



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**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**

AUTORA:

LIZANDRA HONÓRIA MOURA SANTOS

ORIENTADOR: RAFAEL AMARAL SHAYANI

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO/2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PLANEJAMENTO ENERGÉTICO PARA ESCOLAS
PÚBLICAS DO DISTRITO FEDERAL A PARTIR DA
TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL OU ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA CONSIDERANDO A PRECIFICAÇÃO DO
CARBONO**

LIZANDRA HONÓRIA MOURA SANTOS

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

**RAFAEL AMARAL SHAYANI – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
(ORIENTADOR)**

**CARLOS HENRIQUE RIBEIRO LIMA - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
(EXAMINADOR INTERNO)**

**FRANCISCO JAVIER CONTRERAS PINEDA – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 09 DE NOVEMBRO DE 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, Lizandra Honória Moura

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.

ix, 86 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2021)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1. EXTERNALIDADE AMBIENTAL | 2. PLANEJAMENTO ENERGÉTICO |
| 3. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA | 4. TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL |
| 5. PRECIFICAÇÃO DE CARBONO | 6. ESCOLAS PÚBLICAS |
| I. ENC/FT/UnB | II. Bacharel |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, Lizandra H. M. (2021). **PLANEJAMENTO ENERGÉTICO PARA ESCOLAS PÚBLICAS DO DISTRITO FEDERAL A PARTIR DA TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL OU ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA CONSIDERANDO A PRECIFICAÇÃO DO CARBONO.** Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 86 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: LIZANDRA HONÓRIA MOURA SANTOS

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: *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.*

1º/2021: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2021

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

LIZANDRA HONÓRIA MOURA SANTOS
LIZANDRAUNB@GMAIL.COM

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus que em um momento crucial ministrou Miquéias 6:8 e Sofonias 3:17 em meu coração e trouxe a certeza que me guiaria em cada etapa, colocando as pessoas certas para me ajudar e aproveitar esse tempo de formação acadêmica.

Agradeço à minha família, aos meus pais, Sued e Karla por abrirem os caminhos para mim, pelas correções dos deveres de casa, pelos incentivos, livros, orações, inúmeras noites de luzes ligadas até de madrugada, cafés, zelo e amor. Aos meus avós, tios e primos que acompanharam todo o processo com muito amor e proporcionaram momentos de descanso chaves! À tia Thaís, que me mostrou com o seu olhar a Universidade de Brasília, me indicou os melhores professores de cálculo 3 e física e acompanhou de perto cada semestre, transformando cada amigo em um membro da família.

Agradeço também aos meus amigos, Augusto, Fernanda, Luciana e Regina por compartilharem os momentos de alegria, aprendizado, dúvidas, vitórias, almoços, madrugadas de estudo. Vocês foram essenciais para o meu aprendizado pessoal e acadêmico!

Assim como meus pastores e amigos da INSEJEC Sobradinho, os quais suportaram em amor e oração cada período que me ausentei para poder me dedicar completamente a minha vida acadêmica.

À Fundação Nacional de Saúde (FUNASA) e Grupo Silva e Sousa, que ajudaram a formar uma profissional que olha tanto para a empresa quanto para a população e preza pelo melhor atendimento possível.

Aos professores, pelos ensinamentos, correções, conselhos e desafios propostos, que possibilitaram o melhor aprendizado que eu poderia ter. Especialmente ao professor Shayani, por me orientar com tamanha dedicação e paciência, sempre me instigando a conhecer mais cada assunto abordado neste projeto.

Obrigada a todos que participaram, direta ou indiretamente, da minha formação acadêmica, nessas páginas tem um pedaço de cada um!

RESUMO

As mudanças climáticas se tornaram pautas das discussões internacionais devido 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 de energia, o qual é diretamente proporcional com o desenvolvimento da sociedade, por isso ter um planejamento energético que ajuda a reduzir a emissão de tais gases é benéfico para sociedade mundial. Diante disso, 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. A análise feita permite quantificar financeiramente as externalidades ambientais causadas pelos gases de efeito estufa das duas fontes de energia, assim como precificar o carbono envolvido no processo. Conseqüentemente, é possível avaliar a relevância dos impactos de cada forma de geração de energia e se planejar de uma forma que contribua para o desenvolvimento sustentável, visto que o projeto abrange a economia, a sociedade e os recursos ambientais.

O consumo de energia mensal das escolas públicas do Distrito Federal é de 2.782,14 MWh, o que possibilita uma instalação de termelétrica de ciclo combinado com potência de 6 MW e usina solar fotovoltaica da 23MW, em uma área de 113.233,17 m². Para o cálculo do custo nivelado de energia com as externalidades ambientais (LCOE Ambiental), considerou-se o custo do 30º Leilão de Energia Nova de R\$ 188,87 para o gás natural e R\$ 84,39 para energia solar, e os ciclos de vida de cada tecnologia envolvida. Os resultados obtidos foram R\$ 189,24 MWh e R\$ 84,45 MWh para termelétrica a gás natural de ciclo combinado e solar fotovoltaica adotando-se a precificação mínima de carbono prevista no Projeto PMR Brasil, respectivamente, e para a precificação máxima R\$ 189,91 MWh e R\$ 84,51 MWh. Com isso, tem-se que o custo é reduzido para a energia fotovoltaica em comparação com a termelétrica a gás natural de ciclo simples ou combinado quando a externalidade ambiental das emissões de GEE são internalizadas na LCOE.

Palavras-chave: Externalidade ambiental; Planejamento energético; Energia solar fotovoltaica; Termelétrica a gás natural; Precificação de carbono; Escolas públicas.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO GERAL	17
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. Desenvolvimento sustentável	18
3.1.1 Histórico	18
3.1.2. IPCC.....	20
3.1.3. Acordo de Paris.....	21
3.2. Mudanças climáticas e impactos	22
3.2.1. Gases de Efeito Estufa	22
3.2.2. Impactos ambientais	25
3.2.2.1. Temperatura	25
3.2.2.2. Ciclo do carbono e ciclo da água	27
3.2.3. Impactos antrópicos	29
3.2.3.1. Saúde.....	29
3.2.3.2. Educação	30
3.2.3.3. Renda	31
3.3. Contexto energético.....	31
3.3.1. Global.....	32
3.3.2. Brasileiro.....	32
3.4. Energia termelétrica a gás natural.....	33
3.5. Energia solar	37
3.6. Análise de custo.....	40
3.6.1. Estimativa dos custos energéticos sem externalidades	40
3.6.2. Estimativa dos custos energéticos com externalidades.....	44
3.7. Precificação de carbono	48
3.7.1. Formas de precificação	50
3.7.2. O projeto PMR Brasil	51
4. METODOLOGIA	53
4.1 Considerações iniciais	53
4.2 Caracterização da área de estudo	54
4.3 Custo nivelado de energia.....	55
4.4 Cálculo da LCOE.....	56
4.5. Emissões de GEE.....	58
4.6 Precificação de carbono	59

4.6.1.	Mercado de carbono.....	60
4.6.2.	Taxa de carbono.....	60
4.6.3.	Custo social do carbono.....	61
4.7	Emissões.....	62
4.8	Custo do Gás Natural.....	64
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
5.1	Potência instalada.....	65
5.2	Disponibilidade de área.....	68
5.3	Cálculo da LCOE Ambiental.....	69
5.4	Emissões de GEE.....	71
5.5	Custo simplificado da emissão.....	74
5.6	LCOE Ambiental.....	76
5.7	Mercado de carbono.....	79
5.8	Taxa de carbono.....	80
6.	CONCLUSÃO.....	81
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Anomalia de temperatura (°C)	15
Figura 3.2 - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.....	20
Figura 3.3 - Evolução do nível de CO ₂ atmosférico.....	21
Figura 3.4 - Evolução das emissões de CO ₂ em alguns países	23
Figura 3.5 - Atividades que mais produzem GEE de 1990 a 2018.....	24
Figura 3.6 - Emissões de CO ₂ por combustível de 1990 a 2018.....	24
Figura 3.7 - Emissão total anual de CO ₂ por regiões	26
Figura 3.8 - Mudanças na temperatura de 1970 a 2020 em Fahrenheit (°F).....	27
Figura 3.9 - Ciclo do Carbono	28
Figura 3.10 - Ciclo da água.....	29
Figura 3.11 - Emissões de CO ₂ a partir de combustíveis fósseis no mundo.....	32
Figura 3.12 - Perfil esquemático da termelétrica a gás natural.....	34
Figura 3.13 - Produção mundial de gás natural	35
Figura 3.14 - Consumo e produção de gás natural no Brasil	36
Figura 3.15 - Geração de energia solar fotovoltaica no Brasil.....	38
Figura 3.16 - Parque Solar Nova Olinda (PI).....	40
Figura 3.17 - Ganhos de eficiência da política de precificação	49
Figura 3.18 - Iniciativas de precificação de carbono mundiais.....	51
Figura 3.19 - Legenda da figura 3.18.....	51
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia do projeto.	54
Figura 4.2 - Abordagens da precificação de carbono	60
Figura 5.1 – Valores utilizados como características técnicas para instalação.....	66
Figura 5.2 – Comparação das potências instaladas para cada tipo de tecnologia de geração de energia elétrica.	67
Figura 5.3 – Preço do gás natural no Brasil.....	68
Figura 5.4 – Preço do gás natural no Brasil.....	69
Figura 5.5 – Preço da fonte solar fotovoltaica em leilões de energia no mercado regulado.	70
Figura 5.6 – Variação do preço de venda de energia pela CEE ao longo dos anos.....	71
Figura 5.7 – Comparação das emissões de GEE em CO ₂ eq em termelétrica a gás natural e usina fotovoltaica.....	73
Figura 5.8 – LCOE Ambiental para cada tecnologia com a precificação mínima e máxima....	78

Figura 5.9 – LCOE Ambiental para cada tecnologia com a precificação mínima, máxima, do MCTIC e suposta.79

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Fontes de energia e seus principais custos de investimento	41
Tabela 3.2 - Fontes de energia e seus principais fatores de capacidade	42
Tabela 3.3 - Fontes de energia e seus principais custos variáveis.	42
Tabela 3.4 - Fontes de energia e suas vidas úteis.....	42
Tabela 3.5 - Fontes de energia e seus principais custos do combustível.	43
Tabela 3.6 - Valores dos parâmetros.....	43
Tabela 3.7 - Emissão de SO ₂ e seus impactos.....	45
Tabela 3.8 - Emissão de NO _x e seus impactos.	46
Tabela 3.9 - Emissão de CH ₄ e seus impactos.	46
Tabela 3.10 - Danos do CO ₂	47
Tabela 3.11 - Impactos dos materiais particulados.	48
Tabela 3.12 - Componentes e objetivos do PMR.....	52
Tabela 4.13 - Preço médio da venda de energia do Leilão de energia Nova A-6 de 2019.....	58
Tabela 4.14 - Cenários a serem discutidos.....	62
Tabela 4.15 - Parâmetros analisados para energia solar	63
Tabela 5.1 – Potência instalada para cada tecnologia.....	66
Tabela 5.2 - Emissão de GEE nas termelétricas a gás natural	72
Tabela 5.3 - Emissão de GEE no ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos.....	72
Tabela 5.4 - Peso dos GEE produzidos	73
Tabela 5.5 - Cálculo GHG de Brasília.....	74
Tabela 5.6 - Cálculo simplificado do custo da emissão pela termelétrica a gás natural de ciclo combinado.....	75
Tabela 5.7 - Cálculo simplificado do custo da emissão pela energia fotovoltaica	75
Tabela 5.8 - Cálculo simplificado do custo da emissão pela termelétrica a gás natural de ciclo combinado.....	76
Tabela 5.9 – Cálculo simplificado do custo da emissão pela energia solar fotovoltaica.....	76

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACV Análise do Ciclo de Vida

AGEEL Agência De Gerenciamento De Energia Elétrica

AMP Aquisição da Matéria Prima

ANEEL Agência Nacional De Energia Elétrica

BNDES Banco Nacional De Desenvolvimento Econômico E Social

CCEE Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CEBS Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável

CH₄ Metano

CO₂ Dióxido De Carbono

ENOS El Niño, Oscilação Sul

EPA Environmental Protection Agency

EPE Empresa De Pesquisa Energética

GEE Gases De Efeito Estufa

Gt Giga toneladas

Gtco_{2eq} Gigatoneladas De Dióxido De Carbono Equivalente

GW Giga watts

GWh Gigawatts Hora

GWP Global Warming Potencial

HFCs Hidrofluorcarbonetos

ICE Instalação para a Conversão de Energia

IDH Índice De Desenvolvimento Humano

IEA **International Energy Agency**

IPCC **Intergovernmental Panel On Climate Change**

LCOE **Levelized Cost Of Energy**

MME Ministério De Minas E Energia

Mtoe Megatoneladas Equivalente De Petróleo

MW Megawatts

N₂O Óxido Nitroso

NETL **National Environmental Technology Laboratory**

NO_x Óxido De Nitrogênio

ODP Oscilação Decantal Do Pacífico

ODS Objetivos Do Desenvolvimento Sustentável

ONU Organização Das Nações Unidas

P&D Pesquisa E Desenvolvimento

PIB Produto Interno Bruto

PFCs Compostos Perfluorados

PL Projeto De Lei

PNE 2030 Plano Nacional De Energia 2030

PNUD Programa Das Nações Unidas Para O Desenvolvimento.

SIN Sistema Interligado Nacional

TCO₂ Teor de dióxido de carbono

TMP Transporte da Matéria Prima

TWh Terawatts Hora

WWF World Wildlife Found

PMR Partnership for Market Readiness

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas estão cada vez mais presentes em todas as agendas políticas, sociais e econômicas, porque seus impactos são sentidos tanto no presente quanto no futuro. O Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e Painel Internacional 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 (INPE, 2021).

Segundo o IPCC (2007), o efeito estufa é um fenômeno que ocorre naturalmente quando os gases, como o gás carbônico, metano, óxido nitroso e vapor de água se acumulam na atmosfera terrestre. Esses gases bloqueiam parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre, o que gera um balanço de radiação que mantém a vida no planeta.

Todavia, as atividades antrópicas interferem na quantidade natural desses gases presentes na atmosfera, principalmente no ciclo do carbono e da água. Por exemplo, o dióxido de carbono que era retido em reservas naturais é emitido para a atmosfera principalmente pela queima de combustíveis fósseis. Tal atividade contribui para o aumento na temperatura global e afeta, direta ou indiretamente, o equilíbrio dos ecossistemas e o desenvolvimento humano.

Como as mudanças climáticas atingem todos os países, há diversas conferências, agendas, programas e políticas internacionais, que visam mitigar as emissões de GEE, manter o aquecimento global dentro do limite de 2°C e promover um real desenvolvimento sustentável.

De acordo com a Agência Espacial Norte-Americana (NASA), a temperatura média do planeta hoje já é 0,94°C superior ao que era em 1880, o que acarreta no aumento da intensidade e frequência de eventos climáticos extremos, conforme demonstrado na Figura 1.1. Segundo o IPCC, para manter o aquecimento global dentro do limite de 2°C será necessário zerar as emissões líquidas de GEE até o final deste século.

Uma forma de mitigar tais emissões é reduzir o uso de combustíveis fósseis, principalmente no setor energético, que pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2018) é o setor que mais emite GEE. Ele também é o setor que permite o desenvolvimento

econômico dos países, visto que a produção energética é essencial para a infraestrutura necessária para seu avanço.

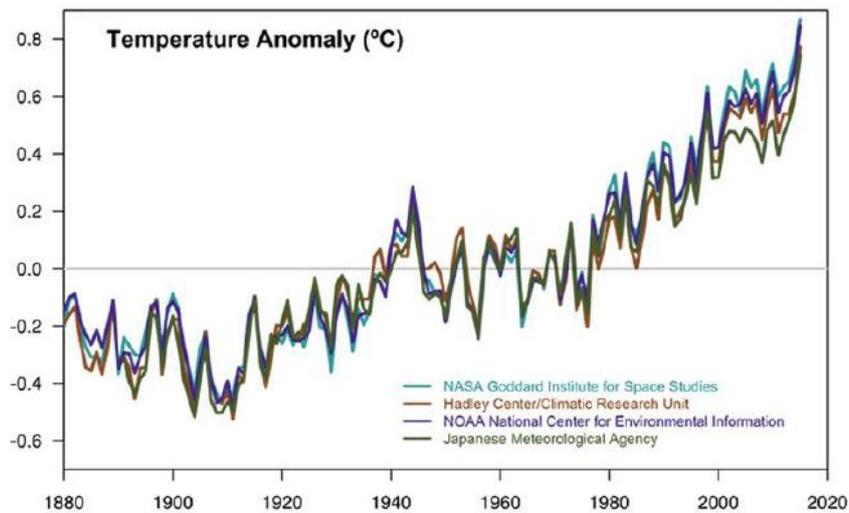


Figura 1.1- Anomalia de temperatura (°C)

Fonte: NASA (2020)

O Brasil é um exemplo de país em desenvolvimento que procura novas fontes energéticas justamente para garantir seu crescimento socioeconômico. 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. Para o MEE (2007), as termelétricas movidas a gás natural eram uma potencial alternativa para diversificação da matriz energética do país devido a elevada disponibilidade do gás no território. Entretanto, ele contribui para as emissões de GEE, visto que desde a sua extração até seu funcionamento há diversos impactos.

A fonte energética de geração solar por painéis fotovoltaicos tem sido cada vez mais adotada mundialmente por ser considerada uma fonte de energia limpa. De acordo com o IAE (2020), em 2019 houve a instalação de 112GW global de sistemas de energia fotovoltaicos.

Mesmo ela sendo uma energia renovável e considerada limpa, é preciso analisar suas contribuições de impactos ambientais durante todo seu ciclo de vida, isto é, sua produção, transporte e descomissionamento das placas fotovoltaicas.

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 taxaçoão do carbono no cálculo do custo nivelado de energia.

2. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral precificar o carbono proveniente da emissão da geração de eletricidade pela usina termelétrica a gás natural e do sistema solar fotovoltaico por meio da precificação do carbono emitido.

2.1.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Comparar o custo da produção energética a partir das termelétricas a gás natural e da energia solar fotovoltaica considerando as externalidades ambientais.
- ✓ Quantificar as emissões de gases poluentes da energia termelétrica a gás natural e da energia solar fotovoltaica.
- ✓ Precificar o custo ambiental de energia elétrica produzida por termelétricas a gás natural e por painéis fotovoltaicos.
- ✓ Avaliar o benefício econômico de se precificar o carbono a fim de diminuir os impactos ambientais causados pela matriz energética.
- ✓ Apresentar a precificação de carbono para as escolas públicas do Distrito Federal.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta o embasamento teórico do estudo com discussões sobre desenvolvimento sustentável, mudanças climáticas, impactos ambientais, contexto energético e análise de custo energético.

3.1.Desenvolvimento sustentável

3.1.1 Histórico

O relacionamento do homem com a natureza mudou ao longo dos séculos, principalmente com o crescimento da população humana. Quando a população era nômade, havia uma dependência total e direta da natureza, todavia a partir do momento que a população se tornou sedentária o sistema econômico também se modificou.

A ascensão da agricultura e da pecuária intensificou a ação antrópica sobre a natureza e possibilitou a aceleração da capacidade produtiva, o crescimento populacional e a expansão tanto da ocupação e uso da terra quanto do conhecimento técnico e científico. Logo, houve uma grande transformação na natureza.

No século XX tem-se os primeiros grandes acidentes industriais, como o acidente nuclear de Chernobyl (Ucrânia) em 1986, que deixaram perceptível que os impactos antrópicos deterioram o meio ambiente e geram um desequilíbrio ao meio ambiente.

Após a Segunda Guerra Mundial criou-se a Organização das Nações Unidas (ONU) com o objetivo de manter a paz, a segurança e a cooperação entre as nações. Em 1972 houve a primeira Conferência da ONU sobre o meio ambiente, já que cada vez mais se tinha desastres ambientais ao redor do mundo.

A conferência de Estocolmo (1972) trouxe a variável ambiental para as políticas de desenvolvimento. A partir dessas discussões montou-se a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, que trouxe a definição de desenvolvimento sustentável no Relatório Brundtland. Com isso, as conferências posteriores sobre o meio ambiente debateram sobre como conciliar o crescimento econômico, político e social com as questões ambientais a fim de mudar o comportamento antrópico frente a natureza.

Segundo o Relatório de Brundtland (1987), o desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras. Ou seja, aumentar a eficiência da produção e do consumo com tecnologias que

não impactem o meio ambiente e garantem formas de manter uma qualidade de vida digna para a toda sociedade, e não somente uma parte dela.

Outro marco importante sobre meio ambiente e desenvolvimento ocorreu em 1992 na chamada Cúpula da Terra. Nesta conferência foram apresentados cinco documentos que alertaram uma urgente necessidade de mudança do comportamento antrópico, sendo eles:

- ✓ Declaração do Rio sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento;
- ✓ Agenda 21;
- ✓ Princípios para a Administração Sustentável das Florestas;
- ✓ Convenção da Diversidade Biológica; e,
- ✓ Convenção sobre a Mudança do Clima (Protocolo de Kyoto).

Diante do supracitado, percebe-se que a preocupação com a degradação ambiental é mundial assim como os esforços para revertê-la, uma vez que seus impactos são sentidos por todos. Por isso, o desenvolvimento sustentável deve estar ligado com o desenvolvimento social, econômico e ambiental.

Diante dessa interação, em 2015 foram estabelecidos os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS), resultantes da Cúpula Rio +20, composto por 17 objetivos (ODS), como exposto na Figura 3.2, e 169 metas que englobam diversas temáticas. Este estudo apresenta uma forma de atingir três desses objetivos:

O objetivo 7: energia acessível e limpa, visto que a energia solar fotovoltaica é uma energia renovável, limpa e sustentável.

O objetivo 8: emprego digno e crescimento econômico, uma vez que há toda uma produção envolvida na construção dos equipamentos, operação e manutenção.

O objetivo 13: combate às alterações climáticas, já que a energia solar não envolve queima de combustíveis fósseis que é uma das principais causas do efeito estufa e do aquecimento global.



Figura 3.2 - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

Fonte: Site Itamaraty, 2016.

3.1.2. IPCC

Em 1988, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) criaram o Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC) com o intuito de monitorar a mudança do clima e propor medidas de adaptação e mitigação.

De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações os Relatórios de Avaliação do IPCC são feitos por três grupos de trabalho, sendo que cada grupo analisa um aspecto diferente da ciência relacionada a mudança climática, como exemplificado abaixo:

- ✓ Grupo de Trabalho I: Base da Ciência Física,
- ✓ Grupo de Trabalho II: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade; e,
- ✓ Grupo de Trabalho III: Mitigação da Mudança do Clima.

Os relatórios abrangem as mudanças climáticas, seus impactos, riscos para gerações futuras e métodos para reduzir a taxa de tais mudanças. Uma das primeiras conclusões dos relatórios foi que essas alterações estão diretamente relacionadas ao aumento das emissões de gases que causam o efeito estufa e, conseqüentemente, aumentam o aquecimento global.

Diversos teóricos concordam que a Revolução Industrial é a responsável pelo aumento da temperatura da Terra, advinda das crescentes emissões de dióxido de carbono (CO₂), principal gás do efeito estufa, Figura 3.3. O aquecimento global altera a mudança no regime de chuvas, secas, ventos e correntes marinhas em todo mundo, e impacta diretamente a economia mundial, por isso deve ser controlado e minimizado. (IPCC,2014)

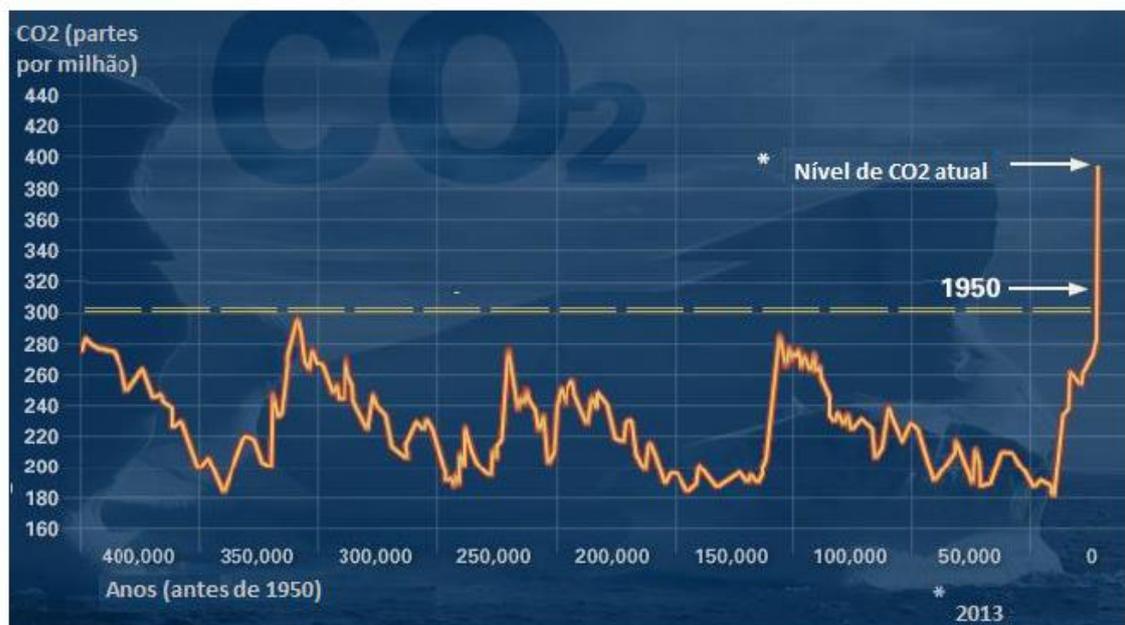


Figura 3.3 - Evolução do nível de CO2 atmosférico

Fonte: PMR, 2017.

3.1.3. Acordo de Paris

Visando reduzir o aquecimento global, 195 países assinaram o Acordo de Paris durante a 21ª Conferência do Clima (COP 21). Esse tratado mundial substituiu o Protocolo de Kyoto e tem como principal objetivo diminuir as emissões de gases do efeito estufa para limitar o aumento médio da temperatura global a 2°C. Segundo o *World Resources Institute* os cinco pontos-chaves do Acordo de Paris são:

- ✓ Alcançar emissões líquidas zero no longo prazo
- ✓ Reforçar os compromissos climáticos de cada país a cada cinco anos;
- ✓ Ajudar os mais vulneráveis;
- ✓ Ser mais transparente; e,

- ✓ Auxiliar países em desenvolvimento através de financiamentos.

O Brasil é um membro ativo e signatário de cada uma dessas conferências e acordos, tanto que segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), 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. Diante disso, um dos compromissos brasileiros é de ter 45% de energia renovável em sua matriz.

3.2. Mudanças climáticas e impactos

3.2.1. Gases de Efeito Estufa

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 (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e o hexafluoreto de Enxofre (SF_6) como sendo os GEE antropogênicos.

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 3.4. Em 1970 o Brasil emitia em seu território 94 milhões de toneladas equivalentes de CO_2 (MtCO_2) e em 2019 essa emissão já era 466 MtCO_2 .

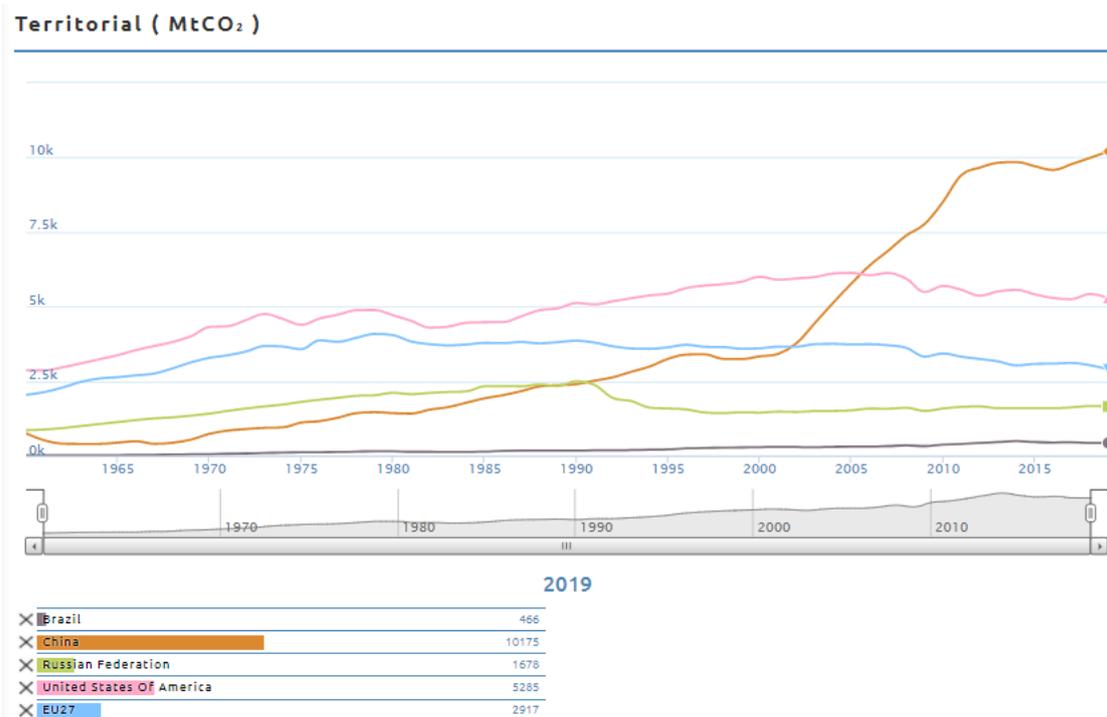


Figura 3.4 - Evolução das emissões de CO₂ em alguns países

Fonte: Global Carbon Project, 2019.

O dióxido de carbono é o gás que mais contribui pro 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).

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 3.5. Por isso, é tão importante encontrar meios de mitigar as emissões de CO₂, principalmente no setor energético para mitigar o aquecimento global.

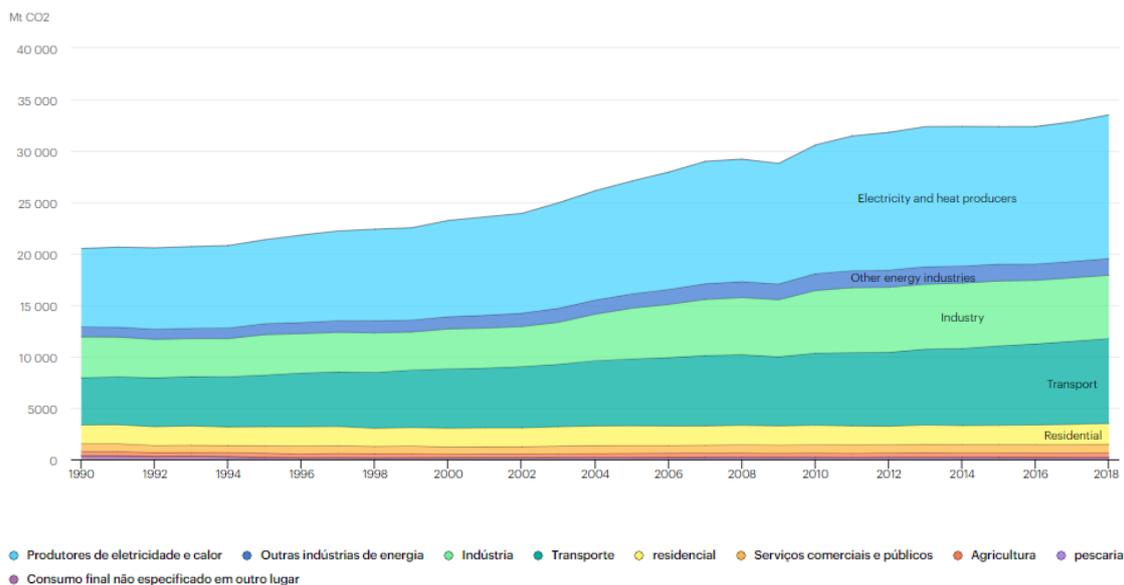


Figura 3.5 - Atividades que mais produzem GEE de 1990 a 2018

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 3.6 ilustra os componentes das emissões de CO₂ por combustível.

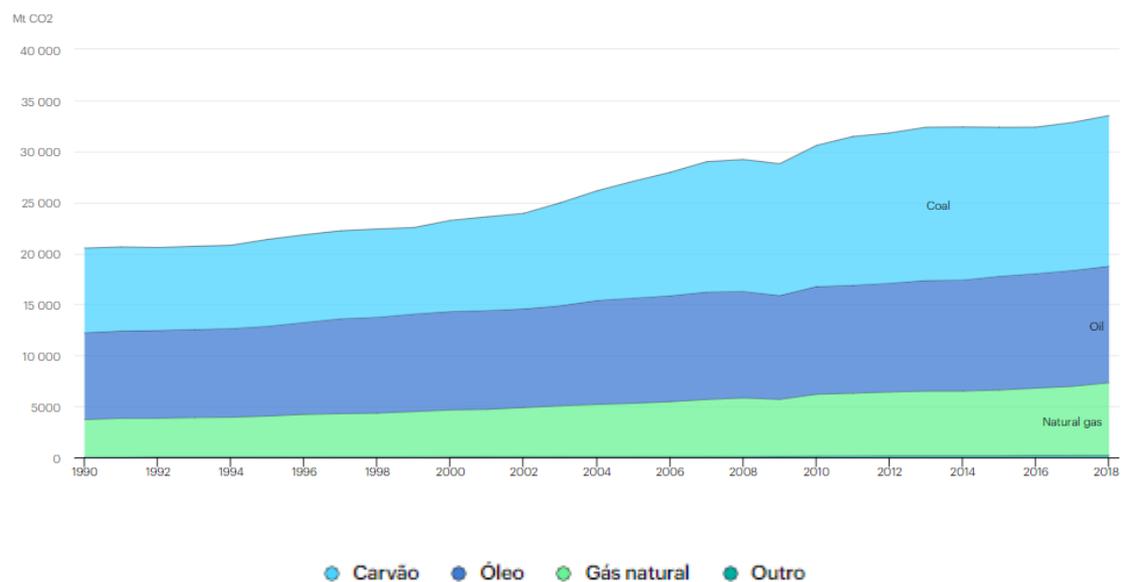


Figura 3.6 - Emissões de CO₂ por combustível de 1990 a 2018

Fonte: IEA, 2018.

3.2.2. Impactos ambientais

3.2.2.1. Temperatura

Os termos clima e tempo andam juntos, tanto que por muitas vezes tem suas definições confundidas. No glossário do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) a definição de clima é o estado médio e comportamento estatístico da variabilidade dos parâmetros do tempo sobre um período. Já o tempo é definido por um conjunto de condições atmosféricas e fenômenos meteorológicos que afetam a biosfera e a superfície terrestre em um dado momento e local, como temperatura, chuva, vento, umidade.

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 emite GEE e colaboram para o aquecimento global e efeito estufa. (INPE, 2021)

Diversas atividades antrópicas para crescimento dos países desenvolvidos utilizaram grandes quantidades de recursos naturais fósseis para produção de diversos produtos. Quando as consequências foram vistas, começou-se a trabalhar com desenvolvimento sustentável, para que os países em desenvolvimento não percorressem o mesmo caminho de degradação ambiental.

A elevada emissão de GEE dos países industrializados impacta o derretimento das calotas polares e conseqüentemente o aumento do nível do mar. De acordo com Roland Gehrels et al. (2016) o nível do mar aumentou cerca de 0,06mm a cada década no século XX. Com esse dado o IPCC (2015) estimou que com a temperatura 1,5°C mais alta, o nível do mar pode chegar 1 metro a mais até 2100. A partir disso vem outras consequências como os ciclones tropicais.

Annual total CO₂ emissions, by world region

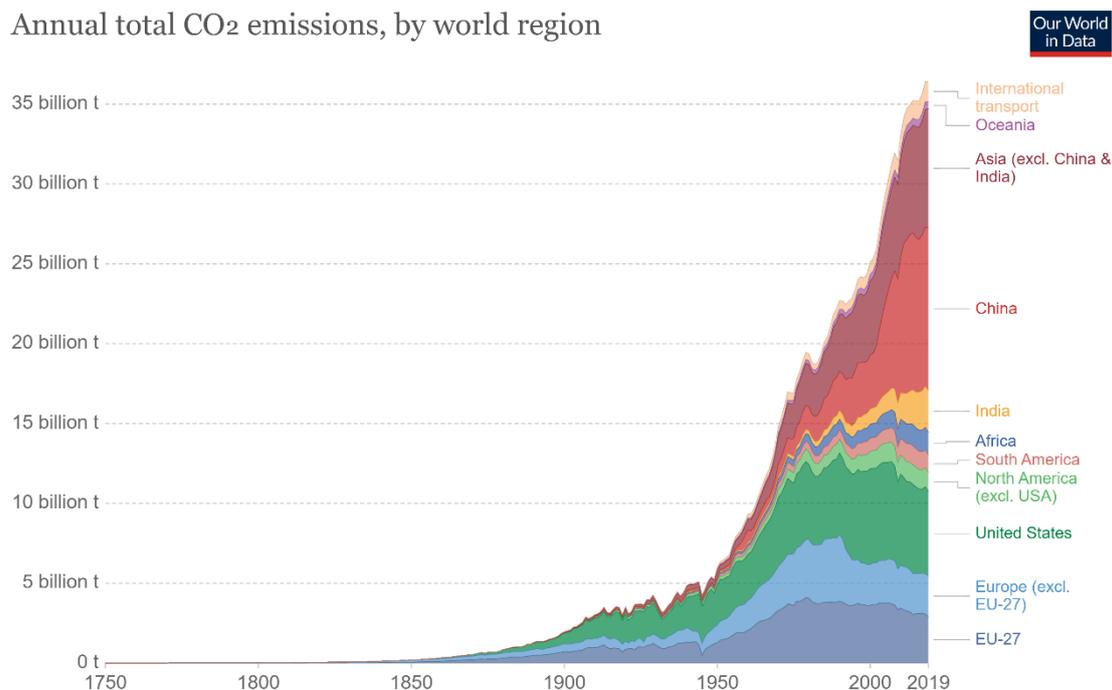


Figura 3.7 - Emissão total anual de CO₂ por regiões

Fonte: Global Carbon Project, 2019.

Os ciclones tropicais são sistemas de baixas pressão de núcleo quente, que se desenvolvem sobre águas tropicais e, às vezes, subtropicais. Logo, com a temperatura do oceano maior, a energia pode vir a desencadear ciclones tropicais mais intensos e furacões, de acordo com o glossário do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.

As mudanças climáticas estão alterando até mesmo as oscilações climáticas naturais, como a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação Sul (ENOS), mais conhecida como El Niño, que também influenciam as mudanças climáticas globais. Por exemplo, o El Niño promove secas no leste e sul da Ásia e aumenta a probabilidade de furacões no Atlântico (UNDP, 2007).

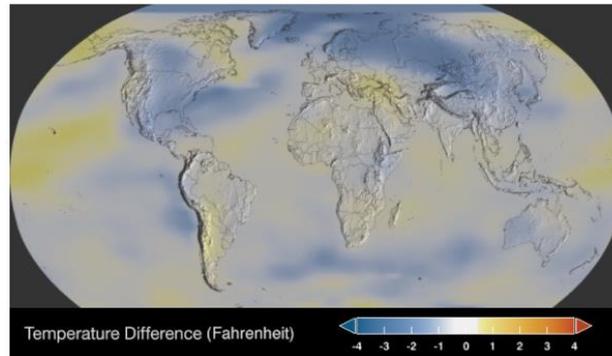
De acordo com o Relatório de Desenvolvimento Humano (2007), as intensidades e frequências desses eventos estão diretamente relacionadas às consequências climáticas causadas por GEE, isso afeta principalmente as regiões mais sensíveis em intensidade e frequência.

A Figura 3.8 demonstra a diferença de temperatura entre 1970 e 2020 em Fahrenheit (°F) que foi influenciada pela emissão de CO₂ durante esses cinquenta anos.

SÉRIE TEMPORAL: 1884 A 2020

1970

Fonte de dados: NASA / GISS
Crédito: NASA Scientific Visualization Studio



SÉRIE TEMPORAL: 1884 A 2020

2020

Fonte de dados: NASA / GISS
Crédito: NASA Scientific Visualization Studio

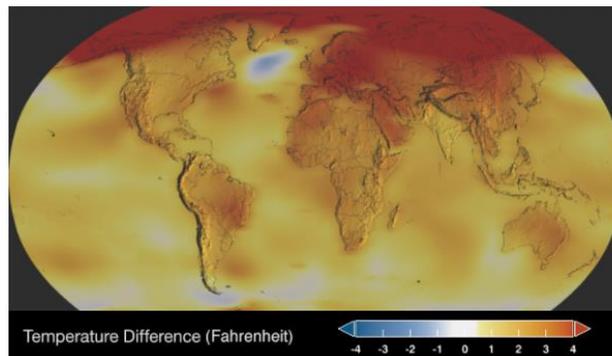


Figura 3.8 - Mudanças na temperatura de 1970 a 2020 em Fahrenheit (°F)

Fonte: NASA, 2020

3.2.2.2. Ciclo do carbono e ciclo da água

O carbono é um elemento que está presente na atmosfera, no oceano e no solo, em forma de carbonato e carvão em rochas sedimentares, sendo que em cada um desses lugares ocorrem processos de troca de carbono que equilibram a vida vegetal e animal, como apresentado na Figura 3.9. Tanto que Leggett (1990) afirmou que a biota vegetal absorve cerca de 102Gt de CO₂ atmosférico pela fotossíntese e libera 50 Gt de CO₂ na atmosfera pela respiração por ano. Já no oceano, os fitoplanctons consomem cerca de 92 Gt de CO₂ e devolvem 90 GT de carbono anualmente, o que gera um resultado líquido de 2 Gt de CO₂ retidos no oceano.

Segundo Pacheco (2006), tanto a variação térmica quanto a variação de concentração de dióxido de carbono em um longo período de tempo são normais, uma vez que as atividades vulcânicas, dissoluções do carbonato e respiração da biota permitem tais variações. Contudo, as variações atuais são provocadas por eventos antrópicos não

naturais e por isso tem comportamentos atípicos que devem ser estudados, monitorados e mitigados.

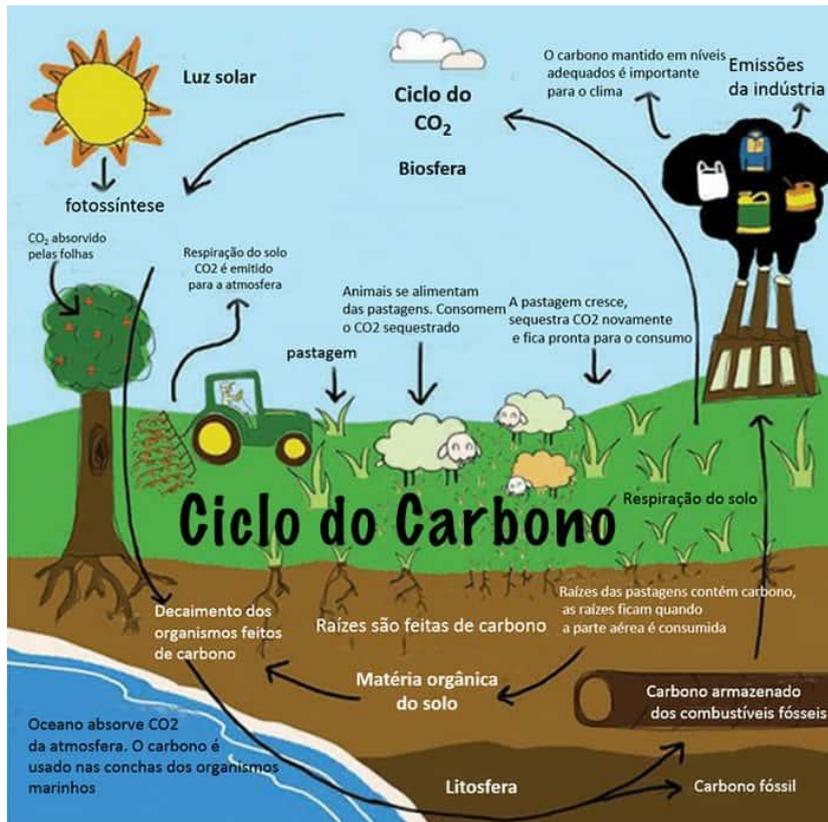


Figura 3.9 - Ciclo do Carbono

Fonte: Grupo Escolar.

Os combustíveis fósseis a base de carvão e carbonetos interferem no equilíbrio natural do ciclo de carbono, visto que há mais emissão do que retirada de CO₂ pela biota e esse déficit causa a alteração climática justamente porque a absorção natural de dióxido de carbono é muito menor do que a quantidade emitida.

Outro ciclo que é muito impactado pelas mudanças climáticas é o ciclo da água, apresentado na Figura 3.10. Os ciclos hidrológicos estão passando por diversas mudanças, principalmente os padrões de chuvas.

Esse ciclo é tão importante que o oceano é tido como parâmetro para analisar o aquecimento global. Isso porque a água mais quente não tem tanto oxigênio dissolvido em sua composição consequentemente ocorre a acidificação do ecossistema marinho, que interfere nos corais. Tanto que se houver o aumento de 2°C na temperatura superficial dos oceanos, haverá um branqueamento de 99% dos corais devido a acidificação.

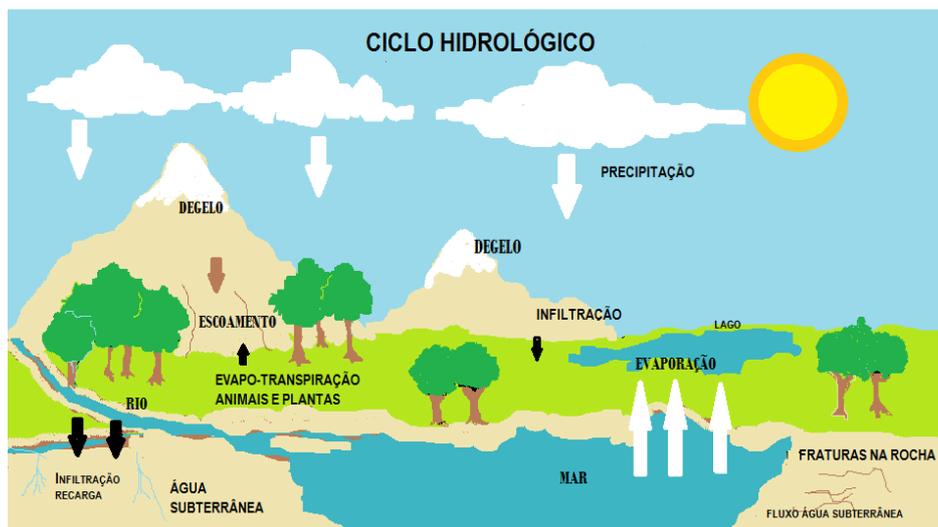


Figura 3.10 - Ciclo da água

Fonte: Observatório histórico geográfico, 2016.

3.2.3. Impactos antrópicos

As alterações climáticas influenciam diretamente o desenvolvimento humano, já que de acordo com o Relatório de Desenvolvimento Humano da ONU ele depende de uma boa saúde, educação e renda.

3.2.3.1. Saúde

O conceito de saúde não envolve apenas a ausência de doença ou enfermidade, mas sim um completo bem-estar. Tanto que a Organização Mundial de Saúde (OMS) afirma que a saúde é um estado completo de bem-estar físico, mental e social. O que faz dela um parâmetro que pode ser afetado pelas mudanças climáticas tanto diretamente quanto indiretamente.

Alguns impactos diretos são fatais, já que provêm de eventos como furacões, ondas de calor, ciclones. Os impactos indiretos são mais silenciosos e participam de uma junção de outros fatores, como a distribuição e acesso a recursos básicos com qualidade. Por exemplo, populações pequenas, com pouco recurso financeiro são mais propensas a desnutrição, desidratação e doenças infecciosas e endêmicas (ERNMENTA; NEL, 2014).

A alimentação também entra nos impactos indiretos das mudanças climáticas no âmbito da saúde devido à má gestão de áreas agricultáveis, ao aumento de zonas mortas nos oceanos para pesca e à extinção de diversas espécies da fauna e da flora. Sanchez (2015) alertou que isso pode gerar um declínio global na nutrição, podendo chegar a 600 milhões

de pessoas com risco de fome até 2080. Esse dado é preocupante porque a desnutrição afeta o desenvolvimento físico e cognitivo de crianças, adultos e idosos.

O 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.

Normalmente famílias de baixa renda acumulam água em tanques ou moram perto de um terreno baldio usado para deposição de resíduos sólidos, esses ambientes são propícios ao mosquito. Segundo o Ministério da Saúde (2010), outras doenças como a dengue, esquistossomose, gastroenterites, hepatite A podem se agravar com secas ou enchentes, fatores que são determinados pelo clima do local.

3.2.3.2.Educação

Neste fator também podemos ver a diferença clara entre países desenvolvidos e não desenvolvidos. Os países desenvolvidos sabem o que são as mudanças climáticas e não querem sofrer ainda mais com suas consequências. Já alguns países não desenvolvidos sabem, mas não conseguem evitar suas ações impactantes e outros ainda nem sabem o que são mudanças climáticas.

O acesso à educação é um fator indireto nos impactos, mas determinante em como se vê o mundo e seu futuro, afinal as mudanças climáticas atingem com mais força àqueles locais sensíveis, como populações ribeirinhas ou litorâneas que tiram seu sustento do ecossistema local.

São essas populações que mais preservam e sabem cuidar do local que vivem, mas que mais sofrem pelos impactos externos que degradam seu ambiente natural. Já que depois, o aumento do nível do mar acaba com boa parte da cidade litorânea ou o rio que dava peixe e turismo para população seca.

Por mais que indivíduos com acesso à educação saibam o que devem fazer para preservação e conservação do meio ambiente, é necessário ter educação para todos. A educação ambiental deve ser ensinada desde a escola primária, a fim de garantir a conscientização tanto dessa geração quanto da geração futura de como se deve tratar o meio ambiente.

3.2.3.3. Renda

As mudanças climáticas começaram justamente pela busca do crescimento econômico. Para se tornar um país desenvolvido é necessário ter uma base econômica muito forte, ou seja, produzir muito e ter recursos para produzir ainda mais. Por muitos anos essa produção foi desenfreada, e por mais que se tenha atingido o status de país desenvolvido a Terra passou a sentir os impactos.

Com uma boa renda a população consegue manter uma boa qualidade de vida, ou seja, se alimentar melhor, ter acesso a boa educação e moradia. O atual custo dos produtos é calculado por diversos fatores, sendo um deles o fator ambiental que normalmente aumenta o custo por envolver outros métodos de produção.

Todavia, o valor ambiental garante a preservação do meio ambiente e não gera tanto impacto, por isso neste trabalho busca-se precificar o carbono a fim de mostrar que o uso de energia solar fotovoltaica não impacta tanto quanto o uso de energia produzida a termelétrica a gás natural.

3.3. Contexto energético

Segundo o IAE (2017), desde 1980 houve um aumento considerável de emissões de CO₂ relacionadas ao desenvolvimento econômico, crescimento populacional e maior demanda energética. Na produção energética tem-se emissão de CO₂ no consumo e queima de gás natural, assim como no consumo de petróleo e de carvão, como mostra a Figura 3.11.

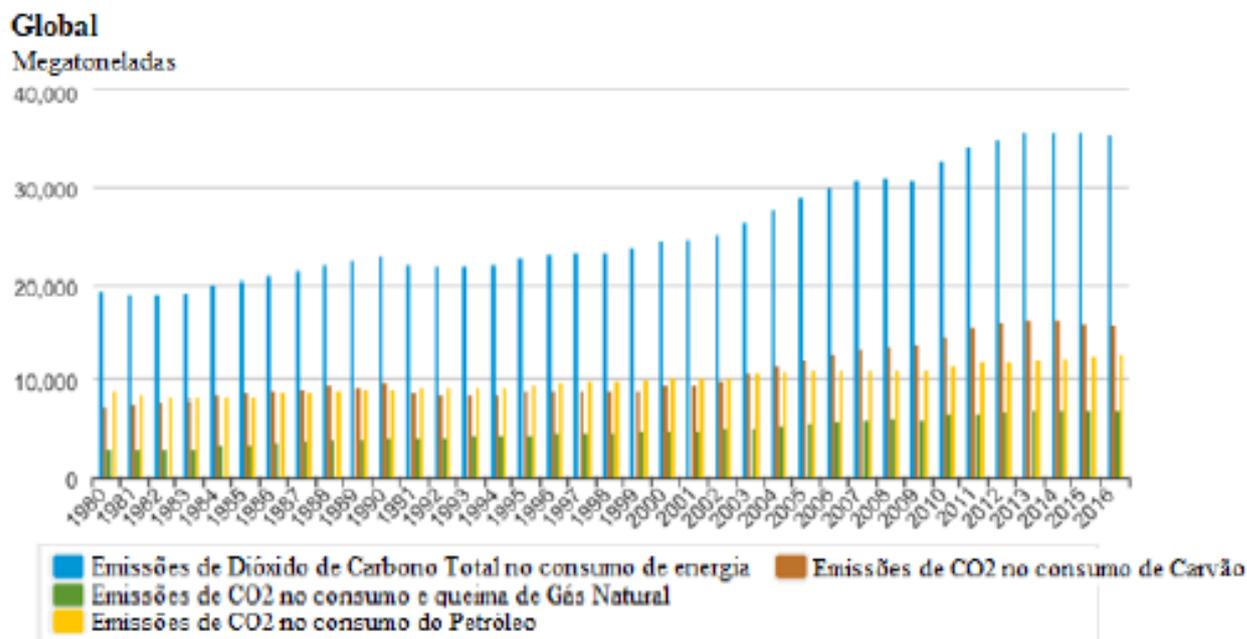


Figura 3.11 - Emissões de CO₂ a partir de combustíveis fósseis no mundo.

Fonte: IAE, 2017.

3.3.1. Global

Os países desenvolvidos produzem e consomem mais energia para manter sua infraestrutura, tanto que em 2016 o IEA comprovou que os seis países com maior geração elétrica foram responsáveis por 73% das emissões de CO₂.

De acordo com Fatheazam e Da Silva (2019), as matrizes energéticas variam de acordo com os recursos e reservas disponíveis no país. Desde a revolução industrial a oferta mundial de energia primária é dominada pela queima de combustíveis fósseis. Da Figura 9, a Índia e a China usam termelétricas como suas principais fontes de energia movidas a carvão e contribuem com 40% nas emissões de CO₂ globais por geração de energia.

Mesmo com todas as conferências sobre mudanças climáticas e acordos, as fontes energéticas mais utilizadas nos países desenvolvidos continuam sendo carvão, gás natural, hidrelétrica, óleo, nuclear e algumas energias renováveis. (IAE, 2016) É justamente esse ponto que não ajuda no combate as emissões de GEE, o crescimento econômico prevalecendo contra o crescimento sustentável.

3.3.2. Brasileiro

O contexto brasileiro de energia é composto por hidroelétricas e termoelétricas, que juntos garantem a eficácia do sistema elétrico. As diversas bacias hidrológicas possibilitam 60%

da produção elétrica brasileira e as termoelétricas são usadas como fonte estratégica de subsidias o sistema elétrico em anos hidrológicos desfavoráveis (MME, 2007).

O Ministério de Minas e Energia prevê que até 2050 haverá um consumo de 1250TWh/ano, isso significa que é necessária uma potência energética adicional expressiva, visto que o consumo em 2017 foi de 526 TWH/ano. Entretanto, as hidrelétricas e as termelétricas, principais componentes do sistema energético brasileiro, já demandam muita área, por isso deve-se diversificar a matriz energética brasileira.

3.4. Energia termelétrica a gás natural

O gás natural é um hidrocarboneto formado a partir da decomposição da matéria orgânica no subsolo terrestre durante milhões de anos, assim como o petróleo. A diferente entre os dois está nas etapas da degradação, sendo que o petróleo provém das primeiras etapas e o gás natural das últimas. Ele é encontrado no subsolo, em rochas porosas isoladas do meio ambiente por uma camada impermeável (MME,2007).

A terceira edição do Atlas de energia elétrica do Brasil produzido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) apresenta dados sobre potenciais de geração de energia elétrica, empreendimentos de geração e transmissão, consumo e demanda de energia elétrica nas diversas regiões e setores de atividade no Brasil.

De acordo com o atlas, o funcionamento das usinas termelétricas é dado pela mistura de ar comprimido com o gás natural para se obter a combustão. Nesse processo há emissão de gases em alta temperatura que provocam o movimento das turbinas conectadas aos geradores de eletricidade. Isto é, a energia térmica se transforma em mecânica e depois em elétrica (ANEEL, 2008). A Figura 3.12 apresenta um perfil esquemático da termelétrica.

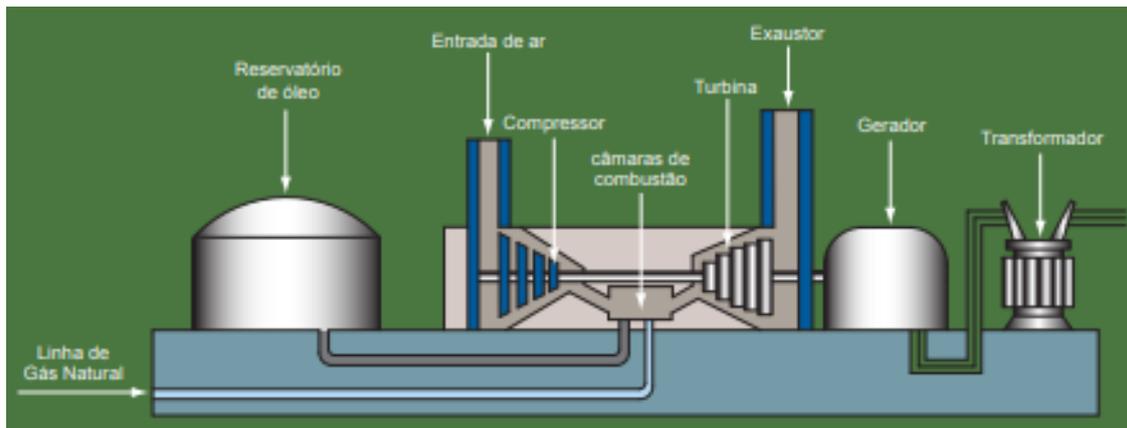


Figura 3.12 - Perfil esquemático da termelétrica a gás natural.

Fonte: ANEEL, 2008.

O gás natural pode ser utilizado de duas formas: geração exclusiva da eletricidade e cogeração, sendo que nessa se extrai o calor e o vapor utilizados em processos industriais. A energia térmica e de vapor são produzidos pelo calor gerado na produção da eletricidade por usinas em ciclo simples que pode ou não liberar gases na atmosfera. O uso do gás natural na termoelétrica pode ser aplicado em ciclo simples (aberto) ou combinado (fechado).

Quando o ciclo é simples, os gases são resfriados e liberados na atmosfera por uma chaminé, mas quando o ciclo é combinado os gases são transformados em vapor e direcionados novamente as turbinas, fazendo-as funcionar. Ou seja, neste ciclo a operação das turbinas ocorrem tanto a gás quanto a vapor (ANEEL, 2008).

A exploração do gás natural se intensificou justamente por ele ser uma fonte alternativa menos agressiva ao meio ambiente do que o petróleo. Entretanto, ele também se destaca pela versatilidade, visto que pode ser utilizado tanto na geração de energia elétrica quanto em motores de combustão, na produção de chamas, calor e vapor.

O atlas também apresenta os países com as maiores reservas de gás natural, assim como os países produtores e consumidores. De acordo com os dados de 2008, a Rússia tinha a maior reserva e era a maior produtora, mas os Estados Unidos era o grande consumidor, o Brasil aparece como quadragésimo em reserva e produção, mas trigésimo em consumo. A produção mundial de gás natural está em alta, como é demonstrado na Figura 3.13.

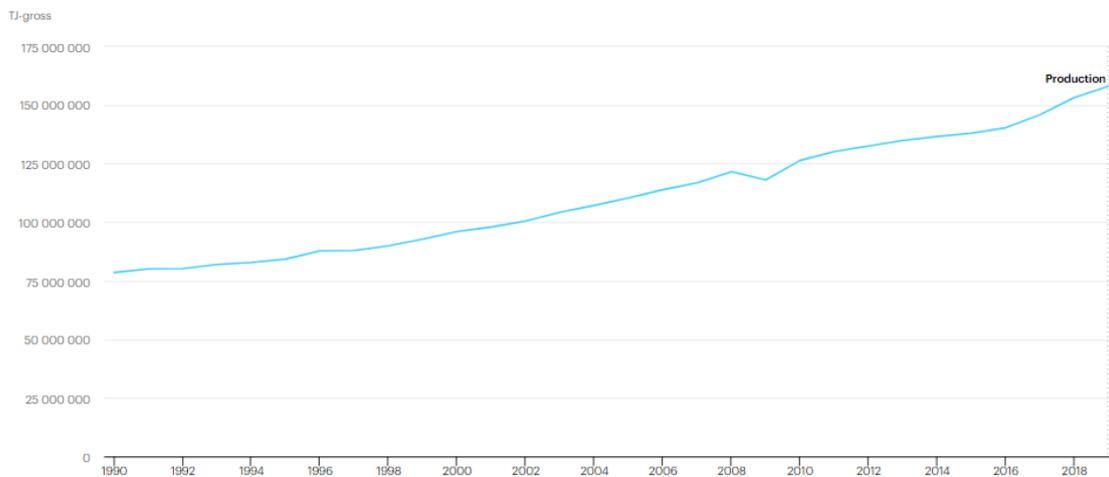


Figura 3.13 - Produção mundial de gás natural

Fonte: IEA, 2018.

Com esses dados é possível perceber que o comércio internacional faz o mercado do gás natural, o que o torna um pouco instável porque se o país fornecedor precisa de mais gás em seu território ele não exporta para os outros países. Um exemplo disso foi a redução dos volumes de gás natural enviados para o Brasil pela Bolívia e Argentina em 2007, que comprometeu o funcionamento das termoeletricas no período de seca, que é justamente o período de mais uso delas a fim de preservar a água dos reservatórios das hidroelétricas.

Fatheazam e Da Silva (2019) discutiram a relação entre reserva e produção de gás natural em diferentes países, afirmando que as políticas entre os países detentores de reservas complementam as políticas dos países consumidores. Isto é, quando a importação da matéria bruta não é suficiente para a demanda local o país pode comprar mais gás natural de outros países produtores.

Em 2017 o consumo de gás natural na América do Sul foi um pouco menor do que sua produção, mas no Brasil houve mais consumo que produção. O gráfico abaixo mostra o comportamento de produção e consumo brasileiro em períodos de crise econômica (2008) e de racionamento energético (2014/2015).

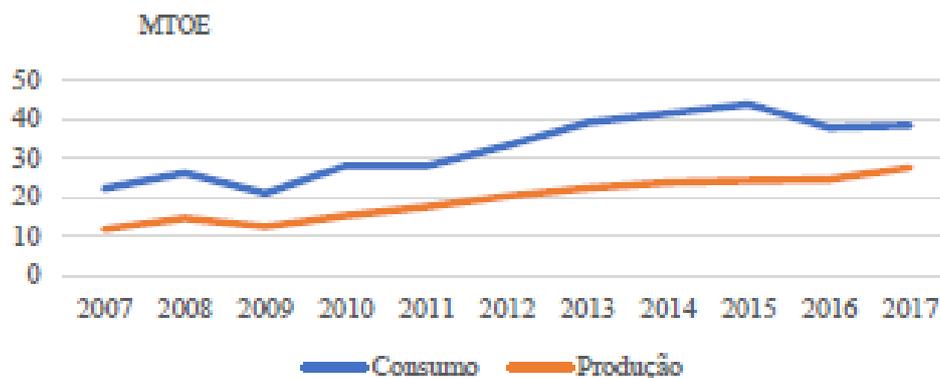


Figura 3. 14 - Consumo e produção de gás natural no Brasil

Fonte: BP, 2018.

Como já foi dito anteriormente, o Brasil importa gás natural da Bolívia. O transporte do gás ocorre por gasodutos até as centrais de distribuição de ambos países, são 3.150 quilômetros de gasodutos distribuídos ao longo da costa do Oceano Atlântico, com ramificações no eixo do Centro-Oeste pelo gasoduto Brasil-Bolívia. Esse tipo de transporte é o mais econômico para grandes volumes de gás natural em regime de fornecimento contínuo ocorrendo a altas pressões, de acordo com o MME.

Essa fonte de energia ainda é subdesenvolvida em território brasileiro, mas sua produção é cada vez mais crescente. 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.

Em 2009 foi aprovada uma Lei específica para o gás natural, a Lei nº 11.909, que tinha como objetivo incentivar a entrada de agentes privados no setor de transporte do gás natural para expandir sua malha de gasodutos. A ideia era criar um mercado competitivo, mas não deu certo porque a Petrobrás era membro ativo em todos os segmentos relacionados à produção, ao transporte e ao fornecimento e distribuição do gás natural.

Na perspectiva ambiental, o uso do gás natural é melhor do que o petróleo porque ele emite menos GEE. Seus principais poluentes são CO₂, N₂O, mas podem ser encontrados também monóxido de carbono, metano e alguns hidrocarbonetos de baixo peso molecular. Por mais que ele seja mais limpo, ainda existem diversos impactos ambientais

causados por ele, como exploração e degradação do solo, vazamento do óleo no ambiente marinho e dispersão dos poluentes no ar (ANEEL, 2008).

3.5. Energia solar

Segundo o Plano Nacional de Energia 2030, a energia solar chega à terra nas formas térmica e luminosa, e sua irradiação por ano na superfície da Terra é suficiente para atender milhares de vezes o consumo anual de energia mundial. Entretanto, a Terra não recebe a radiação uniformemente, visto que existe a influência da latitude, estação do ano e condições atmosféricas.

Quando a energia solar passa pela atmosfera terrestre ela se manifesta sob a forma de luz não visível de raios infravermelhos e ultravioleta. Os equipamentos usados para captar a luz determinam qual será o tipo de energia obtida e utilizada, podendo ser térmica ou elétrica.

De acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2008), existem dois sistemas para produção de energia elétrica o heliotérmico e o fotovoltaico. No sistema heliotérmico, a irradiação solar é coletada, convertida em calor, transportada, armazenada e convertida em eletricidade. Esse sistema é mais utilizado em locais com alta incidência de irradiação solar direta, como o semiárido brasileiro. Já no sistema fotovoltaico, a transformação da radiação solar em eletricidade é direta através de um material semicondutor, geralmente o silício, que quando estimulado pela radiação, permite o fluxo eletrônico de partículas positivas e negativas. O Plano Nacional 2030 explica as células fotovoltaicas como:

As células fotovoltaicas têm, pelo menos, duas camadas de semicondutores: uma positivamente carregada e outra negativamente carregada, formando uma junção eletrônica. Quando a luz do sol atinge o semicondutor na região dessa junção, o campo elétrico existente permite o estabelecimento do fluxo eletrônico, antes bloqueado, e dá início ao fluxo de energia na forma de corrente contínua. Quanto maior a intensidade de luz, maior o fluxo de energia elétrica. Um sistema fotovoltaico não precisa do brilho do sol para operar. Ele também pode gerar eletricidade em dias nublados.

O interesse por essa fonte energética perpassou pela visão econômica e ambiental, visto que na década de 70 o desenvolvimento das placas solares foi uma forma de sair da crise econômica e agora a implementação da energia solar é uma forma de reduzir as emissões de GEE.

Segundo o IEA (2018), o Brasil ainda está em processo de desenvolvimento de políticas para produção e uso do sistema solar fotovoltaico, mesmo sendo um país com alto potencial solar. A média anual de irradiação solar no Brasil é de 1.534 kWh/m² a 2.264

kWh/m², tal irradiação começou a ser melhor aproveitada para geração de eletricidade a partir 2012 com a Resolução Normativa da ANEEL n° 482. A Figura 3.15 demonstra esse crescimento da energia solar fotovoltaica.

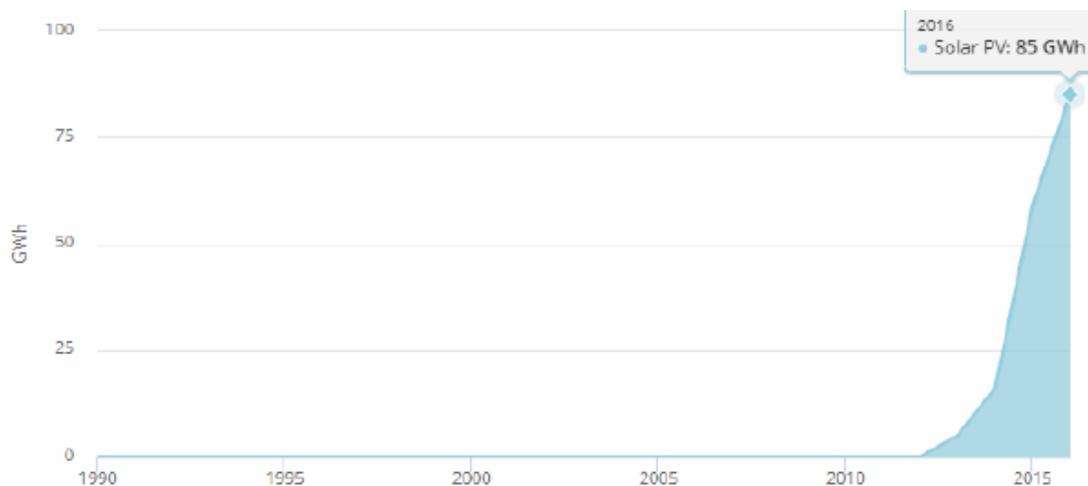


Figura 3.15 - Geração de energia solar fotovoltaica no Brasil

Fonte: IEA, 2018

De acordo com o MME, após o Acordo de Paris, o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de GEE em 37% e 43% nos anos de 2030 e 2050, respectivamente. Contudo, para atingir esse objetivo o país deve ter 40% de energias renováveis em sua matriz energética até 2030.

A geração de energia por sistemas solares fotovoltaicos é uma das opções que o Brasil tem para desenvolver, visto que ela cresceu mais de cinco vezes entre 2014 e 2016. Ao considerar apenas a faixa de melhor irradiação (6,0 a 6,2 kWh/m²) em áreas já antropizadas, pode-se instalar 307 GWp em centrais fotovoltaicas, com geração aproximada de 506 TWh/ano. Considerando as projeções para 2050, essas grandezas são extremamente significativas (EPE, 2018).

O uso da energia fotovoltaico pode acontecer por dois sistemas, o sistema isolado e o distribuído. Para locais remotos, o melhor sistema é o isolado, visto que ele funciona como geração e consumo independente. A geração de energia alimenta diretamente a demanda energética local, o que possibilita o uso de baterias individuais para armazenar o excedente de energia produzida durante o dia. O sistema distribuído é melhor aproveitado em redes de distribuição, como condomínios residenciais porque ele aumenta a capacidade de todo sistema energético.

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.

Os impactos ambientais dos painéis fotovoltaicos são analisados a partir do ciclo de vida dos produtos que os compõem, desde a emissão de carbono, demanda energética, até o uso de água para sua produção. Abbasi e Abbasi (1999) listaram alguns impactos desses painéis, sendo eles: poluição das águas pluviais referentes as substâncias tóxicas nas placas solares, geração de resíduos não recicláveis, compactação do solo para nivelamento do local de instalação das placas, alteração do microclima local devido ao desvio de ventos e mudança da paisagem.

Os painéis mais antigos tinham cádmio e telúrio em sua fabricação, compostos que ao terem contato com a água se tornam poluentes. Atualmente os processos industriais já são capazes de controlar o contato da água com esses componentes tóxicos. Irena (2017) considerou fomentar o uso das placas de silício a fim de reduzir tanto seu preço de mercado quanto esse tipo de impacto ambiental.

Todavia, segundo Padoan, Altimari e Pagnanelli (2018) o baixo custo do silício influenciaria na recuperação do material de placas antigas pelos processos de reciclagem, assim como a heterogeneidade das placas. Outra consideração sobre a geração de resíduos foi tratada por Jordan e Kurtz (2012), os quais salientam o aumento do descarte das placas a partir de 2035 nos aterros sanitários. Estes locais devem considerar os impactos da lixiviação dos produtos antioxidante, anticongelamento e de refrigeração existentes no painel que pode acontecer após as chuvas e contaminar o solo e os corpos hídricos.

Os outros impactos relacionados por Abbasi e Abbasi (1999) podem ser vistos nos parques fotovoltaicos, como pode ser visto na Figura 3.16, local com grandes quantidades de placas fotovoltaicas, já que neles há a necessidade de compactar o solo para nivelar as placas, o que aumenta o risco de erosões. Além disso, precisa-se aplicar herbicidas para impedir o crescimento de plantas onde as placas serão colocadas.

Outra consequência dos parques fotovoltaicos é o sombreamento, que altera o habitat de organismos vivos do solo e o microclima local, devido ao desvio de ventos e mudança de paisagem.



Figura 3.16 - Parque Solar Nova Olinda (PI)

Fonte: Instalo solar, 2018.

É importante ressaltar que os impactos supracitados são vistos nas construções de indústrias geradoras de eletricidade, porque de acordo com Hastik et. al. (2015) não há impactos ambientais na fase de operação de sistemas fotovoltaicos em edifícios, somente na sua fase de instalação com os impactos visuais.

3.6. Análise de custo

3.6.1. Estimativa dos custos energéticos sem externalidades

Com a ascensão do desenvolvimento sustentável os Empreendedores passaram a considerar os aspectos sociais, econômicos e ambientais de seus produtos. No âmbito da geração de energia elétrica, a escolha das alternativas de expansão de capacidade instalada depende dos custos de construção, operação, manutenção e fatores de desempenho.

Para a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016) a metodologia mais adequada para avaliação e comparação da competitividade econômica de diferentes tecnologias é a *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) que calcula o custo nivelado da eletricidade.

O LCOE é dado pela 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. Ou seja, a receita obtida com a produção de eletricidade ao longo da

vida útil da usina descontada do valor presente deve ser igual a todos os custos incorridos com a usina desde sua construção até seu descomissionamento (EPE, 2016).

De acordo com o IPCC e com a EPE, os principais parâmetros para o cálculo do LCOE para as termoeletricas 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.

- ✓ **Custo de investimento:** está associado à construção do empreendimento, por isso inclui os estudos de viabilidade, obras civis, equipamentos mecânicos, elétricos e controles, montagem, comissionamento da planta e conexão elétrica à rede de transmissão.

- ✓ **Fator de capacidade:** é um parâmetro básico definido pela relação entre a potência instalada e a geração da fonte energética ao longo de um certo período de tempo, podendo ser mensal, trimestral ou anual.

Tabela 3.1 - Fontes de energia e seus principais custos de investimento

Fonte de energia	Principais custos de investimento
Termoeletrica a gás natural	- Turbinas a gás e a vapor; - Geradores elétricos; e, - Caldeira de recuperação de calor.
Energia solar fotovoltaica	- Depende da localização, configuração, tipo e tamanho do sistema.

Fonte: EPE (2016)

Tabela 3.2 - Fontes de energia e seus principais fatores de capacidade

Fonte de energia	Fator de capacidade
Termoelétrica a gás natural	- Calculado a partir do poder calorífico do combustível e da eficiência do processo de transformação.
Energia solar fotovoltaica	- É influenciado pela localização dos painéis fotovoltaicos.

Fonte: EPE (2016)

- ✓ **Custo de operação e manutenção:** de acordo com o IPCC esses custos são classificados como fixos e variáveis. Os custos fixos são aqueles que não variam com o fator de capacidade ou o número de horas de operação, mas sim com a mão de obra e encargos mensais de operação. Já os custos variáveis são diretamente proporcionais à quantidade de energia produzida.
- ✓ **Vida útil:** este parâmetro depende da tecnologia e do combustível utilizado e afeta a viabilidade econômica dos projetos positivamente, visto que quanto maior seu valor, menor é o custo da energia gerada.

Tabela 3.3 - Fontes de energia e seus principais custos variáveis.

Fonte de energia	Custo variável
Termoelétrica a gás natural	- Consumo de água; - Consumo de lubrificantes; e, - Tratamento de água.
Energia solar fotovoltaica	- Nulo

Fonte: EPE (2016) e IPCC (2014)

Tabela 3.4 - Fontes de energia e suas vidas úteis.

Fonte de energia	Vida útil
Termoelétrica a gás natural	De 20 a 40 anos
Energia solar fotovoltaica	25 anos

Fonte: EPE (2016)

- ✓ **Custo do combustível:** é um dos fatores que mais impactam no custo final da energia gerada pelas termelétricas.

Tabela 3.5 - Fontes de energia e seus principais custos do combustível.

Fonte de energia	Custo do combustível
Termoelétrica a gás natural	- Gasto para aquisição do gás natural; - Eficiência térmica da planta.
Energia solar fotovoltaica	- Nulo

Fonte: EPE (2016)

- ✓ **Taxa de desconto:** reflete os interesses de remuneração do capital dos investidores. De acordo com Rhodes, et al (2017), o capital inicial para financiar a instalação dos projetos de geração de energia elétrica geralmente vem de empréstimos que são condicionados pela vida útil do empreendimento e pelas taxas de juros aplicáveis.

Os valores dos parâmetros segundo o IPCC e a EPE estão indicados na tabela abaixo. Percebe-se que o custo nesse processo não considera as externalidades envolvidas nos dois empreendimentos.

Tabela 3.6 - Valores dos parâmetros.

Fonte energética	Fonte	Custo do Investimento (USD/kW)	Fator de Capacidade (%)	O&M Variável (USD/MWh)	O&M Fixo (USD/kW. Ano)	Vida útil (anos)	Custo Combustível (USD/mmBTU)	Taxa de desconto (%)
Gás Natural	EPE	900 - 1300	70	6	18	30	10	8
	IPCC	550 - 1100 - 2100	85	0 - 3,2 - 4,9	0 - 7 - 39	30	3,59 - 13,25	5 - 10
Solar Fotovoltaica	EPE	2633	15,7 - 18,5	N/A	26,33	20	N/A	6
	IPCC	2200 - 4400 - 5300	N/A*	N/A	17 - 37 - 44	25	N/A	5 - 10

Fonte: EPE (2016) e IPCC (2014)

Legenda:

N/A: parâmetros que não se aplicam a tecnologia.

N/A*: não se encontrou dados sobre o parâmetro na bibliografia utilizada.

3.6.2. Estimativa dos custos energéticos com externalidades

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).

Os parâmetros de externalidade ambiental analisados foram o dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e material particulado (MP_{2,5} e MP₁₀).

- ✓ **Dióxido de enxofre (SO₂):** é um gás tóxico e incolor que pode ser emitido tanto por processos naturais, como vulcões, quanto por processos antrópicos, como queima de combustíveis fósseis. Em 2018 o Ministério do Meio Ambiente apontou que as atividades antrópicas que apresentam as emissões de SO₂ mais significativas são geração de energia, uso veicular e aquecimento doméstico.

Tabela 3.7 - Emissão de SO₂ e seus impactos.

Emissão de SO ₂	Fontes	Impactos
Meio ambiente	Vulcões	- Em altas concentrações altera o habitat; - Contribui para formação de chuva ácida; - Auxilia na formação de outros óxidos de enxofre, que podem formar MP.
Saúde humana	Queima de combustíveis fósseis	- Dificuldades ao respirar; - Agravamento de doenças respiratórias.

Fonte: EPA (2018) e Rhodes, et al. (2017)

- ✓ **Óxidos de nitrogênio (NO_x):** são gases poluentes com altas taxas oxidação. Seu principal agente é o dióxido de nitrogênio (NO₂), que influencia diretamente o efeito estufa. Os impactos ambientais causados por esses gases são fluidos, se distribuem ao redor da Terra, já os impactos antrópicos são pontuais, totalmente concentrados nos centros urbanos.
- ✓ **Metano (CH₄):** é um gás que captura radiação com muita facilidade, mas que não vive tanto na atmosfera quanto o CO₂. De acordo com a EPA (2018), comparando-se a mesma quantidade de metano e dióxido de carbono vê-se que o metano é 25 vezes mais impactante para a camada de ozônio para um período de 100 anos.
- ✓ **Dióxido de carbono (CO₂):** é um gás natural, presente na atmosfera a partir do ciclo do carbono. As atividades antrópicas acrescentam carbono nesse ciclo e influenciam na captura de carbono nos ambientes naturais.
Assim como os outros poluentes, suas principais fontes antrópicas são a queima de combustíveis fósseis para produção energética e transporte, processos industriais e mudanças de uso e ocupação do solo. (EPA,2018).

Tabela 3.8 - Emissão de NO_x e seus impactos.

Emissão de NO_x	Fontes	Impactos
Naturais	<ul style="list-style-type: none"> - Vulcões; - Bactérias; - Descargas elétricas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Contribuição para formação de chuva ácida; - Contribuição para o aumento de eutrofização nos corpos hídricos; - Agravamento do efeito estufa.
Antrópicas	<ul style="list-style-type: none"> - Queima de combustíveis fósseis em automóveis e na produção energética. 	<ul style="list-style-type: none"> - Agravamento de doenças e infecções respiratórias

Fonte: EPA (2018)

Tabela 3.9 - Emissão de CH₄ e seus impactos.

Emissão de CH₄	Fontes	Impactos
Meio ambiente	<ul style="list-style-type: none"> - Atividades vulcânicas; - Degradação de matéria orgânica. 	Agravamento do efeito estufa
Saúde humana	<ul style="list-style-type: none"> - Vazamento de sistemas de gás natural; - Criação de gado em larga escala. 	Agravamento do efeito estufa

Fonte: EPA (2018) e Rhodes, et al. (2017)

Tabela 3.10 - Danos do CO₂.

Parâmetros considerados para cálculo do custo da emissão de CO₂	Danos
CO ₂	- Associados à queima do combustível, operação, manutenção e insumos energéticos para extração do combustível; - Varia de acordo com a vida útil da tecnologia de produção energética.
CO ₂ Downstream	- Associados ao ano que a planta energética é descomissionada; - Considera que os danos futuros causados pela emissão de CO ₂ são maiores que os atuais.
CO ₂ Upstream:	- Associados ao ano que a planta energética é construída, assumindo que todo CO ₂ seja emitido atualmente.

Fonte: Rhodes, et al. (2017)

- ✓ **Material particulado (MP_{2,5} e MP₁₀):** o material particulado é formado pela mistura de partículas suspensas no ar de diferentes fontes, tamanhos, composições e propriedades. Segundo a EPA (2004), ele é o poluente atmosférico mais associado a danos à saúde tanto em estudos clínicos epidemiológicos quanto experimentais, visto que sua composição vai de poeira e fuligem a metais pesados. O material particulado é dividido em duas classes de acordo com seu diâmetro, as partículas inferiores a 2,5 micrometros são representadas por MP_{2,5}, e as partículas inferiores a 10 micrometros são as MP₁₀. As fontes de MP são canteiros de obras, vias não pavimentadas, chaminés, incêndios e queima de combustíveis fósseis.

Tabela 3.11 - Impactos dos materiais particulados.

Fontes	Tamanho da partícula	Impactos
- Canteiros de obras; - Vias não pavimentadas; - Chaminés; - Incêndios; - Queima de combustíveis fósseis.	MP _{2,5}	- Acidificação de corpos hídricos; - Alteração do equilíbrio de nutrientes nos corpos hídricos; - Dissipação de nutrientes no solo; - Redução de visibilidade devido formação de neblinas.
	MP ₁₀	- Agravamento de doenças pulmonares ou cardíacas; - Ataques cardíacos não letais; - Arritmias; - Agravamento de asma; - Dificuldades respiratórias.

Fonte: EPA (2018) e Rhodes, et al. (2017)

3.7. Precificação de carbono

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 que está gerando para a sociedade como um todo.

Para o World Bank (2020) ela é um instrumento de mercado custo-efetivo capaz de alcançar os objetivos de mitigação de GEE ao menor custo possível para a sociedade. Tanto que através de sua adoção em vários países, ela já cobre mais de 20% das emissões mundiais de GEE.

A Figura 3.17 ilustra o processo de mitigação agregada que a precificação permite através da comparação dos custos de precificação com os custos de comando e controle. Ela representa duas empresas (A e B) reguladas com curvas marginais de abatimento (MAC),

a qual permite ilustrar a relação custo-benefício e a escala de impacto relativo de cada medida para reduzir as emissões de carbono.

A política visa introduzir a mitigação de Q_A+Q_B unidades de emissão com uma política de comando e controle que force a mitigação de Q_A unidades de A e Q_B unidades de B. O custo total é a soma das integrais abaixo das curvas A e B até Q_A e Q_B , respectivamente.

Com a utilização de um preço de carbono, tem-se o preço de equilíbrio p^* , o qual causa uma redução maior sob a MAC B e menor sob a MAC A, ou seja, a redução acontece onde ela é mais barata. A partir disso, a redução de custos da política de precificação em relação à política original é dada pela soma das áreas pintadas, enquanto o objetivo ambiental é atingido igualmente. Quanto maior for a heterogeneidade entre as curvas MAC dos participantes do sistema, maiores serão os ganhos de custos associados ao sistema de precificação (PMR, 2017).

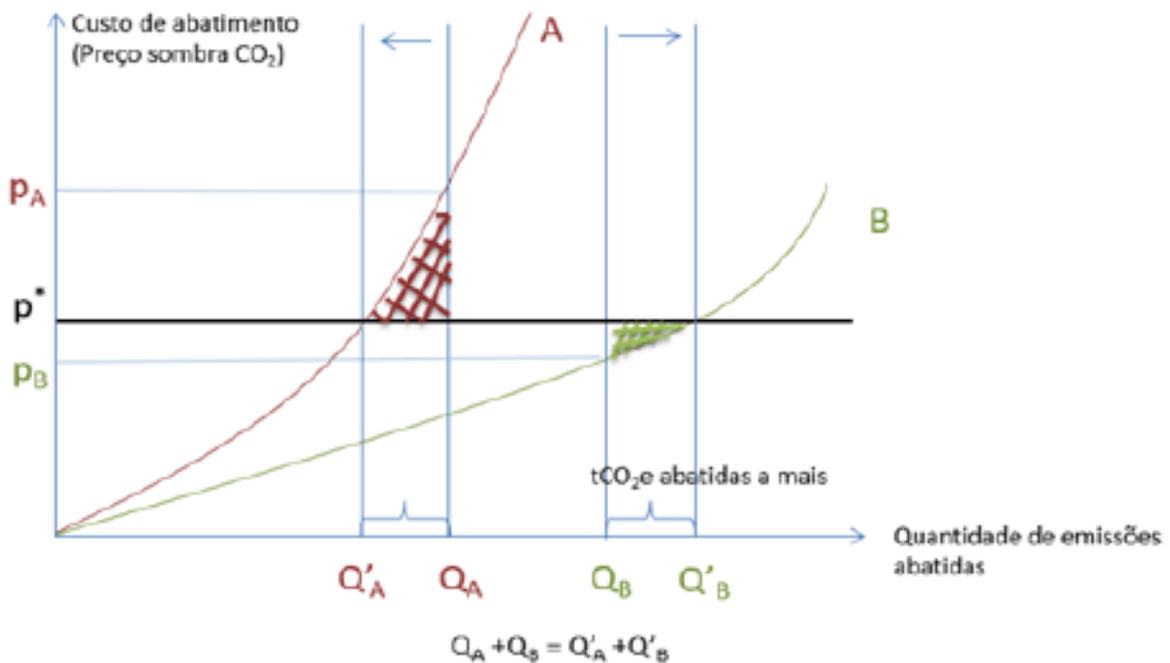


Figura 3.17 - Ganhos de eficiência da política de precificação

Fonte: PMR, 2017.

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 abatemento 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.

3.7.1. Formas de precificação

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. O Projeto PMR Brasil (2020) explica essas duas formas como:

Com um tributo, especifica-se uma alíquota a ser paga por tonelada de CO₂e emitida e a quantidade de emissões é definida no mercado. Sob um SCE, é definida uma quantidade máxima de emissões agregadas aos agentes regulados são emitidas permissões de emissão equivalentes. As permissões são distribuídas gratuitamente ou via leilões e podem ser transacionadas entre os agentes para que eles conciliem suas emissões. Nesse caso, garante-se o objetivo de limitar as emissões (quantidade) e o preço é definido no mercado.

A adoção por sistemas de precificação cresceu a partir de 2005 com a inserção do mercado de carbono no território europeu. Nas décadas anteriores a precificação se restringia as taxas de carbono, como pode-se ver na figura 3.18. Segundo o PMR (2017), a tendência mundial é a ligação de mercados, visto que ela melhora a custo-efetividade do sistema como um todo, como pode ser visto no SCE Californiano, que se tem participação do Québec e logo terá de Ontário e Manitoba.

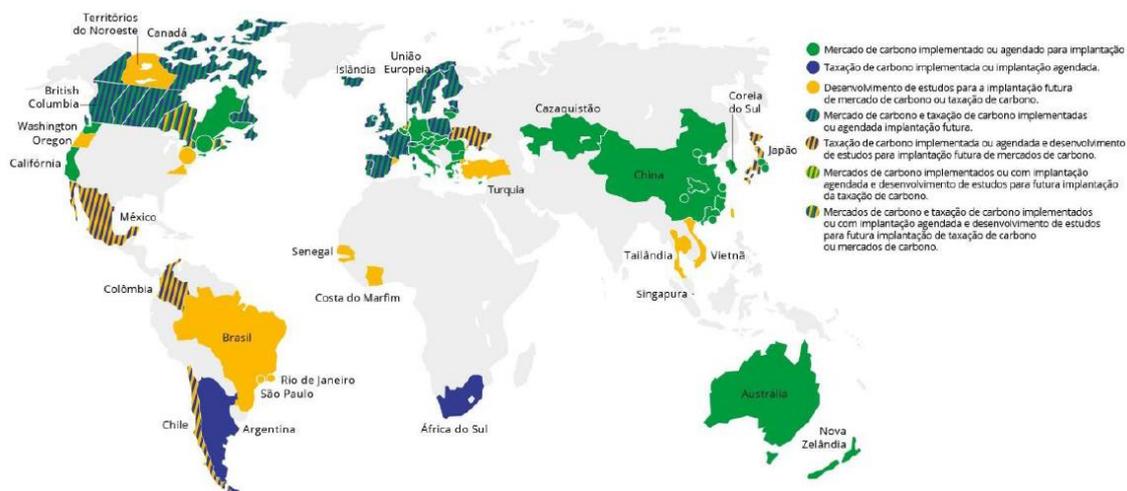


Figura 3.18 - Iniciativas de precificação de carbono mundiais

Fonte: World Bank, 2019.

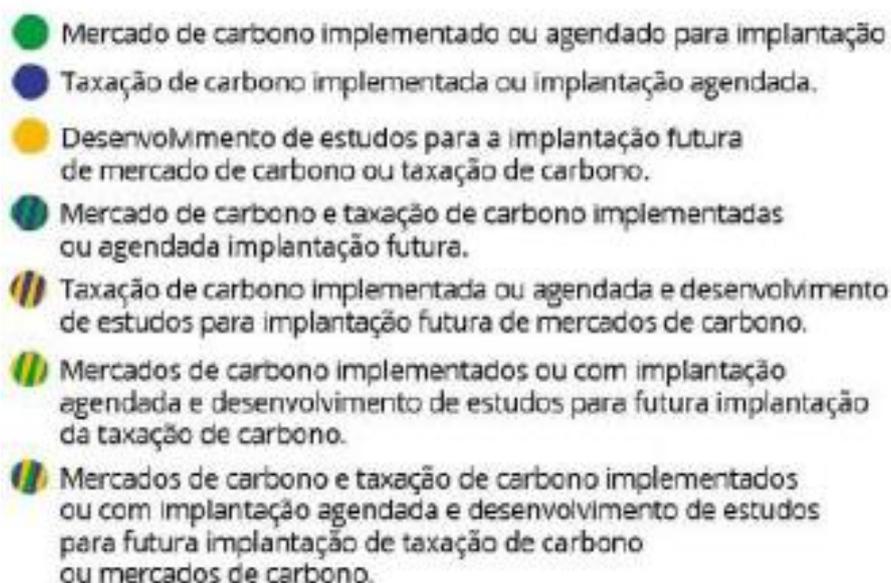


Figura 3.19 - Legenda da figura 3.18

Fonte: World Bank, 2019.

3.7.2. O projeto PMR Brasil

O Projeto *Partnership for Market Readiness* (PMR) Brasil tem como objetivo subsidiar o processo de tomada de decisão acerca do papel de instrumentos de precificação de carbono nas políticas de mitigação de emissões de GEE, através de estudos e avaliações detalhadas dos impactos de mecanismos de precificação de carbono sobre a economia, a sociedade e o meio ambiente.

O projeto vê a adoção da precificação como uma opção para reduzir o custo total de cumprimento da meta nacional de mitigação de emissões de GEE proposto pela *Nationally Determined Contribution* (Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil - NDC brasileira). O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC) estima que seria possível alcançar a meta da NDC para 2025 com base em medidas com viabilidade econômica, mas para a meta de 2030 seria necessário adotar programas e políticas governamentais que considerassem o valor de carbono na ordem de US\$ 10/tCO_{2e}, ou seja, R\$ 56,80/tCO_{2e}.

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.

Tabela 3.12 - 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)

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.

4. METODOLOGIA

4.1 Considerações iniciais

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.

A Figura 4.1 representa os passos de elaboração do estudo na forma de um fluxograma. Os dados de entrada estão representados em laranja e os de saída em verde, entre eles está justamente o objetivo do estudo que é avaliar a introdução da precificação do carbono no setor elétrico brasileiro.

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 três cenários diferentes, o primeiro só com o custo técnico (situação atual), o segundo com o custo técnico e ambiental a partir do mercado de carbono, e o terceiro com o custo técnico e ambiental a partir da taxaçoão de carbono.

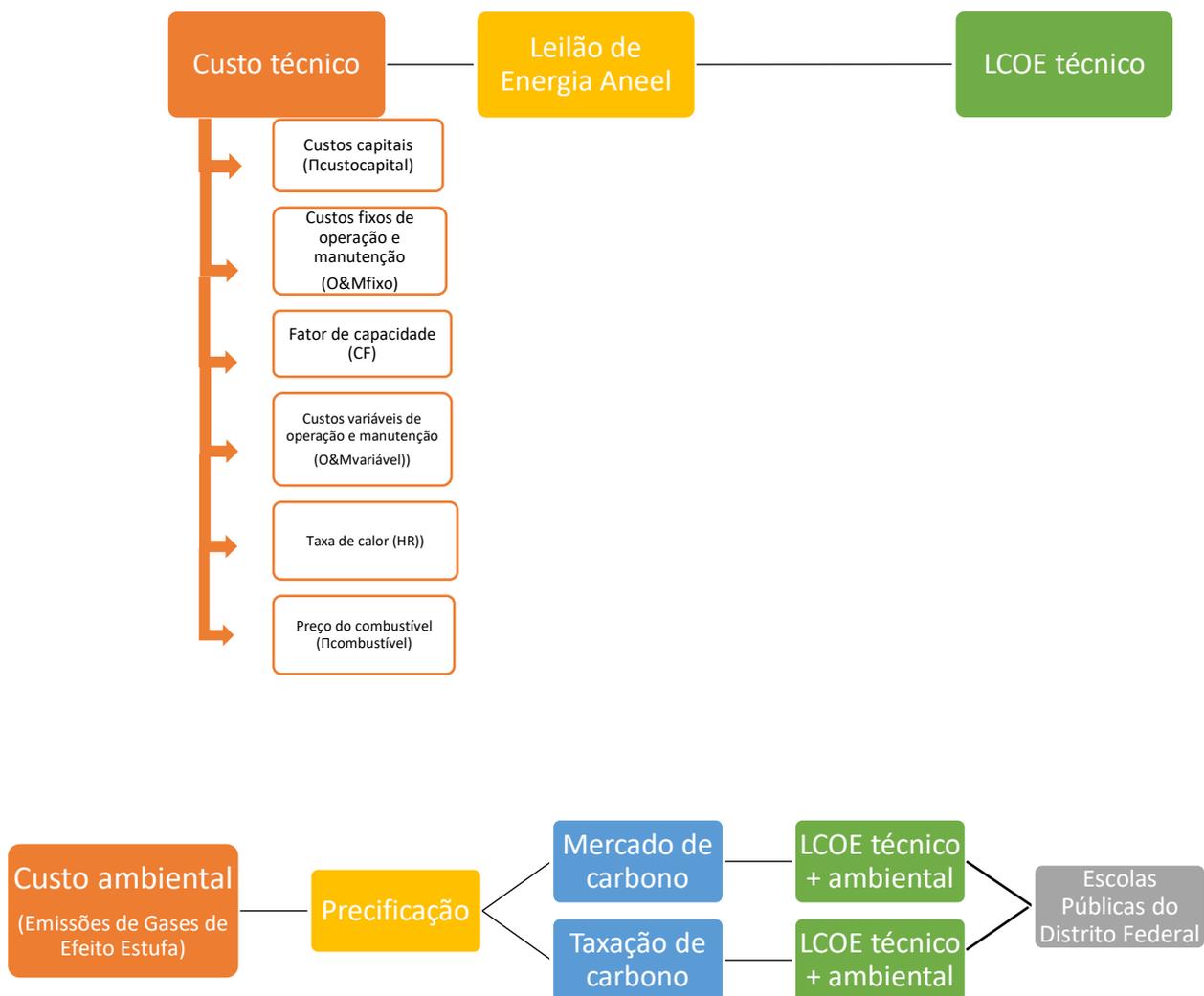


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia do projeto.

4.2 Caracterização da área de estudo

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.

A EPE (2016), estimou-se que o consumo de energia elétrica brasileira deve aumentar mais de três vezes até 2050, chegando a 1.605.00 GWh. Esse dado mostra a importância do planejamento energético brasileiro contar com fontes renováveis de energia para reduzir a emissão de GEE. De acordo com o PCE (2014), as fontes energéticas brasileiras

devem emitir cerca de 370 milhões de toneladas equivalentes de CO₂ em 2050 se continuarem sendo geradas por fontes não renováveis.

Para Barbosa Filho, et al. (2015), os valores de radiação solar no Brasil são altos comparados a média mundial, já que variam de 1550 a 2400 kWh/m² por ano. A projeção de capacidade instalada de GD por energia solar no Brasil com políticas de incentivo para 2050 é de 118.000 MW, representando mais de 8% do SIN (EPE, 2016).

De acordo com o Censo escolar DF de 2020 há 543.833 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.

Pelo Censo tem como filtrar as escolas por região administrativa, escola e rede. Cada filtro obtém o total de matrícula, profissionais de educação, turmas, infraestrutura e a quantidade de escolas.

4.3 Custo nivelado de energia

Fathezam e Da Silva (2019) escolheram o modelo *Levelized Cost of Energy* (LCOE - Custo Nivelado de Energia) como uma ferramenta para avaliar e construir uma relação de custo privado de diferentes gerações de energia por meio do custo nivelado. Este 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 gerado (\$/MWh).

Contudo, o método LCOE permite a entrada de valores desatualizados e incorretos que podem ser ajustados com a devida atenção. Branker, Pathak e Pearce (2011) destacaram que a taxa de desconto, o custo do sistema, o financiamento e incentivos, o tempo de vida do sistema, e a taxa de degradação e produção de energia são os parâmetros que permitem a entrada do erro no método.

- ✓ **Taxa de desconto:** É a partir dela que os investidores conhecem os custos das tecnologias e os riscos que estão envolvidos no investimento, já que quanto maior a taxa de retorno, maior o lucro do investimento a curto prazo. Para não ter erro, deve-se analisar a taxa de desconto de acordo com o país que vai receber o investimento.

- ✓ **Custo do sistema, financiamento e incentivos:** O custo de sistema é a despesa de projeto, a escolha do tipo de sistema e sua instalação, valor do seguro e interconexões. O custo de financiamento engloba tanto o método escolhido quanto o custo público, o qual contém os juros. É importante manter a mesma linha de financiamento na comparação das tecnologias. Para incluir as externalidades ambientais negativas é necessário fazer o cálculo expandido do método LCOE, que vai ser apresentada logo mais.

- ✓ **Tempo de vida do sistema:** Abrange desde o início da operação do sistema até o momento que o custo de operação e manutenção possui um aumento significativo, ou seja, quando o custo é economicamente inviável para manter o sistema comparado com sua eficiência de produção.

- ✓ **Taxa de degradação e produção de energia:** É o fator de redução da eficiência de geração de energia devido ao desgaste do sistema.

Como dito no custo do sistema, financiamento e incentivos, para incluir as externalidades ambientais é necessário realizar o cálculo expandido da LCOE desenvolvido por Rhodes et. al. (2017). Essa expansão permite internalizar o custo ambiental da emissão de GEE da operação do sistema de geração de eletricidade durante todo o ciclo de vida, que é uma externalidade-chave no custo de geração de energia elétrica.

4.4 Cálculo da LCOE

As equações (1), (2) e (3) representam o cálculo da LCOE técnico (padrão), o cálculo do fator de recuperação do capital e o cálculo do custo nivelado de energia ambiental, respectivamente.

$$LCOEa = \frac{\Pi_{custo\ capital} * CRF + O\&M\ fixo}{8760 * CF} + O\&M\ variável + HR * \Pi_{combustível} \quad (1)$$

Onde,

$\Pi_{\text{custo capital}}$: custos capitais da usina energética e de gasodutos relevantes (incluir o *payback*) (\$/MW);

$O\&M_{\text{fixo}}$: custos fixos de operação e manutenção (\$/MW);

CF: fator de capacidade médio da vida útil da usina (Energia/Potência instalada) (MWh/MW);

$O\&M_{\text{variável}}$: custos variáveis de operação e manutenção (\$/MWh);

HR: taxa de calor (MmBTU/MWh);

$\Pi_{\text{combustível}}$: preço do combustível (\$/MmBTU);

CRF: fator de recuperação do capital (Equação 2)

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

Onde:

i = taxa de juros;

n = número de anos para custear a dívida.

$$LCOE_{\text{amb}} = LCOE + \sum_{j \in \theta} R_j * D_j \quad (3)$$

Onde:

R_j = taxa de emissão do poluente j em CO₂eq (tonCO₂eq /MWh)

D_j = custo da externalidade j (\$/tonCO₂eq);

θ = poluentes analisados (N₂O, CO₂ e CH₄).

O resultado da equação (1) é o custo total do investimento, 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.

A equação (3) contabiliza os impactos através do cálculo da emissão de GEE e os internaliza com o preço obtido pela comparação com o CO₂eq.

O valor do LCOE 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. Os resultados do leilão podem ser observados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Preço médio da venda de energia do Leilão de energia Nova A-6 de 2019

Tipo de instalação	Preço (R\$/MWh)
Gás Natural	188,87
Energia Solar	84,39

Fonte: MME (2019)

4.5. Emissões de GEE

A versão estendida do cálculo do LCOE citada no final do capítulo 4.3 inclui as externalidades ambientais e foi relacionada as emissões de GEE resultantes do ciclo de vida dos produtos envolvidos na termelétrica a gás natural ou solar fotovoltaica. O ciclo de vida considerado abrange a extração da matéria prima, transporte, instalação, operação e descomissionamento das instalações.

As análises dos ciclos de vida (ACV) contabilizaram 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. A unidade de equivalência é o CO₂e.

$$28 * \text{Emissão de CH}_4 = \text{CO}_2\text{e de CH}_4 \quad (4)$$

$$265 * \text{Emissão de N}_2\text{O} = \text{CO}_2\text{e de N}_2\text{O} \quad (5)$$

Buscou-se dados atuais para o cálculo das taxas de emissão de poluentes atmosféricos para cada tipo de tecnologia. Por isso, foram utilizados os dados da Agência

governamental *Energy Information Administration* (EIA), que possui dados de emissões modernas para novos projetos.

Para os cálculos dos danos causados pelas emissões de CO₂ e CO₂ equivalente (CO₂eq), utilizou-se os dados da *Environmental Protection Agency* (EPA), visto que ela considera a vida útil de cada planta energética para o cálculo dos danos associados as emissões upstream e downstream. Essa consideração é importante porque tecnologias com vida útil maior, possuem valores maiores de CO₂ downstream, já que ele pondera impactos futuros. Segundo Rhodes, et al. 2017, esses dados devem ser baseados no *Social Cost of Carbon* (SCC) e calculados a partir de três taxas de desconto para o horizonte 2010 a 2050, sendo elas de 5%, 3% e 2,5%, respectivamente.

A metodologia de *Value of a Statistical Life* (VSL) foi utilizada para estimar os custos relacionados a emissão de SO₂, NO_x, MP_{2,5} e MP₁₀. Contudo, para os danos marginais dos primeiros baseou-se nos dados de Holland et al (2015) e para o material particulado de 10 micrometros nos dados de Muller e Mendelsohn, (2009). Já para a estimativa das emissões de metano advindas da termelétrica a gás natural, utilizou-se a metodologia apresentada por Marten e Newbold (2012) de Social Cost of Methane (SCM).

A EPA (2018) ressalta que a metodologia VSL busca analisar o custo benefício de uma nova política ambiental através da estimativa do valor que um grande grupo de pessoas estaria disposto a pagar por uma pequena redução do risco de morrer por condições adversas de saúde que podem ser causadas pela poluição ambiental.

4.6 Precificação de carbono

A precificação do carbono é um mecanismo que inclui as externalidades e promove o reconhecimento de atividades que geram impactos. Ela pode ser tanto via tributação quanto via comércio de licenças para emissão.

No Brasil o marco da precificação de carbono está sendo desenvolvido pela *Partnership for Market Readiness* (PMR), que é uma iniciativa internacional capitaneada pelo Banco Mundial. O Projeto PMR Brasil tem como objetivo apoiar o processo de tomada de decisão pela precificação de carbono através do mercado de carbono subsidiando o governo brasileiro com estudos e políticas de mitigação de emissões de GEE brasileiras (PMR, 2020).

Como dito no embasamento teórico há diferentes abordagens da precificação do carbono, a Figura 4.2 apresenta as abordagens segundo a FGV. Segundo FGV (2018), o preço do carbono deve ser um componente de uma abordagem maior, visto que esse mecanismo sozinho não reflete todas as externalidades associadas às mudanças climáticas. Por isso, utilizou-se a metodologia do LCOE juntamente com a precificação mandatória.

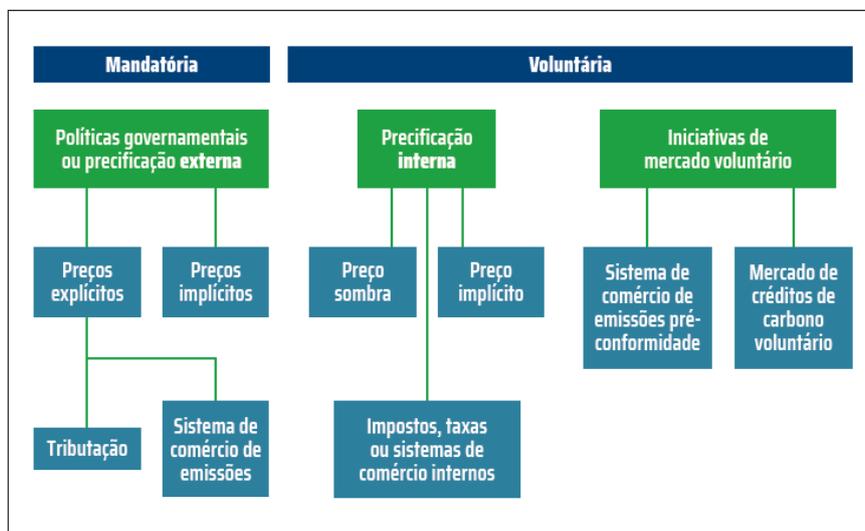


Figura 4.2 - Abordagens da precificação de carbono

Fonte: FGV, 2018.

4.6.1. Mercado de carbono

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.

Todavia, se faz necessário a criação de uma estrutura administrativa e de fiscalização por parte do governo para implementação, visto que há dificuldades para se estabelecer a liquidez do mercado e manter o controle da flutuação dos preços de mercado.

4.6.2. Taxa de carbono

Já a taxaço de carbono é um instrumento baseado em um preço e com baixa flexibilidade para reduço de custos do sistema, por isso é mais utilizada para agentes econômicos como transporte e agricultura. Ela privilegia a reduço de emissões de GEE do agregado da economia, já que aproveita a estrutura institucional e administrativa já existente no governo para tributação.

Isto é, essa tributação cobra um tributo dos responsáveis pela imposição de custos externos (emissões de GEE) sobre outros. A dificuldade desta forma de precificação consiste na definição do valor adequado deste tributo, a fim de atingir a meta definida de reduço de GEE.

Para a FGV (2018), a efetividade do tributo depende da elasticidade da demanda e da oferta por determinado bem ou recurso, porque para bens com demanda fixa o valor do tributo é repassado para o consumidor final e não para a empresa, a qual também deve ser cobrada.

4.6.3. Custo social do carbono

O custo social do carbono influencia nas decisões políticas e tomadas de decisões sobre o investimento que será feito nas fontes energéticas. Nele há o valor ambiental composto pelos custos na saúde, na produção agropecuária, serviços ecossistêmicos, entre outras externalidades.

O custo da emissão total vai ser o produto do GHG brasileiro pelo custo do carbono brasileiro, que segundo o PMR (2020) tem seu preço mínimo de R\$ 20,00/tCO₂eq e o preço máximo é de R\$ 40,00/tCO₂eq.

Logo, o custo social de carbono (LCOE ambiental) foi descrito como:

$$LCOE_{amb} = LCOE + \sum_{i \in \theta} \text{Custo de Emissão total } i \quad (6)$$

Onde:

$LCOE$ = 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 Simples, Termoelétrica Ciclo Combinado, Painéis Fotovoltaicos;
 Θ = poluentes analisados (N_2O , CO_2 e CH_4).

Esse estudo vai contemplar três cenários como exposto na Figura 18, um com a metodologia do LCOE técnico, outro com o LCOE ambiental dentro do mercado de carbono e outro com LCOE ambiental com taxas de carbono.

Tabela 4.2 - Cenários a serem discutidos.

Cenários	1	2	3
	Comando e Controle (LCOE)	Mercado de Carbono	Taxa de Carbono

4.7 Emissões

Como supracitado a análise do ciclo de vida (ACV) referente a energia solar fotovoltaica abrange a extração e transporte dos materiais dos painéis fotovoltaicos, fabricação, instalação, manutenção e descomissionamento dos mesmos. Hsu et al. (2012) analisaram 397 estudos referentes a ciclos de vida de placas fotovoltaicas e suas emissões de GEE a partir de suas características físicas e tecnológicas.

Seguiu-se a refinação do Fatheazam e Da Silva (2019) para se chegar nos melhores estudos avaliativos do ACV das placas fotovoltaicas. Para isso, exclui-se os estudos anteriores a 1980 e com dados insuficientes. Além disso, avaliou-se a qualidade, transparência e relevância de cada estudo e placa solar. A seleção final resultou em 13 estudos e 41 estimativas, que foram avaliados em 4 parâmetros.

A determinação do peso emitido de GEE para cada 1kWh produzido é realizada através da equação GHG, presente em diversos estudos do ciclo de vida de painéis fotovoltaicos, dividindo as emissões dos processos de produção, instalação e descomissionamento pela energia gerada ao longo da vida do sistema (HSU, et al., 2012).

$$GHG = \frac{W}{I*n*PR*LT*A} \quad (7)$$

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.

Tabela 4.3 - Parâmetros analisados para energia solar

Parâmetro	Definição	Dados	Valor
Eficiência do módulo	Percentual de conversão da energia solar para uma corrente elétrica direta.	Policristalino - Si	17,46
<i>Perfome Ratio</i>	Proporção de corrente alternada produzida, contabilizando as perdas no sistema	Painéis solares inclinados com suas faces voltadas para o norte.	75%
Irradiação	Fluxo de energia do Sol em kWh/m ² . ano.	Irradiação anual.	Equação AA
Tempo de vida do sistema	Quantos anos um painel fotovoltaico opera até sua habilidade ser comprometida.	25 anos.	25 anos

Fonte: Hsu et al. (2012) e Kurtz (2012),

Segundo Hsu et al. (2012), a média do GHG harmonizado está entre 1700 kWh/m². ano e 2400 kWh/m². ano. O valor de W é calculado a partir de uma manipulação da equação 8 e da consideração do acréscimo das emissões de metano e óxido nitroso de 6% do valor total de GHG, de acordo com Frank et al. (2005). Logo, W foi calculado por:

$$W = (GHG \times 1,06) \times I \times n \times PR \times LT \times A \quad (8)$$

4.8 Custo do Gás Natural

A análise da ACV para o gás natural também seguiu a mesma linha da energia solar, mas o embasamento teórico foi retirado de O'Donoghue et al. (2014) que apresenta o CO₂eq. total da ACV completa do gás natural. Para estimar as emissões de cada GEE na ACV do gás natural utilizou-se a metodologia 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.

Skone (2012) apresentou alguns resultados técnicos característicos de cada uma das três etapas são localização do poço de perfuração, gasto energético para o processamento do gás natural, material utilizado no gasoduto, gasto energético para o processamento do gás natural, entre outros.

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).

No estudo de caso a ser desenvolvido no Projeto Final II será apresentado uma análise comparativa que mostra a importância de se considerar o ganho ambiental que a precificação do carbono pode trazer no planejamento energético brasileiro.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As discussões deste tópico abrangem a geração de energia elétrica por termelétrica a gás natural ou solar fotovoltaica durante 25 anos capaz de suprir o consumo de energia elétrica pelas escolas públicas do Distrito Federal conveniadas com a Secretaria de Educação.

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 se 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).

Em suma, esse capítulo trata dos resultados referentes à potência de cada instalação, as emissões de GEE, ao custo da externalidade e a precificação do carbono. Cada um dos resultados será analisado em cenários sem e com a externalidade ambiental, considerando ainda o uso de mercado ou taxa de carbono.

5.1 Potência instalada

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 energia por aluno de 5,35 kWh por capta/mês apresentado por De Mello (2016), tem-se que o produto do consumo pela quantidade de matrícula é igual a 2.782,14 MWh/mês em todas as escolas vinculadas ao SEEDF. A energia tem relação com o tempo de uso, com isso tem-se que seria necessário em média 33,11 kW/dia por escola.

Essa potência é referente a construção dos equipamentos da usina termelétrica ou da usina de energia solar fotovoltaica, sendo que para a usina termelétrica o tipo de instalação pode ser tanto por ciclo simples ou ciclo combinado.

A potência de cada instalação pode ser vista na tabela 5.1, calculada a partir dos dados acima e dos valores característicos de cada instalação presentes no Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos apresentado pela Figura 5.1 e das equações (9) e (10).

	Solar Fotovoltaica	Ciclo Simples	Ciclo Combinado
PR^4	0,75	-	-
I^5	5,46	-	-
FC^6	-	0,3	0,7
Potência FV (W) ⁷	345	-	-
Área Placa FV (m ²) ⁸	1,98	-	-

Figura 5.1 – Valores utilizados como características técnicas para instalação

Fonte: Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos, 2014

$$P_{picoFV} = \frac{E_{escBSB}}{I * PR} \quad (9)$$

$$P_{picoGN} = \frac{E_{escBSB}}{FC} \quad (10)$$

Onde,

E_{escBSB} = Média de consumo de energia anual no período de 25 anos para o setor escolar em Brasília (MWh);

I = Irradiação Média Solar (kWh/m²/dia);

PR = Performance Ratio; e,

FC = Fator de Capacidade.

Tabela 5.16 – Potência instalada para cada tecnologia

Tipo de Instalação	Potência [MW]
Ciclo Simples	13
Ciclo Combinado	6
Solar Fotovoltaica	23

A análise do parâmetro de potência depende da variação do consumo de energia elétrica, por isso a termelétrica a gás natural de ciclo simples é mais adequada para grandes oscilações de geração de energia e o de ciclo combinado para pequenas variações.

O sistema fotovoltaico de 23 MW vai operar durante 5,46 horas de Sol Pleno, gerando 125,58 MWh/dia. Considerando o rendimento do sistema de 75%, a energia elétrica produzida será de 94,2 MWh/dia.

A usina a gás natural pode operar durante o dia inteiro, visto que o combustível pode ser armazenado. Para gerar 92,7 MWh/dia, necessita de uma potência de 3,9 MW. Ao considerar o fator de capacidade, a usina de ciclo simples deve ser de 13 MW, e a de ciclo combinado de 6 MW.

É importante ressaltar que de acordo com a Tabela 5.1, o sistema fotovoltaico precisa de quase 5 vezes mais potência do que o ciclo combinado da termelétrica a gás natural para atender o mesmo consumo escolar do DF. O gráfico 5.2 compara as potências instaladas para cada tecnologia.

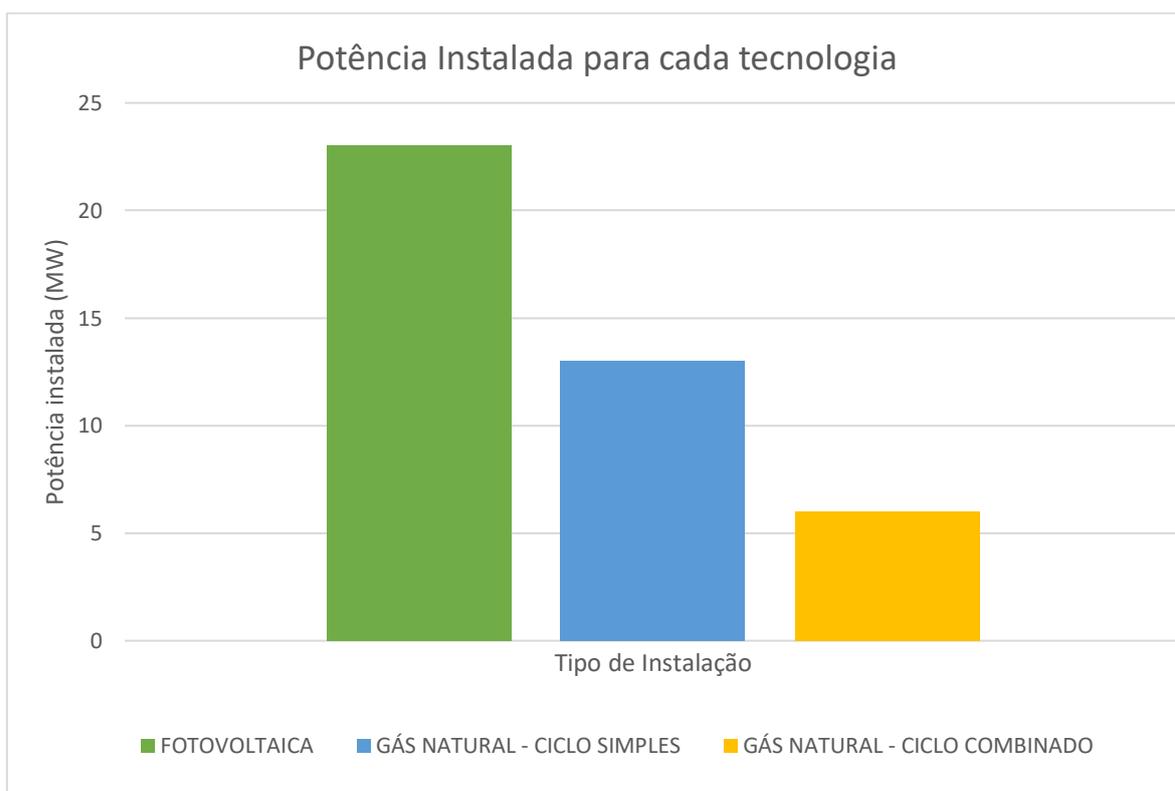


Figura 5.2 – Comparação das potências instaladas para cada tipo de tecnologia de geração de energia elétrica.

A potência instalada nas usinas termelétricas é menor devido sua capacidade de armazenamento, o que não há na usina solar fotovoltaica por isso a potência dela é maior. Enquanto a termelétrica a gás natural pode funcionar o dia todo, o painel fotovoltaico absorve somente 5,46 kWh/m²/dia de irradiação média solar e precisa produzir a mesma energia de 2.782,14 MWh/mês para as escolas públicas do DF.

Com o intuito de apresentar um cenário mais real e que apresentou a potência quatro vezes menor que a energia solar fotovoltaica, a continuação da análise será feita somente com a usina termelétrica a gás natural de ciclo combinado.

5.2 Disponibilidade de área

Segundo o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2014) o rendimento do painel fotovoltaico é de 20% 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.

Considerando as 684 escolas, esse valor total de área não é grande, o que torna viável a criação de um campo fotovoltaico para atender todas as escolas, como a figura 5.3. Considerou-se o estacionamento do Estádio Mané Garrincha por ele estar em um lugar centralizado.

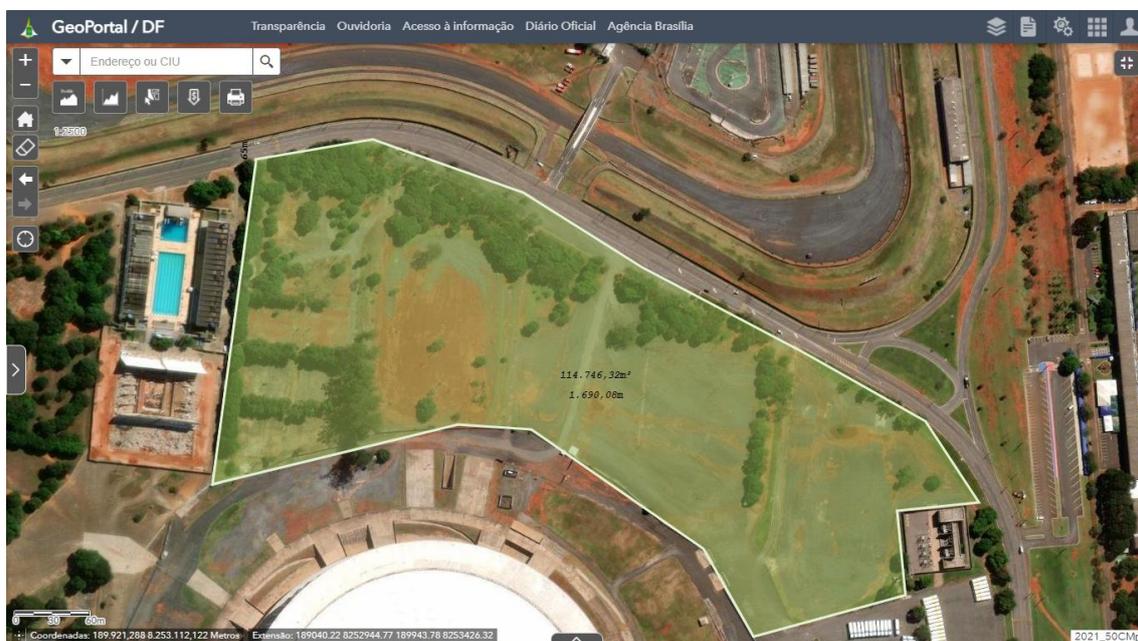


Figura 5.3 – Preço do gás natural no Brasil.

5.3 Cálculo da LCOE Ambiental

O cálculo do custo nivelado ambiental de energia tem base no custo da energia do Leilão de Energia Nova A-6 de outubro de 2019, visto que ele foi o último até o presente momento desta categoria. Os valores da geração de energia para termelétrica a gás natural e solar fotovoltaica dependem dos incentivos e do valor do dólar, por isso são modificados constantemente.

Segundo a Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres (ABRACE), o preço do gás natural está interligado ao preço do petróleo em dólar e ao câmbio (conversão ao Real). Por isso, analisando o preço do gás natural no Brasil com o câmbio médio de R\$ 5,10/US\$, os valores devem se aproximar de US\$ 7/MMBTU, como pode ser visto na Figura 5.4.

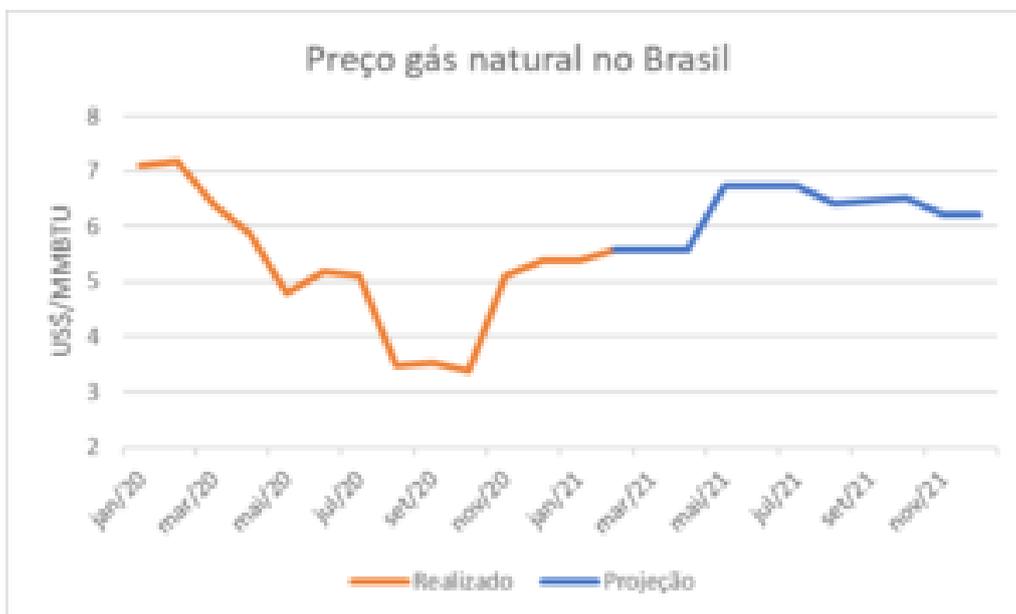


Figura 5.4 – Preço do gás natural no Brasil.

Fonte: ABRACE (2021).

Já a evolução do preço da fonte solar fotovoltaica em leilões de energia no mercado regulado tem passado por um decréscimo desde 2013, como pode-se ver na Figura 5.5 apresentado pela CEE/ABSOLAR em 2021.



Figura 5.5 – Preço da fonte solar fotovoltaica em leilões de energia no mercado regulado.

Fonte: Portal Solar (2021).

Conforme supracitado na metodologia, o custo do mega watt-hora da fonte solar fotovoltaica é menor do que o do gás natural, o qual tem a projeção de aumento de uso no Brasil. Entretanto, resoluções normativas como a REN nº 482/2012 e Decreto nº 9934/2019 que incentiva o aumento do custo da geração de energia por solar fotovoltaica e a criação de um Comitê de Monitoramento da Abertura do Mercado de Gás Natural que torna o gás natural mais competitivo no mercado, respectivamente.

Tanto que Fatheazam e Da Silva (2019) apresentam um gráfico baseado nos dados da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) que demonstra a variação do custo da energia termelétrica de gás natural e do solar fotovoltaico ao longo dos anos de 2017 a 2019. Na Figura 5.6 fica evidente que a energia solar fotovoltaica tem o menor custo desde 2017 devido a facilidade de compra dos módulos fotovoltaicos e o incentivo na compensação de energia.

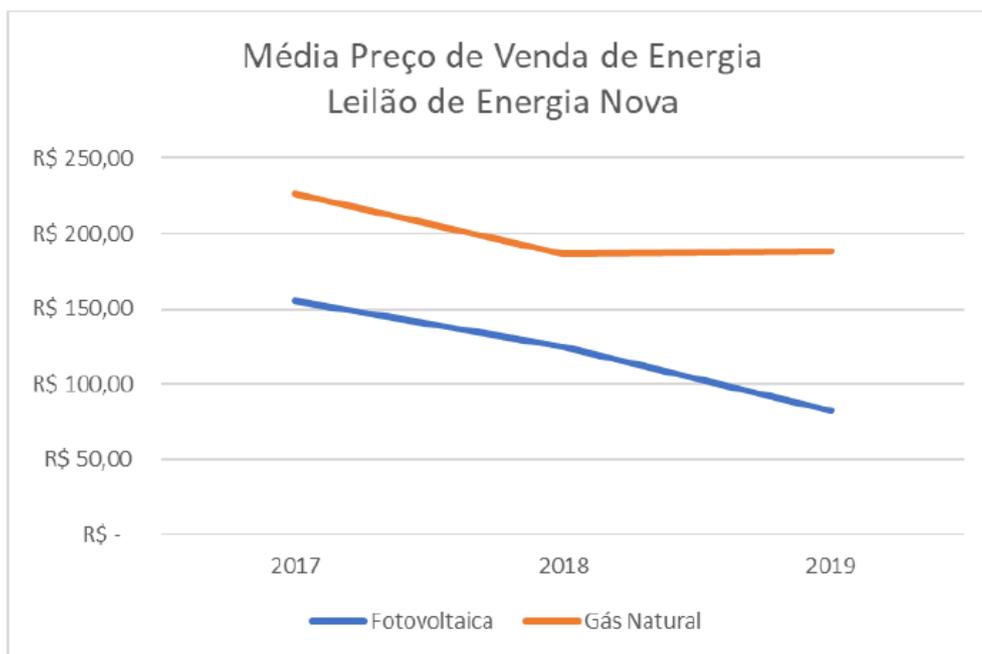


Figura 5.6 – Variação do preço de venda de energia pela CEE ao longo dos anos.

Fonte: Fatheazam e Da Silva (2019).

O incentivo a geração de energia limpa por parte do governo nas escolas públicas do Distrito Federal pode impactar o preço de venda de energia, fazendo com que a energia solar seja ainda mais competitiva e acessível no mercado. Dessa forma tem como assegurar o desenvolvimento sustentável, visto que o tipo de geração de energia não aumenta tanto os gases de efeito estufa na atmosfera.

5.4 Emissões de GEE

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. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5.2.

Tabela 5.2 - Emissão de GEE nas termelétricas a gás natural

EMIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA [ton./MWh]						
Tipo de tecnologia	GEE	Construção	Operação	Descomissionamento	Emissões totais	GWP 100 ANOS
Ciclo Combinado	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	265
	CH ₄	1,91E-03	7,69E-04	5,94E-07	2,68E-03	25
	Total					
	CO₂eq 100 anos	6,88E-02	2,32E-02	3,93E-01	4,88E-01	-

Fonte: Skone (2012) adaptado.

Para avaliar as emissões provenientes da geração de energia solar fotovoltaica utilizou-se o estudo de Prennushi, G. (2007), o qual apresenta dados para cada etapa do ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, conforme pode ser visto na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Emissão de GEE no ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos

EMIÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA [ton./MWh]						
GEE	Construção	Operação	Descomissionamento	Emissões Totais	GWP 100 anos	
CO₂	4,67E-02	0,00	7,51E-04	4,75E-02	1	
N₂O	1,12E-04	0,00	1,23E-06	1,13E-04	265	
CH₄	8,16E-05	0,00	3,01E-07	8,19E-05	25	
Total						
CO₂eq 100 anos	7,87E-02	0,00	1,09E-03	7,95E-02	-	

Fonte: Prennushi, G. (2007) adaptado.

A Figura 5.7 ilustra as diferenças das emissões em cada etapa da geração de energia pela termelétrica a gás natural e usina fotovoltaica.

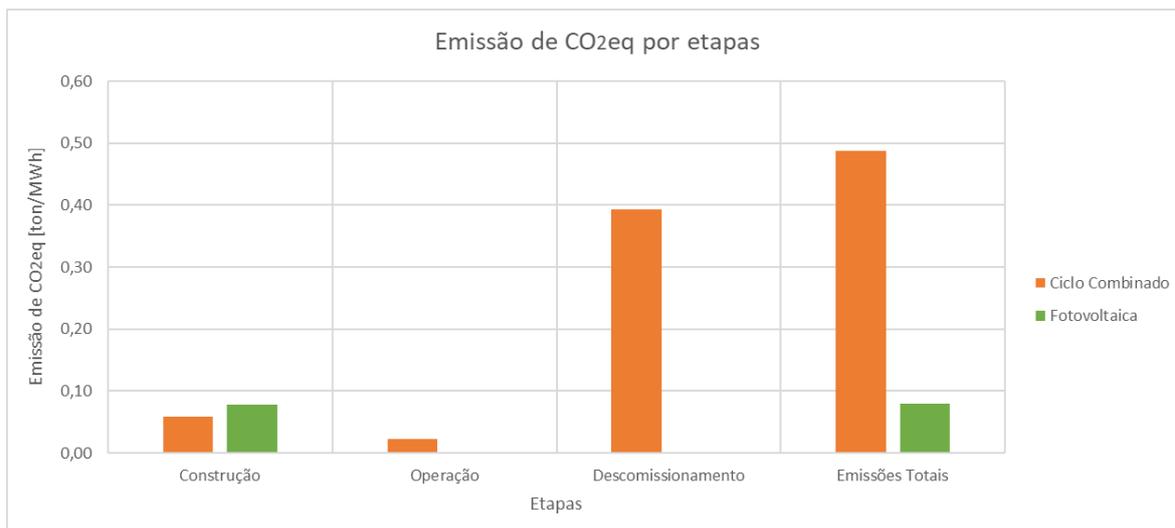


Figura 5.7 – Comparação das emissões de GEE em CO₂eq em termelétrica a gás natural e usina fotovoltaica.

Na Figura 5.7 pode-se observar o quanto a emissão de GEE para o ciclo combinado é maior, já que parte das emissões são reutilizadas para o aquecimento da turbina a vapor, que a etapa de instalação para a conversão de energia (ICE) é a que mais emite os gases de efeito estufa porque realiza combustão contínua do gás natural ao longo do tempo.

Ela também mostra que a maior parte das emissões de gases de efeito estufa proveniente da energia solar fotovoltaica vem da construção da usina, visto que nela há a fabricação, o transporte e a instalação dos painéis fotovoltaicos. 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.

O valor da emissão de CO₂eq total do ciclo de vida foi calculado através da equação 8 e dos dados apresentados por Hsu et al (2012), como apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Peso dos GEE produzidos

Dados		
Irradiação (I)	[kWh/m ² /ano]	1700
Eficiência do Módulo (n)	[%]	12%
Performance Ratio (PR)	[%]	75%
Tempo de vida (LT)	[anos]	25
Area (A)	[m ²]	1
Peso emitido de GEE para cada 1kWh produzido (GHG)	[g/kWh]	55
Peso dos GEE produzido (W)	[g]	228.572,4

Considerando a equação 7 e a irradiação para Brasília foi possível obter a emissão total de g/kWh em CO₂eq, como pode ser observado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Cálculo GHG de Brasília

Dados		
Irradiação (I)	[kWh/m ² /ano]	1993
Eficiência do Módulo (n)	[%]	17,46%
Performance Ratio (PR)	[%]	75%
Tempo de vida (LT)	[anos]	25
Area (A)	[m ²]	1
Peso dos GEE produzido (W)	[g]	228572,4
GHG	[g/kWh]	35,03

Percebe-se que a placa que recebe 1700 kWh/m²/ano de irradiação gera uma emissão harmonizada de 0,048 ton./MWh, com eficiência no módulo entre 12,3 e 13%. Contudo, quando se considera o sistema instalado em Brasília, o qual possui a irradiação de 1993 kWh/m²/ano, a mesma placa gera quase a mesma emissão por MWh.

5.5 Custo simplificado da emissão

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.

O custo simplificado da externalidade ambiental é dado pelo produto do consumo de energia anual das escolas públicas pela quantidade de emissão de construção, operação ou descomissionamento, pelo custo da precificação do carbono. Sendo que o valor da emissão acompanha as fases do ciclo de vida: construção, operação e descomissionamento. Logo, no ano 1 foi considerada a emissão de construção, nos anos 2 a 24 a emissão de operação e no ano 25 a emissão de descomissionamento.

A tabela 5.6 contém um exemplo de como o cálculo foi realizado em cada uma dessas etapas para a termelétrica a gás natural de ciclo combinado com a precificação do carbono de R\$ 20,00 ton./CO₂eq. Já a tabela 5.7 apresenta o mesmo cálculo para energia solar fotovoltaica.

Tabela 5.6 - Cálculo simplificado do custo da emissão pela termelétrica a gás natural de ciclo combinado

t [ano]	1	15	25
Energia anual [MWh/ano]	33.385,67	33.385,67	33.385,67
Emissão [ton./MWh]	6,88E-02	2,32E-02	3,93E-01
Emissões [ton./ano]	2.297	775	13.121
Precificação da emissão [R\$/ton.]	20	20	20
Custo da emissão [R\$]	45.939	15.491	262.411

Tabela 5.7 - Cálculo simplificado do custo da emissão pela energia fotovoltaica

t	1	15	25
Energia anual [MWh/ano]	33.386,67	33.386,67	33.386,67
Emissão [ton./MWh]	7,87E-02	0,00E+00	1,09E-03
Emissões [ton./ano]	2.627	-	36
Precificação da emissão [R\$/ton.]	20	20	20
Custo da emissão [R\$]	52.549	-	728

Pela conta simplificada percebe-se que o custo da emissão na construção da usina solar fotovoltaica é R\$ 6.610,00 maior, entretanto a termelétrica a gás natural de ciclo combinado é maior R\$ 277.174,00 juntando a operação e o descomissionamento. Em outras palavras, a energia solar na construção tem o custo 14,4% maior do que a termoelétrica a gás natural, mas esta é maior 38,4% no restante do ciclo de vida.

Considerando a precificação da emissão igual a R\$ 40,00/tCO₂eq, tem-se as tabelas 5.8 e 5.9 para termelétrica a gás natural e energia solar fotovoltaica, respectivamente.

Tabela 5.8 - Cálculo simplificado do custo da emissão pela termelétrica a gás natural de ciclo combinado

t [ano]	1	15	25
Energia anual [MWh/ano]	33.385,67	33.385,67	33.385,67
Emissão [ton./MWh]	6,88E-02	2,32E-02	3,93E-01
Emissões [ton./ano]	2.297	775	13.121
Precificação da emissão [R\$/ton.]	40	40	40
Custo da emissão [R\$]	91.877	30.982	524.823

Tabela 5.9 – Cálculo simplificado do custo da emissão pela energia solar fotovoltaica

t	1	15	25
Energia anual [MWh/ano]	33.386,67	33.386,67	33.386,67
Emissão [ton./MWh]	7,87E-02	0,00E+00	1,09E-03
Emissões [ton./ano]	2.627	-	36
Precificação da emissão [R\$/ton.]	40	40	40
Custo da emissão [R\$]	105.098	-	1.456

Com esse novo valor de precificação a razão continua a mesma entre as fases, o que indica uma constância nos valores. O próximo passo foi aprimorar esse cálculo a partir da fórmula do LCOE Ambiental para calcular o custo nivelado da externalidade ambiental.

5.6 LCOE Ambiental

O custo nivelado de energia considera um fluxo de caixa de 25 anos e as equações 1 e 3, tendo 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, geram o custo da emissão (equação 11).

$$\text{Custo da emissão} = \text{Emissões} * \text{Precificação (mínima/máxima)} \quad (11)$$

Sendo que:

Emissões = consumo de energia anual * Emissão de GEE [ton./ano]

Precificação = valores de mínimo e máximo estabelecidos pelo PMR [R\$/tonCO₂eq]

Custo da emissão = [R\$]

Para o LCOE tem-se a razão do valor presente do custo da emissão pelo valor presente da energia. Nas equações 12 e 13 estão os custos nivelados para energia termelétrica a gás natural de ciclo combinado para o valor mínimo e máximo da precificação e nas tabelas 14 e 15 estão os custos para a energia solar fotovoltaica.

$$LCOEgn(20) = \text{Custo Leilão} + \frac{\sum \frac{\text{Custo}}{(1+r)^t}}{\sum \frac{Et}{(1+r)^t}} = 188,56 + \frac{307.980}{455.808} = 189,24 \text{ R\$/MWh} \quad (12)$$

$$LCOEgn(40) = \text{Custo Leilão} + \frac{\sum \frac{\text{Custo}}{(1+r)^t}}{\sum \frac{Et}{(1+r)^t}} = 84,39 + \frac{615.959}{455.808} = 84,45 \text{ R\$/MWh} \quad (13)$$

$$LCOEsf(20) = \text{Custo Leilão} + \frac{\sum \frac{\text{Custo}}{(1+r)^t}}{\sum \frac{Et}{(1+r)^t}} = 188,56 + \frac{50.094}{834.642} = 189,91 \text{ R\$/MWh} \quad (14)$$

$$LCOEsf(40) = \text{Custo Leilão} + \frac{\sum \frac{\text{Custo}}{(1+r)^t}}{\sum \frac{Et}{(1+r)^t}} = 84,39 + \frac{100.188}{834.642} = 84,51 \text{ R\$/MWh} \quad (15)$$

Logo, o custo total da LCOE Ambiental de cada tecnologia é dado pela soma do preço da venda do leilão supracitada e destes custos das externalidades como pode ser visto na figura 5.8.

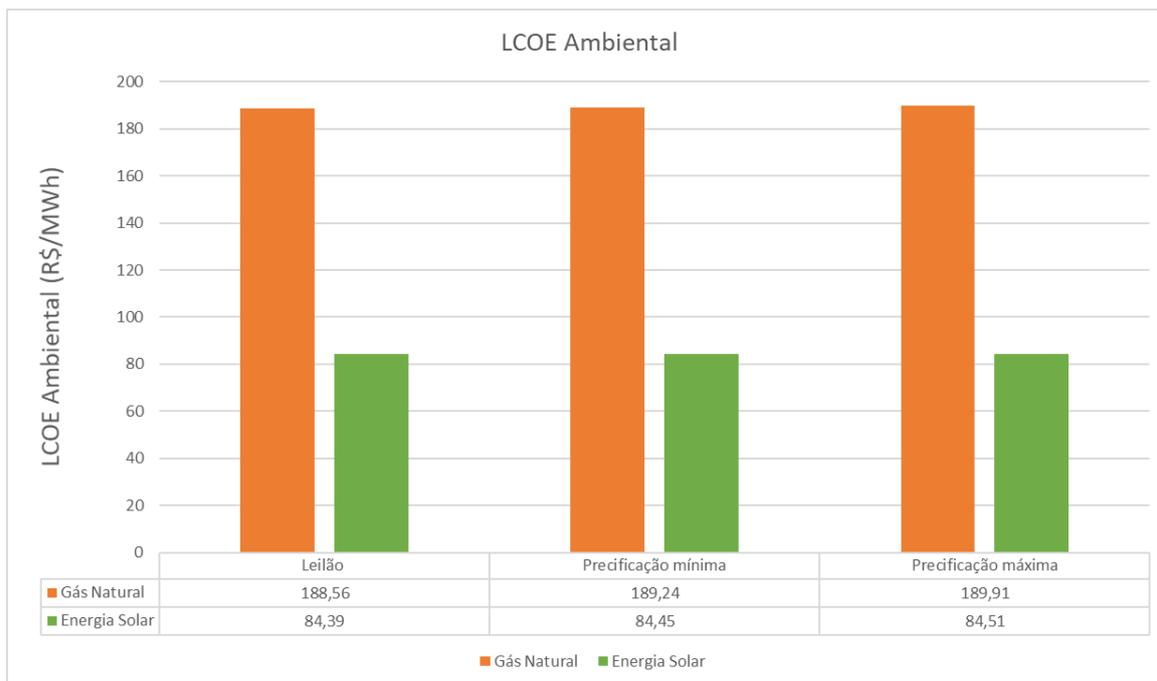


Figura 5.8 – LCOE Ambiental para cada tecnologia com a precificação mínima e máxima

É possível perceber que o custo da energia fotovoltaica é relativamente constante, já que durante seu ciclo de vida não há emissão durante a operação da usina solar, o que permite que a LCOE Ambiental seja praticamente devido os investimentos técnicos calculados no leilão de energia.

Isso demonstra que a troca de fonte de geração de energia para solar fotovoltaica é viável, preserva o meio ambiente, reduz a quantidade de emissões de GEE na atmosfera, melhora a qualidade de vida da população e permite que o recurso financeiro seja investido na própria tecnologia ou na sociedade, o que coincide com as propostas do Acordo de Paris e dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Diante das recentes notícias divulgadas na ONU News Perspectiva Global Reportagens Humanas, percebe-se que o aquecimento global é alarmante e os países devem tomar uma atitude o quanto antes para evitar uma catástrofe climática. Tanto que diversas reportagens de outubro de 2021 descrevem que o mundo não está nada perto de atingir as metas do Acordo de Paris e por isso a ONU elaborou um documento “Unidos pela Ciência 2021” que comprova essa afirmação e reforça a urgência de atitudes que realmente diminuam o aquecimento global.

Tendo em vista tal urgência, 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, conforme figura 5.9.

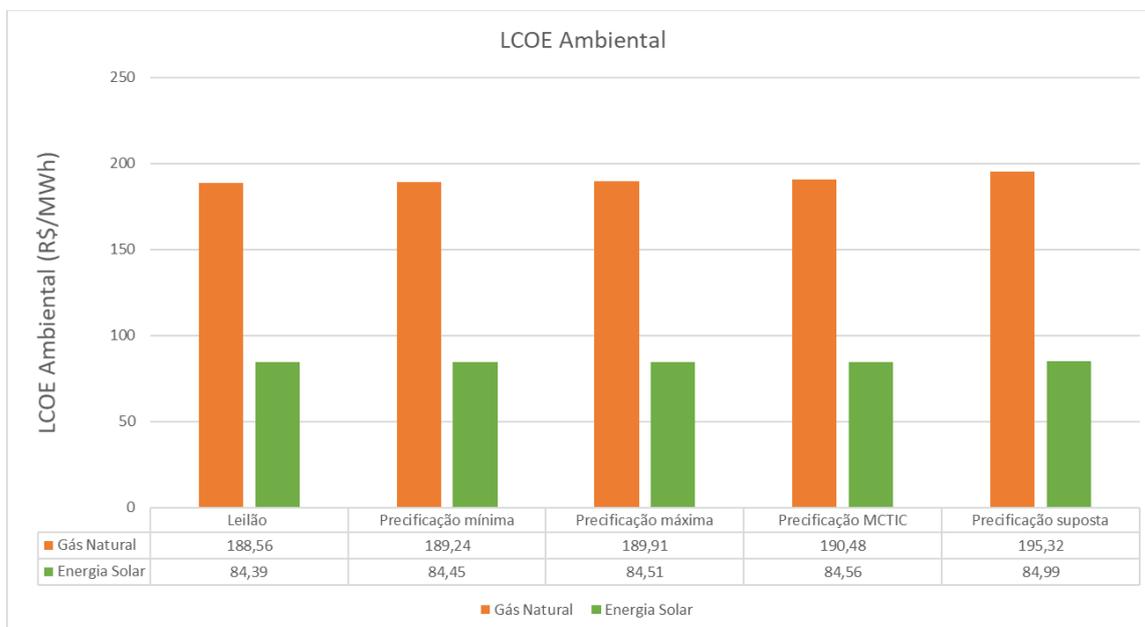


Figura 5.9 – LCOE Ambiental para cada tecnologia com a precificação mínima, máxima, do MCTIC e suposta.

Pela figura 5.9 percebe-se que as diferenças entre as precificações para a termelétrica a gás natural são de 0,36%, 0,72% e 3,59% para R\$ 20, 40 e 200/tCO₂eq respectivamente. Já para energia solar fotovoltaica são de 0,07%, 0,14% e 0,71%. O que representa um custo proporcional a precificação de carbono.

5.7 Mercado de carbono

O Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS) vem trabalhando desde 2016 na precificação de carbono brasileira através do mercado e da taxa de carbono. Para o mercado de carbono, ele defende a criação de um marco regulatório, através de uma lei, a fim de trazer credibilidade em cada uma de suas propostas.

Segundo o CEBDS, há 3 princípios dentro do mercado de carbono:

1. Implementação gradual;
2. Proteção à competitividade empresarial; e,
3. Boa governança.

Respeitando tais princípios é possível ter um mercado de carbono com um preço piso de R\$ 20/tCO_{2e}. Outro fator importante é a permissão para compensações do setor florestal e o fornecimento de isenção de impostos sobre ganhos de capital em transações comerciais de emissões para ajudar a conter os custos.

Para a Confederação Nacional da Indústria (CNI) o mercado de carbono no modelo *Cap and trade* é a melhor escolha para o Brasil, visto que o mercado permite a interação entre os setores regulados que compram e vendem permissões de emissões de GEE.

Nesse modelo tem-se definida uma quantidade máxima de emissões de GEE aos agentes regulados e são emitidas permissões de emissão de gases de efeito estufa. Essas emissões são disseminadas gratuitamente ou via leilões e podem ser comercializadas entre empresas.

Adotando o modelo *Cap and trade* para as escolas públicas do DF pode-se separar o recurso financeiro sobressalente para criar créditos em energias renováveis que complementem a energia solar fotovoltaica em outras instituições públicas do DF.

5.8 Taxa de carbono

Conforme dito anteriormente, a CNI aprova o mercado de carbono, já que a taxa de carbono permite o aumento do custo de produção o que atrapalharia a competitividade econômica. Além disso, não se tem a garantia que o pagamento da taxa seja revertido para ações de redução de emissões de GEE ou tecnologias de baixo carbono. Tanto que em uma pesquisa que a CNI realizou chegou-se à conclusão que teria um aumento de custos dos insumos da indústria de 6% na energia elétrica.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho tem 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 e a solar fotovoltaica. Em outras palavras, mostrar o quanto o valor ambiental é um fator importante na redução das emissões de GEE.

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 privado e a precificação de carbono indicada pelo projeto PMR tanto para o mercado de carbono quanto para taxação 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/tCO_{2e} foi de R\$ 189,24/MWh e R\$ 84,45/MWh, respectivamente, e para precificação máxima de R\$ 189,91/MWh e R\$ 84,51/MWh. Tais valores não correspondem a diferença vista no cálculo simplificado, mas são proporcionais ao esperado para o estudo de caso por se tratar de um fluxo de caixa com taxa de desconto a longo prazo de 5,32%.

Os valores encontrados não representam a realidade, um ponto que também foi crucial para os valores não atingirem as expectativas é a qualidade e a quantidade de dados referentes as metodologias para quantificar as emissões de gases de efeito estufa em cada sistema, assim como a precificação de carbono, que ainda é nova no Brasil, tendo seu marco regulatório no ano de 2021. O valor do leilão é de 2019, os dados de emissões da termelétrica a gás natural e solar fotovoltaica também são obsoletos, o que dificulta a acurácia dos resultados.

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. Além disso, os valores do PMR não representam a realidade do Brasil

Diante o supracitado, a precificação de carbono pode-se dar pelo mercado ou pela taxaço de carbono. Como o PMR está comeoando agora, os valores ainda são teóricos e precisam de tempo para encontrar o equilíbrio no mercado financeiro e comeoar a mostrar seus primeiros resultados. Entretanto, considerando o mercado de carbono como a melhor maneira de ingressar a precificaço 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.

Como proposta de trabalhos futuros tem-se:

- ✓ Analisar outros impactos ambientais do Acordo de Paris;
- ✓ Estimar quando será possível reduzir a temperatura global em 2° C com as medidas existentes;
- ✓ Projetar o aumento do custo da energia solar fotovoltaica com a revisão da Resoluço Normativa ANEEL n 482 de 17 de abril de 2012;
- ✓ Realizar uma análise de sensibilidade da precificaço do carbono;
- ✓ Apresentar uma ponderaço da transiço da termelétrica a gás natural e energia solar fotovoltaica;
- ✓ Precificar o carbono com valores mais reais;
- ✓ Demonstrar o mercado de carbono no setor de energia e seus impactos econmicos e ambientais; e,
- ✓ Demonstrar a taxaço de carbono no setor de energia e seus impactos econmicos e ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, S. A.; ABBASI, N. **The likely adverse environmental impacts of renewable energy sources.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/apenergy>. Acesso em: 19 abril. 2021.

ANEEL. **ATLAS de Energia Elétrica do Brasil 2008.** 3. ed. Brasília: [2008].

ANEEL. **Resolução Normativa N° 482.** 2012.

BENHELAL, E. et al. **Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry.** *Journal of Cleaner Production*, v. 51, p. 142–161, 15 jul. 2013.

BNDES. **Taxa de Juros de Longo Prazo – TJLP.** Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/taxa-juros-longo-prazo-tjlp>. Acesso em: 16 de outubro de 2021.

BRANKER, K.; PATHAK, M.; PEARCE, J. M. **A Review of Solar Photovoltaic Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15(9), n. August 2011, p. 4470–4482, 2018.

BRASIL. **MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Matriz Energética Nacional 2030.** Brasília: [s.n.].

CENSO ESCOLAR DF, 2020. **Censo 2020 – Dados gerais.** Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaWYwZDE4YWUtNzUzMC00YmExLTgxZmItN2JjNjJhOTk2ODdmIiwidCI6ImJhMjI5OThiLTQ4ZDctNDc3Zi05MjdjLTA3OTNiNTlkZjIwYyJ9&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.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum.** 2º edição. Editora da Fundação Getúlio Vargas. Rio de Janeiro, RJ, 1991.

CPTEC. **Glossários.** Disponível em: <https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>. Acesso em: 29 março. 2021.

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.

DUARTE, M. M. **Análise técnico-econômica acerca da implementação de geração solar fotovoltaica no Centro de Ensino Médio Taguatinga Norte**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136p.

FATHEAZAM, S. M. e DA SILVA, H. B. **Estudo dos custos de uso da fonte energética por termelétrica a gás natural ou fotovoltaica incluindo as externalidades ambientais no setor residencial do Distrito Federal**. ix, 104 p., 297 mm. ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019.

FGV. **Gestão e Precificação de Carbono: Riscos e oportunidades para Instituições Financeiras**. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas, abril de 2018.

GORINI, R. **Matriz energética brasileira**. p. 47–69, 2005.

HASTIK, R. et al. **Renewable energies and ecosystem service impacts**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 48, p. 608–623, 2015.

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

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

IAE. **CO 2 EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION (2012 Edition)-III**. p. 1–51, 2012.

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.

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

INPE. **Perguntas frequentes**. Disponível em: <http://www.inpe.br/faq/index.php?pai=9>. Acesso em 25 maio de 2021.

IPCC. **CLIMATE CHANGE 2014 Mitigation of Climate Change Summary for Policymakers and Technical Summary Mitigation of Climate Change**. [s.l: s.n.].2014.

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.

LORENZON, Adrianno. **Perspectivas para o preço do gás natural em 2021**. Disponível em: <https://editorabrasilenergia.com.br/perspectivas-para-o-preco-do-gas-natural-em-2021/>. Acesso em: 27 de setembro de 2021.

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

MARENGO ORSINI, J. A. **Água e mudanças climáticas**. In: [s.l: s.n.]. p. 13.

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.

ME – Ministério da Economia. **Síntese das análises e resultados do Projeto PMR Brasil**. Grupo Banco Mundial, dezembro de 2020.

MME – Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética – EPE, **Plano Nacional de Energia 2050**, 2018.

MME - Ministério de Minas e Energia **Mudança Climática e Saúde: Um Perfil do Brasil**. (2009). Brasília.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Energia Solar no Brasil e Mundo – 2016, 2017**.

ONU. **ONU News Perspectiva Global Reportagens Humanas**. Disponível em: <https://news.un.org/pt/tags/aquecimento-global>. Acesso em: 23 de outubro de 2021.

PADOAN, F. C. S. M.; ALTIMARI, P.; PAGNANELLI, F. **Recycling of end-of-life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development Solar Energy, 2019**.

PINHO, João Tavares e GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL – CRESESB. Edição Revisada e Atualizada. Rio de Janeiro, 2014.

PRENNUSHI, Giacomo, et.al. **Final report on Technical data, costs and life Cycle inventories of PV applications**. Programme New Energy Externalities Developments for Sustainability n° 502687.

ROBERT, E.K. et al. **Temperature-driven global sea-level variability in the common era**. Disponível em: <https://www.pnas.org/content/pnas/113/11/e1434.full.pdf>. Acesso em: 03 maio. 2021.

SANCHEZ, P. A.; SWAMINATHAN, M. S. **Cutting World Hunger in Half**. n. January 2005, p. 357–359, 2015. 2015.

SKONE, T. J. **Role of Alternative Energy Sources: Natural Gas Technology Assessment**., 2012.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **Human Development Report 2016: Human Development for Everyone**. New York, NY USA, 2016.

UNITED NATIONS FOR DEVELOPMENT PROGRAM (UNDP). **Relatório de Desenvolvimento Humano 2007 / 2008 Combater as alterações climáticas**: Retrieved from hdr.undp.org/sites/default/files/hdr2007-8-portuguese.pdf, 2008.

WRI BRASIL. **O Acordo de Paris: Ponto Decisivo para uma Solução Climática**. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/pt/node/41058>. Acesso em: 20 abril. 2021.