

GRUPO DE ESTUDO Comercialização, Economia e Regulação do Mercado de Energia Elétrica - GCR

Avaliação de impactos econômicos dos mecanismos de precificação de carbono nas fontes de geração do SIN

**Mariana de Queiroz Andrade; Erik Eduardo Rego; Renato Haddad Simões Machado
Empresa de Pesquisa Energética (EPE); Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP)**

RESUMO

Tem sido contantes as discussões sobre a urgência em reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, devido aos efeitos causados ao meio-ambiente e à sociedade com a elevação das temperaturas médias do planeta. Nesse sentido, instrumentos de mercado podem ser utilizados para que externalidades (como as emissões de GEE) sejam precificadas e os custos relativos a danos causados à sociedade sejam internalizados pelos agentes. Os mecanismos de precificação de carbono são exemplos de instrumentos econômicos que geram incentivos para redução de emissões. O Brasil é o maior emissor de GEE na América Latina e, como um dos signatários do Acordo de Paris, tem o compromisso de reduzir suas emissões. O setor elétrico brasileiro (SEB) é responsável por parte do total de emissões referentes ao setor energético, e seu processo de modernização pode dar oportunidade para introdução de mecanismos de precificação de carbono. Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo descrever os mecanismos de precificação de carbono, apresentando suas principais características, vantagens e desvantagens; analisar a proposta descrita no Projeto de Lei nº 182, de 2024, que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e avaliar possíveis impactos econômicos que a implantação desse mecanismo pode causar no SEB, do ponto de vista do sistema e do mercado.

PALAVRAS-CHAVE

Mudanças climáticas, Gases de efeito estufa, Precificação de carbono, Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa

1.0 INTRODUÇÃO

O aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera tem sido um dos maiores motivadores de discussão em ambientes científicos pela preocupação com implicações para as gerações futuras, devido a elevação das temperaturas médias do planeta o que, consequentemente, causaria mudanças significativas para a sociedade. Existem vários esforços sendo feitos para tentar minimizar futuros impactos relacionados ao aquecimento global, sendo um deles o Acordo de Paris, que é um tratado internacional sobre mudanças climáticas, no qual 196 países se comprometeram a reduzir as emissões de GEE nos anos seguintes, conforme metas estabelecidas [1].

Com isso, esforços tem sido realizados para incentivar agentes de mercado a reduzirem suas emissões, a fim de atingir as metas estipuladas, por meio de instrumentos de políticas públicas aplicadas em diversos segmentos da economia, para solucionar essa falha de mercado. Segundo [2], falha de mercado se refere a uma situação em que o mercado, por si só, não consegue fazer uma alocação eficiente de seus recursos. Uma externalidade é um tipo de falha de mercado em que uma ação provoca impacto no bem-estar de um terceiro, não participante dessa ação, que não paga (externalidade positiva) ou recebe (externalidade negativa) nenhuma compensação por esse impacto. Nesse caso, as emissões de GEE são consideradas externalidades negativas.

Para a correção dessas falhas de mercado as entidades governamentais dispõem de uma série de instrumentos de políticas públicas para internalização de externalidades, como as emissões de GEE, que podem ser: instrumentos regulatórios (também conhecidos como instrumentos de “Comando e Controle”); instrumentos de informação e educação (chamados de “*soft measures*”); acordos de abordagens voluntários; incentivos a pesquisa e desenvolvimento (P&D); e instrumentos econômicos baseados no mercado [3].

Instrumentos econômicos baseados no mercado são soluções de mercado criadas a fim de precificar as externalidades com o objetivo de contabilizar e internalizar os custos causados por danos a terceiros e a sociedade. Mecanismos de precificação de carbono são exemplos desse tipo de instrumento, onde se atribui um preço sobre a tonelada de dióxido de carbono emitida, o que gera incentivo aos agentes de mercado para que façam escolhas no sentido de serem menos intensivos em carbono e eles têm tido papel importante para mudanças de padrões de investimentos e comportamentos, fomentando inovações em tecnologias e infraestrutura.

O Brasil é o maior emissor de GEE na América Latina e quinto maior emissor do mundo, segundo [4], com base em dados do ano de 2021. Como um dos signatários do Acordo de Paris, o país tem a meta, declarada por meio da contribuição nacionalmente determinada (NDC) [5], de reduzir suas emissões líquidas de gases de efeito estufa em 59% a 67% abaixo dos níveis de 2005 até 2035, o que, em termos absolutos, consiste em um nível de emissão de 1,05 a 0,85 GtCO₂, de acordo com os dados de inventário mais recentes.

Atualmente, a maior parte das emissões brasileiras são referentes ao setor da agricultura, responsável por 35% das emissões no ano de 2021, sendo seguido pelo setor de energia, com cerca de 32%. Em 2021, ano marcado pela escassez hídrica e que provocou aumento na geração termelétrica, o setor elétrico¹ foi responsável por 7% do total de emissões, totalizando 112,3 Mt CO_{2e}, que demonstra um aumento se comparado com o histórico de emissões do setor nos cinco

¹ No estudo da ClimateWatch, os dados são referentes ao subsetor energético de “Eletricidade e Geração de calor”, mas, para fins desse levantamento, admitiu-se que o total de emissões é do subsetor de eletricidade.

últimos anos (no qual era observada uma tendência de queda) e, caso não sejam tomadas medidas, as emissões podem continuar crescendo na próxima década.

No texto do relatório brasileiro da contribuição nacionalmente determinada (NDC), “*BRAZIL’S NDC - National determination to contribute and transform*”, cita explicitamente o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) como um dos instrumentos do Plano de Transformação Ecológica, que visa apoiar a implementação da Política Nacional sobre Mudança do Clima e dos acordos internacionais firmados pelo Brasil.

2.0 MECANISMOS DE PRECIFICAÇÃO DE CARBONO

Os dois principais instrumentos de precificação de carbono são: (i) impostos sobre o carbono e; (ii) o sistema de comércio de emissões (SCE). A principal diferença entre eles é o processo de formação de preço. Enquanto no primeiro (imposto) o governo determina o preço a ser pago por tonelada de CO₂ emitida e permite que o mercado ajuste as quantidades de equilíbrio, no SCE a lógica é contrária, onde o governo define a quantidade de emissões para um dado período e o mercado determina o preço de equilíbrio [3].

O instrumento de imposto sobre carbono estabelece uma ligação entre a quantidade de emissões de gases estufa e o custo dessa emissão a ser pago sobre elas, dando um incentivo econômico para que as empresas reduzam suas emissões alterando o montante de produção ou os métodos utilizados no processo produtivo. Para que tenha o funcionamento esperado é preciso que o governo tenha acesso as devidas informações em relação a estrutura de custos das empresas emissoras, para que determine o valor correto do imposto a ser cobrado por tonelada de CO₂ e, assim, incentive a redução de emissões.

Já o sistema de comércio de emissões consiste na determinação de um limite da quantidade de emissões, feita pelo órgão governamental, que as empresas dos setores participantes estão autorizadas a realizar em um determinado período. Sendo assim, são geradas permissões (ou certificados) para essas emissões que são alocadas entre os participantes do sistema. Após essa alocação, os agentes de mercado podem comercializar as permissões entre si para que, ao final do período, consigam apresentar ao órgão responsável as permissões correspondentes as suas emissões. O preço das permissões comercializadas é determinado pela oferta e demanda no mercado. Caso o volume de emissões seja maior que as permissões entregues, ou seja, maior que o limite imposto para o período, o órgão competente aplica sanções sob forma de multas, medidas administrativas, ou outra forma de penalidade.

Os dois mecanismos de precificação de carbono apresentados são instrumentos custo-efetivos para internalização de externalidades ambientais e produzem resultado equivalentes, mas, segundo [3] o SCE apresenta mais vantagens se comparado com o imposto sobre carbono. Entre as vantagens do SCE estão o estabelecimento de um preço explícito mais crível para os GEE; determinação de um limite explícito para a quantidade de GEE a ser emitida, o que assegura que metas de emissões possam ser alcançadas; flexibilidade na operacionalização do mercado; possibilidade de implementação em diversos contextos econômicos e políticos; e tem a opção de leiloar as permissões disponíveis no sistema, fornecendo uma fonte adicional de receita para o governo, que pode ser reinvestida em outras ações de incentivos ao baixo carbono.

Mas o SCE também apresenta algumas desvantagens, como a maior volatilidade de preço em relação ao imposto sobre o carbono, o que dificulta a gestão de risco dos entes regulados do mercado, e a dificuldade na escolha do melhor método de distribuição inicial das permissões entre os agentes do mercado.

Em relação ao imposto sobre o carbono, suas vantagens são uma maior previsibilidade de custos, o que reduz a volatilidade de preços e os riscos para investidores, um aumento na arrecadação do Estado e a tendência de ter uma implementação e administração mais fácil do que o SCE. Uma grande desvantagem desse mecanismo é que não se tem a garantia de cumprimento das metas internacionais de emissões, além do que, o órgão competente pode definir um valor baixo e insuficiente para o imposto, por não ter informações completas sobre os custos envolvidos, que não gere incentivos à redução das emissões na quantidade desejada.

3.0 SISTEMA BRASILEIRO DE COMÉRCIO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SBCE)

O Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) foi instituído pela Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024 e estabelece o marco regulatório do mercado de carbono no Brasil, tendo como objetivo, além da diminuição de emissões de GEE, o estímulo a inovações tecnológicas de baixo carbono [6]. Conforme descrito, o modelo adotado se inspira em ferramentas similares utilizadas em grandes economias globais, reconhecidas por sua capacidade de promover reduções significativas nas emissões nacionais.

A lei supracitada [7], em seu capítulo II, estabelece os princípios e características do sistema, sua governança e as competências de cada órgão, ativos integrantes do SBCE, entre outras informações relevantes do SBCE, que serão descritas resumidamente a seguir.

Foram descritos os dois ativos integrantes do SBCE: a Cota Brasileira de Emissões (CBE) e o Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE). A CBE será outorgada de forma gratuita ou de forma onerosa, através de leilões ou outros instrumentos administrativos, com o limite máximo definido no Plano Nacional de Alocação. Já os CRVE serão reconhecidos no âmbito do SBCE como os resultados, de acordo com metodologia previamente credenciada, de conciliação periódica de obrigações pelos operadores (observando o percentual máximo admitido no âmbito do Plano Nacional de Alocação) ou da transferência internacional de resultados de mitigação, condicionada à autorização prévia pela autoridade nacional designada para fins do disposto no art. 6º do Acordo de Paris.

O Plano Nacional de Alocação deverá estabelecer o limite máximo de emissões; a quantidade de CBEs a ser alocada entre os operadores; as formas de alocação das CBEs, gratuita ou onerosa, para as instalações e as fontes reguladas; o percentual máximo de CRVEs admitido na conciliação periódica de obrigações, dentre outros dispositivos relevantes para implementação do SBCE.

As receitas obtidas pelo SBCE serão provenientes da cobrança dos pagamentos decorrentes dos leilões (ou de outro instrumento) de CBEs, das multas aplicadas aos participantes, dos encargos setoriais, de convênios ou de acordos celebrados com entidades ou ainda de doações e outros recursos que lhe forem destinados. A maior parte desses recursos deverá ser destinada para o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima², a ser direcionada para o financiamento de investimentos para a descarbonização das atividades, fontes e instalações reguladas no âmbito do SBCE. O restante (em torno de 20% da receita) deverá ser utilizada para a operacionalização e manutenção do SBCE e para a compensação pela contribuição dos povos indígenas e dos povos e comunidades tradicionais para a conservação da vegetação nativa e dos serviços ecossistêmicos.

² Criado pela Lei nº 12.114, de 9 de dezembro de 2009.

A aplicação dos recursos destinados ao Fundo Nacional sobre Mudança do Clima dará prioridade ao fomento à inovação tecnológica para o desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono direcionadas aos setores regulados; ao apoio a investimentos para a implantação de novas tecnologias de descarbonização em fontes e em instalações de operadores regulados; ao desenvolvimento de soluções direcionadas ao atendimento dos desafios tecnológicos para a descarbonização das fontes e das instalações reguladas no âmbito do SBCE e a formação e a capacitação de mão de obra para os setores regulados.

Já o terceiro capítulo descreve sobre os agentes regulados e suas obrigações. Nesse item é citado que todos os agentes responsáveis por instalações ou fontes que emitam acima de 10.000 tCO₂ estarão sujeitos a regulação do SBCE, tendo a obrigação de submeter, para apreciação do órgão gestor do SBCE, um plano de monitoramento, enviar o relato de emissões e remoções de GEE e atender outras solicitações previstas em decreto ou em ato específico. Já os agentes com emissões acima de 25.000 tCO₂, além das obrigações descritas, deverão enviar periodicamente um relato de conciliação de obrigações. Ainda nesse item são descritas as penalidades aplicáveis aos agentes por descumprimento das regras do SBCE.

O capítulo IV trata da oferta voluntária dos créditos de carbono, gerados a partir de projetos ou programas que impliquem redução de emissão ou remoção de GEE, que poderá ser feita por qualquer gerador ou desenvolvedor de projeto de crédito de carbono que seja titular dos créditos ou por ente público desenvolvedor de programas jurisdicionais e projetos públicos de crédito de carbono.

Por último, a Lei nº 15.042, de 2024, apresenta as cinco fases a serem realizadas até a implementação do SBCE, sendo a fase I dedicada a edição da regulamentação (período de doze meses, prorrogável pelo mesmo período); a fase II para a operacionalização dos instrumentos para relato de emissões (período de um ano); a fase III quando os operadores estarão sujeitos somente ao dever de submissão de plano de monitoramento e de apresentação de relato de emissões e remoções de GEE ao órgão gestor do SBCE (período de dois anos); a fase IV, sendo a vigência do primeiro Plano Nacional de Alocação, com distribuição não onerosa de CBEs e implementação do mercado de ativos do SBCE e a fase V a implementação do SBCE, ao fim fase IV.

4.0 IMPACTOS ECONÔMICOS NO SEB

A matriz elétrica brasileira é composta em sua maioria por fontes renováveis, como hidrelétrica, eólica e solar, que representam cerca de 70% da capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (SIN) [8]. Esse fato faz com que o setor elétrico tenha grande potencial de ser um gerador de créditos de carbono em um mercado regulado.

Porém, existem discussões no setor em relação a contribuição das fontes renováveis para a diminuição dos GEEs, visto que é possível que, durante a fabricação dos equipamentos e estruturas necessárias para a construção das usinas sejam realizadas emissões em níveis consideráveis, dependendo da matriz elétrica do país onde os componentes são fabricados. Devido a esse fato, há a necessidade de se levantar as emissões de GEE relacionadas a todo o “ciclo de vida” das fontes renováveis, e não só as ocorridas após o início da operação das usinas [9] [10].

Assim, para a identificação dos possíveis impactos da implantação do SBCE no setor elétrico brasileiro, foram feitas avaliações a respeito de usinas termelétricas a combustíveis fósseis, que podem ser afetadas pelo fato de emitirem gases de efeito estufa. Do ponto de vista do

empreendedor, um dos efeitos a serem considerados pela criação do mercado regulado de carbono é o montante a ser desembolsado para a compra de créditos de carbono a fim de compensar as emissões causadas pelo empreendimento, o que será estimado a seguir.

Primeiramente, foi feita análise sobre as usinas termelétrica já existentes no SIN. Com base em dados do SIN do ano de 2023 [11], das 67 usinas avaliadas, apenas 9 delas não seriam reguladas pelo SBCE, ou seja, emitiram menos que 10.000 toneladas de CO₂ no ano de 2023.

Ao todo as usinas inventariadas emitiram aproximadamente 18 milhões de toneladas CO₂e³ em 2023, sendo que apenas 10 usinas foram responsáveis por 71% dessas emissões, sendo que metade delas utilizam carvão mineral como combustível principal, e a outra metade gás natural. Para a estimativa do impacto financeiro que as dez usinas poderiam ter no mercado regulado de carbono, foi feito cálculo do montante a ser desembolsado por cada uma delas, caso tivessem que compensar suas emissões adquirindo créditos de carbono em quantidade correspondente a totalidade das emissões, considerando o valor de R\$ 150/tonCO₂⁴ para precificação do carbono. A Figura 1 demonstra o valor a ser pago anualmente por cada uma das usinas para a compra de créditos de carbono.

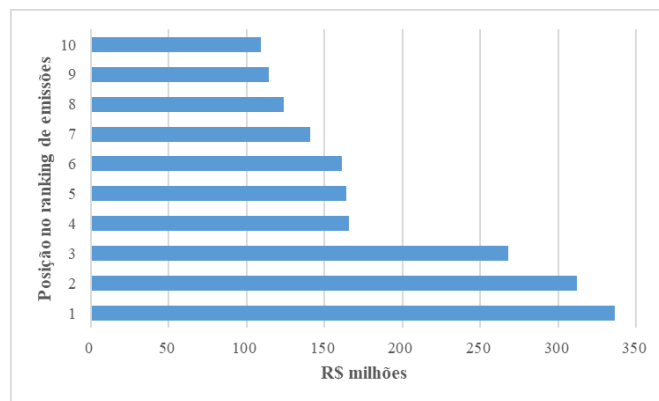


Figura 1 - Estimativa de pagamentos anuais para compra de créditos de carbono por usinas termelétricas existentes

Conforme a estimativa feita, as usinas deveriam desembolsar entre 100 e 340 milhões de reais por ano para a compra de créditos de carbono, totalizando um montante de 1,9 bilhões de reais, que seriam revertidos como receita para o SBCE.

Já do ponto de vista do sistema elétrico, um impacto da implantação do mercado regulado de carbono é em relação a alteração nos custos de geração de empreendimentos termelétricos novos (“greenfield”). Para realizar essa estimativa, foi feita análise para verificar o efeito que a consideração do preço de emissões pode ter no custo dessas fontes. Para isso, utilizou-se o custo nivelado de energia (*Levelized Cost of Energy – LCOE*) como métrica para comparação entre os valores de usinas termelétricas a combustíveis fósseis, com e sem a inclusão da precificação de carbono.

Foram utilizados como premissa, para o cálculo do LCOE, fatores de emissão de CO₂ para a geração de energia elétrica [12], para as fontes termelétricas Gás Natural (ciclo simples - CS e ciclo combinado - CC), Carvão e Óleo Combustível e estimativas de parâmetros de custos das

³ Toneladas de dióxido de carbono equivalente.

⁴ Referência: Preço para valoração financeira das emissões evitadas no Leilão dos Sistemas Isolados do ano de 2025, conforme descrito no Informe Técnico EPE-DEE-IT-099/2024-r1 (Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-856/Informe%20T%C3%A9cnico%20-%20EPE-DEE-IT-099_2024-r1.pdf)

fontes de geração (como CAPEX, custos de O&M e de combustíveis) [13]. Para a análise de sensibilidade, foram considerados três cenários de cálculo do LCOE: (1) sem consideração de preço de carbono (ou seja, sem a implantação do SBCE); (2) considerando a precificação do carbono, com preço a R\$ 150/tonCO₂⁵; e (3) considerando a precificação do carbono, com preço a R\$ 300/tonCO₂⁶. Os resultados da avaliação são apresentados na Figura 2:

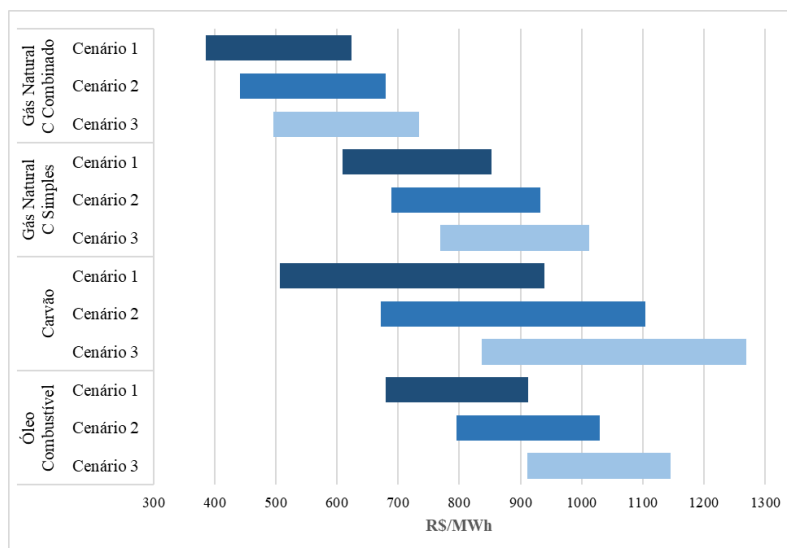


Figura 2 - Estimativa de LCOE de usinas termelétricas a combustíveis fósseis, considerando precificação de carbono

Pela interpretação dos resultados da Figura 2, é possível observar que a precificação do carbono representa um aumento em torno de 10% a 30% no custo da usina a gás natural, de 15% a 35% no da usina a óleo combustível e de 20% a 65% no da usina a carvão. Além disso, no cenário 1 (sem a precificação de carbono) a fonte termelétrica a gás natural a ciclo combinado (CC) se mostra mais competitiva que as outras, ou seja, tem os menores valores de LCOE, e a fonte a carvão apresenta a faixa mais ampla. Já no cenário 2, com a consideração da precificação de carbono ao menor preço, a fonte termelétrica gás natural CC continua sendo mais competitiva, apresentando menores valores de LCOE, enquanto o mesmo recurso energético a ciclo simples (CS) passa a ser tão competitiva quanto a carvão, pelo fator de emissões ser menor. A maior competitividade da fonte termelétrica a gás natural CS fica mais evidenciada no terceiro cenário, no qual a faixa de preços da termelétrica a carvão é o segundo mais elevado.

A fonte termelétrica a óleo combustível se mostra menos competitiva em todos os cenários e a fonte termelétrica a carvão apresenta as maiores parcelas de precificação de carbono, pelo fato de ter o maior fator de emissão dentre as alternativas apresentadas.

Uma das alternativas para reduzir ou eliminar os custos com aquisição de créditos de carbono no mercado regulado é a instalação de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (Carbon Capture and Storage – CCS), onde o CO₂ emitido pela usina termelétrica é capturado, comprimido e transportado (através de dutos ou de modais aquaviário, ferroviário ou rodoviário) para ser injetado e armazenado em formações geológicas profundas [14].

⁵ Referência: Preço para valoração financeira das emissões evitadas no Leilão dos Sistemas Isolados do ano de 2025, conforme descrito no Informe Técnico EPE-DEE-IT-099/2024-r1 (Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-856/Informe%20T%C3%A9cnico%20-%20EPE-DEE-IT-099_2024-r1.pdf)

⁶ Referência: US\$ 50/ tonCO₂, com base nos preços médios de mercados de carbono internacionais apresentados no dashboard do World Bank Group (Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/price>)

Adicionalmente, foi feita comparação, como demonstrado na Figura 3, entre os valores de LCOE das fontes termelétricas a carvão e a gás natural (ciclo combinado) dos cenários 2 e 3 simulados anteriormente (considerando a precificação de carbono) com estimativas de usinas dessas fontes energéticas com a tecnologia CCS, calculadas a partir de custos (CAPEX e OPEX) referentes ao ano de 2023 e projetados para o ano de 2050 [15].

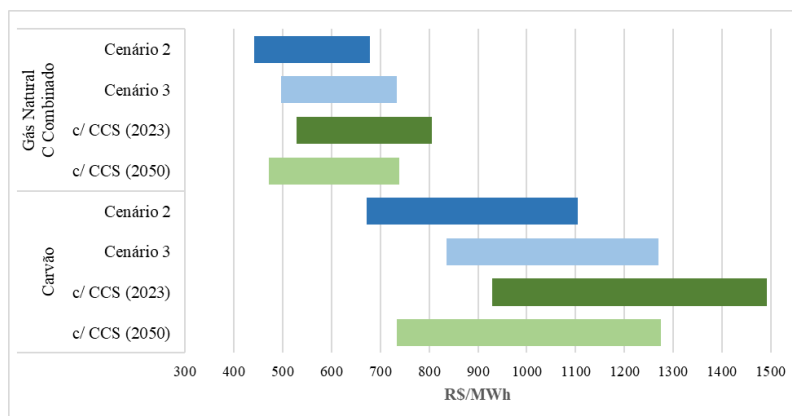


Figura 3 - Estimativa de LCOE de usinas termelétricas com tecnologia CCS

Pela análise das faixas demonstradas na Figura 3, é possível observar que os custos nivelados de projetos a carvão e a gás natural com a tecnologia com CCS se mostram semelhantes aos custos totais desses projetos considerando precificação de carbono entre R\$ 150 e 300/tonCO₂ (cenários 2 e 3).

Por fim, é importante ressaltar que também poderão ter impactos “positivos” para o SEB com a implantação do mercado regulado de carbono brasileiro, visto que, conforme descrito na Lei nº 15.042, de 2024, a maior parte dos recursos arrecadados pelo SBCE deverá ser revertida para o financiamento de atividades de descarbonização, o que inclui projetos de geração de energia elétrica a partir de recursos renováveis, tecnologias de CCS e outras atividades ligadas ao setor elétrico brasileiro.

5.0 CONCLUSÕES

Como foi apresentado, os mecanismos de precificação de carbono são exemplos de instrumentos econômicos baseados no mercado, onde se atribui um preço sobre a tonelada de dióxido de carbono emitida, o que gera incentivo aos agentes de mercado para que façam escolhas no sentido de serem menos intensivos em carbono.

O Brasil, como um dos signatários do Acordo de Paris, tem como meta reduzir suas emissões líquidas de gases de efeito estufa e, nesse caminho, em dezembro de 2024 foi instituído o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) com o objetivo de diminuir as emissões de GEE por meio de um mercado regulado de carbono e estimular inovações tecnológicas de baixo carbono.

Sendo assim, foram feitas avaliações em relação aos impactos que o setor elétrico brasileiro (SEB) pode ter com a implantação do SBCE. Pelo ponto de vista dos agentes de mercado, foi feita estimativa dos montantes a serem pagos pelas usinas termelétricas a combustíveis fósseis para a compensação das emissões com a aquisição de créditos de carbono. Esses valores podem variar entre 100 e 340 milhões de reais por ano por usina, totalizando 1,9 bilhões de reais a serem revertidos como receita para o SBCE.

Já pelo ponto de vista do sistema, foi analisado o efeito da precificação de carbono no custo das fontes termelétricas a combustíveis fósseis, utilizando-se a métrica do custo nivelado de energia (LCOE). Como resultado, observa-se que a fonte termelétrica a gás natural a ciclo combinado apresenta os menores valores de custo, enquanto a fonte termelétrica a óleo combustível tem os maiores valores. Já a fonte termelétrica a carvão apresenta as maiores parcelas de precificação de carbono, pelo fato de ter o maior fator de emissão dentre as alternativas apresentadas. Adicionalmente observa-se que os custos nivelados de projetos a carvão e a gás natural com a tecnologia com CCS se mostram semelhantes aos custos totais dos projetos dessas fontes energéticas considerando precificação de carbono.

Também cabe mencionar que a implantação do SBCE também poderá gerar impactos “positivos” para o SEB, visto que grande parte dos recursos arrecadados pelo SBCE deverá ser revertida para o financiamento de atividades de descarbonização, o que inclui projetos de geração de energia elétrica a partir de recursos renováveis, tecnologias de CCS e outras atividades ligadas ao setor elétrico brasileiro.

6.0 BIBLIOGRAFIA

Escreva aqui a bibliografia, de acordo com sua apresentação (veja exemplos nas referências abaixo). Fonte a ser usada é sempre Times ou Helvética, 11 ou 12.

- [1] United Nations Climate Change (UNCC), “Process and meetings - The Paris Agreement,” (Online). Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>. (Acesso em 03 de Abril de 2025)
- [2] G. N. Mankiw, “Externalities,” em Principles of Economics, Cengage Learning, 2016
- [3] J. I. T. Gonzalez, Proposta de precificação das emissões de gases de efeito estufa do setor elétrico brasileiro por meio de sistema de comércio de emissões, São Paulo: Tese de Doutorado, IEA, USP, 2020
- [4] Climate Watch, “Historical GHG Emissions,” [Climatewatchdata.org](https://www.climatewatchdata.org), (Online). Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?breakBy=countries&chartType=line&end_year=2021®ions=WORLD&start_year=1990. (Acesso em 3 de Abril de 2025)
- [5] United Nations Climate Change, “Nationally Determined Contributions Registry - NDCs - Brazil,” [unfccc.int](https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Brazil%20First%20NDC%20(Updated%20submission).pdf), [Online]. Disponível em: [https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Brazil%20First%20NDC%20\(Updated%20submission\).pdf](https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Brazil%20First%20NDC%20(Updated%20submission).pdf). (Acesso em 3 de Abril de 2025).
- [6] Ministério da Fazenda, “Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões” Desenvolvimento Econômico Sustentável (Online). Disponível em: <https://www.gov.br/fazenda/pt-br/orgaos/spe/desenvolvimento-economico-sustentavel/sistema-brasileiro-de-comercio-de-emissoes> (Acesso em 3 de Abril de 2025)
- [7] BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 dez. 2024. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-15.042-de-11-de-dezembro-de-2024-601124199>. (Acesso em 11 de Abril de 2025).
- [8] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, “Evolução da Capacidade Instalada no SIN – abril 2025” Sobre o SIN – O sistema em número. [Online]. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros> (Acesso em 18 de Abril de 2025)
- [9] Empresa de Pesquisa Energética - EPE, “Nota técnica – Análise Socioambiental das fontes energéticas do PDE 2034” Novembro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico->

- 725/NT%20An%C3%A1lise%20socioambiental%20das%20fontes%20energ%C3%A9ticas%20do%20PDE%202034%20NT010_24%20DEA_SMA.pdf (Acesso em 18 de Abril de 2025)
- [10] Constantino, G.; Freitas, M.; Fidelis, N.; Pereira, M. G. 2018. “Adoption of Photovoltaic Systems Along a Sure Path: A Life-Cycle Assessment (LCA) Study Applied to the Analysis of GHG Emission Impacts.” *Energies*, v. 11, n. 10, p. 2806, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2806> (Acesso em 18 de Abril de 2025)
- [11] Instituto de Energia e Meio Ambiente - IEMA, “4º Inventário de emissões atmosféricas em usinas termelétricas” Dezembro de 2024. [Online]. Disponível em: https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2024/12/4-inventario-ute-iema-2024_V4.pdf (Acesso em 18 de Abril de 2025)
- [12] Empresa de Pesquisa Energética - EPE, “Apresentação da metodologia e dos fatores de emissão utilizados para as estimativas de emissão de GEE nos planos de energia, no BEN e demais produtos da EPE” 12 2022. [Online]. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/areas-de-atuacao/estudos-socioambientais/SiteAssets/Paginas/Emissoes-de-Gases-de-Efeito-Estufa/Informativo%20Tecnico_11-2022_fatores%20de%20emiss%C3%A3oSMA.pdf (Acesso em 15 de Abril de 2025)
- [13] Empresa de Pesquisa Energética - EPE, “Caderno de Parâmetros de Custos” Agosto de 2024. [Online]. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-804/topico-709/Caderno%20de%20Custos%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20e%20Transmiss%C3%A3o_PDE2034_2024.09.06.pdf (Acesso em 15 de Abril de 2025)
- [14] International Energy Agency - IEA, “Carbon Capture Utilisation and Storage”. [Online]. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage> (Acesso em 22 de Abril de 2025)
- [15] International Energy Agency - IEA, “Power generation technology costs and assumptions in the WEO-2024 Stated Policies and Net Zero Emissions by 2050 scenarios”. [Online]. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/global-energy-and-climate-model-key-input-data> (Acesso em 22 de Abril de 2025)

DADOS BIOGRÁFICOS



Mariana de Queiroz Andrade possui graduação em Engenharia de Produção pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), pós-graduação (MBA) em Gestão de Energias Renováveis e, em 2021, ingressou no programa de mestrado em Engenharia de Produção na Universidade de São Paulo (USP). Trabalha desde 2013 na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) na área de planejamento da geração de energia elétrica.

Renato Haddad é engenheiro eletricitista, graduado pela UFRJ, com mestrado em Sistemas de Energia Elétrica pela COPPE/UFRJ e doutorando em Economia da Energia no Programa de Pós-Graduação Engenharia de Produção da USP. Trabalha na Empresa de Pesquisa Energética (EPE) desde 2009, onde tem participado de diversos estudos e atividades relacionadas ao planejamento da expansão da oferta do sistema elétrico brasileiro.

Professor associado da Escola Politécnica da USP, **Erik Eduardo Rego** é engenheiro de produção, bacharel em ciências econômicas, mestre e doutor em energia, livre docente em engenharia de produção, todos título pela USP. Além da academia, acumula experiência de mais de 20 anos no mercado de energia, com passagens pelo setor financeiro (B3 e banco de investimento BV), empresas de consultoria especializadas em energia (Excelência Energética e PSR) e empresa pública (ex-diretor de Estudos de Energia Elétrica da Empresa de Pesquisa Energética – EPE). Atualmente ainda é membro, por notório saber, do Conselho Estadual de Política Energética – CEPE, sendo que já foi membro do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE.