

PRECIFICAÇÃO DE CARBONO PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL E ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDO DE CASO

PRECIO DEL CARBONO PARA LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE ENERGÍA ELÉCTRICA TÉRMICA A GAS NATURAL Y ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA: ESTUDIO DE CASO

CARBON PRICING FOR ELECTRICITY GENERATION FROM NATURAL GAS THERMAL POWER AND PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY: CASE STUDY

Lizandra Honória Moura Santos; Rafael Amaral Shayani, Dr.

1. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
2. Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.

PALAVRAS-CHAVE

Precificação de carbono; Levelized Cost of Energy; Energia Fotovoltaica; Termelétrica a Gás Natural.

PALABRAS CLAVE

Fijación de precios del carbono; Costo Nivelado de Energía; fotovoltaica; Termoeléctrica a Gas Natural.

KEY WORDS

Carbon Pricing; Levelized Cost of Energy; Photovoltaic Energy; Natural Gas Thermal Power Plan

RESUMO

As mudanças climáticas se tornaram pautas das discussões internacionais devido às suas consequências como o aquecimento global, causado pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa. Dentre as principais fontes de emissão de GEE está o setor energético. Visando estimular a sustentabilidade energética, este projeto apresenta uma comparação entre a geração de energia elétrica a partir de termelétrica a gás natural e de solar fotovoltaica para as escolas públicas do Distrito Federal. Para tal, foi considerado o Levelized Cost of Energy (LCOE) como método para a aquisição de resultados e os custos sugeridos pelo Projeto PMR Brasil para precificação do carbono. O 30º Leilão de Energia Nova foi utilizado como o custo nivelado de energia técnico através dos valores R\$ 188,87 para o gás natural e R\$ 84,39 para energia solar. Já os custos nivelados de energia ambiental (LCOE Ambiental) levaram em conta as emissões de GEE dos ciclos de vida de cada

tecnologia. Os resultados obtidos indicaram um acréscimo no custo do gás natural, em comparação com a energia solar, como forma de refletir seu impacto climático.

RESUMEN

El cambio climático se ha convertido en la agenda de las discusiones internacionales debido a sus consecuencias como el calentamiento global, provocado por el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre las principales fuentes de emisiones de GEI se encuentra el sector energético. Con el objetivo de estimular la sustentabilidad energética, este proyecto presenta una comparación entre la generación de energía eléctrica a partir de gas natural termoeléctrica y solar fotovoltaica para escuelas públicas del Distrito Federal. Para ello, se consideró como método de adquisición de resultados el Costo Nivelado de la Energía (LCOE) y los costos sugeridos por el Proyecto PMR Brasil para la tarificación del carbono. La 30ª Subasta de Nuevas Energías fue utilizada como costo nivelado de la energía técnica a través de los valores de R\$ 188,87 para gas natural y R\$ 84,39 para energía solar. Los costos nivelados de energía ambiental (LCOE Ambiental) tuvieron en cuenta las emisiones de GEI de los ciclos de vida de cada tecnología. Los resultados obtenidos indicaron un aumento en el costo del gas natural, en comparación con la energía solar, como una forma de reflejar su impacto climático.

ABSTRACT

As the changes made, the agendas of consequences are activated due to their consequences such as global warming, an increase due to the increase in greenhouse gas emissions. Among the main sources of GHG emissions is the energy sector, which is directly proportional to the development of society, so having an energy plan that helps to reduce the emission of such gases is beneficial to society worldwide. Therefore, this project presents a comparison between the generation of electricity from natural gas thermoelectric and solar photovoltaic for public schools in Distrito Federal, Brazil. To this end, the Leveled Cost of Energy (LCOE) was considered as a method for acquiring results and the costs suggested by the PMR Brazil Project for carbon pricing. The 30th New Energy Auction was used as the capped cost of technical energy through the values BRL 188.87 for natural gas and BRL 84.39 for solar energy. The leveled environmental energy costs (Environmental LCOE) took into account the GHG dependents of the life cycles of each technology. The results obtained showed an increase in the cost of natural gas power, more than solar energy, in order to get their climate impact.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas estão cada vez mais presentes em todas as agendas políticas, sociais e econômicas, visto que seus impactos são sentidos tanto no presente quanto no futuro. O Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) concordam que as alterações climáticas estão cada vez mais evidentes e têm relação direta com o aumento de emissões de gases que causam o efeito estufa (GEE) e, conseqüentemente, com o aquecimento global (IPCC, 2021). Uma forma de mitigar tais emissões é reduzir o uso de combustíveis fósseis, principalmente no setor energético, entretanto o desafio é complexo pois este também é o setor que permite o desenvolvimento econômico dos países, uma vez que a produção energética é essencial para a infraestrutura necessária para seu avanço. Para que projetos de infraestrutura sejam sustentáveis, é importante considerar o impacto que a energia requerida para estes projetos causa no clima.

O Brasil é um exemplo de país em desenvolvimento que procura novas fontes energéticas para garantir seu crescimento socioeconômico de forma ambientalmente adequada. Segundo o Ministério de Minas e Energia (2007), as principais fontes que podem ser desenvolvidas em território nacional são gás natural, solar e eólica. O gás natural é visto como uma fonte de energia intermediária dentro das ações de mitigação. As termelétricas movidas a gás natural são uma alternativa para diversificação da matriz energética do país devido à elevada disponibilidade do gás no território nacional. Entretanto, ele contribui para as emissões de GEE, visto que desde a sua extração até seu funcionamento há diversos impactos e, como o Brasil é um país signatário do Acordo de Paris, o uso do gás natural vai contra o objetivo de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa.

O grande desafio energético que se apresenta à humanidade é: como fornecer energia suficiente para garantir o crescimento das nações, em especial das que estão em desenvolvimento e, ao mesmo tempo, reduzir as emissões de gases de efeito estufa, com meta de emissões nulas na metade do século? Uma das formas de contribuir neste tema, que é o objetivo geral do presente trabalho, é precificar as emissões de gases de efeito estufa relacionadas à geração de energia, para que o custo ambiental possa ser internalizado no custo das fontes energéticas, permitindo que as decisões que envolvam infraestrutura energética das nações possam ser tomadas com melhor conhecimento do custo ambiental associado. Essa análise é realizada no planejamento governamental que considera diversos fatores, sendo um deles o fator econômico que precisa da intervenção do governo para implementar um mecanismo que internalize a externalidade gerada por parte do produtor.

Segundo o PMR (2017), grande parte das medidas tomadas pelos governos para mitigar as emissões de GEE são do tipo comando & controle, ou seja, a criação de normas obrigatórias que são fiscalizadas pelo governo. Contudo, outras ações têm auxiliado o governo, como as iniciativas de mercado, da qual a precificação de carbono faz parte.

A precificação de carbono é uma maneira custo-efetiva de reduzir as emissões de GEE ao menor custo agregado possível. Neste estudo serão analisados os impactos que existem quando se consideram as externalidades negativas ambientais e precificação de carbono através do mercado ou da taxaço do carbono no cálculo do custo nivelado de energia.

O objetivo específico é analisar a precificação do carbono nas escolas públicas do Distrito Federal (DF) por meio da comparação dos custos nivelados das emissões de gases de efeito estufa na geração de energia elétrica através de usina termelétrica a gás natural ciclo combinado e solar fotovoltaica. Pretende-se, então, contribuir para alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas, como os objetivos 7, 8 e 13, os quais prescrevem energia limpa e acessível, o trabalho decente e o crescimento econômico e as ações contra a mudança global do clima, respectivamente.

Neste estudo são analisados os impactos que existem quando se considera as externalidades negativas ambientais da geração de eletricidade por meio da precificação do carbono emitido, considerando estratégias de mercado e de taxaço do carbono no cálculo do custo nivelado de energia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

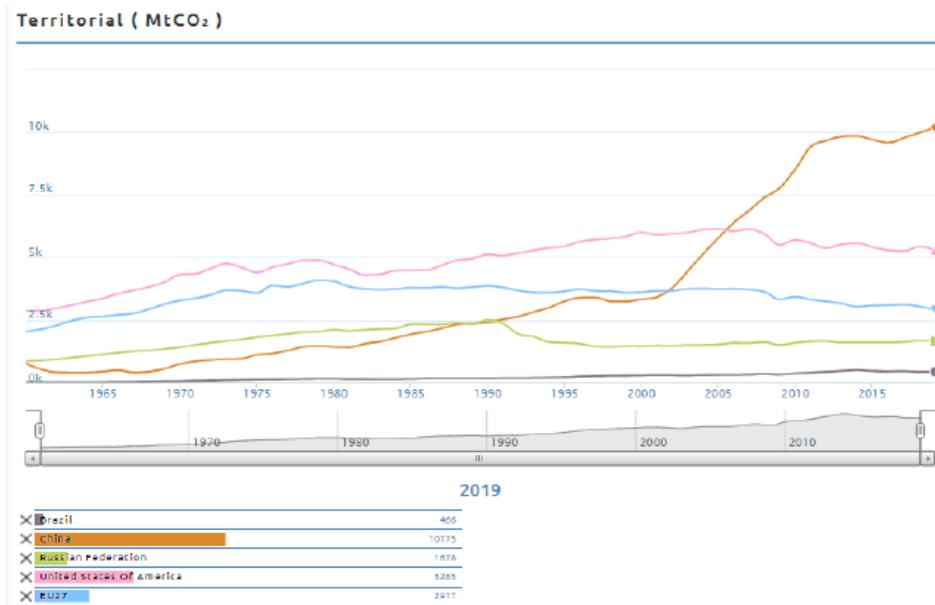
Visando reduzir o aquecimento global, 195 países assinaram o Acordo de Paris durante a 21ª Conferência do Clima (COP 21). Esse tratado mundial tem como principal objetivo diminuir as emissões de gases do efeito estufa para limitar o aumento médio da temperatura global a 2°C. O Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% e 43% nos anos de 2030 e 2050, respectivamente. Uma das formas que contribuem para atingir essa meta é a mudança da composição da matriz energética que deve considerar fontes de energia renovável, por isso, um dos compromissos brasileiros é ter 45% de energia renovável em sua matriz.

Os Gases de Efeito Estufa (GEE) são gases naturais que absorvem parte da radiação vermelha emitida pelo Sol e refletida pela superfície terrestre, dificultando o escape desta radiação para o espaço. Segundo Benhelal (2013), o Protocolo de Kyoto considera o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e o hexafluoreto de Enxofre (SF₆) como sendo os GEE antropogênicos. O dióxido de carbono é o gás que mais contribui para o aquecimento global porque as principais atividades antrópicas envolvem a oxidação do carbono, e outros gases como CH₄ e N₂O, os quais estão relacionados com a agropecuária, a disposição de rejeitos orgânicos e a extração de combustíveis (LIU, WU, 2017).

A revolução industrial aumentou consideravelmente a emissão desses gases devido aos meios produtivos e meios de transporte utilizados (MARANGON, COLLISCHONN, & MARENGO, 2014). Tanto que o crescimento das emissões globais de 1970 a 2019 é significativo, como pode ser visto na Figura 1. Em 1970 o Brasil emitia em seu território 94 milhões de toneladas equivalentes de CO₂ (MtCO₂) e em 2019 essa emissão já era 466 MtCO₂.

Os impactos dos GEE podem ser vistos na temperatura global, no ciclo do carbono e da água, na saúde, na educação e na renda. Tais fatores são trabalhados na escola, por essa razão o estudo de caso deste trabalho aborda, de forma didática, as fontes energéticas nas escolas públicas do Distrito Federal, como uma forma de aplicar o conhecimento visto em diversas disciplinas e também introduzir a educação ambiental.

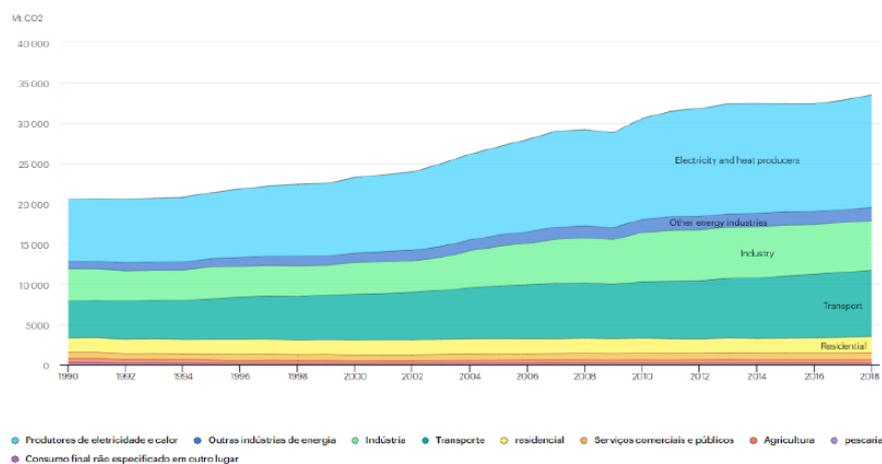
Figura 1: Evolução das emissões de CO₂ em alguns países.



Fonte: Global Carbon Project, 2019.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA,2017) as atividades do setor energético, da indústria e do meio de transporte são as mais poluentes de CO₂, respectivamente, como pode ser visto na Figura 2. Por isso, é tão importante encontrar meios de mitigar as emissões de CO₂, principalmente no setor energético para mitigar o aquecimento global.

Figura 2: Atividades que mais produzem GEE de 1990 a 2018.

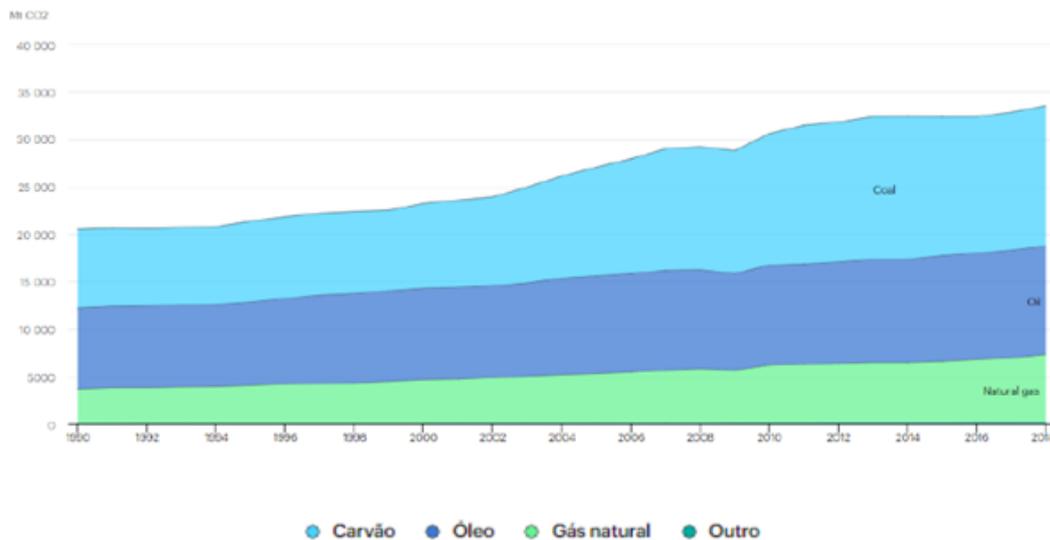


Fonte: IEA, 2018.

Dados do IEA comprovam que os gases de efeito estufa que compõem o setor energético são CO₂, CH₄ E N₂O, sendo que desses três o CO₂ é o maior, tendo 90% de participação. As emissões de

CO₂ por combustível aumentaram em todos os tipos desde 1970. A Figura 3 ilustra os componentes das emissões de CO₂ por combustível.

Figura 3: Emissões de CO₂ por combustível de 1990 a 2018.



Fonte: IEA, 2018.

A temperatura é uma grandeza física escalar que mede o grau de agitação das moléculas que compõem um corpo. O relatório de 2015 do IPCC apresentou um dado alarmante que a temperatura média global aumentou aproximadamente 1°C quando comparada à média global de 1850 a 1900. Fazendo cálculos estatísticos tem-se que ela aumentará acima de 1,5°C até 2050, logo todo o clima mudaria drasticamente.

As consequências dessas mudanças originam as alterações climáticas, que estão cada vez mais presentes no aumento do nível do mar, derretimento de calotas polares, alteração nos padrões de chuva, entre outros. Por exemplo, o desmatamento que acontece na Amazônia para venda de madeira ou criação de gado, gera impactos diretos e indiretos em todos os outros estados e países, já que os gases presentes no fogo emitem GEE e colaboram para o aquecimento global e efeito estufa. (INPE, 2021).

De acordo com o Relatório de Desenvolvimento Humano (2007), as intensidades e frequências desses eventos estão diretamente relacionadas às consequências climáticas causadas por GEE, isso afeta principalmente as regiões mais sensíveis em intensidade e frequência.

IPCC (2014) concluiu que os efeitos das mudanças climáticas para saúde são globais, mas sentidos e vistos em diferentes escalas ao redor do mundo por causa das diferentes tecnologias de tratamento e infraestrutura. Em países desenvolvidos há muito mais chance de se mitigar as consequências das

mudanças climáticas, tanto com medidas de prevenção quanto com tratamentos efetivos. Segundo a OMS, para esses países a cada US\$ 1,00 dólar investido em saneamento, há US\$ 4,30 dólares economizados em custos de saúde.

Pensando nas consequências indiretas nacionais, o Brasil sofre com a falta de saneamento básico, que possibilita o crescimento das doenças de veiculação hídrica. O aumento da temperatura, umidade e precipitação geram ambientes favoráveis para proliferação de mosquito *Aedes aegypti* que transmite a dengue, doença encontrada em locais com água parada.

O contexto brasileiro de energia é composto por hidroelétricas e termoeletricas que, juntas, garantem o funcionamento do sistema elétrico. As diversas bacias hidrológicas possibilitam 60% da produção elétrica brasileira e as termoeletricas são usadas como fonte estratégica que subsidia o sistema elétrico em anos hidrológicos desfavoráveis (MME, 2007).

O gás natural é uma fonte de energia com produção cada vez mais crescente, mesmo sendo uma fonte de energia ainda subdesenvolvida em território brasileiro. No Plano Nacional de Energia Elétrica para 2030 estimou-se que haveria uma potência instalada de gás natural de cerca de 10.040 MW e de, pelo menos, 12.490 MW para 2011 (IAE, 2018). Mesmo com esse desenvolvimento, as políticas que embasam o incentivo para entrada de agentes privados e as medidas de fomentação da indústria de gás natural não são fortes o suficiente para criar um marco regulatório.

Já a geração de energia por sistemas solares fotovoltaicos é uma das opções que o Brasil tem para desenvolver, visto que ela vem crescendo de forma expressiva nos últimos anos. Para o MME (2007), um dos fatores que impedem o crescimento do uso dos painéis fotovoltaicos é o seu alto custo. Como o Brasil é o maior exportador de sílica do mundo, seu o preço interno é maior. Para reduzir esse custo, o PNE 2030 fomentou instalar indústrias de baixa emissão de GEE de beneficiamento do silício, assim o uso do sistema se torna competitivo no mercado internacional, já que o aumento da demanda gera redução de preço e incentivo ao mercado. De acordo com o IPCC (2020), o custo do painel fotovoltaico reduziu de forma expressiva pela lei da oferta e demanda.

Em ambos os casos, os impactos ambientais estão presentes no ciclo de vida dos produtos que os compõem, ou seja, as emissões de GEE presentes na etapa de implementação, operação e descomissionamento das usinas permitem uma comparação das externalidades ambientais produzidas por cada uma delas. Estes impactos podem ser contabilizados pelo indicador Levelized Cost of Electricity (LCOE), que calcula o custo nivelado da eletricidade, através da razão da soma de todos os custos incorridos com a usina ao longo de sua vida útil pela quantidade de eletricidade produzida, ajustada pelo valor econômico ao longo do tempo.

De acordo com o IPCC e com a EPE, os principais parâmetros para o cálculo do LCOE para as termelétricas a gás natural e para energia solar fotovoltaica são: custo de investimento, fator de capacidade, custo de operação e manutenção, vida útil, custo do combustível e taxa de desconto. Tais parâmetros não consideram os custos ambientais envolvidos em todo ciclo de vida dos empreendimentos.

Openstax (2015), afirma que o conceito de externalidade ocorre quando a realização de uma interação voluntária entre comprador e vendedor afeta indiretamente um terceiro. Esse impacto pode ser negativo ou positivo, dependendo de suas consequências. Por exemplo, a poluição ambiental é uma externalidade negativa resultante da relação entre consumo e produção não sustentáveis.

O estudo de Rhodes, et al. (2017) estimou o custo de algumas externalidades ambientais relacionadas a produção de energia elétrica a partir do método do custo nivelado (LCOE). Ele considerou as características geográficas do local de instalação, as externalidades ambientais, neste caso os poluentes atmosféricos, de cada tipo de fonte energética e os principais parâmetros apresentados na seção anterior (custo de investimento, fator de capacidade, taxa de desconto, vida útil, manutenção fixa e variável, custo do combustível e taxa de desconto).

Segundo o Partnership for Market Readiness (Projeto PMR Brasil, 2020), precificar o carbono consiste em alocar um preço sobre a tonelada de CO₂ emitida, ou seja, cobrar um valor pelas emissões de gases de efeito estufa causadores de mudanças climáticas. O conceito parte do princípio “poluidor pagador”, o qual afirma que quem gera a externalidade negativa deve internalizar o custo.

Na teoria, para se maximizar o custo-efetividade do sistema, o preço do carbono deveria ser único em todos os países para explorar toda a heterogeneidade existente entre custos marginais de abatimento no mundo. Quando o sistema estivesse em equilíbrio todos os MACs globais estariam iguais, possibilitando opções de mitigação mais em conta. Para tal, o preço deveria ser exatamente o suficiente para fazer com que o produtor da externalidade a internalize, ou seja, cobrar um preço de carbono igual o custo social do carbono.

Algumas consequências esperadas dessa teoria são que a partir do momento que há um preço sob o carbono, o consumo por produtos que emitem menos CO₂ aumentaria, assim como os investimentos em produtos e tecnologias menos intensivos em emissões. Outra consequência seria a receita proveniente da precificação que pode ser utilizada de modo a causar situações de duplo dividendo, já que com a precificação o governo pode corrigir a distorção da externalidade negativa das emissões de GEE e reciclar a receita, baixando os impostos sobre folha de pagamentos (PMR, 2017).

A implementação da precificação depende em larga escala da estrutura regulatória e produtiva, além de aspectos de economia política, específicos de cada jurisdição, o que varia muito de país para país.

Há duas formas de precificar o carbono: o tributo sobre as emissões (carbon tax) e o sistema de comércio de emissões (SCE), mais conhecido como mercado de carbono. Para o PMR Brasil, o preço mínimo do carbono deve ser de R\$ 20,00/tCO₂eq e o preço máximo deve ser de R\$ 40,00/tCO₂eq. Já para o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC) a estimativa para alcançar a meta da NDC para 2025 com base em medidas com viabilidade econômica, o valor de carbono deve ser de R\$ 56,80/tCO₂eq.

Para saber se o instrumento de precificação de carbono poderia compor a política climática brasileira no período pós-2020 e quais características ele deveria ter para otimizar a relação entre objetivos ambientais e desenvolvimento socioeconômico, o PMR apresentou 3 componentes do seu projeto.

A partir deste embasamento teórico percebe-se que por mais que as emissões de GEE agravem as mudanças climáticas, suas externalidades não são consideradas nos custos do planejamento energético brasileiro.

Alguns estudos recentes já foram feitos para analisar como a precificação dos impactos ambientais afetam o custo das fontes de energia, com destaque para os benefícios ambientais da energia solar fotovoltaica, entre eles Guimarães e Shayani (2018), Neves e Shayani (2020) e Bredemann, Fatheazam e Shayani (2020). O presente trabalho aprofunda os achados destes autores.

Tabela 1: Componentes e objetivos do PMR

Componente	Objetivo
Componente 1	Estudos setoriais para informar a política e a modelagem de impactos da precificação de carbono
Componente 2	Avaliação de impactos da precificação
Componente 3	Comunicação, consulta e engajamento no que diz respeito à precificação de carbono

Fonte: PMR (2017)

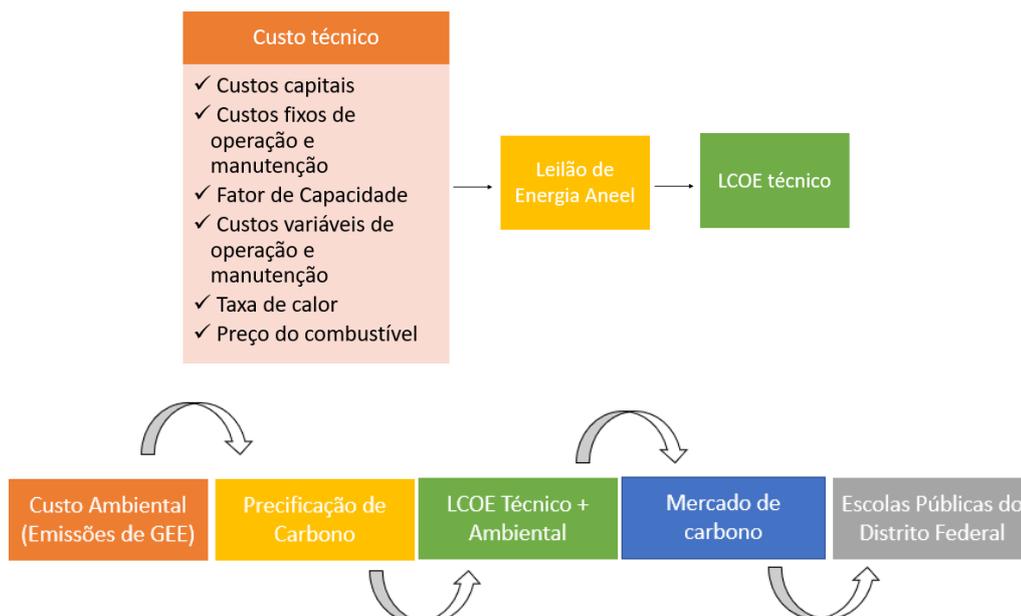
3. METODOLOGIA

Diante do cenário do desenvolvimento sustentável dentro do setor energético este estudo desenvolve uma metodologia que inclui os impactos ambientais como custo a partir da precificação do carbono com o intuito de mitigar as emissões de GEE.

Rhodes et. al. (2016) desenvolveu uma metodologia que apresenta um cálculo alternativo para o Levelized Cost of Energy (LCOE) ao contabilizar as externalidades ambientais decorrentes das emissões de gases de efeito estufa (GEE) nas diversas fontes de geração de energia. Através deste cálculo do custo nivelado é possível inserir dados de entrada referente às características tecnológicas das instalações e das emissões de poluentes atmosféricos. Os critérios de custos foram considerados com base nas externalidades negativas, para posteriormente serem internalizados nos custos de geração elétrica.

Com todos os dados é possível calcular, através da metodologia do LCOE, um custo social comparativo entre a tecnologia do sistema solar fotovoltaico e de termelétrica a gás natural em dois cenários diferentes para a geração de energia para as escolas públicas do Distrito Federal, o primeiro só com o custo técnico (situação atual), o segundo com o custo técnico acrescido do ambiental a partir do mercado de carbono, o qual é considerado o melhor método inicial de precificação de carbono. Os dados de entrada estão representados em laranja e os de saída em verde (Fig. 4), entre eles está o objetivo do estudo que é avaliar a introdução da precificação do carbono no setor elétrico brasileiro.

Figura 4: Fluxograma da Metodologia.



Fonte: elaborado pelos autores.

O Brasil é um país privilegiado geograficamente, visto que tem grande potencial hídrico e solar, mas os impactos ambientais das hidroelétricas são expressivos, então para mitigar as emissões de GEE e diversificar a matriz elétrica com fontes renováveis, a energia solar é uma opção a ser considerada.

De acordo com o Censo escolar DF de 2020 há 543.833 alunos matrículas no Distrito Federal, sendo 520.026 em escolas públicas estaduais vinculadas a Secretaria de Estado de Educação do DF (SEEDF) e 23.807 na rede particular conveniada. Além disso, tem-se 806 escolas, sendo 10,31% delas na área rural.

3.1 Características dos sistemas de geração de energia elétrica

Para as placas fotovoltaicas foi considerado o período de incidência solar no local de instalação, o rendimento do módulo e o desempenho do sistema (Performance Ratio). Já para a termelétrica a gás natural considerou-se o Fator de Capacidade (FC) fornecido pela EPE (2016), o qual é determinado pela razão entre a produção de eletricidade em um período e a máxima eletricidade que poderia ter produzido nesse mesmo período.

A área para a instalação de painéis fotovoltaicos foi considerada, para fins de simulação, em um estacionamento central do estádio nacional de Brasília, sendo contabilizadas as características do Performance Ratio de painéis solares de tecnologia policristalina instalados levemente inclinados com suas faces voltadas para o norte. O tempo de vida escolhido foi de 25 anos, baseado na garantia fornecida pelos fabricantes dos módulos fotovoltaicos.

3.2 Emissões de gases de efeito estufa

As análises dos ciclos de vida (ACV) contabilizam os GEE emitidos diretamente da geração de eletricidade como também as emissões indiretas, as quais dependem da fonte energética e do combustível utilizado. Para incluir o metano e o óxido nitroso, definiu-se uma padronização a partir do potencial de aquecimento global (GWP) de cada fonte retirado do IPCC (2014) para um horizonte de 100 anos, conforme indicado nas equações (1) e (2). A unidade de equivalência é o CO₂eq.

$$28 \times \text{Emissão de } CH_4 = CO_{2eq} \text{ de } CH_4 \quad (1)$$

$$265 \times \text{Emissão de } N_2O = CO_{2eq} \text{ de } N_2O \quad (2)$$

Fotovoltaica. Para aplicar a LCOE Ambiental, foi utilizado o estudo de Hsu et al. (2012), o qual considera os cálculos de emissões de gases de efeito estufa por unidade de eletricidade gerada (GHG), g/kWh harmonizados de acordo com a equação (3). O parâmetro W é o peso dos gases de efeito estufa produzido em gramas, já I representa a irradiação em kWh/m².ano, n a eficiência do módulo em %, PR o valor de Performance Ratio, LT como sendo o tempo de vida do sistema em anos e A representando a área em m².

$$GHG = W / (I \times n \times PR \times LT \times A) \quad (3)$$

Onde,

GHG = Peso emitido de GEE para cada 1 kWh produzido;

W = Peso dos gases de efeito estufa produzido, em gramas;

I = Irradiação anual, em kWh/m². ano;

n = eficiência do módulo, em %;

PR = Performance Ratio;

LT = Tempo de vida do sistema, em anos;

A = área de cada módulo, em m².

O valor de W é calculado a partir de uma manipulação da equação (4) e da consideração do acréscimo das emissões de metano e óxido nítrico de 6% do valor total de GHG, de acordo com Frank et al. (2005). Logo, o valor de W é calculado por meio da equação (4).

$$W = (GHG \times 1,06) \times I \times n \times PR \times LT \times A \quad (4)$$

Os parâmetros utilizados para determinar W do estudo de Hsu et al. (2012) estão apresentados na Tab. 2.

Tabela 2: Parâmetros utilizados para cálculo de W.

Parâmetros harmonizados	Valores
Quantidade total de GEE por 1 kWh produzido	55 gCO ₂ eq/MWh
Irradiação	1700 kWh/m ² .ano
Eficiência do Módulo Policristalino	17,46%
Performance Ratio	0,75
Tempo de Vida do Sistema	25 anos
Área do Módulo	1 m ²

Com a obtenção do valor do W harmonizado, será calculado os valores de GHG de Brasília para a fotovoltaica aplicando as características dos painéis solares da Tab. 1 no denominador da Eq. 3, considerando o resultado como o valor de emissão total do ciclo de vida para a placa fotovoltaica em tCO₂eq/MWh

Termelétrica a gás natural. Para estimar as emissões de cada GEE na ACV do gás natural utilizou-se a metodologia do National Energy Technology Laboratory (NETL) descrita por Skone (2012). Ela consiste na análise das etapas de aquisição da matéria prima (AMP), transporte da matéria prima (TMP) e instalação para a conversão de energia (ICE). A AMP envolve a extração e o processamento da matéria prima. Já o TMP é composto pela construção e operação dos gasodutos e o escape dos gases. Na ICE constam a construção, operação e descomissionamento da usina. Com os resultados de Skone (2012) verifica-se a precisão das emissões de GEE de acordo com a quantidade de CO₂eq resultante do filtro das publicações de O'Donoghue et al. (2014).

Precificação do carbono. Para precificar o carbono considerou-se os valores do PMR (2020) de preço mínimo de R\$ 20,00/tCO₂eq e o preço máximo é de R\$ 40,00/tCO₂eq, tal precificação serve para demonstrar os reflexos da degradação do meio ambiente na sociedade. Com o repasse desses valores para a sociedade tem como investir em diversas formas de mitigação de problemas relacionados a própria tecnologia, a educação ou a saúde humana, visto que com menos emissão de GEE a qualidade de vida aumenta. Logo, o custo social de carbono (LCOE ambiental) foi descrito pela Eq. (5).

$$LCOE_{amb} = LCOE + \sum \text{Custo de Emissão total } i \quad (5)$$

Sendo:

LCOE = Levelized Cost of Electricity, representando o Custo Privado em R\$;

LCOE_{amb} = Levelized Cost of Electricity Ambiental, representando o Custo Social em R\$;

Custo Emissão Total *i* = Emissão Gerada de CO₂eq para cada tecnologia *i*, valor da externalidade em R\$;

i = Termoelétrica Ciclo Combinado, Painéis Fotovoltaicos;

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2020), o mercado de carbono é um instrumento baseado na quantidade limite de emissões de CO₂ estabelecida por agentes econômicos com atividades mais concentradas, como os setores industriais e energéticos. Este tipo de precificação permite o estabelecimento de permissões de emissões que podem ser leiloadas, vendidas ou

distribuídas gratuitamente entre os agentes econômicos a partir de critérios estabelecidos. Além disso, também permite o uso de créditos de carbono para compensação de emissões de GEE.

3.3 *Levelized cost of energy*

O modelo *Levelized Cost of Energy* (LCOE - Custo Nivelado de Energia) é uma ferramenta para avaliar e construir uma relação de custo privado de diferentes gerações de energia por meio do custo nivelado. É dado pela razão do custo anual da construção e manutenção da fonte energética pela quantidade de eletricidade gerada em sua vida útil. O resultado então é um preço por unidade de energia gerada (\$/MWh).

A Eq. (6) demonstra o custo total do investimento, ajustado pela taxa de juros no período. O $\Pi_{custo\ capital}$ representa os custos capitais da usina energética, em \$/MW. Esta parcela leva em consideração a construção dos gasodutos para as termelétricas de gás natural; $O\&M_{fixo}$ são os custos fixos de operação e manutenção, em \$/MW e é ajustado pelo CRF (fator de recuperação do capital). A parcela $O\&M_{variável}$ representa os custos variáveis de operação e manutenção em \$/MWh, realizados de acordo com o desgaste da usina durante a geração de eletricidade. O preço do combustível, representado por $\Pi_{combustível}$, está em \$/MMbtu.

$$LCOE_a = \Pi_{custo\ capital} * CRF + O\&M_{fixo} * 8760 * CF + O\&M_{variável} + HR * \Pi_{combustível} \quad (6)$$

O resultado da equação é o custo total do empreendimento, já incluso o lucro ajustado pela taxa de juros do período. O custo de operação fixo e o investimento total dependem da quantidade de energia que será produzida de acordo com a potência instalada para que seja possível analisar os gastos e retornos. A outra parcela da razão é composto pela quantidade de horas para um ano (8760) e pelo fator de capacidade médio da vida útil da usina. O preço do combustível representa o insumo utilizado para geração de calor, logo ele é considerado apenas para análise do LCOE da termoeletrica a gás natural neste estudo. Os custos variáveis de operação e manutenção dependem da atividade do sistema e da quantidade de energia que ele produz.

O valor do LCOE técnico usado neste estudo vem do Leilão de Energia Nova A-6 de 18/10/2019 realizado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Com ele tem-se a entrada de um dado preciso que possibilita montar um cenário real para o estudo. O preço médio da venda de energia do leilão para o gás natural é de R\$ 188,87/MWh e de R\$ 84,39/MWh para energia solar fotovoltaica.

3.3 Escolas públicas do Distrito Federal

Segundo o Censo DF Escolar Ano 2020 há 520.026 mil matrículas distribuídas nas 684 escolas vinculadas na rede pública estadual vinculada à Secretaria de Estado da Educação do Distrito Federal (SEEDF). Considerando o consumo médio de eletricidade por aluno de 5,35 kWh por mês apresentado por De Mello (2016), tem-se que o produto do consumo pela quantidade de matrículas é igual a 2.782,14 MWh/mês em todas as escolas vinculadas à Secretaria de Educação do Distrito Federal (DF).

A potência de cada instalação foi calculada. O sistema fotovoltaico necessário para suprir este consumo é de 23 MW, considerando 5,46 horas de Sol Pleno e rendimento do sistema de 75%, produzindo 94,2 MWh/dia. Para uma usina de gás natural de ciclo combinado, ao considerar um fator de capacidade de 0,7, a potência instalada para suprir a energia necessária para as escolas é de 5,6 MW.

Segundo o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2014) o rendimento do painel fotovoltaico é de 17,46% e a potência normatizada é de 1000 W/m². Com isso, a disponibilidade de área por escola é de 165,55 m², o que totaliza 113.233,17 m² para todas as escolas públicas do DF.

4. RESULTADOS

O estudo de caso abordou as escolas públicas do Distrito Federal com o intuito de demonstrar a importância do assunto em diferentes áreas do conhecimento, como a econômica, ambiental, social e política, o que serve de exemplo para as demais capitais do país, visto que educa tanto as crianças quanto as suas famílias a como ter um consumo consciente.

Os resultados encontrados envolvem os custos já conhecidos de energia elétrica adicionados ao custo de externalidade ambiental causado pelas emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de cada um dos tipos de instalação de geração de energia. Tal externalidade vai seguir os preceitos da precificação de carbono presentes no PMR (2020).

Para o cálculo das emissões de GEE considerou-se o estudo de Skone (2012), o qual apresenta as emissões de gases de efeito estufa na aquisição da matéria prima (AMP), no transporte da matéria

prima (TMP) e na instalação para a conversão de energia (ICE), ou seja, em cada etapa do ciclo de vida do gás natural. Assim como o estudo de O'Donoghue et. al. (2014), o qual apresenta os valores em massa por energia e harmoniza os GEE. Tendo como base o estudo de Skone (2012), para usinas termelétricas, e de Prenzushi (2007), para painéis fotovoltaicos, pode-se observar o quanto a emissão de GEE para o ciclo combinado é maior do que fotovoltaica.

A maior parte das emissões de gases de efeito estufa proveniente da energia solar fotovoltaica (Tab. 2) vem da construção da usina, visto que nela há a fabricação, o transporte e a instalação dos painéis. Tais emissões dependem do diâmetro das placas, material utilizado, tecnologia empregada e pureza do silício, como abordado na metodologia. Já as emissões presentes no descomissionamento são causadas pela desmontagem dos materiais, transporte e processamento dos mesmos. As emissões da usina de gás natural ciclo combinado estão apresentadas na Tab. 3.

Ao analisar a emissão total das fontes, nota-se que a usina a gás natural ciclo combinado emite 6,12 vezes mais gases de efeito estufa do que a usina solar. Este impacto ambiental será agora precificado, para que possa refletir no real custo da tecnologia.

Tabela 2: Emissão de gases de efeito estufa (ton/MWh) no ciclo de vida dos sistemas fotovoltaicos.

GEE	Construção	Operação	Descomissionamento	Emissões Totais	GWP 100 anos
CO ₂	4,67E-02	0,00	7,51E-04	4,75E-02	1
N ₂ O	1,12E-04	0,00	1,23E-06	1,13E-04	265
CH ₄	8,16E-05	0,00	3,01E-07	8,19E-05	25
Total CO ₂ eq 100 anos	7,87E-02	0,00	1,09E-03	7,95E-02	-

Fonte: Prenzushi, 2007 – adaptado

Tabela 3: Emissão de gases de efeito estufa (ton/MWh) no ciclo de vida da termelétrica a gás natural ciclo combinado.

GEE	AMP	TMP	ICE	EMISSIONES	GWP 100 ANOS
CO ₂	2,08E-02	3,95E-03	3,93E-01	4,18E-01	1
N ₂ O	6,73E-07	4,93E-09	1,51E-08	6,93E-07	298
CH ₄	1,91E-03	7,69E-04	5,94E-07	2,68E-03	25
Total CO ₂ eq 100 anos	6,88E-02	2,32E-02	3,93E-01	4,88E-01	-

Fonte: Skone (2012).

O custo nivelado de energia considera um fluxo de caixa de 25 anos e a taxa de desconto de longo prazo de 5,32% ao ano, segundo o BNDES. Os dados supracitados fazem parte do LCOE Ambiental, mas a taxa de desconto traz o valor presente no fluxo de caixa.

O consumo anual de energia é de 33.385,67 MWh, as emissões durante os anos seguem os estudos do ciclo de vida de cada tipo de geração de energia, fazendo o produto desses dois fatores tem-se as emissões por ano que, quando precificadas pela fórmula do LCOE, geram o custo da emissão (Eq. 7). Foram consideradas as precificações mínimas e máximas recomendadas, de R\$ 20,00/tCO₂eq e R\$ 40,00/tCO₂eq, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.

$$\text{Custo da emissão} = \text{Emissões} * \text{Precificação} \quad (7)$$

É possível perceber que o custo da energia fotovoltaica ficou relativamente constante, mesmo acrescida a precificação da emissão de gases de efeito estufa. Já para o gás natural houve um acréscimo de 5,2% no valor considerando a precificação mínima recomendada do carbono, e 10,4% considerando a precificação máxima recomendada.

Tendo em vista a urgência climática, montou-se mais dois cenários que consideram a precificação do carbono apresentada pelo MCTIC de R\$ 56,80/tCO₂eq e uma suposição de R\$ 200,00/tCO₂eq, para verificar o quanto tais precificações modificam o custo de cada uma das tecnologias, também apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: LCOE ambiental considerando diversos cenários.

LCOE Ambiental [R\$/MWh]	Leilão	Considerando a precificação mínima recomendada	Considerando a precificação máxima recomendada	Precificação MCTIC	Precificação suposta
Gás natural	188,56	198,32	208,08	216,28	286,16
Energia solar	84,39	85,26	86,13	86,87	93,11

Fonte: elaborado pelos autores.

Ao considerar a precificação recomendada pelo MCTIC, há um acréscimo de 14,7% no custo da energia proveniente do gás natural, contra um aumento de 2,9% na energia solar fotovoltaica. Para o cenário proposto de R\$ 200,00/tCO₂eq, a energia do gás aumenta 51,8%, contra 10,4% da solar. Nota-se como a precificação do carbono auxilia a demonstrar, em resultados econômicos, os ganhos ambientais da utilização de energia limpa.

Visando ilustrar como a precificação das emissões pode auxiliar na tomada de decisões ambientalmente adequadas, considere o estudo de caso das escolas públicas do DF. Em um período

de 25 anos, consumindo 2.782,14 MWh/mês, a emissão total, se suprida por gás natural, será de 407.305 tCO₂eq. Se as mesmas escolas forem supridas por um sistema fotovoltaico de 23 MW, as emissões totais seriam de 66.354 tCO₂eq. A emissão evitada, de 340.950 toneladas, precificada a R\$ 56,80/ tCO₂eq, resulta em um custo ambiental evitado de aproximadamente R\$ 19.000.000,00. Tal valor poderia ser considerado para investimento em fontes renováveis de energia, o que corresponde à cerca de 20% do custo da usina de 23 MW, barateando ainda mais a energia limpa e acelerando, economicamente, a transição energética rumo à emissão nula para meados do século. Trata-se de um círculo virtuoso de estímulo à energia limpa de forma economicamente sustentável.

A redução das emissões ao substituir o crescimento energético, de gás natural ciclo combinado para solar fotovoltaica, promoverá uma emissão evitada total de 340.950 tCO₂eq, o que corresponde à 13.638 toneladas por ano. Considerando que há 520.026 mil alunos que consomem a energia considerada no estudo de caso, cada aluno estará evitando a emissão de 26,6 quilos de CO₂eq ao ter energia solar no telhado de sua escola. Estes são dados práticos que podem ser aplicados nas aulas para melhor conscientização ambiental dos estudantes.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como um de seus objetivos analisar a precificação do carbono nas escolas públicas do Distrito Federal por meio da comparação dos custos nivelados das emissões de gases de efeito estufa na geração de energia elétrica através de usina termelétrica a gás natural ciclo combinado e solar fotovoltaica.

Para avaliação do custo nivelado considerou-se as emissões de GEE da análise do ciclo de vida da termelétrica a gás natural de ciclo combinado e dos painéis fotovoltaicos durante 25 anos. Além disso, foi considerado os dados do Leilão de Energia para o custo técnico e a precificação de carbono indicada pelo projeto PMR tanto para o mercado de carbono quanto para taxaço de carbono.

O estudo de caso abordou as escolas públicas do Distrito Federal com o intuito de demonstrar a importância do assunto em diferentes áreas do conhecimento, uma vez que se pode aproveitar a geração de energia renovável na capital do país em escolas públicas e educar tanto as crianças quanto as suas famílias a como se ter um consumo consciente.

Com isso, a custo nivelado resultante da LCOE Ambiental para a termelétrica a gás natural de ciclo combinado e solar fotovoltaica para precificação mínima de R\$ 20/tCO₂e foi de R\$ 198,32/MWh e R\$ 85,26/MWh, respectivamente, e para precificação máxima recomendada de R\$

208,08/MWh e R\$ 86,13/MWh. Outra conclusão é que o custo nivelado não é a melhor forma de precificar o carbono, visto que ele dilui o custo ao longo do tempo por conta da taxa de desconto.

Como a precificação de carbono ainda está iniciando no Brasil, os valores ainda são teóricos e precisam de tempo para encontrar o equilíbrio no mercado financeiro e começar a mostrar seus primeiros resultados. Entretanto, considerando o mercado de carbono como a melhor maneira de ingressar a precificação pode-se trabalhar com o tipo cap and trade nas escolas públicas para que seja trabalhado as vertentes econômica, ambiental, social e política envolvidas em todo trabalho.

REFERÊNCIAS

BREDEMANN, H. H., FATHEAZAM, S. M., SHAYANI, R. A. Custos da energia termelétrica a gás natural ou fotovoltaica incluindo as externalidades ambientais no setor residencial do Distrito Federal. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, 2020.

CENSO ESCOLAR DF, 2020. Censo 2020 – Dados gerais. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNWYwZDE4YWUtNzUzMC00YmExLTgxZmItN2JjNjJhOTk2ODdmIiwidCI6ImJhMjI5OThiLTQ4ZDctNDc3Zi05MjIjLTA3OTNiNTlkZjIwYyJ9&pageName=ReportSection7dd95adc13612dc82e5c>. Acesso em: 17 de setembro de 2021.

CNI. A precificação de carbono e os impactos na competitividade da cadeia de valor da indústria. Confederação Nacional da Indústria. Brasília, 2020.

DONOUGHUE, P. R. O. et al. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generated from Conventionally Systematic Review and Harmonization. v. 18, n. 1, 2014.

HSU, D. D. et al. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Systematic Review and Harmonization. 2012.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética.,2016. Energia Termelétrica gás natural, biomassa, carvão, nuclear.v. 1, pp. 1 – 417. EPE. Empresa de Pesquisa Energética.,2018 Anuario Estatístico de Energia Elétrica 2018. Disponível em <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>> Acesso em: 06 de março de 2021.

IAE. Key World Energy Statistics. 2017.

IAE. Key World Energy Statistics. 2017. IAE. CO 2 EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION (2012 Edition)-III. p. 1–51, 2012.

IAE World Energy Balances 2018 - <https://webstore.iea.org/world-energy-balances-2018>.

IPCC,Fifth Assessment Report:Global Warming Potential Values.,2014.vol 5.

IPCC, Sixth Assessment Report: The Physical Science Basis, 2021.

LIU, L. C.; WU, G. The effects of carbon dioxide, methane and nitrous oxide emission taxes: An empirical study in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 1044–1054, 2017.

MARANGON LIMA, J. W.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J. A. Efeitos das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica. São Paulo, 2014.

MCTI. Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia_do_clima/painel_intergovernamental_sobre_mudanca_do_clima.html. Acesso em: 30 março. 2021.

NEVES, G. M. SHAYANI, R. A. Precificação da emissão de gases de efeito estufa da energia solar fotovoltaica e da energia termelétrica a gás natural: estudo de caso na Universidade de Brasília. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, 2020.

SANTOS, L.H.M, SHAYANI, R. A. Análise da precificação de carbono para geração de eletricidade a partir de termelétrica a gás natural e energia solar fotovoltaica: estudo de caso para escolas públicas do Distrito Federal.

VINÍCIUS DAVID GUIMARÃES, V. D., SHAYANI, R. A. Aspectos ambientais, sociais e econômicos do estímulo à energia solar fotovoltaica no planejamento energético considerando mudanças climáticas. XI Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Cuiabá, 2018.