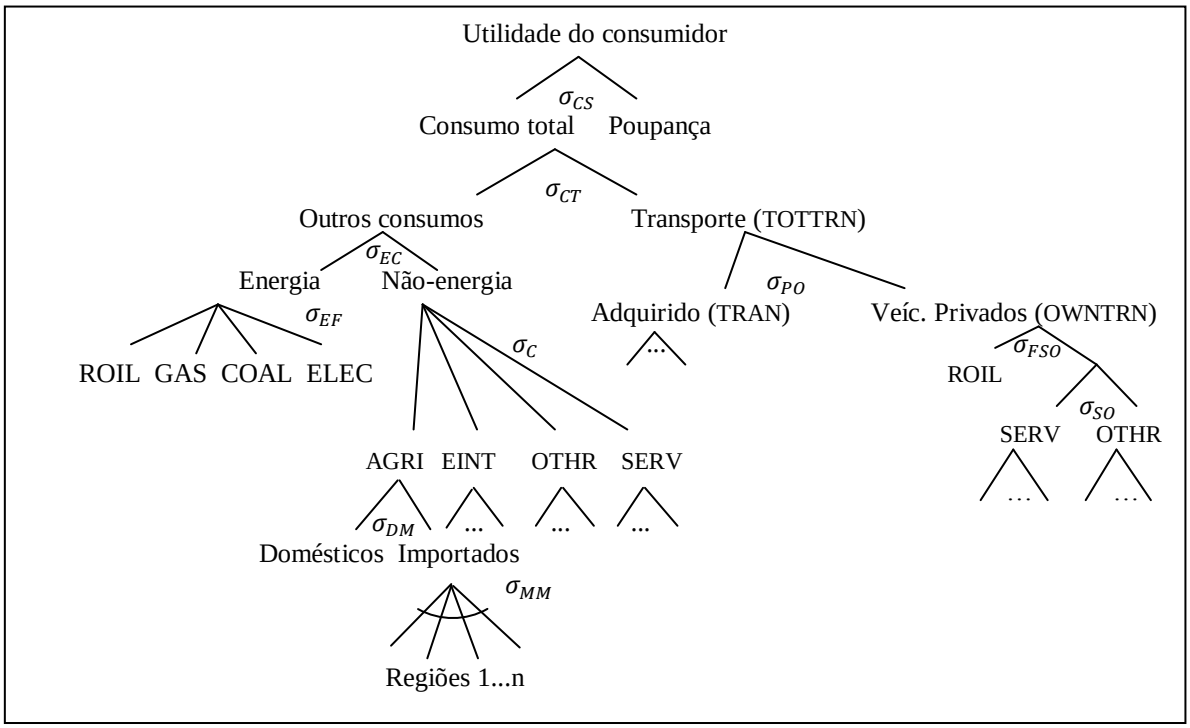
A representação de comércio na formulação de Armington permite uma representação explícita dos fluxos de comércio bilaterais, calibrados para o ano base (2004), de forma que as regiões sejam ao mesmo tempo exportadoras e importadoras de um bem em particular. No caso do modelo EPPA, em que a maioria dos bens produzidos é uma agregação de diversos bens individuais, a capacidade de representar o comércio nas duas direções é importante. Os fluxos bilaterais envolvem impostos de exportações, tarifas de importações e margens de transportes internacionais, explicitamente representadas no modelo.

2.2.5 Consumo

Assim como na produção, o modelo EPPA utiliza uma estrutura CES aninhada para descrever as preferências, conforme ilustrado na Figura 6. A poupança entra diretamente na função utilidade, o que gera uma demanda por poupança e faz com que a decisão consumo - investimento se torne endógena. Na mensuração do bem-estar, contudo, consideram-se as mudanças no consumo agregado apenas, excluindo a poupança, para evitar dupla contagem ao longo do tempo, uma vez que a poupança é transformada em investimentos, que impactam a produção e o

consumo no próximo período. A medida de bem-estar é mensurada em termos de variação equivalente Hicksiana[6] em cada período do modelo.

A estrutura aninhada considera um ramo para a energia e outro que capta o transporte das famílias. O ramo de energia exclui as compras de combustíveis para o transporte das famílias, que são tratadas explicitamente no ramo de transporte. Deve-se destacar que o consumo de serviços de transporte por parte das famílias apresenta duas formas: transporte próprio (veículos privados) e compras de transporte. As compras de transporte vêm da indústria de transportes (viagens aéreas, hidroviárias, ferroviárias, entre outros). Já a oferta própria de serviços de transporte é realizada com a utilização de insumos de outras indústrias como a compras de veículos, serviços (manutenção, seguros, estacionamento, entre outros) e combustíveis (produzido pela indústria de petróleo refinado).



Fonte: Paltsev et al. (2005).

Figura 6 - Estrutura aninhada do consumo das famílias

A Tabela 3 apresenta as elasticidades utilizadas na representação do consumo. A elasticidade entre insumos não energéticos para o consumo varia ao longo do tempo

[6] A variação equivalente Hicksiana mede a mudança na renda do consumidor necessária para que este atinja, após uma mudança em preços relativos, o nível de utilidade inicial.

e de acordo com a região, sendo uma função do crescimento da renda per capita. Da mesma forma a participação do consumo em cada período também é atualizada em função do crescimento da renda per capita entre períodos, conforme Lahiri, Babiker e Eckaus (2000). Como a função de consumo CES utilizada no EPPA é homogênea de grau um, a parcela do gasto com cada bem no consumo total permanece constante, independente das mudanças na renda. Apesar de não ser consistente com tendências de longo-prazo, a propriedade de homogeneidade das funções CES é conveniente no EPPA por simplificar a solução do modelo no algoritmo MPSGE. Para superar os limites dos retornos constantes de escala no consumo, adota-se uma abordagem de tornar as elasticidades e as parcelas de participação de bens e serviços no consumo dependentes da mudança na renda entre períodos, mas não dentro de um período. Isto mantém a homogeneidade dentro de um período consistente com retornos constantes e capta a evolução do consumo em função da renda ao longo do tempo. As mudanças em elasticidades e parcelas ao longo do tempo foram estimadas por Lahiri, Babiker e Eckaus (2000).

Tabela 3 - Elasticidades de substituição no consumo final no modelo EPPA.

Símbolo	Descrição	Valor	Comentários
σ_{EC}	Energia- outro consumo	0,25	
σ_{EF}	Entre combustíveis e eletricidade	0,4	
σ_{FSO}	Petróleo refinado (ROIL)- Serviços/Outros	0,3	Aumenta ao longo do tempo
σ_{CS}	Consumo- Poupança	0,0	
σ_{C}	Entre bens não energéticos	0,25-0,65	Valores do ano base entre os países aumentam com a renda per capita
σ_{CT}	Transporte- outro consumo	1,0	
σ_{PO}	Transporte próprio- comprado	0,2	
σ_{SO}	Serviços- Outro	0,5	

Fonte: Paltsev et al. (2005).

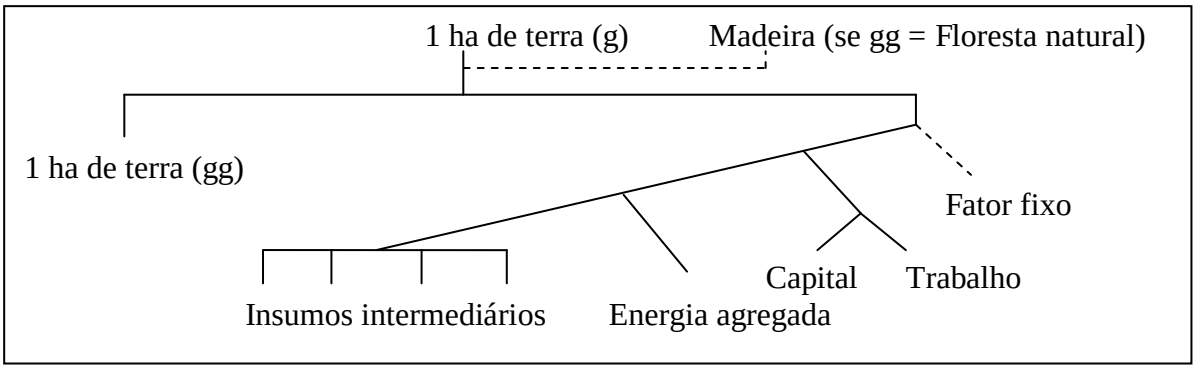
2.2.6 Representação de Mudanças no Uso da Terra

Uma sofisticação importante do modelo EPPA diz respeito à representação de mudanças no uso da terra. O uso da terra está dividido em cinco categorias: pastagens, culturas, produção florestal (áreas de silvicultura, extração vegetal e florestas plantadas), florestas naturais e pastagens naturais. Cada categoria de terra

é considerada um recurso renovável, que pode ser alterado pela sua conversão em outra categoria, ou abandonada em categoria não utilizada (vegetação secundária). A terra também está sujeita às melhorias exógenas de produtividade, estabelecidas em 1% ao ano para cada categoria, refletindo a tendência histórica de avanço na produtividade agropecuária, bem como o rendimento histórico das safras, o qual tem apresentado um crescimento de 1% a 3% ao ano, de acordo com Reilly e Fuglie (1998).

Com relação à transformação do uso da terra, a área sob determinada categoria de uso pode ser ampliada pela conversão de outras categorias de uso. Por exemplo, estradas e acessos para áreas de florestas podem ser criados, permitindo que uma área desmatada seja transformada em área de florestas plantadas, pastagens ou culturas. O sentido oposto também pode ser observado, ou seja, áreas destinadas às culturas podem ser abandonadas voltando a crescer florestas ou campos secundários.

A transformação do uso da terra é representada por equações de conversão de uma categoria de uso da terra em outra e de expansão da fronteira agrícola pela redução das áreas de vegetação natural. A Figura 7 representa o funcionamento das relações de conversão de uso da terra. Nessas relações, um hectare de determinada categoria de terra pode ser convertido em um hectare de outra categoria. A terra convertida assume uma nova produtividade média de acordo com o tipo de terra que fora convertida e a região. Em equilíbrio, o custo da conversão marginal de um tipo de terra em outro deve ser igual à diferença entre o valor econômico dos dois tipos de terra. Esse procedimento permite manter a pressuposição de lucro econômico igual a zero nos modelos de equilíbrio geral, em que a atividade econômica só se torna viável se seus custos são compensados pela receita advinda da mesma. Além disso, exige-se que a conversão utilize insumos reais através de uma função de transformação da terra, como representada na Figura 7.



Fonte: Gurgel *et al*. (2007).

Figura 7 – Estrutura das funções de conversão do uso da terra.

A linha tracejada no topo indica uma função de elasticidade de produção de coeficiente fixo, multi-produto, a qual gera um produto da indústria florestal (madeira e outros produtos florestais) quando áreas de florestas naturais são convertidas para outro uso. Esse produto é um substituto perfeito da produção do setor florestal. Utiliza-se um fator de produção fixo para modelar a resposta observada da oferta de terra, em que a elasticidade de substituição entre o fator fixo e outros insumos é parametrizada para representar a resposta observada da oferta de terra em resposta a mudanças no preço da mesma nas últimas décadas. O modelo assume que a resposta observada da conversão de terras nos últimos anos é uma representação da resposta de longo-prazo.

O valor de uso da terra no modelo representa as transações monetárias reais como inferido pelas agências de estatísticas econômicas de cada país, portanto, esse valor deve ser consistente com os dados sobre receita, custos de insumos e retornos de outros fatores. A renda da terra bem como a área no uso de culturas, pastagens e silvicultura é obtida a partir da base de dados do GTAP (HERTEL, 1997; DIMARANAN; MCDOUGALL, 2002; NARAYANAN; WALMSLEY, 2008). Para obter o valor da renda por hectare, os dados acerca das rendas agregadas precisam ser divididos pela quantidade física de terra. Como as categorias florestas naturais e pastagens naturais não são utilizadas para produção econômica, pois não estão em uso corrente, é necessário um esforço para inferir um valor econômico para essas categorias. Os dados das áreas que não produzem fluxo de renda foram obtidos da base de dados de Hurtt *et al*. (2006), como discutido em Gurgel *et al*. (2007).

2.2.7 Implementação de Políticas Climáticas no modelo

O modelo EPPA permite a incorporação de vários tipos de políticas de controle de emissões de GEEs. Pode-se incluir impostos e subsídios à produção e ao consumo de combustíveis e a outros tipos de produtos, bem como as alíquotas de impostos podem ser fixadas para representar o conteúdo de carbono para diferentes tipos de combustíveis. Também é possível definir as políticas por região, por setor produtivo ou por tipo de gás de efeito estufa.

O modelo permite também aplicar restrições quantitativas nas emissões, seja de forma independente para cada região, gerando um preço autárquico, ou permitindo o comércio internacional de créditos (ou permissões) de emissões, gerando preços globais. Nesse último caso, o comércio de permissões é contabilizado juntamente com outros fluxos de comércio e, portanto, entra como parte da balança comercial e está sujeito a hipóteses de fechamento na conta de capital. Assim, os superávits associados com vendas líquidas de permissões entram na economia exportadora e são automaticamente calculados na medida de bem-estar.

Pode-se considerar limites quantitativos ou impostos diferenciados por tipos de gases de efeito estufa ou ainda, pode-se determinar limites no total equivalente e permitir o comércio de créditos entre os diferentes gases (CO_2, CH_4, N_2O, SF_6, HFCs e PFCs). Controles de preço resultantes da solução do modelo com restrições sobre esses gases são então reportados por toneladas de gás relevante e considerando o preço em carbono equivalente. Quando o comércio de gases é permitido, uma taxa de troca entre os gases deve ser especificada[7]. Sob esta opção, o preço equivalente de carbono é o preço reportado para a restrição de carbono.

A incorporação de restrições quantitativas às emissões de gases de efeito estufa no modelo é feita através da consideração de relação complementar entre o uso do combustível fóssil gerador de emissões e a quantidade física de permissões ou créditos de emissões associada ao uso do mesmo. Isso significa que, na representação das árvores tecnológicas das Figuras 2 a 5, adiciona-se um novo

---

[7] O valor de troca, ou equivalente, entre os diferentes gases é definido com base no potencial de aquecimento global – GWP (*Global Warming Potential*) para o período de 100 anos.

insumo (créditos de emissões) que deve ser combinado com cada tipo específico de energia fóssil com elasticidade de substituição igual a zero (Leontief). A quantidade desse insumo é específica ao setor e ao combustível fóssil sendo utilizado, de forma a refletir o volume de emissões associado aos mesmos. No caso de emissões setoriais de outros gases que não estão relacionadas ao uso de combustíveis fósseis, como por exemplo, no uso de fertilizantes na agricultura, os créditos de emissões são combinados à combinação total de insumos, ou seja, ao nível mais elevado da estrutura aninhada dos setores. Elasticidades de substituição diferentes de zero são consideradas quando existem possibilidades de redução de emissões devido ao emprego de tecnologias mais limpas.

2.3 A Dinâmica do Modelo

De grande importância na caracterização dos modelos de equilíbrio geral são as pressuposições a respeito da capacidade do modelo de captar a dinâmica da economia no tempo. Nos modelos dinâmico-recursivos, como o EPPA, as decisões econômicas de otimização são realizadas a cada período considerando apenas os valores de preços e quantidades vigentes naquele período. Os resultados de equilíbrio gerados em um período são então utilizados como valores de referência para o processo de otimização do próximo período. Nesse sentido, em cada período o modelo possui um processo estático de solução, na medida em que os agentes não se preocupam com valores ou tendências futuras esperadas para as demais variáveis.

A evolução do modelo no tempo é baseada em cenários de crescimento econômico resultantes do comportamento de consumo, poupança e investimentos e pressuposições exógenas sobre o aumento da produtividade do trabalho, da energia e da terra. O crescimento na demanda por bens e serviços produzidos por cada setor, incluindo alimentos e combustíveis, ocorre à medida que o produto e a renda aumentam. Os estoques de recursos limitados, como combustíveis fósseis, diminuem à medida que estes são utilizados, forçando o aumento no custo de extração e beneficiamento dos mesmos. Setores que usam recursos renováveis, como a terra, competem pela disponibilidade de fluxos de serviços fornecidos pelos

mesmos. Todos esses fenômenos, aliados às políticas simuladas, como impostos e subsídios ao uso de energia, controle nas emissões de poluentes e imposição de mandatos de percentuais mínimos de misturas de combustíveis, determinam a evolução das economias e alteram a competitividade e participação das diferentes tecnologias ao longo do tempo e entre cenários alternativos. O desenvolvimento ou declínio de uma tecnologia em particular é determinado de forma endógena, de acordo com a competitividade relativa dessa.

Apresenta-se a seguir uma descrição mais detalhada dos processos mais influentes na evolução do modelo no tempo, que incluem o acúmulo do capital, a disponibilidade futura de tecnologias alternativas, o crescimento da força de trabalho, a evolução na intensidade de uso de energia, o esgotamento de recursos e as mudanças estruturais no consumo.[8]

2.3.1 Evolução do Capital

A representação da evolução do capital através das decisões de poupança e investimento é o fator mais importante dos modelos CGE em relação à dinâmica da economia no tempo. Nos modelos dinâmico-recursivos, poupança e investimento são baseados apenas em variáveis do período corrente, diferente dos modelos de otimização intertemporal (*forward-looking*), em que as decisões de poupança e investimentos consideram todas as condições econômicas futuras, dadas como conhecidas pelos agentes. No modelo recursivo a poupança em cada período se iguala ao investimento, que repõe a depreciação no período corrente e contribui para a formação de capital do próximo período.

Investimentos são representados no modelo através de um setor produtivo específico. Esse setor produz um nível agregado de investimentos igual ao nível de poupança determinado pela função de utilidade do agente representativo. Esse

---

[8] O Anexo C apresenta diversas tabelas com projeções do modelo EPPA para o horizonte de análise do modelo (2010 a 2050), como taxas anuais de crescimento do PIB, nível do PIB per capita, emissões de gases de efeito estufa e uso da terra no Brasil, que refletem as diferentes premissas sobre a dinâmica do modelo.

investimento agregado deve então ser utilizado por cada setor da economia como demanda setorial por investimentos (formação bruta de capital fixo mais variação de estoques), de acordo com a informação disponível nas matrizes de insumo-produto da base de dados do GTAP. A acumulação de capital é contabilizada a partir da adição dos investimentos ao estoque já existente, descontada a depreciação. A propensão marginal a poupar é mantida constante ao longo do tempo, evitando assim choques relacionados aos ciclos econômicos.

O EPPA ainda considera uma sofisticação na representação da dinâmica de uso do capital, pela distinção entre capital maleável e não-maleável. Tal representação objetiva captar a dificuldade de se converter o capital de uma atividade em fator produtivo de uso alternativo em outro setor da economia no curto prazo. Apesar de ser geralmente ignorada nos modelos dinâmico-recursivos, essa representação da rigidez de curto prazo no capital é um ponto importante nesse tipo de modelagem, uma vez que a evolução da economia ano a ano não permite a flexibilidade de se converter máquinas, equipamentos e edifícios de uma atividade em outra em curtos espaços de tempo. A ausência dessa representação faz com que os modelos assumam completa flexibilidade de reversão de qualquer investimento em capital físico para produção de bens e serviços no transcorrer de apenas um período do modelo. No caso dos setores de energia, fundamentais para o estudo dos problemas climáticos, a falta de maleabilidade do capital permite representar o longo tempo de maturação de investimentos nesse setor e a dificuldade de converter plantas e tecnologias uma vez colocadas em funcionamento.

Para representar a rigidez do estoque de capital, assume-se que a parcela maleável deste estoque em cada setor é descrita pelas funções CES apresentadas anteriormente. Isso significa que o capital pode substituir e ser substituído por outros insumos na função de produção. A parcela não maleável do capital é tratada através de uma função Leontief, que não permite a substituição entre insumos. As parcelas de capital não maleável e dos demais insumos na função de produção são definidas no momento que o capital é formado, refletindo a tecnologia vigente e em uso no momento da criação daquele capital. Essa formulação permite que o modelo apresente respostas de curto e de longo prazo a partir de mudanças nos preços relativos. Dessa forma, a possibilidade de substituição de insumos em um único período como resposta a mudanças em preços é uma combinação das

possibilidades de substituição de longo prazo (dadas pela produção advinda do emprego do capital maleável) e da ausência de substituição no curto prazo (dada pelo produto gerado a partir do uso do capital não maleável). Com o desenrolar dos anos no modelo, o capital não maleável gerado em um determinado período anterior sofrerá depreciação e será substituído por novas parcelas de capital não maleável, que refletem as tecnologias em uso nos períodos mais recentes, oriundas das mudanças em preços relativos no tempo. Quanto maior a parcela da produção setorial originada do uso de capital não maleável, menores serão as possibilidades de substituição entre insumos naquele período, assim como menor será a capacidade de conversão do capital daquele setor em capital a ser empregado em outro setor qualquer, uma vez que, o capital não maleável não pode ser realocado entre setores.

2.3.2 Disponibilidade de Tecnologias Alternativas

Um importante elemento que define a evolução dos modelos dinâmicos é a representação de tecnologias que não estão em uso atualmente (ou são usadas em pequena escala), mas que podem tornar-se disponíveis em futuro próximo. Essa forma de mudança tecnológica é fundamental nos debates de políticas climáticas, uma vez que, diversas fontes de energia limpa são conhecidas atualmente, porém, são demasiadamente caras de serem utilizadas ou ainda, são tidas como certas de tornarem-se disponíveis a preços competitivos nas próximas décadas. Essas opções energéticas, como a solar e a eólica, devem começar a ser utilizadas em maior escala quando a oferta de recursos energéticos convencionais baseados em combustíveis fósseis tornar-se mais escassa e/ou mais cara, ou quando políticas públicas que visem reduzir as emissões de poluição penalizarem as tecnologias energéticas convencionais. O momento no tempo em que essas tecnologias tornar-se-ão disponíveis, também chamado de período de entrada, depende dos custos relativos dessas em relação aos custos das fontes convencionais de energia. A Tabela 4 apresenta as opções de tecnologias avançadas representadas no modelo EPPA.

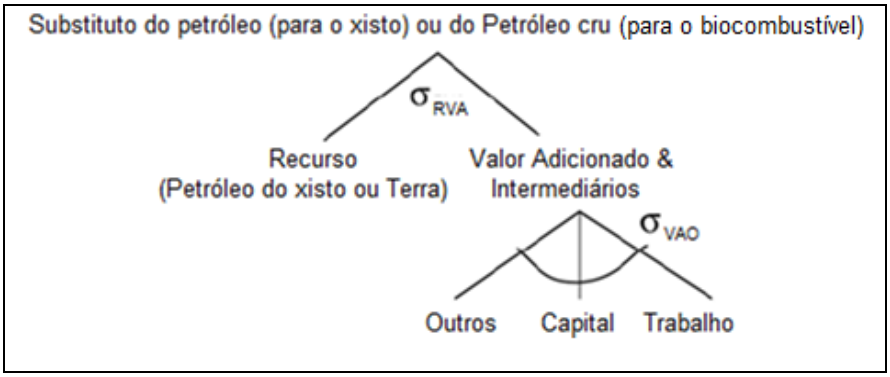
Três tecnologias produzem substitutos para os combustíveis fósseis convencionais, gás de carvão, produto de petróleo cru do xisto e combustível refinado da biomassa. Outras cinco opções tecnológicas incluem a geração de energia elétrica eólica e solar, a partir da biomassa, e de ciclo combinado de gás natural com e sem captura e sequestro de carbono. Os atributos específicos dessas tecnologias são determinados pelos parâmetros das funções CES aninhadas. A abordagem básica é similar à especificação dos outros setores da economia. As figuras 8 a 11 apresentam a estrutura de produção para cada uma dessas tecnologias. Os insumos intermediários são uma combinação de domésticos e importados como nos demais setores apresentados anteriormente.

Tabela 4 - Tecnologias alternativas disponíveis no modelo EPPA

Tecnologia	Descrição
Gaseificação de carvão	Converte carvão em um substituto perfeito para o gás natural.
Petróleo de xisto	Extrai e melhora o betume do xisto transformando-o em um substituto perfeito para o petróleo.
Bicombustível de biomassa	Converte a biomassa em um substituto perfeito para petróleo refinado (segunda geração de biocombustíveis).
Eletricidade de biomassa	Converte biomassa em um substituto perfeito para eletricidade.
Eólica e solar	Converte a energia eólica e solar intermitente em um substituto imperfeito para eletricidade.
Gás avançado	Tecnologia de geração de eletricidade baseada no ciclo combinado do gás natural (CCGN) que converte gás natural em eletricidade.
Gás avançado com sequestro e captura de carbono	Tecnologia de ciclo combinado do gás natural que captura 90% ou mais do CO_2 produzido na geração de energia.
Carvão avançado com sequestro e captura de carbono	Ciclo combinado integrado de gaseificação do carvão (CCIG) que captura 90% ou mais do CO_2 produzido na geração de energia.

Fonte: Paltsev et al. (2005).

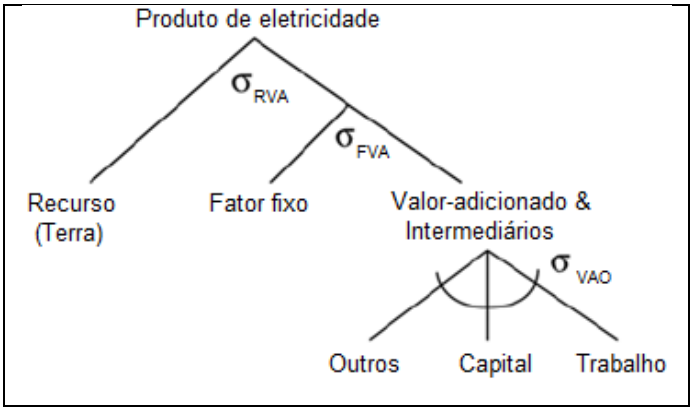
Os produtos petróleo de xisto e de biocombustível têm uma estrutura de produção parecida, conforme mostra a Figura 8. A única diferença é que o recurso específico para o primeiro é o conteúdo estimado das reservas de xisto, enquanto que para o biocombustível o insumo é a terra. Além disso, os recursos do xisto são esgotáveis, enquanto o recurso terra é considerado renovável, cuja produtividade aumenta exogenamente com o tempo.



Fonte: Paltsev et al. (2005).

Figura 8 - Estrutura da produção de petróleo de xisto e de biocombustível

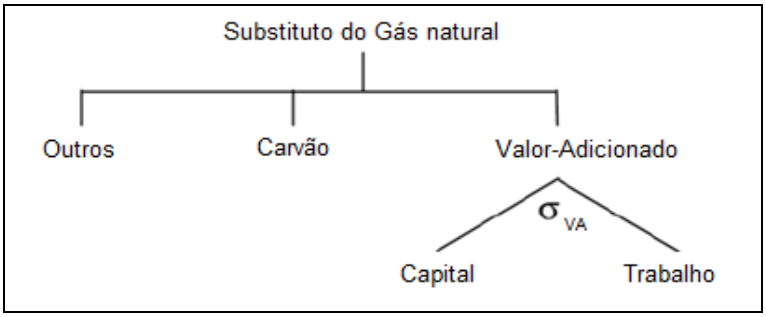
A produção de eletricidade a partir da biomassa também utiliza o fator terra, porém, sua árvore tecnológica difere daquela do setor de biocombustível por incluir um fator fixo específico que controla o ritmo de entrada desta tecnologia e limita a sua expansão a taxas maiores do que o que seria esperado na prática (Figura 9).



Fonte: Paltsev et al. (2005).

Figura 9 - Tecnologia bioelétricas e eólica & solar

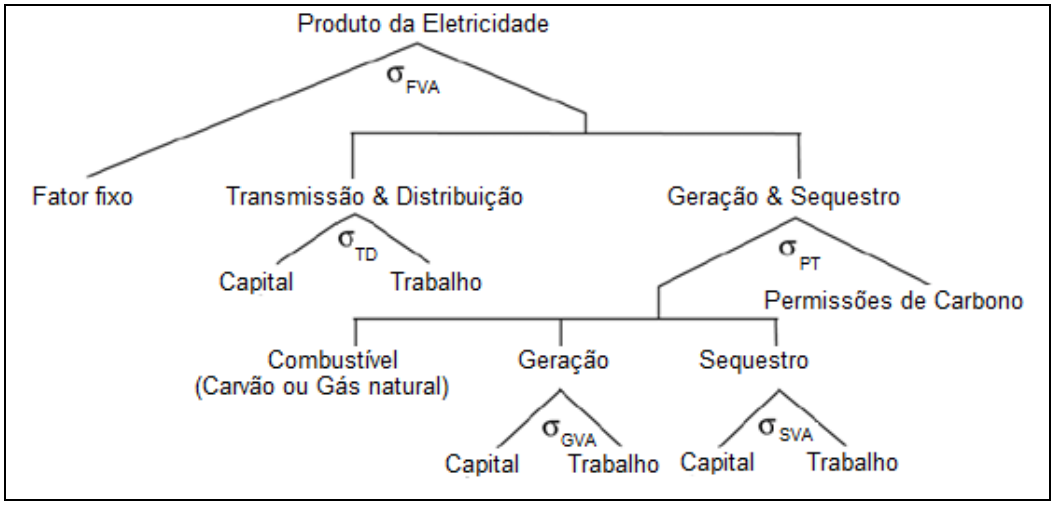
Já a tecnologia de gaseificação de carvão inclui insumos intermediários no ramo superior e a matéria-prima carvão, considerados complementares (Leontief) à cesta de valor adicionado, conforme apresentado na Figura 10.



Fonte: Paltsev et al. (2005).

Figura 10 - Tecnologia de gaseificação de carvão

As três tecnologias avançadas de geração de eletricidade a partir de combustível fóssil têm estruturas similares entre si, mas uma delas é mais elaborada. Apresentadas de forma genérica na Figura 11, essas tecnologias representam: a tecnologia de ciclo combinado de gás natural sem sequestro de carbono; a mesma tecnologia com sequestro e captura de carbono; e uma tecnologia integrada de gaseificação de carvão com sequestro e captura de carbono. A estrutura produtiva elaborada dessas tecnologias inclui ramificações separadas para descrever o custo de transmissão e distribuição (T&D), de geração e de sequestro. Em contraste, nas demais tecnologias elétricas avançadas, como eletricidade de biomassa e eólica, os custos de transmissão e distribuição estão implicitamente inclusos no capital, trabalho e na cesta de outros insumos. Outra diferença dessa representação é que as permissões de carbono entram em um ramo da estrutura CES. Essa estrutura permite representar que, para aumentar a taxa de captura e sequestro de carbono, mais de todos os insumos para geração e sequestro de carbono serão utilizados conforme o preço do carbono aumenta. Essas tecnologias também incluem fatores fixos adicionais no topo da representação que permitem representar os custos de ajustamento que ocorrem no desenvolvimento de novos setores nas economias.



Fonte: Paltsev et al. (2005).

Figura 11 - Tecnologia de eletricidade fóssil avançada

A Tabela 5 apresenta as parcelas de participação dos diferentes insumos nas tecnologias descritas anteriormente, bem como o fator de *markup*, ou custo relativo estimado em relação à tecnologia tradicional com a qual a tecnologia alternativa deve competir. Assim como na representação das tecnologias convencionais, a habilidade de substituição entre os insumos em resposta a mudanças nos preços relativos é controlada pelas elasticidades de substituição, conforme apresentadas na Tabela 6.

Tabela 5 - *Markups* e parcelas de custos com insumos para as tecnologias alternativas

		Parcela de Insumos e Fatores							
Tecnologia	**Mark-up**	**Recur-sos**	**Outros**	**Capital**	**Traba-lho**	**Fator fixo**			
Gás de carvão	3,5-4,0	0,4	0,1	0,3	0,3	--			
Petróleo de xisto	2,5-2,8	0,1	0,27	0,36	0,36	--			
Biocombustível	2,1	0,1	0,18	0,58	0,58	--			
Bio-eletricidade	1,4-2,0	0,19	0,18	0,44	0,44	0,05			
Eólica & Solar	1,0-4,0	0,05	0,25	0,4	0,4	0,05			
		Fator fixo	**Capital (Gera-ção)**	**Trabalho (Gera-ção)**	**Capi-tal (T&D)**	**Traba-lho (T&D)**	**Capi-tal (seq.)**	**Traba-lho (seq)**	**Com-bustível**
Gás avançado	0,94	0,01	0,24	0,05	0,31	0,31	0	0	0,23
Gás av. com SCC	1,16	0,01	0,29	0,07	0,26	0,26	0,05	0	0,16
Carvão av. com SCC	1,19	0,01	0,39	0,12	0,21	0,21	0,08	0,01	0,07

Fonte: Paltsev et al. (2005).

Tabela 6 - Elasticidades de substituição de insumos nas tecnologias alternativas

Símbolo	Tecnologia	Valor	Insumos
σ_{RVA}	Petróleo de xisto	0,5	Recurso-valor adicionado / outro
σ_{RVA}	Bio-elétrica	0,3	Recurso-valor adicionado / outro
σ_{RVA}	Biocombustível	0,1	Recurso-valor adicionado / outro
σ_{RVA}	Eólica & solar	0,02-0,06	Recurso-valor adicionado / outro
σ_{FVA}	Bio-eletricidade	0,4	Fator fixo-valor adicionado / outro
σ_{FVA}	Eólica & solar	0,6	Fator fixo-valor adicionado / outro
σ_{FVA}	NGCC, NGCC& IGCC com sequestro	0,1	Fator fixo-valor adicionado / outro
σ_{VAO}	Petróelo de xisto	0,2	Trabalho-capital-outro
σ_{VAO}	Biocombust. & eletricidade, eólica & solar	1	Trabalho-capital-outro
σ_{VA}	Aplicada à gaseificação do carvão	0,5	Capital-trabalho
$\sigma_{GVA,SVA,TD}$	Geração, transmissão e sequestro	0,8	Capital-trabalho
σ_{PT}	NGCC & IGCC com sequestro	1	Créditos de emissões

Fonte: Paltsev et al. (2005).

Os fatores fixos atribuídos para cada nova tecnologia são específicos. Como discutido em Jacoby et al. (2004), as taxas de penetração observadas para uma tecnologia nova em geral mostram uma penetração gradual. O modelo EPPA permite replicar tal comportamento atribuindo ao agente representativo uma quantidade pequena de recurso fixo. A dotação desse recurso cresce como uma função do produto do período anterior. A capacidade de expansão é, então, restringida em qualquer período pela quantia desse recurso de fator fixo e pela capacidade de substituir outros insumos por este. Como o produto aumenta ao longo do tempo, a dotação cresce, reduzindo a limitação na capacidade de expansão. A intuição por trás dessa especificação é de que a nova indústria possui recursos escassos de engenharia para construir plantas produtoras da tecnologia nova. Havendo demanda para expansão de capacidade, as firmas com essa capacidade gerarão retorno. Assim, essas firmas ganham experiência e expandem a dotação do fator fixo para períodos futuros. A parametrização desse custo de ajustamento é baseada na observação da capacidade de expansão das usinas nucleares a partir de sua introdução na década de 1980.

2.3.3 Outros Fatores que Determinam a Dinâmica do Modelo

Outros fatores importantes que influenciam a evolução do modelo EPPA ao longo do tempo estão relacionados com a representação do aumento na força de trabalho, mudanças na produtividade de fatores e insumos, mudança nos padrões de consumo a partir da evolução da renda e esgotamento dos recursos naturais.

O crescimento da força de trabalho é definido exogenamente, composto pelos efeitos separados do crescimento populacional e da produtividade do trabalho. O crescimento populacional baseia-se na tendência de longo prazo das estimativas das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2000, 2001). A produtividade do trabalho, por sua vez, é especificada de forma a permitir a reprodução de níveis de produto interno bruto nas regiões do modelo em concordância com valores observados e previsões do FMI e do Banco Mundial.

A mudança tecnológica exógena é outra fonte importante de crescimento da economia considerada no modelo EPPA. Jacoby et al. (2004), destaca dois tipos de mudança tecnológicas exógenas presentes no modelo. Na primeira assume-se um incremento exógeno na produtividade do trabalho, levando-se em conta previsões sobre o crescimento da população e da produtividade do trabalho como citado anteriormente, bem como na oferta de recursos naturais, através de aumentos na produtividade da terra e de descobertas de novas fontes de recursos naturais.[9]

A segunda forma de considerar a mudança tecnológica exógena é através da redução do uso de insumos por unidade de produto ao longo do tempo. Essa representação de mudança tecnológica é considerada no caso de insumos energéticos em modelos que se preocupam com o aumento autônomo da eficiência de energia (*energy efficiency improvement index* – AEEI). O AEEI é uma representação da mudança no uso de energia ao longo do tempo que não está relacionada a mudanças em preços. Baseia-se na observação de que há uma redução na quantidade de energia por unidade de PIB à medida que aumenta o PIB *per capita* do país. Tal aumento na eficiência do uso de energia não é induzido por preços, mas sim por mudanças tecnológicas na demanda por energia. No modelo EPPA, a evolução do AEEI baseia-se nas estimativas de Paltsev et al. (2005), que

---

[9] O EPPA assume um aumento na produtividade da terra de 1% ao ano, em concordância com Reilly e Fuglie (1998). As pressuposições sobre a evolução da oferta de recursos naturais fósseis no modelo EPPA são detalhadas em Paltsev et al. (2005).

evidencia trajetórias diferenciadas para cada região, em que a eficiência no uso de energia reduz levemente para todos países e regiões nos primeiros períodos do modelo, com exceção da China e dos países desenvolvidos, e posteriormente, o AEEI cresce, porém, em ritmos diferenciados no tempo e no espaço. As trajetórias do AEEI diferenciadas para cada região do modelo refletem as mudanças nesse parâmetro historicamente observadas nos países desenvolvidos como função da renda *per capita* dos mesmos.

Outro aspecto importante da dinâmica das economias é o padrão de mudança no consumo ao longo do tempo. A forte evidência empírica de redução de participação de alimentos e produtos básicos e aumento da participação de serviços nos gastos dos consumidores à medida que a renda *per capita* cresce também deve ser representada no modelo. Como descrito na seção 2.2.5, isso é feito no EPPA através de mudanças nas elasticidades e nas parcelas de participação de bens e serviços no consumo em função de mudança na renda entre períodos do modelo, seguindo as estimativas de Lahiri, Babiker e Eckaus (2000).

Por fim, o processo de esgotamento dos recursos naturais também é outro fenômeno de importância que afeta a trajetória das economias no tempo. O modelo EPPA considera três tipos de recursos fósseis individualmente, rastreando em unidades físicas as reservas de petróleo, de carvão e de gás natural. Esses recursos são modelados como possuindo diferentes graus de qualidade, o que implica em aumento no custo de extração conforme reduz a sua quantidade. Ao longo do tempo, reduz-se o estoque de recursos energéticos regionais a quantidade equivalente à extraída para a produção física do combustível no período anterior. Como o EPPA é resolvido recursivamente de cinco em cinco anos, o esgotamento do recurso é aproximado nos anos intermediários por meio da multiplicação do produto de cada setor de combustível por um fator de cinco.

Os processos descritos anteriormente, bem como as políticas de redução de gases de efeito estufa ou no uso de energia, devem determinar a evolução das economias no tempo, alterando a competitividade e participação das diversas tecnologias. Ao final da resolução de cada cenário, o modelo fornece estimativas e previsões sobre o crescimento do Produto Interno Bruto nos países e regiões, consumo agregado e produção setorial, consumo e produção de energia em unidades físicas, fluxos comerciais, emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes, bem como

medidas de custos econômicos das políticas simuladas. Vale ressaltar que o modelo não considera processos dinâmicos de inovação tecnológica endógenos, que poderiam gerar a descoberta de novas fontes de energia, de aumentos mais pronunciados na produtividade de uso das mesmas, ou mesmo em formas de reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

2.4 Adaptações do Modelo às Especificidades Brasileiras

2.4.1 Biocombustíveis de Primeira Geração

O modelo EPPA considera biocombustíveis de segunda geração como uma tecnologia *backstop*, com potencial de desenvolvimento futuro, mas sem capacidade de competir com os derivados do petróleo no momento presente. Os biocombustíveis atualmente produzidos e em uso, seja pela sua competitividade ou por apoio governamental, não são considerados explicitamente na versão 5 do modelo, uma vez que o uso em larga escala dessas tecnologias é relativamente novo e seu potencial em contribuir para reduções em emissões de gases de efeito estufa é limitado ou tem sido questionado.[10]

Diante do grande desenvolvimento na produção e uso dos biocombustíveis de primeira geração em diversos países na última década, como é o caso do etanol de cana-de-açúcar no Brasil, do etanol de milho nos EUA e do biodiesel na UE, bem como de políticas específicas de estímulo aos mesmos, torna-se importante acrescentar ao modelo EPPA a representação dessas tecnologias.

---

[10] A IEA(2004b) apresenta uma revisão de diferentes estudos que estimam as emissões de gases de efeito estufa advindas do ciclo de vida de diversos tipos de biocombustíveis. Segundo esses estudos, as reduções líquidas em emissões, em relação aos derivados de petróleo, variam de acordo com o tipo de biomassa utilizada, podendo chegar a um máximo de 66% para biodiesel de canola, e geram emissões líquidas superiores à gasolina para o etanol de milho. Já de acordo com Seabra (2008), as emissões do ciclo de vida do etanol da cana-de-açúcar são cerca de 83% menores que da gasolina. Contudo, diversos estudos apontam o risco de elevadas emissões de gases de efeito estufa oriundas da expansão da fronteira agrícola e consequente desmatamento caso haja necessidade de aumentar a área agrícola diante de uma forte expansão da produção de biocombustíveis (Fargione et al. 2008; Searchinger et al. 2008). Apesar de diversos trabalhos mais recentes abordarem o tema, a capacidade de contribuição dos diferentes tipos de biocombustíveis de primeira geração para a mitigação ainda permanece em aberto quando se consideram os efeitos indiretos de mudanças no uso da terra.

Para incluir os biocombustíveis de primeira geração no modelo são acrescentados vários blocos de produção para os diferentes tipos de biomassa destinada a biocombustíveis, de acordo com o nível corrente de produção existente nos diferentes países, bem como blocos de produção para representar o processamento da biomassa para a geração do biocombustível. A partir das matrizes de insumo-produto do GTAP, são incluídos os seguintes tipos de biomassa: culturas açucareiras (cana de açúcar e beterraba), grãos (milho), trigo e oleaginosas (canola, soja, palma). Com base na parcela de área cultivada em cada país ou região do EPPA, de acordo com os dados da FAO para o ano de 2005, oleaginosas são posteriormente, divididas em soja, canola e palma, e culturas açucareiras em cana de açúcar e beterraba.

A produção de biomassa requer a combinação de insumos intermediários, energia e fatores primários, de acordo com a tecnologia representada na Figura 12. A parcela de participação desses insumos no custo total da produção é obtida através da base de dados do GTAP7.

O fator terra utilizado no bloco de produção é específico para produção de culturas agrícolas, e sua produtividade para a produção de biomassa é específica de cada região do modelo e reflete a média histórica, de acordo com os dados da FAO. Essa produtividade aumenta exogenamente à taxa de 1% ao ano, como discutido anteriormente sobre os aspectos dinâmicos do modelo.

A produção de um determinado tipo de biocombustível utiliza a biomassa específica a este tipo e segue a tecnologia representada na Figura 13. As estimativas das parcelas de cada insumo no custo total de produção de cada tipo de biocombustível seguem o procedimento utilizado por Gitiaux et al. (2009), que coletou informações sobre os requerimentos de diferentes insumos no processo produtivo da bioenergia. Adotando esse procedimento, o custo de produção estimado para o etanol de cana-de-açúcar é de 0,39 US$ por litro no Brasil, de 0,55 US$/l para o etanol de milho nos EUA e de 0,57 US$/l para o biodiesel de soja na UE. Os custos de cada tipo de biocombustível para as demais regiões são extrapolados assumindo-se que a tecnologia de produção de um dado tipo de biocombustível é a mesma em todas as regiões (em termos de participação de cada insumo no custo total de produção), com exceção da parcela correspondente à biomassa, que varia regionalmente de

acordo com as diferenças em preços observadas para a cultura utilizada na produção da biomassa.

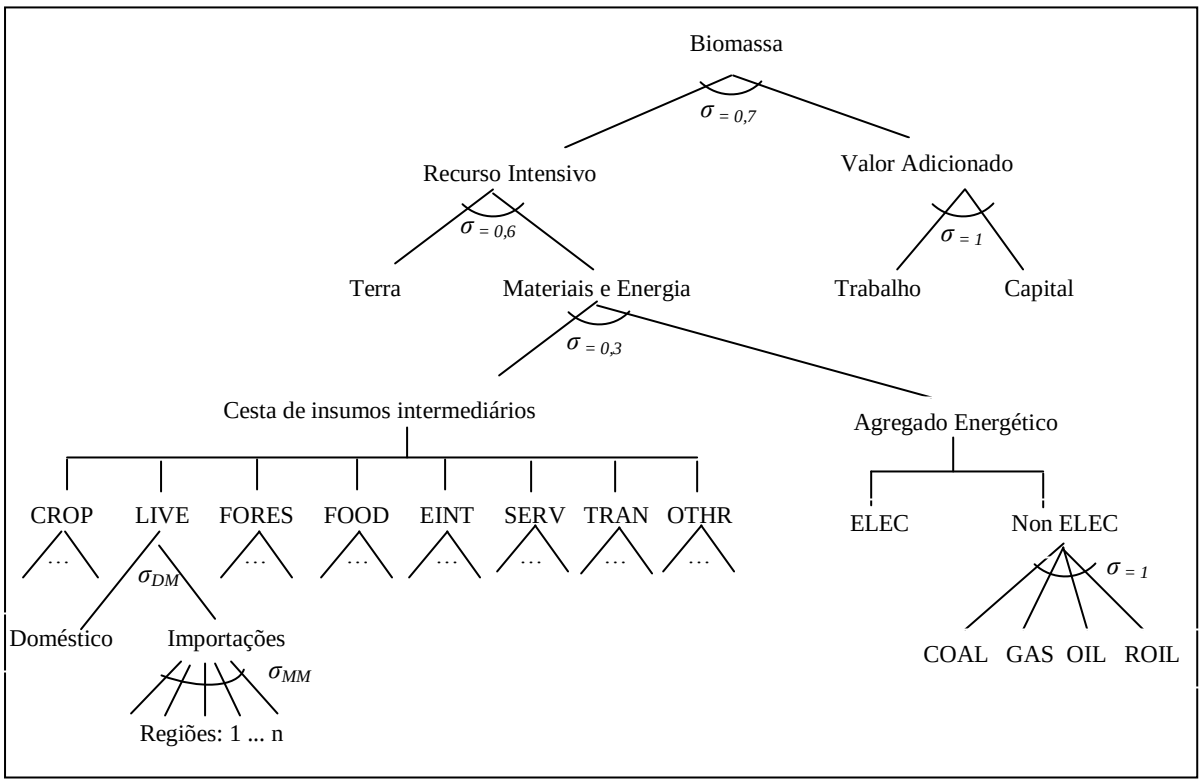


Figura 12. Tecnologia de produção de biomassa para biocombustíveis de primeira geração.

Como exemplo, os EUA é a região de referência para a produção de etanol de milho. Normalizando as parcelas de gastos com insumos para que some o valor de um nos EUA, naquelas regiões em que o preço do milho for superior ao dos EUA, a soma das parcelas de gastos com a produção de etanol será superior à unidade. O Brasil é a região de referência para a produção de etanol de cana de açúcar, a UE para a produção de biodiesel de canola, etanol de trigo e de beterraba, a Indonésia para a produção de biodiesel de palma, e os EUA para a produção de biodiesel de soja. Na ausência de informações de preços pela FAO para alguma cultura de biomassa em alguma região, assume-se que aquele tipo de biocombustível não pode ser produzido naquela região.

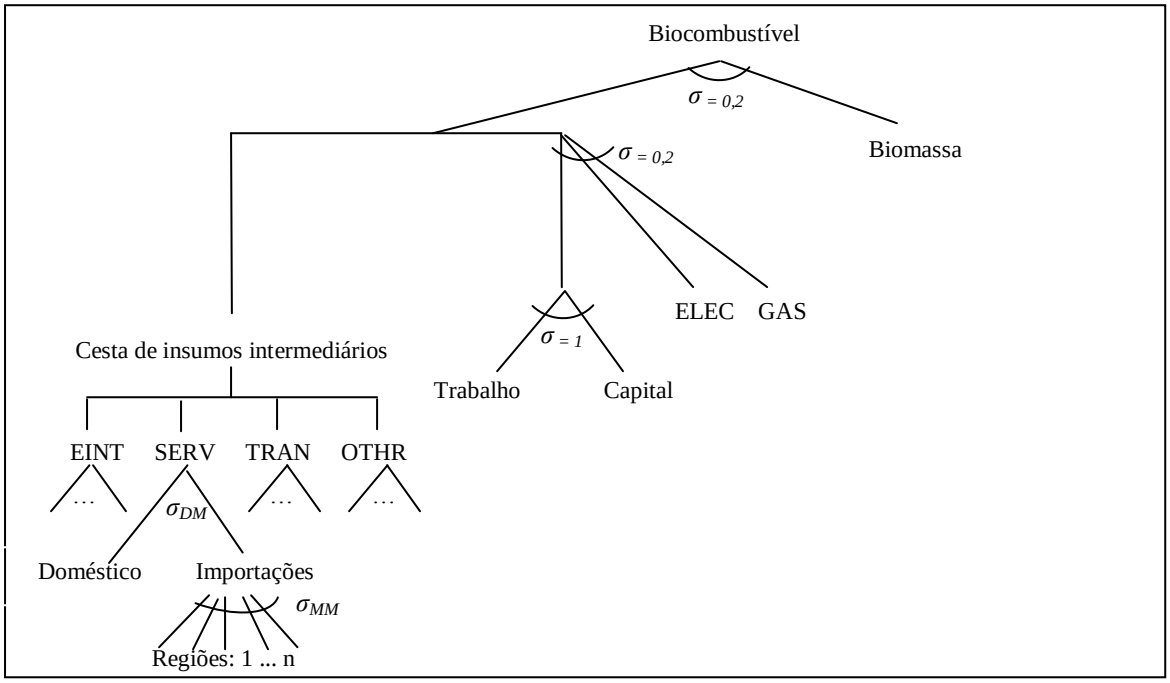


Figura 13. Tecnologia de produção de biocombustíveis de primeira geração.

O modelo EPPA adota um procedimento comum na modelagem de equilíbrio geral, de considerar os preços normalizados no equilíbrio inicial como iguais à unidade e produtos e insumos denominados em valores monetários e não em unidades físicas. Se a tecnologia de biocombustível for mais cara que o combustível derivado do petróleo no equilíbrio inicial, é necessário calcular essa diferença de custo (também chamado de *markup*) e multiplicar o custo do biocombustível por esse número de forma a refletir o maior custo relativo do biocombustível. Esse procedimento assegura a consistência entre os valores em unidades monetárias do modelo e a contabilidade física de unidades de energia, emissões, volume de biomassa e área. Dessa forma, uma região deve produzir algum tipo de biocombustível apenas se tal tecnologia for competitiva em relação ao derivado de petróleo, ou se a produção for estimulada por subsídios e/ou exigências de misturas de combustíveis com participação mínima de biocombustíveis.

2.4.2 Ajustes dos dados iniciais do modelo EPPA para o Brasil

O modelo EPPA utiliza dados do GTAP e da IEA sobre quantidades produzidas e consumidas de energia, bem como dados do EPA dos EUA e de Olivier e Berdowski

(2001) sobre emissões de gases de efeito estufa. Os dados de uso da terra são provenientes da base de dados do GTAP e dos estudos desenvolvidos por Hurtt *et al*. (2006). Esses dados são passíveis de comparação com aqueles produzidos por instituições brasileiras, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Ministério das Minas e Energia e o Ministério da Ciência e Tecnologia. Dessa forma, foram coletados dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2006), do Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (Ministério da Ciência e Tecnologia, 2009), e do Balanço Energético Nacional (Empresa de Pesquisa Energética, 2010) para ajustar os dados iniciais do modelo EPPA de forma a melhor refletir as estatísticas produzidas por instituições oficiais brasileiras. Tais ajustes permitem uma representação mais realistas da base de dados inicial do modelo para o caso brasileiro.

2.4.3 Desagregação dos setores intensivos em energia

Um dos interesses do estudo de impactos da economia de baixo carbono diz respeito aos efeitos sobre setores intensivos em energia. O modelo EPPA agrega todos os setores mais intensivos no uso de energia sob um único setor, denominado de EINT. De forma a ampliar o escopo da análise para considerar diferentes setores intensivos em energia, procurou-se desagregar o setor EINT do modelo em três novos setores, quais sejam:

a) químicos, borracha, plásticos, celulose e papel (CRP)

b) siderurgia e metalurgia (IRON)

c) outras indústrias intensivas em energia (OINT), que incluem a manufatura de outros produtos minerais não metálicos e a manufatura básica e processamento de minerais preciosos e metais não-ferrosos e fundição de metais não-ferrosos.

Tal desagregação foi realizada a partir da base de dados do GTAP7 (NARAYANAN; WALMSLEY, 2008), considerando uma agregação daquela base de dados equivalente à agregação de regiões e setores utilizadas na versão 5 do EPPA. Foram considerados dados de valor da produção, consumo intermediário, consumo final, consumo do governo, formação bruta de capital fixo, alíquotas de impostos,

pagamentos aos fatores de produção, consumo de energia, exportações e importações, dos setores intensivos em energia desagregados nos três setores acima descritos.

3. CENÁRIOS DE POLÍTICAS CLIMÁTICAS

Para definir os cenários que serão simulados no modelo EPPA de forma a atingir os objetivos do estudo, faz-se necessário um levantamento das principais políticas climáticas em discussão e/ou implementação pelos principais países emissores e nos fóruns de discussões internacionais sobre o tema. As discussões no âmbito da UNFCCC, através das Conferências das Partes (COP), constituem um importante balizador das ações regionais e globais para redução em emissões. Segue abaixo uma breve descrição das metas e comprometimentos assumidos por diferentes países no âmbito das COPs bem como outras políticas e metas consideradas pelos mesmos, quando existentes. As informações foram retiradas do portal eletrônico "Center for Climate and Energy Solutions" (CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY SOLUTIONS, 2011). Vale ressaltar que na COP-17 em Durban em 2011 os países membros sinalizaram que uma reformulação da economia global em direção a uma economia de baixo carbono só deverá ser atingida em discussões posteriores, para início de aplicação provável a partir de 2020. Até lá, os compromissos assumidos no Protocolo de Kyoto devem ser prolongados, sendo que alguns países declararam abertamente retirar sua participação naquele protocolo, como o Canadá.

3.1 Políticas Climáticas em Discussão

Estados Unidos

Meta: A meta de redução das emissões está na faixa de 17% abaixo dos níveis de 2005 até 2020.

Ações: Ocorrem a nível estadual e regional, sem uma regulamentação a nível federal.

A Califórnia tem como meta reduzir as emissões de GEEs aos níveis de 1990 até 2020 e 80% abaixo dos níveis de 1990 até 2050. O estado aprovou em 2011 uma lei para aumentar a quantidade de eletricidade gerada a partir de recursos de energia renovável por ano para uma quantidade que equivale ao menos 20% do total de eletricidade vendida para clientes de varejo até 2013, 25% até 2016 e 33% até 2020. Estas metas incluem todos os varejistas de eletricidade do estado, até empresas de serviços públicos.

Dez estados do Nordeste lançaram o programa Regional *Greenhouse Gas Initiative*, que é um sistema de *cap-and-trade* de CO2. Os leilões de licenças de emissão começaram em setembro/2008. Os proventos serão utilizados para promover a conservação de energia e a energia renovável. O sistema afeta usinas de combustíveis fósseis com 25MW ou maior capacidade de geração.

O estado de Connecticut tem como meta reduzir as emissões em 10% abaixo dos níveis de 1990 até 2020.

A Flórida estabeleceu metas de redução de emissões de GEEs em 10% abaixo dos níveis atuais em 2012, 25% em 2017 e 40% em 2025.

Além das metas discutidas nas COPs, Em 26 de junho de 2009, foi aprovado um projeto de lei na *House of Representatives* conhecido *como American Clean Energy and Security Act* (ACES), mas que, contudo, foi barrado no Senado. É um projeto de lei com o propósito de estabelecer um sistema de créditos de carbono para os EUA, similar ao EU ETS. Também conhecido como Waxman-Markey em referência aos seus autores, propõe um limite nacional, que se reduziria ao longo do tempo, para as emissões de gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono (CO_2), durante o período de 2012 a 2050. O principal objetivo seria uma redução em 17% das emissões em 2020, com base nos valores de 2005. A proposta está um pouco acima dos 14% defendidos pela administração Obama, mas ambos defendem chegar à meta de 80% para o ano de 2050.

União Europeia

Meta: Os chefes de Estado e de Governo estabeleceram uma série de metas a serem cumpridas até 2020, conhecidas como “20-20-20” – redução de emissões de GEEs em pelo menos 20%, podendo chegar até 30%, abaixo dos níveis de 1990;

20% do consumo energético proveniente de fontes renováveis; e diminuição de 20% no consumo de energia primária em comparação com os níveis previstos.

Ações:

Para implementar essas metas foi aprovado pelo Parlamento Europeu e pelo Conselho e se tornou lei um “pacote clima e energia”.

Uma das peças da legislação complementar são a revisão e o fortalecimento do Sistema de Comércio de Emissões (*EU Emissions Trading Scheme* - EU ETS). Haverá um teto para as emissões, que valerá para a UE inteira a partir de 2013 e será cortado por ano, reduzindo o número de licenças disponíveis para empresas a 21% abaixo do nível de 2005 em 2020. A atribuição gratuita de licenças de emissão será progressivamente substituída por leilão, e os setores e gases abrangidos pelo sistema será um pouco expandido.

Outra peça da legislação é o “Effort Sharing Decision” que vai reger as emissões de setores não cobertos pelo ETS, tais como transporte, habitação, agricultura e resíduos. Cada Estado-Membro concordou com uma meta de limitação de emissões vinculativas para 2020, que reflitam sua riqueza relativa. As metas dos setores não atingidos pelo ETS variam de uma redução de emissões de 20% para os países mais ricos a um aumento nas emissões de 20% para os mais pobres.

Metas nacionais obrigatórias para energias renováveis que coletivamente, vai levar a porcentagem média da EU em 20% até 2020. Os objetivos nacionais variam de 10% em Malta a 49% na Suécia.

Outro ponto da legislação é a criação de um quadro jurídico para promover o desenvolvimento e utilização segura de captura e armazenamento de carbono (CCS, sigla em inglês). Embora os diferentes componentes do CCS já estejam implantados em escala comercial, a viabilidade técnica e econômica de seu uso como um sistema integrado ainda tem que ser demonstrado. A EU, portanto, prevê a criação de uma rede de instalações de demonstração CCS até 2015 para testar a sua viabilidade, com o objetivo de atualizar a comercialização de CCS por volta de 2020.

O esquema de comércio de emissões da União Europeia (EU ETS) foi inaugurado em 2005, como o maior esquema de créditos de carbono do mundo e a principal política de combate às mudanças climáticas da União Europeia. Em média, mais de dez milhões de permissões de emissão são transacionadas por semana.

Atualmente, pode-se dividir a implementação do EU ETS em três fases. O primeiro período, equivalente a três anos, estendendo-se de 1º de janeiro de 2005 até o final de 2007 correspondeu a etapa de aprendizagem do programa, crucial para a continuidade da implantação. Já o segundo período, corresponde ao dos compromissos assumidos no Protocolo de Quioto, de 1º de janeiro de 2008 até o final de 2012. A importância dessa segunda etapa se dá justamente pela avaliação sobre o cumprimento das metas do Protocolo. Nesse segundo período de cinco anos, os países devem limitar suas emissões em cerca de 6,5% abaixo dos níveis de 2005, o que significa, no geral, um cumprimento das metas. Uma terceira etapa, após esta, é comumente chamada de Pós-2012.

Na terceira etapa de implementação do EU ETS, o número de emissões alcançado na fase anterior será tomado como referência, estabelecendo-se uma queda anual linear de 1,74% a partir de 2013, apenas ajustado para refletir a maior abrangência do sistema, como também as pequenas instalações que tinham sido excluídas anteriormente pelos Estados Membros. O fator linear de 1,74% usado na terceira etapa se aplicará até o ano de 2020, quando começará o quarto período de comércio (de 2021 a 2028). Posteriormente, essa taxa de redução deverá ser revisada até o ano de 2025, no máximo.

Japão

Meta: O país tem como objetivo reduzir suas emissões em 25% até 2020 em relação aos níveis de 1990.

Ações:

Para cumprir com essa meta serão tomadas medidas que incluem a introdução de um mecanismo nacional de comércio de emissões e uma tarifa diferenciada (*feed-in*) para energias renováveis, bem como a consideração de um imposto sobre o aquecimento global.

Atualmente, o Japão é líder mundial no desenvolvimento de novas tecnologias limpas. Os veículos elétricos híbridos da Honda e da Toyota foram nomeados como os mais eficientes em combustível e de menor emissão.

Além disso, a capital Tóquio está se preparando para forçar a indústria a fazer grandes cortes nas emissões de GEEs. Desde 2010, aproximadamente, 1.300 grandes escritórios e fábricas que consomem energia elétrica equivalente a 1.500 litros de petróleo bruto por ano devem reduzir as emissões de CO2 em 15-20% do volume médio dos últimos três anos antes desse regimento. Mesmo com o comércio de emissões ou *cap-and-trade*, se a meta não for alcançada até 2020, a pena a ser cobrada será de 500 mil ienes.

Canadá

Meta: Comprometeu-se a reduzir as emissões em 17% dos níveis de 2005 até 2020.

Ações:

O primeiro passo tomado para atingir tal meta foi a criação de regulamentos para as quantidades de GEEs emitidos pelos setores mais poluidores, transporte e energia, e futuramente, será expandido para outros setores.

Também está trabalhando para regulamentar a geração de eletricidade a carvão, na qual lançou regulamentos, que vai aplicar um padrão de desempenho rigoroso para novas unidades de geração e para as unidades que chegaram ao fim de sua vida econômica, com intuito de reduzir significativamente suas emissões de GEEs.

Além disso, o país tem dado prosseguimento ao compromisso de regular o conteúdo de combustível renovável nos combustíveis fósseis. A partir de dezembro de 2010, foi estabelecida a exigência de 5% de combustível renovável na gasolina e 2% no diesel.

Outro pilar das ações do Governo canadense é o investimento em tecnologias de implantação de captura e armazenamento de carbono, tendo gasto nos últimos anos US$ 3 bilhões em financiamento de projetos.

Apesar desses projetos visionados, o país abandonou oficialmente o Protocolo de Kyoto, no qual concordou em reduzir até 2012 suas emissões de carbono em 6% menos do que os níveis de 1990. No entanto, tem sido observado que suas emissões aumentaram consideravelmente nos últimos anos.

Austrália

Meta: O país tem como meta reduzir as emissões de GEE entre 5-15% ou 25 % até 2020 em relação aos níveis de 2000. Os 5% são incondicionais, mas o restante dependerá das ações internacionais. Também se comprometeu a uma meta de longo prazo para reduzir a poluição em 80% abaixo dos níveis de 2000 até 2050.

Ações:

Em fevereiro de 2011, o Governo lançou o Plano de Energia Limpa, que inclui um mecanismo de preços de carbono. Este terá início em 01 de julho de 2012, sendo que preço que será fixado para os três primeiros anos. O preço vai começar em US$ 23 por tonelada e aumentará em 2,5% a cada ano. A partir de 01 de julho de 2015 o preço será determinado pelo mercado. Essa política terá uma ampla cobertura, englobando setores tais como energia, transportes e processos indústrias, mas não se aplicará a combustíveis de transportes de famílias, e combustíveis de transporte comercial em veículos leves e *off-road* usados pela agricultura, silvicultura e pesca.

Além disso, o Governo está investindo mais de US$ 5 bilhões em desenvolvimento e comercialização de tecnologias de energia limpa, o que inclui transformar o setor de energia isento de fontes altamente poluentes como o carvão.

Também lançou um pacote de financiamento "*Fast-Start*" de US$ 614 milhões a serem gastos até 2013, que é alocado em uma série de setores chave, com 52% atribuído a medidas de adaptação, 24% sendo direcionados para a redução do desmatamento e degradação florestal nos países em desenvolvimento (REDD+) e outros 24% para atividades de mitigação.

Como as famílias australianas são diretamente responsáveis por cerca de um quinto da poluição de carbono, o governo está investindo em medidas para que as famílias também reduzam suas emissões. Mais da metade do dinheiro arrecadado com a precificação do carbono será usado para apoiar as famílias. Nove em cada 10 famílias receberão uma combinação de cortes de impostos e pagamentos para ajudar com os custos do preço do carbono. Por exemplo, o Sistema de Bônus de Energia Renovável oferece as famílias um desconto de US$ 1.000 para um sistema de água quente solar ou um desconto de US$ 600 para um sistema de bomba de calor.

China

Meta: Estabeleceu como meta a redução de 40-50% em intensidade de carbono comparado a 2005. Comprometeu-se a aumentar a quota de combustíveis não-fosséis no consumo de energia primária em torno de 15% até 2020. E também aumentar a cobertura florestal em até 40 milhões de hectares e o volume de estoque de floresta em até 1,3 bilhões de metros cúbicos até 2020, a partir dos níveis de 2005.

Ações:

O Programa Nacional de Mudança Climática chinês define estratégias que incluem reestruturação econômica, melhoria da eficiência energética, padrões de emissões dos veículos, desenvolvimento e utilização de energia hidrelétrica e de outras fontes de energias renováveis, bem como a restauração e proteção ecológica. Mais especificamente, a contribuição do país para baixar as emissões de GEEs será via eficiência energética, na qual se espera quadruplicar o PIB entre 2000 e 2020, apenas dobrando o consumo de energia. Também pretende quadruplicar a capacidade de geração de energia nuclear para 40GW até 2020, aumentar a infraestrutura para utilização de gás natural em substituição ao carvão e dobrar até 2020 a capacidade de geração de energia de hidroelétricas.

Além disso, o governo tomará medidas para fechar instalações industriais pequenas e menos eficientes em setores que incluem ferro, aço, cimento, cobre, vidro e cerâmica.

Outra base do programa é o aumento do imposto de exportação sobre produtos intensivos em energia, que passou para 15% sobre o cobre, níquel, alumínio e outros metais, 10% para produtos primários de aço, e entre outros. Essas medidas visam desencorajar as exportações de produtos intensivos em energia como um meio de conservar as fontes energéticas nacionais. Isso foi desencadeado pelos recentes elevados investimentos em indústrias intensivas em energia.

Índia

Meta: Estabeleceu a meta de redução das emissões entre 20-25% em intensidade de carbono comparado a 2005 até 2020.

Ações:

Criou um plano de ação, o *National Action Plan on Climate Change*, para delinear as políticas existentes e futuras e os programas que abordem a mitigação do clima e a adaptação.

O plano abrange metas específicas para o uso crescente de tecnologias térmicas solares em áreas urbanas, indústrias e estabelecimentos comerciais. A meta é de aumentar a produção de energia fotovoltaica em até 1000 MW/ano e a implementação de pelo menos 1000 MW de geração de energia solar térmica.

Outra base do plano é a Missão Nacional para a Eficiência Energética, na qual 714 indústrias intensivas em energia terão a obrigação de reduzir o seu consumo específico de energia, a partir de um acurado conjunto de referência em um determinado período de três anos. Às indústrias que reduzirem mais do que sua obrigação serão concedidos certificados de economia de energia (ESCerts) que poderão ser comercializados no mercado.

Também inclui a arborização de seis milhões de hectares de áreas florestais degradadas e expansão da cobertura florestal de 23% para 33% do território.

México

Meta: O compromisso de redução do país é de 30 % comparado a um cenário de referência sem políticas climáticas.

Ações:

Para cumprir com a promessa o país já tem tomado algumas medidas como a reconversão de energia, para que já em 2012, 26% da eletricidade seja provida por fontes renováveis.

Além disso, há dois projetos de petróleo e gás no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kyoto, que visam reduzir as emissões em cerca de 7,5 milhões de CO2.

Outras pequenas ações como a troca de eletrodomésticos velhos por novos e a mudança de lâmpadas incandescentes por fluorescentes, também estão sendo

implementadas, e se espera que com elas haja uma redução de 4,73 milhões de CO2 entre 2009 e 2012.

Coréia do Sul

Meta: O compromisso assumido pelo país é de reduzir as emissões em 30% comparado a um cenário de referência sem políticas climáticas.

Ações:

Os esforços do país para reduzir as emissões incluem a legislação do Plano de Crescimento Verde e do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e a expansão do seu *Green New Deal* em um plano de crescimento de cincos anos, que aumentará as despesas com iniciativas de mitigação das mudanças climáticas até 2014 em US$ 92,6 bilhões.

Também inclui créditos fiscais para investimentos em instalações poupadoras de energia de 20% e para investimentos em instalações de preservação do meio ambiente de 10%.

Outro passo importante é o *Trading Scheme National* para o comércio de emissões planejado para entrar em vigor a partir de 2015. O esquema de *cap-and-trade* vai envolver mais de 300 das maiores empresas do país (responsáveis por 60% das emissões de GEEs). Um limite máximo global será definido sobre as emissões, e então, uma certa quantidade de licenças para poluir será emitido para as empresas, dependendo do seu tamanho, dentro desse limite. Empresas que reduzirem as emissões além de seus benchmarks serão capazes de comercializar seus excedentes com aqueles que estão poluindo mais do que o esperado. A alocação das permissões se dará em 90% de forma livre e em 10% por meio de leilões.

Indonésia

Meta: Comprometeu-se a reduzir em 26% suas emissões até 2020 em relação a um cenário de referência sem políticas climáticas.

Rússia

Meta: A meta de redução do país está na faixa de 15-25% até 2020 em relação aos níveis de 1990.

Ações:

As medidas a serem tomadas pelo país compreendem ações para tratar do desmatamento em seu território e aumentar a quota de energias renováveis em sua matriz energética.

África do Sul

Meta: Comprometeu-se a reduzir as emissões em 34% até 2020 comparado a um cenário de referência sem políticas climáticas.

Ações:

Foi criada a agência DEAT para dirigir e formular o programa *The National Climate Change Response Strategy*, que descreverá um amplo quadro de ações de forma a cumprir com os compromissos assumidos perante a UNFCCC.

Brasil

Meta: O Brasil definiu como meta a redução das emissões de GEEs entre 36,1-38,9% até 2020 comparado a um cenário de referência sem políticas climáticas.

Ações:

O país dispõe de arcabouço jurídico e institucional dedicado a promover as medidas necessárias para mitigação das emissões de GEE e a adaptação aos efeitos da mudança do clima. Os três principais instrumentos são: a Política Nacional sobre Mudança do Clima, o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima e o Plano Nacional sobre Mudança do Clima.

Aprovada na Lei nº12.187 de dezembro de 2009, a Política Nacional sobre Mudança do Clima constitui estratégia permanente que deverá nortear a elaboração do Plano Nacional sobre Mudança do Clima, dos planos estaduais e de outros planos, programas, projetos e ações relacionados com a mudança do clima.

Para cumprir com as metas de redução estão previstos nesta lei as seguintes medidas a serem adotadas:

- Redução de 80% do desmatamento na Amazônia Legal em relação à média verificada entre 1996 e 2005;
- Redução de 45% do desmatamento no Cerrado em relação à média verificada entre 1999 e 2008;
- Expansão da oferta hidrelétrica, da oferta de fontes alternativas renováveis, notadamente centrais eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e bioeletricidade, da oferta de biocombustíveis, e incremento da eficiência energética;
- Recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas;
- Ampliação do sistema de integração lavoura-pecuária-floresta em 4 milhões de hectares;
- Expansão da prática de plantio direto na palha em 8 milhões de hectares;
- Expansão da fixação biológica de nitrogênio em 5,5 milhões de hectares de áreas de cultivo, em substituição ao uso de fertilizantes nitrogenados;
- Expansão do plantio de florestas em 3 milhões de hectares;
- Ampliação do uso de tecnologias para tratamento de 4,4 milhões de m³ de dejetos de animais; e
- Incremento da utilização na siderurgia do carvão vegetal originário de florestas plantadas e melhoria na eficiência do processo de carbonização.

O Fundo Nacional sobre Mudança do Clima tem como objetivo financiar empreendimentos e fomentar pesquisas, estudos, geração de informações, projetos ou iniciativas voltadas à redução de emissões ou remoção por sumidouros de GEE, e também a adaptação aos efeitos associados à mudança do clima.

O Plano Nacional sobre Mudança do Clima está formulado em quatro eixos: mitigação, vulnerabilidade, impacto e adaptação, pesquisa e desenvolvimento, e capacitação e divulgação.

Os objetivos do plano compreendem pontos tais como:

Implementação de uma Política Nacional de Eficiência Energética, aumento do consumo de carvão vegetal sustentável em substituição ao carvão mineral, troca de geladeiras antigas, estímulo à utilização de sistemas de aquecimento solar de água,

substituição de gases refrigerantes, aumento da reciclagem de resíduos sólidos, eliminação gradual do emprego do fogo na colheita da cana-de-açúcar e incentivo a práticas sustentáveis na agricultura;

Buscar manter elevada a participação de energia renovável na matriz elétrica, preservando posição de destaque que o Brasil sempre ocupou no cenário internacional por meio do aumento da oferta de energia elétrica de co-geração, redução das perdas não-técnicas na distribuição de energia elétrica, construção de novas usinas hidrelétricas, aumento da participação de fontes renováveis na geração de energia elétrica, expansão da indústria fotovoltaica nacional e utilização desta fonte de energia em sistemas isolados e conectados à rede;

Fomentar o aumento sustentável da participação de biocombustíveis na matriz de transportes nacional e, ainda, atuar com vistas à estruturação de um mercado internacional de biocombustíveis sustentáveis; e

Eliminar a perda líquida da área de cobertura florestal no Brasil.

Para reduzir o desmatamento e, consequentemente, as emissões ganharam vigor também as propostas de modificações do Código Florestal brasileiro, que trata de questões tais como desmatamento, exploração e conservação de vegetação nativa.

3.2 Políticas de incentivo aos biocombustíveis

Além das políticas climáticas e metas de redução de emissões discutidas nos âmbitos internacional e domésticos, diversos países possuem mandatos e metas de produção e consumo de biocombustíveis como parte de uma estratégia de redução de emissões e aumento da segurança energética. Segue uma breve descrição das principais identificadas.

EUA: *Renewable Fuel Standard*

O Renewable Fuel Standard (RFS) é uma política norte-americana que determina um volume mínimo de combustíveis renováveis a ser misturado à oferta de combustíveis para transporte. O RFS inicial foi estabelecido em 2005 como parte da

Energy Policy Act of 2005 (EPAct 2005) estabelecendo um mínimo de 7,5 bilhões de galões de combustíveis renováveis na oferta de gasolina em 2012. No ano de 2007 o Energy Independence and Security Act de 2007 (EISA 2007) expandiu a quantidade mínima de biocombustíveis para 36 bilhões de galões em 2022. O RFS é administrado pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (*Environmental Protection Agency* – EPA) e envolve certificados negociáveis chamados de Números de Identificação Renováveis (*Renewable Identification Numbers* – RINs). Fornecedores de combustíveis são obrigados a incorporar os volumes de biocombustíveis determinados pela política em suas vendas anuais, independentemente dos preços desses.

O RFS subdivide os requerimentos totais de combustíveis renováveis em etanol fabricado a partir do milho, com um máximo de 15 bilhões de galões a partir de 2015, e biocombustíveis avançados complementando o mínimo requerido a partir de então. Tais biocombustíveis avançados incluem o etanol celulósico, biodiesel produzido a partir de biomassa e biocombustíveis de açúcares não baseados em milho[11], sendo que cada tipo possui seus próprios volumes ou padrões. As categorias de biocombustíveis mencionadas no RFS possuem um volume designado, padrões mínimos de reduções em emissões de ciclo de vida e são esperados de acordo com a biomassa utilizada[12]. A Tabela 7 apresenta os volumes determinados pelo RFS.

Tabela 7. Requerimentos de biocombustíveis pelo RFS

Ano	Biocombustível celulósico	Biodiesel de biomassa	Biocombustível avançado	Total[b]
2011	0,25	0,8	1,35	13,95
2012	0,5	1,0	2,0	15,2
2013	1,0	a	2,75	16,55
014	1,75	a	3,75	18,15
2015	3,0	a	5,5	20,5
2016	4,25	a	7,25	22,25
2017	5,5	a	9,0	24,0
2018	7,0	a	11,0	26,0

[11] O etanol de cana-de-açúcar brasileiro é considerado um biocombustível avançado.

[12] As reduções mínimas em emissões em relação aos combustíveis fósseis, exigidas para classificar os diferentes tipos de biocombustíveis, são: 20% para combustíveis renováveis; 50% para biocombustíveis avançados; 50% para diesel de biomassa; 60% para biocombustível celulósico.

2019	8,5	a	13,0	28,0
2020	10,5	a	15,0	30,0
2021	13,5	a	18,0	33,0
2022	16,0	a	21,0	36,0

[a] A ser determinado pela EPA, sendo no mínimo 1 bilhão de galões.
[b] Inclui o requerimento de etanol de milho.

Diretiva Europeia de Biocombustíveis

A União Europeia estabeleceu através da Diretiva 2003/30/EC a meta mínima de 5,75% de energia renovável no setor de transporte para 2010 e 10% em 2020 em todos os estados membros. Ainda, requer que o uso de biocombustíveis seja sustentável e gere redução líquida em emissões de gases de efeito estufa, sem impacto negativo sobre a biodiversidade e o uso da terra.

A Comissão Europeia cita como principais razões para a Diretiva a segurança energética e a necessidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa. O consumo de energia no setor de transporte depende quase que exclusivamente de importações em muitos dos países membros da UE.

4. RESULTADOS

4.1 Cenários implementados

Diante das políticas climáticas em discussão ou implementação e das metas de biocombustíveis, e considerando que as negociações na última COP em Durban adiaram para 2020 a busca mais efetiva pela redução em emissões, foram simulados os seguintes cenários:

1. Cenário de referência (*business as usual* - **BAU**): desconsidera a aplicação de políticas climáticas em qualquer país do mundo, excetuando o estágio atual da EU-ETS. Contudo, as metas de produção e consumo de biocombustíveis nos EUA e na UE são mantidas, por já fazerem parte da política atual ou anunciada como certa.

2. Cenário de políticas climáticas mundiais (**Policy**): considera a implementação de políticas climáticas em diversos países do mundo, via mercados domésticos de permissões de carbono, de forma a atingir:

UE: Redução de 14% das emissões em 2020 em relação às emissões observadas em 2010, com metade desta redução (7%) em 2015. Como ainda não se determinaram metas para os anos seguintes, considerar-se-á a tendência de redução de 14% a cada década até o ano de 2050, atingindo redução de 56% neste ano, em relação às emissões de 2010.

EUA: Mesma política da UE, porém com início uma década após, ou seja, redução de 14% das emissões em 2030 em relação às emissões de 2010, com metade desta redução (7%) em 2025 e tendência de redução de 14% a cada década até o ano de 2050, atingindo redução de 42% neste ano, em relação às emissões de 2010. Ainda, consideram-se reduções modestas de 2% e 4% nos anos de 2015 e 2020, respectivamente, em relação às emissões de 2010.

Japão: redução linear das emissões em 30% de 2015 a 2050 em relação aos níveis de emissões observadas em 2005.

Canadá: redução linear das emissões em 21% de 2015 a 2050 em relação aos níveis de emissões observadas em 2005.

Austrália: redução linear das emissões em 21% de 2015 a 2050 em relação aos níveis de emissões observadas em 2005.

China: aumento da eficiência energética via redução da intensidade de carbono (Emissões/PIB) em 50% até 2050. Como tal redução já ocorre espontaneamente no cenário de referência do modelo EPPA[13], nenhuma política de mercado de carbono é aplicada efetivamente neste cenário.

Índia: aumento da eficiência energética via redução da intensidade de carbono (Emissões/PIB) em 25% até 2050. Como tal redução já ocorre espontaneamente no cenário de referência do modelo EPPA, nenhuma política de mercado de carbono é aplicada efetivamente neste cenário.

México: redução linear em 30% em emissões até 2050 em relação às emissões projetadas pelo modelo no cenário de referência.

África do Sul: Meta de redução desconsiderada, uma vez que o continente africano está todo agregado como uma única região no modelo EPPA.

Coréia do Sul e Indonésia: redução linear em 26% nas emissões até 2050 em relação às emissões projetadas pelo modelo no cenário de referência (como os países do Leste Asiático de maior dinamismo econômico estão todos agregados em uma única região, considera-se a meta da Indonésia para esta região como um todo, região ASI no EPPA).

Rússia: redução de 25% nas emissões até 2050, em relação às emissões observadas em 1990.

Brasil: redução das emissões de GEEs de 38,9% até 2020 em relação ao nível de referência estabelecido pelo governo brasileiro, o que significa reduzir as emissões de cerca de 2.704 milhões de toneladas (ton.) de CO_2 Equivalente (CO_2-Eq.) para 1.652 milhão de ton CO_2-Eq. Tal meta deve ser atingida com cortes diferenciados em emissões por setor. Para compor os 38,9% de redução, devem-se somar 24,7% de redução em emissões provenientes do desmatamento e de mudanças no uso da terra (*Land Use Changes* – LUC), 6,1% de redução em emissões dos setores agropecuários, 7,7% de emissões do uso de energia, e 0,4% de emissões dos setores de cimento e siderurgia. Como o cenário de referência gerado pelo modelo EPPA pode não necessariamente refletir o cenário de referência delineado pelo

[13] O Modelo EPPA considera o aumento da eficiência no uso de energia à medida que a renda per capita de um país aumenta, de acordo com o observado para os países desenvolvidos ao longo dos últimos 100 anos. Dado o crescimento do PIB per capita da China no modelo, o ganho de eficiência a partir deste crescimento é suficiente para atingir a redução na intensidade de carbono delineada pela China. O mesmo é válido para a meta de redução na intensidade de carbono da Índia.

governo brasileiro, buscou-se implementar os cortes em emissões no Brasil de forma a alcançar o nível máximo em emissões de 1.652 milhão de ton CO_2-Eq, como desejado na Política Nacional de Mudança Climática, considerando os cortes diferenciados por setores. Assumiu-se que a política teve início em 2015, sendo implementados cortes correspondentes à metade dos aplicados em 2020. Deste ano em diante, considerou-se que os cortes nas emissões da agricultura e do uso de energia foram aprofundados em um ponto percentual a cada ano, até o ano de 2050. Já as emissões provenientes do desmatamento e de mudanças no uso da terra foram reduzidas gradualmente até cessarem completamente no ano de 2040. Devido às metas diferenciadas de cortes em emissões de diferentes setores, implementa-se mercados de carbono setoriais, ou seja, sem a possibilidade de negociação de créditos de carbono entre diferentes setores. Isso significa que o modelo determina endogenamente um preço para as permissões de carbono (ou créditos negociáveis de emissões) para cada setor representado, de acordo com a interação entre a oferta de permissões (determinada pela meta de corte em emissões) e a demanda dos setores pelas mesmas por conta do uso de energia ou da geração de emissões pelo uso de insumos ou características do processo produtivo. Contudo, setores que demandam mais permissões do que o ofertado, não podem buscar em outros setores a compra de permissões. Acredita-se que com essa estratégia de implementação da política consegue-se refletir melhor os custos associados à aplicação das diferentes estratégias de mitigação previstas no Plano Nacional de Mudanças Climáticas, baseadas em adoção de tecnologia, expansão de fontes renováveis, controle de desmatamento, entre outras, que são específicas aos diferentes setores e, portanto, não cambiáveis entre eles.[14]

---

[14] É importante ressaltar, contudo, que a estratégia de implementação da política climática brasileira na forma de mercados setoriais de carbono pode não representar a contento as políticas explicitamente direcionadas ao incentivo de adoção de tecnologias de menores emissões, como é o caso do Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC), que prevê a adoção voluntária de tecnologias como plantio direto, integração lavoura-pecuária e recuperação de pastagens degradas, a partir de financiamento com taxas de juros mais baixas que as de mercado. Enquanto o mercado setorial de carbono, ao impor o custo de pagamento pelos créditos de carbono pelas emissões que excederem o limite determinado, pode levar tanto à adoção de tecnologias de menores emissões quanto à redução da produção se a tecnologia poupadora de carbono for relativamente cara, o incentivo à adoção de tecnologias a partir de financiamento mais barato pode gerar a redução em emissões pela adoção tecnológica ou a não adoção e, consequentemente, o fracasso em atingir as metas de redução. Dessa forma, ao simular o mercado de carbono setorial no presente estudo parte-se da hipótese de que a meta de redução em emissões deve ser obrigatoriamente atingida, seja via adoção de tecnologias de baixo carbono, seja via redução na produção.

A Tabela 8 apresenta os cortes em emissões implementados nas diferentes regiões do modelo (exceto Brasil) no cenário Policy, enquanto a Tabela 9 apresenta um esboço dos cortes implementados para o Brasil. A Tabela 8 evidencia que cada país ou região possui uma meta diferenciada em reduções, que por sua vez é relativa a um ano específico ou às emissões ano a ano do cenário de referência. Já os cortes em emissões no Brasil, apresentado na Tabela 9, são relativos às emissões do cenário de referência, sendo determinados de forma a atingir as metas em volume de emissões previstas pelo Plano Nacional de Mudanças Climáticas.

Tabela 8 – Cortes percentuais em emissões de gases de efeito estufa nas diferentes regiões do modelo EPPA

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
USA*	2	4	7	14	21	28	35	42
CAN+	3	5	8	11	13	16	18	21
MEX**	4	8	11	15	19	23	26	30
JPN+	4	8	11	15	19	23	26	30
ANZ+	3	5	8	11	13	16	18	21
EUR*	7	14	21	28	35	42	49	56
RUS++	3	6	9	13	16	19	22	25
ASI**	3	7	10	13	16	20	23	26

Fonte: Resultados do estudo.
* Cortes em relação ao ano de 2010
+ Cortes em relação ao ano de 2005
** Cortes em relação ao respectivo ano do cenário de referência
++ Cortes em relação ao ano de 1990

Tabela 9 – Cortes percentuais em emissões de gases de efeito estufa no Brasil em relação ao cenário de referência

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
LUC	20	56	65	70	85	100	100	100
Agropecuária	2	5	10	15	20	25	30	35
Uso de Energia	3	6	11	16	21	26	31	36

Fonte: Resultados do estudo.

3. Cenário de políticas climáticas mundiais com impostos compensatórios de carbono (**Policy_BCA**): aplicação das políticas climáticas delineadas no cenário "Policy", com a cobrança pelos países desenvolvidos (EUA, UE, Canadá, Japão,

Austrália e Rússia) de impostos de importação compensatórios com base no conteúdo de carbono (*Board Carbon Adjustment Taxes* - BCA) para produtos importados de países sem metas de redução em emissões.

4. Cenário de políticas climáticas mundiais sem a participação do Brasil e com impostos compensatórios de carbono (**Policy_BCA_noBRA**): aplicação das políticas climáticas delineadas no cenário "Policy" com exceção das políticas discutidas para o Brasil, com a cobrança pelos países desenvolvidos (EUA, UE, Canadá, Japão, Austrália e Rússia) de impostos de importação compensatórios com base no conteúdo de carbono para produtos importados de países sem metas de redução em emissões.

5. Cenário de pacto mundial para redução em emissões (**Policy_Global**): aplicação de um mercado mundial amplo de créditos de carbono, com participação de todos os países e preço único de carbono no mundo, com créditos de carbono distribuídos por países de acordo com os limites em emissões delineados nas Tabelas 8 e 9, com os demais países e regiões não incluídos na Tabela 8 (ROE, CHN, IND, REA, AFR, MES, LAM) seguindo o mesmo corte em emissões aplicados pela região ASI, em relação às emissões observadas nessas regiões no cenário de referência.

Todos os cenários de políticas, com exceção da aplicação da política climática setorial no Brasil e do cenário "Policy_Global", foram simulados no modelo EPPA como mercados domésticos de créditos de carbono amplos na região implementadora, com os limites em emissões sobre todos os gases de efeito estufa. Foi considerada a possibilidade de comercialização de créditos entre diferentes setores e tipos de gases, de forma a obter um preço único em termos de dólares por unidade de CO_2 equivalente em toda a região. Os limites em emissões aplicam-se às emissões provenientes do uso de energia e de atividade dos setores (emissões fugitivas), incluindo as provenientes das atividades agropecuárias e produção de cimento. As emissões provenientes de mudanças no uso da terra e desmatamento também foram limitadas no Brasil e na Indonésia (região ASI), porém com mercado e preço diferenciado dos créditos de carbono destinados aos demais setores. No cenário "Policy_Global" assume-se um mercado mundial de carbono, com a possibilidade de compras e vendas de créditos de carbono entre países e preço único no mercado mundial.

4.2 Resultados[15]

4.2.1 Emissões de gases de efeito estufa

Os impactos dos diferentes cenários implementados são mais bem compreendidos quando se observa como os mesmos alteram a trajetória de emissões de gases de efeito estufa no cenário sem políticas climáticas. A Figura 14 a seguir apresenta as trajetórias individuais de emissões de gases de efeito estufa para as regiões do modelo EPPA. A Figura 15 apresenta as trajetórias de emissões para o Brasil.

A Figura 15 mostra que os países desenvolvidos estão sujeitos a um esforço maior de redução em emissões no cenário Policy, já que seus cortes em emissões são determinados com base em algum ano fixo de referência. A UE é a região que aplica cortes mais elevados em emissões no cenário Policy. Já os países em desenvolvimento que se comprometeram com políticas climáticas nesse cenário, como o México (MEX) e os países asiáticos de crescimento acelerado (ASI), reduzem emissões em relação ao cenário de referência, contudo, tais reduções não implicam em trajetória decrescente de emissões no tempo. Dessa forma, os comprometimentos de reduções em emissões refletem a noção de responsabilidades comuns, porém diferenciadas, de acordo com a contribuição histórica para o acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera.

Quanto aos países em desenvolvimento que não aplicam ações explícitas de redução em emissões, estes apresentam nítida trajetória de crescimento em emissões tanto no cenário de referência (BAU) quanto no cenário Policy. Porém, a trajetória de emissões no tempo é afetada negativamente no cenário Policy para apenas algumas regiões, como a África (AFR), o resto da América Latina (LAM) e o restante do Leste da Ásia (REA), o que indica que essas regiões possuem uma elevada dependência, seja por conta de importações, exportações ou fluxos de capitais, daquelas regiões que aplicam políticas climáticas no cenário Policy. Outras regiões, como China (CHN), Índia (IND) e Oriente Médio (MES), praticamente não

---

[15] O Anexo C apresenta as projeções do modelo EPPA no cenário de Referência BAU para a taxa de crescimento do PIB e as emissões de gases de efeito estufa para as várias regiões representadas no modelo, bem como para o PIB per capita e a intensidade de uso de energia, de forma a refletir como as várias hipóteses e premissas determinam a trajetória dinâmica do modelo.

sofrem mudanças em suas trajetórias de emissões de gases de efeito estufa, sugerindo que os impactos das políticas climáticas em outros países possuem poucos desdobramentos sobre a economia desses países.

A aplicação de tarifas compensatórias de carbono (*Carbon Board Adjustment Taxes*) pelos países desenvolvidos no cenário Policy_BCA tem efeitos pouco expressivos sobre as emissões de gases de efeito estufa da maioria das regiões. As regiões que as aplicam (USA, CAN, ANZ, EUR, JPN e RUS) não sofrem mudanças em suas trajetórias de emissões. Os países em desenvolvimento que também implementam políticas climáticas (MEX e ASI), mas não aplicam tarifas compensatória, também não são afetados pelas mesmas. Já os países que não possuem políticas climáticas, e que, portanto, precisam pagar as tarifas compensatórias nas suas exportações para os países desenvolvidos, têm suas trajetórias de emissões afetadas apenas modestamente pelas tarifas, o que sugere que as mesmas não são efetivas no sentido de evitar ou reduzir os vazamentos em emissões, ou seja, a substituição de bens domésticos intensivos em carbono nos países desenvolvidos por bens importados. A região Resto da Europa (ROE) parece ser a mais afetada pelas tarifas compensatórias, provavelmente pela sua proximidade e relacionamento comercial com a UE (EUR).

No cenário Policy_Gobal de aplicação de uma política climática global, percebe-se que a trajetória de emissões de gases de efeito estufa é afetada em todas as regiões do modelo EPPA. Os países desenvolvidos apresentam maiores emissões nesse cenário do que no cenário Policy, o que significa que são capazes de comprar créditos de carbono de outras regiões do mundo, aliviando assim a necessidade de reduções em emissões. Esse resultado revela a importância de instrumentos como os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDLs), uma vez que o corte em emissões pode ser realizado a menores custos em alguns países em desenvolvimento do que nos países compradores de créditos de carbono. Já os países em desenvolvimento que não realizaram cortes no cenário Policy, passam a contribuir com cortes em emissões no cenário Policy_Global, tendo suas trajetórias de emissões drasticamente afetadas, com destaque para as reduções em emissões na China. Dessa forma, a política global alivia os países desenvolvidos via comercialização de créditos de carbono, permitindo aos países em desenvolvimento a venda de créditos de carbono aos países desenvolvidos.

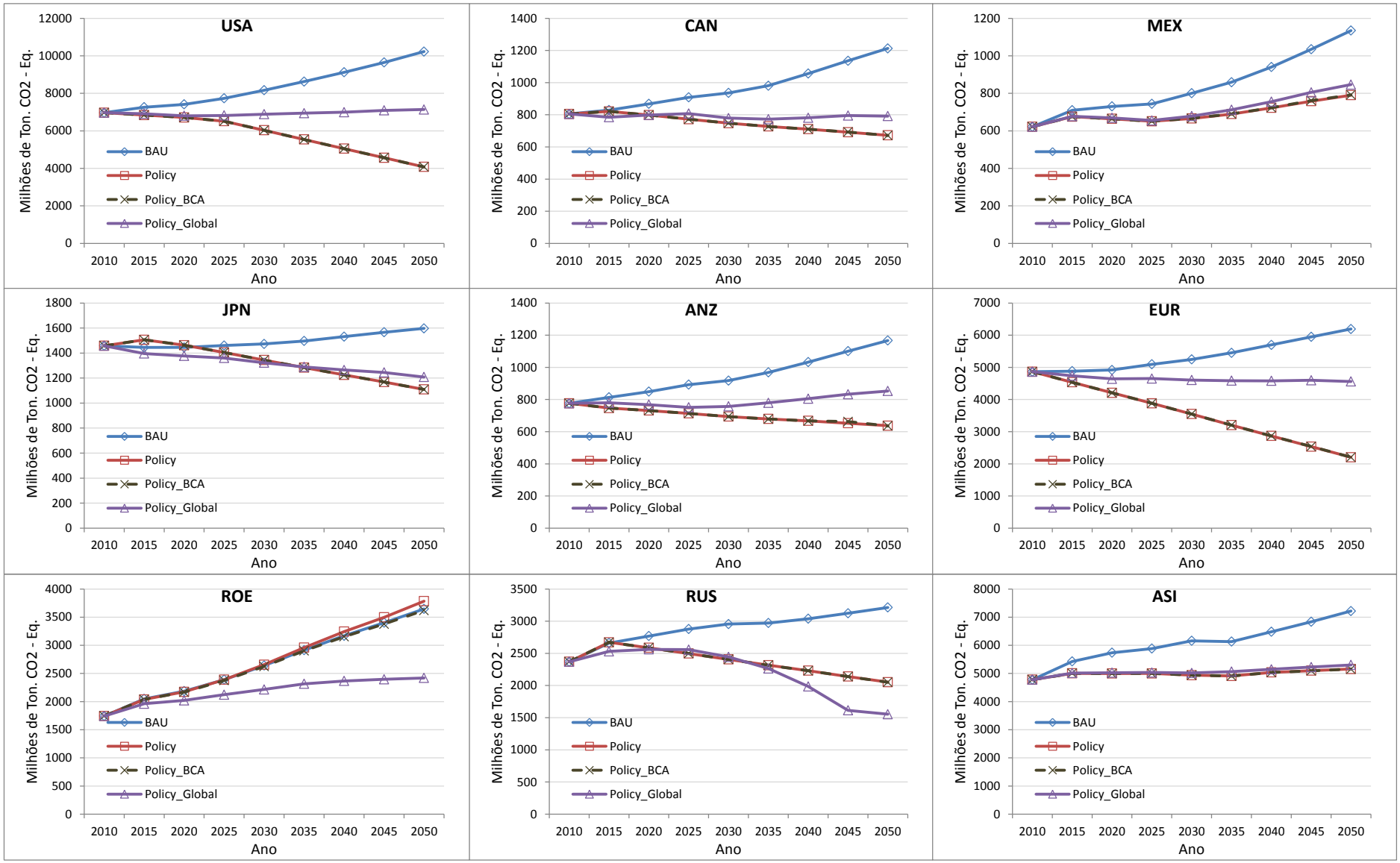


Figura 15 – Trajetórias de emissões de gases de efeito estufa nos cenários implementados

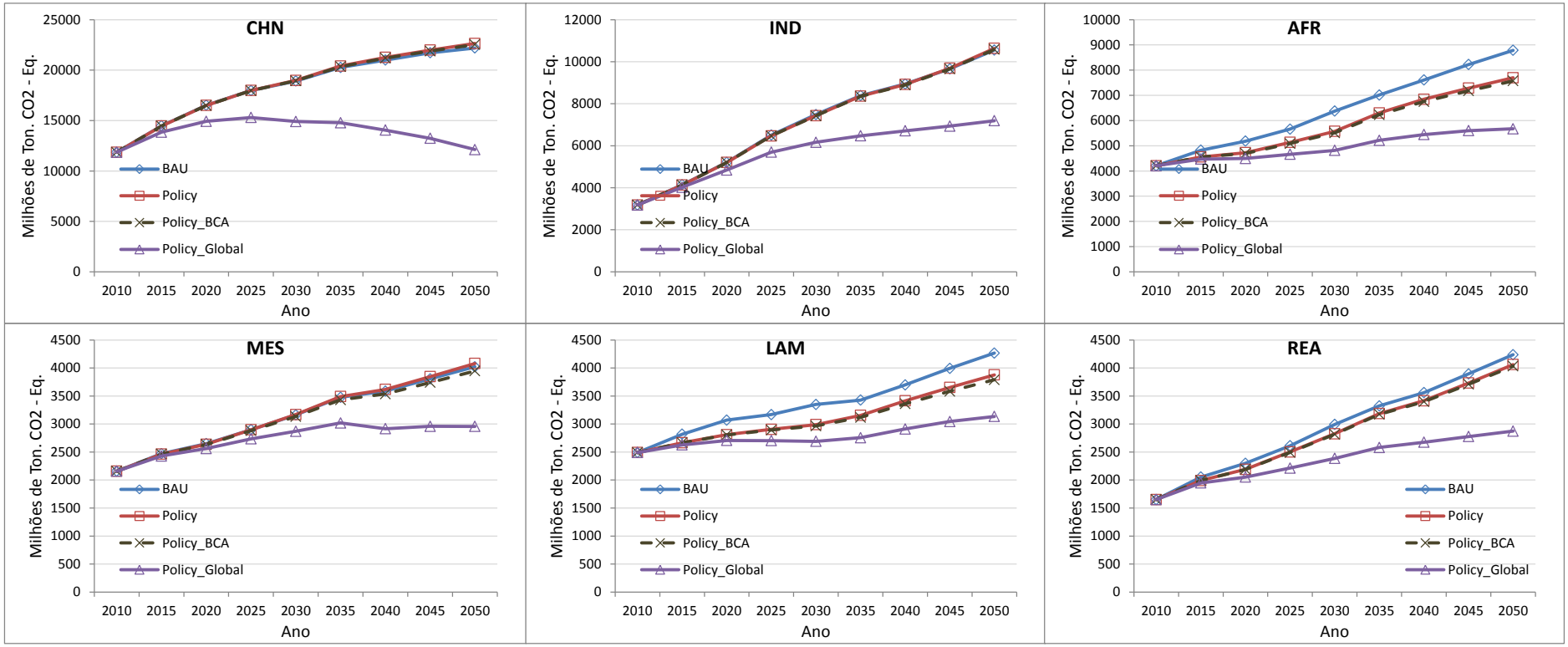


Figura 15 (cont.) – Trajetórias de emissões de gases de efeito estufa nos cenários implementados

Vale ressaltar que as trajetórias em emissões do cenário Policy_BCA_NoBRA não foram apresentadas na Figura 15 uma vez que não possuem diferença visual em relação ao cenário Policy.

O conjunto de políticas implementadas produzem diferentes trajetórias nas emissões globais de gases de efeito estufa (Figura 16). Sem políticas climáticas, o modelo projeta que as emissões alcançariam 80 bilhões de ton. de CO_2-Eq. em 2035, e cerca de 96 bilhões de ton. em 2050. A implementação das políticas por parte apenas dos países desenvolvidos e alguns poucos países em desenvolvimento seria capaz de alterar essa trajetória, reduzindo as emissões em cerca de 20 bilhões de ton. de CO_2-eq. no final do período, o que equivale a uma queda de cerca de 20% apenas. Tal redução mostra-se modesta e insuficiente para conter a concentração de gases de efeito estufa em níveis considerados seguros, como os níveis de 450 e 550 ppm, associados a mudanças em temperaturas restritas a cerca de 2º C até o final do século. Já a política global aqui simulada estabilizaria as emissões anuais em cerca de 60 bilhões de ton. de CO_2-Eq., evidenciando a necessidade do esforço conjunto de todos os países, incluindo grandes emissores como China e Índia. Vale notar que as emissões Globais no cenário Policy_BCA de implementação das tarifas compensatórias pelos países desenvolvidos são praticamente as mesmas do cenário Policy, indicando que essas tarifas não são capazes de evitar o aumento em emissões em países que não implementam políticas climáticas no cenário Policy.

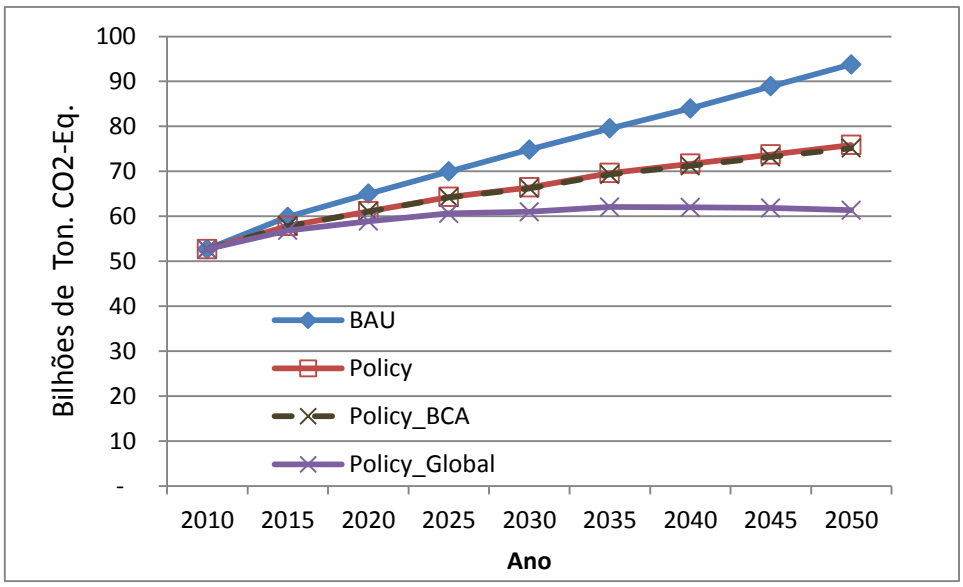


Figura 16 – Trajetória mundial de emissões de gases de efeito estufa nos cenários implementados

As trajetórias de emissões de gases de efeito estufa no Brasil nos cenários simulados são apresentadas na Figura 17 considerando as diferentes fontes emissoras. O modelo prevê uma trajetória crescente em emissões no cenário BAU, com algumas oscilações devido às emissões de mudanças no uso da terra (*Land Use Change* – LUC). As emissões de 2005 e 2010 são calibradas no modelo para refletir os níveis observados no Inventário Brasileiro de Emissões (BRASIL, 2009), e as reduções no desmatamento dos biomas naturais, no caso do ano de 2010. Nos demais anos, as emissões são consequência do funcionamento das economias segundo as hipóteses consideradas na construção do modelo. Dessa forma, a oscilação nas emissões provenientes de mudanças no uso da terra nos anos de 2015 e 2020 reflete tanto a calibração dos parâmetros que regem a transformação de áreas de vegetação natural em áreas de produção agropecuária, baseadas em taxas históricas, quanto na necessidade de calibrar o modelo com menores emissões em 2010 com base nos dados históricos de desmatamento. Dessa forma, em 2015 o modelo parece “compensar” o menor desmatamento em 2010, e como consequência, as emissões em 2020 geradas pelo modelo sofrem o ruído do processo de calibragem de 2010 e ajuste endógeno do modelo em 2015. A partir de então, o modelo projeta emissões constantes provenientes de mudanças no uso da terra, refletindo os parâmetros calculados com base no desmatamento histórico observado desde a década de 1990. O setor agropecuário também apresenta emissões constantes ao longo do tempo, enquanto os demais setores geram emissões crescentes, com destaque para o aumento da participação do setor de outras indústrias (Outros).

Quando da aplicação da política climática no cenário Policy, as emissões provenientes de mudanças no uso da terra são drasticamente reduzidas, até serem completamente zeradas em 2040, o que contribui para uma redução considerável nas emissões totais de gases de efeito estufa do país. As emissões dos setores agropecuários (Agri), outras indústrias (Outros), transportes (Transp.) e indústrias intensivas em energia (Intens. Ener.) são reduzidas gradualmente em comparação com o cenário BAU, levando a uma estabilização nos níveis de emissões do país em cerca de um bilhão de toneladas de CO_2-Eq a partir de 2040. Quando o Brasil não contribui com o esforço de redução em emissões (cenário Policy_BCA_noBRA), a imposição de tarifas compensatórias de carbono sobre o país praticamente não afeta as emissões dos diferentes setores, o que sugere que tais tarifas não são

capazes de evitar os “vazamentos” em emissões, ao menos aqueles que se observariam na economia brasileira.

Já o cenário de acordo global para redução em emissões (Policy_Global) gera reduções nas emissões brasileiras similares às do cenário Policy, contudo, ligeiramente superiores nos setores agropecuários e transportes, e menores emissões no uso de energia, distribuindo de forma mais eficiente os créditos de carbono entre os diferentes setores. Isso é devido à adoção de um mercado único de créditos de carbono ao invés de metas setoriais de controle de emissões como no cenário Policy. Também se torna um demandante líquido de créditos de emissões no mercado internacional, uma vez que gera maiores emissões no total.

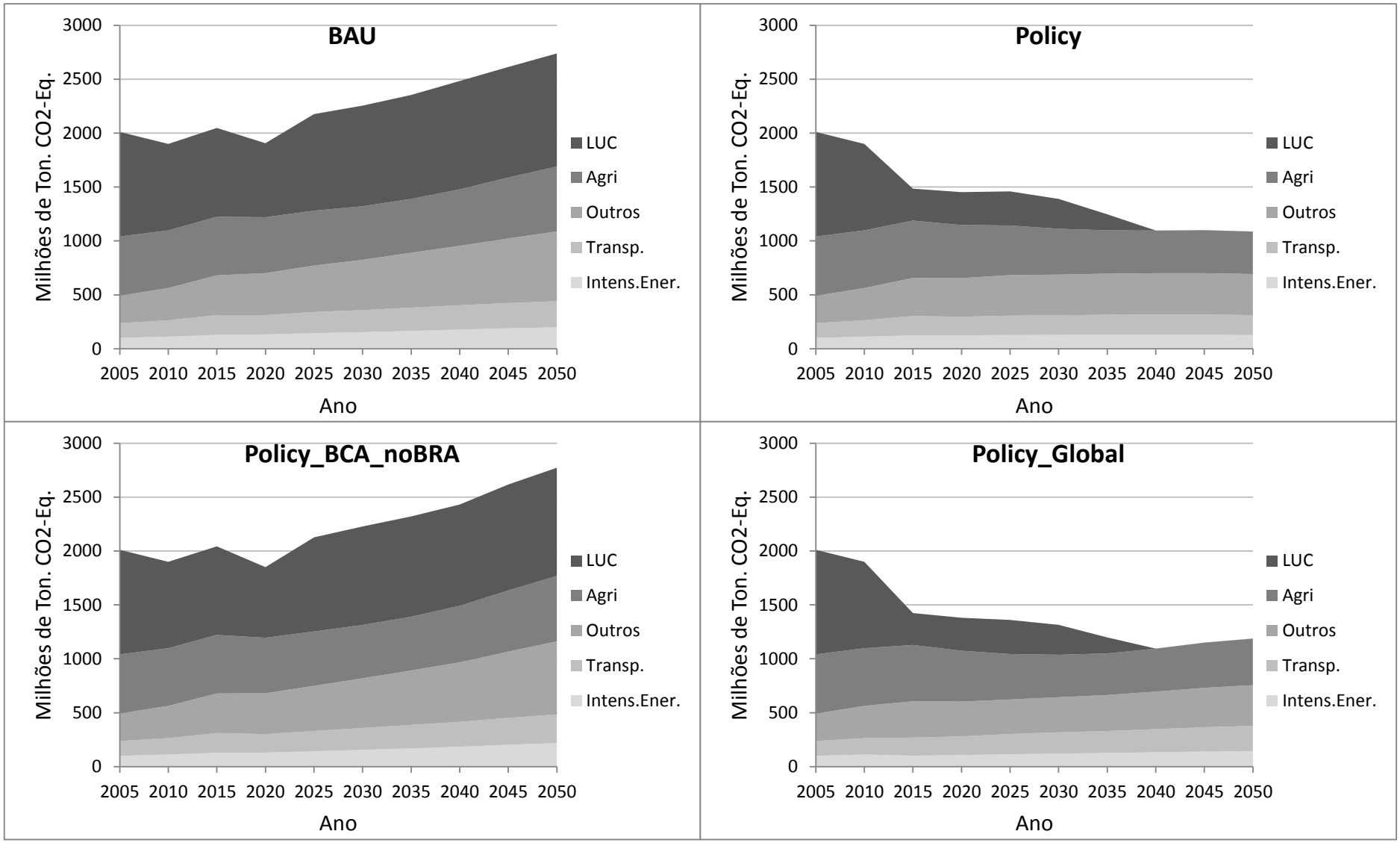


Figura 17 – Trajetórias de emissões de gases de efeito estufa no Brasil

A Tabela 10 apresenta o quanto as trajetórias em emissões dos diferentes cenários de políticas climáticas representam em relação às emissões do cenário de referência no Brasil. No cenário Policy as emissões totais representam 76% das emissões do cenário BAU em 2020, ou seja, um corte de 23% nas emissões brasileiras. Deve-se ressaltar que o corte em emissões previsto pelo Plano Nacional de Mudança do Clima em 2020 é de 36% a 38,9% em relação às emissões do cenário de referência projetado pelo governo, que seriam de cerca de 2.704 milhões de toneladas de CO_2-Eq. Como o modelo EPPA projeta para 2020 um volume de emissões consideravelmente menor, de cerca de 2.000 milhões de ton. de CO_2-Eq., que o do cenário de referência do governo, os cortes em emissões implementados no modelo são propositadamente um pouco menores, respeitando a meta máxima de emissões previstas pelo governo.

Dois aspectos importantes podem ser identificados a partir da Tabela 10. O primeiro diz respeito ao cenário Policy_BCA_noBRA, no qual o Brasil não aplica sua política climática, enquanto os países desenvolvidos e alguns em desenvolvimento continuam aplicando a política, com a imposição de barreiras tarifárias baseadas no conteúdo de carbono pelos países desenvolvidos. Nesse cenário, as emissões brasileiras praticamente não são afetadas, o que significa que os setores brasileiros não incorrem em custos para reduzir as emissões, e que as tarifas de ajustamento de carbono (BCA) pelos países desenvolvidos tem pouco impacto indireto sobre as emissões brasileiras.

O segundo aspecto diz respeito aos cortes em emissões no cenário Policy_Global, no qual um mercado mundial amplo de carbono é implementado. Nesse cenário, as reduções em emissões nos diferentes setores brasileiros são substancialmente diferentes daquelas observadas no cenário Policy, em que a política climática brasileira era determinada setorialmente. Por exemplo, o setor de agricultura, que inclui a produção de culturas, pecuária, silvicultura e florestal, reduz as emissões em 4% no cenário Policy em 9% no cenário Policy_Global em 2020, o que significa que esse setor apresenta oportunidades mais baratas de mitigar os gases de efeito estufa naquele ano, se houvesse um mercado de carbono global em vigor. Enquanto o setor de transportes reduz emissões em 3% no cenário Policy e não precisa reduzir emissões no cenário Policy_Global, sendo portanto, um setor com elevados custos de mitigação em 2020, preferindo adquirir créditos de emissões de setores com oportunidades mais baratas de redução de emissões, como o agropecuário.

Tabela 10 – Índice de emissões nos diferentes cenários de políticas climáticas em relação às emissões no cenário de Referência (BAU)

	2010	2020	2035	2050
	Policy			
Intensivos em Energia	1.00	0.93	0.78	0.64
Transportes	1.00	0.97	0.86	0.76
Outros setores	1.00	0.92	0.75	0.59
Agricultura	1.00	0.95	0.80	0.65
Mudança no uso da terra	1.00	0.44	0.15	0.00
Total	1.00	0.77	0.53	0.40
	Policy_BCA			
Intensivos em Energia	1.00	0.93	0.78	0.64
Transportes	1.00	0.98	0.86	0.76
Outros setores	1.00	0.91	0.75	0.59
Agricultura	1.00	0.95	0.80	0.65
Mudança no uso da terra	1.00	0.44	0.15	0.00
Total	1.00	0.77	0.53	0.40
	Policy_BCA_noBRA			
Intensivos em Energia	1.00	0.99	1.03	1.07
Transportes	1.00	0.98	1.01	1.06
Outros setores	1.00	0.98	0.99	1.03
Agricultura	1.00	1.00	1.00	1.00
Mudança no uso da terra	1.00	0.97	0.97	0.95
Total	1.00	0.98	0.99	1.00
	Policy_Global			
Intensivos em Energia	1.00	0.82	0.78	0.70
Transportes	1.00	1.00	0.97	0.91
Outros setores	1.00	0.84	0.67	0.56
Agricultura	1.00	0.91	0.78	0.71
Mudança no uso da terra	1.00	0.45	0.15	0.00
Total	1.00	0.73	0.52	0.43

Fonte: Resultados da Pesquisa

Isso indica que os cortes diferenciados por setores propostos pelo Plano Nacional de Mudança do Clima não são a forma mais custo-efetivo de se reduzir as emissões, já que, quando se permite que os setores negociem créditos de carbono com os demais e internacionalmente, as oportunidades mais baratas de cortes em emissões são melhores exploradas. Ainda, as emissões totais brasileiras são menores em 2020, o que significa que o país possui nesse ano oportunidades de cortes em emissões relativamente mais baratos que outros países, e portando, é um exportador líquido de créditos de carbono. Essa situação se inverte até 2050, quando o Brasil reduz emissões menos do que o delineado no cenário Policy,

indicando que o país torna-se um comprador líquido de créditos de carbono no mercado internacional.

4.2.2 Impactos sobre o PIB

A Figura 18 apresenta os resultados dos diferentes cenários sobre o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, em relação ao PIB projetado no cenário BAU. A política delineada para 2020 possui impactos bastante modestos sobre o PIB, de queda de 0,28% em relação ao PIB que seria observado no cenário de referência (BAU), o que significa que os impactos de se atingir as metas de redução em emissões previstas no Plano Nacional de Mudanças Climáticas, através de mercados setoriais de carbono, são modestos. Contudo, as perdas em PIB crescem acentuadamente com o tempo, considerando as hipóteses adotadas de incremento nos cortes em emissões em cerca de um ponto percentual ao ano na agropecuária e no uso de energia, o que gera perdas de cerca de 4% do PIB em 2050. Essas perdas representam uma forma de estimar os custos agregados de se perseguir metas de redução em emissões de gases de efeito estufa no Brasil e demais países, ou seja, da transição para uma economia de baixo carbono. Essas perdas não significam que o crescimento do PIB se torna negativo, mas sim, que o PIB cresce a uma taxa menor que no cenário BAU de ausência de políticas climáticas.[16] Pode-se atribuir tais reduções na taxa de crescimento do PIB aos aumentos em custo de produção associados ao pagamento de impostos ao carbono em todas as atividades que emitem gases de efeito estufa, à necessidade de redução no consumo de energia e de aumento na eficiência no uso da mesma, bem como à necessidade de investimentos em capital, trabalho e outros insumos na substituição de insumos e fontes de energia emissora por insumos e fontes de energia mais limpos ou renováveis.[17]

---

[16] Isso significa que a taxa de crescimento do PIB entre os anos de 2010 a 2050 passa de 3,26% ao ano no cenário BAU para 3,16% ao ano no cenário Policy.

[17] Como o modelo adota a hipótese de pleno emprego, mudanças na oferta e demanda de trabalho são acomodadas por variações no salário relativo. As direções das mudanças em PIB são um ótimo indicativo da direção das mudanças esperadas no nível de emprego da economia. A hipótese de pleno emprego evita a modelagem complicada das diferentes teorias e dos diversos fatores que afetam os mercados de trabalho nas regiões representadas no modelo, aspectos ainda carentes de consenso na literatura econômica. A hipótese de pleno emprego equivale à premissa de que a taxa

Deve-se ressaltar, contudo, que esses resultados não levam em conta os benefícios associados ao controle das emissões, ou seja, à redução nos possíveis danos e prejuízos que seriam causados pelas mudanças climáticas no cenário BAU, o que caracterizaria uma análise de custo-benefício. Tais benefícios não são considerados em valores monetários no modelo EPPA pela dificuldade que a ciência possui em identificar e mensurar todos os possíveis prejuízos que seriam causados pelas mudanças climáticas, limitando a capacidade de análises do tipo custo-benefício. Dessa forma, o modelo EPPA permite análises de custo-efetividade das políticas, ou seja, a mensuração dos custos associados a uma determinada meta de redução em emissões, sem auferir os benefícios de tais metas em termos de prejuízos evitados.

Um ponto importante sobre os impactos da política climática em termos de redução do PIB em relação ao cenário de referência (BAU) é o custo estimado, não desprezível, de cerca de 1,4% de queda em 2035 e de 4% em 2050. Esses custos, relativamente elevados, são devido à aplicação da política com metas setoriais diferenciadas de redução em emissões, com créditos de carbono não comercializáveis entre setores.

Essa escolha de aplicação da política climática no Brasil baseia-se nas metas do Plano Nacional de Mudança Climática, que considera reduções em emissões diferenciadas entre agricultura, uso de energia, siderurgia e mudanças no uso da terra. Essas metas devem ser atingidas pela aplicação de diferentes estratégias de mitigação, baseadas em adoção de tecnologia (como o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e o de plantio direto), expansão de fontes renováveis de energia, controle de desmatamento, entre outras, que são específicas aos diferentes setores e, portanto, não permitem o comércio de emissões entre eles. Como a representação de muitas dessas medidas não seria possível no modelo por conta das especificidades técnicas das mesmas e ausência de estimativas de curvas de custo marginal de abatimento para os diferentes setores[18], uma forma direta mais prática de considerar essas políticas foi através dos mercados setoriais de permissões de emissões, que levariam à adoção de tecnologias, redução no

---

natural de desemprego das economias é determinada por fatores estruturais que não são afetados pelos choques simulados no presente estudo.

[18] Curvas que apresentam os custos associados à redução de diferentes níveis de emissões em um dado setor com base nos custos das diferentes tecnologias possíveis de serem empregadas para a redução nas emissões.

consumo de energia e aumento na eficiência energética via mudanças em preços relativos.[19]

Contudo, a aplicação de metas setoriais de reduções em emissões não costuma se apresentar como a política mais custo-efetiva, uma vez que impede que aqueles setores com menores custos de mitigação respondam por maiores cortes em emissões do que setores com custos de mitigação mais elevados. Dessa forma, as perdas em PIB em relação ao cenário de referência observadas no cenário Policy são relativamente elevadas devido a menor custo-efetividade da política setorial considerada. Ou seja, seria possível reduzir os custos da política se esta permitisse maiores cortes em emissões em setores com menores custos de mitigação, o que seria possível através, por exemplo, de mercados amplos de créditos de carbono, que abrangessem todos os setores ao mesmo tempo.

No cenário em que os países desenvolvidos aplicam tarifas compensatórias de carbono (cenário Policy_BCA), as perdas em PIB no Brasil são praticamente as mesmas que no cenário Policy, uma vez que as exportações brasileiras não estão sujeitas ao pagamento das tarifas compensatórias, que neste cenário só são aplicadas a países que não possuem políticas de reduções em emissões.

Se o Brasil não aplicar políticas climáticas mas estiver sujeito às tarifas compensatórias de carbono (cenário Policy_BCA_noBRA), ocorrem ligeiras perdas, inferiores a 0,5% do PIB a cada ano, ao longo de todo o horizonte de política simulado, devido à incidência das tarifas compensatórias de carbono aplicadas pelos países desenvolvidos às exportações brasileiras, bem como por conta da desaceleração da economia dos países desenvolvidos diante das políticas climáticas. Já o cenário de esforço mundial de redução em emissões, cenários Policy_Global, traz impactos bem menores em termos de menor crescimento do PIB (0,06% em 2020, 0,61% em 2035 e 1,7% em 2050) que o cenário Policy, em que um número limitado de países participa dos esforços de redução em emissões. Esse resultado é consequência tanto da capacidade do país de comercializar créditos de carbono com outros países e assim diminuir os prejuízos com os cortes em emissões, quanto do menor custo de mitigação quando da possibilidade dos

---

[19] Na Seção 4.3 de Cenários Tecnológicos buscou-se utilizar informações de outros estudos para estimar e representar curvas de custo marginal de abatimento para os setores de culturas e pecuária e simular os impactos do Plano Nacional de Redução de Emissões na Agropecuária (Plano ABC).

diferentes setores negociarem créditos de carbono para atingir uma meta nacional ou global de redução em emissões, ao invés da aplicação dos mercados setoriais de emissões do cenário Policy.

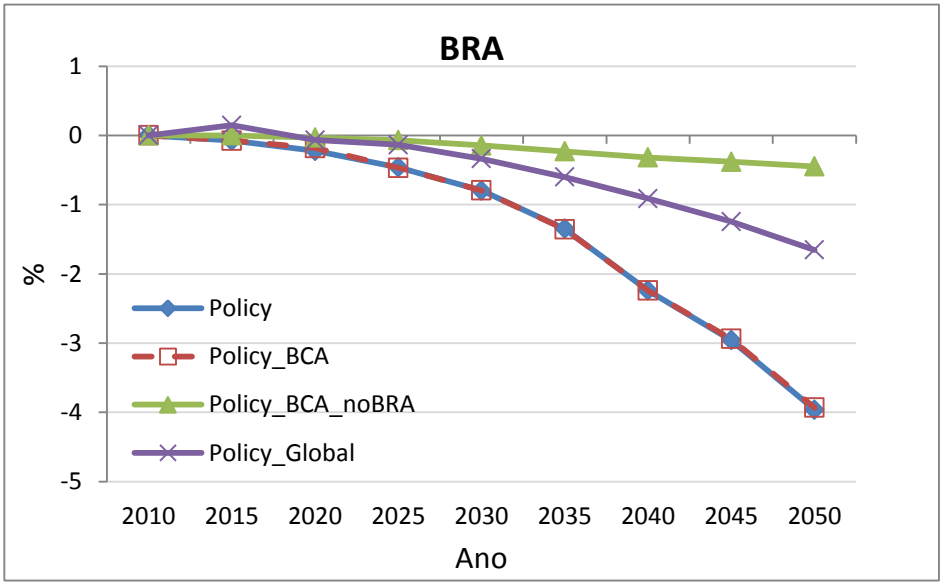


Figura 18 – Mudanças no PIB (%) nos cenários de políticas em relação ao cenário BAU, Brasil

A Figura 19 apresenta os resultados de mudanças no PIB nos diferentes cenários de políticas em relação ao cenário BAU, para as demais regiões do modelo EPPA. Os resultados sugerem padrões similares entre os países desenvolvidos, de quedas maiores e bem mais pronunciadas no PIB no cenário Policy, pequena ou nenhuma diferença entre os resultados do cenário Policy e Policy_BCA, o que significa que a tarifa compensatória de carbono não evita os vazamentos em emissões, e quedas em PIB bem mais modestas no cenário Policy_Global, devido à possibilidade de adquirir créditos de carbono de países em desenvolvimento, e com isso, realizar cortes mais modestos em emissões.

Já as mudanças em PIB nos países em desenvolvimento que se comprometem com reduções em emissões no cenário Policy (MEX e ASI) seguem a mesma lógica dos resultados para o Brasil e para os países desenvolvidos, ou seja, os resultados são bem menos contundentes sob a política climática de alcance global (Policy_Global) do que no cenário de políticas climáticas limitadas a alguns países (Policy). Contudo, no caso da região ASI, nota-se que o cenário Policy_BCA gera resultados ligeiramente menos contundentes que o cenário Policy, uma vez que, com a

aplicação das tarifas compensatórias de carbono, alguns países em desenvolvimento como a China acabam sofrendo restrições às exportações dos seus produtos para países desenvolvidos, cedendo espaço para maiores exportações e aumento na produção da região ASI.

Os demais países em desenvolvimento sofrem modestas reduções em PIB, geralmente inferiores a 1%, no cenário Policy em relação ao cenário BAU, motivadas pela queda na atividade econômica dos países desenvolvidos. As únicas exceções ocorrem no caso dos países do Oriente Médio (MES), que sofrem perdas mais expressivas que os demais países em desenvolvimento devido à dependência nas exportações de petróleo, já que as políticas climáticas diminuem a demanda dos países desenvolvidos por esta fonte de energia, e no caso da Índia (IND), que apresenta aumentos modestos no PIB a partir das políticas climáticas nos países desenvolvidos. O resultado positivo para a Índia sugere que essa economia se beneficia da queda na atividade econômica dos países desenvolvidos, o que pode ser devido à possibilidade de importar energia e bens mais baratos no comércio mundial.

A aplicação de tarifas compensatórias de carbono pelos países desenvolvidos (cenário Policy_BCA) intensifica as quedas em PIB nos países em desenvolvimento que não aplicam políticas climáticas, uma vez que estes sofrem maiores barreiras às suas exportações para os países desenvolvidos, com exceção da Índia, que não é afetada pelas tarifas compensatórias de carbono, o que confirma que os ganhos em PIB experimentados por aquele país estão associados às importações de bens mais baratos no mercado mundial. Já sob o cenário de política climática global (Policy_Global), os países em desenvolvimento experimentam quedas mais pronunciadas na atividade econômica, já que passam a contribuir para o esforço mundial de mitigação das mudanças climáticas pelo corte explícito em emissões. Nesse caso, percebe-se que as perdas em bem-estar são relativamente modestas em relação ao cenário BAU para países como China e Índia e regiões como o Resto da América Latina (LAM), atingindo no máximo 2% de queda em 2050. Esse resultado indica que a relutância dessas nações em participar de um esforço global de corte em emissões não se justifica por razões de queda na atividade econômica agregada do país, ao menos considerando os cortes em emissões simulados no presente estudo.

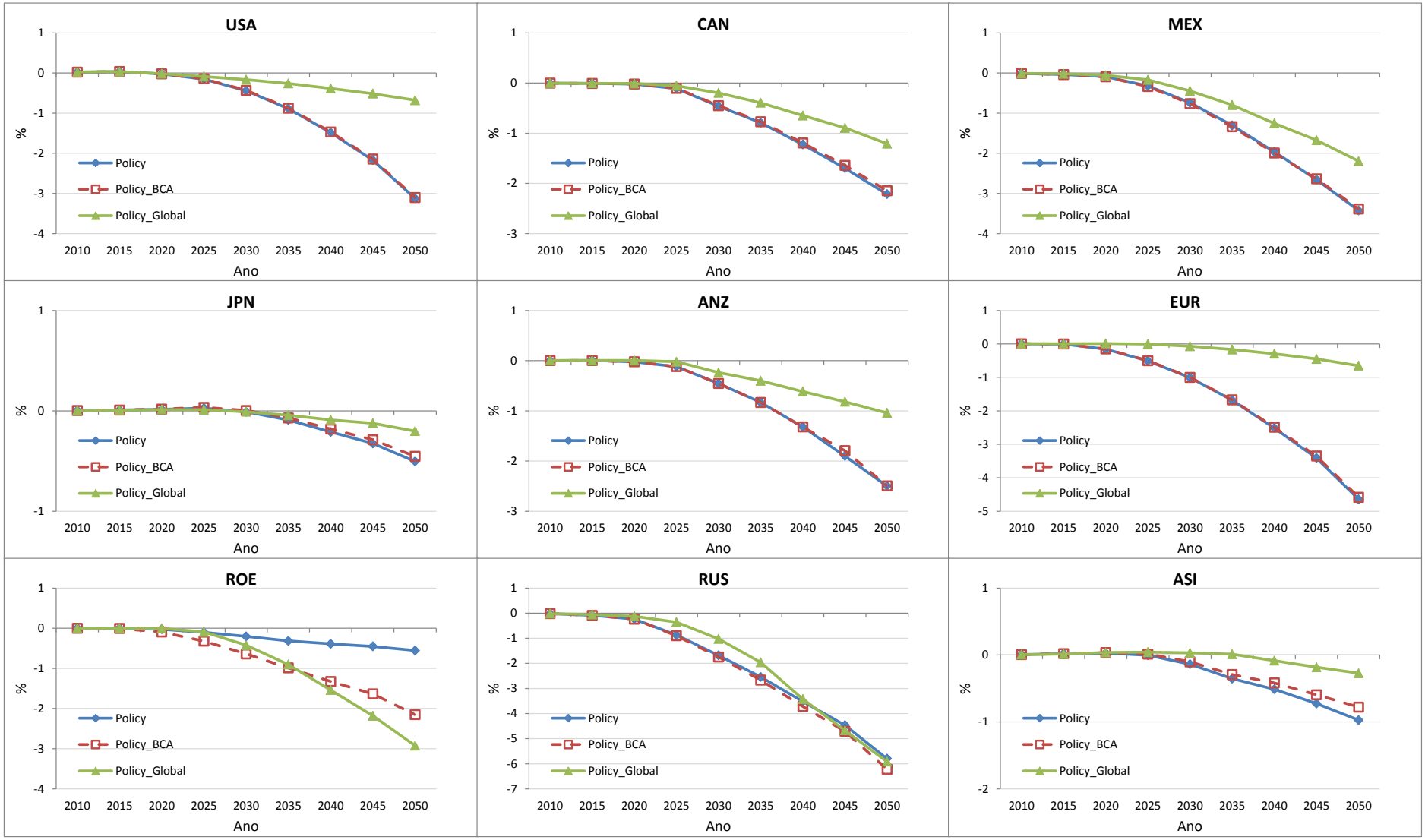


Figura 19 – Variações no PIB (%) nos cenários de políticas em relação ao cenário de Referência (BAU)

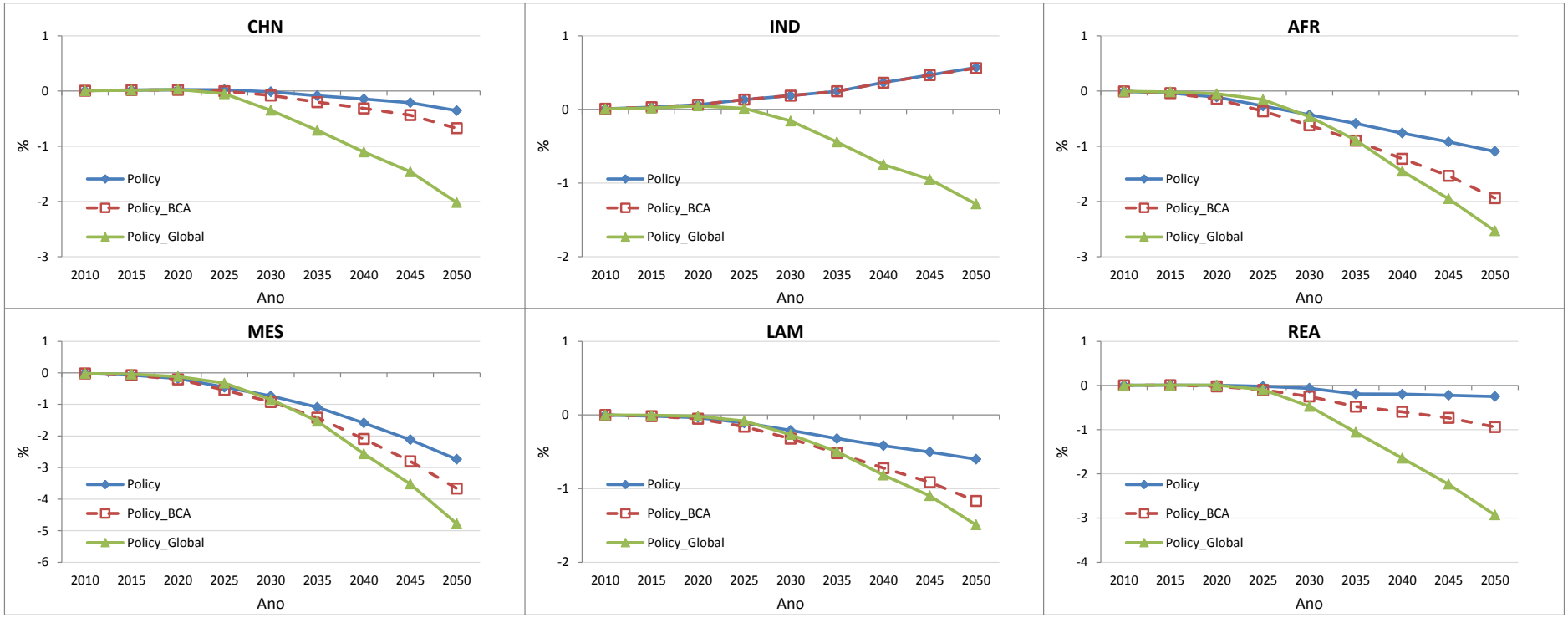


Figura 19 (cont.) – Variações no PIB (%) nos cenários de políticas em relação ao cenário de Referência (BAU)

4.2.3 Impactos sobre o bem-estar no Brasil

A Tabela 11 apresenta os resultados de mudanças em bem-estar na economia brasileira a partir dos cenários de políticas climáticas simulados, em relação ao cenário de referência (BAU). As mudanças em bem-estar são uma boa indicação dos impactos agregados esperados sobre o nível de conforto e satisfação das famílias do país, considerando todas as mudanças em preços de bens e serviços e dos fatores de produção, que em última instância determinam a renda das famílias.[20]

Os resultados para o Brasil indicam que o cenário Policy leva a uma queda no nível de bem-estar entre 0,01% e 0,53% no período de 2015 a 2030, e a partir daí, uma intensificação nas perdas de bem-estar, partindo de 1% de queda em 2035 e atingindo -3,6% em 2050. Esses resultados sugerem impactos modestos até 2030, contudo, efeitos negativos consideráveis a partir de então. Caso os países desenvolvidos adotem tarifas compensatórias de carbono, as perdas em bem-estar no Brasil continuam similares ao do cenário Policy, a não ser no ano de 2020, quando as perdas em bem-estar se tornam bem menores, o que sugere que a aplicação da tarifa compensatória nos países desenvolvidos confere alguma vantagem comparativa para a economia brasileira naquele ano em relação a países que não adotam políticas climáticas e, portanto, está sujeito ao pagamento das tarifas compensatórias quando exportam para os países desenvolvidos.

No cenário em que o Brasil não aplica políticas climáticas, mas está sujeito ao pagamento das tarifas compensatórias de carbono (Policy_BCA_noBRA), o país apresenta perdas de bem-estar bem menos intensas do que quando aplica políticas climáticas, apesar das perdas serem persistentes. Isso significa que a imposição das tarifas compensatórias sobre as exportações brasileiras é capaz de afetar em algum grau o bem-estar do consumidor brasileiro, uma vez que a competitividade relativa do país diminui, comprometendo a geração de renda via exportações. Quando a política climática global é simulada (cenário Policy_Global), o Brasil apresenta

---

[20] As mudanças em bem-estar são mensuradas na forma de variação equivalente Hicksiana, o que significa que expressam a compensação na renda necessária para que os consumidores retornem ao nível de utilidade (ou curva de indiferença) inicial, após todas as mudanças em preços relativos provocadas pelo choque de política. Em termos menos técnicos, podem ser interpretadas como a mudança no nível de consumo das famílias, considerando tanto as mudanças em renda quanto nos preços dos bens.

ganhos de bem-estar no primeiro período, o que é consequência da exportação de créditos de carbono para outros países. Contudo, perdas em bem-estar ocorrem a partir de 2020, porém substancialmente mais modestas que no cenário Policy, uma vez que os mercados de carbono são aplicados de forma ampla no país e internacionalmente, incluindo as economias em desenvolvimento. Essas perdas são ligeiramente maiores que no cenário Policy_BCA_noBRA, em que o Brasil não aplica políticas, mas está sujeito às tarifas compensatórias de carbono. Apesar de esse resultado sugerir que o país deveria se aliar a outros relutantes em aplicar políticas climáticas, do ponto de vista do bem-estar agregado a participação do país em um esforço global de redução em emissões seria uma opção razoável, uma vez que traz resultados próximos ao do cenário de não participação nesse esforço. As menores perdas em bem-estar no cenário Policy_BCA_noBRA explica de certa forma a relutância comum de muitos países em desenvolvimento em participar de esforços mundiais de redução em emissões, uma vez que a não participação pode trazer menores perdas.

Tabela 11 – Mudanças em bem-estar nos cenários de política em relação ao cenário BAU (%)

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Policy	-0.01	-0.21	-0.24	-0.53	-1.02	-1.94	-2.65	-3.61
Policy_BCA	-0.01	-0.05	-0.29	-0.52	-1.05	-1.95	-2.62	-3.57
Policy_BCA_noBRA	0.00	-0.15	-0.04	-0.16	-0.27	-0.49	-0.69	-0.91
Policy_Global	0.59	-0.04	-0.05	-0.19	-0.32	-0.52	-0.83	-1.22

Fonte: Resultados da pesquisa.

4.2.4 Impactos sobre a produção setorial no Brasil

As Figuras 20 a 24 apresentam as mudanças percentuais na produção brasileira dos diferentes setores representados no modelo EPPA para os vários cenários de políticas climáticas. As mudanças percentuais são calculadas em relação à produção observada no cenário de referência (BAU). Outra forma de analisar as variações na produção provocadas pelos cenários de políticas é através das taxas anuais de crescimento dos setores sob os diferentes cenários considerados em relação ao nível de produção no ano de 2010, apresentadas na Tabela 12.

As variações em produção nos setores de culturas (CROP), pecuária (LIVE) e indústria de alimentos (FOOD) são bastante similares em direção e magnitude (Figura 20). Esses setores geralmente experimentam quedas na produção quando da implementação das políticas nos países desenvolvidos e em alguns países em desenvolvimento (cenários Policy e Policy_BCA) em relação ao cenário de referência. Tais quedas em produção são desprezíveis no ano de 2020, alcançam entre 2% e 4% em 2035 e podem chegar a 12% de queda em 2050. Apenas o setor de Culturas (CROP) apresenta ganhos em 2020, inferiores a 1%, quando os países desenvolvidos impõem barreiras tarifárias aos países que não aplicam políticas climáticas, o que afeta positivamente a competitividade do produto brasileiro, aumentando seu acesso aos mercados das nações desenvolvidas.

Já no cenário em que o Brasil não aplica políticas climáticas, mas enfrenta as tarifas compensatórias (cenário Policy_BCA_noBRA), a produção do setor de culturas (CROP) sofre as maiores quedas, mas que são inferiores a 1% em relação à produção observada no cenário de referência. Isso significa que as tarifas compensatórias aplicadas pelos países desenvolvidos impactam pouco a produção desses setores quando o Brasil não aplica políticas climáticas, uma vez que a produção desses países sofre forte queda e é mais intensiva em emissões que a brasileira.

No cenário de política climática global (Policy_Global), as quedas em produção agropecuária e de alimentos são maiores em 2020 e 2035 e ligeiramente menores em 2050 que no cenário de política Policy. Como nesse cenário os diferentes setores e países podem comercializar créditos de carbono, os impactos mais pronunciados em 2020 e 2035 indicam que esses setores possuem menores custos de abatimento para o nível total de redução em emissões projetados para aqueles anos, tornando-se ofertadores líquidos de créditos de emissões. Já em 2050 as quedas em produção menos pronunciados nos setores CROP, LIVE e FOOD no Brasil indicam que a política setorial implementada no cenário Policy impõe cortes em emissões nesses setores proporcionalmente mais elevados do que em outros setores da economia do ponto de vista do custo de abatimento por unidade de emissão. Dessa forma, ao estabelecer um mercado único mundial de carbono, esses setores podem negociar créditos de carbono de forma a reduzir menos suas emissões que as metas originalmente traçadas. Vale ressaltar que os impactos negativos sobre a produção agropecuária nos cenários de políticas climáticas são

consequência da necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa associados ao processo produtivo, como o CH_4 e o N_2O, o que é possível a partir de reduções na produção e/ou da adoção de práticas agrícolas e tecnologias mais caras que permitam a produção com menores níveis de emissões.

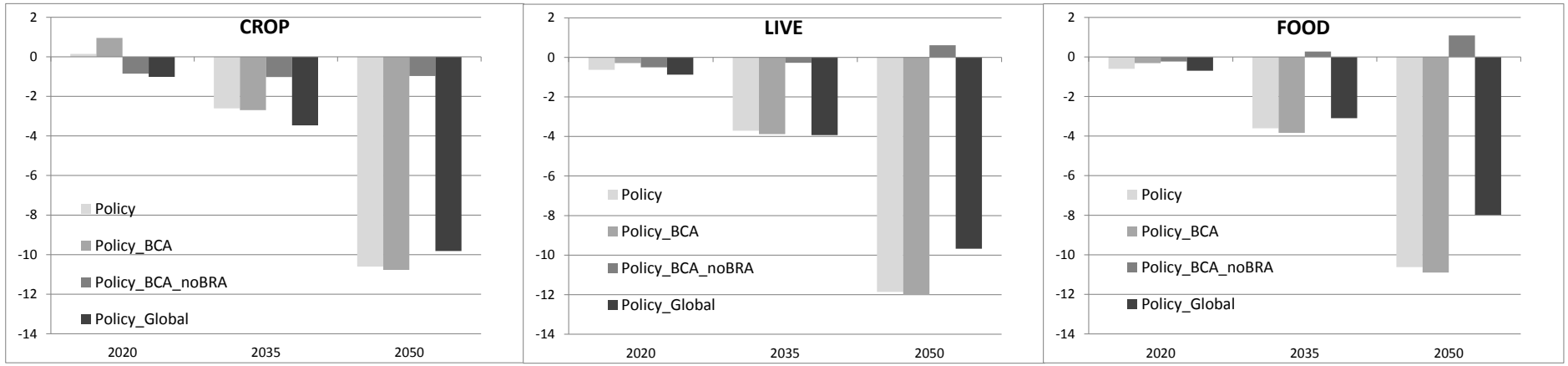


Figura 20 – Variações na produção brasileira (%) dos setores agropecuários e de alimentos nos cenários de políticas em relação ao cenário de Referência (BAU)

Essas mudanças na produção dos setores agropecuários e de alimentos se traduzem em pequenos desvios na trajetória de crescimento dos mesmos, como pode ser observado pela Tabela 12. A taxa de crescimento do setor de culturas, que no cenário de referência é de 2,09% até 2020, 2,37% até 2035, e de 2,82% até 2050, em relação à produção em 2010, reduz-se no mínimo para 1,98%, 2,23% e 2,53%, respectivamente. Esses resultados indicam um efeito relativamente pequeno das políticas consideradas sobre os setores agropecuários e de alimentos, apesar da agropecuária brasileira ser uma das mais afetadas negativamente, em termos relativos, nos cenários de políticas climáticas analisados. Efeitos negativos mais pronunciados sobre a agropecuária brasileira estão relacionados à aplicação da política climática através de mercados de carbono setoriais, que impedem a comercialização de créditos de emissões entre setores e, portanto, impõem elevados custos a setores intensivos em emissões não associadas ao consumo de energia, como a agricultura.

Já os setores mais intensivos em energia, quais sejam os de químicos, borracha, plásticos e papel (CRP), de siderurgia e metalurgia (STEEL), de manufatura de metais não ferrosos como alumínio, zinco e cobre (ALUM) e de manufatura de minerais não metálicos como o cimento e o vidro (CIME), apresentam em comum o comportamento de pequenas mudanças na produção nos cenários de políticas em relação à produção do cenário de referência no ano de 2020, geralmente inferiores a 2%, como pode ser observado na Figura 21. Outro resultado comum a esses setores é o de aumento na produção nos cenários em que o Brasil aplica cortes em emissões especificados setorialmente (cenários Policy e Policy_BCA) em 2020, e quedas posteriormente nos anos de 2035 e 2050. Os aumentos de produção observados em 2020 indicam que o nível dos cortes em emissões (de cerca de 6% nas emissões advindas do uso de energia) pode ser absorvido pelos mesmos de forma barata relativamente aos demais setores da economia, levando ao deslocamento de fatores produtivos para estes setores intensivos em energia. Ainda, a aplicação da tarifa compensatória de carbono nos países desenvolvidos favorece esses setores no Brasil naquele ano, por limitar as exportações de países em desenvolvimento que não aplicam políticas climáticas. Contudo, a intensificação dos cortes em emissões nos anos posteriores acaba tornando o abatimento de emissões caro, forçando a queda da produção em 2035 e 2050.

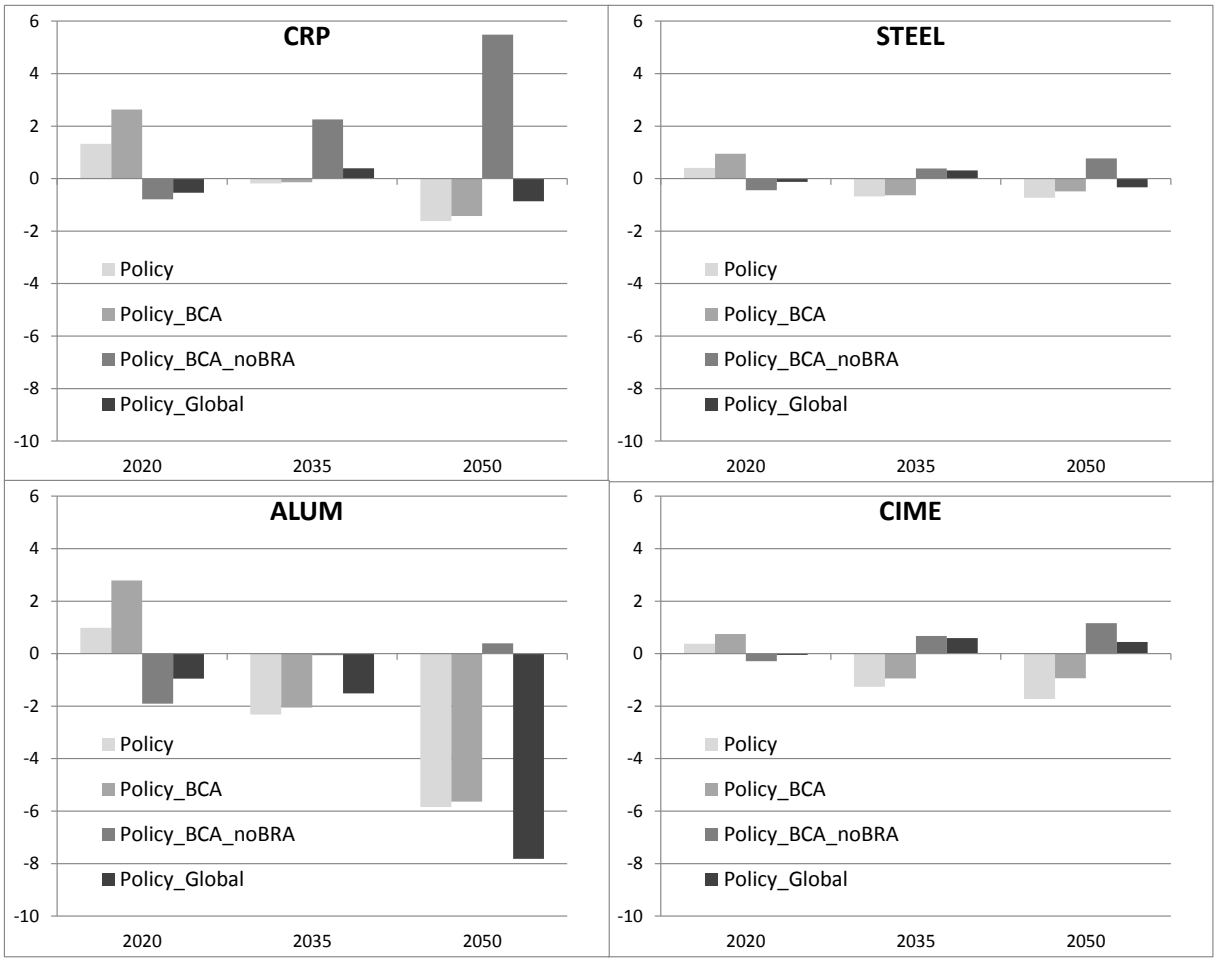


Figura 21 – Variações na produção brasileira (%) dos setores intensivos em energia nos cenários de políticas em relação ao cenário de Referência (BAU)

O setor de metais não ferrosos (ALUM) enfrenta as maiores reduções relativas em produção, de cerca de 2% em 2035 e quase 6% em 2050, consequência da menor capacidade deste setor em substituir fontes de energia e reduzir emissões no seu processo produtivo em comparação com os demais setores da economia, levando à perda de fatores produtivos para esses outros setores. Nota-se que no cenário Policy_BCA as perdas são ligeiramente menores do que no cenário Policy para todos os setores, o que significa que as tarifas compensatórias cobradas pelos países desenvolvidos no cenário Policy_BCA possuem um pequeno efeito de diminuir a vantagem comparativa daqueles países que não aplicam políticas climáticas.

Quando o país não faz parte do grupo de nações aplicando políticas climáticas (cenário Policy_BCA_noBRA) os setores intensivos em energia são afetados negativamente em 2020 e positivamente em 2035 e 2050, apesar de que em

magnitudes muito pequenas. Isso significa que as tarifas compensatórias de carbono impostas pelos países desenvolvidos possuem pequeno impacto sobre o país, seja pelo volume relativamente pequeno de exportações brasileiras em alguns setores, seja pela matriz energética relativamente mais limpa no Brasil do que em outros países em desenvolvimento, que se traduzem em menores tarifas compensatórias aplicadas ao produto brasileiro. Contudo, o setor de químicos, plásticos, borracha e papel (CRP) apresenta-se como exceção, pelo elevado aumento na produção deste setor no cenário Policy_BCA_noBRA. Tal resultado é consequência do maior uso de eletricidade por este setor, que significa baixos coeficientes de emissões por unidade produzida no Brasil e, portanto, menores tarifas de ajustamento de carbono no comércio internacional. Dessa forma, o Brasil sofre menores restrições às exportações desse setor do que outros países e outros setores da economia, tornando o mesmo mais atrativo aos investimentos e emprego. Já sob o cenário de política climática global, enquanto os setores de químicos, plásticos, borracha e papel (CRP) e de siderurgia e metalurgia (STEEL) sofrem pequenas perdas, o setor de metais não ferrosos (ALUM) apresenta perdas de cerca de 2% em 2035 e perdas bem mais pronunciadas em 2050, de quase 8%. Esse resultado indica que, entre os setores intensivos em energia, o setor ALUM é o mais prejudicado pelas políticas climáticas, perdendo capacidade de competir por recursos econômicos com outros setores da economia, mesmo na possibilidade de adquirir créditos de emissões de setores com menores custos de redução em emissões.[21]

É importante ressaltar que as mudanças percentuais em produção nos setores intensivos em energia, apesar de serem modestas, revelam importantes respostas da produção brasileira à aplicação de políticas climáticas domésticas e internacionais. As mudanças em produção diante das políticas revelam que os cortes em emissões mudam a competitividade relativa de um setor em relação aos demais, levando à realocação de fatores produtivos em direção aos setores com maior capacidade de reduzir emissões e/ou consumo de energia fóssil, bem como

---

[21] Vale indicar que esse setor sofre perdas em produção mais pronunciadas que as observadas no Brasil do que em outras regiões do modelo, como por exemplo, quedas de 15% na Índia e 12,5% na região Leste da Europa (ROE) em 2050. Contudo, a produção de alguns países como os das regiões do Leste Asiático (ASI), da União Europeia, Japão e EUA aumentam no cenário de política climática global, indicando que esses países possuem opções tecnológicas mais baratas que os demais para reduzir emissões e/ou maior capacidade para adquirir créditos de emissões de outros setores e países.

afetam a competitividade relativa nos mercados internacionais, tanto por conta de diferenças na matriz energética quanto no conteúdo de carbono associado ao valor de cada bem. Dessa forma, as políticas provocam mudanças em custos relativos que podem ser mais favoráveis ou prejudiciais em alguns setores e países.

As mudanças na produção dos setores intensivos em energia nos cenários de políticas se traduzem em variações modestas na trajetória de crescimento desses setores. A Tabela 12 evidencia que a taxa de crescimento anual do setor CRP, em relação ao ano de 2010, é mais afetada positivamente quando o Brasil não adota política climática (cenário Policy_BCA_noBRA) aumentando de 3,08% no cenário de referência para até 3,35% em 2020, de 3,17% para 3,27% em 2035, e de 3,10% para 3,23% em 2050. Já os setores STEEL e CIME apresentam variações em suas taxas de crescimento nos cenários de políticas geralmente inferiores a 0,06 pontos percentuais em relação ao cenário de referência. O setor ALUM é o mais afetado negativamente por políticas climáticas, sendo o impacto mais pronunciado o de queda da taxa de crescimento do setor de 2,81% no cenário de referência em 2050 para 2,60% no cenário de política global.

Os setores de outras indústrias (OTHR) e de serviços (SERV) apresentam mudanças bastante modestas em produção, geralmente inferiores a 1% em módulo (Figura 22). Contudo, enquanto o setor OTHR apresenta aumentos em produção em alguns anos e cenários, o setor SERV sofre impactos negativos em praticamente todos os anos e cenários. Os resultados positivos para o setor OTHR refletem a menor intensidade de emissões desse setor, bem como certa facilidade em trocar fontes de energia fósseis por renováveis, enquanto os impactos negativos para o setor SERV são mais influenciados pela queda na demanda setorial por conta da diminuição da renda doméstica agregada, uma vez que serviços não são transacionados internacionalmente. As maiores perdas para o setor de serviços relativas ao cenário de referência são observadas nos cenários Policy e Policy_BCA, justamente os de maior impacto negativo em PIB e no bem-estar.

O setor de transportes (TRAN) é bastante afetado negativamente pelas políticas climáticas setoriais implementadas no Brasil nos cenários Policy e Policy_BCA. As quedas em produção neste setor vão de 2,9% em 2020, passando por 10,8% em 2035 e atingindo 18,2% em 2050. Esse resultado revela a baixa disponibilidade de alternativas aos combustíveis fósseis para o uso neste setor, menor capacidade de ganhos em eficiência, bem como uma política setorial brasileira que coloca um peso

desproporcional sobre este setor em relação ao seu custo de mitigação mais elevado. Deve-se ressaltar que, apesar da possibilidade do uso de biocombustíveis em parte da frota brasileira de automóveis de passeio, o setor de transporte abarca todo o transporte aéreo, hidroviário, e de carga rodoviário, o que torna a capacidade de substituição dos derivados de petróleo pelos biocombustíveis relativamente limitada. Já o cenário de política climática global (Policy_Global) produz impactos negativos bem menos expressivos sobre esse setor, de queda de apenas 3,9% na produção em 2050, reforçando a assertiva de que a política setorial do cenário Policy desconsidera os elevados custos de mitigação neste setor. Sob a política global, o setor pode adquirir créditos de emissões de outros setores e países a custos bem menores que os da adoção de tecnologias setoriais mais limpas ou de maior eficiência no uso de energia.

Em termos de trajetórias setoriais de crescimento, a taxa anual de crescimento dos setores OTHR e SERV permanece praticamente a mesma em todos os cenários simulados (Tabela 12). Já o setor de transportes sofre mudanças consideráveis em taxas de crescimento. No cenário de referência o setor cresce cerca de 3,6% a.a de 2010 a 2020, 3,4% até 2035 e 3,2% até 2050. Essas taxas reduzem-se a 3,3% em 2020, 2,9% em 2035 e 2,7% em 2050 nos cenários Policy e Policy_BCA, o que significa mudanças expressivas na trajetória de crescimento de longo prazo do setor.

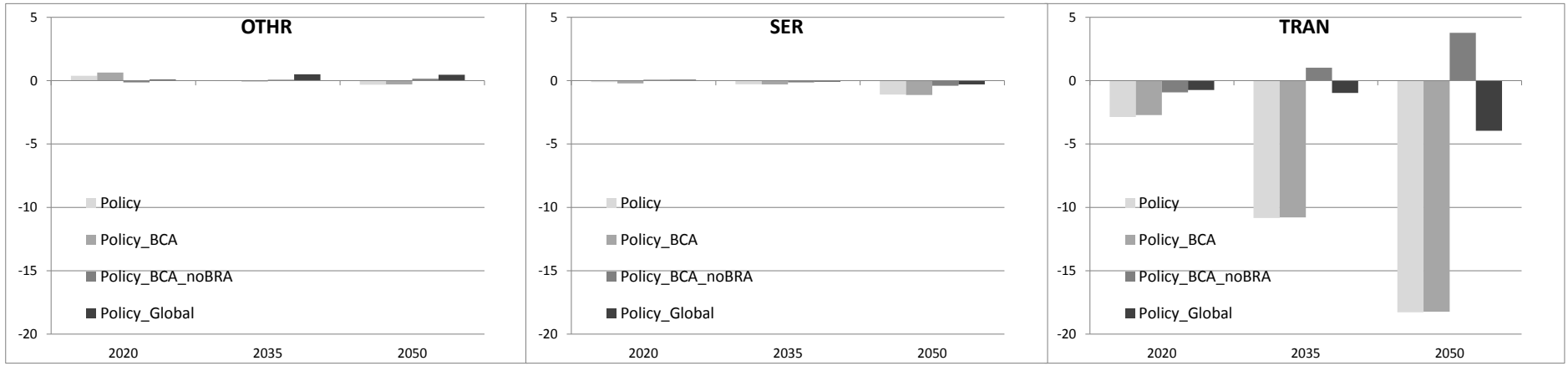


Figura 22 – Variações na produção brasileira (%) dos setores de outras indústrias, serviços e transportes nos cenários de políticas em relação ao cenário de Referência (BAU)

Os setores brasileiros produtores de energia fóssil são, em geral, impactados negativamente pelas políticas climáticas (Figura 23). Tais impactos são esperados, uma vez que as políticas buscam reduzir as emissões de gases de efeito estufa causadas em grande parte pelo uso dessas fontes de energia. As políticas climáticas dos cenários Policy e Policy_BCA promovem quedas pouco expressivas na produção de energia em 2020, uma vez que os cortes setoriais nas emissões advindas do uso de energia são relativamente modestos (6%). Os impactos percentuais mais pronunciados são observados no setor de produção de carvão (COAL), e podem atingir quedas de até 43% em 2050 em relação à produção no cenário de referência. A produção de carvão também se reduz no cenário em que o Brasil não aplica políticas climáticas (Policy_BCA_noBRA), como consequência da imposição das tarifas compensatórias de carbono pelos países desenvolvidos, que tende a forçar a substituição do carvão por fontes menos emissoras, como o gás natural. Devido à pequena importância do setor de carvão na matriz energética brasileira e valor da produção pouco expressivo, as quedas percentuais nesse setor não devem significar maiores desafios para a produção de energia no Brasil.

O setor de gás natural (GAS) também sofre impactos percentuais negativos consideráveis em sua produção. Como o gás natural possui menor conteúdo de carbono que o carvão, sofre quedas um pouco menos pronunciadas que o carvão. Contudo, na medida em que as metas de cortes em emissões são intensificadas, a substituição de carvão por gás natural torna-se mais limitada, e as quedas na produção de gás natural atingem 18% em 2035 e 37% em 2050. Já no cenário de política climática global (Policy_Global) as reduções na produção de gás natural, apesar de expressivas, são menos intensas que as observadas para o carvão, reflexo da possibilidade de substituição entre essas fontes.

A produção de petróleo bruto (OIL) também tende a ser impactada negativamente com a implementação das políticas climáticas em todos os cenários simulados, porém, as quedas em produção tendem a ser mais modestas que as observadas nos setores de carvão e gás. Tais quedas variam de 0,5% a 15%, dependendo do cenário e ano considerado. Os impactos mais pronunciados são observados nos cenários Policy e Policy_BCA no ano de 2020. Uma das razões para o forte impacto percentual neste ano é a expansão acelerada do setor no cenário de referência, provocado pelos investimentos previstos e em andamento para desenvolvimento de maior capacidade produtiva, que são considerados exógenos no modelo por conta

dos planos de expansão na exploração de novas reservas, incluindo as do pré-sal. Diante da política setorial restritiva às emissões, esse setor sofre forte queda na produção em termos relativos. A redução nas exportações (que será discutida na próxima seção) também é um fator preponderante na queda da produção em 2020, que é ainda mais drástica diante das barreiras de ajustamento ao carbono nos países desenvolvidos. Já os impactos negativos menos pronunciados nos anos de 2035 e 2050 são consequência de uma forte dependência da matriz energética brasileira dessa fonte de energia, bem como do crescimento mais modesto da produção no cenário de referência naqueles anos.

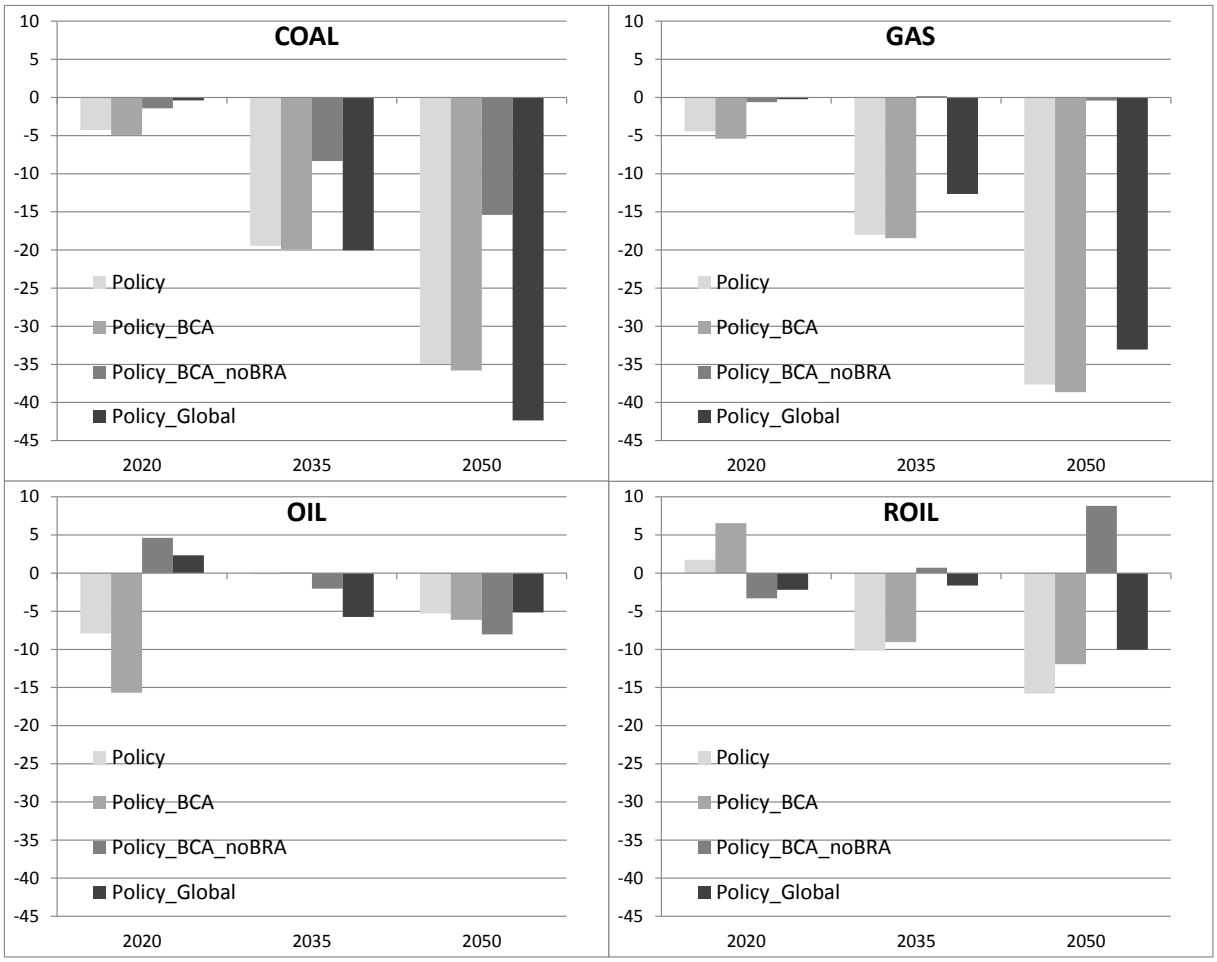


Figura 23 – Variações na produção brasileira (%) dos setores de energia fóssil nos cenários de políticas em relação ao cenário de Referência (BAU)

O setor de refino do petróleo (ROIL) também tende a ser afetado negativamente pelas políticas climáticas, uma vez que seu principal insumo é o petróleo bruto. Contudo, o setor aumenta a produção em 2020 nos cenários Policy e Policy_BCA.

Esse resultado é oposto ao observado no setor de petróleo bruto, e guarda uma relação muito próxima com este. Sob políticas climáticas nos países desenvolvidos e em alguns países em desenvolvimento incluindo o Brasil, o setor de petróleo brasileiro reduz suas exportações, uma vez que os principais mercados de destino são os países em desenvolvimento e o uso do insumo petróleo (OIL) no setor de refino daqueles países gera um produto (ROIL) com conteúdo de carbono ligeiramente superior naqueles países em comparação com o produto brasileiro. Dessa forma, com a implementação de políticas de pequenos cortes em emissões, como é o caso do ano de 2020, os países desenvolvidos substituem parte do seu produto ROIL pelo produto brasileiro, bem como deixam de importar o petróleo bruto nacional, uma vez que o conteúdo de carbono do produto refinado no modelo é determinado pela indústria de refino do país, e não pelo petróleo bruto usado como insumo. Sob o cenário Policy_BCA em 2020 as exportações de ROIL do Brasil em direção a países como os EUA são ainda maiores, uma vez que a tarifa compensatória de carbono impede a entrada desse produto de outros países em desenvolvimento, o que está relacionado com uma queda ainda maior nas exportações brasileiras de OIL. Esse efeito das exportações brasileiras de ROIL substituírem as exportações de OIL acontecem apenas no ano de 2020, devido aos pequenos cortes em emissões implementados naquele ano e, portanto, devem ser interpretadas como uma possibilidade mais próxima à exceção do que regra, dadas as condições geradas pelas hipóteses de políticas implementadas no presente estudo. Dessa forma, em 2035 e 2050 a aplicação de cortes setoriais em emissões no Brasil e políticas climáticas nos países desenvolvidos produz forte queda na produção da indústria de refino do petróleo, devido ao elevado conteúdo de carbono desse produto, acompanhando a retração da indústria de transportes.

No cenário Policy as quedas na produção do setor ROIL são mais pronunciadas do que no cenário de aplicação de tarifas compensatórias (Policy_BCA) nos anos de 2035 e 2050, uma vez que o produto brasileiro não precisa pagar tais tarifas quando direcionado aos países desenvolvidos, enquanto os demais países em desenvolvimento sofrem a imposição da tarifa. Já no cenário em que o país não aplica políticas climáticas, mas enfrenta tarifas compensatórias de carbono, o efeito das tarifas não é capaz de reduzir a produção brasileira de petróleo refinado. Este resultado deve-se ao direcionamento da produção de petróleo refinado para o consumo doméstico, para atender principalmente ao aumento da demanda do setor

de transporte nesse cenário. Já no cenário de política climática global (Policy_Global), a produção brasileira de petróleo sofre quedas de 2% e 10% em 2035 e 2050, respectivamente, apesar de menores que nos cenários de aplicação de políticas climáticas setoriais no Brasil. Esses resultados acompanham os observados para o setor de transportes, principal demandante dos produtos do setor de petróleo refinado.

As taxas anuais de crescimento da produção dos setores de energia, em relação ao ano de 2010, mostram que o setor de extração de petróleo (OIL) é o setor que mais deve crescer na economia até 2020 no cenário de referência, de 4,92%, por conta dos investimentos previstos para o mesmo. As políticas climáticas setoriais podem reduzir essa taxa de crescimento a níveis entre 3,15% e 4,07%, devido à menor demanda por esse produto nos países que impõem políticas climáticas. As taxas de crescimento esperadas para o setor de petróleo no cenário de referência para os anos de 2035 e 2050 são menores, de 2,98% e 2,07%, respectivamente. Essas taxas também são impactadas negativamente pelas políticas climáticas, atingindo no mínimo 2,73% em 2035 e 1,86% em 2050.

O setor de gás natural (GAS) também apresenta taxas de crescimento elevadas no cenário de referência, de 4,29% até 2020, 4,15% até 2035 e 3,88% até 2050. Essas taxas são bastante impactadas pelas políticas climáticas, podendo ser reduzidas a até 3,71%, 3,3% e 2,62%, nos respectivos anos, dependendo do cenário de política considerado.

Já o setor de refino de petróleo (ROIL) possui taxa de crescimento mais modesta nos cenários de referência que os setores OIL e GAS, em parte por conta do direcionamento da produção de petróleo cru para exportações e investimentos menores na ampliação da capacidade de refino. A taxa de crescimento desse setor pode aumentar no cenário em que o país não aplica políticas climáticas (Policy_BCA_noBRA), saindo de 1,93% no cenário de referência para 2,58% em 2020, e de 1,45% para 1,66% em 2050. Esse aumento está relacionado à menor capacidade de exportar tanto o petróleo cru quanto o refinado nesse cenário, que aumentam a oferta doméstica e reduzem o preço do produto refinado, que passa a ser mais consumido internamente.

O setor de geração de eletricidade apresenta resultados que seguem a mesma direção dos impactos sobre a economia como um todo, ou seja, as mudanças no PIB e no consumo agregado (Figura 24). A aplicação de políticas climáticas nos

países desenvolvidos e em alguns países em desenvolvimento (cenário Policy) reduz a produção de energia elétrica no Brasil, como consequência da redução na demanda total por energia. A aplicação de tarifas compensatórias nos países desenvolvidos (cenário Policy_BCA) não altera os resultados do cenário Policy para o setor de energia elétrica, já que a mesma não é exportada diretamente para aqueles países. O cenário em que o Brasil não impõe políticas climáticas, mas enfrenta tarifas compensatórias pelos países desenvolvidos, permite um pequeno incremento na produção de energia elétrica no país, de forma a atender ao crescimento de setores industriais como o de químicos, borracha, plásticos e papel (CRP) e de alimentos (FOOD). Já no cenário de política climática global (Policy_Global), a produção de energia elétrica é impactada negativamente, uma vez que a produção e o consumo dos demais setores na economia tende a diminuir para atingir as metas de reduções em emissões. Note-se, porém, que os impactos são menos pronunciados nesse cenário do que nos cenários de políticas setoriais (Policy e Policy_BCA), já que a política global é mais custo-efetiva do que as políticas setoriais.

O modelo projeta que o setor de produção de eletricidade possui taxa de crescimento de 2,36% ao ano até 2020, 2,16% até 2035 e 2,04% até 2050 no cenário de referência, em relação à produção de 2010 (Tabela 12). Essa taxa de crescimento é impactada negativamente nos cenários em que o país adota políticas climáticas, podendo ser reduzida a 2,30% em 2020, 1,98% em 2035 e 1,77% em 2050.

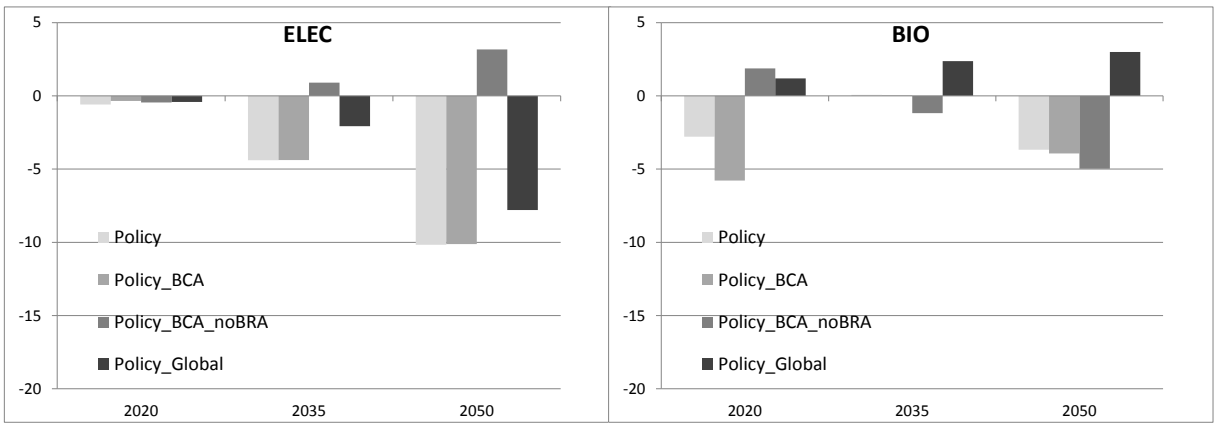


Figura 24 – Variações na produção brasileira (%) dos setores de eletricidade e biocombustíveis nos cenários de políticas em relação ao cenário de Referência (BAU)

O último setor energético de interesse na análise é o de produção de biocombustível (BIO), que no modelo é representado pelo etanol gerado a partir da cana-de-açúcar. A Figura 24 apresenta os resultados de mudanças em produção para este setor. Apesar de ser um substituto potencial para o uso de petróleo refinado no setor de transportes diante de políticas climáticas, já que geram menores níveis de emissões, este setor também sofre alguns impactos negativos na produção, em relação ao cenário de referência, porém menos expressivos que dos demais setores energéticos. As quedas em produção estão relacionadas, na sua maioria, com a redução no consumo de combustíveis para transporte pelas famílias. Vale ressaltar que apenas uma parcela da frota de automóveis brasileiros possui a capacidade de substituir petróleo e biocombustível, enquanto existe a obrigatoriedade de adição de uma parcela de etanol à gasolina comum, o que gera uma relação mista de substituição quando do uso do etanol nos carros *flex-fuel* por um lado, e, por outro, complementariedade com a gasolina por conta das exigências de mistura entre esses combustíveis. Ainda, as políticas climáticas possuem um efeito de redução na atividade econômica agregada, com quedas na produção de serviços de transportes. Dessa forma, a menor produção no setor de biocombustíveis em relação ao cenário de referência, quando ocorre, é consequência da redução na produção do setor de transportes, da relação de complementariedade entre gasolina e etanol, e da capacidade limitada de substituição do petróleo refinado pelo etanol.

Nos cenários Policy e Policy_BCA as quedas em produção de biocombustíveis ocorrem em 2020 e em 2050, chegando a cerca de 5%. Em 2020 esse resultado vem do redirecionamento da oferta de petróleo cru para o mercado doméstico, com aumento da produção da indústria de refino, o que reduz o preço da gasolina e, portanto, o consumo de etanol nos veículos flex-fuel. Já em 2050 o resultado é consequência da política setorial menos custo-efetiva, que impacta mais fortemente o setor de transportes. O cenário Policy_BCA_noBRA provoca os efeitos negativos mais pronunciados em relação ao cenário de referência BAU em 2050, que estão relacionados à competição com o petróleo refinado, que atinge um menor preço domesticamente por conta da menor demanda dos países desenvolvidos por este insumo e das proteções contra às importações do mesmo. Já o cenário de política climática global (Policy_Global) gera aumentos na produção do setor de biocombustíveis, de cerca de 3% em 2035 e 2050, uma vez que são uma forma

relativamente mais barata de mitigar emissões em um cenário de política mundial de redução em emissões.[22]

[22] Vale ressaltar que o modelo EPPA considera a possibilidade de exportação do etanol de cana-de-açúcar para outros países. Contudo, devido às fortes oscilações nas exportações brasileiras desse produto nos últimos anos, as incertezas no desenvolvimento desse mercado a nível mundial e as barreiras comerciais tarifárias e não tarifárias existentes e em discussão, incluindo critérios de sustentabilidade e certificações, considera-se no modelo que a possibilidade de substituição do petróleo refinado pelo etanol brasileiro nos principais países importadores é bastante limitada, o que impede grandes mudanças nos fluxos comerciais observados no ano de 2010 no modelo.

Tabela 12 – Taxas de crescimento (%) da produção setorial e do PIB brasileiros em relação ao ano de 2010

	2020					2035					2050				
	BAU	Policy	Policy_ BCA	Policy_ BCA_ noBRA	Policy_ Global	BAU	Policy	Policy_ BCA	Policy_ BCA_ noBRA	Policy_ Global	BAU	Policy	Policy_ BCA	Policy_ BCA_ noBRA	Policy_ Global
CROP	2.09	2.10	2.18	2.00	1.98	2.37	2.27	2.26	2.33	2.23	2.82	2.53	2.53	2.79	2.55
LIVE	2.48	2.42	2.45	2.43	2.39	2.53	2.38	2.37	2.52	2.37	2.57	2.25	2.25	2.59	2.31
FOOD	2.47	2.41	2.44	2.44	2.40	2.48	2.33	2.32	2.49	2.35	2.48	2.20	2.19	2.51	2.27
CRP	3.08	3.21	3.35	3.00	3.02	3.17	3.17	3.17	3.27	3.19	3.10	3.06	3.06	3.23	3.07
STEEL	2.87	2.91	2.97	2.83	2.86	2.93	2.91	2.91	2.95	2.95	2.88	2.86	2.87	2.90	2.87
ALUM	2.76	2.86	3.04	2.56	2.66	2.84	2.74	2.75	2.84	2.78	2.81	2.66	2.66	2.82	2.60
CIME	2.84	2.88	2.92	2.81	2.84	2.84	2.79	2.80	2.87	2.86	2.84	2.80	2.82	2.87	2.85
OTHR	3.14	3.18	3.20	3.12	3.15	3.02	3.02	3.02	3.02	3.04	3.00	2.99	2.99	3.00	3.01
SERV	4.07	4.06	4.05	4.08	4.08	3.74	3.73	3.73	3.73	3.74	3.52	3.49	3.49	3.51	3.51
TRAN	3.63	3.33	3.34	3.53	3.55	3.41	2.94	2.94	3.45	3.37	3.20	2.68	2.68	3.30	3.10
COAL	2.15	1.71	1.64	2.01	2.11	2.08	1.20	1.18	1.72	1.17	1.87	0.78	0.75	1.44	0.48
OIL	4.92	4.07	3.15	5.40	5.17	2.98	2.97	2.98	2.89	2.73	2.07	1.93	1.91	1.86	1.94
GAS	4.29	3.81	3.71	4.22	4.26	4.15	3.32	3.30	4.15	3.59	3.88	2.66	2.62	3.87	2.85
ROIL	1.93	2.11	2.58	1.59	1.71	1.71	1.28	1.32	1.74	1.64	1.45	1.01	1.12	1.66	1.18
ELEC	2.36	2.30	2.32	2.31	2.32	2.16	1.98	1.98	2.20	2.08	2.04	1.77	1.77	2.12	1.83
PIB	3.74	3.71	3.7	3.74	3.73	3.44	3.38	3.38	3.43	3.41	3.29	3.18	3.18	3.28	3.24

Fonte: Resultados da pesquisa.

É importante observar a proporção de uso da gasolina (gasool) e do etanol hidratado no setor de transporte urbano (Tabela 13), que no cenário de referência atinge proporções elevadas (89%) devido ao crescimento da frota de veículos flex-fuel no país, bem como do aumento no preço do petróleo ao longo do tempo. O modelo considera um aumento gradativo na proporção de automóveis *flex-fuel* na frota, até atingir 100% da frota no ano de 2050. A proporção de etanol hidratado utilizada é consequência da substituição entre este e a mistura de gasolina com etanol anidro, o que é uma decisão endógena do modelo, de acordo com o preço relativo dos diferentes combustíveis. O modelo gera no cenário de referência (BAU) uma elevada participação do etanol hidratado no total de combustível utilizado nos automóveis urbanos no Brasil. Nos cenários de políticas climáticas essa participação aumenta nos anos de 2020 e 2050, mesmo que modestamente, evidenciando a substituição da mistura gasolina-etanol anidro pelo etanol hidratado a partir das políticas climáticas simuladas. Como discutido anteriormente, no cenário Policy_BCA_noBRA o preço da gasolina tende a ser afetado negativamente pela redução da demanda internacional naqueles anos, o que favorece o consumo da mesma em detrimento do etanol hidratado. Já em 2020 o efeito contrário é observado, com aumento da produção da indústria de refino do petróleo (ROIL) nos cenários de políticas setoriais (Policy e Policy_BCA) e redução do preço desse substituto do etanol.

Tabela 13 – Proporção de etanol hidratado (%) no total de combustíveis usados nos automóveis urbanos no Brasil nos diferentes cenários

	BAU	Policy	Policy_BCA	Policy_BCA_noBRA	Policy_Global
2010	55	55	55	55	55
2020	50	58	58	57	57
2035	73	75	75	72	76
2050	89	90	90	82	93

Fonte: Resultados da Pesquisa

4.2.5 Impactos sobre as exportações setoriais brasileiras

A Tabela 14 apresenta os resultados de variações nas exportações dos diferentes setores brasileiros nos diversos cenários de políticas, em relação às exportações do cenário de referência (BAU). As mudanças em exportações costumam seguir, em geral, as direções dos resultados de mudanças na produção. Em 2020, ocorrem pequenas mudanças nas exportações da maioria dos setores, consequência das

metas de reduções em emissões serem modestas no país, a não ser pelas metas de reduções em emissões do desmatamento. Contudo, os setores de energia fóssil apresentam resultados mais expressivos de mudanças nas exportações naquele ano, como é o caso do setor de petróleo bruto (OIL), que sofre quedas nas exportações entre 26% e 56%, enquanto o setor de refino do petróleo apresenta aumentos de 25% a 55%, nos cenários em que o Brasil aplica cortes setoriais em emissões de GEEs. A queda nas exportações de petróleo reflete em geral o forte impacto que as políticas climáticas têm sobre esse setor principalmente nos países importadores, que reduzem suas demandas e importações. Contudo, as mudanças nas exportações de petróleo bruto dependem bastante do cenário implementado e do ano considerado. Nos anos de 2035 e 2050 as exportações de petróleo cru aumentam nos cenários Policy e Policy_BCA, o que indica uma mudança nos parceiros comerciais mundiais, que passam a ser os países em desenvolvimento que não aplicam políticas climáticas. Já no cenário em que o Brasil não aplica políticas climáticas (Policy_BCA_noBRA) percebe-se que as exportações de petróleo cru e refinado caem naqueles anos.

Em 2035, impactos negativos em exportações são observados em diversos setores. Os setores de culturas (CROP), pecuária (LIVE) e indústria de alimentos (FOOD) apresentam quedas nas exportações em todos os cenários, sendo as maiores perdas observadas para o setor de pecuária (LIVE) em todos os cenários.[23] No ano de 2050 os impactos negativos sobre as exportações dos setores agropecuários e de alimentos se intensificam consideravelmente, o que indica que as metas de cortes em emissões naquele ano atingem níveis que comprometem a competitividade brasileira e estão além da capacidade de mitigação do setor.

Os setores intensivos em energia sofrem impactos em exportações geralmente pequenos nos três períodos considerados. O setor de metais não ferrosos (ALUM) sofre as maiores quedas em exportações, que atingem 15% de perda no cenário de política global no ano de 2050. Já o setor de químicos, borracha, plásticos e papel

[23] Deve-se ressalvar que as exportações de produtos do setor de pecuária (LIVE) são bem pequenas no modelo, uma vez que esse setor abrange apenas a produção animal, ou seja, apenas os animais vivos, não incluindo carnes, leite, ovos e outros produtos originados da atividade pecuária, que fazem parte da indústria de alimentos no modelo.

(CRP) apresentam pequenos aumentos em exportações em praticamente todos os cenários.

Os demais setores industriais (OTHR) e o setor de serviços (SERV) apresentam pequenos aumentos nas exportações, entre 1% e 6%, nos anos de 2020 e 2035, e entre 14% e 18% e 2050, com exceção do cenário Policy_BCA_noBRA, em 2020, em que pequenas perdas (até 2%) são observadas nas exportações desses setores. No ano de 2050 as variações em exportações nesses setores são mais pronunciadas nos cenários Policy, Policy _BCA e Policy Global, o que reflete que os mesmos ganham competitividade em relação aos demais setores brasileiros e seus concorrentes internacionais, uma vez que possuem baixos níveis de emissões e considerável parcela do consumo de energia dos mesmos é de energia elétrica, fonte de baixas emissões no país.

Os resultados de mudanças em exportações refletem os efeitos diferenciados das políticas sobre os diversos setores, uma vez que as políticas climáticas mudam as vantagens comparativas dos setores de acordo com a intensidade de emissões e a capacidade de mitigação dos mesmos. Deve-se notar que, sob a política global, as mudanças percentuais em exportações dos setores não energéticos tendem a ser menos pronunciadas, já que neste cenário a economia consegue distribuir melhor entre setores as responsabilidades de cortes em emissões, de acordo com os custos de mitigação de cada setor, permitindo maiores cortes em emissões naqueles setores com menores custos de mitigação.

Tabela 14 – Mudanças nas exportações brasileiras (%) nos cenários de políticas em relação ao cenário de referência (BAU)

	Policy	Policy_BCA	Policy_BCA_noBRA	Policy_Global
		2020		
CROP	2	4	-3	-2
LIVE	-3	-1	-18	-10
FOOD	-1	1	-2	-3
COAL	9	14	-11	1
OIL	-26	-56	18	10
ROIL	25	55	-13	-10
GAS	2	5	-3	-1
ELEC	-1	-1	-1	0
CRP	4	7	-2	-1
STEEL	2	5	-2	-1
ALUM	2	5	-3	-2
CIME	2	4	-2	-1
OTHR	3	6	-1	0
SERV	4	6	-2	0
TRAN	-14	-13	-6	-4
		2035		
CROP	-1	-1	-7	-6
LIVE	-7	-4	-50	-38
FOOD	-11	-12	2	-10
COAL	4	3	-31	-20
OIL	12	11	-6	-16
ROIL	6	19	-12	13
GAS	-25	-25	-33	-14
ELEC	-7	-8	-6	-1
CRP	1	1	2	2
STEEL	-1	-1	0	2
ALUM	-4	-3	-2	-3
CIME	-8	-4	1	3
OTHR	4	3	0	4
SERV	5	5	0	4
TRAN	-44	-43	-2	-1
		2050		
CROP	-15	-14	-7	-17
LIVE	-51	-47	-34	-64
FOOD	-27	-28	6	-24
COAL	-41	-44	-75	-71
OIL	7	-5	-39	-6
ROIL	48	100	-6	4
GAS	-29	-31	-47	-24
ELEC	-15	-18	-16	-6
CRP	1	2	5	2
STEEL	2	3	0	1
ALUM	-10	-8	-4	-15
CIME	-8	1	-2	3
OTHR	14	14	0	8
SERV	18	18	2	8
TRAN	-62	-60	2	-11

Fonte: Resultados da Pesquisa

4.2.6 Impactos sobre as importações setoriais brasileiras

A Tabela 15 apresenta as mudanças nas importações brasileiras nos cenários de políticas climáticas em relação ao cenário de referência (BAU). Os resultados indicam queda nas importações da maioria dos setores nos três anos analisados. Essas quedas em importações são causadas tanto por mudanças em vantagens comparativas como pela queda na atividade econômica no Brasil e no resto do mundo a partir das políticas climáticas simuladas. Apenas os setores de pecuária (LIVE), alimentos (FOOD), metais não ferrosos (ALUM) e minerais não metálicos (CIME) e de transportes (TRAN) apresentam aumentos consistentes em importações nos cenários em que o país implementa políticas climáticas. Esses resultados refletem as mudanças em vantagens comparativas geradas pelas políticas climáticas, que desfavorecem esses setores pelos elevados níveis de emissões nos mesmos e/ou menor capacidade de mitigar essas emissões via substituição de insumos energéticos e mudanças tecnológicas. No cenário em que o Brasil não adota política climática (Policy_BCA_noBRA), os setores de carvão (COAL) e gás natural (GAS) também experimentam aumentos em importação, uma vez que essas fontes de energia tornam-se relativamente mais baratas nos mercados internacionais pela redução da demanda dos países desenvolvidos, e a economia brasileira sofre menores reduções no nível geral de atividade e consumo, o que mantém a demanda por energia em patamares similares aos observados no cenário de referência.

Tabela 15 – Mudanças nas importações brasileiras (%) nos cenários de políticas em relação ao cenário de referência (BAU)

	Policy	Policy_BCA	Policy_BCA_noBRA	Policy_Global
		2020		
CROP	-2	-3	1	1
LIVE	1	1	0	7
FOOD	0	-1	1	2
COAL	-9	-12	0	0
OIL	-	-	-	-
ROIL	-12	-19	5	4
GAS	-7	-10	0	0
ELEC	-1	-1	-1	0
CRP	-2	-3	0	0
STEEL	-2	-3	1	1
ALUM	0	-1	1	1
CIME	-1	-3	1	1
OTHR	-2	-3	1	0
SERV	-3	-4	1	0
TRAN	7	7	2	2
		2035		
CROP	-3	-2	-2	3
LIVE	-1	-1	-10	32
FOOD	3	4	-3	5
COAL	-19	-20	14	-20
OIL	-	-	-	-
ROIL	-12	-11	-5	-12
GAS	-22	-21	3	-5
ELEC	-12	-12	-14	-5
CRP	-3	-3	-5	-2
STEEL	-2	-2	-4	-1
ALUM	2	3	-3	2
CIME	3	4	-7	-3
OTHR	-4	-4	-2	-3
SERV	-4	-3	-1	-2
TRAN	32	33	-10	0
		2050		
CROP	-1	2	-4	10
LIVE	32	29	-23	79
FOOD	9	10	-9	14
COAL	-38	-39	31	-43
OIL	-	-	-	-
ROIL	-32	-31	-17	-20
GAS	-47	-45	6	-13
ELEC	-27	-27	-28	-14
CRP	-6	-6	-11	-4
STEEL	-6	-6	-11	-2
ALUM	6	8	-9	7
CIME	1	2	-15	-4
OTHR	-12	-12	-5	-6
SERV	-13	-12	-3	-5
TRAN	60	62	-22	3

Fonte: Resultados da pesquisa

4.3 Cenários Tecnológicos

Esta seção pretende testar e analisar as consequências de possíveis trajetórias de desenvolvimento de tecnologias de menores emissões de gases de efeito estufa no Brasil e no mundo. Diversas hipóteses de trajetórias tecnológicas foram consideradas no modelo de equilíbrio geral, com base nos resultados dos estudos setoriais e opiniões de especialistas. Cada hipótese gerou a formulação de cenários de referência (BAU_Tec) e de políticas climáticas (Policy_Tec), que foram comparadas com os cenários simulados anteriormente (BAU e Policy). Primeiramente consideram-se diversas tecnologias ao mesmo tempo nos cenários Tec, e posteriormente algumas tecnologias são analisadas isoladamente.

4.3.1 Cenários com Hipóteses Gerais de Trajetórias Tecnológicas

Setores Intensivos em Energia

De acordo com os estudos setoriais, não são esperadas mudanças tecnológicas nesses setores capazes de alterar positivamente a competitividade relativa da produção brasileira. No caso do setor de Metais não Ferrosos (ALUM), o cenário de referência simulado no modelo EPPA anteriormente (cenário BAU) reflete o que se espera do cenário tecnológico mais provável sugerido pelo estudo setorial como: pouca mudança na participação das diferentes fontes de energia no total de energia consumida pelo setor; maior custo com energia no Brasil do que no resto do mundo como um todo; adoção tecnológica lenta e de custo elevado; ligeiro aumento na eficiência energética (saindo de cerca de 15,2 MWh/ton em 2010 para 13 MWh/ton em 2050); menor possibilidade de redução em emissões na América Latina, que já faz uso de fontes de baixas emissões na geração de eletricidade; e redução de até 20% no uso de eletricidade e combustível pelo processo Bayer na produção de alumínio. Dessa forma, não são adotadas hipóteses alternativas no modelo EPPA nos cenários BAU_Tec e Policy_Tec.

Já no setor de Minerais Não Metálicos (CIME), o cenário de referência (BAU) simulado no modelo EPPA reflete o que se espera de cenários tecnológicos sugeridos pelo estudo setorial, que afirma que o consumo de energia por tonelada de clínquer é ligeiramente superior no Brasil do que em vários outros países

considerados e que a vantagem brasileira de maior eficiência, em termos de emissões de carbono do que a média mundial (de cerca de 20%), tende a se erodir lentamente. A previsão de redução de 12% nas emissões por tonelada de produto de 2007 a 2050 já é observada no cenário de referência (BAU) simulado anteriormente. Uma possível mudança tecnológica importante apontada no estudo setorial para este setor seria a adoção de tecnologias de captura e sequestro de carbono, que poderia ocorrer e se intensificar a partir de 2030. As emissões por tonelada de produto poderiam reduzir em cerca de 42% caso haja desenvolvimento das tecnologias de captura e sequestro de carbono. Essas tecnologias estão disponíveis no modelo EPPA no caso da produção de energia elétrica a partir de carvão e gás natural (tecnologias NGCC-CCS e IGCC-CCS na Tabela 1), mas apenas seriam adotadas em cenários com restrições às emissões de carbono, uma vez que representam formas bem mais caras de se gerar eletricidade que as fontes convencionais fósseis, e portanto, não são competitivas ou atrativas na ausência de políticas explícitas de controle de emissões de GEE. Dessa forma, o cenário Policy_Tec considera a redução dos custos associados ao desenvolvimento dessas tecnologias e compara a adoção das mesmas com o cenário Policy.

No caso do setor de Siderurgia e Metalurgia (IRON), o cenário de referência simulado anteriormente (BAU) já reflete o que se espera de cenários tecnológicos sugeridos pelo estudo setorial, de pequena possibilidade de redução significativa do consumo específico de energia, que de 2010 a 2020 poderia ser reduzido em 4%, até 2035 em 8% e até 2050, 12%. O consumo específico de energia, que no Brasil é um pouco menor do que a média mundial, tende a se erodir com o tempo. A mudança na participação das diferentes fontes de energia sugere no tempo uma queda da participação de carvão (de 74% em 2011 para 70% em 2035, e 65% em 2050) e aumento da participação de gás natural (de 8% para 12%, e para 14%, respectivamente) e de eletricidade (de 6% para 9%, e para 12%, respectivamente), o que se verifica no cenário BAU simulado anteriormente.

Transportes (automóveis e transporte aéreo)

O estudo setorial sugere a entrada dos veículos híbridos (movidos tanto a gasolina quanto a energia elétrica) e dos veículos elétricos com novos sistemas de propulsão a partir de 2020, e sua popularização em 2035 e 2050. No cenário BAU simulado

anteriormente, esses veículos possuem uma pequena penetração a partir de 2035 em alguns poucos países (como exemplo, nos EUA esses veículos teriam uma participação de apenas 2% em 2040 no total de novos veículos adquiridos, atingindo 8% em 2050). Dessa forma, para representar uma penetração maior e mais precoce desses veículos nos cenários tecnológicos reduziu-se o custo relativo de desenvolvimento e aquisição desses automóveis para torná-los mais atrativos, e permitir a sua adoção a partir da década de 2020. Os veículos híbridos são considerados no modelo EPPA cerca de 30% mais caros que os veículos com os sistemas de propulsão convencionais, enquanto os movidos completamente a energia elétrica são 65% mais caros, bem como ambos são mais intensivos em capital. Nos cenários tecnológicos, reduz-se gradativamente o custo dos sistemas de propulsão desses automóveis, de forma a torna-los apenas 20% mais caros que os automóveis convencionais no caso dos híbridos e 50% mais caros no caso dos veículos movidos apenas a energia elétrica.

No caso do setor de transporte aéreo, espera-se um aumento na economia de uso de combustíveis de cerca de 2% ao ano pelo relatório setorial, o que já é observado no cenário BAU. Espera-se que a eficiência energética no Brasil continuará ligeiramente pior do que no resto do mundo, uma vez que parte dessa eficiência vem da gestão aeroportuária. Ainda, espera-se que o setor aéreo passe a usar biocombustíveis em proporções crescentes, atingindo cerca de 5% em 2020, 7,5% em 2035 e 55% em 2050. Para refletir esse prognóstico, considera-se nos cenários BAU_Tec e Policy_Tec a possibilidade de uso dos biocombustíveis de segunda geração no setor de transporte comercial (TRAN), e não apenas no setor de transporte das famílias, como nos cenários originais.

Biocombustíveis

De acordo com o relatório setorial sobre biocombustíveis e opinião de especialistas, considera-se nos cenários BAU_Tec e Policy_Tec uma maior possibilidade de substituição entre etanol e gasolina nos países desenvolvidos ao longo do tempo e o desenvolvimento da segunda geração de biocombustíveis no Brasil a partir do uso do bagaço de cana-de-açúcar a partir de 2020. Ainda, considera-se o uso de biocombustíveis no setor de serviços de transporte, que inclui o setor de transporte rodoviário de carga e o de transporte aeroviário.

Demais setores

Nos setores agropecuários seria importante representar mais explicitamente as diferentes possibilidades de mitigação previstas no Plano e no Programa ABC, que para o horizonte de 2010 a 2020 pretende atingir a recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas, a ampliação da integração lavoura pecuária em 4 milhões de hectares, o aumento na área com plantio direto de qualidade em 8 milhões de hectares, e a expansão das áreas que fazem uso da fixação biológica de nitrogênio em 5,5 milhões de hectares. Espera-se que essas medidas, que fazem parte dos "NAMAs" apresentados pelo Governo Brasileiro em Copenhagen, em dezembro de 2009, reduzam as emissões anuais de CO2-equivalente em, respectivamente, 83 a 104 milhões de toneladas, 18 a 22 milhões de toneladas, 16 a 20 milhões de toneladas e 16 a 20 milhões de toneladas. Essas tecnologias podem ser representadas no modelo considerando-se os custos necessários para reduzir determinado volume de emissões. Contudo, existe uma escassez de informações sobre esses custos e os potenciais reduções em emissões das tecnologias de mitigação previstas para a agropecuária brasileira. Dessa forma, optou-se por investigar a agricultura de baixo carbono separadamente, em cenários que serão explorados mais adiante neste trabalho. Dessa forma, os cenários Tec não exploram a implementação do Plano e do Programa ABC.

4.3.1.1 Resultados dos cenários tecnológicos

Emissões (Brasil e mundo)

A Tabela 16 apresenta os resultados de emissões brasileiras de gases de efeito estufa nos cenários tecnológicos, comparando-os com os dos cenários BAU e Policy simulados inicialmente. Os resultados revelam que as diferentes hipóteses tecnológicas consideradas levam a poucas diferenças em emissões agregadas para o Brasil entre os cenários originalmente simulados e os cenários tecnológicos. As emissões são ligeiramente inferiores nos cenários tecnológicos (BAU_Tec e Policy_Tec) a partir de 2030. Esses resultados indicam que as hipóteses consideradas nos cenários tecnológicos, que incluem o desenvolvimento dos biocombustíveis de segunda geração, menor custo das tecnologias de captura e

sequestro de carbono, menor custo dos automóveis híbridos e o uso de biocombustíveis por vários setores de transportes, não provocam diferenças consideráveis nas emissões totais do país, apesar de contribuírem para uma ligeira redução nas emissões. No caso do cenário Policy_Tec, como a meta de redução em emissões é estabelecida com base nas emissões do cenário de referência, a maior disponibilidade de tecnologias de redução em emissões não deve significar reduções em emissões que diferem substancialmente das emissões do cenário Policy, mas podem significar menores custos para atingir a mesma meta de redução em emissões. Deve-se ainda considerar que as pequenas diferenças em resultados entre os cenários iniciais e os cenários Tec apenas significam que o modelo EPPA já incorporava diversos padrões de mudanças tecnológicas previstos nos estudos setoriais, como é o caso dos ganhos de eficiência nos setores intensivos em energia.

Tabela 16 – Emissões brasileiras de gases de efeito estufa em diferentes cenários (Milhões e Ton. Co_2-Eq.)

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
BAU	1905	2046	1879	2169	2254	2360	2468	2635	2777
BAU_Tec	1905	2037	1929	2200	2208	2305	2419	2581	2721
Policy	1905	1491	1438	1453	1389	1253	1107	1116	1112
Policy_Tec	1905	1508	1469	1481	1373	1215	1071	1083	1080

Fonte: Resultados da pesquisa.

A Tabela 17 apresenta as mudanças nas emissões globais nos cenários BAU, Policy, BAU_Tec e Policy_Tec. Essa tabela revela que as tecnologias incorporadas no modelo nos cenários Tec também afetam pouco as emissões globais projetadas pelo modelo, apesar de contribuírem para um volume total menor em emissões. Isso significa que as mudanças tecnológicas incorporadas nos cenários BAU_Tec e Policy_Tec são pouco capazes de alterar a trajetória global de emissões projetada pelo modelo, seja pela baixa adoção que tais tecnologias teriam em um cenário sem exigências explícitas de reduções em emissões (BAU_Tec), seja pelo alcance limitado das políticas implementadas no cenário Policy_Tec, que afetam apenas os países desenvolvidos, e algumas poucas nações e regiões em desenvolvimento.

Tabela 17 - Emissões Globais de gases de efeito estufa em diferentes cenários (Milhões e Ton. Co_2-Eq.)

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
BAU	52565	59616	64670	69666	74450	79138	83503	88340	93154
BAU_Tec	52565	59616	64677	69656	74372	79004	83280	88008	92674
Policy	52565	57588	60734	64033	66066	69259	71296	73328	75457
Policy_Tec	52565	57587	60741	64028	66001	69128	71064	72970	74964

Fonte: Resultados da pesquisa.

Mudanças em PIB

A Figura 25 apresenta as mudanças percentuais no PIB nos cenários de políticas Policy e Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec, respectivamente. Percebe-se que as quedas em PIB que a política climática brasileira simulada provoca são praticamente as mesmas, independente das hipóteses tecnológicas dos cenários Tec. Esse resultado reforça o observado para emissões de GEE, de que as tecnologias supostas nos cenários Tec não geram mudanças consideráveis na trajetória de crescimento da economia brasileira. Como seria esperado, observam-se menores custos econômicos diante de políticas climáticas no cenário Tec, contudo, as diferenças na trajetória de queda relativa do PIB indicam que as tecnologias simuladas no cenário Tec ou são pouco adotadas no Brasil, mesmo que possuam custos menores do que nos cenários originalmente simulados, e/ou não trazem grandes benefícios em reduzir os custos de mitigação. Essas questões serão mais bem analisadas posteriormente nesta seção.

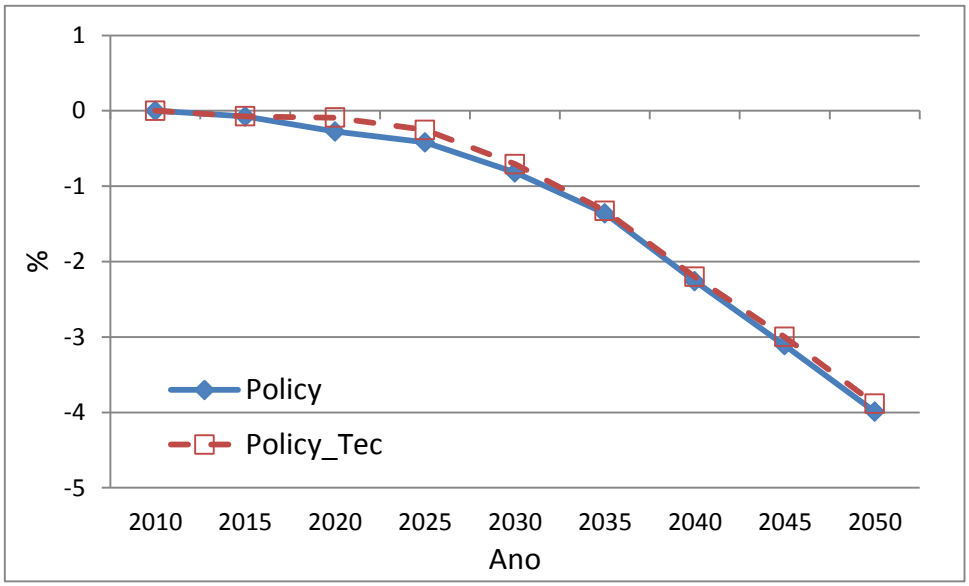


Figura 25 – Mudanças (%) no PIB brasileiro nos cenários de políticas Policy em Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec, respectivamente.

Mudanças em bem-estar

A Tabela 18 apresenta as mudanças em bem-estar nos cenários de políticas Policy e Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec. Tais mudanças representam medidas de custos das políticas climáticas sobre os consumidores dos países, considerando todas as mudanças em preços relativos e renda. Observa-se um custo relativo consideravelmente menor da política climática brasileira sob as hipóteses tecnológicas dos cenários Policy_Tec e BAU_Tec até o ano de 2030. A partir de 2035, os custos tornam-se maiores sob tais hipóteses. Esses resultados indicam que as tecnologias incorporadas nesses cenários contribuem para mitigar emissões de forma mais barata apenas sob metas menos restritivas às emissões. Quando tais metas se intensificam, as tecnologias incorporadas não são suficientes para reduzir os custos de mitigação no Brasil, ou por apresentarem baixo nível de adoção no país ou serem capazes de reduzir muito pouco os custos de mitigação.

Tabela 18 – Mudanças em bem-estar (%) no Brasil nos cenários Policy e Policy_Tec em relação aos cenário BAU e BAU_Tec, respectivamente

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Policy	-0.01	-0.21	-0.24	-0.53	-1.02	-1.94	-2.65	-3.61
Policy_Tec	-0.02	0.07	0.17	-0.31	-1.05	-2.00	-2.80	-3.62

Fonte: resultados da pesquisa.

É interessante notar que esse resultado não é o mesmo para todas as regiões do modelo. Como exemplo, a Figura 26 apresenta as mudanças em bem-estar para os EUA e China nos mesmos cenários. Para esses países, as hipóteses tecnológicas consideradas nos cenários Tec significam possibilidades de reduzir consideravelmente os custos de mitigação. Como os EUA também adotam uma política climática no cenário Policy, a sua menor queda em bem-estar sob os cenários Tec sugere a adoção em larga escala de tecnologias com menores níveis de emissões, como o uso de veículos elétricos híbridos no setor de transportes e a construção de usinas de energia a carvão e gás natural com captura e sequestro de carbono. Já na China, que não adota políticas climáticas, o resultado menos prejudicial sob os cenários Tec deve refletir a menor queda de produção, consumo e importações de países desenvolvidos como os EUA e os da UE.

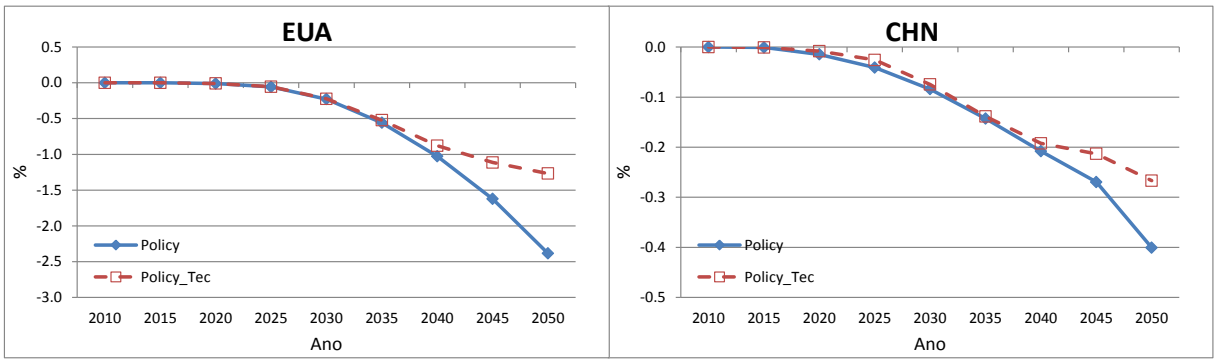


Figura 26 – Mudanças em bem-estar (%) nos cenários Policy e Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec, respectivamente, nos EUA e China

Produção Setorial no Brasil

A Tabela 19 apresenta as taxas de crescimento (%) da produção setorial brasileira em relação ao ano de 2010 nos cenários BAU, BAU_Tec, Policy e Policy_Tec. As taxas setoriais de crescimento são ligeiramente superiores nos cenários Tec em 2020 para quase todos os setores, excetuando-se apenas os setores de serviços (SERV) e de petróleo bruto (OIL). Esses dois setores apresentam menores taxas de crescimento nos cenários Tec também nos anos de 2035 e 2050. A menor taxa de crescimento do setor OIL nos cenários Tec sugere que o desenvolvimento da tecnologia de biocombustível de segunda geração a partir do uso do bagaço da cana-de-açúcar é capaz de aumentar a oferta e reduzir o preço deste combustível

renovável, gerando uma competição com a produção de petróleo bruto, o que reduz sua taxa de crescimento em relação aos cenários em que não se considerava a possibilidade de desenvolvimento daquele combustível alternativo. Esse resultado é corroborado pelas maiores taxas de crescimento no setor de transportes (TRAN) nos cenários Tec em todos os anos. A partir de 2035, todos os setores apresentam taxas de crescimento menores nos cenários Tec, com exceção do setor TRAN já citado e dos setores de produção de gás natural (GAS) e de geração de eletricidade (ELEC). Nota-se, contudo, que as diferenças em taxas de crescimento são muito pequenas entre os cenários Tec e não Tec, e que os cenários de políticas climáticas sempre geram quedas nas taxas de crescimento em relação aos cenários de referência, reflexo dos maiores custos que as restrições às emissões de GEE impõem aos mesmos. Dessa forma, as hipóteses tecnológicas consideradas nos cenários Tec causam diferenças relevantes apenas nos resultados dos setores de petróleo e de transportes, o que indica que, dentre as tecnologias consideradas naqueles cenários, apenas as de biocombustíveis, e talvez as de veículos elétricos híbridos, são capazes de provocar mudanças relevantes nos resultados encontrados inicialmente.

Tabela 19 – Taxas de crescimento (%) da produção setorial brasileira em relação ao ano de 2010, cenários selecionados

	2020				2035				2050			
	BAU	BAU_Tec	Policy	Policy_Tec	BAU	BAU_Tec	Policy	Policy_Tec	BAU	BAU_Tec	Policy	Policy_Tec
CROP	2.09	2.26	2.10	2.12	2.37	2.34	2.27	2.25	2.82	2.79	2.53	2.50
LIVE	2.48	2.57	2.42	2.43	2.53	2.50	2.38	2.36	2.57	2.55	2.25	2.22
FOOD	2.47	2.55	2.41	2.42	2.48	2.45	2.33	2.31	2.48	2.46	2.20	2.18
CRP	3.08	3.37	3.21	3.25	3.17	3.13	3.17	3.14	3.10	3.06	3.06	3.00
STEEL	2.87	3.02	2.91	2.96	2.93	2.89	2.91	2.88	2.88	2.85	2.86	2.84
ALUM	2.76	3.34	2.86	3.08	2.84	2.80	2.74	2.72	2.81	2.78	2.66	2.61
CIME	2.84	2.96	2.88	2.93	2.84	2.80	2.79	2.76	2.84	2.81	2.80	2.77
OTHR	3.14	3.19	3.18	3.19	3.02	2.99	3.02	3.00	3.00	2.97	2.99	2.98
SERV	4.07	4.04	4.06	4.05	3.74	3.73	3.73	3.72	3.52	3.51	3.49	3.48
TRAN	3.63	3.99	3.33	3.66	3.41	3.51	2.94	3.04	3.20	3.29	2.68	2.77
COAL	2.15	2.36	1.71	2.02	2.08	1.98	1.20	1.11	1.87	1.83	0.78	0.67
OIL	4.92	3.12	4.07	3.87	2.98	2.91	2.97	2.81	2.07	2.03	1.93	1.81
GAS	4.29	4.54	3.81	4.26	4.15	4.15	3.32	3.34	3.88	3.88	2.66	2.70
ROIL	1.93	3.08	2.11	2.42	1.71	1.43	1.28	1.05	1.45	1.30	1.01	0.91
ELEC	2.36	2.53	2.30	2.42	2.16	2.16	1.98	1.98	2.04	2.04	1.77	1.76

Fonte: Resultados da Pesquisa.

Exportações Setoriais Brasileiras

A Tabela 20 apresenta os resultados de mudanças percentuais nas exportações brasileiras nos cenários Policy e Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec, respectivamente. Os resultados seguem, em geral, a mesma direção e magnitudes parecidas nos cenários Tec e não Tec. As diferenças mais expressivas dizem respeito aos resultados para os setores de petróleo bruto (OIL), refino do petróleo ROIL em todos os anos considerados e setores intensivos em energia apenas em 2020. No caso dos setores de petróleo e refino, a competitividade e o fluxo de exportações desses setores são bastante afetados pelo desenvolvimento da tecnologia de biocombustível de segunda geração, na forma de etanol de cana-de-açúcar produzido a partir do uso do bagaço.

Apesar de o modelo indicar pequenos volumes absolutos exportados de petróleo e produtos do refino em 2020, uma política climática no Brasil reduziria as exportações de petróleo bruto pelo país em 2020, na ausência de produção de biocombustíveis de segunda geração (cenário Policy), e aumentaria a produção e as exportações de derivados do petróleo, indicando um *trade-off* entre a venda do produto bruto e do produto refinado. Contudo, na presença de biocombustível de segunda geração, a competição entre este e os produtos do refino do petróleo sugerem que haveria uma queda na demanda e produção doméstica de produtos refinados, o que direcionaria os excedentes produzidos pela expansão da produção de petróleo do pré-sal para o mercado externo. Nos demais anos, o crescimento da produção de etanol de segunda geração no Brasil acaba por acirrar a competição com os derivados do petróleo, que são cada vez mais direcionados para exportação diante das restrições às emissões de GEE na economia brasileira e ausência de restrições em vários países em desenvolvimento, enquanto o petróleo bruto é menos direcionado às exportações.

Já nos setores intensivos em energia, a reversão de sinal nas exportações em 2020, que passam de positivas no cenário Policy para negativas no cenário Policy_Tec, refletem o impacto da política climática brasileira sobre esses setores, que passam de ligeiramente positivos no cenário Policy para ligeiramente negativos no cenário Policy_Tec, provavelmente pela competição por recursos escassos demandados por setores menos impactados pela política climática, como o setor de serviços e o de etanol de segunda geração. Ao se considerar as pequenas variações percentuais

nas exportações desses setores no ano de 2020 e as incertezas associadas ao modelo e aos exercícios de simulação desta natureza, as diferenças observadas entre os cenários Tec e não Tec não revelam mudanças expressivas na competitividade dos setores brasileiros diante das hipóteses tecnológicas incorporadas.

Tabela 20 – Mudanças nas exportações brasileiras (%) nos cenários Policy e Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec, respectivamente

	2020		2035		2050	
	Policy	Policy_Tec	Policy	Policy_Tec	Policy	Policy_Tec
CROP	2	-2	-1	0	-15	-15
LIVE	-3	-7	-7	-7	-51	-55
FOOD	-1	-5	-11	-10	-27	-26
COAL	9	2	4	4	-41	-37
OIL	-26	63	12	3	7	-6
ROIL	25	-16	6	8	48	52
GAS	2	-2	-25	-22	-29	-12
ELEC	-1	-1	-7	-7	-15	-14
CRP	4	-2	1	2	1	0
STEEL	2	-3	-1	0	2	3
ALUM	2	-4	-4	-3	-10	-12
CIME	2	-2	-8	-8	-8	-11
OTHR	3	-1	4	6	14	19
SERV	4	-1	5	6	18	22
TRAN	-14	-15	-44	-43	-62	-62

Fonte: resultados da pesquisa.

Importações Setoriais Brasileiras

As mudanças percentuais nas exportações brasileiras nos cenários Policy e Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec, respectivamente, são apresentadas na Tabela 21. Os resultados seguem, em geral, a mesma direção e magnitudes parecidas nos cenários Tec e não Tec, com exceção dos resultados para os setores de produtos do refino do petróleo (ROIL) e intensivos em energia, em 2020, por motivos já discutidos. Assim como nos resultados sobre exportações, os obtidos para as importações reafirmam os pequenos efeitos das hipóteses tecnológicas simuladas sobre os resultados do modelo.

Tabela 21 – Mudanças nas importações brasileiras (%) nos cenários Policy e Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec, respectivamente

	2020		2035		2050	
	Policy	Poilcy_Tec	Policy	Poilcy_Tec	Policy	Poilcy_Tec
CROP	-2	0	-3	-4	-1	-1
LIVE	1	4	-1	-1	32	43
FOOD	0	3	3	3	9	10
COAL	-9	-4	-19	-19	-38	-37
OIL	-	-	-	-	-	-
ROIL	-12	5	-12	-12	-32	-34
GAS	-7	-3	-22	-23	-47	-51
ELEC	-1	-1	-12	-11	-27	-23
CRP	-2	0	-3	-3	-6	-5
STEEL	-2	1	-2	-2	-6	-6
ALUM	0	2	2	2	6	6
CIME	-1	1	3	4	1	3
OTHR	-2	0	-4	-5	-12	-13
SERV	-3	0	-4	-5	-13	-14
TRAN	7	8	32	31	60	57

Fonte: Resultados da pesquisa.

Biocombustíveis

Como observado até aqui, as hipóteses consideradas nos cenários tecnológicos BAU_Tec e Policy_Tec pouco afetam os resultados obtidos inicialmente nos cenários BAU e Policy, com algumas poucas exceções relacionadas aos setores de produção e refino do petróleo e de serviços de transportes. Vale, portanto, uma análise mais detalhada sobre a produção e uso dos biocombustíveis, principal fonte de energia capaz de competir com o combustível fóssil no setor de transportes, nos cenários considerados. O Quadro 1 abaixo apresenta a produção e a área de etanol no Brasil nos cenários BAU, BAU_TEC, Policy e Policy_Tec. Os resultados indicam um crescimento bem maior na produção do que na área de 2010 para 2020 nos cenários Tec, consequência do desenvolvimento do etanol de segunda geração a partir do uso do bagaço da cana-de-açúcar no processo de produção. Assumiu-se que o ganho de eficiência por área permitiria aumentar em 50% a produção de etanol por ha de cana-de-açúcar colhida a partir do desenvolvimento da tecnologia, o que aumento a produção em 2020 nos cenários Tec mesmo com redução da área plantada em relação ao ano de 2010. A oferta de etanol também é maior nos cenários Tec em relação aos cenários originais, entre 9% e 15% em 2020, entre

50% e 61% em 2035 e 2050, dependendo do cenário considerado. Esses resultados sugerem mudanças importantes na produção do setor, caso a produção de etanol de segunda geração no Brasil seja desenvolvida efetivamente através da quebra da celulose do bagaço.

Quadro 1 – Produção de etanol no Brasil e área de cana-de-açúcar na produção de etanol nos cenários BAU, BAU_Tec, Policy e Policy_Tec

	Ano	Produção (Mil TEP*)	Área (mil ha)		Ano	Produção (Mil TEP)	Área (mil ha)
BAU	2010	10994	4939	Policy	2010	10994	4939
	2020	15373	5832		2020	16155	6102
	2035	24261	7850		2035	24107	7673
	2050	34397	9247		2050	32937	7975
BAU_Tec	2010	10994	4939	Policy_Tec	2010	10994	4939
	2020	16014	4133		2020	16319	4190
	2035	38336	8424		2035	35916	7722
	2050	58043	10621		2050	51944	8609

***** TEP: tonelada equivalente e petróleo.
Fonte: Resultados da Pesquisa.

O Quadro 2 apresenta o destino da produção de etanol nos cenários considerados. Até 2020, uma maior parcela do etanol, ligeiramente superior a 50%, é destinada ao uso em automóveis flex fuel em todos os cenários considerados. A partir daí, nos cenários inicialmente simulados (BAU e Policy) a proporção de etanol hidratado cresce, acompanhando o aumento da frota de automóveis flex fuel e o menor preço relativo deste combustível em relação à gasolina. A política climática acentua ligeiramente este padrão. As exportações praticamente mantêm a sua participação, já que o desenvolvimento de um mercado internacional para biocombustíveis nestes cenários é considerado pouco provável. Já nos cenários tecnológicos, considera-se a possibilidade de usar os biocombustíveis em outros setores de transportes (transporte aéreo e rodoviário de carga), bem como o desenvolvimento do mercado internacional de biocombustíveis, pelo aumento da elasticidade de substituição do etanol importado pelos derivados do petróleo nos principais países importadores. Como consequência, observa-se um forte aumento na participação das exportações nos cenários BAU_Tec e Policy_Tec, bem como uma demanda bastante expressiva do etanol pelos demais setores de transportes.

O cenário Policy_Tec acentua o uso do etanol hidratado nos veículos flex fuel e para exportações, em detrimento do uso nos demais setores de transportes. Percebe-se, portanto, que mudanças expressivas nos resultados podem ocorrer nos mercados de biocombustíveis dependendo das hipóteses consideradas sobre o desenvolvimento e adoção dessa tecnologia. Devem-se salientar as incertezas atuais sobre as hipóteses assumidas nos cenários Tec, tanto no que diz respeito ao possível sucesso no desenvolvimento tecnológico do etanol de segunda geração da cana-de-açúcar, da liberalização dos mercados dos países desenvolvidos e desenvolvimento de um mercado mundial, quanto do amplo uso dos mesmos em diferentes modais de transportes, que tornam difícil a previsão do futuro deste setor.

Quadro 2 – Uso do etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil (%)

		Parcela de uso (%)						Parcela de uso (%)			
		Hidratado	Anidro	Export.	Outros Transp.			Hidratado	Anidro	Export.	Outros Transp.
BAU	2010	55	41	3	-	Policy	2010	55	41	3	-
	2020	51	43	6	-		2020	55	40	5	-
	2035	63	33	5	-		2035	64	32	5	-
	2050	70	27	4	-		2050	71	26	3	-
BAU_Tec	2010	55	41	3	-	Policy_Tec	2010	55	41	3	-
	2020	52	41	6	-		2020	54	40	6	-
	2035	41	21	8	31		2035	44	21	8	27
	2050	42	16	17	25		2050	46	17	19	19

Fonte: Resultados da Pesquisa

A Tabela 22 apresenta a proporção de etanol hidratado utilizada pelos automóveis urbanos no setor de transporte das famílias nos cenários considerados. Esse tipo de biocombustível só pode ser utilizado pelos automóveis do tipo *flex fuel*. A parcela restante de combustíveis deve-se à mistura de gasolina com etanol anidro. A Tabela revela que nos cenários tecnológicos a proporção de etanol hidratado é maior que nos cenários inicialmente simulados, consequência do aumento da produção de etanol devido ao desenvolvimento da segunda geração no Brasil.

Tabela 22 – Proporção de etanol hidratado (%) no total de combustíveis usados nos automóveis urbanos no Brasil em cenários selecionados

	BAU	BAU_Tec	Policy	Policy_Tec
2010	55	55	55	55
2020	50	53	58	57
2035	73	75	75	77
2050	89	89	90	91

Fonte: Resultados da pesquisa

Veículos híbridos e elétricos

Os cenários tecnológicos consideram menores custos para o desenvolvimento e adoção dos veículos com novos sistemas de propulsão, veículos híbridos movidos a combustível convencional e energia elétrica e movidos apenas por energia elétrica. O custo de aquisição dos veículos híbridos é 30% superior ao dos veículos convencionais nos cenários BAU e Policy quando essas tecnologias se tornam disponíveis em 2015, enquanto os veículos elétricos custam 65% mais. O modelo ainda prevê uma curva de aprendizagem no desenvolvimento desses veículos que reduz esses custos em 5 pontos percentuais até 2050. Nos cenários BAU_Tec e Policy_Tec, os custos de aquisição desses veículos foram reduzidos para apenas 20% no caso dos híbridos e 50% no caso dos elétricos. Os resultados revelam que, apesar dos menores custos nos cenários tecnológicos, esses veículos possuem participação desprezível na frota brasileira, mesmo na presença de políticas climáticas. Esse resultado é consequência da disponibilidade e competitividade do etanol de cana-de-açúcar no Brasil, que se mostra uma opção mais barata de mitigação do que a aquisição dos veículos híbridos, mesmo considerando a economia relativa de combustíveis que os mesmos permitem.

Para outras regiões do mundo, contudo, os automóveis híbridos mostram-se uma opção tecnológica interessante para mitigar as emissões de GEE. Este é o caso dos EUA, cujos resultados são apresentados na Tabela 23 a título de exemplo. A Tabela 23 revela o percentual de aquisição de novos veículos nos EUA de acordo com o sistema de propulsão dos mesmos. Enquanto no cenário BAU esses veículos participariam da frota apenas em 2050, no cenário Policy os mesmos já seriam adotados em 2035 e atingiriam 21% das aquisições de novos veículos em 2050. Sob o cenário BAU_Tec os veículos híbridos já representariam 5% das novas aquisições

em 2035, mesmo sem políticas climáticas, como forma de reduzir os custos com combustíveis fósseis, que apresentam preços crescentes com o tempo. Sob políticas climáticas no cenário Policy_Tec, 8% dos novos veículos são híbridos em 2035 e atingem 25% das novas aquisições em 2050. Dessa forma, a redução nos custos de aquisição desses veículos permite a sua maior penetração em algumas regiões do modelo, apesar disso só ocorrer a partir de 2035.

Tabela 23 – Participação (%) dos veículos por tipo de sistema de propulsão no total de novos veículos de passeio, EUA.

		2020	2035	2050
BAU	Tradicional	100	100	92
	Híbridos+elétricos	-	-	8
BAU_Tec	Tradicional	100	95	81
	Híbridos+elétricos	-	5	19
Policy	Tradicional	100	97	79
	Híbridos+elétricos	-	3	21
Policy_Tec	Tradicional	100	92	75
	Híbridos+elétricos	-	8	25

Fonte: Resultados da pesquisa

Tecnologias de geração de eletricidade com captura e sequestro de carbono

O modelo EPPA considera o desenvolvimento futuro das tecnologias de geração de eletricidade a partir de gás natural e gaseificação de carvão com captura e sequestro de carbono (tecnologias NGCC-CCS e IGCC-CCS descritas na Tabela 1). Essas tecnologias seriam formas possíveis de representar as tecnologias de captura e sequestro de carbono referenciadas nos relatórios setoriais das indústrias intensivas em energia, apesar de não serem capazes de representar a redução em emissões não provenientes do uso de energia (como seria o caso das observadas na indústria de cimento). As tecnologias NGCC-CCS e IGCC-CCS são cerca de 42% a 52% mais caras para a obtenção de eletricidade que as tecnologias convencionais a base de carvão e gás natural nos cenários BAU e Policy. Nos cenários tecnológicos BAU_Tec e Policy_Tec assume-se que essas tecnologias são apenas entre 20% e 30% mais caras que as tecnologias convencionais de geração de eletricidade baseadas em carvão e gás natural.

A Tabela 24 apresenta os resultados em termos de proporção da geração de eletricidade oriunda das tecnologias de captura e sequestro de carbono no total da

eletricidade gerada em regiões selecionadas do modelo. Os resultados dos cenários BAU e BAU_Tec não são apresentados, uma vez que não há adoção dessas tecnologias no modelo na ausência de políticas climáticas. Pela tabela percebe-se que esse tipo de tecnologia não se desenvolve no Brasil, uma vez que o custo da geração de eletricidade no país a partir de fontes fósseis é mais elevado que a hidroelétrica. Contudo, em outras regiões essas tecnologias são adotadas, mesmo sob custos mais elevados do cenário Policy, como é o caso dos EUA. Sob os custos menores do cenário Policy_Tec, a proporção de eletricidade gerada por essas tecnologias nos EUA é substancialmente maior no final do período considerado. Na UE, por outro lado, a tecnologia só seria dotada no cenário Policy_Tec, e em menor proporção que nos EUA. No mundo como um todo, a taxa de adoção dessas tecnologias é nula em 2020, atinge até 1,3% da geração de eletricidade em 2035 e ate 17% em 2050 no cenário tecnológico de menores custos das mesmas. Dessa forma, a consideração de menores custos para as tecnologias de captura e sequestro de carbono não altera os resultados para o Brasil, mas contribui para reduzir os custos de políticas climáticas em alguns países.

Tabela 24 – Proporção da geração de eletricidade proveniente de tecnologias de captura e sequestro de carbono em regiões selecionadas (%)

		Policy		Policy_Tec	
	Tecnologia	2035	2050	2035	2050
EUA	NGCC-CCS	-	0.9	0.9	3.1
	IGCC-CCS	-	1.2	3.2	65.2
EU	NGCC-CCS	-	-	0.0	3.4
	IGCC-CCS	-	-	0.8	10.9
Brasil	NGCC-CCS	-	-	-	-
	IGCC-CCS	-	-	-	-
Mundo	NGCC-CCS	-	0.1	0.1	0.9
	IGCC-CCS	-	0.1	1.2	15.9

Fonte: Resultados da Pesquisa.

4.3.2 Interação entre Etanol e Carros Híbridos

Uma conclusão dos resultados dos cenários tecnológicos discutidos até aqui é de que a competitividade do etanol brasileiro acaba prevenindo a adoção dos carros híbridos no país. Para investigar essa questão, primeiramente adicionou-se a possibilidade de substituição entre etanol hidratado e a mistura gasolina + etanol

anidro nos veículos híbridos no Brasil. Ainda, foram simulados vários cenários tecnológicos alternativos. No primeiro, considerou-se que a produção de etanol de segunda geração no Brasil não será desenvolvida. Em um segundo cenário, aumentou-se o custo de produção do etanol de cana-de-açúcar brasileiro de primeira geração em 50%. Em um terceiro cenário, dobrou-se o custo de produção de etanol de primeira geração no Brasil. Em todos esses cenários, manteve-se o custo dos carros híbridos como sendo 20% superior ao dos carros convencionais e dos carros elétricos como sendo 50% mais caros no ano de 2015 e a curva de aprendizagem na redução de custos desses veículos. Desses três cenários, apenas o terceiro resultou na penetração dos carros híbridos e elétricos no país, reforçando a conclusão anterior de que a competitividade o etanol brasileiro previne a adoção em larga escala dos carros híbridos.

Para entender esse resultado, é importante compreender como estão representadas as novas tecnologias de sistemas propulsores no modelo e como as mesmas competem com os veículos convencionais. O modelo considera que os consumidores escolhem entre os três tipos de veículos considerando que o serviço de transportes prestados pelos mesmos, junto com seus gastos de combustíveis, são substitutos perfeitos. Ou seja, o consumidor compra a combinação veículo + combustível que for mais atraente quanto ao custo. Como o veículo possui uma vida útil relativamente longa e existem limites à taxa de penetração dos veículos híbridos e elétricos, é possível em um dado momento o consumo de dois, ou mesmo dos três, tipos de veículos pelos consumidores.[24]

Considerando essa representação da competição entre tecnologias veiculares no modelo, deve-se observar a escolha pelos veículos híbridos e elétricos no modelo quando os custos associados à aquisição do veículo convencional e gastos com combustível neste tipo forem superiores, o que tende a acontecer ao longo do tempo com o encarecimento do derivado de petróleo, devido ao seu esgotamento e à maior eficiência dos híbridos e elétricos. Quando políticas climáticas são adotadas, o preço dos derivados de petróleo aumenta mais rapidamente devido à necessidade de

---

[24] KARPLUS et al., 2012 discute em detalhes a representação das tecnologias de veículos híbridos e elétricos bem como de seu uso no modelo EPPA.

pagar pelas emissões de carbono, o que acelera o processo de penetração dos veículos híbridos e elétricos.

No caso brasileiro, a não penetração desses veículos avançados, mesmo quando o etanol de segunda geração no país é desconsiderado, significa que a combinação de veículos convencionais mais combustível é sempre mais barata que as combinações de veículos híbridos ou elétricos com seus respectivos combustíveis. Esse resultado significa que, à medida que o derivado do petróleo se torna mais caro, o etanol substitui a gasolina nos motores flex fuel dos veículos brasileiros, como demonstraram os resultados da Tabela 22, impedindo que os veículos híbridos e elétricos se tornem mais competitivos, uma vez que esses veículos possuem um custo de aquisição mais elevado. Dessa forma, a capacidade de produzir etanol a preços que não acompanham o aumento do preço do petróleo desestimula a penetração dos carros híbridos. Apenas quando os custos de produção do etanol foram aumentados em 100% a adoção dos carros híbridos e elétricos foi observada no modelo. A Tabela 25 apresenta a proporção de veículos híbridos e elétricos na frota brasileira nos cenários de referência (BAU) e Policy sob essa hipótese de maiores custos na produção de etanol. Os resultados revelam uma pequena penetração dos veículos híbridos em 2035, que atinge 15% de participação na aquisição de novos veículos em 2050 no cenário de referência, chegando a 24% no cenário de política. Esses resultados são parecidos com os observados para os EUA na Tabela 23, e sugerem que a política climática estimula a adoção dos veículos híbridos no Brasil, caso o etanol de cana-de-açúcar se torne uma opção tecnológica mais cara do que o observado atualmente.

Tabela 25 – Participação (%) dos veículos por tipo de sistema de propulsão no total de novos veículos de passeio no Brasil sob a hipótese de custos de produção de etanol mais elevados.

		2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
BAU_Tec	Tradicional	100	100	100	100	98	95	90	85
	Híbridos				0	2	5	10	15
Policy_tec	Tradicional	100	100	100	98	94	89	83	76
	Híbridos			0	2	6	11	17	24
	Elétricos								0

Fonte: Resultados do modelo

Duas questões importantes devem ser consideradas a partir do resultado acima: como a adoção dos carros híbridos diante de maiores custos de produção do etanol afetariam as emissões de gases de efeito estufa pelo país? Qual cenário traria menores custos para o país, o cenário de etanol mais barato ou o de adoção dos carros híbridos? A Tabela 26 procura responder a primeira questão, apresentando as emissões de gases de efeito estufa nos cenários BAU e Policy sob as diferentes hipóteses. Os resultados evidenciam que sob a hipótese de custos correntes do etanol, que previnem a penetração dos carros híbridos, as emissões totais de gases de efeito estufa são menores tanto no cenário de referência quanto no cenário de política ao longo de todo o horizonte analisado. Isso ocorre uma vez que o etanol já é uma tecnologia competitiva e é utilizado não apenas no setor de veículos de passeio das famílias, mas também em outros setores de transportes. O encarecimento deste combustível permitiria a adoção dos carros híbridos, porém, impediria o seu uso pelos demais setores da economia. É importante notar, contudo, que tanto em 2035 quanto em 2050 as reduções percentuais em emissões do setor de transporte das famílias tornam-se maiores quando da penetração dos carros híbridos, indicando que esta tecnologia possui um potencial de mitigação maior em um horizonte de tempo bastante distante.

Tabela 26 - Emissões de gases de efeito estufa no setor de transporte domiciliar e no Brasil em Mton CO_2 Eq. nos cenários tecnológicos sob hipóteses alternativas de custo do etanol

		Etanol aos custos correntes				Custos mais elevados do Etanol (Penetração dos carros híbridos)			
Cenário	Setor	2010	2020	2035	2050	2010	2020	2035	2050
BAU_Tec	Transporte	56	80	96	113	75	112	147	162
	Total	1898	1929	2305	2721	1924	2078	2447	2884
Policy_Tec	Transporte	56	79	93	106	75	112	140	140
	Total	1898	1469	1215	1080	1924	1575	1328	1179
Redução %	Transporte	0	-2	-3	-6	0	0	-5	-13
	Total	0	-24	-47	-60	0	-24	-46	-59

Fonte: Resultados da pesquisa.

Na Tabela 27 apresentam-se as variações percentuais no PIB brasileiro sob as duas hipóteses consideradas de custo do etanol. Os resultados indicam que a disponibilidade do etanol a custos compatíveis com os observados atualmente

permitem menores impactos das políticas climáticas no PIB brasileiro pelo menos até o ano de 2040. Nos dois últimos períodos do horizonte temporal considerado, a penetração dos carros híbridos reverte esse resultado, tornando a política climática mais onerosa na situação em que o etanol mais barato impede a penetração desses veículos avançados. Esse resultado reforça o discutido anteriormente, de que existe um potencial de contribuição dos veículos híbridos para mitigação das mudanças climáticas, porém, bastante distante temporalmente dados os custos dessas tecnologias. Deve-se ainda observar que as quedas em PIB a partir de 2045 nos cenários simulados, apesar de mais intensas quando os veículos híbridos não se desenvolvem, estão associadas a menores emissões de gases de efeito estufa. Esse resultado sugere cautela na atribuição de um papel muito importante aos veículos híbridos na mitigação das mudanças no longo prazo, uma vez que o horizonte temporal embute maiores incertezas e os cenários aqui simulados ainda consideram que esses veículos possuem custos mais baixos do que os previstos no desenvolvimento e aquisição desses veículos.

Tabela 27 – Variações percentuais no PIB no cenário de política em relação ao cenário BAU sob hipóteses alternativas de custo do etanol

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Etanol aos custos correntes	0.00	-0.07	-0.09	-0.25	-0.71	-1.33	-2.20	-3.00	-3.88
Custos mais elevados do etanol (penetração dos carros híbridos)	0.00	-0.08	-0.23	-0.34	-0.72	-1.37	-2.22	-2.88	-3.66

Fonte: Resultados da pesquisa.

Esses resultados sugerem que a adoção dos carros híbridos e elétricos no país se tornaria viável apenas diante de uma forte redução nos custos desses veículos, e que o potencial de redução de emissões no setor de transporte urbano é maior pelo uso do etanol no curto e médio prazos. Em relação a políticas públicas, os resultados não suportam a adoção explícita de incentivos (como subsídios) à aquisição destes veículos pelo consumidor, uma vez que são uma opção menos custo efetiva de redução de emissões diante da disponibilidade do etanol de cana-de-açúcar. Políticas mais adequadas estariam relacionadas à pesquisa e inovação para reduzir os custos de produção e aquisição desses veículos.

4.3.3 Agricultura de Baixo Carbono

A representação explícita das diferentes possibilidades de mitigação previstas no Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC) e no Programa ABC é um desafio no modelo EPPA, devido às especificidades tecnológicas previstas nessas políticas, de difícil representação no modelo EPPA diante da agregação setorial de apenas dois grandes setores agropecuários, o de culturas e o de pecuária.

O Plano e Programa ABC pretendem, para o horizonte de 2010 a 2020, atingirem a recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas, a ampliação da integração lavoura pecuária em 4 milhões de hectares, o aumento na área com plantio direto de qualidade em 8 milhões de hectares, e a expansão das áreas que fazem uso da fixação biológica de nitrogênio em 5,5 milhões de hectares. Espera-se que essas medidas, que fazem parte dos “NAMAs” apresentados pelo Governo Brasileiro em Copenhagen, em dezembro de 2009, devam reduzir as emissões anuais de CO2-equivalente em, respectivamente, 83 a 104 milhões de toneladas, 18 a 22 milhões de toneladas, 16 a 20 milhões de toneladas e 16 a 20 milhões de toneladas.

Essas opções tecnológicas podem ser representadas no modelo EPPA, mesmo este considerando apenas os dois setores agropecuários, considerando-se os investimentos em capital e outros fatores produtivos necessários para reduzir determinado volume de emissões e os custos associados a esses investimentos. Essas informações permitiriam a calibragem das elasticidades das árvores tecnológicas de produção de culturas e de pecuária de forma a obter curvas de custo marginal de abatimento compatíveis com os dados de custos das tecnologias de baixo carbono e seus potenciais de mitigação de emissões. A maior limitação para tal calibragem, contudo, é a escassez de informações sobre as necessidades de investimentos para adoção dessas tecnologias e potenciais reduções em emissões que os mesmos proporcionariam.

O estudo *Brazil Low-Carbon Country Case Study* (Gouvello, 2010) estimou curvas de custo marginal de abatimento para diversas opções de estratégias e tecnologias de redução de emissões. As tecnologias consideradas naquele estudo relacionadas à agropecuária, seu potencial anual de redução de emissões e o preço do carbono capaz de induzir a sua adoção são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Redução anual em emissões entre 2010 e 2030 e preço do carbono para induzir a adoção de tecnologias de redução de emissões.

	Redução em Emissões		Preço Carbono
	%	Mt CO2 eq	U$/ton CO2 Eq.
Cogeração	1	7,9	8
Etanol substituindo Gasolina (uso doméstico)	2	8,8	24
Redução do desmatamento + intensificação pecuária	53	302,05	6
Aumento do plantio direto	3	17,75	0,5
Exportações de etanol substituindo a gasolina	6	33,35	48
Reflorestamento	10	54,25	12

Fonte: Gouvello (2010).

A Tabela 29 não apresenta informações sobre todas as tecnologias previstas no Plano ABC, além de que o estudo sugere cautela no uso dos números, devido ao elevado grau de incerteza nas mensurações. Contudo, na ausência de informações, esses são os únicos parâmetros disponíveis para incorporar a agricultura de baixo carbono no modelo EPPA. Dessa forma, o modelo foi calibrado de forma a refletir algumas das tecnologias da Tabela 29, gerando as curvas marginais de abatimento da Figura 27. Essas curvas representam o nível anual de redução em emissões esperado (em valores absolutos ou em percentual) de acordo com o preço do carbono em vigor.

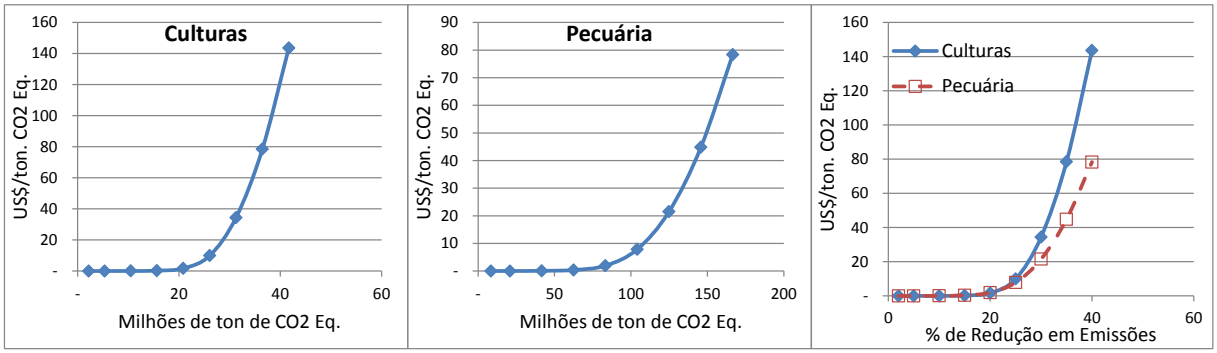


Figura 27 – Curvas de custo marginal de abatimento geradas pelo modelo EPPA para representar as tecnologias da agricultura de baixo carbono no Brasil

Para o setor de culturas, a calibragem do modelo EPPA permite representar o potencial de redução de 16 Mton de CO_2 Eq. a um preço de carbono de R$0,25, o que caracteriza a contento o crescimento do uso do plantio direto na Tabela 16. Já

para o setor de pecuária, a Figura 27 indica a redução de 104 Mton de CO_2 Eq. ao preço de carbono de R$7,85. Como o estudo de Gouvello (2010) não separa a redução do desmatamento da intensificação de pastagens, não há como fazer comparações precisas daquele estudo com a calibragem do modelo EPPA.

Ainda, para uma representação mais adequada do Plano e Programa ABC, faz-se necessário simular no modelo EPPA o aporte de recursos previstos para a adoção das tecnologias de baixo carbono. O Programa ABC prevê financiamentos com taxas de juros de 5% ao ano e até US$1 milhão por tomador para a adoção das tecnologias e práticas previstas no Plano ABC. Essa política pode ser representada no modelo EPPA na forma de um subsídio ao uso do fator capital, dado pela diferença entre a taxa de juros do programa e a taxa de referência da economia ou do setor (taxa Selic ou taxa média de outros financiamentos agropecuários).

A partir dessas considerações, buscou-se simular novamente o cenário Policy, só que agora com a representação das tecnologias de baixo carbono no modelo como nas curvas marginais de abatimento da Figura 27 e com o incentivo à adoção dessas tecnologias, na forma de subsídios ao uso do capital na agricultura. Esse cenário foi chamado de Policy_Tec.

Os resultados desse cenário para algumas variáveis são apresentados a seguir, comparando-os, quando pertinente, aos resultados encontrados anteriormente. A Figura 28 Apresenta os resultados de mudanças no valor da produção dos setores de Culturas (CROP) e Pecuária (LIVE) nos cenários Policy e Policy_Tec. Considerando que o corte em emissões é o mesmo nos dois cenários, a representação das tecnologias de baixo carbono e do Programa ABC no modelo EPPA reduzem os impactos negativos da política climática brasileira. O setor de culturas experimenta resultados mais favoráveis, com aumentos na produção nos anos de 2020 e 2035, e queda de apenas 3% na produção em 2050 no cenário Policy_Tec, bem inferior à queda de mais de 10% no cenário Policy. Já o setor de pecuária continua sofrendo perdas em todos os anos, porém, menos expressivas que no Cenário Policy. Esses resultados indicam que a calibragem da curva de custo marginal de abatimento do modelo EPPA no cenário Policy_Tec permitem menores custos na mitigação das emissões do que a formulação original do modelo, bem como os recursos do Programa ABC amenizam os custos de se adotar tecnologias de baixo carbono para os produtores, impedindo assim perdas expressivas na produção e na competitividade dos setores agropecuários. Contudo,

o setor da pecuária tem maior dificuldade em manter a produção, mesmo com os recursos do Programa ABC, perdendo competitividade em relação ao setor de culturas.

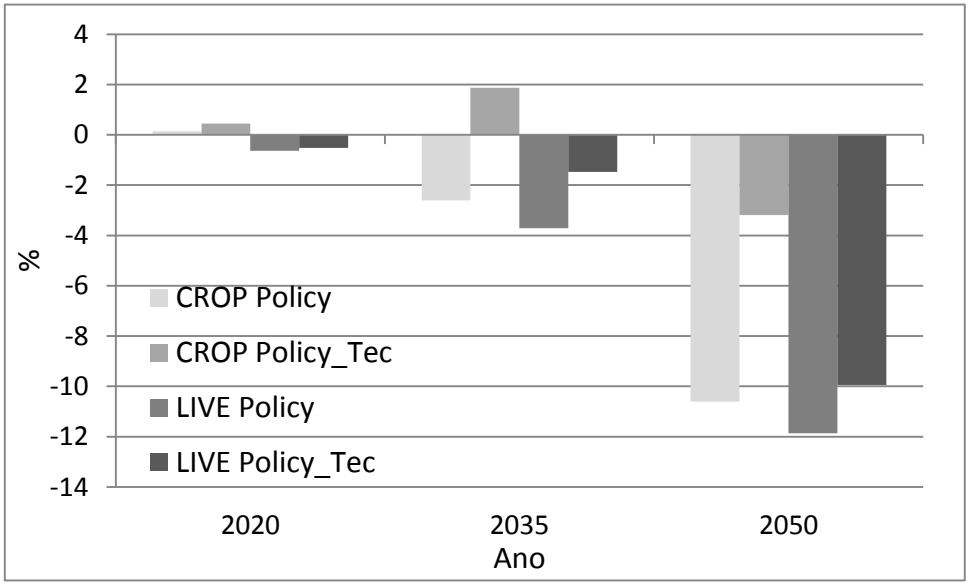


Figura 28 – Variações na produção brasileira (%) dos setores agropecuários nos cenários Policy e Policy_Tec

Deve-se ressaltar que as mudanças no valor da produção são calculadas em relação à produção no Cenário de Referência (BAU). A Tabela 30 apresenta as taxas de crescimento da produção nos setores de culturas e pecuária em diferentes cenários. Essas taxas confirmam que o cenário de tecnologias de baixas emissões na agricultura brasileira permite taxas de crescimento na produção mais próximas daquelas observadas no cenário de referência.

Tabela 30 – Taxas de crescimento (%) da produção dos setores agropecuários em relação ao ano de 2010

	2020			2035			2050		
	BAU	Policy	Policy_Tec	BAU	Policy	Policy_Tec	BAU	Policy	Policy_Tec
CROP	2.09	2.10	2.24	2.37	2.27	2.48	2.82	2.53	2.74
LIVE	2.48	2.42	2.46	2.53	2.38	2.49	2.57	2.25	2.31

Fonte: Resultados da pesquisa.

Um aspecto importante do Programa ABC é o volume de recursos necessários para induzir o agricultor a adotar as tecnologias de baixas emissões. A Tabela 31

apresenta os montantes de recursos que seriam tomados pelos agricultores para atingir as metas de cortes em emissões simuladas. Os valores necessários seriam de cerca de US$ 0,54 bilhões em 2015 e US$ 0,6 bilhões em 2020, o que são montantes compatíveis com o disponibilizado pelo governo atualmente no Programa ABC. O setor de culturas sempre toma mais recursos que o de pecuária, por ter um valor de produção mais expressivo. Ainda, isso reflete a maior competitividade que o cenário tecnológico traz para esse setor, sugerindo que as taxas de juros do programa ABC para mitigação de emissões na pecuária deveriam ser menores se fosse objetivo do programa distribuir recursos de forma mais equitativa entre os dois setores ou evitar perdas maiores na pecuária. Contudo, a aplicação de taxas de juros diferentes entre os setores tenderia a diminuir a eficiência do programa ABC, por discriminar o setor com maior capacidade de abatimento de emissões.

Tabela 31 – Montante de recursos do Programa ABC necessários para atingir os cortes em emissões do cenário Policy, em bilhões de US$

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CROP	0.33	0.37	0.88	1.51	2.50	3.88	5.60	7.86
LIVE	0.21	0.23	0.54	0.96	1.53	2.24	3.13	4.24

Fonte: Resultados da pesquisa.

A introdução das tecnologias de baixo carbono no modelo e do Programa ABC no cenário Policy_Tec pouco alteram os resultados do PIB diante da política climática simulada. A Tabela 32 compara as variações do PIB nos cenários Policy e Policy_Tec em relação ao PIB do cenário de referência. A queda em PIB é geralmente menor quando da incorporação das tecnologias de baixo carbono na agricultura e do Programa ABC até o ano de 2035, quando então se torna mais elevada. Isso reflete o menor custo de mitigação para a agropecuária além de indicar que o subsídio de taxa de juros do Programa ABC não é prejudicial à economia. Contudo, quando os cortes em emissões e o volume de recursos tomados através do Programa ABC se tornam mais expressivos, as perdas em PIB são mais acentuadas.

Tabela 32 – Variações no PIB brasileiro nos cenários de políticas climáticas

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Policy	-0.08	-0.28	-0.42	-0.82	-1.36	-2.26	-3.11	-3.99
Policy_Tec	-0.05	-0.17	-0.42	-0.67	-1.24	-2.35	-3.11	-4.10

Fonte: Resultados da pesquisa.

5 Contribuição do Brasil para Mitigação das Mudanças Climáticas

Os cenários simulados até o momento mostram que o país possui grande potencial de contribuição para mitigação dos impactos negativos das mudanças climáticas pela redução nas emissões de gases de efeito estufa. De forma a verificar o custo associado aos cortes em emissões em diferentes setores da economia, os cortes em emissões do cenário Policy foram simulados novamente, porém, de forma a considerar a aplicação parcial da política restrita a alguns setores de cada vez. Dessa forma, seis cenários foram considerados: o cenário Policy original com reduções em emissões nos diversos setores da economia através de mercados setoriais de carbono e das provenientes do desmatamento; um cenário de redução apenas das emissões de desmatamento (denominado LUC); cenário de redução apenas das emissões provientes do uso de energia (Energia); redução apenas das emissões da agropecuária (Agropecuária); redução das emissões de todos os setores como no cenário Policy, porém, sem redução das emissões do desmatamento (Sem LUC); e redução das emissões de todos os setores através de um mercado amplo de carbono no país, porém, sem redução das emissões do desmatamento.

A Figura 29 apresenta as reduções em emissões em cada cenário, em Milhões de Ton. de CO_2 Eq. Essas reduções seguem os cortes setoriais descritos na Tabela 9. Como previsto na Política Nacional de Mudança do Clima, os cortes mais pronunciados devem-se ao controle das emissões do desmatamento, enquanto os setores da agropecuária e o consumo de energia contribuem com menores parcelas. Contudo, a partir de 2035 as possibilidades de reduções de emissões de mudanças no uso da terra praticamente se esgotam, e a participação dos setores da agropecuária e do uso de energia no controle de emissões se intensificam.

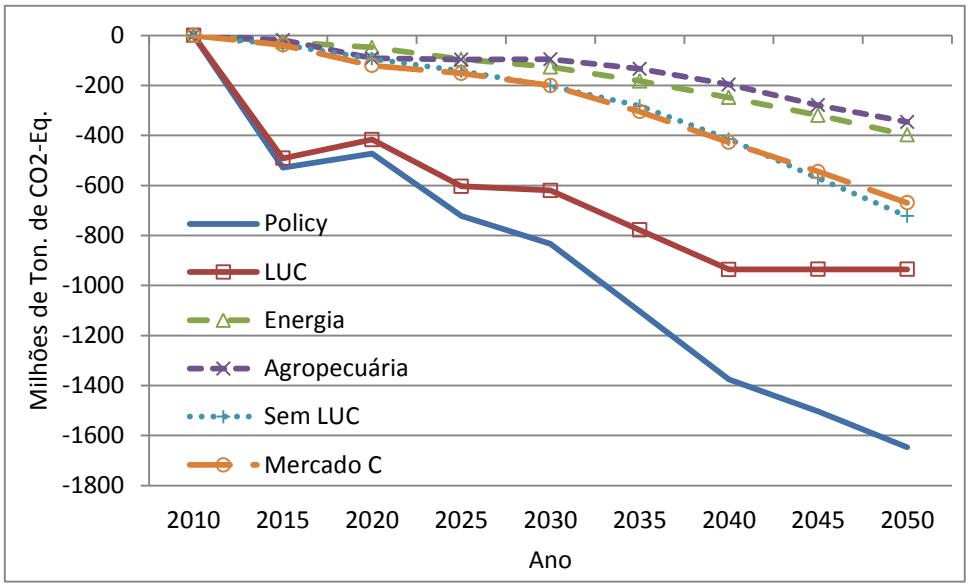


Figura 29- Redução das emissões de gases de efeito estufa no Brail em relação ao cenário de referência (BAU)

A Figura 30 apresenta as quedas percentuais no PIB brasileiro em relação ao PIB do cenário de referência BAU, a partir da aplicação desses diferentes cortes em emissões. Os resultados sugerem que o controle de emissões de mudanças no uso da terra (cenário LUC) é bem mais vantajoso em termos de custo econômico e de potencial de redução em emissões, seguido das reduções em emissões dos setores agropecuários. Os cortes nas emissões provenientes do uso de energia são os mais onerosos. Contudo, se um mercado amplo de carbono for aplicado, as opções mais baratas de mitigação na agricultura contribuem para que os custos de redução de emissões provenientes do consumo energético sejam minimizados, alcançando menor nível de perda do produto na economia como um todo.

Dessa forma, a contenção das emissões provocadas pelo desmatamento e mudanças no uso da terra mostra-se como a opção de menor custo e de maior potencial de contribuição do país para ações de mitigação das mudanças climáticas. A grande disponibilidade de áreas desmatadas subutilizadas, incluindo pastagens de baixa produtividade, deve contribuir para que a redução do desmatamento não afete negativamente a expansão da produção agropecuária no país. Nesse sentido, a adoção de tecnologias de baixas emissões na agropecuária também mostra-se como uma importante via de contribuição para reduzir as mudanças climáticas. Contudo, deve-se atentar para os custos relativamente maiores de medidas setoriais associadas à transição para uma economia de baixo carbono em comparação a

políticas de mercados amplos de créditos de emissões, uma vez que essas tendem a estimular a redução no consumo de energia, investimentos em aumento na eficiência e na substituição de insumos e fontes de energia emissora de forma mais eficiente, impedindo assim o risco de escolha de metas setoriais e tecnologias menos eficientes pelos formuladores de políticas.

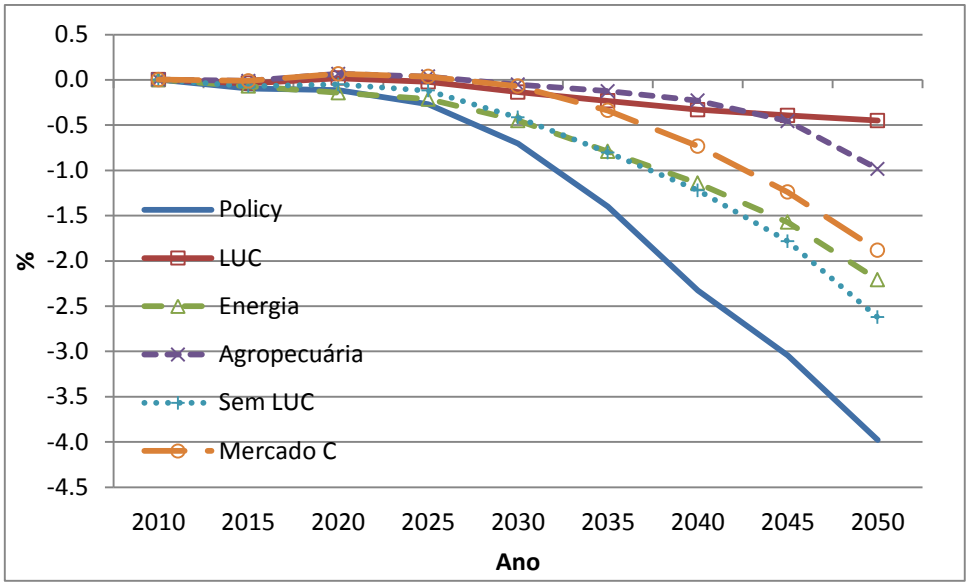


Figura 30 – Variações no PIB brasileiro em relação ao cenário de referência (BAU)

Ainda, como discutido nos cenários de política da Seção 4.1, barreiras comerciais, como tarifas compensatórias de carbono, são instrumentos de baixa eficiência em conter os vazamentos de emissões e prevenir a perda de competitividade dos países que as impõem. Isso significa que o Brasil deve tomar uma posição ativa nas discussões e fóruns internacionais contra tais tipos de instrumentos.

6 Conclusões

Procurou-se mensurar os impactos da economia mundial de baixo carbono a partir da implementação de cenários de políticas climáticas capazes de reduzir as emissões de gases de efeito estufa a partir de mudanças tecnológicas aumentar na eficiência no uso de energia e reduzir o uso de insumos emissores de gases de efeito estufa. Diferentes cenários de políticas climáticas foram considerados, de forma a representar as discussões internacionais sobre o tema. Tais cenários consideram: a adoção de políticas climáticas pelos países desenvolvidos e alguns países em desenvolvimento que se comprometeram com metas de cortes em

emissões nos fóruns internacionais (Rússia, Brasil, México, Coréia do Sul e Indonésia) (cenário Policy); a adoção de políticas climáticas pelos mesmos países, porém com a cobrança de tarifas compensatórias de carbono pelos países desenvolvidos contra importações de países sem políticas de reduções em emissões (cenário Policy_BCA); adoção de políticas climáticas pelos mesmos países com cobrança de tarifas compensatórias de carbono, porém sem a participação do Brasil (cenário Policy_BCA_noBRA); e adoção de política climática global, com participação de todos os países em um mercado único de carbono (cenário Policy_Global).

Os cenários simulados mostram que as discussões internacionais vão em direção a maiores esforços de reduções em emissões pelos países desenvolvidos, considerando a contribuição histórica mais expressiva destes para os atuais níveis de concentrações de gases de efeito estufa. Contudo, os resultados encontrados sugerem que o atual nível de comprometimento dos diferentes países com cortes em emissões é insuficiente para estabilizar o fluxo de emissões em patamares considerados seguros pela comunidade científica, que evitem um aumento na temperatura média terrestre inferior a 2º C. A aplicação de tarifas compensatórias de carbono pelos países desenvolvidos não evita os vazamentos em emissões nem a perda de competitividade pelos países que as adotarem, revelando que este instrumento tem baixa capacidade de atingir seus objetivos. A adoção da política climática de alcance global permite reduzir os custos de mitigação nos países desenvolvidos através do comércio de créditos de carbono, bem como atingir um nível estacionário de emissões de cerca de 60 bilhões de toneladas de CO_2-Eq. Os países em desenvolvimento que ainda não se comprometeram com reduções em emissões seriam justamente os que se tornariam ofertadores líquidos de créditos de carbono.

A política climática brasileira prevê cortes em emissões diferenciados entre agropecuária, mudanças no uso da terra, siderurgia e uso de energia. Os cortes mais intensos estão associados à redução do desmatamento, sendo este componente o mais importante na composição das emissões brasileiras. A aplicação desses cortes produz poucos impactos na economia brasileira no ano de 2020, com ligeira queda de 0,3% do PIB em relação ao que seria observado no cenário de referência sem a política. Contudo, a intensificação da política gera perdas crescentes, que chegam a 4% do PIB em 2050. Esses custos, elevados em

comparação aos estimados para os países desenvolvidos, devem-se em parte à aplicação da política com metas setoriais diferenciadas de redução em emissões, com créditos de carbono não comercializáveis entre setores. Tal política não permite que aqueles setores com menores custos de mitigação respondam por maiores cortes em emissões. Dessa forma, as perdas em PIB são relativamente elevadas devido ao menor custo-efetividade da política setorial considerada. As perdas econômicas representam custos associados à transição para uma economia de baixo carbono, como pagamentos de impostos ao carbono, redução no consumo de energia, investimentos em aumento na eficiência e na substituição de insumos e fontes de energia emissora por outros mais limpos ou renováveis. Esses resultados não consideram os benefícios associados ao controle das emissões, de redução nos danos e prejuízos que seriam causados pelas mudanças climáticas.

A aplicação de tarifas compensatórias de carbono pelos países desenvolvidos não altera as perdas em PIB observadas no cenário Policy para o Brasil, uma vez que as exportações brasileiras não estão sujeitas ao pagamento das tarifas compensatórias, que neste cenário só são aplicadas a países que não possuem políticas de reduções em emissões. Se o Brasil não aplicar políticas climáticas, mas estiver sujeito às tarifas compensatórias de carbono, as perdas em bem-estar são inferiores a 0,5%, provenientes da incidência das tarifas compensatórias e da desaceleração da economia dos países desenvolvidos. Já o cenário de política climática global permite que os países comercializem créditos de carbono, e assim, diminuam os custos dos cortes em emissões, o que reduz as perdas em PIB para o Brasil a valores percentuais inferiores a 1,7%, ou menos da metade das perdas em PIB observadas nos cenários de aplicação de políticas setoriais pelo Brasil.

Os impactos sobre o bem-estar dos consumidores brasileiros indicam uma queda no nível de bem-estar entre 0,01% e 0,5% no período de 2015 a 2030, e a partir daí, uma intensificação, mas partindo de 1% de queda em 2035 e atingindo -3,6% em 2050. Quando o país não aplica políticas climáticas, mas está sujeito ao pagamento das tarifas compensatórias de carbono, as perdas de bem-estar são bem mais modestas, apesar de persistentes, já que as tarifas compensatórias são capazes de afetar a competitividade relativa do país, comprometendo a geração de renda via exportações. Quando a política climática global é simulada, o Brasil apresenta perdas em bem-estar mais moderadas, uma vez que os mercados de carbono são

aplicados de forma ampla no país e internacionalmente, incluindo as economias em desenvolvimento.

Os resultados setoriais sobre a produção, exportações e importações revelam mudanças importantes na competitividade relativa dos setores. As mudanças na produção e nas exportações dos diferentes setores são pouco expressivas no ano de 2020 em todos os cenários simulados, o que reflete que os cortes em emissões implementados naquele ano afetam pouco os custos de produção dos setores, seja pelo nível modesto de corte em emissões, seja pela capacidade dos setores de adotarem tecnologias e fontes energéticas de menores emissões.

Os setores de energia fóssil são os maiores prejudicados com as políticas climáticas, com destaque para a queda na produção de gás natural, carvão e de refino de petróleo. Os setores agropecuários, a indústria de alimentos, a indústria intensiva em energia e o setor de transportes também são impactados negativamente, principalmente no ano de 2050, enquanto os setores de outras indústrias e de serviços quase não sofrem impactos. Esses resultados são consequência das diferentes capacidades dos diversos setores em reduzir emissões via adoção de tecnologias de baixas emissões, aumento na eficiência energética, e substituição de fontes de energia fóssil por fontes renováveis ou limpas. Setores com custos mais elevados ou menores condições de reduzir emissões acabam perdendo fatores produtivos para os setores com maior capacidade de adaptação à economia de baixo carbono, alterando a competitividade relativa dos diferentes setores e a estrutura de produção da economia. Vale ressaltar que os resultados obtidos para o ano de 2020 são pouco expressivos e modestos, não representando grandes mudanças ou desafios à economia. Já para o ano de 2035 e 2050 os impactos são consideráveis em alguns setores, e indicam mudanças importantes na competitividade relativa setorial. Para o ano de 2050 em particular o estudo indica grandes mudanças estruturais na economia brasileira.

Dentre os cenários simulados, o que apresenta resultados mais favoráveis ou menos prejudiciais à economia como um todo e para produção setorial em geral, é aquele em que o Brasil não adota políticas climáticas, enquanto os países desenvolvidos reduzem emissões e cobram tarifas compensatórias às importações baseadas nas emissões de cada bem. Esse resultado é consequência dos menores custos que a economia sofreria ao ter que enfrentar barreiras baseadas em carbono às suas exportações, que contribuem relativamente pouco para a produção da maioria dos

setores e para o PIB do país, em comparação com os custos de ter que reduzir diretamente as emissões nos diferentes setores, seja pela adoção de tecnologias e/ou fontes de energia mais caras ou pela redução na produção, por conta de políticas climáticas domésticas ou globais. Contudo, esse resultado não deve ser interpretado como um desestímulo à busca por uma economia de baixo carbono, uma vez que as consequências negativas do aumento nas concentrações de gases de efeito estufa são desconsideradas no presente estudo e têm sido apontadas pela comunidade científica mundial como certas e potencialmente elevadas.

Assim, os resultados indicam que a implementação de um mercado mundial amplo de carbono, além de permitir que uma economia de baixo carbono seja estabelecida a menores custos, também reduz a amplitude das mudanças em produção e fluxos comerciais, já que as responsabilidades de cortes em emissões são melhores distribuídas de acordo com os custos de mitigação de cada setor, permitindo maiores cortes em emissões naqueles setores com menores custos. Dessa forma, as metas nacionais de reduções em emissões devem ser acompanhadas de intensa atividade diplomática nos fóruns internacionais para adesão ampla de outros países em desenvolvimento aos esforços de redução em emissões e maiores comprometimentos pelos países desenvolvidos. Preferencialmente focando em arranjos e esquemas que permitam o aproveitamento das oportunidades mais baratas de mitigação, como os mercados de carbono internacionais, mecanismos de desenvolvimento limpo e outros instrumentos de cooperação multilateral e multiregional.

Por fim, foram implementados cenários considerando trajetórias tecnológicas apontadas nos relatórios setoriais. As hipóteses consideradas nesses cenários incluem: menor custo de implantação de usinas de geração de energia elétrica com captura e sequestro de carbono; menor custo de desenvolvimento e adoção de veículos híbridos e Plug-in; possibilidade de uso de biocombustíveis no transporte aéreo e rodoviário de carga; maior substituição da gasolina por biocombustível importado nos países desenvolvidos; desenvolvimento do etanol de segunda geração no Brasil a partir do uso do bagaço da cana-de-açúcar; cenários de tecnologias de baixo carbono na agropecuária brasileira. Nos demais setores não foram considerados hipóteses adicionais. Vale lembrar que o modelo EPPA já representa vários aspectos de futuras trajetórias tecnológicas apontadas nos

estudos setoriais, como por exemplo, o aumento da eficiência no uso de energia nos setores intensivos em energia.

Os resultados dos cenários tecnológicos foram comparados com os dos cenários originais, e revelam que, para o Brasil, as hipóteses tecnológicas praticamente não afetam os resultados agregados em termos de emissões e os custos das políticas climáticas em termos de PIB e em bem-estar. Isto ocorre uma vez que a principal mudança provocada pelos cenários tecnológicos recai sobre o setor de biocombustível, que apresenta um forte incremento em produção e produtividade. Esse forte aumento em produção é destinado principalmente para exportações e para o uso em outros setores de transportes, o que acaba afetando os resultados dos setores de produção e refino do petróleo e de transportes. Contudo, a disponibilidade do etanol de cana-de-açúcar a custos competitivos com a gasolina no país impede a adoção dos veículos híbridos, que nada contribuem para mitigar os custos das políticas climáticas no país. Apenas sob hipóteses de custos de produção do etanol 100% superiores aos custos correntes os veículos híbridos penetrariam em volume considerável na frota nacional. Ainda, não se observa o desenvolvimento das tecnologias de geração de eletricidade com captura e sequestro de carbono no país, o que significa que as mesmas não se tornam competitivas mesmo na presença de uma política climática doméstica.

A introdução das tecnologias de baixo carbono na agricultura no modelo e do Programa ABC permite menores quedas em PIB no cenário de política climática, o que reflete o menor custo de mitigação para a agropecuária além de indicar que o subsídio de taxa de juros deste programa não é prejudicial à economia. Esse resultado sugere que o Plano e o Programa ABC são importantes instrumentos de redução em emissões para o país.

REFERÊNCIAS

AMIT, R. Petroleum reservoir exploitation: switching from primary to secondary recovery. **Operations Research**, Baltimore, v. 34, p. 534-549, 1986.

BABIKER, M.; ECKAUS, R. Rethinking the Kyoto Emissions Targets. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 54, n. 4, p. 339-414, 2002.

BABIKER, M. H., ECKAUS, R. S. Unemployment effects of climate policy. **Environmental Science and Policy**, New York, v. 10, n. 7-8, p. 600-609, 2007.

BABIKER, M.; GURGEL, A.; PALTSEV, S.; REILLY, J. **The forward-looking version of the MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) model**. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2008. Report n. 161. Disponível em: <http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt161.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2009.

BABIKER, M.; JACOBY, H. D. **Developing country effects of Kyoto-type emissions restrictions**. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 1999. Report n. 53. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=624>. Acesso em: 20 ago. 2006.

BABIKER, M.; METCALF, G.; REILLY, J. Tax distortions and global climate policy. **Journal of Economic and Environmental Management**, Maryland Heights, v. 46, n. 2, p. 269-287, 2003.

BABIKER, M.; REILLY, J; JACOBY, H. The Kyoto Protocol and developing countries. **The Energy Policy**, Oxford, v. 28, n. 8, p. 525-536, 2000.

BERNARD, A.; PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; VIELLE, M.; VIRGUIER, L. **Russia's role in the Kyoto Protocol**. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2003. Report n. 98. Disponível em: < http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=670>. Acesso em: 25 ago. 2006.

BERNSTEIN, P. M.; MONTGOMERY, W. D.; RUTHERFORD, T. F. Effects of restriction on international permit trading: the MS-MRT model. **The Energy Journal**, Wellington, n. esp., p. 221-256, 1999.

BOSETTI, V.; CARRARO, C.; GALEOTTI, M.; MASSETTI, E.; TAVONI, M. A world induced technical change hybrid model. **The Energy Journal**, Wellington, v. 26, n. esp., p. 13-37, 2006.

BOSETTI, V.; TAVONI, M. Uncertain R&D, backstop technology and GHGs stabilization. **Energy Economics**, Amsterdam, v. 31, p. S18-S26, 2009. Suplemento 1.

BRANNLUND, R.; GREN, I. M. (Eds.). **Green taxes**: economic theory and empirical evidence from scandinavia. Cheltenham: Edward Elgar, 1999.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. *Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa* – Informações Gerais e Valores Preliminares. 2009.

BROOKE, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A; RAMAN, R. **GAMS**: a user's guide. Washington: GAMS Development Corporation, 1998. 262 p.

BURNIAUX, J. M.; NICOLETTI, G.; OLIVEIRA MARTINS, J. **GREEN**: a global model for quantifying the cost of policies to curb CO_2 emissions. 1992. OECD Economic Studies, n. 19.

BURNIAUX, J. M.; TRUONG, P. T. **GTAP-E**: an energy-environmental version of the GTAP model. Center for Global Trade and Analysis. Purdue, 2002. Technical Paper n. 16. Disponível em: < https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=923>. Acesso em: 03 ago. 2008.

CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY SOLUTIONS. Disponível em: <http://www.pewclimate.org/policy_center/internacional_policy>. Acesso em: 13 dez. 2011.

COASE, R. The problem of social costs. **Journal of Law & Economics**, Chicago, v. 3, p. 1-44. 1960.

COSSA, P. **Uncertainty analysis of the cost of climate policies**. 2004. Thesis (Master of Science) - Technology and Policy Program, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2004.

COYLE, W. The future of biofuels: a global perspective. **Amber Waves**, Washington, v. 5, n. 5, p. 24-29, 2007. Disponível em: <http://www.ers.usda.gov/AmberWaves/November07/Features/Biofuels.htm>. Acesso em: 7 mar. 2008.

DIAZ, M. D. C.; SCHWARTZMAN, S. Carbon offsets and land use in the Brazilian Amazon. In: MOUTINHO, P.; SCHWARTZMAN, S. (Eds.). **Tropical deforestation and climate change**. Washington, DC: Environmental Defense Fund, 2005. p. 93-98.

DIMARANAN, B.; MCDOUGALL, R. **Global trade, assistance, and production**: the GTAP 5 Data Base. West Lafayette: Center for Global Trade Analysis, Purdue University, 2002.

DINIZ, E. M. Climate change and economics in Brazil. In: HÜTTNER, K. L.; HAKE, J-F.; FISCHER, W. (Orgs.). **Climate change mitigation and adaptation**: identifying options for developing countries. Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2003. v. 1, p. 217-219.

DINIZ, E. M. **Crescimento, poluição e o Protocolo de Quioto**: uma avaliação do caso brasileiro. Pós-Doutorado (Relatório) - University of Oxford, University of Oxford & St Antony's College Centre for Brazilian Studies, Oxford, 2000.

DINIZ, E. M. Lessons from the Kyoto Protocol. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 10, n. 1, p. 27-38, 2007.

DOUGHERTY, K. Quebec the first to announce carbon tax. **Canada National Post**, Ontario, 7 jun. 2007. p. A1.

DOWLATABADI, H.; MORGAN, M. G. A model framework for integrated studies of the climate problem. **The Energy Policy**, Oxford, v. 21, n. 3, p. 209-221, 1993.

EDMONDS, J.; PITCHER, H.; ROSENBERG, N.; WIGLEY, T. Design for the global change assessment model. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INTEGRATIVE ASSESSMENT OF MITIGATION, IMPACTS AND ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE. **Proceeding** … Laxenburg, Austria: IIASA, 1994.

EMBRAPA. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo, 2008. Disponível em: < http://www.embrapa.br/publicacoes/tecnico/aquecimentoglobal.pdf/view>. Acesso em: 05 maio 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2010**: Ano Base 2009. Rio de Janeiro: EPE, 2010. 276 p.

EUROPEAN COMMUNITY. Directive 2003/87/EC of the european parliament and of the council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the community and amending Council Directive 96/61/EC. **Official Journal,** L 275, p. 32–45, 25 October 2003.

EUROPEAN COMMISSION. **Communication from the commission to the council and the european parliament**: the share of renewable energy in EU. Brussels, Belgium, 2004. Disponível em: <http://ec.europa.eu/energy/res/legislation/country_profiles/com_2004_366_en.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2008.

EUROPEAN COMMISSION. **Impact assessment, commission staff working document, sustainable power generation from fossil fuels**: aiming for near-zero emissions from coal after 2020. Brussels, Belgium, 2007. Disponível em: < http://ec.europa.eu/energy/energy_policy/doc/16_communication_fossil_fuels_en.pdf >. Acesso em: 27 jul. 2008.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY. **Application of the emissions trading irective by EU Member States**. Copenhagen, Denmark, 2006. European Environmental Agency Technical Report, N. 2/2006.

FARGIONE, J., HILL, J., TILMAN, D., POLASKY, S., HAWTHORNE, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science** 319, p.1235 -1238, 2008.

FEIJÓ, F. F.; PORTO JÚNIOR, S. S. Protocolo de Quioto e o bem–estar econômico no Brasil: uma análise utilizando equilíbrio geral computável. **Análise Econômica**, João Pessoa, v. 27, n. 51, p. 127-154, 2009.

FERREIRA FILHO, J. B. S.; ROCHA, M. T. Avaliação econômica de políticas públicas visando redução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 45., 2007, Londrina. **Anais** ... Londrina: SOBER, 2007.

FOWLIE, J.; ANDERSON, F. B. C. Introduces carbon tax. **The Vancouver Sun**, Vancouver, Feb. 19 2008.

GITIAUX, X., PALTSEV, S., REILLY, J., RAUSCH, S. Biofuels, climate policy and the European vehicle fleet. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2009. Report n. 176. Disponível em: < http://globalchange.mit.edu/files/document/MITJPSPGC_Rpt176.pdf>. Acesso em: 10 out. 2011.

GOULDER, L. H. Effects of carbon taxes in an economy with prior tax distortions: an intertemporal general equilibrium analysis. **Journal of Economic and Environmental Management**, Maryland Heights, v. 29, n. 3, p. 271-297, 1995.

GOULDER, L. H.; SCHNEIDER, S. H. Induced technological change and the attractiveness of CO2 abatement policies. **Resource and Energy Economics**, Amsterdam, v. 21, n. 3-4, p. 211-253, 1999.

GOUVELLO, C. Brazil Low-Carbon Country Case Study. The World Bank Group, 2010. Disponível em: < http://siteresources.worldbank.org/BRAZILEXTN/Resources/Brazil_LowcarbonStudy.pdf>. Acesso em: 3 out. 2012.

GUILHOTO, J. J.; LOPES, R.; SEROA DA MOTTA, R. **Impactos ambientais e regionais de cenários de crescimento da economia brasileira, 2002-12**. Rio de Janeiro: IPEA, 2002. (Texto para Discussão, 892)

GURGEL, A. C.; REILLY, J. M.; PALTSEV, S. Potential land use implications of a global biofuels industry. **Journal of Agricultural & Food Industrial Organization**, Berkeley, v. 5, n. esp, 2007.

HANSEN, J.; SATO, M.; RUEDY, R.; LO, K.; LEA, D. W.; ELIZADE, M. M. Global change temperature. **Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America** - **PNAS**, Washington, v. 103, n. 39, p. 14288-14293, Sept. 2006.

HARRISON, W. J.; PEARSON, K. R. Computing solutions for large general equilibrium models using GEMPACK. **Computational Economics**, New York, v. 9, n. 2, p. 83-127, 1996

HERTEL, T. **Global trade analysis***:* modeling and Applications*.* Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

HERTEL, T. W.; GOLUB, A. A.; JONES, A. D.; O'HARE, M.; PLEVIN, R. J.; KAMMEN, D. M. Effects of US maize ethanol on global land use and greenhouse gas emissions: estimating market-mediated responses. **BioScience**, Berkeley, v. 60, n. 3, p. 223-231, 2010.

HILGEMBERG, E. M.; GUILHOTO, J. J. M. Uso de combustíveis e emissões de CO2 no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto. **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 16, n. 1, p. 49-99, 2006.

HOLLOWAY, S.; BENTHAM, M.; KIRK, K. Underground storage of carbon dioxide. In: SHACKLEY, S.; GOUGH, C. (Eds.). **Carbon capture and its storage**: an integrated assessment. Aldershot: Ashgate, 2006. p. 15-42.

HURTT, G. C., FROLKING, S., FEARON, M. G., MOORE, B., SHEVLIAKOVAS, E., MALYSHEV, S., PACALA, S. W., HOUGHTON, R. A. The underpinnings of land-use history: three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands. *Global Change Biology*, v. 12, p. 1208-1229, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/default.shtm>. Acesso em: 01 junho 2009.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewable energy policy in IEA countries**. Paris: OECD/IEA, 1997. Country reports, v. 2.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook**: 2004. Paris: OECD/IEA, 2004a.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Biofuels for transport**: an international perspective: 2004. Paris: OECD/IEA, 2004b.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy balances of non-OECD countries**: 2005 edition. Paris: OECD/IEA, 2005.

JACOBY, H. D.; BABIKER, M. H.; PALTSEV, S.; REILLY, J. M. Sharing the burden of GHG reductions. In: ALDY, J.; STAVINS, R. (Eds.). **Post-Kyoto International climate policy**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. p. 753 -785.

JACOBY, H. D.; ECKHAUS, R. S.; ELLERMAN, A. D.; PRINN, R. G.; REINER, D. M.; YANG, Z. CO_2 emissions limits: economic adjustments and the distribution of burdens. **The Energy Journal**, Wellington, v. 18, n. 3, p. 31-58, 1997.

JACOBY, H. D.; REILLY, J. M.; MCFARLAND, J. R.; PALTSEV, S. **Technology and technical change in the MIT EPPA Model**. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2004. Report, n. 111. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=683>. Acesso em: 23 abr. 2006.

JORGENSON, D. W.; GOETTLE R. J.; WILCOXEN, P. J.; SING HO, M. The economic costs of a market-based climate policy. **The pew center on global climate change**. White Paper, Apr. 2008. Disponível em: <http://www.pewclimate.org/docUploads/economic-costs-market-based-climate-policy.pdf>. Acesso em: 17 set. 2009.

KAMIEN, M. I.; SCHWARTZ, N. L. **Dynamic optimization**: the calculus of variations and optimal control in economics and management. 2nd ed. New York: Elsevier, 1991.

KARL, T. R.; TRENBERTH, K. E. Modern global climate change. **Science**, Washington, v. 302, p. 1719-1723, 2003.

KARPLUS, V. J.; PALTSEV, S.; BABIKER, M.; HEYWOOD, J.; REILLY, J. M. Applying engineering and fleet detail to represent passenger vehicle transport in a computable general equilibrium model. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2012. Report n. 216. Disponível em: < http://globalchange.mit.edu/research/publications/2270>. Acesso em: 30 jul. 2012.

KASAHARA, S.; PALTSEV, S.; REILLY, J.; JACOBY, H.; ELLERMAN, A. D. Climate change taxes and energy efficiency in Japan. Environmental and Resource Economics, Dordrecht, v. 37, n. 2, p. 377-410, 2007.

LAHIRI, S.; BABIKER, M.; ECKAUS, R. S. **The effects of changing consumption patterns on the costs of emission restrictions**. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2000. Report n. 64. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=636>. Acesso em: 27 maio 2006.

LIMA, E. M. C. **Impactos de políticas climáticas internacionais sobre a economia brasileira**. 2011. 151p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2011.

LOPES, I. V. (Coord.). **O mecanismo de desenvolvimento limpo**: guia de orientação. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 2002.

LOPES, R. L. **Efeitos de uma restrição na emissão de CO_2 na economia brasileira**. 2003. 170p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

LOTT, N.; ROSS, T. **Tracking and evaluating U.S. billion dollar weather disasters, 1980-2005**. Asheville: National Climatic Data Center, 2007. Disponível em: <http://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/papers/200686ams1.2nlfree.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2010.

MANNE, A.; RICHELS, R. The greenhouse debate: economic efficiency, burden sharing and hedging strategies. **The Energy Journal**, Wellington, v. 16, n. 4, p. 1-37, 1995.

MANNE, A. S.; RICHELS, R. G. **The role of non-CO_2 greenhouse gases and carbon sinks in meeting climate objectives**. Stanford University, 2004. Disponível em: <http://www.stanford.edu/group/MERGE/EMF21.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2007.

MARGULIS, S.; DUBEUX, C. B. S. (Eds). **Economia da mudança do clima no Brasil**: custos e oportunidades. São Paulo: IBEP Gráfica, 2010. 82 p.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **The future of coal**: options for a Carbon-Constrained World. Cambridge: MIT, 2007. Disponível em: <http://web.mit.edu/coal/The_Future_of_Coal.pdf>. Acesso em: 9 set. 2008.

MATHIESEN, L. Computation of economic equilibrium by a sequence of linear complementarity problems. **Mathematical Programming Study**, Heidelberg, v. 23, p. 144-162, 1985.

MELILLO, J. M.; REILLY, J. M.; KICKLIGHTER, D. W.; GURGEL, A. C.; CRONIN, T. W.; PALTSEV, S.; FELZER, B. S.; WANG, X.; SOKOLOV, A. P.; SCHLOSSER, C. A. Indirect emissions from biofuels: how Important? **Science**, Washington, v. 326, p.1397-1399, 2009.

METCALF, G. E.; PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D; HOLAK, J. **Analysis of U.S. greenhouse gas tax proposals**. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2008. Report n. 160. Disponível em: < http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=870>. Acesso em: 2 fev. 2009.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**: informações gerais e valores preliminares. 2009. Disponível em: <http://oc.org.br/cms/arquivos/inventa%c2%a1rio_emissa%c2%b5es_gee-valores_preliminares-25-11-2009.pdf>. Acesso em 18 jul. 2010.

MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. O Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no mecanismo de desenvolvimento limpo por meio de projetos em energia limpa. **Contexto Internacional**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, p. 9-47, 2008.

MUTH, J. F. Rational expectations and the theory of price movements. **Econometrica**, Oxford, v. 29, p. 315-335, 1961.

NARAYANAN, B. G.; WALMSLEY, T. G. ***Global trade, assistance, and production****: the GTAP 7 data base*. West Lafayette: Center for Global Trade Analysis, Purdue University, 2008.

NORDHAUS, W. D. An optimal transition path for controlling greenhouse gases. **Science**, Washington, v. 258, p.1315-1319, 1992.

NORDHAUS, W. **The challenge of global warming**: economic models and environmental policy in the DICE-2007 Model. New Haven: Yale University, 2007. Disponível em: <http://nordhaus.econ.yale.edu/dice_mss_091107_public.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2008.

NORDHAUS, W. D.; YANG, Z. A Regional dynamic general-equilibrium model of alternative climate change strategies. **The American Economic Review**, Nashville, v. 86, n. 4, p.741-765, 1996.

OLIVIER, J. G. J.; BERDOWSKI, J. J. M. Global emission sources and sinks. In: BERDOWSKI, J.; GUICHERIT, R.; HEIJ, B. J. (Ed.). **The climate system**. Lisse: Swets and Zeitlinger Publishers, 2001. p. 33-78.

ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Mudança climática e saúde**: um perfil do Brasil / Organização Pan-Americana da Saúde. Brasília: Ministério da Saúde, Organização Pan-Americana da Saúde, 2009.

OTTO, V. M.; REILLY, J. Directed technical change and the adoption of CO_2 abatement technology: The case of CO_2 capture and storage. **Energy Economics**, Amsterdam, v. 30, n. 6, p. 2879-2898, 2008.

PALTSEV, S. **Moving from static to dynamic general equilibrium economic models.** MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2004. Technical Note n. 4. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=523>. Acesso em: 15 de março de 2006.

PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D.; ECKAUS, R.S.; MCFARLAND, J.; SAROFIM, M.; ASADOORIAN, M.; BABIKER, M. **The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model**: version 4. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2005. Report n. 125. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=697>. Acesso em: 18 fev. 2006.

PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D.; GURGEL, A.C.; METCALF, G. E.; SOKOLOV, A.P.; HOLAK, J. F. Assessment of US cap-and-trade proposals. **Climate Policy**, London, v. 8, p. 395-420, 2008.

PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D.; MORRIS, J. F. **The cost of climate policy in the United States**. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2009. Report n. 173. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=1965>. Acesso em: 26 jan. 2010.

PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D.; TAY, K. H. **The cost of Kyoto protocol targets**: the case of Japan. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2004. Report n. 112. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=684>. Acesso em: 23 março 2006.

PARRY, M. L.; CANZIANI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. (Ed.). **Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 976 p.

POPP, D. ENTICE: endogenous backstop technology in the DICE model of global warming. **Journal of Environmental Economics and Management**, Maryland Heights, v. 48, n. 1, p. 742-768, 2004.

POPP, D. ENTICE-BR: the effects of backstop technology R&D on climate policy models. **Energy Economics**, Amsterdam, v. 28, p. 188-222, 2006.

PRINN, R. H. J.; JACOBY, H. D.; SOKOLOV, A. P.; WANG, C.; XIAO, X.; YANG, Z.; ECKHAUS, R. S.; STONE, P. H.; ELLERMAN, A. D.; MELILO, J. M.; FITZMAURICE, J.; KICKLIGHTER, D.; HOLIAN, G.; LIU, Y. Integrated global system model (IGSM) for climate policy assessment: feedbacks and sensitivity studies. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 41, n. 3, p. 469-549, 1999.

REILLY, J.; FUGLIE, K. Future yield growth in field crops: what evidence exists? **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 47, p. 275-290, 1998.

REILLY, J.; PALTSEV, S. European greenhouse gas emissions trading: a system in transition. In: MIGUEL, C.; LABANDEIRA, X.; MANZANO, B. (Ed.). Economic modelling of climate change and energy policies. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2006. p. 45-64.

REILLY, J.; PALTSEV, S.; FELZER, B.; WANG, X.; KICKLIGHTER, D.; MELILLO, J.; PRINN, R.; SAROFIM, M.; SOKOLOV, A.; WANG, C. Global economic effects of changes in crops, pasture, and forests due to changing climate, carbon dioxide, and ozone. **The Energy Policy**, Oxford, v. 35, p. 5370-5383, 2007.

REILLY, J.M; SAROFIM, M.; PALTSEV, S.; PRINN, E. The role of non-CO_2 greenhouse gases in climate policy: analysis using the MIT IGSM. **The Energy Journal**, Wellington, n. esp., p. 503-520, 2006.

RICHELS, R. G.; MANNE, A. S.; WIGLEY, T. M. L. Moving beyond concentrations: the challenge of limiting temperature change. In: SCHLENSINGER, M. E. et al. **Human-induced climate change**. New York: Cambridge University Press, 2007. p. 387-401.

ROCHA, M. T. **Aquecimento global e o mercado de carbono**: uma aplicação do modelo CERT. 2003. 196 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

ROTMANS, J. **IMAGE**: an integrated model to assess the greenhouse effect. Dordrecht: Kluwer Academics, 1990.

ROTMANS, J.; DOWLATABADI, H. Integrated assessment of climate change: evaluation of methods and strategies. In: RAYNER, S.; MALONE, E. (Eds.). **Human choice and climate change**: an international social science assessment. Columbus: Battelle Press, 1998. p. 291-377.

RUTHERFORD, T. F. Extension of GAMS for complementarity problems arising in applied economic analysis. **Journal of Economic Dynamics and Control**, Amsterdam, v. 19, n. 8, p. 1299-1324, 1995.

RUTHERFORD, T. F. **Overlapping generations with pure exchange**: an MPSGE formulation. University of Colorado, 1998. Disponível em: <http://www.mpsge.org/olgmcp/default.htm>. Acesso em: 14 set 2008.

RUTHERFORD, T. F. Applied general equilibrium modeling with MPSGE as a GAMS subsystem: an overview of the modeling framework and syntax. **Computational Economics**, New York, v. 14, p. 1-46, 1999a.

RUTHERFORD, T. F. **Recursive versus intertemporal**: a worked example. University of Colorado, 1999b. Disponível em: <http://www.mpsge.org/dynamics/note.htm>. Acesso em: 14 set 2010.

RUTHERFORD, T. F. **Using finite-dimensional complementarity problems to approximate infinite-horizon optimization models**. University of Colorado, 2005. Disponível em: <http://www.mpsge.org/ramseynlp/ramseynlp.htm>. Acesso em: 14 set 2008.

RUTHERFORD, T. F. **The welfare effects of fossil carbon restrictions**: results from a Recursively Dynamic Trade Model. OECD Economics Department, 1992. Working Paper No. 112.

RUTHERFORD, T. F.; PALTSEV, S. **GTAP-Energy in GAMS**: the dataset and static model., CO. Boulder: Center for Economic Analysis, Department of Economics, University of Colorado at Boulder, 2000. p. 42. Discussion Papers in Economics, Working Paper No. 00-2. Disponível em: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/1736.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2006.

SADOULET, E. ; DE JANVRY, A. **Quantitative development policy analysis**. Baltimore: The Johns Hopkins University, 1995. 397 p.

SCHLAMADINGER, B.; BIRD, N.; JOHNS, T.; BROWN, S.; CANADELL, J.; CICCARESE, L. A synopsis of landuse, land-use change and forestry (LULUCF) under the Kyoto Protocol and Marrakech Accords. **Environmental Science and Policy**, New York, v. 10, n. 4, p. 271-282, 2007a.

SCHLAMADINGER, B.; JOHNS, T.; CICCARESE, L.; BRAUN, M.; SATO, A.; SENYAZ, A.; STEPHENS, P.; TAKAHASHI, M.; ZHAN, X. Options for including land use in a climate agreement post-2012: improving the Kyoto Protocol approach. **Environmental Science and Policy**, New York, v. 10, n. 4, p. 295-305, 2007b.

SEABRA, J. E. A. Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa da cana. 2008. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - UNICAMP, Campinas, 2008.

SEARCHINGER, T., HEIMLICH, R., HOUGHTON, R. A., DONG, F., ELOBEID, A., FABIOSA, J., TOKGOZ, S., HAYES, D., YU, T. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. Science, v. 319, p.1238-1240, 2008.

Seroa da Motta, R. Os impactos ambientais industriais da Alca no Brasil. **Revista de Economia Aplicada**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 5-23, 2005.

SHOVEN, J. B.; WHALLEY, J. **Applying general equilibrium**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 299 p.

SILVA, J. G. **Impactos econômicos de políticas de mitigação das mudanças climáticas na economia brasileira:** um estudo a partir de um modelo de equilíbrio geral computável. 2010. 128p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2010.

SOKOLOV, A.; SCHLOSSER, C. A.; DUTKIEWICZ, S.; PALTSEV, S.; KICKLIGHTER, D. W.; JACOBY, H. D.; PRINN, R. G.; FOREST, C. E.; REILLY, J.; WANG, C.; FELZER, B.; SAROFIM, M. C.; SCOTT, J.; STONE, P. H.; MELILLO, J. M.; COHEN, J. **The MIT integrated global system (IGSM) version 2**: model description and baseline evaluation. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2005. Report n. 124. Disponível em: <http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt124.pdf>. Acesso em: 4 maio 2006.

SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (Ed.). **Contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.

STATE OF CALIFORNIA. **Assembly Bill 32**. 2006. Disponível em: <http://www.arb.ca.gov/cc/docs/ab32text.pdf >. Acesso em: jul. 2010.

THE PEW CENTER ON GLOBAL CLIMATE CHANGE. The 10-50 solution: technologies and policies for a low-carbon future. **In Brief**, Arlington, n. 9, 2005. Disponível em: <http://www.pewclimate.org/docUploads/10-50%20In-Brief.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2006.

TOMIYAMA, K. Two-stage optimal control problems and optimality conditions. **Journal of Economic Dynamics and Control**, Amsterdam, v. 9, 317-337, 1985.

TOURINHO, O. A. F.; SEROA DA MOTTA, R.; ALVES, Y. L. B. **Uma aplicação ambiental de um modelo de equílibrio geral**. Rio de Janeiro: IPEA, 2003. Texto para discussão n. 976. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/pub/td/2003/td_0976.pdfp>. Acesso em: 14 jun. 2006.

UNFCCC. **Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change**, 1998. Disponível em <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em 11 de maio de 2006.

UNITED NATIONS. **Long-run world population projections**: based on the 1998 Revision. New York: United Nations, 2000.

UNITED NATIONS. **World population prospects**: the 2000 revision. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2001. 22 p. Disponível em: < http://www.un.org/spanish/esa/population/wpp2000h.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2006.

US CCSP. United States Climate Change Science Program. Synthesis and assessment product 2.1, part A: scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. In: CLARKE, L. et al. **U.S. climate change science program**. Washington: Department of Energy, 2007.

US HOUSE OF REPRESENTATIVES. **Keep america competitive global warming policy act of 2006**. 109th Congress, 2nd Session, Washington, 2006a. Disponível em: <http://thomas.loc.gov/cgibin/bdquery/z?d109:h.r.05049:>. Acesso em: 19 fev. 2007.

US HOUSE OF REPRESENTATIVES. **Safe climate act of 2006**. 109th Congress, 2nd Session. Washington, 2006b. Disponível em: <http://thomas.loc.gov/cgi-bin/bdquery/z?d109:h.r.05642:>. Acesso em: 19 fev. 2007.

US NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **The effectiveness and impact of corporate average fuel economy (CAFÉ) standards**. Washington: National Academies Press, 2002.

US SENATE. **Climate stewardship and innovation act of 2007**. 110th Congress, 1 st Session, Washington, 2007a. Disponível em: <http://thomas.loc.gov/cgi-bin/query/z?c110:S.280>. Acesso em: 7 fev. 2008.

US SENATE. **Global warming pollution reduction act of 2007**. 110th Congress, 1st Session, Washington, 2007b. Disponível em: <http://thomas.loc.gov/cgi-bin/query/z?c110:S.309>. Acesso em: 7 fev. 2008.

US SENATE. **Global warming reduction act of 2007**. 110th Congress, 1st Session, Washington, 2007c. Disponível em: <http://thomas.loc.gov/cgi-bin/query/z?c110:S.485>. Acesso em: 7 fev. 2008.

VIRGUIER, L. L.; BABIKER, M. H.; REILLY, J. M. The cost of the Kyoto Protocol in the European Union. **The Energy Policy**, Oxford, v. 31, p. 459-481, 2003.

VIOLA, E. Brazil in the context of global governance politics and climate change, 1989-2003. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v.7, n. 1, p. 27-46, 2004.

VIOLA, E. The international regime on climate change and Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, São Paulo, v.17, n. 50, p. 26-46, 2002.

WEBSTER, M. D.; BABIKER, M.; MAYER, M.; REILLY, J. M.; HARNISCH, J.; HYMAN, R.; SAROFIM, M. C.; WANG, C. Uncertainty in emissions projections for climate models. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 36, p. 3659-3670, 2002.

WEBSTER, M. D.; FOREST, C.; REILLY, J.; BABIKER, M.; KICKLIGHTER, D.; MAYER, M.; PRINN, R.; SAROFIM, M.; SOKOLOV, A.; STONE, P.; WANG, C. Uncertainty analysis of climate change and policy response. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 61, p. 295-320, 2003.

WEYANT, J. Economic Models: how they work & why their results differ. In: M. CLAUSSEN (Ed.). **Climate change**: science, strategies and solutions. Washington: Pew Center for Global Climate Change, 2001. p. 193-208.

WHALLEY, J., WIGLE, R. The international incidence of carbon taxes. In: DORNBUSH, R.; POTERBA, J. M. **Global warming**: economic policy responses. Cambridge: MIT Press, 1991. p. 71-97.

APÊNDICE A – A Álgebra do Modelo EPPA

O modelo EPPA foi construído a partir do sub-programa *Mathematical Programming System for General Equilibrium* – MPSGE (Rutherford, 1999), que é uma linguagem de programação desenvolvida para solucionar modelos econômicos de equilíbrio ao estilo Arrow-Debreu. O MPSGE usa como interface a linguagem de programação do GAMS e objetiva construir modelos computáveis de equilíbrio geral de forma simples e com menores chances de erro de programação, aumentando a produtividade do pesquisador. Isso é possível uma vez que o MPSGE cria automaticamente a formulação matemática do modelo na forma de um problema de complementariedade mista, uma vez escolhidas as formas funcionais desejadas para as funções de produção, de transformação e de utilidade, as possibilidades de substituição entre bens e insumos, e os dados iniciais de fluxos econômicos da matriz de contabilidade social em equilíbrio. O MPSGE utiliza essas informações para construir algebricamente as funções de custo e demanda relacionada e checa automaticamente todas as condições de equilíbrio dos mercados e de lucro zero.

A formulação do problema de complementariedade mista pelo MPSGE considera que três desigualdades devem ser satisfeitas: condição de lucro zero (ou custo unitário igual ao preço do bem), condição de equilíbrio nos mercados (oferta igual à demanda) e condição de balanço da renda (despesas iguais às receitas). Um conjunto de três variáveis não negativas deve ser determinado na solução de um problema em MCP: preços, quantidades (níveis de atividades em MPSGE) e níveis de renda. Pretende-se aqui apresentar a formulação algébrica construída pelo MPSGE para o modelo EPPA para um período qualquer. Serão apresentadas as principais equações do modelo, referentes às Figuras 1 a 6, excluindo-se a representação das tecnologias *backstop* e omitindo-se os impostos comuns e restrições aos gases de efeito estufa, a não ser os relacionados ao carbono proveniente das emissões de combustíveis fósseis. A representação das árvores

tecnológicas e o texto da Seção 2 contêm todas as informações necessárias para a compreensão do modelo[25].

As tabelas A1, A2 e A3 a seguir apresentam os conjuntos, variáveis e parâmetros do modelo. Na notação algébrica, o símbolo Π_{rk}^{u} denota a função de lucro na região *r* e setor *k* para a atividade de produção *u*. As equações de lucro zero denotam as estruturas tecnológicas de cada setor e atividade da economia. A construção dessas equações utiliza as funções de custo unitário e as funções de demanda na sua forma calibrada pela proporção (*calibrated share form*), como descrito por Rutherford (2002). Tal formulação considera que o preço unitário de cada atividade deve ser igual aos custos dos insumos e fatores para produção da mesma, considerando as possibilidades de substituição descritas na metodologia. A diferenciação da função de lucro em relação aos preços dos insumos e produtos gera as demandas compensadas e de oferta (lema de Shepard), que serão utilizadas nas condições de equilíbrio de mercado.

Tabela A1 - Conjuntos e subconjuntos do modelo

Notação	Descrição
k, i, j[1]	Setores e bens
r, s	Regiões
Sub-setores de k:	
STIO	Setores de serviços, transportes, intensivo em energia e de outras indústrias
ASIO	Setores de agricultura, serviços, intensivo em energia e de outras indústrias
ENE	Setores de energia: carvão, gás natural, petróleo, petróleo refinado e eletricidade
ENOE	Setores de energia não-elétricos: carvão, gás natural, petróleo e petróleo refinado
FF	Setores de energia fóssil primária: carvão, gás natural, petróleo
ECGPR	Setores de energia elétrica, carvão, gás natural e petróleo refinado
CO	Setores de carvão e petróleo

[1] A Tabela 1 apresenta todos os elementos dos conjuntos *k* e *r* do modelo EPPA.

[25] A construção das equações pelo MPSGE é entendida ao comparar as mesmas com as árvores tecnológicas das Figuras 1 a 6, e pode ser facilmente inferida para os setores *backstop*, dada a menor complexidade dos mesmos. Vale notar que o modelo EPPA possui uma versão "*open source*", disponível no endereço eletrônico http://globalchange.mit.edu/igsm/eppadl.html a pesquisadores interessados em trabalhar com o modelo.

Tabela A2 - Variáveis Endógenas (setores e níveis de preços)

Variável	Descrição
Y_{rk}	Produção do setor *k* na região *r*
N_{rk}	Insumo energético agregado utilizado no setor *k* na região *r*
M_{rk}	Importações agregadas do setor *k* na região *r*
A_{rk}	Agregação Armington de bens domésticos e importados no setor *k* na região *r*
U_r	Nível de utilidade das famílias na região *r*
S_r	Poupança das famílias na região *r*
C_r	Consumo agregado (bens e energia, exceto transporte) das famílias na região *r*
CT_r	Consumo de transporte das famílias na região *r*
π_{rk}^{Y}	Preço de produção do bem *k* produzido na região *r*
π_{rk}^{A}	Preço do bem agregado *k* de Armington na região *r*
π_{rk}^{N}	Preço do agregado energético no setor *k* na região *r*
π_{r}^{LD}	Preço dos serviços do fator terra na região *r*
π_{rk}^{EMB}	Preço da cesta agregada de energia e materiais no setor *k* na região *r*
π_{r}^{PS}	Preço dos insumos substitutos perfeitos na produção de energia elétrica na região *r*
π_{r}^{WS}	Preço dos insumos de energia eólica e solar na produção de energia elétrica na região *r*
π_{rk}^{M}	Preço das importações agregadas do bem *k* importados pela região *r*
π^{T}	Preço do transporte internacional
w_r	Salário na região *r*
r_r	Preço dos serviços de capital na região *r*
q_r^{LD}	Preço dos serviços (retorno) da terra na região *r*
q_{rk}	Preço dos serviços (retorno) dos recursos naturais fósseis na região *r*
q_r^{NU}	Retorno dos recursos fixos utilizados no setor de energia nuclear na região *r*
q_r^{HD}	Retorno dos recursos fixos utilizados no setor de energia nuclear na região *r*
π_{rk}^{E}	Preço das permissões de GEEs no setor *k* na região *r*
π_{rC}^{E}	Preço das permissões de GEEs no consumo final na região *r*
p_r^{U}	Índice de preço da utilidade do consumidor na região *r*
p_r^{S}	Índice de preço da poupança do consumidor na região *r*
p_r^{OC}	Índice de preço da cesta de outros consumos na região *r*
p_r^{T}	Índice de preço da cesta de transporte do consumidor na região *r*

Tabela A3 - Parâmetros iniciais de parcelas de custos (*θ*), dotações de fatores e coeficientes técnicos (variáveis exógenas)

Parâmetro[1]	Descrição
θ_{rjk}	Parcela do bem intermediário *j* no setor *k* na região *r*
θ_{rk}^{KLE}	Parcela da cesta KLE no setor *k* na região *r*
θ_{rk}^{N}	Parcela de energia na cesta KLE no setor *k* na região *r*
α_{rk}	Parcela de mão-de-obra no setor *k* na região *r*
α_{rN}	Parcela de mão-de-obra no setor de energia *nuclear* na região *r*
α_{rH}	Parcela de mão-de-obra no setor de energia hidroelétrica na região *r*
θ_{rk}^{ELE}	Parcela de eletricidade na demanda de energia pelo setor *k* na região *r*
θ_{rk}^{VA}	Parcela de valor adicionado no setor *k* na região *r*
θ_{r}^{LD}	Parcela do fator terra no setor AGR na região *r*
θ_{rk}^{II}	Parcela de insumos intermediários agregados no setor *k* na região *r*
θ_{rjk}^{ENOE}	Parcela do insumo *j* ϵ ENOE no setor *k* na região *r*
θ_{rk}^{R}	Parcela de recurso natural do setor *k* na região *r*
θ_{rk}^{GAS}	Parcela de gás natural na cesta de combustíveis fósseis no setor *k* na região *r*
θ_{rk}^{PS}	Parcela de insumos substitutos perfeitos no setor de eletricidade na região *r*
θ_{rN}^{R}	Parcela do recurso fixo na produção de energia nuclear
θ_{rH}^{R}	Parcela do recurso fixo na produção de energia hidroelétrica
θ_{rk}^{D}	Parcela do bem doméstico *k* no Agregado de Armington na região *r*
θ_{srk}^{M}	Parcela das importações do bem *k* provientes da região *s* nas importações de *r*
θ_{r}^{S}	Parcela de custo com poupança nos custos totais de consumo na região *r*
θ_{r}^{OC}	Parcela da cesta de outros consumos no consumo agregado na região *r*
θ_{rj}^{CE}	Parcela do agregado de energia no consumo final da região *r*
θ_{rj}^{C}	Parcela do bem *j* no consumo final da região *r*
θ_{C}^{TP}	Parcela do transporte próprio no consumo final da região *r*
θ_{C}^{RO}	Parcela de petróleo refinado para transporte no consumo final da região *r*
θ_{C}^{SE}	Parcela de serviços (seguros, manutenção, etc) e de bens de outras indústrias (automóveis, peças, etc) para transporte no consumo final da região *r*
ω_{r}^{L}	Dotação de trabalho na região *r*
ω_{r}^{K}	Dotação de capital na região *r*
ω_{r}^{LD}	Dotação de terra na região *r*
ω_{rk}^{R}	Dotação do recurso natural do setor *k* na região *r* (*k* ϵ FF)
ω_{r}^{NU}	Dotação do recurso fixo nuclear na região *r*
ω_{r}^{HD}	Dotação do recurso fixo hidroelétrico na região *r*
ω_{rk}^{E}	Dotação de permissões de carbono para o setor *k* na região *r*
ω_{rC}^{E}	Dotação de permissões de carbono para as famílias na região *r*
ϵ_{rk}^{j}	Coeficiente de emissões de carbono pelo combustível fóssil *j* ϵ ENOE no setor *k* na região *r*
ϵ_{rC}^{j}	Coeficiente de emissões de carbono pelo combustível fóssil *j* ϵ ENOE no consumo final na região *r*
$\bar{B}_r$	Saldo do balanço de pagamentos na região *r*, tal que: $\sum_r \bar{B}_r = 0$
μ_{rsk}	Coeficiente de custo unitário de transporte internacional do bem *k* da região *s* para a região *r*

[1] As definições das elasticidades *σ* encontram-se nas Tabelas 2 e 3.

Condições de Lucro Zero

1. Produção de bens pelos setores SERV, EINT, TRAN, OTHR (STIO):

$$\Pi_{rk}^{Y} = \pi_{rk}^{Y} - \sum_{j \notin ENE} \theta_{rjk}\pi_{rj}^{A} - \theta_{rk}^{KLE}\left[\theta_{rk}^{N}(\pi_{rk}^{N})^{1-\sigma_{EVA}} + (1-\theta_{rk}^{N})\left(w_{r}^{\alpha_{rk}} r_{r}^{1-\alpha_{rk}}\right)^{1-\sigma_{EVA}}\right]^{\frac{1}{1-\sigma_{EVA}}} = 0 \; \forall \; k \in STIO$$

2. Produção de bens do setor AGR

$$\Pi_{rk}^{Y} = \pi_{rk}^{Y} - \left\{\theta_{rk}^{VA}\left(w_{r}^{\alpha_{rk}} r_{r}^{1-\alpha_{rk}}\right)^{1-\sigma_{ERVA}} + (1 - \theta_{rk}^{VA})\left[\theta_{r}^{LD}(q_{r}^{LD})^{1-\sigma_{ER}} + (1-\theta_{r}^{LD})\pi_{rk}^{EMB\,1-\sigma_{ER}}\right]^{\frac{1-\sigma_{ERVA}}{1-\sigma_{ER}}}\right\}^{\frac{1}{1-\sigma_{ERVA}}} = 0 \; \forall \; k \in AGR$$

$$\Pi_{rk}^{EMB} = \pi_{rk}^{EMB} - \left\{\theta_{rk}^{II}\left(\sum_{j \notin ENE} \theta_{rjk}\pi_{rj}^{A}\right)^{1-\sigma_{AE}} + (1-\theta_{rk}^{II})\pi_{rk}^{N\;1-\sigma_{AE}}\right\}^{\frac{1}{1-\sigma_{AE}}} = 0 \; \forall \; k \in AGR$$

3. Produção de energia primária de combustíveis fósseis:

$$\Pi_{rk}^{Y} = \pi_{rk}^{Y} - \left[\theta_{rk}^{R} q_{rk}^{1-\sigma_{GR}} + (1-\theta_{rk}^{R})\left(\sum_{j \notin ENE} \theta_{rjk}\,\pi_{rj}^{A} + \left(w_{r}^{\alpha_{rk}} r_{r}^{1-\alpha_{rk}}\right)\right)^{1-\sigma_{GR}}\right]^{\frac{1}{1-\sigma_{GR}}} = 0 \; \forall \; k \in FF$$

4. Produção de petróleo refinado

$$\Pi_{rk}^{Y} = \pi_{rk}^{Y} - \sum_{j \notin ECGPR} \theta_{rjk}\pi_{rj}^{A} - \theta_{rk}^{KLE}\left[\theta_{rk}^{N}(\pi_{rk}^{N})^{1-\sigma_{EVA}} + (1-\theta_{rk}^{N})\left(w_{r}^{\alpha_{rk}} r_{r}^{1-\alpha_{rk}}\right)^{1-\sigma_{EVA}}\right]^{\frac{1}{1-\sigma_{EVA}}} = 0 \; \forall \; k \in ROIL$$

5. Produção de eletricidade

$$\Pi_{rk}^{Y} = \pi_{rk}^{Y} - \left[\theta_{rk}^{PS}\pi_{r}^{PS\,1-\sigma_{WS}} + (1-\theta_{rk}^{PS})\pi_{r}^{WS\,1-\sigma_{WS}}\right]^{\frac{1}{1-\sigma_{WS}}} = 0 \; \forall \; k \in ELE$$

$$\Pi_r^{PS} = \pi_r^{PS} - \left(\sum_{j \notin ENE} \theta_{rjELE}\, \pi_{rj}^{A} + \theta_{rELE}^{KLE} \left[\theta_{rELE}^{N} (\pi_{rELE}^{N})^{1-\sigma_{EVA}} + (1-\theta_{rELE}^{N}) \left(w_r^{\alpha_{rELE}} r_r^{1-\alpha_{rELE}} \right)^{1-\sigma_{EVA}} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{EVA}}} \right) = 0$$

$$\Pi_r^{PS} = \pi_r^{PS} - \left[\theta_{rN}^{R} q_r^{NU\,1-\sigma_{NGR}} + (1-\theta_{rN}^{R}) \left(w_r^{\alpha_{rN}} r_r^{1-\alpha_{rN}} \right)^{1-\sigma_{NGR}} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{NGR}}} = 0$$

$$\Pi_r^{PS} = \pi_r^{PS} - \left[\theta_{rH}^{R} q_r^{HD\,1-\sigma_{NGR}} + (1-\theta_{rH}^{R}) \left(w_r^{\alpha_{rH}} r_r^{1-\alpha_{rH}} \right)^{1-\sigma_{NGR}} \right]^{\frac{1}{1-\sigma_{NGR}}} = 0$$

6. Agregado de insumos energéticos específico por setor

$$\Pi_{rk}^{N} = \pi_{rk}^{N} - \left\{ \theta_{rk}^{ELE} (\pi_{rELE}^{A})^{1-\sigma_{ENOE}} + (1-\theta_{rk}^{ELE}) \left(\sum_{j \in ENOE} \theta_{rjk} \left(\pi_{rj}^{A} + \pi_{rk}^{E} \epsilon_{rk}^{j} \right)^{1-\sigma_{EN}} \right)^{\frac{(1-\sigma_{ENOE})}{(1-\sigma_{EN})}} \right\} = 0 \;\forall\, k \in STIO\ e\ AGR$$

$$\Pi_{rk}^{N} = \pi_{rk}^{N} - \left\{ \theta_{rk}^{ELE} (\pi_{rELE}^{A})^{1-\sigma_{ENOE}} + (1 - \theta_{rk}^{ELE}) \left(\sum_{j \in FF} \theta_{rjk} \left(\pi_{rj}^{A} + \pi_{rk}^{E} \epsilon_{rk}^{j} \right)^{1-\sigma_{EN}} \right)^{\frac{(1-\sigma_{ENOE})}{(1-\sigma_{EN})}} \right\} = 0 \;\forall\, k \in ROIL$$

$$\Pi_{rk}^{N} = \pi_{rk}^{N} - \left\{ \theta_{rk}^{ELE} (\pi_{rELE}^{A})^{1-\sigma_{ENOE}} + (1 - \theta_{rk}^{ELE}) \left[\theta_{rk}^{GAS} (\pi_{rGAS}^{A} + \pi_{rk}^{E} \epsilon_{rk}^{GAS})^{1-\sigma_{COG}} + (1 - \theta_{rk}^{GAS}) \left(\sum_{j \in CO} \theta_{rjk} (\pi_{rj}^{A} + \pi_{rk}^{E} \epsilon_{rk}^{j})^{1-\sigma_{CO}} \right)^{\frac{(1-\sigma_{COG})}{(1-\sigma_{CO})}} \right]^{\frac{(1-\sigma_{ENOE})}{(1-\sigma_{COG})}} \right\}^{\frac{1}{1-\sigma_{ENOE}}} = 0 \; \forall \; k \in ELE$$

7. Agregado de Armington:

$$\Pi_{rk}^{A} = \pi_{rk}^{A} - [\theta_{rk}^{D} (\pi_{rk}^{Y})^{1-\sigma_{DM}} + (1 - \theta_{rk}^{D}) (\pi_{rk}^{M})^{1-\sigma_{DM}}]^{1/(1-\sigma_{DM})} = 0$$

8. Agregação de importações de diferentes regiões:

$$\Pi_{rk}^{M} = \pi_{rk}^{M} - \left(\sum_{s} \theta_{ksi}^{M} (\pi_{sk}^{Y} + \mu_{ksi} \pi^{T})^{1-\sigma_{MM}} \right)^{1/(1-\sigma_{MM})} = 0$$

9. Nível de utilidade das famílias (poupança e consumo):

$$\Pi_{r}^{U} = p_{r}^{U} - \left\{ \theta_{r}^{S} (p_{r}^{S})^{1-\sigma_{CS}} + (1 - \theta_{r}^{S}) [\theta_{r}^{OC} (p_{r}^{OC})^{1-\sigma_{CT}} + (1 - \theta_{r}^{OC}) (p_{r}^{T})^{1-\sigma_{CT}}]^{\frac{1-\sigma_{CS}}{1-\sigma_{CT}}} \right\}^{\frac{1}{1-\sigma_{CS}}} = 0$$

10. Demanda de energia e outros bens pelas famílias

$$\Pi_{r}^{OC} = p_{r}^{OC} - \left\{ \left[\theta_{r}^{CE} \left(\sum_{j \in ENOE} \theta_{rj}^{C} (\pi_{rj}^{A} + \pi_{rC}^{E} \epsilon_{rC}^{j})^{1-\sigma_{EF}} \right)^{\frac{1}{(1-\sigma_{EF})}} \right]^{1-\sigma_{EC}} + \left[(1 - \theta_{r}^{CE}) \left(\sum_{j \in ASIO} \theta_{rj}^{C} (\pi_{rj}^{A})^{1-\sigma_{C}} \right)^{\frac{1}{(1-\sigma_{C})}} \right]^{1-\sigma_{EC}} \right\}^{\frac{1}{1-\sigma_{EC}}} = 0$$

11. Demanda de serviços de transporte pelas famílias

$$\Pi_r^{CT} = p_r^T - \left\{\theta_C^{TP}\left\{\theta_C^{RO}(\pi_{rROIL}^A + \pi_{rROIL}^A \epsilon_{rC}^{ROIL})^{1-\sigma_{FSO}} + (1 - \theta_C^{RO})[\theta_C^{SE}(\pi_{rSEV}^A)^{1-\sigma_{SO}} + (1-\theta_C^{SE})(\pi_{rOTHR}^A)^{1-\sigma_{SO}}]^{\frac{1-\sigma_{FSO}}{1-\sigma_{SO}}}\right\}^{\frac{1-\sigma_{PO}}{1-\sigma_{FSO}}} + (1 - \theta_C^{TP})(\pi_{rTRAN}^A)^{1-\sigma_{PO}}\right\}^{\frac{1}{1-\sigma_{PO}}} = 0$$

Condições de Equilíbrio dos Mercados

12. Trabalho

$$\omega_r^L = \sum_k Y_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^Y}{\partial w_r}$$

13. Capital

$$\omega_r^K = \sum_k Y_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^Y}{\partial r_r}$$

14. Terra

$$\omega_r^{LD} = Y_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^Y}{\partial q_r^{LD}} \quad \forall\, k \in AGR$$

15. Recursos naturais (reservas de combustíveis fósseis)

$$\omega_{rk}^R = Y_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^Y}{\partial q_{rk}} \quad \forall\, k \in FF$$

16. Recursos fixos (nuclear e hidroelétrico)

$$\omega_r^{NU} = Y_{rELE} \frac{\partial \Pi_r^{PS}}{\partial q_r^{NU}}$$

$$\omega_r^{HD} = Y_{rELE} \frac{\partial \Pi_r^{PS}}{\partial q_r^{HD}}$$

17. Produção setorial

$$Y_{rk} = A_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^A}{\partial \pi_{rk}^Y} + \sum_{s \neq r} M_{sk} \frac{\partial \Pi_{sk}^M}{\partial \pi_{rk}^Y}$$

18. Demanda de energia setorial

$$N_{rk} = Y_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^{Y}}{\partial \pi_{rk}^{N}}$$

19. Oferta de importação

$$M_{rk} = A_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^{A}}{\partial \pi_{rk}^{M}}$$

20. Oferta agregada Armington

$$A_{rj} = \sum_{k} Y_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^{Y}}{\partial \pi_{rj}^{A}} + C_r \frac{\partial \Pi_{r}^{OC}}{\partial \pi_{rj}^{A}}$$

$$A_{rj} = \sum_{k \epsilon STIO} Y_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^{Y}}{\partial \pi_{rj}^{A}} + \sum_{k \epsilon ENOE} Y_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^{Y}}{\partial \pi_{rj}^{A}} + Y_{rAGR} \frac{\partial \Pi_{rAGR}^{EMB}}{\partial \pi_{rj}^{A}} + Y_{rELE} \frac{\partial \Pi_{r}^{PS}}{\partial \pi_{rj}^{A}} + C_r \frac{\partial \Pi_{r}^{OC}}{\partial \pi_{rj}^{A}} + CT_r \frac{\partial \Pi_{r}^{CT}}{\partial \pi_{rj}^{A}} \quad \forall\, j \notin ENE$$

$$A_{rj} = \sum_{k} N_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^{N}}{\partial \pi_{rj}^{A}} + C_r \frac{\partial \Pi_{r}^{OC}}{\partial \pi_{rj}^{A}} + CT_r \frac{\partial \Pi_{r}^{CT}}{\partial \pi_{rj}^{A}} \quad \forall\, j \in ECGPR$$

$$A_{rj} = \sum_{k \notin ROIL} N_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^{N}}{\partial \pi_{rj}^{A}} + Y_{rROIL} \frac{\partial \Pi_{rROIL}^{Y}}{\partial \pi_{rj}^{A}} + C_r \frac{\partial \Pi_{r}^{OC}}{\partial \pi_{rj}^{A}} \quad \forall\, j \in OIL$$

21. Demanda por poupança pelas famílias

$$S_r = U_r \frac{\partial \Pi_{r}^{U}}{\partial p_{r}^{S}}$$

22. Demanda final por bens e serviços (incluindo energia) pelas famílias

$$C_r = U_r \frac{\partial \Pi_{r}^{U}}{\partial p_{r}^{OC}}$$

23. Demanda final de serviços de transporte pelas famílias

$$CT_r = U_r \frac{\partial \Pi_{r}^{U}}{\partial p_{r}^{T}}$$

24. Emissões de carbono pelos setores

$$\omega_{rk}^{E} = N_{rk} \frac{\partial \Pi_{rk}^{N}}{\partial \pi_{rk}^{E}}$$

25. Emissões de carbono pelas famílias

$$\omega_{rC}^{E} = N_{rk} \frac{\partial \Pi_{r}^{OC}}{\partial \pi_{rC}^{E}}$$

Balanço da renda

$$p_r^U U_r = w_r\, \omega_r^L + r_r\, \omega_r^K + q_r^{LD} \omega_r^{LD} + \sum_{k \in FF} q_{rk} \omega_{rk}^{R} + q_r^{NU} \omega_r^{NU} + q_r^{HD} \omega_r^{HD} + \sum_{k} \pi_{rk}^{E} \omega_{rk}^{E} + \pi_{rC}^{E} \omega_{rC}^{E} + \bar{B}_r$$

Deve-se notar que as condições de lucro zero que envolvem a demanda de energia fóssil explicitam como as políticas de restrições às emissões de carbono são introduzidas no modelo. Nessas equações, o preço do insumo energético de origem fóssil (π_{rj}^{A}) é somado ao preço das permissões de emissões ($\pi_{rk}^{E} \epsilon_{rk}^{j}$), considerando o coeficiente físico de emissões específico de cada combustível para cada setor da economia. Dessa forma, quando a política é implementada, ativa-se a necessidade de utilizar para cada unidade monetária de energia o equivalente, em unidades físicas, de permissões de emissões correspondente ao que seria emitido pelo setor ao consumir aquele valor de energia. O preço das permissões pode ser especificado por setor emissor (*k*) como representado nas equações, ou ainda, como um preço único para a economia (π_{r}^{E}) no caso de mercados nacionais de carbono, ou ainda como um preço único para o mundo ou grupo de regiões (π^{E}) no caso de mercados internacionais de emissões.

Por fim, deve-se ilustrar como é feita a programação do MPSGE, uma vez que a representação algébrica descrita anteriormente não precisa ser digitada pelo modelador, sendo construída automaticamente pelo software. Abaixo representa-se o bloco de produção dos setores de serviços, transportes, bens intensivos em energia e outras indústrias na linguagem de programação do MPSGE:

```
$PROD:Y(k,r)  s:0  ee:sigmaEVA(r,k) va(ee):sigmaVA(r,k)
O:PY(k,r)            Q:XP0(r,k)
I:PA(ne,r)           Q:XDP0(r,ne,k)
I:PL(r)              Q:LABD(r,k)     va:
I:PK(r)              Q:KAPD(r,k)     va:
I:PEN(k,r)           Q:ENE(k,r)       ee:
```

O bloco de produção acima indica que o setor Y(k,r) produz uma bem cujo preço é PY(k,r), a partir da combinação de: insumos intermediários com preços PA(ne,r), provenientes da oferta de bens agregados Armington não energéticos (subconjunto ne); trabalho (preço PL); capital (preço PK); e um agregado de insumos energéticos de preço PEN(k,r). O nível de Y e dos diversos preços são variáveis endógenas no modelo. Os parâmetros especificados após os campos “Q:” indicam os valores na base de dados inicial do modelo relacionados com cada um dos preços, ou seja, o valor inicial da produção do setor (XP0), o valor dos insumos intermediários (XDP0), o valor dos serviços de trabalho (LABD) e de capital (KAPD) e o valor do agregado de insumos energéticos (ENE). Para que a condição de lucro zero seja satisfeita, a soma dos valores dos insumos deve ser igual ao valor da produção. Por último, o código após a especificação dos parâmetros da base de dados (“va:” e “ee:”) indicam as possibilidades de substituição na árvore tecnológica. O valor das elasticidades de substituição são especificados na primeira linha do código, logo após a definição do bloco de produção $PROD:Y(k,r). A especificação “s:” indica o nível de substituição mais alto na árvore tecnológica e não precisa ser colocado na linha dos insumos. O valor zero na frente deste símbolo indica que a função assume proporções fixas de insumos intermediários e do agregado dos demais insumos (cesta KLE). A especificação “ee:” define a elasticidade sigmaEVA entre o agregado de insumos energéticos e o valor adicionado, enquanto a especificação “va:” determina a elasticidade sigmaVA entre os componentes do valor adicionado. Maiores detalhes sobre a formulação do modelo EPPA podem ser encontrados em Paltsev et al. (2005), enquanto maiores informações sobre a álgebra criada pelo MPSGE podem ser obtidas em Rutherford (1995, 1999).

ANEXO A – Países Anexo I e Não-Anexo I do Protocolo de Quioto

Países Anexo I

Alemanha	Eslovênia	Itália	Portugal
Austrália	Espanha	Japão	Reino Unido e Irlanda do Norte
Áustria	Estados Unidos	Letônia	República Tcheca
Bielo-Rússia	Estônia	Liechtenstein	República Eslovaca
Bélgica	Federação Russa	Lituânia	Romênia
Bulgária	Finlândia	Luxemburgo	Suécia
Canadá	França	Mônaco	Suíça
Comunidade Ec. Européia	Grécia	Noruega	Turquia
Croácia	Hungria	Nova Zelândia	Ucrânia
Dinamarca	Irlanda	Países Baixos	
Eslováquia	Islândia	Polônia	

Países não-Anexo I

Afeganistão	Djibouti	Madagascar	Rep. Democ. do Congo
África do Sul	Dominica	Malásia	Rep. D. Pop. da Coréia
Albânia	Egito	Maláui	Rep. Democ.do Laos
Angola	El Salvador	Maldivas	República Dominicana
Antiga República Iugoslava da Macedônia	Emirados Árabes Unidos	Mali	República Unida da Tanzânia
Antígua e Barbuda	Equador	Malta	Ruanda
Arábia Saudita	Eritréia	Marrocos	Samoa
Argélia	Etiópia	Maurício	Santa Lúcia
Argentina	Fiji	Mauritânia	São Cristóvão e Nevis
Armênia	Filipinas	México	São Tomé e Príncipe
Azerbaijão	Gabão	Mianmar	São Vicente e Granadinas
Bahamas	Gâmbia	Micronésia	Senegal
Bahrein	Gana	Moçambique	Serra Leoa
Bangladesh	Geórgia	Mongólia	Sérvia
Barbados	Granada	Montenegro	Seychelles
Belize	Guatemala	Namíbia	Somália
Benin	Guiana	Nauru	Sri Lanka
Bolívia	Guiné-Bissau	Nepal	Suazilândia
Bósnia e Herzegovina	Guiné Equatorial	Nicarágua	Sudão
Botsuana	Haiti	Níger	Suriname
Brasil	Honduras	Nigéria	Tadjiquistão
Burkina Fasso	Iêmen	Niue	Tailândia
Burundi	Ilhas Comores	Omã	Timor Leste
Butão	Ilhas Cook	Palau	Tongo
Cabo Verde	Ilhas Marshall	Panamá	Trinidad e Tobago
Camarões	Ilhas Salomão	Papua - Nova Guiné	Tunísia
Camboja	Índia	Paquistão	Turcomenistão
Cazaquistão	Indonésia	Paraguai	Tuvalu
Chile	Irã	Peru	Uganda
China	Israel	Qatar	Uruguai
Chipre	Jamaica	Quênia	Uzbequistão
Cingapura	Jordânia	Quirguistão	Vanuatu
Colômbia	Kiribati	República Árabe da Síria	Venezuela
Congo	Kuwait	República Árabe da Líbia	Vietnam
Costa do Marfim	Lesoto	República Centro-Africana	Zâmbia
Costa Rica	Líbano	República da Coréia	
Cuba	Libéria	República da Moldávia	

ANEXO B – Mapeamento de Setores e Regiões do GTAP para o EPPA

Mapeamento de setores do GTAP para o EPPA

Setor do EPPA	Setor original do GTAP	Descrição do GTAP	Setor do EPPA	Setor original do GTAP	Descrição do GTAP
AGRI	PDR	paddy rice	OTHR	LUM	wood products
AGRI	WHT	wheat	CRP	PPP	paper products - publishing
AGRI	GRO	cereal grains nec	ROIL	P_C	petroleum - coal products
AGRI	V_F	vegetables - fruit - nuts	CRP	CRP	chemical - rubber - plastic products
AGRI	OSD	oil seeds	EINT	NMM	mineral products nec
AGRI	C_B	sugar cane - sugar beet	IRON	I_S	ferrous metals
AGRI	PFB	plant-based fibers	EINT	NFM	metals nec
AGRI	OCR	crops nec	IRON	FMP	metal products
AGRI	CTL	bo horses	OTHR	MVH	motor vehicles and parts
AGRI	OAP	animal products nec	OTHR	OTN	transport equipment nec
AGRI	RMK	raw milk	OTHR	ELE	electronic equipment
AGRI	WOL	wool - silk-worm cocoons	OTHR	OME	machinery and equipment nec
AGRI	FRS	forestry	OTHR	OMF	manufactures nec
AGRI	FSH	fishing	ELEC	ELY	electricity
COAL	COL	coal	GAS	GDT	gas manufacture - distribution
OIL	OIL	oil	OTHR	WTR	water
GAS	GAS	gas	OTHR	CNS	construction
OTHR	OMN	minerals nec	SERV	TRD	trade
OTHR	CMT	bo meat products	TRAN	OTP	transport nec
OTHR	OMT	meat products	TRAN	WTP	water transport
OTHR	VOL	vegetable oils and fats	TRAN	ATP	air transport
OTHR	MIL	dairy products	SERV	CMN	communication
OTHR	PCR	processed rice	SERV	OFI	financial services nec
OTHR	SGR	sugar	SERV	ISR	insurance
OTHR	OFD	food products nec	SERV	OBS	business services nec
OTHR	B_T	beverages and tobacco products	SERV	ROS	recreational and other services
OTHR	TEX	textiles	SERV	OSG	public admin (defence, educ. health)
OTHR	WAP	wearing apparel	OTHR	DWE	ownership of dwellings
OTHR	LEA	leather products	CGD	CGD	Savings good

Fonte: Paltsev et al. (2005)

Mapeamento de regiões do GTAP para o EPPA

Região no EPPA	País ou Região	Região no EPPA	País ou Região	Região no EPPA	País ou Região
USA	USA	LAM	Jamaica	EUR	Romania
CAN	Canada	LAM	Puerto Rico	EUR	Slovakia
MEX	Mexico	LAM	Saint Kitts and Nevis	EUR	Slovenia
BRA	Brazil	LAM	Saint Lucia	EUR	Estonia
RUS	Russia	LAM	Saint Vincent and the Grenadines	EUR	Latvia
CHN	China	LAM	Trinidad and Tobago	EUR	Lithuania
IND	India	LAM	Virgin Islands, U.S	EUR	Switzerland
JPN	Japan	LAM	Anguilla	EUR	Iceland
LAM	Colombia	LAM	Aruba	EUR	Liechtenstein
LAM	Peru	LAM	Cayman Islands	EUR	Norway
LAM	Venezuela	LAM	Cuba	ROE	Turkey
LAM	Bolivia	LAM	Guadeloupe	ROE	Albania
LAM	Equador	LAM	Martinique	ROE	Croatia
LAM	Argentina	LAM	Monserrat	ROE	Belarus
LAM	Chile	LAM	Netherlands Antilles	ROE	Ukraine
LAM	Uruguay	LAM	Turks and Caicos	ROE	Armenia
LAM	Paraguay	LAM	Virgin Islands, British	ROE	Azerbajan
LAM	Nicaragua	EUR	Austria	ROE	Georgia
LAM	Bermuda	EUR	Belgium	ROE	Kazakhstan
LAM	Greenland	EUR	Denmark	ROE	Kyrgyzstan
LAM	Saint Pierre Miquelon	EUR	Finland	ROE	Andorra
LAM	Falkland Islands	EUR	France	ROE	Bosnia and Herzogov.
LAM	French Guiana	EUR	Germany	ROE	Faroe Islands
LAM	Guyana	EUR	United Kingdom	ROE	Giblartar
LAM	Suriname	EUR	Greece	ROE	Macedonia
LAM	Belize	EUR	Ireland	ROE	Monaco
LAM	Costa Rica	EUR	Italy	ROE	San Marino
LAM	El Salvador	EUR	Luxembourg	ROE	Serbia and Montenegro
LAM	Guatemala	EUR	Netherlands	ROE	Moldova
LAM	Honduras	EUR	Portugal	ROE	Tajikistan
LAM	Panama	EUR	Spain	ROE	Turkmenistan
LAM	Antigua & Barbuda	EUR	Sweden	ROE	Uzbekistan
LAM	Bahamas	EUR	Bulgaria	ASI	Malaysia
LAM	Barbados	EUR	Cyprus	ASI	Philippines
LAM	Dominica	EUR	Czech Republic	ASI	Singapore
LAM	Dominican Republic	EUR	Hungary	ASI	Thailand
LAM	Grenada	EUR	Malta	ASI	Korea
LAM	Haiti	EUR	Poland	ASI	Taiwan

Região no EPPA	País ou Região	Região no EPPA	País ou Região	Região no EPPA	País ou Região
ASI	Indonesia	ANZ	Vanuatu	AFR	Seychells
REA	Vietnam	ANZ	Wallis and Futuna	AFR	Benin
REA	Cambodia	MES	Iran	AFR	Burkina Faso
REA	Bangladesh	MES	Bahrain	AFR	Burundi
REA	Sri Lanka	MES	Iraq	AFR	Cameroon
REA	Pakistan	MES	Israel	AFR	Cape Verde
REA	Afghanistan	MES	Jordan	AFR	Central African Republic
REA	Maldives	MES	Kuwait	AFR	Chad
REA	Nepal	MES	Lebanon	AFR	Comoros
REA	Bhutan	MES	Palestina	AFR	Congo
REA	Brunei	MES	Oman	AFR	Coe d'Ivoire
REA	Laos	MES	Qatar	AFR	Djibouti
REA	Myanmar	MES	Saudi Arabia	AFR	Equatorial Guinea
REA	Timor Leste	MES	Syria	AFR	Eritrea
REA	Macau	MES	United Arab Emirates	AFR	Ethiopia
REA	Mongolia	MES	Yemen	AFR	Gabon
REA	Korea, Dem. Republic of,	AFR	Morocco	AFR	Gambia
ANZ	Australia	AFR	Tunisia	AFR	Ghana
ANZ	New Zealand	AFR	Egypt	AFR	Guinea
ANZ	American Samoa	AFR	Botswana	AFR	Guinea-Bissau
ANZ	Cook Islands	AFR	South African Republic	AFR	Kenya
ANZ	Fiji	AFR	Malawi	AFR	Liberia
ANZ	French Polynesia	AFR	Mozambique	AFR	Mali
ANZ	Guam	AFR	Tanzania	AFR	Mauritania
ANZ	Kiribati	AFR	Zambia	AFR	Mayotte
ANZ	Marshall Islands	AFR	Zimbabwe	AFR	Niger
ANZ	Micronesia	AFR	Mauritius	AFR	Reunion
ANZ	Nauru	AFR	Madagascar	AFR	Rwanda
ANZ	New Caledonia	AFR	Uganda	AFR	Saint Helena
ANZ	Norfolk Islands	AFR	Nigeria	AFR	Sao Tome and Principe
ANZ	Northern Mariana Islands	AFR	Senegal	AFR	Sierra Leone
ANZ	Niue	AFR	Algeria	AFR	Somalia
ANZ	Papua New Guinea	AFR	Lybia	AFR	Sudan
ANZ	Samoa	AFR	Lesotho	AFR	Togo
ANZ	Solomon Islands	AFR	Namibia		
ANZ	Tokelau	AFR	Swaziland		
ANZ	Tonga	AFR	Angola		
ANZ	Tuvalu	AFR	Congo (Dem.Rep. of)		

ANEXO C –Premissas e Dados Iniciais do Modelo EPPA

Este anexo apresenta dados iniciais e resultados do modelo EPPA no cenário de referência (BAU) que refletem as consequências de várias das hipóteses e premissas do modelo descritas na metodologia, no que diz respeito ao crescimento das economias, intensidade de uso de energia, emissões de gases de efeito estufa e uso da terra.

A Tabela C1 apresenta as taxas anuais de crescimento do PIB para as regiões do modelo em todo o horizonte de simulação. As taxas de crescimento no ano de 2010 refletem as estatísticas de taxas de crescimento do Banco Mundial entre 2005 e 2011, que são de cerca de 4,2% para o Brasil, 10,9% para a China e 0,9% para os EUA. As taxas de crescimento do modelo EPPA são geradas endogenamente no processo de solução do mesmo e refletem os diversos fenômenos dinâmicos descritos na metodologia, como a evolução do crescimento populacional e da produtividade do trabalho, os aumentos exógenos de eficiência no uso de energia e de fatores produtivos como terra e recursos naturais, a acumulação endógena de capital oriunda das taxas de investimento, a disponibilidade de tecnologias *backstop* e as mudanças em hábitos de consumo de acordo com o aumento da renda *per capita*.

Tabela C1 – Taxas anuais de crescimento do PIB (%) para cada intervalo de cinco anos no Cenário de Referência – BAU.

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
USA	1,07	2,71	2,49	2,46	2,73	2,74	2,63	2,60	2,61
CAN	1,09	2,29	2,54	2,67	2,93	2,75	2,90	2,94	2,85
MEX	1,48	3,33	2,03	2,17	2,71	3,00	3,12	3,24	3,29
JPN	0,15	1,46	1,59	1,58	1,67	1,80	1,84	1,87	1,79
ANZ	2,49	3,10	2,95	3,14	3,01	3,00	2,91	2,94	2,82
EUR	0,84	1,88	1,93	1,94	2,00	2,04	2,13	2,18	2,19
ROE	3,98	4,63	3,02	3,12	3,29	3,41	3,13	2,92	2,86
RUS	3,02	3,96	2,60	2,52	2,25	1,88	1,86	1,97	1,99
ASI	4,09	4,69	2,88	2,95	3,13	3,12	3,07	3,00	3,13
CHN	9,56	8,23	6,70	6,31	5,68	4,16	3,47	3,30	3,15
IND	8,15	7,49	6,27	6,12	4,73	4,19	3,28	3,38	3,88
BRA	4,22	4,43	3,06	3,26	3,24	3,21	3,04	3,07	3,01
AFR	4,80	4,25	2,96	3,55	3,63	3,90	2,92	2,98	3,02
MES	4,15	4,29	2,95	3,13	3,15	3,34	2,16	2,46	2,43
LAM	4,60	4,12	3,26	3,27	3,13	3,08	3,15	3,20	3,16
REA	6,14	6,37	4,07	4,38	4,58	4,29	3,26	3,49	3,49

Fonte: Resultados da pesquisa

A Tabela C2 apresenta o PIB *per capita* em US$ de 2004 no cenário de referência. Os dados para o ano de 2004, ano base do modelo, são oriundos da divisão do PIB dos países nas matrizes de insumo-produto do GTAP, fonte dos dados econômicos, pelas estatísticas de população do Banco Mundial, e portanto, são comparáveis ao dados daquela instituição. O Brasil, por exemplo, possuía um PIB per capita de US$ 3.610 em 2004 pelas estatísticas do Banco Mundial, enquanto os EUA US$ 40.292, e a China US$ 1.490. Esses valores são bem próximos aos da Tabela C2, e as pequenas discrepâncias existentes refletem os ajustamentos da base de dados do GTAP para conciliação das matrizes de insumo-produto dos diversos países do mundo.

Tabela C2 – PIB per capita em US$ de 2004 no Cenário de Referência – BAU.

	2004	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
USA	38.283	39.131	39.466	43.228	46.961	51.100	56.533	62.759	69.477	77.000	85.514
CAN	29.320	29.814	29.896	31.971	34.690	38.139	42.638	47.639	53.654	60.711	68.575
MEX	6.523	6.544	6.614	7.355	7.757	8.298	9.177	10.370	11.869	13.756	16.095
JPN	35.850	36.458	36.698	39.576	43.265	47.562	52.793	59.140	66.479	74.816	83.954
ANZ	22.313	22.574	23.369	25.289	27.374	30.098	33.135	36.618	40.551	45.203	50.243
EUR	25.636	26.050	26.624	28.881	31.472	34.408	37.859	41.843	46.541	51.991	58.183
ROE	2.389	2.525	2.982	3.634	4.110	4.698	5.448	6.380	7.393	8.509	9.808
RUS	3.851	4.031	4.703	5.744	6.588	7.567	8.621	9.648	10.779	12.113	13.641
ASI	3.498	3.674	4.247	5.085	5.615	6.256	7.072	8.039	9.173	10.493	12.146
CHN	1.405	1.448	2.228	3.240	4.422	5.970	7.879	9.738	11.719	14.084	16.898
IND	571	603	831	1.116	1.426	1.825	2.201	2.607	2.974	3.433	4.086
BRA	3.312	3.954	4.638	5.523	6.204	7.088	8.151	9.429	10.894	12.678	14.803
AFR	885	943	1.062	1.167	1.210	1.299	1.409	1.555	1.646	1.756	1.886
MES	4.623	4.887	5.283	5.917	6.272	6.775	7.394	8.195	8.623	9.257	9.988
LAM	3.308	3.436	4.041	4.658	5.178	5.794	6.482	7.280	8.257	9.443	10.840
REA	508	567	713	904	1.036	1.215	1.451	1.723	1.960	2.268	2.643

Fonte: Resultados da pesquisa

A Tabela C3 apresenta os dados de emissões de gases de efeito estufa, medidos em CO_2 Eq. utilizando a metodologia GWP para conversão. As emissões nos anos de 2005 e 2010 são compatíveis com os dados da *US Environmental*

Protection Agency (US-EPA)[26], do Carbon Dioxide Information Analysis Center[27] e da base de dados EDGAR desenvolvida por Olivier e Berdowski (2001). Para os demais anos, as emissões são geradas de forma endógena pelo modelo.

Tabela C3 – Emissões de Gases de Efeito Estufa em Milhões de Toneladas de CO_2-Eq. no cenário de Referência BAU

	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
AFR	3.440	4.199	4.820	5.179	5.714	6.374	7.024	7.623	8.240	8.807
ANZ	749	766	805	842	886	912	964	1.030	1.100	1.168
ASI	4.335	4.859	5.403	5.722	5.870	6.153	6.131	6.449	6.777	7.134
BRA	2.012	1.899	2.036	1.916	2.191	2.290	2.385	2.508	2.657	2.801
CAN	841	796	822	862	903	961	1.009	1.088	1.137	1.216
CHN	7.473	11.814	14.370	16.392	17.828	18.775	20.131	20.870	21.603	22.105
EUR	5.633	4.851	4.868	4.906	5.081	5.270	5.445	5.697	5.955	6.202
IND	2.285	3.169	4.121	5.176	6.438	7.367	8.226	8.732	9.403	10.247
JPN	1.582	1.457	1.444	1.445	1.460	1.474	1.498	1.534	1.570	1.603
LAM	2.075	2.477	2.807	3.061	3.189	3.336	3.419	3.693	3.990	4.264
MES	1.838	2.144	2.451	2.628	2.868	3.128	3.438	3.552	3.769	3.982
MEX	603	612	701	722	736	793	851	932	1.026	1.124
REA	1.305	1.631	2.033	2.281	2.594	2.974	3.306	3.541	3.876	4.217
ROE	1.707	1.737	2.041	2.178	2.382	2.634	2.907	3.162	3.393	3.637
RUS	2.469	2.349	2.639	2.747	2.854	2.931	2.945	3.011	3.093	3.180
USA	7.348	6.956	7.245	7.397	7.720	8.151	8.615	9.106	9.621	10.179
Total	45.696	51.717	58.605	63.454	68.712	73.519	78.295	82.530	87.208	91.865

Fonte: Resultados da pesquisa.

O uso da terra no Brasil no cenário de referência é apresentado na Tabela C4. Os dados que originaram o mapeamento de uso da terra no modelo EPPA são oriundos do estudo de Hurt et al. (2006), e foram agrupados e interpretados como descrito em Melillo et al. (2009). É importante que os dados de uso da terra sejam compatíveis em termos de classificação e ordenamento a nível mundial, razão pela qual o modelo segue um estudo mundial sobre uso da terra como fonte dos dados.

Os dados da Tabela C4 mostram que a área plantada com culturas (incluindo a área de cana-de-açúcar para etanol) estimada pelo modelo em 2010 é da ordem de 74 milhões de ha, ligeiramente superior à área prevista pelo IBGE e CONAB, de 72 milhões de ha. A área de pastagens plantadas no modelo é superior a levantada

[26] http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/

[27] http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_coun.html

pelo IBGE no Censo Agropecuário de 2006, de cerca de 101 milhões de ha. Já as áreas de florestas e pastagens naturais abarcam todos os tipos remanescentes de vegetação natural, e portanto, são de difícil comparação com as estatísticas nacionais. Uma comparação possível é com os dados do Portalbio do Ministério do Meio Ambiente[28]. De acordo com essa fonte, a área de vegetação nativa florestal no país é de cerca de 462 milhões de ha, comparável à área de florestas naturais no EPPA, de 457 milhões de ha. No Portalbio as áreas de vegetação nativa não florestal, incluindo as campestres e de transição, são de 121 milhões de ha, comparável à área de pastagens naturais no EPPA. Já a área de vegetação secundária é de 12,6 milhões de ha pelo Portalbio, enquanto o EPPA estima que essas áreas são de 18 milhões de ha quando somadas à área de silvicultura no país. As projeções de uso da terra no modelo são geradas endogenamente, como consequência dos diversos processos que determinam a dinâmica do modelo, incluindo o aumento da demanda por alimentos por conta do crescimento populacional e a competição por diferentes usos da terra, representada pelas funções de conversão do uso da terra.

Tabela C4 – Uso da Terra no Brasil (milhões de ha) no Cenário de Referência BAU

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Culturas	69,6	70,7	73,1	77,2	80,7	89,0	99,4	111,0	124,9
Pastagens	130,1	141,1	146,0	154,7	162,2	170,4	177,2	183,9	189,3
Silvicultura e florestas Secundárias	17,9	23,4	19,9	14,8	14,7	15,8	16,9	17,3	19,2
Florestas Naturais	456,7	451,2	443,9	433,6	421,7	408,4	393,4	376,1	356,9
Pastagens Naturais	122,0	110,0	112,4	114,3	114,3	109,3	105,7	103,4	100,6
Cana-de-açúcar p/ Etanol	4,6	4,5	5,6	6,2	7,1	7,7	8,1	8,9	9,6

Fonte: Resultados da Pesquisa.

A Tabela C5 apresenta a intensidade de uso de energia mensurada como a razão entre o consumo total de energia e o PIB de cada região do modelo. Esse parâmetro permite visualizar o aumento na eficiência energética ao longo do tempo, consequência das hipóteses sobre o aumento autônomo da eficiência de energia (*energy efficiency improvement index* – AEEI) e das mudanças endógenas no

[28] http://homolog-w.mma.gov.br/index.php?ido=conteudo.monta&idEstrutura=72

consumo dos diferentes combustíveis e insumos energéticos de acordo com as variações em preços relativos ao longo do tempo. A Tabela também ilustra a maior eficiência energética dos países desenvolvidos e o aumento mais acelerado na eficiência pelos países em desenvolvimento ao longo do tempo.

Tabela C5 – Intensidade de uso de energia (MJ/US$ de 2004) no cenário de referência BAU

	2004	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
USA	8,84	8,21	7,70	7,02	6,34	5,82	5,32	4,83	4,46	4,12	3,82
CAN	13,81	12,97	12,05	11,09	10,21	9,39	8,60	7,90	7,29	6,74	6,20
MEX	9,21	8,50	7,92	7,43	6,90	6,60	6,27	5,97	5,69	5,40	5,13
JPN	5,05	4,71	4,44	4,11	3,81	3,55	3,29	3,06	2,85	2,66	2,48
ANZ	8,21	7,62	7,00	6,31	5,69	5,18	4,74	4,33	3,97	3,66	3,38
EUR	6,32	5,87	5,25	4,85	4,48	4,19	3,90	3,65	3,41	3,18	2,97
ROE	35,95	33,89	28,04	26,06	24,21	22,78	21,42	20,16	18,97	17,83	16,76
RUS	51,72	49,93	40,75	37,73	34,80	32,22	29,86	27,76	26,13	24,57	23,08
ASI	16,18	15,02	13,78	12,55	11,46	10,53	9,62	8,74	8,02	7,39	6,83
CHN	36,85	33,83	33,83	27,28	23,19	19,48	16,54	14,67	13,23	12,08	11,11
IND	24,39	23,65	22,55	20,69	19,53	18,58	17,40	16,13	14,82	13,71	12,51
BRA	12,52	10,61	9,87	9,36	8,49	8,02	7,46	6,94	6,40	5,98	5,58
AFR	17,35	16,32	14,83	13,22	11,99	10,98	10,07	9,27	8,53	7,97	7,47
MES	25,89	25,01	23,80	21,96	20,33	18,97	17,68	16,54	15,39	14,48	13,61
LAM	14,25	13,32	12,35	11,26	10,37	9,62	8,97	8,31	7,73	7,21	6,71
REA	21,11	19,28	18,55	17,61	16,48	15,72	15,04	14,36	13,53	12,87	12,21

Fonte: Resultados da Pesquisa.