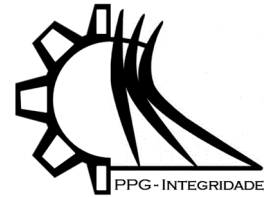


ISSN 2447-6102



Article

Projeção de emissões de gee do setor energético no contexto da contribuição nacionalmente determinada

Rabelo, N.A.T.¹, Angarita, J.A.C.^{2,*} and Shayani, R.A.²

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia, Universidade de Brasília; nathalia.akemi@aluno.unb.br

² Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia, Universidade de Brasília; jcormane@unb.br

³ Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília; shayani@unb.br

* Correspondence: jcormane@unb.br

Received: 30/05/2025; Accepted: 03/06/2025; Published: 10/06/2025

Resumo: Com o objetivo de conter o avanço do efeito estufa, compromissos internacionais foram assinados pelo Brasil. O Acordo de Paris realizado em 2015 estipulou que os países signatários definissem metas para a redução das Emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE), as chamadas Contribuições Nacionalmente Determinadas. A partir de análises, foi possível evidenciar os avanços de cada subsetor energético em relação às metas brasileiras de redução de emissões de GEE durante os últimos anos, como por exemplo, os avanços no setor de transportes. A partir dos dados disponíveis, verificou-se o potencial de aplicação de métodos estatísticos para análise de dados que permite a identificação de tendências e correlações entre os diferentes subsetores do setor de energia, como por exemplo, a estimação do comportamento das emissões de GEE produzidas pelo setor de energia até 2025, data que representa o fim do primeiro período de implementação das metas de mitigação propostas na NDC Brasileira. Tudo isto visa fornecer subsídios para o acompanhamento, refinamento e estabelecimento de novas metas de desenvolvimento energético sustentável e a proposição de políticas públicas baseadas em dados que contribuam para a aceleração do processo de transição energética no Brasil. Os resultados da projeção das emissões de gases de efeito estufa do setor energético brasileiro indicam que as metas não serão alcançadas na atual tendência.

Palavras-chave: setor elétrico brasileiro, emissão de gases de efeito estufa, Acordo de Paris, transição energética, política climática

Abstract: In response to the need to mitigate the greenhouse effect, Brazil has committed to international agreements aimed at reducing emissions. The Paris Agreement, signed in 2015, required signatory countries to establish targets for the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions through their Nationally Determined Contributions (NDCs). This study analyzes the progress of various energy subsectors in meeting Brazil's emission reduction targets over recent years, with particular emphasis on the transportation sector. The analysis of available data highlights the applicability of statistical methods for trend detection and correlation analysis across energy subsectors. Such methods enable the estimation of GHG emission trajectories in the Brazilian energy sector through 2025, the final year of the first NDC implementation cycle. The results aim to inform the monitoring and refinement of existing targets, support the formulation of new goals for sustainable energy development, and guide the design of evidence-based public policies to accelerate the energy transition in Brazil. Projections indicate that, under current trends, the established emission reduction targets for the energy sector are unlikely to be achieved.

Keywords: Brazilian energy sector, greenhouse gas emissions, Paris Agreement, energy transition, climate policy



1. Introdução

Os acordos internacionais sobre mudança do clima foram instaurados com a implementação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, sigla em inglês), em 1992. A partir desse momento os países participantes se reúnem anualmente para decidirem questões globais acerca das mudanças climáticas, por meio de reuniões da Conferência das Partes (COP, sigla em inglês). O primeiro acordo internacional surgiu em uma COP, em 1997, o Protocolo de Quioto. Esse acordo também foi o primeiro tratado climático ratificado pelo Brasil, em 2002. O Protocolo de Quioto entrou em vigor em 2005 e visava reduzir os níveis de emissão de GEE em 5% até 2012 e 18% até 2020, em relação aos níveis de 1990. No fim do período de implementação do Acordo de Quioto, durante a 21ª COP, foi adotado um novo acordo climático, o Acordo de Paris. Esse, diferentemente do anterior, conta com metas mais rigorosas e a participação de mais países em desenvolvimento. A principal meta do acordo é garantir que a temperatura média global não ultrapasse 2 °C em relação aos níveis pré-industriais e limitar o aumento a 1,5 °C.

A fim de atingir essas metas, foi criada a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, sigla em inglês), a qual os países apresentam planos de ação nacionais para reduzirem as suas emissões de GEE. A NDC brasileira visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% até 2025, e indica redução de 50% até 2030, em relação aos níveis de emissões estimados para 2005. Essas metas são acompanhadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Os relatórios de avaliação do IPCC são produzidos por três grupos de trabalho e tratam de questões específicas acordadas entre os países membros, incluindo o Brasil. Também são publicados os Relatórios de Metodologia que fornecem diretrizes práticas para a preparação de inventários de gases de efeito estufa.

É por meio dessas diretrizes que o Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de GEE é produzido e publicado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). O Inventário é um método de comunicação do Brasil com a UNFCCC e informa a comunidade internacional dos avanços do país com os compromissos climáticos. O inventário conta com as emissões e remoções de GEE relativas a cinco setores do país: Energia; Processos Industriais e Uso de Produtos (IPPU, sigla em inglês); Agropecuária; Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF, sigla em inglês); e Resíduos.

Dentre esses cinco setores, observou-se que a variação no setor de energia foi mais relevante que os demais. Em 2019 o setor representava 21% das emissões totais e em 2020 caiu para 18%. Além da diminuição da participação, o setor de energia teve uma variação negativa de 4,5% na emissão de GEE entre 2019 e 2020, sendo o único setor a diminuir suas emissões nesse período (MCTI, 2022). Diante do exposto esse trabalho utiliza como material o Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de GEE (MCTI, 2022) para projetar a emissão de GEE ao final do prazo da NDC, em 2025. O estudo visa responder a seguinte questão: O Brasil é capaz de cumprir a NDC? Qual o impacto do setor de energia nas emissões de GEE?

O objetivo geral do presente estudo é avaliar estatisticamente os impactos do setor de energia na emissão GEE até 2025, data que representa o fim do primeiro período de implementação das metas de mitigação propostas na NDC Brasileira. Como objetivos específicos, tem-se: avaliar comparativamente as contribuições do setor de energia para a emissão de GE e verificar quantitativamente o cumprimento das metas da NDC.

2. Materiais e Métodos

Para cumprir as atividades propostas, os processos foram divididos em cenários, sendo os cenários 1 e 2, os cenários bases, e os 3 e 4 complementares.

Cenários 1 e 2

Para esses cenários, considerados cenários base, o processo de análise seguiu a seguinte ordem: primeiramente, foram coletados os dados de emissões de gases do efeito estufa na sexta edição da publicação "Estimativas de Emissão de Gases do Efeito Estufa no Brasil". Em seguida, os dados de consumo de combustível por setor foram coletados a partir do Balanço Energético Nacional (BEN). Após a coleta dos dados, eles foram agrupados para facilitar o processo de análise. Utilizando a biblioteca pandas do Python, os dados foram importados e tratados. Com o pandas, foi possível realizar diversas operações, como a criação da matriz de correlação de Pearson. Essa matriz permitiu avaliar a relação entre as variáveis. Além disso, também foi aplicado um modelo de regressão linear múltipla utilizando o pandas. Esse modelo permitiu obter os coeficientes da equação de regressão, que relaciona as emissões com os consumos de combustível por setor, as emissões sendo consideradas a variável dependente e os consumos as variáveis independentes. Em seguida, foram inseridos os dados de consumo estimados até 2030, obtidos do Plano Decenal de Energia (PDE). Utilizando a equação de regressão previamente obtida, foi possível fazer a projeção das emissões para

esse período. Esse processo foi repetido para cada um dos subsetores individualmente, bem como para o setor de energia como um todo.

A cerca da distinção entre os cenários, tem-se que primeiro cenário abrange toda a série histórica disponível, compreendendo o período de 1990 a 2020. O segundo cenário considera-se um intervalo de tempo mais restrito, abrangendo o período de 2014 a 2020. Essa divisão foi motivada pela observação de uma mudança no comportamento de diversos subsetores a partir de 2013 que atingiu seu pico em 2014. No ano de 2014, evidenciou-se um pico nas emissões no setor de energia, particularmente nos subsetores de indústrias de energia, transporte e indústrias de transformação. Esse aumento nas emissões pode ser atribuído, em grande parte, às adversidades climáticas, mais especificamente às secas enfrentadas durante esse período. As secas afetaram significativamente a geração de energia, resultando em uma maior demanda por fontes de energia alternativas, como as termelétricas movidas a combustíveis fósseis. Essa mudança na matriz energética contribuiu para um aumento nas emissões de gases de efeito estufa. Outro ponto visto desse período de aumento (2013 -2014) pode ser em decorrência da copa de 2014. O evento foi realizado no Brasil e contou com muito investimento em infraestrutura, construção civil, comércio varejista em geral e principalmente em turismo. Considerando os dois cenários estabelecidos, notou-se um comportamento diferenciado. O cenário que englobou toda a série histórica apresentou uma tendência ascendente nas emissões ao longo do tempo, cenário 1. Isso se deve ao fato do período apresentar acréscimos até atingir seu maior valor em 2014. Por outro lado, o cenário a partir de 2014 (cenário 2) exibiu uma tendência decrescente nas emissões, que foram observadas de 2014 a 2020 e se estenderam para as projeções considerando este período. O decréscimo após esse período pode ser atribuída à adoção de medidas mitigatórias e à implementação de políticas ambientais mais rigorosas após o pico em 2014.

Essa abordagem de estabelecer múltiplos cenários permitiu uma análise mais abrangente e detalhada das emissões de gases de efeito estufa no setor de energia. Além disso, evidenciou a importância de considerar as mudanças no comportamento dos subsetores ao longo do tempo, fornecendo percepções valiosas para a compreensão das tendências e a elaboração de estratégias eficazes de mitigação.

Cenários 3 e 4

Para esses cenários, deve-se ter em mente que o cenário 3 é uma complementação do cenário 1, assim como o 4 é do 2, pois usam os coeficientes das regressões do cenário 1 e 2 junto aos consumos consolidados do BEN para estimar as emissões de GEE para 2021. Quando este trabalho foi elaborado, não haviam dados consolidados para 2021, por isso esse método. Posteriormente a isso, esses resultados foram submetidos ao python usando a mesma programação dos cenários anteriores para obter a regressão considerando o período de 1990 a 2021 (cenário 3) e de 2014 a 2021 (cenário 4). Os processos subsequentes foram iguais aos cenários bases.

Aplicação dos cenários

Para os subsetores transporte rodoviário (1.A.3.b), indústrias de energia (1.A.1.) e indústrias de transformação (1.A.2.) foram aplicados os quatro cenários, um vez que representam juntos 86,58% das emissões totais do setor de energia. Os outros setores ficaram restritos ao cenário 1, primeiro devido a essa relevância, segundo pela ausência de um comportamento tão afetado nos períodos de pico comentados (2014 e 2020).

Coleta de dados

Conforme descrito em 1.3, metodologias de contabilização são publicadas pelo IPCC, nesse estudo utilizou-se os dados de Emissões publicados na sexta edição da publicação Estimativas de Emissão de Gases do Efeito Estufa no Brasil (MCTI, 2022), a qual possuía dados atualizados até 2020. A publicação usa a métrica do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5) (IPCC, 2014). Os dados foram baixados por meio da plataforma Sirene, do MCTI, que divulgava dados pelo método GWP e GTP, como as informações mais presentes nos inventários mundiais é dada em GWP, essa foi a metodologia escolhida. Os dados relacionados ao consumo de combustíveis foram obtidos a partir do Balanço Energético Nacional (BEN) - Séries Históricas e Matrizes. Esse recurso disponibiliza as Séries Históricas Completas desde o ano de 1970, em formato Excel, no volume impresso do próprio Balanço Energético Nacional. Mais especificamente, os dados utilizados foram extraídos do Capítulo 3 do BEN, intitulado "Consumo de Energia por Setor", abrangendo o período de 1970 a 2021. Embora a disponibilidade dos dados remonte a 1970, optou-se por utilizar apenas os dados a partir de 1990. Essa seleção foi feita para compatibilizar as informações com os dados de emissões de GEE disponíveis nesse período específico. Portanto, ao utilizar apenas os dados de consumo de combustíveis a partir de 1990, foi possível estabelecer uma coerência e consistência entre as informações de emissões e consumo, garantindo uma análise apropriada e comparável ao longo do tempo.

O detalhamento matemático utilizado por ser encontrado em (RABELO, 2023).

3. Results

Embora as metas estabelecidas na NDC não sejam especificamente definidas por setor, mas sim como um total geral, para avaliar o impacto de cada subsetor de forma isolada foi realizado o cálculo dessas metas aplicadas a cada subsetor, a fim de identificar quais setores estão mais alinhados com as metas estabelecidas nas NDC, lembrando que não são metas oficiais da NDC uma estratégia de analisar os comportamentos de cada subsetor separadamente. Essa abordagem também oferece ricas percepções para o desenvolvimento de estratégias e políticas específicas para cada subsetor. Identificar os subsetores que estão mais distantes das metas estabelecidas pode direcionar esforços para a implementação de medidas adicionais de mitigação e incentivar ações específicas que promovam a redução das emissões nesses setores.

3.1 Setor de Indústrias de Energia

Ao analisar o setor de Indústrias de Energia, é possível observar que no cenário 2 e 4 há uma redução significativa no número de fontes de energia em comparação ao cenário 1 e 3. Durante o período de 2014 a 2021, muitos combustíveis foram gradualmente abandonados em favor de outros. É importante ressaltar que na matriz do cenário 2 e 4 não foram observados o uso de nafta, querosene, gás canalizado e coque nesse setor durante esse período específico, o que reflete sua ausência na matriz de correlação. Os cenários 2 e 4 contam com uma perspectiva bem mais otimista, no entanto bem distante da meta relativa (Figura 1).

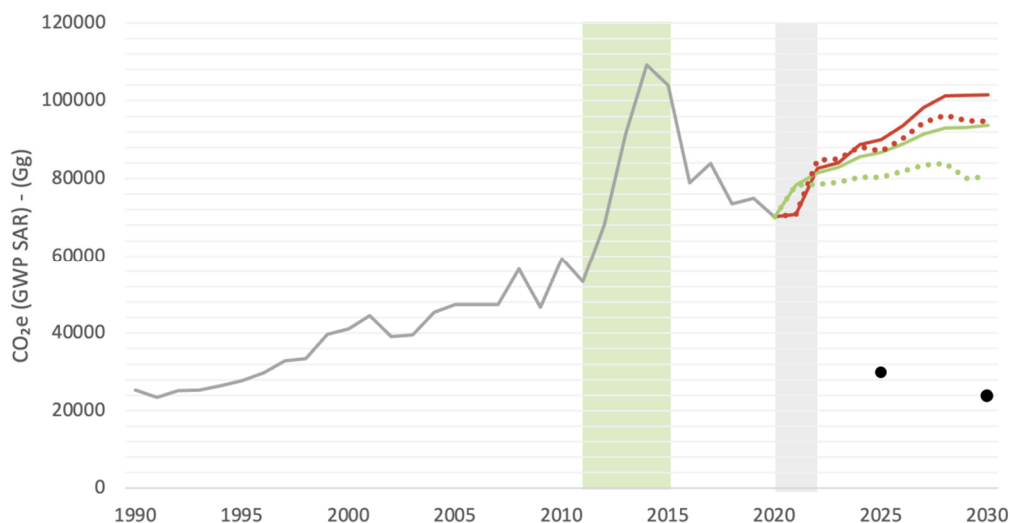


Figura 1. Previsão Setor de Industrias de Energia. Linha cinza (—) : Dados históricos; Linha vermelha (—): Cenário 1; Linha vermelha tracejada (· · ·): Cenário 3; Linha verde (—): Cenário 2; Linha verde tracejada (· · ·): Cenário 4; Faixa verde: Período crescente (copa do mundo); Faixa cinza: Período decrescente (pandemia). Fonte: autoria própria.

3.2 Setor Comercial e Público

No setor comercial e público quanto as correlações é interessante verificar a forte correlação negativa das emissões do setor com a lenha. Isto não significa que a fonte não emite GEE e sim que tem um comportamento quase linearmente contrário ao das emissões do setor, isso se deve ao fato das emissões do setor comercial e público aumentarem no período enquanto a lenha entre em desuso.

O setor comercial, diferente dos demais anteriormente comentados, apresentou valores muito mais próximos da meta referencial. Na Figura 2 também é possível visualizar um declínio no ano de 2020, provavelmente em consequência da pandemia do Covid-19, que causou uma diminuição da demanda. No entanto, o modelo prevê uma recuperação já no ano seguinte.

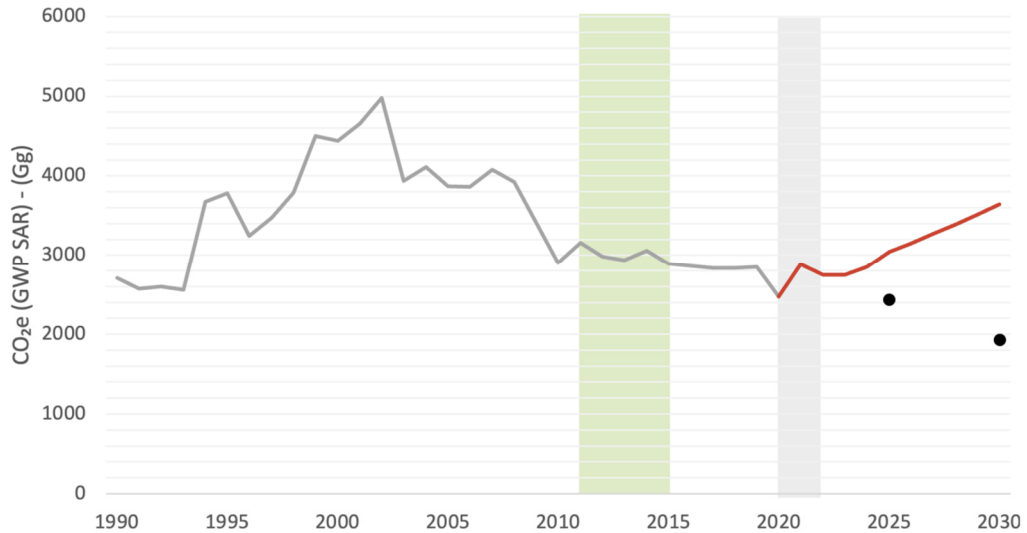


Figura 2. Previsão Setor Comercial e Público. Linha cinza (—) : Dados históricos; Linha vermelha (—): Cenário 1; Faixa verde: Período crescente (copa do mundo); Faixa cinza: Período decrescente (pandemia). Fonte: autoria própria.

3.3 Setor Residencial

No setor residencial quanto as correlações, é interessante verificar a forte correlação das emissões do setor com a eletricidade, visto que grande parte das emissões desse setor é advinda da eletricidade e ambas apresentam um caráter mais estagnado nos últimos anos.

O setor residencial, diferente dos demais, apresenta uma constante queda, iniciada em 2020, provavelmente também em consequência da pandemia do Covid-19, mas diferentemente do setor comercial e público, não tem sinais de recuperação do patamar anterior. Outro ponto interessante no setor residencial é o número crescente de geração solar fotovoltaica distribuída que também pode ter influência nessa diminuição (Figura 3).

3.4 Setor Agropecuário

No setor Agropecuário um dado interessante é a correlação perfeita entre as emissões de GEE no setor e o consumo de óleo diesel. Isto se deve ao uso majoritário do combustível no setor, desde maquinário à eletricidade em regiões isoladas. Outra correlação bastante positiva foi em relação a eletricidade. Outro ponto interessante a ser analisado nesse contexto é a correlação negativa entre o óleo diesel e a lenha, uma vez que a lenha deu lugar ao diesel numa transição energética (não verde) que ocorreu ao longo das últimas décadas.

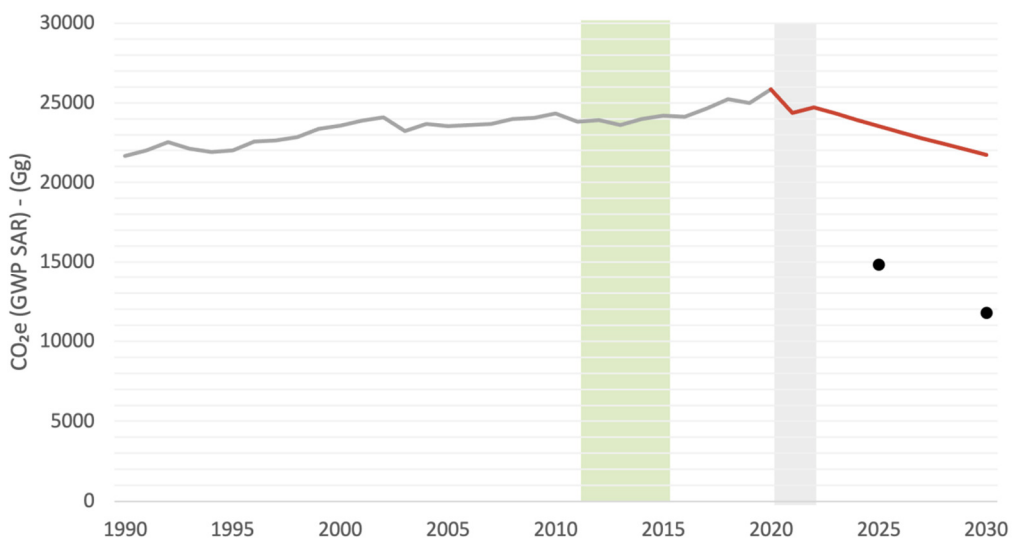


Figura 3. Previsão Setor Residencial. Linha cinza (—) : Dados históricos; Linha vermelha (—): Cenário 1; Faixa verde: Período crescente (copa do mundo); Faixa cinza: Período decrescente (pandemia). Fonte: autoria própria.

O setor agropecuário, diferente dos demais, não apresentou queda em 2020, tendo um comportamento quase linearmente crescente durante o período analisado. Dessa forma o setor se distâcia cada vez mais da meta de referência (Figura 4).

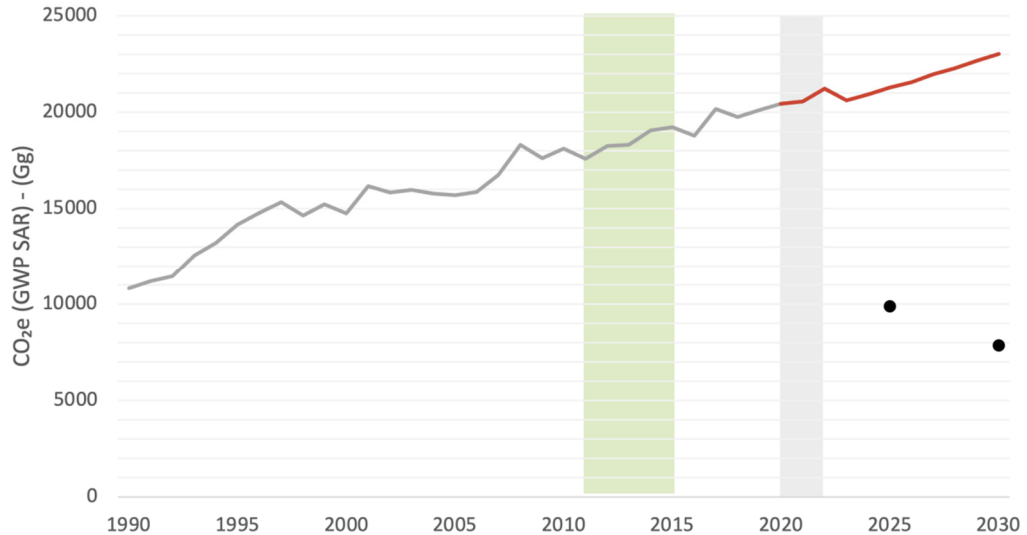


Figura 4. Previsão Setor Agropecuário. Linha cinza (—) : Dados históricos; Linha vermelha (—): Cenário 1; Faixa verde: Período crescente (copa do mundo); Faixa cinza: Período decrescente (pandemia). Fonte: autoria própria.

3.5 Setor de Transporte Rodoviário

Ao analisar o setor de Transporte Rodoviário, nota-se uma discrepância entre a correlação entre o ano e as emissões de GEE (1.A.3) nos dois cenários base, que se estende aos cenários complementares 3 e 4. Os cenários 1 e 3 apresentam uma correlação extremamente positiva, visto que ambos aumentam, já para o segundo uma correlação extremamente negativa, visto que as emissões de GEE para esse setor está decrescendo quase linearmente ao período.

Em relação a previsão, os comportamentos destes cenários também não impactaram muito as estimativas, sendo que ambos apresentam valores bem semelhantes ao final do período. Nota-se que caso adotassem a mesma NDC para esse subsetor os valores previstos são muito acima do esperado, conforme Figura 5.

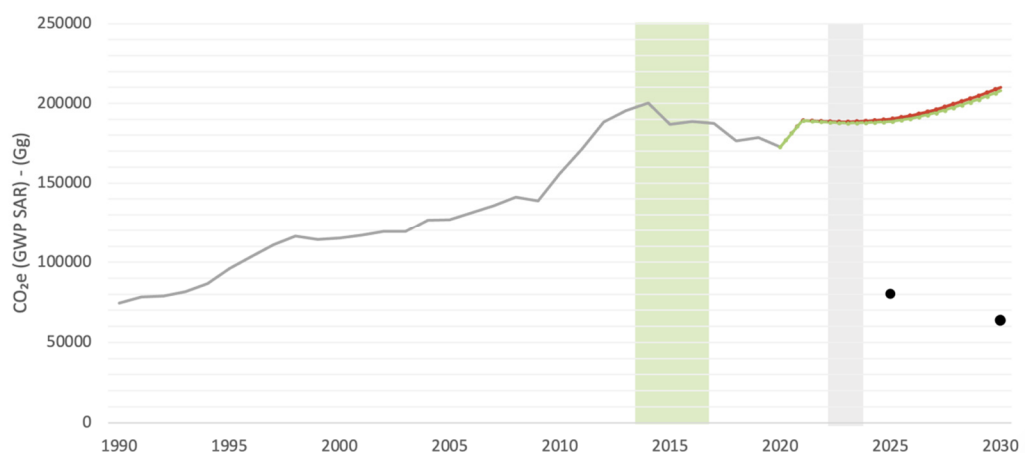


Figura 5. Previsão Setor de Transporte Rodoviário. Linha cinza (—) : Dados históricos; Linha vermelha (—): Cenário 1; Linha vermelha tracejada (· · ·): Cenário 3; Linha verde (—): Cenário 2; Linha verde tracejada (· · ·): Cenário 4; Faixa verde: Período crescente (copa do mundo); Faixa cinza: Período decrescente (pandemia). Fonte: autoria própria.

3.6 Demais Setores de Transporte

As matrizes de correlação para os outros setores de transporte permitem observar que as emissões de GEE no setor de transporte hidroviário estão altamente correlacionadas com o consumo de óleo combustível. Da mesma forma, no setor ferroviário, as emissões de GEE estão fortemente correlacionadas com o consumo de óleo diesel, enquanto no setor aéreo, há uma correlação significativa entre as emissões de GEE e o consumo de querosene de aviação. Essas correlações se devem ao fato de que esses combustíveis são os principais insumos energéticos utilizados em seus respectivos setores.

Quanto as previsões, nos setores hidroviário e aéreo nota-se um crescimento nas GEE e um afastamento quanto as metas. Já no setor ferroviário o comportamento é levemente decrescente, no entanto ainda bem longe das metas (Figura 6).

3.7 Setor de Indústrias de Transformação

Ao analisar o setor de Indústrias de Transformação, nota-se uma discrepância entre a correlação entre o ano e as emissões de GEE nos dois cenários base, que se estende aos cenários complementares 3 e 4. Em relação a previsão, os comportamentos dos cenários comentados anteriormente também não impactaram muito as estimativas, sendo que ambos cenários base apresentam valores bem semelhantes ao final do período e os setores complementares 3 e 4 obtiveram valores muito próximos aos seus respectivos cenários base. Ou seja, o cenário 3 obteve uma linha quase sobreposta a do cenário 1 e o mesmo para o 4 e 2. O cenário 2 e 4, que imaginava ser mais otimista apresentou emissões de GEE maiores em 2025 se afastando da meta (Figura 7).



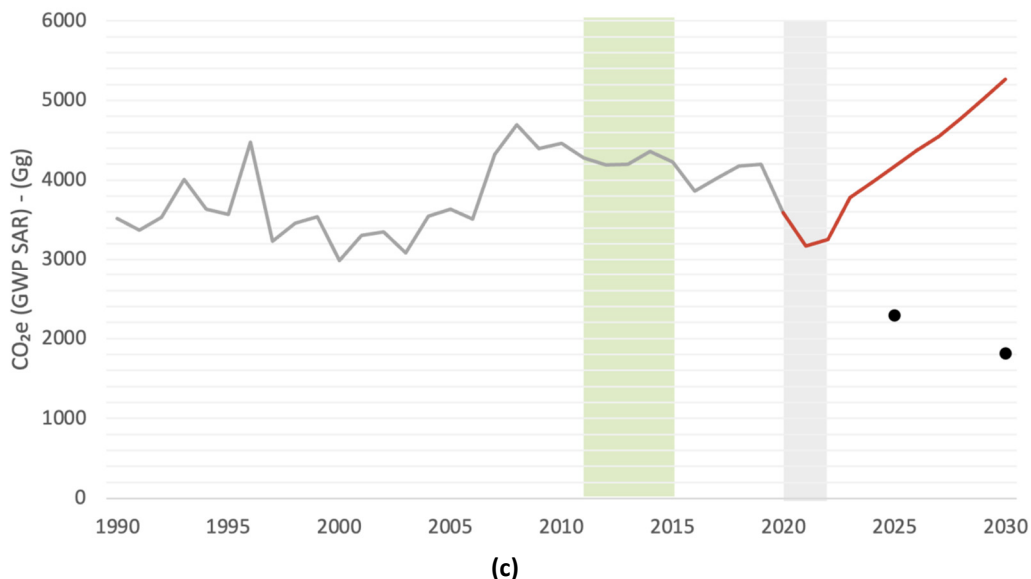


Figura 6. Previsão Setor (a) Transporte hidroviário; (b) Transporte ferroviário; (c) Transporte Aéreo. Linha cinza (—) : Dados históricos; Linha vermelha (—): Cenário 1; Faixa verde: Período crescente (copa do mundo); Faixa cinza: Período decrescente (pandemia). Fonte: autoria própria.

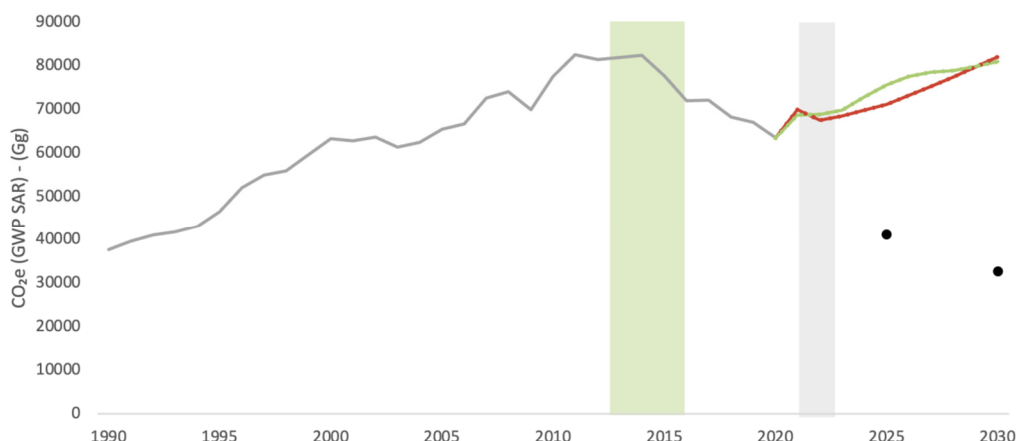


Figura 7. Previsão Setor de Industrias de Transformação. Linha cinza (—) : Dados históricos; Linha vermelha (—): Cenário 1; Linha vermelha tracejada (· · ·): Cenário 3; Linha verde (—): Cenário 2; Linha verde tracejada (· · ·): Cenário 4; Faixa verde: Período crescente (copa do mundo); Faixa cinza: Período decrescente (pandemia). Fonte: autoria própria.

3.8 Total Setor de Energia

Com os resultados, obteve-se o gráfico mostrado na Figura 8, com destaque para o cenário 1. Nota-se que ao adotar as metas da NDC para esse cenário, os resultados se encontram mais de duas vezes maiores que a meta. A participação do setor de transporte é um obstáculo na diminuição dessas emissões, sendo a sua participação bem contribuinte em todo o período da previsão.

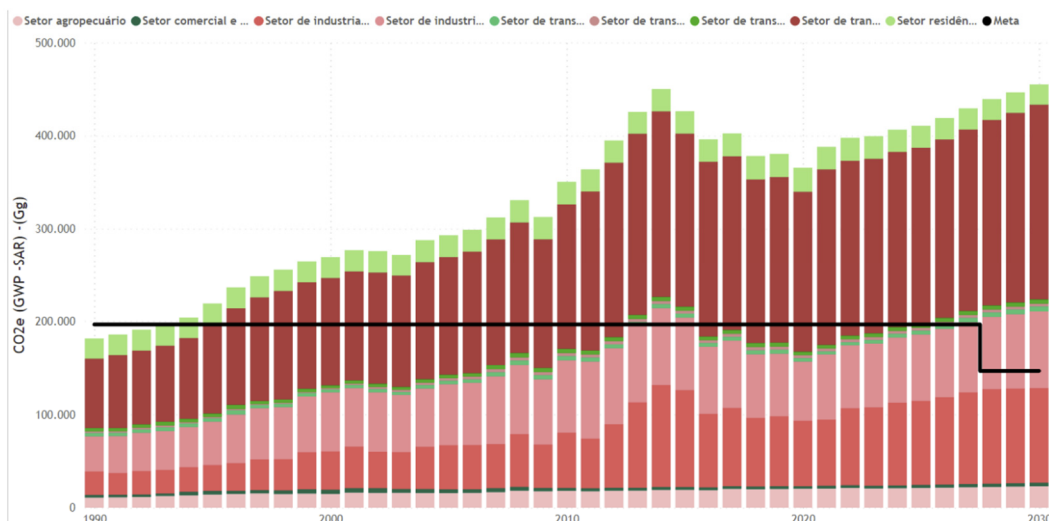


Figura 8. Resultados de previsão para o cenário 1. Fonte: autoria própria.

4. Discussão e considerações finais

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, foi realizada uma análise dos subsetores do setor de energia, bem como o setor de energia como um todo. Mesmo com a criação de quatro cenários não foi observado um comportamento otimista, ou seja, nenhum deles obtiveram previsões próximas das metas propostas para 2025 e 2030. Lembrando que as metas setoriais e sub setoriais não são oficiais da NDC e sim uma tentativa do estudo de estender para um âmbito mais específico com o objetivo de avaliar os sub setores separadamente. Um ponto destacado no estudo foi o setor de transporte como um obstáculo significativo para a redução das emissões de GEE, devido à sua relevante contribuição ao longo do período de previsão. Esse fato está em conformidade com a teoria e com os resultados apresentados também nos relatórios do IPCC. Ademais, em relação ao desempenho dos modelos de regressão calculados neste estudo, foi observado que todos os casos apresentaram coeficientes de determinação próximos de 1, o que indica que os modelos estão bastante ajustados, os erros-padrão também foram baixos na maioria dos casos. Destaca-se, com os resultados, a necessidade de implementar medidas mais robustas e eficazes para a redução das emissões de GEE nos subsetores de transporte, indústrias de transformação e no setor de indústrias de Energia principalmente, uma vez que são os maiores participante do setor de energia como um todo. Apesar do setor de energia no Brasil não ser o principal nas emissões de GEE ainda é fundamental desenvolver e implementar políticas para a diminuição das emissões do setor, indo em conformidade com as metas adotadas na NDC.

Financiamento: Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflitos de interesse: Os autores declaram que não há conflitos de interesses.

Referências

1. IPCC. Quinto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. 2014.
2. MCTI. Sexta Estimativas de Emissão de Gases do Efeito Estufa no Brasil. [S.l.]: Pearson, 2022.
3. EPE. Balanço energético nacional. 2023.
4. Rabelo, Nathália Akemi Tsuchiya. Avaliação da participação do setor de energia brasileiro nas emissões de gases do efeito estufa no contexto Contribuição Nacionalmente Determinada. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2023. Disponível em <https://bdm.unb.br/handle/10>