

EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES IN THE ENERGY SECTOR, IN BRAZIL

Arnaldo Walter¹

¹*Universidade Estadual de Campinas*

DOI: 10.47168/rbe.v27i3.646

RESUMO

O Brasil é um dos maiores emissores globais de gases de efeito estufa (GEE), embora sua parcela seja relativamente pequena se comparada aos dois maiores emissores (China e EUA). Ao contrário de muitos países, o perfil de emissões no Brasil também é distinto, com participação relativamente pequena do setor de energia. Neste artigo, é analisado o perfil das emissões em energia, sua evolução na última década e as perspectivas até 2030. Desde 2014, as emissões de GEE associadas às cadeias energéticas caíram, mas isso se deve à longa crise, e a perspectiva é de que voltem a crescer com a retomada da atividade econômica. É positivo que a matriz energética nacional possua uma grande parcela de fontes renováveis e que haja potencial de crescimento da bioenergia, energia eólica e solar. No entanto, as oportunidades de mitigação de baixo custo em energia também devem se tornar mais limitadas em um período de 10 a 20 anos, além de que o sistema também é vulnerável às mudanças climáticas. Nesse sentido, partindo do pressuposto de que o país terá que continuar reduzindo suas emissões, visando chegar ao zero líquido em meados deste século, ou mesmo um pouco mais tarde, surgem grandes desafios. E isso também porque é provável que as emissões ainda não controladas devido ao desmatamento tenham que ser parcialmente compensadas no setor de energia.

Palavras-chave: Gases de efeito estufa, Emissões, Mitigação, Energia, Desafios.

ABSTRACT

Brazil is one of the largest global emitters of greenhouse gases (GHG), although its share is relatively small compared to the two largest emitters (China and the USA). Unlike many countries, the emissions profile in Brazil is also distinct, with relatively small participation from the energy sector. In this paper, the profile of energy emissions is analysed, as well as its evolution over the last decade and prospects until 2030. Since

2014, GHG emissions associated with energy chains have fallen in Brazil, but this is due to the long crisis in many years, and the perspective is that they will grow again with the resumption of economic activity. It is positive that the Brazilian energy matrix has a large portion of renewable sources and that there is potential for growth in bioenergy, wind and solar energy. However, low-cost energy mitigation opportunities are also likely to become limited over a period of 10 to 20 years, and the system is vulnerable to climate change itself. In this sense, assuming that the country will have to continue reducing its emissions, aiming to reach net zero in the middle of this century, or even a little later, great challenges arise. And this is also because it is likely that the yet uncontrolled emissions due to deforestation will have to be partially offset in the energy sector.

Keywords: Greenhouse gases, Emissions, Mitigation, Energy, Challenges.

1. INTRODUÇÃO

Segundo a publicação *The Gap Report*, de 2020 (UNEP, 2020), as emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) somaram 59,1 GtCO₂e em 2019 (bilhões de toneladas equivalentes de CO₂), incluindo as emissões associadas à mudança do uso da terra¹ (*Land Use Change – LUC*, em Inglês), com uma margem de erro de $\pm 5,9$ GtCO₂e. As emissões globais, quando não computadas aquelas associadas ao LUC, foram estimadas em $52,4 \pm 5,2$ GtCO₂e. Esses valores correspondem à equivalência entre gases de efeito estufa com uso do potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential – GWP*) calculado em um horizonte de 100 anos, cujos valores foram publicados no *4th Assessment Report* do IPCC (GWP 100 – AR4) (UNEP, 2020).

Ainda em 2019, segundo ao mesmo *The Gap Report*, as emissões que são atribuídas à queima de combustíveis fósseis somaram $38,0 \pm 1,9$ GtCO₂e, o que indica que as emissões das cadeias energéticas representam algo próximo a 2/3 das emissões totais. Tanto as emissões totais quanto aquelas atribuídas às cadeias energéticas atingiram seus máximos históricos em 2019.

A Agência Internacional de Energia (IEA, em Inglês) estima que as emissões de CO₂ associadas às cadeias energéticas tiveram redução de 5,8% em 2020, em relação ao ano anterior, por conta dos

1 Em Inglês, a designação correta da categoria de emissões é LULUCF, para *Land Use, Land Use Change and Forestry activities*. Em Português, a categoria é designada como Uso da Terra, Mudança de Uso da Terra e Florestas. Em um inventário, a contribuição líquida dessa categoria pode ser positiva, no caso de desmatamento, o que resulta aumento das emissões totais, ou pode ser negativa, em associação à boa gestão de florestas, ou seja, a remoções, com retirada de carbono da atmosfera.

impactos da pandemia do COVID-19. Em termos absolutos, a redução foi de aproximadamente 2 MtCO₂¹ (IEA, 2021). No futuro, os efeitos da pandemia sobre a evolução das emissões dependerão da velocidade da retomada das atividades econômicas e dos efeitos do que se chama “transição energética” (*energy transition*).

Transição energética é um conceito associado às mudanças de matrizes energéticas. Recentemente, o uso do termo tem sido associado principalmente às transformações do setor energético que resultariam, na segunda metade do Século XXI, em drástica redução do suprimento de fontes fósseis de energia; no limite, ocorreria a transição para matrizes energéticas com zero carbono. Neste número especial da Revista Brasileira de Energia, o tema é tratado por Percebois (2021) e por Ferreira e Machado (2021). A principal razão para a esperada transição é a necessidade de drástica redução das emissões de GEE, mas são também aspectos determinantes a diversificação dos agentes econômicos no setor energético, os desenvolvimentos tecnológicos e as reduções de custos associadas, e os rápidos avanços das tecnologias de gestão de informações (IRENA, 2021).

Dada a importância das emissões das cadeias energéticas no total das emissões de GEE, qualquer plano de redução das emissões para que haja probabilidade significativa de que a temperatura da Terra não supere 1,5-2,0°C, neste século, pressupõe drásticas mudanças das matrizes energéticas e dos padrões de consumo. A mesma IEA mostra que no cenário em que a temperatura não superaria 1,5°C (*Sustainable Development Scenario*) será preciso alcançar emissões líquidas nulas nas cadeias energéticas, em 2070, e essas teriam que ser negativas a partir de então (IEA, 2020a). Evidentemente, trata-se de um desafio sem precedentes, em função do enorme estoque de instalações e equipamentos, dos investimentos que serão requeridos, e dos interesses de empresas e governos que dominam cadeias de suprimento de energéticos fósseis.

Neste artigo é analisada a evolução das emissões de GEE no setor energético brasileiro, no período 2010-2019, e as perspectivas na década 2021-2030. Os dados relativos a 2020 não estavam consolidados quando este artigo foi escrito, em Maio de 2021. O artigo está estruturado em cinco seções, além desta Introdução. Na próxima seção são apresentadas informações sobre as emissões mundiais de GEE, e quais países são os principais emissores. Na terceira seção é analisada a evolução recente das emissões no setor energético, no mundo, e as perspectivas de significativa redução, nas próximas décadas. Na quarta seção é analisada a evolução das emissões de GEE nas

1 Em suas publicações mais recentes a IEA usa o GWP 100 publicado no 5th Assessment Report (GWP 100 – AR5). A redução de 2 MtCO₂ nas emissões corresponde a 5,8% de aproximadamente 36 GtCO₂, que é o valor apresentado pela IEA para as emissões das cadeias energéticas (IEA, 2020).

cadeias energéticas, no Brasil, na última década, enquanto a quinta seção é dedicada à análise das perspectivas para os próximos 10 anos. Finalmente, as conclusões são apresentadas na sexta seção deste artigo.

2. EMISSÕES MUNDIAIS DE GASES DE EFEITO ESTUFA E OS PRINCIPAIS EMISSORES

Grande parte dos inventários de emissões de GEE apresentam os resultados em cinco categorias, ou setores, e seguem metodologia definida pela Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC)¹. Essas categorias são Energia, Processos Industriais, Agropecuária, Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas e Tratamento de Resíduos.

Apesar da metodologia ser bem estabelecida e da atenção com que os resultados são acompanhados, há grande dificuldade para a atualização e para a minimização de divergências de informação. Os países Anexo I² do Protocolo de Quioto têm o compromisso de enviar à Convenção Quadro, todos os anos, seus inventários de emissões, e as informações disponíveis mais recentes são para 2018 (quando este artigo foi escrito). Já os países Não-Anexo I (entre eles o Brasil), são obrigados a enviar com menor frequência suas Comunicações Nacionais, com seus inventários, seguindo a mesma metodologia. Na base de dados da Convenção Quadro, entre os principais emissores Não-Anexo I, as informações mais recentes do Brasil e da Índia são de 2016, de 2014 para a China e de 2000 para a Indonésia (UNFCCC, 2021).

Outra dificuldade está na avaliação das emissões na categoria LULUCF, uma vez que se requer estimativa minimamente precisa das áreas com suas respectivas coberturas vegetais, e do estoque de carbono em cada cobertura. Assim, em muitas listas dos principais emissores são apresentadas informações sem a consideração daquelas associadas a LULUCF.

De acordo com a base de dados apresentada pelo *Climate Watch*³ (2021), em 2018 o Brasil era o sexto maior emissor mundial, como indicado na Tabela 1. A base apresenta estimativas para as emissões totais, incluindo LULUCF, e para o total das emissões mundiais naquele ano a indicação é que elas somaram 48,9 GtCO₂e (a UNEP

1 Em Inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change* – UNFCCC.

2 Aqueles aos quais, no Protocolo de Quioto, foram atribuídas metas de redução das emissões de GEE. São, essencialmente, os países que até então eram historicamente responsáveis pela maior parte das emissões de GEE, desde a Revolução Industrial.

3 A fonte de dados da publicação é o *Climate Analysis Indicators Tool* (CAIT), do *World Resources Institute* (WRI).

apresenta 55,3 GtCO₂eq para o mesmo ano); para as emissões do setor energia, o *Climate Watch* apresenta 37,2 GtCO₂e em 2018, enquanto a UNEP apresenta 37,5 GtCO₂e no mesmo ano. No ranqueamento dos maiores emissores do setor energia, a posição do Brasil é décimo terceiro. Unicamente consideradas as emissões das cadeias energéticas, o Japão é o quinto maior emissor, e o Irã o sétimo.

Na mesma tabela são apresentadas as informações mais recentes disponíveis na base de dados da CQNUMC. A comparação dos dados das duas bases só é possível no caso dos países Anexo I (na Tabela 1, EUA, Rússia e Japão), e pode-se concluir que as informações do *Climate Watch* são bastante adequadas para esse grupo. Para os países Não-Anexo I os registros da base CQNUMC não são compatíveis com a estimativa do *Climate Watch*, por causa da defasagem na divulgação de dados. Dos países considerados maiores emissores, na Indonésia e no Brasil a importância do setor energia sobre as emissões totais é reduzida, pois grande parte de suas emissões são na categoria LULUCF. Já no caso da Rússia, em função da grande remoção de carbono da atmosfera por causa da gestão das florestas, as emissões em energia são até maiores do que as emissões totais.

Para as emissões totais acumuladas no período 1990-2018, ainda a partir da base de dados apresentada pelo *Climate Watch*, a contribuição do Brasil foi 4,3%, como quinto maior país emissor, atrás da China (17,3%), EUA (15%), Índia (5,1%) e Rússia (4,7%).

Tabela 1 – Estimativa das emissões de GEE (MtCO₂eq), totais (incluindo LULUCF) e nas cadeias energéticas, segundo o *Climate Watch* (2018) e a CQNUMC (no caso, o ano da informação está à direita), e percentuais do setor energético sobre as emissões totais

País	Totais (T)	Energia (E)	E/T (%)	Totais (T)	Energia (E)	E/T (%)	Ano
	Climate Watch			CQNUMC			
China	11.705,81	10.318,51	88,1	11.185,41	9.558,58	85,5	2014
EUA	5.794,35	5.271,21	91,0	5.903,15	5.547,21	94,0	2018
Índia	3.346,63	2.424,58	72,4	2.531,72	2.129,74	84,1	2016
Rússia	1.992,08	2.275,62	114,2	1.629,55	1.752,62	107,6	2018
Indonésia	1.703,86	598,17	35,1	1.375,59	280,94	20,4	2000
Brasil	1.420,58	437,33	30,8	1.305,57	422,50	32,4	2016
Japão	1.154,72	1.090,42	94,4	1.180,95	1.085,72	91,9	2018

Tanto as emissões totais quanto as emissões relacionadas às cadeias energéticas são também usualmente ponderadas em relação à população total ou ao resultado macroeconômico da atividade econômica (PIB). Na Tabela 2 (IEA, 2020b) são apresentados os indicadores das emissões devido à queima de combustíveis, em 2018, per capita e por US\$2015. Como ilustração, na mesma tabela também são apresentados os indicadores do suprimento total de energia por unidade de PIB. Entre os maiores emissores individuais, as emissões per capita são mais altas nos EUA e na Rússia, enquanto as emissões por unidade do PIB são mais altas na Rússia e China. No caso das duas métricas, e por conta de sua matriz energética, as emissões do Brasil são significativamente menores do que a média mundial.

Tabela 2 – Emissões de CO₂, em 2018, devido à queima de combustíveis, per capita e por unidade do PIB (US\$₂₀₁₅)

País/Região	Emissões (MtCO ₂)	Emissões (tCO ₂ /capita)	Emissões (kgCO ₂ /US\$2015)	TES (toe/1.000 US\$ ₂₀₁₅)
Mundo	33.513,3	4,42	0,26	0,11
China	9.570,8	6,84	0,40	0,13
EUA	4.921,1	15,03	0,25	0,11
Índia	2.307,8	1,71	0,23	0,09
Rússia	1.587,0	10,99	0,43	0,21
Japão	1.080,7	8,55	0,20	0,08
Alemanha	696,1	8,40	0,17	0,07
Irã	579,6	7,09	0,37	0,17
Indonésia	542,9	2,03	0,16	0,07
Brasil	406,3	1,94	0,13	0,09

3. EMISSÕES MUNDIAIS DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO SETOR ENERGÉTICO

A Figura 1 (OWID, 2021) mostra a evolução mundial das emissões estimadas de CO₂ nas cadeias energéticas, entre 1850 e 2019; são destacadas as emissões associadas às principais fontes de energia fóssil. Exceto 2020, historicamente as emissões devidas às cadeias energéticas só tinham caído em momentos específicos, como na esteira da segunda crise de preços do petróleo (no início dos anos 1980), quando da Guerra do Golfo (no início dos anos 1990), e na crise

econômica de 2009. As emissões associadas ao carvão mineral ainda são as maiores, mas houve tendência de queda nos últimos anos por conta, principalmente, da gradual substituição do energético na geração de eletricidade. As emissões devido ao petróleo e ao gás natural (sem considerar as emissões devido a *flare*) cresceram continuamente até 2019, sendo que as taxas médias anuais de crescimento daquelas associadas ao consumo de gás natural são mais do que o dobro das associadas ao consumo de petróleo e derivados. A respeito, ver Tabela 3 (OWID, 2021).

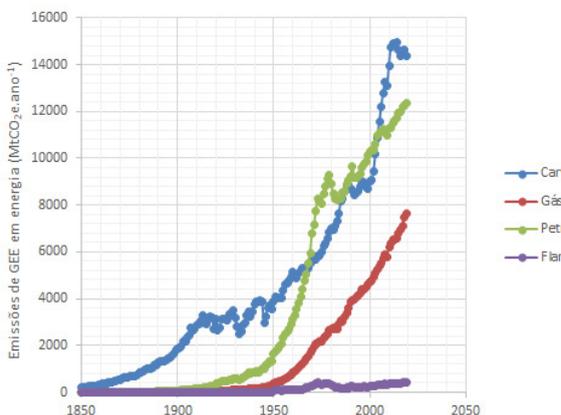


Figura 1 – Evolução das emissões de CO2 associadas a fontes fósseis de energia, entre 1850 e 2019

Tabela 3 – Taxas de crescimento das emissões das cadeias energéticas, em dois períodos, após o ano 2000, para o mundo e para os principais emissores no setor energético

País/ Região	Participação em 2019	C	G	P	E	C	G	P	E
		Taxas médias entre 2000-2019				Taxas médias entre 2010-2019			
Mundo	100,0%	2,5%	2,5%	1,0%	2,0%	0,3%	2,3%	1,0%	1,1%
China	27,9%	6,0%	12,8%	4,6%	6,0%	1,1%	12,9%	3,7%	2,0%
EUA	14,5%	-3,6%	1,6%	-0,2%	-0,7%	-6,5%	3,0%	0,3%	-0,8%
EU-28	9,0%	-2,9%	0,0%	-0,9%	-1,3%	-4,8%	-1,3%	-0,9%	-2,0%
Rússia	7,2%	-0,4%	0,9%	1,2%	0,7%	-0,6%	0,2%	2,0%	0,4%
Índia	4,6%	5,8%	5,8%	4,1%	5,3%	5,6%	-0,5%	4,9%	5,1%
Japão	3,0%	0,8%	1,3%	-2,5%	-0,7%	-0,3%	0,3%	-2,4%	-1,0%

Nota: C para carvão mineral, G para gás natural, P para petróleo e para o setor energético.

O crescimento das emissões de GEE no setor energético pode ser analisado pela variação da identidade de Kaya (1990) em um dado período. A identidade de Kaya é definida pela equação (1).

$$GEE_t = P_t \times (GDP/P)_t \times (TES/GDP)_t \times (CO_2/TES)_t \quad (1)$$

Sendo,

- GEE as emissões de gases de efeito estufa (no caso, CO₂);
- P a população no local estudado;
- (GDP/P) a renda per capita;
- (TES/GDP) o indicador de intensidade energética da atividade econômica;
- (CO₂/TES) o indicador da intensidade em carbono da matriz energética;
- t o momento objeto de análise.

Assim, a variação das emissões entre dois momentos no tempo pode ser calculada pela variação de cada um dos quatro parâmetros no mesmo intervalo, o que resulta em uma decomposição estrutural e permite a análise da contribuição das mudanças relativas desses parâmetros. Na Tabela 4 são apresentadas as variações de cada parâmetro nos intervalos 2000-2018 e 2010-2018, para o Mundo, países da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico), e países não OCDE. Os resultados foram obtidos a partir dos dados apresentados pela IEA (2020b).

Tabela 4 – Variações percentuais dos parâmetros que compõe a identidade de Kaya – contribuições para as variações das emissões de GEE no setor energético

Período	Parâmetro	Mundo	OCDE	não OCDE
2000-2018	Δ(E)	1,2%	-0,8%	2,3%
	Δ(P)	1,2%	0,6%	1,3%
	Δ(GDP/P)	2,3%	1,5%	3,5%
	Δ(TES/GDP)	-2,1%	-2,2%	-2,3%
	Δ(CO ₂ /TES)	-0,2%	-0,6%	0,0%
2010-2018	Δ(E)	2,1%	-0,4%	4,2%
	Δ(P)	1,2%	0,6%	1,3%
	Δ(GDP/P)	2,4%	1,2%	4,2%
	Δ(TES/GDP)	-1,6%	-1,8%	-1,8%
	Δ(CO ₂ /TES)	0,1%	-0,5%	0,5%

Entende-se que o grupo OCDE (38 países em 2020) representa adequadamente o dos países ditos economicamente desenvolvidos, enquanto o grupo não OCDE corresponde ao dos países emergentes ou não desenvolvidos economicamente. Nos dois períodos, os dois grupos tiveram reduções similares da intensidade energética da atividade econômica. Os países OCDE também tiveram redução da intensidade de carbono de suas matrizes energéticas, e a combinação dos dois efeitos foi suficiente para anular a tendência de crescimento das emissões associada ao crescimento populacional e ao da renda per capita. Isso não ocorreu nos países não OCDE. Como o crescimento populacional tende a ser maior nos países não OCDE, bem como é de se esperar maiores taxas de crescimento da renda per capita, a redução das emissões de GEE no setor energético só poderá ocorrer com rápida e acentuada reestruturação das atividades econômicas, aumento da eficiência energética, e avanço na transição energética.

O tamanho do desafio é potencializado, primeiro, pelo fato do consumo de energia per capita nos países não-OCDE ainda ser muito menor do que nos países OCDE: 55 GJ.capita⁻¹ versus 179 GJ.capita⁻¹, considerado o suprimento de energia primária (BP, 2020). O segundo aspecto que ilustra o desafio é que se estima que em 2019 havia pouco mais de 770 milhões de pessoas sem acesso físico às redes elétricas, e todas elas viviam em países não-OCDE (IEA, 2020b).

Na visão da IEA, para que a elevação de temperatura da Terra não exceda 1,5°C neste século, é preciso que a neutralidade em carbono dos sistemas energéticos seja alcançada em 2070 (IEA 2020a). Em Maio de 2021 a mesma IEA divulgou um estudo no qual é apresentada proposta bem mais ambiciosa, para que a neutralidade em carbono seja alcançada em 2050. No estudo anterior, a neutralidade na geração de eletricidade deveria ser alcançada em 2055, enquanto em transportes e na indústria ainda haveria emissões líquidas positivas, mas proporcionalmente pequenas, em 2070.

Em relação a um cenário tendencial, a redução de emissões em energia deveria alcançar 35,8 GtCO₂e em 2070, sendo pouco mais de 12 GtCO₂e na geração de eletricidade, mais de 10 GtCO₂e nas indústrias, e próximo a 8 GtCO₂e em transportes. Na geração de eletricidade, aproximadamente a metade da redução das emissões deveria vir da penetração de fontes renováveis, exceto bioenergia, e pouco mais de um quarto do emprego de sistemas CCUS (*carbon capture, utilization and storage*). No caso da indústria, um terço da redução das emissões de GEE deveria ser decorrente da substituição de combustíveis fósseis por eletricidade e pouco mais de 40% deveriam advir de sistemas CCUS e do uso de bioenergia, com contribuições aproximadamente iguais. Já no caso dos transportes, a mobilidade elétrica contribuiria com grande parte da redução das emissões (aproximada-

mente 40%), sendo que a contribuição combinada do uso de hidrogênio, da bioenergia e do ganho de eficiência (na ordem de importância), representaria aproximadamente 55% da redução das emissões.

A Figura 2 (IEA, 2020a) ilustra a contribuição potencial de diferentes tecnologias para com a redução das emissões de GEE no setor energético, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2020a). Na visão da Agência, que coincide com a de várias outras organizações e muitos analistas, significativa contribuição deverá vir da substituição de combustíveis fósseis por eletricidade, desde que as emissões na geração de eletricidade sejam sensivelmente reduzidas. A captura e armazenamento de carbono, e eventualmente a utilização do carbono capturado (e.g. na produção de combustíveis sintéticos), permitiria a redução das emissões nos sistemas que ainda utilizassem fósseis, além de emissões negativas no caso dos sistemas de bioenergia (desde que com uso de biomassa sustentável)¹. Também cabe destacar a contribuição da mudança de comportamentos (demanda evitada) e da eficientização energética (melhora de tecnologia). Estima-se que 35% da redução de emissões estaria associada a tecnologias que atualmente não são comerciais (no fim de 2020).

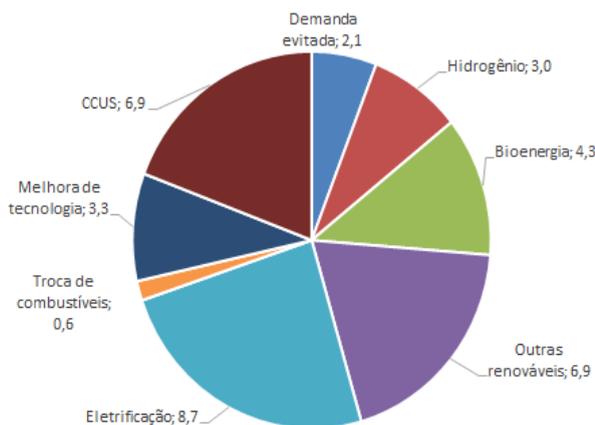


Figura 2 – Contribuição de diferentes tecnologias para a redução das emissões de GEE no setor energético, em 2070, em relação a cenário tendencial. Os valores correspondem a emissões evitadas, em GtCO₂e.ano⁻¹

4. EMISSÕES DE GEE NO BRASIL E A PARTICIPAÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO

No Brasil, os dados oficiais de emissões de GEE são divulgados pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI (BRASIL, 2021). Por ser Não-Anexo I, o país precisa enviar a CQNUMC suas Comunicações Nacionais, e até agora foram enviadas quatro. A última foi publicada no final de 2020, e apresenta dados até 2016. Cabe comentar que não há compatibilidade dos dados entre a Terceira e a Quarta Comunicações, mesmo para anos que já deveriam ter registros consolidados, e mesmo comparando valores com uso da mesma métrica (GWP)¹.

Como mencionado anteriormente, a CQNUMC publica os inventários de emissões de GEE de vários países, e entende-se que as informações divulgadas são oficiais, no sentido de que são as providas pelo país². As informações mais recentes do Brasil são de 2016, mas como será mostrado abaixo, não há completa compatibilidade entre as duas bases de dados.

Alternativamente, o Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) (SEEG, 2021), que é uma iniciativa do Observatório do Clima, divulga com maior frequência inventários de emissões de GEE para o Brasil. A informação mais recente é para o período 1990-2019. O procedimento metodológico é transparente³ e há, inclusive, uma publicação científica que apresenta detalhes (AZEVEDO et al., 2018).

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentadas comparações das estimativas emissões apresentadas nas três bases de dados acima mencionadas. A comparação foi feita em relação ao que é apresentado na Quarta Comunicação Nacional.

1 Um exemplo emblemático é 2005, que é o ano de referência para a NDC (da sigla, em inglês, para Contribuição Nacionalmente Determinada) brasileira. Em 2016, após ter assumido o compromisso de redução de emissões de GEE à época do Acordo de Paris, o Governo Federal declarou ter havido um erro na Comunicação e corrigiu as emissões líquidas totais de 2005 (base GWP 100 – AR5), de aproximadamente 2,2 para 2,8 GtCO₂e. Com a divulgação da Quarta Comunicação, as emissões oficiais em 2005 passaram a ser 2,56 GtCO₂e.

2 Na página web da CQNUMC afirma-se textualmente que as informações divulgadas são aquelas tais como foram disponibilizadas pelo país.

3 As notas metodológicas são disponibilizadas em <http://seeg.eco.br/notas-metodologicas/>. Declara-se que os procedimentos de avaliação são revistos regularmente.

Tabela 5 – Desvios percentuais entre as emissões de GEE apresentadas pela CQNUMC e a Quarta Comunicação Nacional, que aqui é a base de comparação (GWP 100 – SAR)

Setor	1990	1995	2000	2005	2010	2016
Energia	-3,6	-3,3	-1,7	-0,2	-1,0	-0,3
Processos Industriais	-2,8	2,2	0,2	-0,8	3,3	-3,5
Agropecuária	-12,9	-11,8	-11,3	-10,4	-11,1	-9,8
Uso da Terra, Mudança ...	-12,5	-5,8	0,9	-2,7	11,3	-26,8
Tratamento de Resíduos	5,4	-3,3	-6,9	-9,3	-6,4	-4,7
Emissões Totais	-10,8	-6,2	-2,0	-3,8	-2,2	-11,0

Nota: Não está claro qual a métrica utilizada para se estabelecer a equivalência de GEE para os dados do Brasil disponibilizados pela CQNUMC. Assumiu-se que foi utilizado o GWP 100 – SAR, e a comparação foi feita com os resultados da Quarta Comunicação Nacional para uso do mesmo GWP. É a hipótese que minimiza os desvios.

Tabela 6 – Desvios percentuais entre as emissões de GEE apresentadas pelo SEEG e a Quarta Comunicação Nacional, que aqui é a base de comparação (GWP 100 – AR5)

Setor	1990	1995	2000	2005	2010	2016
Energia	-1,2	-1,3	-0,4	0,1	-1,3	-0,6
Processos Industriais	-3,8	1,5	1,3	2,9	9,4	2,4
Agropecuária	2,1	2,7	2,5	3,1	3,8	4,8
Uso da Terra, Mudança ...	28,9	-13,4	11,6	2,3	128,9	117,5
Tratamento de Resíduos	-1,2	-0,3	5,1	4,2	6,3	5,2
Emissões Totais	16,8	-9,3	7,4	2,3	27,1	32,0

No caso do setor energético, os desvios são relativamente pequenos qualquer que seja a comparação. Já para as emissões de GEE nas atividades agropecuárias, e principalmente para as emissões associadas ao uso da terra, mudança de uso da terra e florestas (LULUCF), os desvios são grandes. Embora não seja o tema principal deste artigo, é interessante avançar um pouco mais na análise das emissões na categoria LULUCF, por serem as maiores e, tudo indica, determinantes da tendência nos próximos anos. Na Figura 3 (UNFCCC, 2021; SEEG, 2021; INPE, 2021) é apresentada a evolução das emissões líquidas estimadas nessa categoria desde o ano 2004 (quando houve o maior desmatamento, em área, nos

últimos 20 anos), segundo duas bases (CQNUMC e SEEG), e a evolução do desmatamento na Amazônia¹, estimado por análise de imagens de satélite (INPE, 2021). As informações disponíveis na base da CQNUMC vão até 2016. Pode-se ver na figura que desde 2009 as emissões entendidas como oficiais (apresentadas pela CQNUMC) são proporcionalmente menores do que a estimativa de área desmatada.

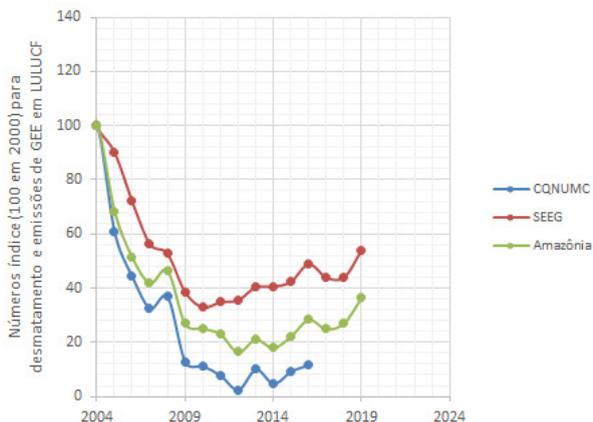


Figura 3 – Evolução no período 2004-2019, apresentada como número índice (100 em 2004), do desmatamento na Amazônia, e das emissões LULUCF, segundo CQNUMC e SEEG

A contribuição percentual do setor energético para com as emissões totais do Brasil depende da consideração que se faz quanto às emissões associadas à categoria LULUCF. Na Figura 4 (Brasil, 2021; SEEG, 2021) pode-se ver que segundo a Quarta Comunicação Nacional, as emissões em energia representaram 27% das emissões totais em 2016, enquanto que de acordo com o SEEG, as emissões em energia representaram 19% das emissões totais em 2019 (20% em 2016).

¹ Emissões líquidas porque são descontadas as remoções, ou seja, a captura de CO₂ devido à manutenção da cobertura vegetal existente. Além das variações de estoque de carbono em várias coberturas vegetais (florestas, entre elas), as emissões na categoria incluem o impacto do gerenciamento de terras abandonadas e a variação de estoque de carbono no solo.

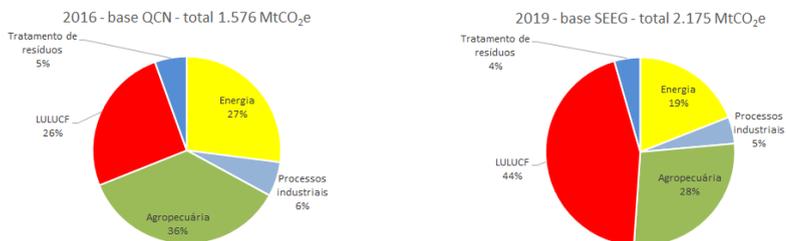


Figura 4 – Perfil das emissões de GEE no Brasil: lado esquerdo, em 2016, de acordo com a Quarta Comunicação Nacional; lado direito, em 2019, de acordo com SEEG

Neste artigo, que tem foco nas emissões de GEE nas cadeias energéticas, na análise que se segue foi utilizada a base de dados do SEEG. As razões são o pequeno desvio em relação ao que se entende são os dados oficiais e, sobretudo, pelo fato da base de dados apresentar maior detalhamento das emissões em diferentes usos finais de energia.

Na Figura 5 (SEEG, 2021) é mostrada a evolução das emissões no setor energético, no Brasil, no período 2010-2019. As emissões são subdivididas em emissões fugitivas e emissões devido à queima de combustíveis no uso final, sendo que essas são classificadas nos diferentes segmentos socioeconômicos. Em 2019 as emissões devido às cadeias energéticas foram estimadas em 413,7 MtCO₂e, mas no período de dez anos o pico foi em 2014, quando alcançaram 480,4 MtCO₂e. Pode-se observar na figura que as emissões totais variaram no período de maneira muito próxima à evolução da atividade econômica, expressa pelo PIB nacional. Na média, as emissões em energia caíram entre 2014 e 2019.

No Brasil, o setor de transportes é o maior emissor, contribuindo com 47,5% em 2019 e com o maior percentual em 2012 (pouco mais de 49%). O segundo maior segmento emissor é a indústria, com 15,8% em 2019, mas com pico superior a 20% em 2011. Já o pico das emissões devido à queima direta de combustíveis na geração de eletricidade foi em 2014, quando a contribuição foi 14,6% do total do setor energético; em 2019, a parcela foi 9,7%.

Dentro de transportes, as emissões do transporte rodoviário representaram no período 2010-2019, na média, pouco mais de 90% das emissões do subtotal, e dentro do transporte rodoviário as emissões associadas aos caminhões são as maiores, representando 43% das emissões rodoviárias, na média do período (44,1% em 2019). As emissões devido ao uso de automóveis representaram 34% das emissões rodoviárias, também na média do período.

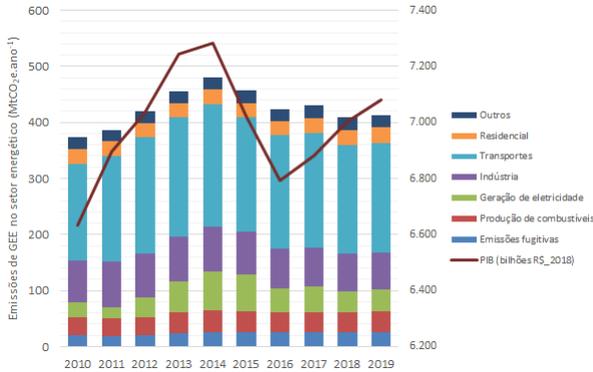


Figura 5 – Evolução das emissões de GEE no setor energético (MtCO₂e.ano⁻¹), entre 2010 e 2019, e evolução do PIB (bilhões de R\$₂₀₁₈) no mesmo período (eixo à direita)

As emissões relativas à indústria são aquelas devido à queima de combustíveis. Cabe destacar que em um inventário as emissões classificadas como “processos industriais” são aquelas que ocorrem no processo produtivo, e não incluem as da combustão. A Figura 6 mostra as emissões anuais médias de vários segmentos industriais no período 2010-2019 (para atenuar as oscilações). Como seria de se esperar, os segmentos que têm maior demanda térmica, e/ou têm maior número de unidades, são os mais significativos quanto às emissões de GEE.

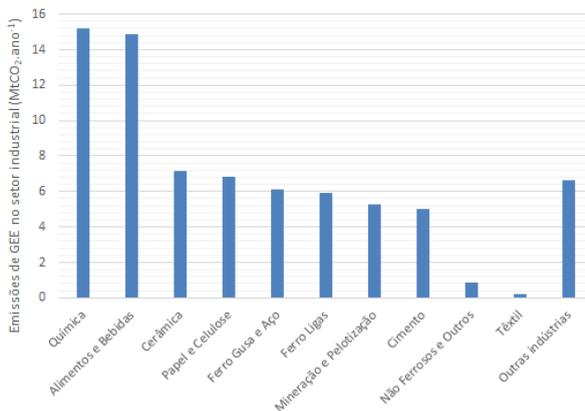


Figura 6 – Emissões médias (MtCO₂.ano⁻¹) de GEE por segmento industrial, no período 2010-2019

Já quanto à geração de eletricidade, o SEEG apresenta as emissões de GEE associadas à queima de combustíveis na geração termoelétrica em centrais de Serviço Público; pode-se entender que estão associadas ao suprimento do Sistema Interligado Nacional - SIN. A queima de combustíveis nos sistemas de autoprodução impacta as emissões, majoritariamente, do setor industrial. A Figura 7 apresenta as emissões de GEE no período 2010-2019, bem como o fator de emissão médio, em $\text{kgCO}_2.\text{MWh}^{-1}$. Em relação à média mundial, o baixo fator de emissão reflete a grande participação das fontes renováveis de energia na matriz elétrica brasileira, enquanto a evolução no tempo está associada a variações da disponibilidade de água nos reservatórios e à lógica de operação do sistema interligado.

Os valores máximos observados na Figura 7 (SEEG, 2021; ONS, 2021a) ocorreram em 2014 e 2015, quando, em função da menor capacidade de armazenamento nos reservatórios das hidroelétricas, principalmente as do subsistema Sudeste + Centro-Oeste, as térmicas operaram em regime mais intenso. Na média o armazenamento não aumentou significativamente a partir de 2016 (ONS, 2021a), mas com as adições na capacidade instalada e o menor consumo de eletricidade, houve alteração na operação e a geração termoelétrica foi significativamente reduzida desde então (ver Figura 8). Entre fim de 2013 e fim de 2015 foram adicionados mais de 4.200 MW em sistemas eólicos e quase 6.000 MW em hidroelétricas (ONS, 2021b). Assim, a geração termoelétrica (com carvão mineral, gás natural e derivados de petróleo) em 2016 foi apenas 60% da geração térmica em 2014.

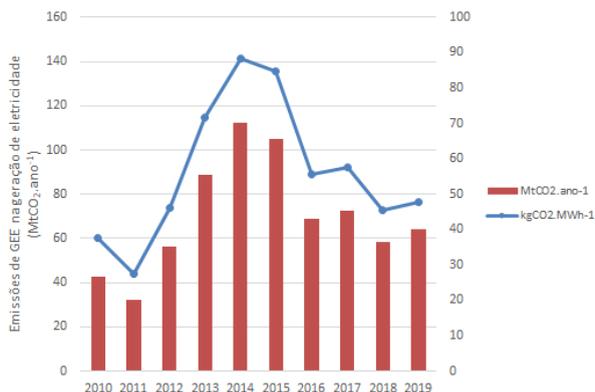


Figura 7 – Emissões de GEE na geração de eletricidade em centrais de Serviço Público, entre 2010 e 2019 ($\text{MtCO}_2.\text{ano}^{-1}$), e fator de emissão médio no mesmo período ($\text{kgCO}_2.\text{MWh}^{-1}$) (eixo da direita)

A Figura 8 foi elaborada a partir de ONS (2021a; 2021b), MME (2020) e IBGE (2020).

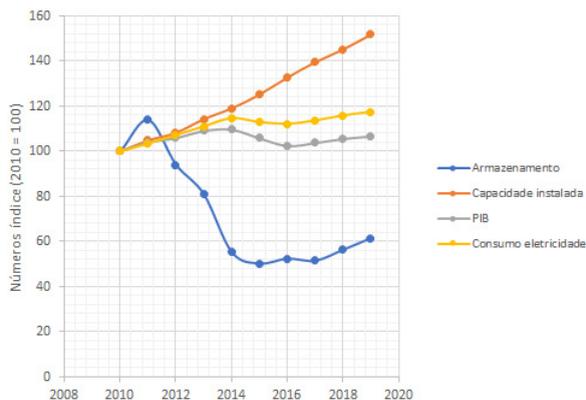


Figura 8 – Evolução no período 2010-2019 da capacidade média de armazenamento em hidroelétricas, da capacidade instalada de geração, do PIB e do consumo final de eletricidade

5. PERSPECTIVAS PARA A EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DO SETOR ENERGÉTICO

A análise das perspectivas de evolução das emissões do setor energético no período 2021-2030 é feita a partir de diferentes referências, que são sumarizadas nas próximas subseções.

5.1 Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC)

Em 2015, quando da realização da Conferência das Partes em Paris (COP 25), o Brasil apresentou suas intenções de redução de emissões de GEE, com metas para 2025 e 2030. Mais tarde, com a ratificação do país ao Acordo de Paris, em 2016, os compromissos passaram a ser a NDC brasileira. No final de 2020, o Brasil enviou uma atualização do documento.

O compromisso assumido, que essencialmente não foi alterado na atualização de 2020, é de redução das emissões de GEE em 37%, em 2025, em relação às emissões líquidas de 2005, e em 43%, em 2030, também em relação às emissões de 2005. Aqui devem ser destacadas as alterações do valor oficial das emissões em 2005, como

comentado na seção anterior, embora o documento de 2020 faça referência às emissões de 2005 apresentadas na Terceira Comunicação (2,84 GtCO₂e) e não àquelas apresentadas na Quarta Comunicação (2,56 GtCO₂e). Na atualização de 2020, o documento menciona o compromisso de que seja atingida a neutralidade climática (i.e. emissões líquidas nulas) em 2060. Em abril de 2021, o Governo mencionou que a meta de neutralidade pode ser antecipada para 2050 que, de resto, já estava mencionada como possibilidade no documento de 2020.

Nos documentos oficiais é dito reiteradas vezes que a NDC brasileira é uma das mais ambiciosas no mundo. Entretanto, o país foi e tem sido criticado por ter sido conservador ao assumir seus compromissos de mitigação. Primeiro, já em 2015 a proposta era considerada pouco ambiciosa, uma vez que a meta era entendida como alcançável com alguma facilidade (CLIMATE ACTION TRACKER, 2021). Segundo, porque o Brasil declarou em 2016 que havia um erro no inventário de emissões de 2005, e o novo valor de referência era 600 MtCO₂e maior, o que faria com que atingir a meta fosse ainda mais fácil¹ (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2020). Terceiro, porque o país teve a oportunidade de ser mais ambicioso em 2020, mas foram repetidos os objetivos anteriormente declarados (WWF, 2020). Como o desmatamento foi muito alto em 2005, a probabilidade de cumprimento das metas já seria considerável ao apresentar aquele ano como o de referência, desde que o desmatamento continuasse a ser controlado. E essa era a tendência até 2014-2015.

Para que a meta apresentada na NDC seja cumprida, as emissões em 2025 não poderão superar 1,79 GtCO₂e, e 1,62 GtCO₂e em 2030 (assumindo que foram 2,84 GtCO₂e em 2005). De acordo com a Quarta Comunicação, as emissões em 2016 (último ano de registro oficial) foram 1,58 GtCO₂e, e essa proximidade de valores (atuais versus meta) acirra as críticas sobre a falta de ambição da proposta brasileira (na prática, as emissões poderão até aumentar). Por outro lado, dado o crescimento do desmatamento, é bastante provável que esses resultados não sejam facilmente alcançados.

Na atualização da NDC, apresentada em 2020, não é mencionada qualquer ação específica de mitigação. Já o documento de 2016 mencionava explicitamente, por exemplo, zerar o desmatamento ilegal e viabilizar a recuperação de florestas em 12 milhões de hectares. Na área energética, as ações mencionadas especificamente eram:

- assegurar que as fontes renováveis de energia representassem 45% da matriz energética nacional, em 2030;

¹ Cabe chamar atenção que o Brasil apresentou, em poucos anos, três valores para as emissões líquidas totais em 2005, que é o ano de referência. Corrigiu novamente o valor, agora para baixo (quase 300 MtCO₂e), mas manteve o valor mais alto como a referência para a verificação do cumprimento das metas.

- expandir a parcela de fontes renováveis que não a hidroeletricidade, também em 2030, para pelo menos 28% na matriz de geração de eletricidade;
- assegurar a produção sustentável de biocombustíveis, fazendo com que a bioenergia representasse pelo menos 18% na matriz energética em 2030;
- aumentar 10% a eficiência no setor elétrico;
- fomentar ganhos de eficiência nos transportes, e estimular o transporte público em centros urbanos.

Em 2016 a EPE publicou uma nota técnica que detalhava e contextualizava as ações acima mencionadas (EPE, 2016). Os valores que são apresentados a seguir são apenas ilustrativos, pois a evolução do consumo final de energia tem estado muito abaixo do que foi então projetado (2,9-3,0% ao ano).

À época foi mencionado que a meta de 45% da participação das renováveis era um desafio, tanto pela necessidade de diversificação de fontes quanto pela necessidade de significativa expansão. Então, foi estimado que cerca de um terço da expansão de renováveis viria da contribuição de derivados da cana e dos insumos para produção de biodiesel, o que não está ocorrendo como previsto, principalmente em relação à cana; por exemplo, foi previsto que a produção de etanol combustível teria que alcançar 54 bilhões de litros em 2030¹. Na hipótese de que houvesse a expansão prevista, o objetivo relativo à produção sustentável de biocombustíveis também seria atendido.

Quanto ao objetivo de aumentar a eficiência no setor elétrico, o resultado almejado corresponderia à redução do consumo de 105 TWh em 2030, o que corresponderia a 20% do acréscimo estimado do consumo no período 2013-2030. O tamanho do desafio é evidenciado pela observação de que 32,9 TWh foi a economia acumulada como resultado das ações do PROCEL em aproximadamente duas décadas (EPE, 2016).

5.2 Plano Nacional de Expansão de Energia (PDE) 2030²

No PDE 2030 (EPE, 2021), a principal conclusão relativa às emissões de GEE é que as que são associadas às cadeias energéticas crescerão até 2030 (chegando a 484 MtCO₂, com crescimento de quase

¹ No PDE 2030 (ver seção 5.2) é previsto que a produção de etanol chegue a 46 bilhões de litros em 2030, valor que deve ser comparado com a produção em 2020, estimada em 32,8 bilhões de litros. Já a produção de biodiesel quase dobraria no período de 11 anos, chegando a 11,5 bilhões de litros em 2030 (6,4 bilhões de litros em 2020) (EPE, 2021; ANP, 2021).

² A respeito, recomenda-se a leitura da contribuição de Ferreira e Machado (2021), neste mesmo número especial.

17% em relação à estimativa feita para 2019). Mesmo com a significativa participação das fontes renováveis de energia na matriz, isso ocorreria porque o consumo de energia per capita deverá crescer.

A Tabela 7 (EPE, 2021) apresenta o perfil previsto para as emissões de GEE no setor energético em 2025 e 2030, no Brasil, no cenário referência do PDE 2030. Pode-se ver que não é prevista alteração significativa no perfil das emissões no período 2019-2030, sendo que as emissões em transportes continuarão a ser as maiores, seguidas das industriais. No período 2019-2030 o crescimento mais significativo das emissões seria daquelas associadas à produção de petróleo (e derivados) e gás natural, e a única previsão de queda é nas emissões associadas à geração de eletricidade em centrais de serviços público (que atendem o Sistema Integrado Nacional – SIN). Já no período 2019-2025, por conta dos impactos da pandemia (incorporados à análise do PDE 2030), as emissões associadas às cadeias energéticas cresceriam muito pouco.

Tabela 7 – Perfil estimado das emissões de GEE no setor energético, no cenário básico do PDE 2030, em 2025 e 2030, e variação percentual no período 2019-2030

Subsetor	2025 (MtCO ₂)	2030 (MtCO ₂)	Parcelas em 2030 (%)	Varição (%) 2019-2030
Geração de eletricidade – SIN	19	22	4,6	-43,6
Geração de eletricidade – autoprodução	16	19	3,9	11,8
Energético	41	47	9,7	56,7
Residencial	21	22	4,6	15,8
Comercial	2	2	0,4	33,3
Público	1	1	0,2	25,0
Agropecuário	21	22	4,6	15,8
Transportes	191	224	46,4	17,3
Industrial	83	93	19,3	22,4
Emissões fugitivas	26	31	6,4	55,0
Total/em relação ao total	421	483	100,0	16,9

No PDE 2030 afirma-se que a evolução das emissões em transportes e nas indústrias já considera a hipótese de uso racional de energia. Já no caso da geração de eletricidade, foram consideradas condições hidrológicas médias. A expansão da capacidade com fontes renováveis, em conjunto com a hipótese de que a hidraulicidade não

será ruim, resulta em baixas emissões (comparar com o que é apresentado na Figura 7). A parcela das renováveis na geração de eletricidade seria 92% em 2030.

5.3 Custos de mitigação das emissões

Em 2010, o Banco Mundial apresentou estudo com propostas para a redução das emissões de GEE no Brasil, tendo 2030 como horizonte de análise (GOUVELLO, 2010). No caso do setor energético, no estudo optou-se por separar transporte (i.e. as emissões devido à queima do combustível utilizado em transportes) do restante do setor energético. Na Tabela 8 (SEEG, 2021; GOUVELLO, 2010), como ilustração, são apresentados dados do ano base daquele estudo (2008), e as estimativas para 2030, tanto para o cenário referência quanto para o cenário de mitigação (“Baixo Carbono”).

Tabela 8 – Emissões de GEE (em MtCO₂) no setor energético, em 2008 e em 2030 (Cenário Referência e Baixo Carbono), com destaque para transportes, e potencial redução estimada em 2030 (% em relação ao Cenário Referência)

Setor/Subsetor	2008	2008	2030	2030	Redução em 2030 (%)
	SEEG	World Bank	Referência	Mitigação	
Energia, sem transportes	197	232	458	297	35,2
Transportes	158	149	245	174	29,0
Energia, com transportes	354	381	703	471	33,0

Os resultados numéricos daquele estudo não podem ser comparados com as estimativas mais recentes para 2030. Primeiro, naquela oportunidade os dados das emissões em 2008 não eram consolidados. Segundo, as estimativas do cenário referência, baseadas no PNE 2030 (2010-2030), refletiam uma expectativa de crescimento econômico que não se consolidou e não se consolidará, tanto por causa do mau desempenho da economia após 2014 quanto pelos impactos da pandemia¹ (resultando estimativa de 703 MtCO₂ em 2030 – ver Tabela 8 –, versus 483 MtCO₂ também em 2030 – ver Tabela 7).

¹ No estudo do Banco Mundial, tendo por referência o PNE 2030, previa-se 43,8% de crescimento real do PIB entre 2010 e 2020, enquanto o efetivo crescimento no período foi de apenas 2,4%. Já no período 2020-2030, previa-se crescimento de 54,3%, enquanto no PDE 2030 o crescimento real do PIB entre 2021 e 2030 é estimado em 29,9%.

No estudo do Banco Mundial foram consideradas algumas alternativas de mitigação de emissões de GEE, levando-se em conta o potencial de implementação e sua representatividade. Excluídos os transportes, foram analisadas opções de eficiência energética no setor residencial e na indústria, substituição de combustíveis (inclusive uso de carvão vegetal sustentável em siderúrgicas), e a geração de eletricidade em centrais eólicas e em sistemas de cogeração com uso da biomassa residual da cana. No transporte urbano de passageiros, foram analisadas alternativas de transporte coletivo (metrô e sistemas de trânsito de ônibus rápido – BRT), enquanto no caso do transporte intermunicipal foram analisadas mudanças de modais, tanto no caso de cargas quanto de passageiros. Também foi analisado com atenção o maior consumo de etanol combustível.

Como ilustração, na Figura 9 (GOUVELLO, 2010) são apresentados os custos marginais de mitigação de GEE das diferentes alternativas no setor energético, versus o potencial de mitigação acumulado no período 2010-2030 (em MtCO₂). Os custos, em US\$/tCO₂, foram estimados para a consideração de uma taxa de desconto de 8% ao ano (mencionada no estudo como taxa de desconto social). Os resultados correspondem a hipóteses que eram adequadas àquela época, e não são necessariamente condizentes com a realidade atual; isso explica a posição relativa de algumas alternativas. Como é típico de estudos nessa área, as ações de efficientização energética têm, em geral, custos de mitigação negativos.

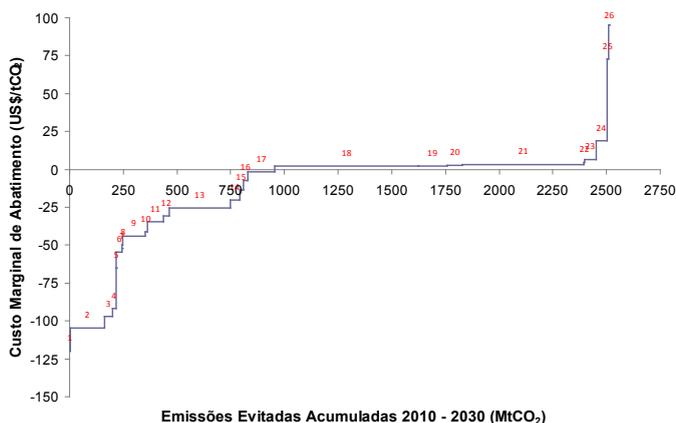


Figura 9 – Custos de mitigação de emissões de GEE no setor energético versus emissões evitadas, acumuladas, no período 2010-2030

1	Iluminação residencial	14	Gás natural substituindo combustíveis
2	Cogeração com biomassa da cana	15	Outras medidas de eficiência energética
3	Sistemas de recuperação de vapor	16	Geração eólica
4	Sistemas de recuperação de calor	17	Sistemas Gas to liquid (GTL)
5	Iluminação industrial	18	Exportação de etanol (substituição de gasolina)
6	Solar térmica	19	Novos processos industriais
7	Iluminação comercial	20	Biomassa substituindo combustíveis
8	Motores elétricos	21	Carvão vegetal renovável
9	Otimização da combustão	22	Aquecedores solares residenciais
10	Refrigeradores domésticos	23	Integração energética nas refinarias existentes
11	Reciclagem	24	Novas refinarias
12	Transmissão Brasil-Venezuela	25	Controle de incrustações nas refinarias existentes
13	Recuperação de calor (fornos)	26	Controle avançado nas refinarias existentes

Figura 9 – Custos de mitigação de emissões de GEE no setor energético versus emissões evitadas, acumuladas, no período 2010-2030 (continuação)

Como pode ser visto na figura, grande parte do potencial de mitigação, de quase 2,5 GtCO₂, poderia ser viabilizado com custos muito baixos, e algo como 800 MtCO₂ teriam custos negativos, ou seja, eram ações economicamente viáveis nas condições em que a análise foi feita. Em 2030, as alternativas de mitigação analisadas contribuiriam com redução de 33% das emissões projetadas.

O mesmo tema foi abordado por Borba et al. (2012), que avaliaram o potencial e os custos em transportes, na indústria e na produção de petróleo e derivados. O horizonte temporal (2030) e as premissas macroeconômicas foram as mesmas do estudo de Gouvello (2010), e os resultados correspondem à possível redução de 27% das emissões projetadas. O potencial total de mitigação, acumulado entre 2010 e 2030, é muito similar ao estudo anteriormente mencionado, somando 2,48 GtCO₂e.

Em transportes, a redução acumulada das emissões no período 2010-2030 foi estimada em 610 MtCO₂e, sendo 435 MtCO₂e a estimativa referente à disseminação do transporte ferroviário. Exceto o último ponto, os custos de emissões evitadas foram estimados entre -120 e 360 US\$.tCO₂⁻¹, sendo que os custos negativos eram os das ações que correspondem ao aumento de eficiência, e o custo mais alto, àquela época, o dos veículos híbridos.

No caso das indústrias, o potencial de mitigação no período de 20 anos foi avaliado por Borba et al. (2012) em 1,47 GtCO₂e, sendo que próximo de 40% estaria associado a ações de efficientização energética, com custos de mitigação variando entre -402 a -96 US\$.tCO₂⁻¹, quando da consideração de taxas de desconto 8% ao ano. Mas cabe mencionar que os custos de mitigação ainda seriam negativos para quase todas as alternativas estudadas, mesmo para taxa de desconto de 15% ao ano. Parte das alternativas de mitigação estudadas não são

específicas de determinados segmentos industriais, mas 38% do potencial identificado está associado à eliminação do uso de biomassa que é explorada e produzida de forma não sustentável (e.g. a produção de carvão vegetal a partir de desmatamento).

Já no caso do segmento petrolífero, as emissões evitadas no chamado *upstream* foram estimadas pelos autores em 124 MtCO_{2e} entre 2010 e 2030, sendo 85% devido à redução das emissões em *flare*; nesse caso, os custos de mitigação estimados seriam ligeiramente negativos. No refino de petróleo, o potencial de mitigação foi quantificado em 68,5 MtCO_{2e} no período, sendo que cerca de 70% do total teria custos de mitigação positivos, variando entre 34 e 92 US\$.tCO₂⁻¹. Finalmente, os autores quantificaram um potencial acumulado de redução de emissões de 12 MtCO_{2e} na petroquímica básica, mas com 80% do total com custos de mitigação muito altos (acima de 800 US\$.tCO₂⁻¹ mesmo para taxas de desconto de 8% ao ano).

Goes et al. (2020) analisaram o potencial e os custos de mitigação de emissões de GEE em transportes, no Brasil, no período 2021-2030, e concluíram que as contribuições mais significativas viriam do maior uso de etanol combustível e biodiesel, com abatimentos de 93 e 85,9 MtCO_{2e} (no cenário mais agressivo), respectivamente, e custos de mitigação de -15,4 e 0,9 US\$.tCO_{2e}⁻¹, também respectivamente. O consumo de etanol hidratado em 2030 seria 47 bilhões de litros (compatível com a estimativa apresentada no PDE 2030 – 46 bilhões de litros) e o biodiesel seria usado em misturas B20. Entretanto, ponderando emissões evitadas e os custos de mitigação, a melhor alternativa seria a melhoria do transporte público em cidades (inclusive capturando parte da demanda de veículos leves) e a expansão da frota de ônibus híbridos e elétricos, que poderia contribuir com redução de 71,6 MtCO_{2e} nas emissões, no acumulado de dez anos, a um custo estimado de -419,6 US\$.tCO_{2e}⁻¹. A adoção de veículos leves elétricos contribuiria muito menos na redução das emissões (17,9 MtCO_{2e} em dez anos), sendo de 63 US\$.tCO_{2e}⁻¹ o custo estimado pelos autores.

É importante destacar que há vários estudos que indicam que as emissões evitadas de GEE devido ao uso de veículos leves elétricos, consideradas as condições brasileiras, não são maiores do que as que se obtém com uso de etanol, em veículos *flex*. De forma geral, os resultados variam entre pequena vantagem para os veículos elétricos ou pequena vantagem para o etanol, dependendo das hipóteses (1) quanto ao fator de emissão da eletricidade (e.g. o da base do sistema ou da margem operacional), aspecto que na prática está associado ao momento em que há recarga das baterias, e também ao tamanho da frota, (2) das autonomias dos veículos elétricos que, nas condições de uso, principalmente em climas quentes, tendem a ser menores em relação ao declarado pelos fabricantes, (3) da consideração de perdas

do sistema elétrico e de perdas na recarga das baterias, (4) dos efeitos da mudança do uso da terra nas emissões do etanol combustível, considerado seu ciclo de vida, etc. Na comparação com veículos híbridos, usando etanol, é de se esperar que as emissões evitadas de GEE dos veículos elétricos não sejam menores¹.

As publicações de Verlandia-Vargas et al. (2019; 2020) são aqui mencionadas como exemplos de estudos sobre o uso de veículos leves e ônibus elétricos no Brasil, tendo 2030 como horizonte. Aspectos importantes a serem destacados, como pontos de reflexão são: (1) a potencial contribuição dos veículos para a melhoria da qualidade do ar em grandes centros urbanos deve ser até mais importante do que para redução das emissões de GEE, no caso brasileiro, (2) criar a infraestrutura pública de recarga das baterias é aspecto que não pode ser subestimado, em países como o Brasil, (3) a produção de veículos convencionais tem enorme impacto socioeconômico no Brasil, e é preciso avaliar o que acontecerá se os veículos elétricos se tornarem dominantes (i.e. onde serão produzidos e o que acontecerá com a indústria no Brasil), e (4) a indústria de veículos que está no Brasil não é nacional, e tomará decisões priorizando seus próprios interesses.

5.4 Perspectivas de redução das emissões no setor energético

Carvalho et al. (2020) analisam as perspectivas de que os compromissos da NDC brasileira, relativos ao setor energético, sejam cumpridos, e concluem positivamente quanto aos pontos especificamente mencionados (ver seção 5.1). Como boa parte das metas foram apresentadas em associação a percentuais, os impactos da crise econômica nos últimos anos, bem como os da pandemia, não são barreiras significativas, embora quando se analisa valores absolutos seja evidente a dificuldade de que os resultados sejam alcançados (por exemplo, quanto à produção estimada de etanol combustível).

No horizonte até 2030 a avaliação de Carvalho et al. (2020) é otimista quanto à evolução, no Brasil, da geração elétrica com energia eólica e solar, bem como quanto ao crescimento da bioenergia². Quanto à eficiência energética, a conclusão dos autores é também otimista, mas principalmente pelo fato das metas não serem muito ambiciosas, embora haja o reconhecimento de que há significativas barreiras a serem superadas. A respeito, recomenda-se a leitura do texto de Santos et al. (2021) neste número especial.

1 No momento ainda há poucos veículos híbridos (sem recarga da bateria), com motores *flex*, aptos para o uso de etanol, e as autonomias ainda não são compatíveis com a dos veículos convencionais.

2 Recomenda-se a consulta a textos específicos publicados neste número especial: Gannoum, 2021, sobre energia eólica; Pereira e Ruther (2021), sobre solar fotovoltaica, e Nogueira et al. (2021), sobre bioenergia.

Também cabe mencionar que é destacado o desafio que continuará a existir pós-2030, se o Brasil quiser continuar contribuindo para que as emissões de GEE continuem a ser reduzidas, dentro do objetivo geral do Acordo de Paris, ou seja, de que haja alta probabilidade de que a temperatura da Terra não cresça significativamente neste século, e que os resultados sejam bem abaixo de 2°C.

5.5 Impactos de baixa hidrologia no setor elétrico

A potencial vulnerabilidade do sistema energético brasileiro às mudanças climáticas e, em particular, do sistema elétrico, foi analisada por Lucena et al. (2009), que concluíram que, dependendo do cenários climáticos, há riscos para a geração hidrelétrica, eventualmente para a geração eólica, e para a produção de biodiesel (principalmente no Nordeste). A mesma questão, e especificamente no que diz respeito à geração hidrelétrica, foi tratada mais recentemente em estudo do Banco Mundial (GOUVELLO; ABICALIL, 2017). No início de 2021, por conta da crise hídrica que decorreu de um verão bem mais seco do que o normal, muito foi comentado sobre o tema.

O estudo do Banco Mundial seguiu uma abordagem “*bottom-up*”, utilizando séries históricas de vazões afluentes aos reservatórios de 195 usinas hidrelétricas e, a partir de então, houve a definição de cenários de hidrologia para o período 2015-2030, que resultaram 200 séries sintéticas de afluência. Critérios estatísticos foram empregados para a definição de um subconjunto de hidrologia seca, o que permitiu a análise de consequências do ponto de vista energético e das emissões de GEE.

Os resultados obtidos levaram às conclusões que são resumizadas a seguir. Primeiro, por conta do necessário acionamento de termelétricas, as emissões anuais em um ano seco podem ser até quatro vezes maiores do que as emissões anuais em um ano úmido. Analisando o que é apresentado na Figura 7, esse resultado já foi observado entre 2011 e 2014. Segundo, em um cenário de baixa hidrologia as emissões acumuladas do SIN seriam duas vezes maiores do que no cenário referência. Particularmente em 2025, as emissões da geração de eletricidade no SIN poderiam chegar a 41,2 MtCO₂, ou seja, mais do que o dobro do que é apresentado na Tabela 7 para o mesmo ano, e que corresponde à estimativa da EPE para o cenário básico (em que a hidraulicidade seria normal). Os impactos econômicos são também mencionados no estudo, em função da elevação do custo marginal de geração.

O estudo do Banco Mundial conclui que os riscos potenciais podem ser minimizados pela adoção de medidas de eficiência energética, e pela maior diversificação da matriz elétrica.

5.6 Precificação de carbono e mecanismos de mercado para fomentar a redução das emissões

No setor energético, no Brasil, a primeira experiência concreta de adoção de mecanismos de mercado para fomentar ações de redução às emissões de GEE é o RenovaBio, instituído em 2017, e que corresponde ao que tem sido identificado como a Política Nacional de Biocombustíveis. Neste artigo este tema não será tratado, pois foi adequadamente abordado por Nogueira et al. (2021) neste mesmo número especial.

Ainda que brevemente, aqui são mencionados os resultados do estudo Preparação de Instrumentos de Mercado no Brasil (*Partnership for Market Readiness – PMR*), que foi finalizado em 2020. No projeto foram analisados os impactos da taxação de carbono e da comercialização de certificados de emissões evitadas, por exemplo, em associação a sistemas *Cap and Trade*. Há dois documentos do projeto com sínteses de recomendações, um para o setor elétrico (MARGULIS; LUCENA, 2020) e outro para o mercado de combustíveis (MARGULIS; SCHAEFFER, 2020). Uma questão essencial é que baixos preços de energéticos incentivam o consumo, e baixos preços de combustíveis fósseis fazem com que as alternativas de mitigação sejam menos viáveis.

No caso do setor elétrico, a síntese das recomendações é que (1) as vantagens concedidas à geração a carvão e a gás natural deveriam ser revistas; (2) a lógica de expansão do setor também precisa ser revista, trazendo à avaliação dos empreendimentos concorrentes as externalidades associadas às emissões de GEE; (3) a lógica do despacho igualmente precisaria ser revista, incluindo à ordem de mérito as externalidades associadas às emissões; (4) contratos de consumo interruptível seriam necessários, principalmente para grandes consumidores, o que reduziria a pressão para acionamento de térmicas e aumentaria o apelo da geração com renováveis intermitentes.

Já no caso dos combustíveis, o foco da análise esteve principalmente nos energéticos utilizados em transportes. As recomendações foram divididas em precificação de combustíveis e em políticas de apoio aos biocombustíveis. Quanto à precificação, comenta-se que para que os instrumentos de precificação de carbono funcionem adequadamente é preciso que o mercado seja competitivo, e que a formação de preços responda à concorrência e seja compatível com o equilíbrio oferta-demanda. É mencionado que o alinhamento dos preços dos combustíveis aos preços internacionais é um passo nessa direção, desde que os preços internacionais reflitam externalidades. Ainda em relação aos preços, outro recomendação é que exista simplificação da tributação, para que o consumidor saiba o que está pagando e o sinal

de preços seja compreendido.

Em relação aos biocombustíveis, por considerar que os mandatos distorcem os mercados (instrumento largamente utilizado em todo o mundo, cabe mencionar), recomenda-se ou sua extinção ou sua flexibilização, mas faz-se ressalva de que tal medida não seria facilmente aplicável, inclusive porque, no Brasil, os mandatos de formação de mistura etanol anidro-gasolina são muito tradicionais. Então, no caso em que os mandatos tivessem que ser mantidos, a recomendação é que o comércio de certificados e o repasse de seus custos aos preços deveria ser o caminho a ser seguido.

No âmbito do mesmo projeto, Gurgel e Paltsev (2020) avaliaram os impactos econômicos da adoção da taxaço de carbono (no caso, avaliaram a taxaço setorial) ou do uso de mecanismos de mercado, através da comercializaço de certificados. Para isso, usaram um modelo de equilíbrio geral e consideraram como caso o cumprimento dos compromissos associados a NDC brasileira. Na avaliaço, os autores consideraram que as emissões em 2005 foram pouco superiores a 2 GtCO₂e, o que depois foi corrigido pelo Brasil para um valor superior, conforme anteriormente mencionado. Uma das conclusões é que mesmo que o país cumpra sem dificuldades as metas em 2030, a continuidade de reduço de suas emissões – que está na essência do Acordo de Paris – irá requerer um plano de mitigaço mais abrangente e, possivelmente, com a precificaço do carbono.

Os autores concluíram que os custos de cumprimento das metas da NDC brasileira, em 2030, seriam relativamente modestos, equivalentes a 0,7% do PIB nacional em relação ao cenário de referência, em que não haveria esforços de mitigaço. É de se supor que como na realidade as metas percentuais poderão ser mais facilmente atingidas, por serem as emissões da data de referência significativamente maiores, os custos serão ainda menores.

Mas o mais importante é análise do que ocorreria após 2030, caso o país tivesse o objetivo de continuar reduzindo suas emissões. Como as oportunidades de baixo custo de reduço das emissões seriam mais escassas (e.g. controle do desmatamento e reflorestamento/regeneraço das áreas desmatadas), os custos aumentariam significativamente, e poderiam implicar perda de até 19% do PIB, em 2050. Essas perdas poderiam ser significativamente reduzidas caso houvesse taxaço setorial do carbono (para 6,6% do PIB em 2050), e ainda menores (3,3% do PIB, ainda em 2050) caso houvesse mecanismos como *cap and trade*.

Os impactos de uma taxaço setorial do carbono seriam assimétricos, pois as oportunidades de mitigaço são distintas entre os vários setores da economia, e superariam 200 US\$.tCO₂⁻¹, em 2050, para muitos setores socioeconômicos. Já os custos das emissões evi-

tadas no caso da adoção de mecanismos *cap and trade* foram estimados em 3 US\$.tCO₂⁻¹ em 2030, e em pouco mais de 100 US\$.tCO₂⁻¹ em 2050. Os resultados indicam, primeiro, que os impactos econômicos da adoção de mecanismos de mercado serão menores do que a simples taxação. Segundo ponto relevante, como destacam Gurgel e Paltsev (2020), para o Brasil os custos de mitigação em curto a médio prazo são muito baixos, o que pode ser entendido como um indicador de que o país fez até agora muito pouco para reduzir suas emissões.

6. CONCLUSÕES

O Brasil é um dos grandes emissores mundiais de gases de efeito estufa, embora suas emissões per capita e por unidade de PIB sejam mais baixas do que as de muitos países que estão em estágio de desenvolvimento econômico equivalente ou superior. O perfil das emissões brasileiras é atípico em relação ao de vários países com os quais a comparação faz sentido, sendo proporcionalmente bem menos relevante as emissões associadas à energia (da ordem de 20%). Entretanto, cabe destacar que as emissões em energia não cresceram nos últimos anos (pós 2014) apenas por causa da contínua e profunda crise econômica, e que é esperado que voltem a crescer a partir de 2021-2022.

Em que pese o discurso – não só governamental – que ressalta o protagonismo e a ambição do país em reduzir suas emissões, os compromissos assumidos até o momento foram relativamente modestos, e os resultados ainda mais. Primeiro, porque nunca foram além do que seria a tendência. Segundo, porque o que foi feito teve baixo custo social e econômico. Terceiro, porque muito do que foi até aqui proposto não implica redução perene das emissões, como é evidenciado pelo recente descontrole do desmatamento. Mas, por outro lado, cabe a ressalva de que, por ser país de economia emergente, e historicamente não ser responsável por emissões significativas, até recentemente não havia a exigência de maiores compromissos (essencialmente, até o Acordo de Paris).

Especificamente no caso das emissões em energia, os resultados que são indicados na NDC brasileira, a serem verificados até 2030, são também em grande parte alcançáveis por representarem tendência, como é o caso do crescimento da geração eólica e solar fotovoltaica. Já no caso da expansão da produção e do consumo de etanol combustível, além do esperado aumento da eficiência energética no setor elétrico, o cumprimento do que foi indicado é bem mais difícil, pois as ações são até agora tímidas.

A relevância das fontes renováveis na matriz energética brasi-

leira assegura que as emissões em energia podem continuar proporcionalmente baixas por um período significativo, mas também podem induzir comodismo e a ilusão de que os riscos são baixos. Aspectos a serem analisados com atenção são (1) o fato de que o próprio potencial existente pode ser afetado pelas mudanças climáticas, em função das possíveis mudanças nos regimes de chuvas e ventos, (2) o fato de que a intermitência de algumas fontes requererá outra visão nos planejamentos da expansão e da operação da geração elétrica, para que a geração com fósseis seja efetivamente reduzida, e (3) as oportunidades de expansão com baixos custos passarão a ser reduzidas ao longo do tempo.

Ainda que seja até provável que as metas da NDC sejam cumpridas até 2030, essa será apenas uma etapa de um longo processo. É de se imaginar que na medida em que outros países, e principalmente aqueles que no contexto econômico são e serão os reais concorrentes do Brasil, avancem com efetivas reduções de suas emissões de gases de efeito estufa, e se aproximem das emissões líquidas nulas, maiores serão as cobranças. É difícil imaginar que haverá tolerância em questões climáticas com um concorrente econômico, em um contexto em que permissividade pode acarretar desvantagem.

O fato do Brasil não estar reduzindo suas emissões (apesar da longa crise econômica, as emissões totais aumentaram, na média, 2,5% ao ano no período 2010-2019), e não aproveitar as oportunidades de menor custo (mais uma vez, o controle do desmatamento deve ser destacado), fará com que no futuro os custos de mitigação sejam mais altos. Em um artigo publicado anos atrás, quando o crescimento do desmatamento ainda não era tão acentuado, Rochedo et al. (2008) já apontavam que no futuro os custos de mitigação em energia, no Brasil, podem se tornar muito altos.

Não será pelo provável crescimento das emissões em energia, no Brasil, que o cumprimento das metas gerais até 2030 estará em risco. Entretanto, a questão importante é como reduzir as emissões para que o país esteja no caminho das emissões nulas. O desafio precisa ser enfrentado desde já. Primeiro, óbvio, todas as oportunidades de baixo custo precisam ser exploradas, e aumentar a eficiência energética é crucial. Por outro lado, é preciso começar a viabilizar transformações reais no sistema elétrico e nos setores de transportes e industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Dados estatísticos. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-estatisticos>. Acesso em: 20 mai. 2021.

AZEVEDO, T. R. et al. SEEG initiative estimates of Brazilian greenhouse gas emissions from 1970 to 2015. *Scientific Data*, 1-43, 2018.

BORBA, B. S. M. C. et al. Energy-related climate change mitigation in Brazil: Potential, abatement costs and associated policies. *Energy Policy*, n. 49, 430–441, 2012.

BP. Statistical Review of World Energy. Disponível em <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. Acesso em 10 maio 2021.

BRASIL. Intended Nationally Determined Contribution Towards Achieving the Objective of The United Nations Framework Convention on Climate Change. 2020.

BRASIL. Comunicação Nacional. Disponível em https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/Comunicacao_Nacional/Comunicacao_Nacional.html. Acesso em 18 abril 2021.

CLIMATE ACTION TRACKER. Brazil. Disponível em <https://climateactiontracker.org/countries/brazil/>. Acesso em 22 abril 2021.

CLIMATE WATCH. Greenhouse Gas (GHG) Emissions. Disponível em https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?end_year=2018&start_year=1990. Acesso em 22 abril 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. O Compromisso do Brasil no Combate às Mudanças Climáticas: Produção e Uso de Energia. Brasília: MME/EPE. 2016.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2030. Brasília: MME/EPE. 2021.

FERREIRA, T. V. B.; MACHADO, G. V. O papel do planejamento na transição energética: Mais luz e menos calor. *Revista Brasileira de Energia*, n.27(2), 2021.

GANNOUM, E. Energia eólica no Brasil: Os motivos do sucesso e o futuro dos nossos bons ventos. *Revista Brasileira de Energia*, n.27(2), 2021.

GURGEL, A.; PALTSEV, L. The Impacts of the Brazilian NDC and their contribution to the Paris Agreement on Climate Change. Disponível em <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/8609.pdf>. Acesso em 02 Junho 2021.

GOUVELLO, C. Estudo de Baixo Carbono para o Brasil. Washington: Banco Mundial. 2010.

GOUVELLO, C; ABICALIL, T. Cenário 2016-2030 de Baixa Hidrologia para o Setor Elétrico Brasileiro – Impacto do Clima nas Emissões de Gases de Efeito Estufa. Washington: Banco Mundial. 2017.

IEA - International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2020. Paris: IEA. 2020a.

IEA - International Energy Agency. Key World Energy Statistics 2020. Paris: IEA. 2020b.

IEA - International Energy Agency. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020>. Acesso em: 23 abr. 2021.

INPE—Instituto de Pesquisas Espaciais. Monitoring Deforestation of Brazilian Amazon Forest through Satellite. Disponível em: www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes. Acesso em: 02 abr. 2021.

IRENA – International Renewable Energy Agency. World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. 2021.

KAYA, Y. Impact of Carbon Dioxide Emission Control on GNP Growth: Interpretation of Proposed Scenarios. IPCC Response Strategies Working Group Memorandum 1989. Paris: IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group. 1990.

LUCENA, A. et al. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. Energy Policy, n. 37(3), 879-889, 2009.

MARGULIS, S.; LUCENA, A. (Coordenadores) Elaboração de Estudos Setoriais (Energia Elétrica, Combustíveis, Indústria e Agropecuária) e Proposição de Opções de Desenho de Instrumentos de Precificação de Carbono. Disponível em: <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/pmr/componente-1/produto-3-2013-recomendacoes-setoriais-eletricidade.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2021.

MARGULIS, S.; SCHAEFFER, R. (Coordenadores) Elaboração de Estudos Setoriais (Energia Elétrica, Combustíveis, Indústria e Agropecuária) e Proposição de Opções de Desenho de Instrumentos de Precificação de Carbono. Disponível em: <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/pmr/componente-1/produto-3-2013-recomendacoes-setoriais-combustiveis.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2021.

NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S; LORA, E. S. Bioenergia no Brasil: onde estamos e quais nossos horizontes. Revista Brasileira de Energia, n.27(2), 2021.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. NDC and the carbon trick maneuver: how Brazil reduced the ambition of its goals under the Paris Agreement. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2020/12/NDC-analysis-EN.pdf>. Acesso em: 02 mai. 2021.

ONS – Operador Nacional do Sistema. Histórico da operação – energia. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/energia_armazenada.aspx. Acesso em: 29 abr. 2021 (a).

ONS – Operador Nacional do Sistema (b). Histórico da operação – capacidade instalada. Disponível em: http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/capacidade_instalada.aspx. Acesso em: 29 abr. 2021 (b).

OWID – Our World in Data. Greenhouse Gas Emissions. Disponível em: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>. Acesso em: 23 abr. 2021.

PERCEBOIS, J. Energy challenges in the post health crisis period. Revista Brasileira de Energia, n.27(2), 2021.

PEREIRA, O. S.; RUTHER, R. Energia solar fotovoltaica. Revista Brasileira de Energia, n.27(2), 2021.

ROCHEDO, P. R. R. et al. The threat of political bargaining to climate mitigation in Brazil. Nature Climate Change, n. 8, 695-698, 2018.

SANTOS, A. H. M.; HADDAD, J.; BAJAY, S. V. Eficiência energética e sua inserção no planejamento energético brasileiro. Revista Brasileira de Energia, n.27(2), 2021.

SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Base de Dados. Disponível em: <http://seeg.eco.br/>. Acesso em: 02 mai. 2021.

UNEP – United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2020. Nairobi: UNEP. 2020.

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change. GHG Data from UNFCCC. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/ghg-data-unfccc/ghg-data-from-unfccc>. Acesso em: 22 abr. 2021.

VERLANDIA-VARGAS et al. Life cycle assessment of electric vehicles and buses in Brazil: effects of local manufacturing, mass reduction, and energy consumption Evolution. The International Journal of Life Cycle Assessment, 24, 1878-1897, 2019.

VERLANDIA-VARGAS et al. The New Neighbor across the Street: An Outlook for Battery Electric Vehicles Adoption in Brazil. World Electric Vehicle Journal, 11, 60, 2020.

WRI - World Resources Institute. Available. Climate Analysis Indicators Tool: WRI's Climate Data Explorer. Disponível em: <http://cait2.wri.org>. Acesso em 23 abril 2021.

WWF. New Brazilian NDC reduces the country's climate ambition, against the spirit of the Paris Agreement. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?77508/New-Brazilian-NDC-reduces-the-country-s-climate-ambition-against-the-spirit-of-the-Paris-Agreement>. Acesso em: 12 dez. 2020.