UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

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

AUTORES:

HELOÍSA HELENA BREDEMANN DA SILVA

SHAYAN MONAJEM FATHEAZAM

ORIENTADOR: RAFAEL AMARAL SHAYANI

COORIENTADOR: CARLOS HENRIQUE RIBEIRO LIMA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM ENGENHARIA AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2019

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

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

SHAYAN MONAJEM FATHEAZAM
HELOÍSA HELENA BREDEMANN DA SILVA

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 (COORIENTADOR)

_____
RICARDO TEZINI MINOTI – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (EXAMINADOR INTERNO)

_____
VANESSA CEZARIO FELIX – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (EXAMINADORA EXTERNA)

DATA: BRASÍLIA/DF, _____ DE_____ DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

FATHEAZAM, Shayan Monajem e DA SILVA, Heloísa Bredemann.

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)

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

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. CUSTO SOCIAL 2. EXTERNALIDADE

3. FOTOVOLTAICA 4. TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL

I. ENC/FT/UnB II. Bacharel (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MONAJEM FATHEAZAM, S. e BREDEMANN DA SILVA, H. **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**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104 p,2019

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: SHAYAN MONAJEM FATHEAZAM e HELOÍSA HELENA BREDERMANN DA SILVA
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: *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* 2°/ 2019: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019

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.

_____ _____
SHAYAN M. FATHEAZAM HELOÍSA H. B. DA SILVA

SMFATHEAZAM@GMAIL.COM HELOISABREDERMANN@GMAIL.COM

AGRADECIMENTOS

Eu, Heloísa, gostaria de agradecer ao apoio e confiança que meus pais, Helena e Fernando, sempre me deram. Com isso, foi possível eu crescer e me tornar quem sou hoje, alguém que busca uma melhoria do mundo de forma correta e otimista. Eu também não conseguiria chegar onde estou agora sem o apoio da minha amiga, Tatiana, que acreditou em mim sempre quando nem eu mesma acreditava. Com toda a paciência, sabedoria e humildade, conseguiu me motivar e me ajudar a persistir nos desafios. Obrigada por esse apoio e amizade durante todo o período do curso e para toda a vida. Um agradecimento especial também para a Camilla e Rebeca, presentes ao meu lado compartilhando desafios e vitórias nesses cinco anos. Um agradecimento especial ao meu namorado Victor, oferecendo todo o apoio emocional que eu precisei durante esse fim de curso e toda a ajuda com organização, que, sozinha, eu não teria conseguido. Gostaria de agradecer à minha dupla do TCC, Shayan, por todo o conhecimento compartilhado, conselhos, apoio emocional e conversas divertidas de madrugada na biblioteca. Você vai longe nessa vida. A vitória de chegar ao fim do curso de Engenharia Ambiental só foi possível com o suporte de cada um. Por toda a jornada deste estudo, gostaria de agradeceu ao meu orientador, Professor Rafael Shayani, por todas as ideias brilhantes e mostrar o caminho enquanto estávamos perdidos. Obrigada por estar sempre presente e acreditar na gente, nos motivando a enxergar além. Por fim, obrigada a todas as instituições que disponibilizaram dados e resultados que puderam ser utilizados para este estudo.

Eu, Shayan, gostaria de agradecer todos aqueles que conheci e me deram suporte nesta dura jornada, essa vitória com certeza é o resultado de muito apoio, tanto de amigos como de professores incríveis que possuo como exemplos de caráter, da minha família e da minha namorada Vitória, que sempre me encorajou naturalmente a ser a melhor pessoa que eu posso ser. Um agradecimento muito especial para minha amiga e companheira de trabalho final Heloísa Helena, foi um prazer ter a sorte de estar ao seu lado para produzir algo que nos dá tanto orgulho, que possui um pedaço de cada um e um prazer ainda maior de finalizar essa etapa de vida ao seu lado, o destino realmente foi meu amigo nesta parte e as lembranças que carrego hoje vou guardar para sempre, muito obrigado. Obrigada ao orientador, Professor Shayani e a todas as instituições consultadas para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Os debates presenciados na realidade giram em torno de como a sociedade pode continuar se desenvolvendo com uma quantia limitada de recursos do Planeta Terra. Esse conceito foi capaz de gerar acordos internacionais abordando compromissos para a redução de danos ao meio ambiente de forma a garantir uma perspectiva de qualidade de vida para gerações futuras, como foi o caso do Acordo de Paris visando a redução de gases de efeito estufa na atmosfera. O consumo de energia é algo preocupante, pois apresenta uma curva crescente, ao mesmo tempo em que os recursos fósseis são limitados e responsáveis pelo aumento de gases de efeito estufa na atmosfera. Este trabalho apresentou uma proposta para quantificar em valor monetário as externalidades ambientais causadas pela emissão dos gases de efeito estufa de duas fontes de energia, uma renovável, representada pela solar fotovoltaica e outra não renovável, representada pela termelétrica a gás natural, e somar este valor ao custo convencional da energia. Dessa forma foi possível apresentar a relevância desses impactos para a sociedade em uma unidade facilmente reconhecida e passível de comparação.

O cálculo foi realizado com base no custo nivelado de energia com as externalidade ambientais (LCOE Ambiental). A parcela do custo atual da energia foi retirado do 30° Leilão de Energia Nova, enquanto as emissões de gases de efeito estufa foram custeadas a partir dos resultados de revisões bibliográficas sobre a análise do ciclo de vida de cada tecnologia. Esse valor foi multiplicado por uma taxa de carbono adotada por países como Reino Unido, Singapura e Canadá. Os resultados obtidos para o LCOE Ambiental para a termelétrica a gás natural de ciclo simples, ciclo combinado e fotovoltaica, respectivamente, foram de 228,98 R$/MWh; 143,77 R$/MWh e 10,04 R$/MWh para as taxas do Reino Unido. Os resultados das taxas de Singapura foram calculados para dois cenários diferentes de aumento do custo do carbono para as três tecnologias: termelétrica a gás natural de ciclo simples, ciclo combinado e fotovoltaica, respectivamente, resultando em 22,49 R$/MWh; 14,12 R$/MWh e 0,99 R$/MWh para o primeiro cenário e 33,05 R$/MWh; 20,75 R$/MWh e 1,44 R$/MWh para o segundo. Por fim, para a taxa canadense os resultados foram de 120,81 R$/MWh; 75,85 R$/MWh e 5,27 R$/MWh. Observa-se um custo 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.

Sumário

1. INTRODUÇÃO 1

2. OBJETIVOS GERAIS 3

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 3

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

3.1 CICLO DE CARBONO 4

3.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS 5

3.2.1 Produção de Gases de Efeito Estufa 5

3.2.2 Alteração da Temperatura 8

3.3 IMPACTOS ASSOCIADOS AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS 11

3.3.1 Impactos em sistemas naturais 12

3.3.2 Impactos no desenvolvimento humano 13

3.3.2.1 Necessidades básicas 13

3.3.2.2 Relações Sociais 15

3.3.2.3 Saúde 15

3.4 CONTEXTO ENERGÉTICO 17

3.4.1 Contexto Energético Global 17

3.4.2 Contexto Energético Brasileiro 19

3.5 ENERGIA TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL 22

3.5.1 Conceito Técnico 22

3.5.2 Contexto Global 22

3.5.3 Contexto Brasileiro 25

3.5.4 Aspectos Ambientais 29

3.6 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA 30

3.6.1 Conceito Técnico 30

3.6.2 Contexto Global 31

3.6.3 Contexto Brasileiro 33

3.6.4 Aspectos Ambientais 35
3.7 APLICAÇÃO LEVELIZED COST OF ENERGY 37
3.8 TAXA DAS EXTERNALIDADES 39
3.8.1 Preço Mínimo de Carbono 42
3.8.2 Lei de Preços de Carbono 43
3.8.3 Sistema de Preços Baseados em Resultados 45
3.9 ESTUDO DE CASO 46
4. METODOLOGIA 47
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 47
4.2 POTÊNCIA INSTALADA 49
4.2.1 Disponibilidade de Área 50
4.3 CUSTO NIVELADO DE ENERGIA 51
4.3.1 Cálculo da LCOE 52
4.4 EMISSÕES DE GEE 55
4.4.1 Cálculo do Carbono Equivalente 55
4.5 ENERGIA SOLAR 55
4.5.1 Dados de Entrada 56
4.5.2 Análise de Emissão de GEE 58
4.6 GÁS NATURAL 59
4.7 CUSTO SOCIAL DO CARBONO 61
4.7.1 Internalização das Externalidades 62
4.7.2 Análise de Sensibilidade 63
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 65
5.1 Potência Instalada 65
5.2 Disponibilidade de Área 66
5.3 Cálculo da LCOE 69
5.4 Emissões de GEE 71

5.5 Custo da externalidade 76
5.6 LCOE Ambiental 79
6 CONCLUSÃO 83
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 85
APÊNDICES 90
APÊNDICE A - MAPA DE RECURSO SOLAR BRASIL 90
APÊNDICE B - MAPA DE RECURSO SOLAR ALEMANHA 91

Lista de Figuras

Figura 1 - Emissão Global de Carbono, 1960 - 2017. 5
Figura 2 – Atividades que mais produzem Gases de Efeito Estufa (esquerda), Emissão de Gases de Efeito Estufa no Setor Energético (direita) 7
Figura 3 Emissões de CO_2 por combustível (esquerda), Emissões de CO_2 por setor (direita). 8
Figura 4 Mudanças na temperatura e na precipitação médias. 10
Figura 5 Emissão de CO_2 Global com base no consumo de combustíveis fósseis. 17
Figura 6 Geração de eletricidade global anual 18
Figura 7 Geração de Eletricidade por fonte 19
Figura 8 Produção de energia elétrica brasileira. 21
Figura 9 - Porcentagem de energia primária global por combustível 23
Figura 10 – Comparação entre a produção de gás natural nos países e seu consumo. 25
Figura 11 - Gasodutos construídos e em planejamento no Brasil. 27
Figura 12 - Crescimento na Geração de Eletricidade por Gás Natural no Brasil 28
Figura 13 - Geração de energia no Brasil por fonte fotovoltaica. 32
Figura 14 - Geração de energia na Alemanha por fonte fotovoltaica. 33
Figura 15 - Evolução dos sistemas fotovoltaicos de telhado por alcance de potência. 35
Figura 16 – Média anual dos preços dos módulos por Mercado em 2015 e 2016. 36
Figura 17- Comportamento da indústria produtora de eletricidade com base no carvão mineral 43
Figura 18 - Fluxograma da Metodologia do Projeto 48

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Concentração aproximada e tempo de vida de Gases de Efeito Estufa (GEE) na troposfera. 6
Tabela 2 - Relação de Variáveis Ambientais com o aumento de GEE. 10
Tabela 3 - Emissões de GEE na combustão do diesel e do gás natural. 30
Tabela 4 - Valores utilizados como características técnicas para a instalação. 50
Tabela 5 - Preço médio da venda de energia do Leilão de Energia Nova A-6 de 2019 54
Tabela 6 - Características da placa fotovoltaica. 58
Tabela 7 - Parâmetros utilizados para descobrir o W 59
Tabela 8 - Consumo de energia elétrica 65
Tabela 9 - Potência instalada para cada tecnologia suprir o consumo de energia elétrica residencial do DF. 66
Tabela 10 - Quantidade de casas e área de telhado em bairros do DF. 67
Tabela 11 - Quantidade de prédios e área de telhado em bairros do DF. 67
Tabela 12 - Resultado de emissão de GEE nas termelétricas a Gás Natural. 72
Tabela 13 - Harmonização dos resultados de emissões de Gases de Efeito Estufa 72
Tabela 14- Emissão de GEE no ciclo de vida da fotovoltaica 74
Tabela 15- Dados referentes ao cálculo de w 75
Tabela 16- Cálculo GHG de Brasília 75
Tabela 17 - Harmonização dos resultados de emissões de Gases de Efeito Estufa 76
Tabela 18- Custo do Carbono 76
Tabela 19 - Análise do custo das externalidades ambientais aplicado para a população do Distrito Federal. 78
Tabela 20 - Resultado da LCOE Ambiental para cada tecnologia em cada cenário em R$/MWh. 82

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Porcentagem das Reservas de Gás Natural provadas por região 24
Gráfico 2 - Evolução do consumo e produção de Gás Natural no Brasil ao longo de 10 anos. 26
Gráfico 3 - Comportamento do mercado com internalização da externalidade. 40
Gráfico 4 – Evolução do preço da fonte solar fotovoltaica em leilões de energia do mercado regulado 54
Gráfico 5 - Tipos de módulos presentes no mercado. 57
Gráfico 6 - Comparação da potência instalada para cada tipo de tecnologia de geração de energia elétrica..... 66
Gráfico 7 - Comparação do uso total da área de telhados de Sobradinho I ou apenas metade 68
Gráfico 8 - Variação do preço de venda de energia pela CCEE ao longo dos anos..... 70
Gráfico 9 - Cenário do aumento do preço da energia fotovoltaica devido à atualização da REN 482/2012 EM 2020. 71
Gráfico 10 - Comparação de emissões de GEE em CO_2eq em termelétrica a gás natural de ciclo simples e de ciclo combinado 73
Gráfico 11 – Comparação de emissões de GEE em CO_2eq em usina fotovoltaica e termelétrica a gás natural..... 74
Gráfico 12 - Evolução dos preços do carbono por tipo de precificação ao longo dos anos.77
Gráfico 13 – Custo das emissões de GEE em R$/MWh 78
Gráfico 14 - Custo total da LCOE Ambiental para cada tecnologia 80
Gráfico 15 - Contribuição na LCOE Ciclo Simples Cenário 1 81
Gráfico 16 - Contribuição na LCOE Ciclo Combinado Cenário 1..... 81
Gráfico 17 - Contribuição na LCOE Fotovoltaica Cenário 1 81
Gráfico 18 - Contribuição na LCOE Ciclo Simples Cenário 2 81
Gráfico 19 - Contribuição na LCOE Ciclo Combinado Cenário 2..... 81
Gráfico 20 - Contribuição na LCOE Fotovoltaica Cenário 2 81
Gráfico 21 - Contribuição na LCOE Ciclo Simples Cenário 3 81
Gráfico 22 - Contribuição na LCOE Ciclo Combinado Cenário 3..... 81
Gráfico 23 - Contribuição na LCOE Fotovoltaica Cenário 3 81
Gráfico 24 - Contribuição na LCOE Ciclo Simples Cenário 4 82
Gráfico 25 - Contribuição na LCOE Ciclo Combinado Cenário 4..... 82
Gráfico 26 - Contribuição na LCOE Fotovoltaica Cenário 4 82

Lista de Equações

Equação 1 - Cálculo da potência de pico para energia solar fotovoltaica. 49
Equação 2 - Cálculo da potência de pico para termelétrica a gás natural 49
Equação 3- Cálculo da Irradiação mensal total 50
Equação 4 - Cálculo da LCOE 52
Equação 5 - Cálculo do Fator de Recuperação do Capital 53
Equação 6 - Cálculo Custo Nivelado de Energia Ambiental..... 53
Equação 7 - Definição da equivalência entre o gás de efeito estufa com o dióxido de carbono. 55
Equação 8 - Transformação de irradiação média diária para irradiação anual..... 57
Equação 9 - Determinação do peso emitido de GEE para cada 1 kWh produzido 58
Equação 10 - Cálculo do peso dos gases emitidos durante o Ciclo de Vida 59
Equação 11 - Transformação de g CO_2eq /kWh para ton CO_2eq / MWh 59
Equação 12 - Geração de gases de efeito estufa produzidos para atender o consumo residencial. 61
Equação 13 - Custo do Carbono em cada país 62
Equação 14 - Cálculo do Custo Social 62
Equação 15 - Cálculo da média equivalente de ambas energias em 2019. 64
Equação 16 - Cálculo do aumento hipotético do custo de energia fotovoltaica em 2020... 64
Equação 17 - Cálculo da média da diferença de custo ao longo dos anos para o gás natural. 64

Lista de Abreviações

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

CACO3 Carbonato De Cálcio

CAN Canadá

CCEE Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CEBS Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável

CH_4 Metano

CO_2 Dióxido De Carbono

ENOS El Niño, Oscilação Sul

EPA Environmental Protection Agency

EPE Empresa De Pesquisa Energética

GBR Grã Bretanha (Reino Unido)

GEE Gases De Efeito Estufa

Gt Gigatoneladas

Gtco2eq Gigatoneladas De Dióxido De Carbono Equivalente

GW Giga watts

Gwh Gigawatts Hora

GWP Global Warming Potencial

Hfcs Hidrofluorocarbonetos

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 Ministerio De Minas E Energia

Mtoe Megatoneladas Equivalente De Petróleo

MW Megawatts

N_2O Óxido Nitroso

NETL **National Environmental Technology Laboratory**

Nox Óxido De Nitrogênio

ODP Oscilação Decantal Do Pacífico

ODS Objetivos Do Desenvolvimento Sustentável

ODS 7 Objetivos de 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.

SGP Singapura

SIN Sistema Interligado Nacional

TCO2 Teor de dióxido de carbono

TJ Terajoule

TMP Transporte da Matéria Prima

Twh Terawatts Hora

WWF World Wildlife Found

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Programa das Nações Unidas Para o Desenvolvimento (PNUD) “as alterações climáticas são um fato científico incontestável”. Os relatórios do Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC) apontam que essas alterações estão relacionadas aos aumentos das emissões de gases que causam o efeito estufa, intensificados pela queima de combustíveis fósseis.

Segundo Houghton. J, (2009) o efeito estufa é um processo natural que depende da concentração de gases como o Dióxido de Carbono, o Metano e o Oxido Nitroso, responsáveis pelo balanço de radiação, atuando na retenção de calor para manter a vida no planeta. Atualmente há uma crescente interferência no ciclo natural desses gases, principalmente no Dióxido de Carbono (CO_2). O CO_2, antes retido em reservas naturais pelo ciclo de carbono, agora é devolvido para a atmosfera em quantidade crescentes devido a extração e queima de combustíveis fósseis, contribuindo para o aumento na temperatura global e na intensificação dos efeitos climáticos extremos, podendo afetar diretamente ou indiretamente o desenvolvimento do ser humano e o equilíbrio de ecossistemas.

Como os gases de efeito estufa são um problema global, políticas internacionais como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris estabeleceram metas para mitigação da emissão desses gases. Um exemplo dessas ações é a diminuição do uso de combustíveis fósseis, principalmente no setor energético, apontado pelo Relatório das Estatísticas de Emissões de CO_2 da Agência Internacional de Energia em 2018, como o setor de maior contribuição no aumento das emissões. Em contrapartida, os países que estão crescendo economicamente possuem uma necessidade de ampliação de seu setor energético, aumentando a produção de eletricidade para acompanhar sua crescente demanda e garantindo a infraestrutura necessária para seu avanço.

Com a elevada disponibilidade de gás natural no território, a capacidade de produção elétrica ininterrupta e sua menor emissão de Gases de Efeito Estufa, comparadas com termelétricas utilizando carvão, faz com que termelétricas movidas a gás natural se tornem atraentes no ponto de vista energético, fazendo com que seja uma potencial alternativa para diversificação da matriz energética do país (MME, 2007; JACOBSON, 2019). Além de possuir essas vantagens, em 2019 foi criado o Comitê de Monitoramento da Abertura do Mercado de Gás Natural, com a finalidade de organizar e incentivar ações como a diminuição do seu custo como combustível, para que torne o gás natural mais competitivo no setor energético.

Por outro lado, a condição de ser um combustível de origem fóssil mais limpo, não exclui sua contribuição para o desequilíbrio do efeito estufa, como também não é apenas a combustão que deve ser analisada para determinar o grau de impacto do combustível e sim a contribuição durante o ciclo de vida, iniciando pela sua extração.

Outra alternativa de fonte energética, difundida ao redor do mundo é a geração solar por módulos fotovoltaicos. Entre o ano de 2016 e 2017, o sistema apresentou um crescimento de potência instalada global de 76 GW para 98 GW (IAE, 2018). Esse modelo de geração pode ser considerado como uma forma de mitigar as emissões de gases de efeito estufa, sendo a contribuição para as alterações climáticas quase inexistentes durante sua operação, além de que avanços tecnológicos estão fazendo com que essa fonte energética aumente cada vez mais sua rentabilidade e vida útil (BRANKER; PATHAK e PEARCE, 2018). Mesmo se tratando de uma fonte considerada como energia limpa, ainda assim há a necessidade de avaliar suas contribuições de impactos ambientais para a atmosfera durante a produção, transporte e descomissionamento das placas fotovoltaicas.

É importante também revisar atos normativos, de maneira que seja considerado o futuro desta tecnologia no país, como é o caso da alteração da Resolução Normativa n° 482/2012, a qual atualmente possibilita abater 1 kWh consumido por 1 kW gerado, por alternativas que podem reduzir a compensação de energia e consequentemente, aumentar seu custo.

Visto que existem acordos internacionais que tendem a reduzir as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera e ambas as fontes são potenciais alternativas de investimento no Brasil, com vantagens e desvantagens diferentes, é necessário elaborar uma avaliação de custo comparativo de ambas as tecnologias, levando em conta também o impacto que causam ao meio ambiente. Um dos impactos associados ao aquecimento global é a alteração do regime de chuvas em determinados locais. O Distrito Federal, caracterizado pelas duas estações do ano bem definidas de chuva e seca do bioma cerrado, vem apresentando ao longo das décadas uma redução na quantidade dessas chuvas. Dessa forma, o estudo do custo das emissões de gases de efeito estufa internalizado no preço da energia e aplicado ao Distrito Federal, promove uma quantificação de como estes impactos poderiam afetar os cidadãos devido a modificação do regime pluviométrico da unidade federativa.

O impacto será referido neste estudo como externalidades negativas e será avaliado com o valor econômico por meio do cálculo do custo nivelado de energia, internalizando o custo das emissões de gases de efeito estufa. Assim, além do investimento necessário, será avaliado qual sistema apresentará um custo socioambiental mais elevado em R$/MWh.

2. OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho possui como objetivo geral a avaliação do custo monetário entre uma usina termelétrica a gás natural e a geração de eletricidade por sistemas solares fotovoltaicos, internalizando aspectos socioambientais nos parâmetros de cálculo.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as emissões de gases de efeito estufa da geração de energia por termelétrica a gás natural e por solar fotovoltaica;
- Monetizar as emissões de gases de efeito estufa da termelétrica a gás natural e da geração de energia por solar fotovoltaica;
- Estimar o custo de energia elétrica produzida por termelétricas a gás natural e de energia fotovoltaica, considerando externalidades ambientais das emissões de gases de efeito estufa;
- Estimar o benefício econômico comparativo entre a energia termelétrica por gás natural e por energia solar fotovoltaica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados dados referentes a literatura e artigos realizados em que complementam, com dados e informações, além de dar suporte para o leitor acerca do estudo realizado.

3.1 CICLO DE CARBONO

Na história do planeta foram vivenciados momentos em que a concentração de gases de efeitos estufa eram maiores que os níveis atuais, como também momentos em que suas concentrações eram relativamente baixas resultando nos períodos de glaciações. A variação térmica e da concentração de CO_2 em um longo período de tempo é dada como natural e eram causadas por emissões de atividades vulcânicas, dissoluções do carbonato de rochas e respiração da biota (PACHECO, HELENE, 2006).

O carbono é naturalmente depositado na biomassa, na atmosfera, no oceano e sob a forma de carbonatos e carvão em rochas sedimentares. Os componentes do sistema climático e a atmosfera possuem relação com a temperatura global, e os processos de troca do carbono entre a atmosfera e as reservas oceânicas e biota foram equilibrados. São contabilizadas no ciclo biogeoquímico do carbono apenas as reservas oceânicas, atmosférica e biótica terrestre, devido ao fato de que carbonatos e carvão estocados não são permutáveis naturalmente, sendo mantidos intocados (BERNER, LASAGA, 2010; PACHECO, HELENE, 2006).

A biota, dominada pelo Reino Vegetal em termos de volume, absorve por ano cerca de 102 Gt de CO_2 atmosférico pela fotossíntese e libera 50 Gt de CO_2 na atmosfera pela respiração. Devido à decomposição da matéria vegetal, é liberado 50 Gt de CO_2 por ação de bactérias, sendo retidos 2 Gt de carbono na biomassa. De forma similar, por difusão, o CO_2 é utilizado na ação do fitoplâncton dos oceanos, na qual consegue consumir cerca de 92 Gt de CO_2 e devolver 90 Gt de carbono anualmente, possuindo um resultado líquido de 2 Gt de CO_2 retidos no oceano (LEGGETT, 1990).

A utilização de carbonetos e carvão como combustíveis fósseis faz com que o carbono da matéria orgânica, que foi armazenada e era originária de organismos preexistentes, seja adicionado na atmosfera e interfira com o equilíbrio natural do ciclo de carbono. Além disso, o desmatamento e queima de florestas contribui para a emissão de CO_2 armazenados em sua biomassa, causando um déficit devido à diminuição de indivíduos para a retirada de CO_2 pela biota. A consequência deste desequilíbrio, que de acordo com o IPCC se intensificou após a industrialização, é o principal motivo das alterações climáticas, excedendo a

capacidade de absorção natural do dióxido de carbono e outros gases que produzem efeito estufa no planeta (LEGGETT, 1990; UNDP, 2007;IPCC,2007).

3.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS

3.2.1 Produção de Gases de Efeito Estufa

Com o avanço da industrialização, os impactos da poluição relacionados aos meios produtivos e meios de transporte sobre o meio ambiente aumentam (MARANGON, COLLISCHONN, & MARENGO, 2014). De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos 2017, as emissões globais de dióxido de carbono aumentaram mais de 50% quando comparadas com os níveis de CO_2 presentes no ano de 1970, observado na Figura 1.

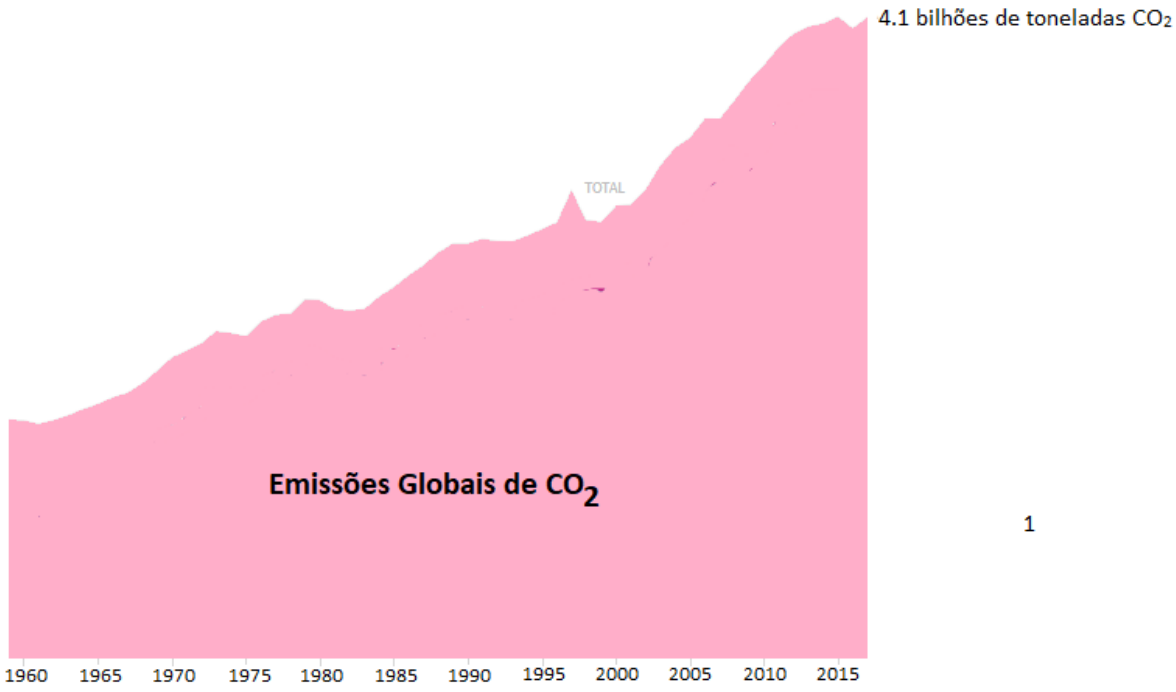


Figura 1 - Emissão Global de Carbono, 1960 - 2017.
Fonte: Global Carbon Project, 2017 (Adaptado)

O aumento de emissões de carbono sugere aumento da concentração de outros gases nos quais também são gerados pela queima de combustíveis, produções industriais (eletricidade ou geração de calor) e desmatamento, juntos são chamados gases de efeito estufa (KING et al., 2007). No Protocolo de Kyoto , são considerados GEE antropogênicos o Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O), Hidrofluorcabonos (HFCs), Perfluorcarbonos (PFCs) e o Hexafluoreto de Enxofre (SF_6). Dos gases mencionados os mais abundantes na troposfera são o Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4) e Óxido Nitroso (N_2O) (ZAHEDI,2012) demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Concentração aproximada e tempo de vida de Gases de Efeito Estufa (GEE) na troposfera.

Gás de Efeito Estufa	Concentração aprox. Pré-1750	Concentração aprox. recente na Troposfera	Tempo de vida (anos)
Concentrações (ppm)			
Dióxido de Carbono (CO_2)	280	388.5	100
Concentrações (ppb)			
Metano (CH_4)	700	1807	12
Oxido Nitroso (N_2O)	270	322	114
Ozônio troposférico (O_3)	25	34	Algumas horas
Concentrações (ppt)			
CFC -11	0	241	45
CFC- 12	0	534	100
CF- 113	0	76	85
HCHC – 22	0	203.5	12
HCFC-141b	0	20	9,3
HCFC-142b	0	20	17,9
Halon 1211	0	4	16
Halon 1301	0	3.2	65
HFC-134ª	0	54,5	14
Carbono Tetracloreto	0	87	26
Metil clorofórmio	0	6,77	5

Fonte:(BENHELAL et al., 2013)

De acordo com Sá *et al*. (2016):

> "A interação entre mudanças climáticas, emissões de poluentes e concentrações atmosféricas ainda é de grande debate. Muito ainda tem que ser explorado para entender e com precisão prever as mudanças nos níveis de poluentes em condições climáticas futuras e em diferentes escalas espaciais." (SÁ et al., 2016)-traduzido

Uma concentração elevada de GEE é associada ao aumento da temperatura global, pois os mesmos provocam uma retenção da radiação infravermelha emitida pela Terra, resultando no efeito estufa. Um aumento na quantidade desses gases acarreta no

desequilíbrio do balanço radiativo, havendo uma maior conservação do calor emitido pela irradiação energética da superfície do planeta para a atmosfera, onde grande parte é retido pelos gases de efeito estufa (LEGGETT, 1990).

Dos GEE, o que mais contribuirá para o aquecimento global nos próximos 100 anos será o Dióxido de Carbono. As principais atividades atualmente são realizadas através da oxidação do carbono, fazendo com que as emissões de CO_2 sejam 2/3 das gerações presentes de GEE emitidos, enquanto as emissões de CH_4 e N_2O estão relacionadas a atividades como agropecuária, disposição de rejeitos orgânicos e extração de combustíveis (LIU & WU, 2017).

Entre 1990 e 2015 houve um aumento das emissões de GEE, sendo o setor energético o que obteve maior crescimento com 12.6 $GtCO_2eq$ enquanto o restante das atividades geradoras de GEE somadas tiveram crescimento de 2.7 $GtCO_2$-eq. Observa-se na Figura 2 à direita os GEE que compõem as emissões do setor energético o mais emitido é o CO_2 . (IEA, 2017).

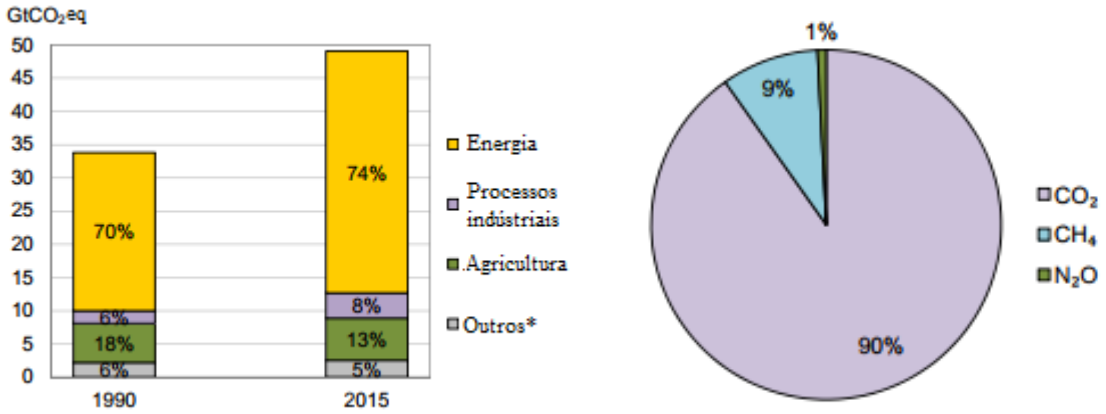


Figura 2 – Atividades que mais produzem Gases de Efeito Estufa (esquerda), Emissão de Gases de Efeito Estufa no Setor Energético (direita)
Fonte: IEA,2017

Nota 1: Em Outros* estão incluídas as emissões por: queimadas, usos de solventes, resíduos e turfas
Nota 2: $\boldsymbol{GtCO_{2eq}}$ é a equivalência da emissão de um determinado gás de efeito estufa em uma quantidade de dióxido de carbono.

É notável a contribuição do setor energético para a emissão de gases de efeito estufa, sendo o CO_2 o mais produzido. De acordo com Benhelal et al (2013):

> "O Dióxido de Carbono [...] é o gás mais importante e um dos mais abundante dentro de todos os GEEs, possuindo a maior contribuição no fenômeno de aquecimento global. Portanto, encontrar meios de mitigar as emissões de CO2 é a prioridade em estudos de diminuição dos efeitos de mudança climática."(BENHELAL et al., 2013)- traduzido

É observado que os gases de efeito estufa interferem na radiação emitida pela superfície da Terra, sendo o CO_2 responsável por aproximadamente 60% da mudança do balanço da radiação e o CH_4 responsável por 20% (KING et al., 2007).

Das atividades que emitem CO_2, a Figura 3 abaixo aponta como principais contribuintes os **setores energéticos** e os **meios de transporte**, respectivamente. Essa informação é fundamental para a criação de medidas de redução de emissões, sendo a inclusão do setor energético essencial na adoção de políticas de mitigação do aquecimento global devido à grande influência que este setor tem de emissão destes gases, principalmente o CO_2 (IEA, 2017; T.M.I. Mahlia, 2002).

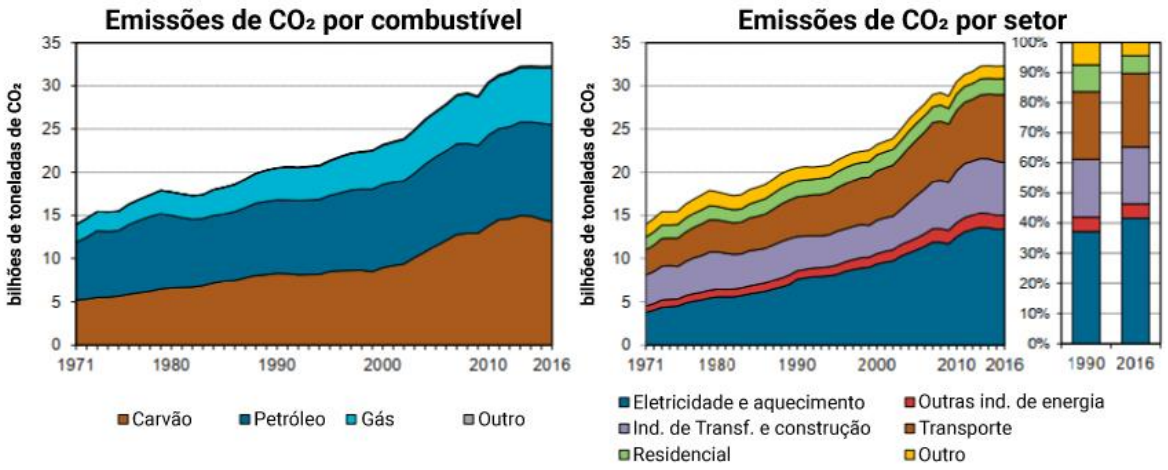


Figura 3 Emissões de CO_2 por combustível (esquerda), Emissões de CO_2 por setor (direita).
Fonte: IEA, 2017

3.2.2 Alteração da Temperatura

De acordo com o IPCC (2015), a temperatura média global aumentou aproximadamente 1.0°C quando comparada com a média global de 1850 – 1900, caso este ritmo continue as estimativas são de 1.5°C alcançados entre 2030 e 2050. Com o aumento da temperatura o comportamento de sistemas dependentes do clima é afetado.

O termo clima significa condições básicas do tempo (pressão do ar, mudanças do fluxo de vento, padrões de chuva, variabilidade de temperatura) de uma região (HUSSAIN

et al., 2018), sendo assim fatores que dependem do clima como a formação de geleiras, monções de verão e secas são diretamente afetadas caso o mesmo sofra alterações.

As alterações climáticas possuem uma abrangência global, tanto em suas causas como em sua consequência (IPCC,2007), sendo assim os efeitos dos GEE que estão sendo emitidos nos países da Europa poderão ter seus impactos nos países da África ou em qualquer parte do mundo. Um exemplo são os polos, os impactos que as geleiras sofrem por consequências da mudança climática decorrente da elevada emissão dos países industrializados.

Segundo Roland Gehrels (2016), no século XX o nível do mar aumentou cerca de 0,06 mm a cada década, em um cenário dado pelo IPCC (2015) com uma temperatura global de 1.5°C de acréscimo, resultou no aumento de até 1 metro no nível do mar até 2100, com estimativas de contínuo aumento após 2100 devido à instabilidade das geleiras, crescendo em 167% quando comparado com as estimativas de Roland Gehrels.

A perda irreversível das geleiras por consequência do aumento da temperatura dos oceanos e topos montanhosos impacta diretamente as zonas costeiras, arquipélagos e regiões de vales. Além de acarretar em um aumento significativo no nível do mar, à medida que o oceano aquece a energia glacial liberada desencadeia ciclones tropicais cada vez mais intensos (UNDP, 2007).

De acordo com PENA (2019) fenômenos de oscilações climáticas como Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a El Niño - Oscilação Sul (ENOS) são fenômenos climáticos naturais que influenciam mudanças climáticas globais. Ambos ocorrem de forma muito semelhante, caracterizados por anomalias da temperatura na superfície do mar. Os resultados dessas oscilações refletem na variabilidade interanual do clima e no ciclo anual das chuvas e consequentemente, nas vazões de bacias (MARENGO ORSINI, 2008) sendo esses fenômenos responsáveis por grandes efeitos na ecologia, além de possuírem influência global no sistema climático, afetando sociedades e economias de diversos países (TIMMERMANN et al., 2015). São atribuídos ao ENOS as secas no leste e sul da Ásia e aumento da probabilidade de furacões no Atlântico (UNDP, 2007).

No Brasil as anomalias climáticas geradas pelas oscilações na temperatura da superfície do mar Atlântico Sul e Tropical, e ao ENOS, produziram secas no Nordeste(1977,1983 e 1998), Sul(2004 até 2006), Centro-Oeste e Sudeste em 2001, e na Amazônia (1926, 1983, 1998 e 2005) (MARENGO, 2008).

Embora esses eventos ocorram naturalmente e não possam ser atribuídos ao aumento de GEE na atmosfera, o Relatório de Desenvolvimento Humano (2007) aponta que as

intensidades e as frequências desses eventos estão relacionadas às consequências climáticas causadas por GEE. A Figura 4 mostra as alterações da temperatura e precipitação caso as emissões continuem no ritmo atual.

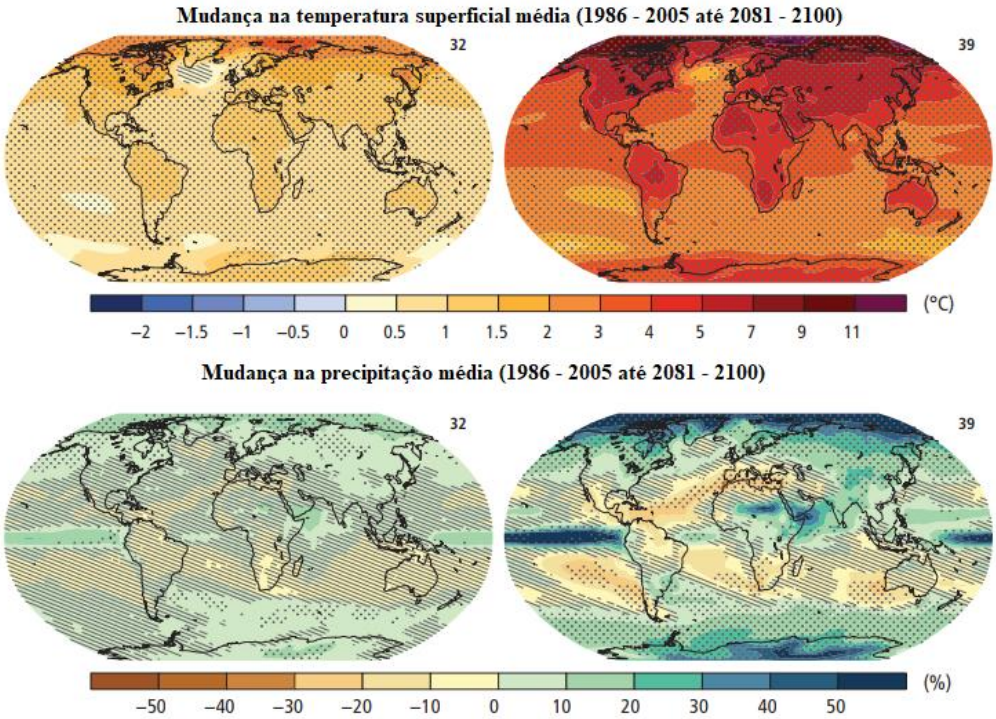


Figura 4 Mudanças na temperatura e na precipitação médias.
(Fonte: ERNMENTA; NEL, 2014)

Os Gases de Efeito Estufa , quando em concentrações altas, refletem no clima devido a sua atuação como conservador do calor irradiado da superfície, isso afeta principalmente regiões mais sensíveis em intensidade e frequência. A Tabela 2 mostra as tendências das variáveis climáticas e quais probabilidades de as ocorrências possuírem relação com o aumento das concentrações de GEE na atmosfera.

Tabela 2 - Relação de Variáveis Ambientais com o aumento de GEE.

Componentes	**Variáveis**	**Tendência**	**Probabilidade de ocorrência após 1960**
Nível do mar	Nível do mar	+[1]	Muito Provável

D

[1] Indicativo de aumento

	Derretimento das geleiras temporárias	+	Muito Provável
	Aquecimento das águas de superfície	+	Provável
Criosfera	Extensão de gelo no Hemisfério Norte	-[2]	Provável
	Extensão média do gelo no Ártico	-	Muito Provável
	Temperatura do pergelissolo	+	Provável
Eventos Extremos	Ondas de calor	+	Provável
	Inundações	+	Provável
	Tempestades	+	Provável
	Secas	+	Muito Provável
Circulação Oceânica Atmosférica	El Niño -ENOS	**Δ**[3]	Mais provável que não > 50%
	Oscilação Atlântico Norte - NÃO	**Δ**	Mais provável que não > 50%
	Oscilação Decadal do Pacífico	**Δ**	Mais provável que não > 50%
Temperatura	Temperatura média global da superfície	+	Extremamente provável > 95%
	Temperatura diária máxima (dia)	+	Muito Provável
	Projeções de temperatura	+	Muito Provável

Fonte: Macana.E (2008), *apud* Hegert *et al*.(2007,p.731) e Trenberth *et al*.(2007)

.

3.3 IMPACTOS ASSOCIADOS AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Devido a relação que o aumento de GEE na atmosfera possui com a variabilidade climática e com mudanças de temperatura, pode-se associar as emissões de gases de efeito estufa com o aumento da frequência e intensidade dos eventos climáticos extremos (IPCC 2007).

D———————————

[2] Indicativo de diminuição.
[3] Indicativo de variação.

Com o passar das décadas é notável a mudança que ocorreu em sistemas naturais e seus impactos no desenvolvimento humano, que são apontadas como consequências das alterações climáticas, aceleradas pelas emissões antrópicas (ERNMENTA; NEL, 2014). De acordo com G.Cumming:

> "Há evidencias crescentes de que atividades humanas podem alterar a distribuição de um serviço ecossistêmico em diferentes escalas incluindo mudanças no clima da Terra."

3.3.1 Impactos em sistemas naturais

Muitos ecossistemas sensíveis sofrem com pressões climáticas sendo elas mudanças naturais de ciclos hidrológicos, como secas e monções. Com as alterações climáticas intensificando essas pressões, aumentam as competições sobre os recursos naturais e, consequentemente, a estabilidade do ecossistema. Nos ecossistemas mais sensíveis às pressões climáticas irão ocasionar alterações mais bruscas no comportamento e resiliência da biodiversidade, tanto terrestres como aquáticas, resultando em mudanças de padrões migratórios, interações e variabilidade entre espécies, com o surgimento de espécies dominantes e mudanças geográficas na distribuição de indivíduos que melhor se adequarem às mudanças ocorridas em seu habitat, colocando uma fração elevada de espécies em risco de extinção e modificando o equilíbrio dos serviços ecossistêmicos no local (UNDP, 2007;ERNMENTA , NEL, 2014).

De acordo com (LEAD et al., 2005).

> "Serviços ecossistêmicos são as interações de diversas estruturas e processos ecológicos dependentes um do outro e interagindo pelos *trade-offs*, onde providenciando um aumento em um serviço poderá acarretar na diminuição de outro [...] sendo possível afetar uma série de outros serviços ecossistêmicos quando alterado um serviço individual." (Lead et al., 2005)

A maior parte do aumento da temperatura decorrente das mudanças climáticas é refletida nos oceanos. Esse aumento de temperatura nas águas oceânicas é utilizada como um parâmetro para a análise do aquecimento global, apresentando como consequência a diminuição de oxigênio dissolvido na água e aumento da acidificação desse ecossistema, afetando diretamente organismos marinhos principalmente os calcificados que utilizam carbonato de cálcio ($CaCO_3$) em sua fisiologia. O ano de 2018 foi o mais quente já registrado quando comparado com mensurações de 1981 à 2017. Cenários apontam que caso ocorra aumento de 2°C na temperatura superficial dos oceanos haverá branqueamento de 99% dos

corais devido a acidificação, afetando significativamente seu desenvolvimento. Além da interferência nos organismos marítimos, o aquecimento do oceano também provoca maior evaporação de água, contribuindo assim para uma intensificação em tempestades e furacões. Considerando que o oceano está aquecendo constantemente desde 1990, existe uma alta probabilidade de atingir seu nível crítico em 2030 e intensificar o desgelo dos polos e suas interferências nos organismos vulneráveis que vivem no Ártico.

3.3.2 Impactos no desenvolvimento humano

Formulado desde 1990 pela Organização das Nações Unidas, o Relatório de Desenvolvimento Humano mensura as perspectivas de progresso e desenvolvimento humano de uma nação pelo Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), baseada em três dimensões básicas: saúde, educação e renda. Essas se tornam fundamentais para ampliação de capacidades e oportunidades de um indivíduo, embora o fator econômico seja um importante aspecto para o desenvolvimento humano ele não é único e o conceito de IDH pressupõe aferir qualidade de vida de uma população, não somente seu crescimento econômico (PNUD IDH,2019).

As alterações no clima afetam o desenvolvimento humano, de forma que muitas vezes este depende das características climáticas locais. Um exemplo são os efeitos que a variabilidade de precipitações possui na agricultura e pesca, sendo a pobreza e o baixo IDH intimamente relacionados com a exposição à fenômenos climáticos e à sua incerteza, além de que países pobres se situam em regiões mais vulneráveis a eventos extremos, consequentemente, são os mais impactados pelas consequências das mudanças climáticas (UNDP, 2007).

Os impactos sobre o desenvolvimento estão associados a qualidade e quantidade dos recursos naturais disponíveis, como água, solo e ar, à tecnologia disponível para seu tratamento e o equilíbrio do meio ambiente local devido a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Os impactos podem ser tanto diretos quanto indiretos e separados em necessidades básicas, relações sociais e saúde (LEAD et al.,2007).

3.3.2.1 Necessidades básicas

As mudanças no clima acarretam alterações de ciclos hidrológicos, com isso há possibilidade de alteração no acesso e qualidade da água. Essas alterações influenciam diretamente em seu uso, além de refletir na produtividade agrícola, e no custo de tratamento

devido ao abastecimento cada vez mais frequente em corpos hídricos com baixa qualidade. A escassez, diminuição da qualidade e aumento da exigência de investimentos influenciará no preço e uso desses recursos (UNDP, 2007).

Existe a estimativa em que a população mundial chegue a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, com implicações em aumento do uso de água e solo. As utilizações desses recursos naturais são vitais para o desenvolvimento humano, sendo a escassez de água potável e desnutrição características de pobreza e baixa qualidade de vida (UNDP, 2016).

De acordo com o relatório da Organização de Alimento e Agricultura das Nações Unidas de 2014 as zonas pesqueiras contribuem 17% do consumo mundial de proteína, mas podem chegar a 70% em alguns países costeiros. O resultado de uma alteração nos sistemas físicos, químicos e biológicos, por causa das mudanças de temperatura da água, aumento dos níveis do oceano e acidificação contribuiria no aparecimento de doenças, zonas mortas nos corpos aquáticos e colapsos da pesca, sendo projetados cenários que demonstram com elevado grau de certeza que haverá intensa redistribuição de espécies marinhas e redução de sua diversidade em regiões sensíveis, contribuindo para a escassez em pontos de pescas (UNDP, 2016; ERNMENTA, NEL, 2014).

No Setor Agrícola, as mudanças no clima e intensificação de eventos extremos (secas ou tempestades) acarretam em perdas na produtividade das plantações, elevando o preço dos alimentos com estimativas de 40% da área total de solo no planeta impactado, afetando 2 bilhões de pessoas e 50% da pecuária, influenciando significativamente na segurança alimentar. A presença cada vez maior de CO_2 na atmosfera contribui para um aumento na taxa de crescimento de plantas, porém os impactos negativos de mudanças nos índices de precipitações, evapotranspiração e aumento da temperatura sobrepõe-se a esse benefício. (LEAD et al., 2007).

A mudança na dinâmica da segurança hídrica e alimentar, somada com o crescimento da demanda pelo crescimento populacional, fazem com que o poder econômico possua uma grande influência no acesso a esses recursos cada vez mais escassos. Países ricos conseguem aumentar sua resiliência por meio da utilização de tecnologias, resultando no aumento de sua produção agrícola, mesmo com a diminuição de áreas cultiváveis, e no tratamento de água em corpos hídricos de baixa qualidade. Porém esta resiliência está desequilibrada, com desnutrição e desidratação afetando regiões ao redor do globo em locais que possuem pouco acesso a estas tecnologias, tornando populações residentes em regiões sensíveis às mudanças climáticas mais vulneráveis à perda de alimento e água, aumentando cada vez mais a desigualdade. Cabe ressaltar que vulnerabilidade à alterações climáticas é classificada por

questões culturais, institucionais e socioeconômicas, determinantes para identificação do grau de vulnerabilidade do país (METZ; DAVIDSON, 2007).

3.3.2.2 Relações Sociais

Com a falta de recursos para a manutenção de populações sensíveis, além das pressões intensificadas dadas as consequências das mudanças climáticas, um dos principais fatores que afeta as relações sociais é o aumento de migrações de habitantes expostos a condições climáticas extremas para áreas menos degradadas. De certa forma, o estresse climático e seus impactos contribuem, junto com outros fatores sociais, na geração de conflitos violentos devido à ampliação da pobreza e mudança dos meios de subsistência (ERNMENTA , NEL, 2007).

As mudanças de meios de subsistência é um fator importante para países que possuem maior dependência econômica em seu setor agrícola, com tendências a uma redução de 25% de lucros por hectare até 2060, devido a alterações climáticas. Países com Setores Industriais mais desenvolvidos serão mais resilientes economicamente em relação a mudanças de precipitações e umidade do solo do que países dependentes do Setor Agrícola, porém ambos sofrerão impactos significativos, com estimativas apontando que a cada US$1 dólar perdido pelo Setor Agrícola há uma perca de até US$3 em setores não-agrícolas. (UNDP, 2007).

É importante salientar no que se refere a relações sociais nas mudanças climáticas, isoladamente não irão interferir diretamente, mas contribuir junto com outros importantes fatores sociais daquela região, essa colaboração entre estilos de vidas vulneráveis, pobreza, baixa participação do Estado e migração que definirá o comportamento daquela sociedade (BARNETT; ADGER, 2007).

3.3.2.3 Saúde

A Organização Mundial da Saúde define saúde como “um estado de bem-estar físico, mental e social além de se abster de doenças e enfermidades”, mensurada em expectativas de vida e dependente da interação de fatores genéticos, sociais, medicinais e ambientais onde uma diminuição de um fator comumente propaga diminuição nos outros (LEAD ET AL.,2007; Organização Mundial da Saúde, 2009).

O impacto indireto das mudanças climáticas sobre a saúde está associado a distribuição e acessos dos recursos básicos com qualidade, onde a diminuição de seu acesso

acarretaráem doenças não transmissíveis como desnutrição e desidratação, e com o desequilíbrio de serviços ecossistêmicos. Pode aumentar a incidência de doenças de veiculação hídrica, com vetores de doenças e microrganismos ampliando suas fronteiras geográficas e consequentemente a ocorrência de doenças infecciosas e endêmicas. Os impactos diretamente relacionados com mudanças climáticas são mortes ocasionadas por eventos extremos como furacões e ondas de calor (ERNMENTA; NEL, 2014).

De acordo com o IPCC 2014, os efeitos das mudanças climáticas que resultam em consequências para a saúde são presenciados globalmente, porém devido a fatores como tecnologias de tratamento e infraestrutura as consequências na saúde conseguirão ser mitigadas em países mais desenvolvidos, onde segundo a Organização Mundial de Saúde a cada US$ 1,00 dólar investido em saneamento resulta em US$4,30 dólares economizados em custos de saúde.

As doenças de veiculação hídrica geram custo para a economia brasileira onde, de acordo com o Ministério da Saúde, foram geradas despesas de R$100 milhões de reais em 2007 devido a doenças originadas por águas contaminadas. Mesmo com 91,3% da população com acesso ao abastecimento de água, doenças como esquistossomose, gastroenterites, Hepatite A permanecem com incidências altas e podem se agravar com secas ou enchentes, apontando a probabilidade no aumento de doenças de 16% durante a seca e 41% durante inundações (PDAD,2002; Ministério da Saúde,2010;UNDP, 2007).

Estimativas do IPCC 2007 indicam um aumento de precipitação e riscos de enchentes na região Sudeste do país, esta foi a mais afetada por focos de Dengue. A Dengue é uma doença transmitida pelo mosquito *Aedes aegypti* a qual possui como condicionantes ambientais para sua proliferação o aumento da temperatura, umidade e precipitação. Atualmente em 2019, o Ministério da Saúde aponta um aumento de 264% de casos em relação ao ano passado com 65.4% sendo na região Sudeste, mesmo com aumento de recursos para seu combate que passou de R$924 milhões de reais em 2010 para R$ 1,73 bilhões de reais em 2018.

Com intensificação das pressões sobre a segurança alimentar, que afeta hoje cerca de 14% da população mundial, devido à perda de áreas agricultáveis, desigualdade no uso global de tecnologia e aumento de zonas mortas nos oceanos para pesca, haverá um declínio global da nutrição com estimativas chegando a um crescimento de 600 milhões de pessoas no risco de fome até 2080. A desnutrição afeta o bem-estar em todas faixas etárias, porém crianças e idosos são os que sofrem maiores impactos em sua saúde. Estudos realizados com crianças que passaram por extremos climáticos apontam que as mesmas sofreram um

decrescimento no seu desenvolvimento infantil, com diminuição na sua taxa de crescimento resultando em estatura média de 2,3 centímetros a menos em relação a crianças nutridas (SANCHEZ; SWAMINATHAN, 2015).

3.4 CONTEXTO ENERGÉTICO

Desde o início da revolução industrial há um aumento significativo de CO_2 liberado por atividades antropogênicas, devido à combustão de combustíveis fósseis e desmatamento. Os países ricos são os responsáveis por grande parte dessas emissões, onde com o passar dos anos as concentrações de CO_2 aumentaram rapidamente em consequência do crescimento populacional, mas principalmente pelo crescimento econômico. O Setor Energético, o maior responsável pelas emissões de CO_2, teve um aumento significativo nas emissões nos últimos 30 anos, sendo esse aumento relacionado diretamente com o desenvolvimento econômico e busca de maior demanda energética.

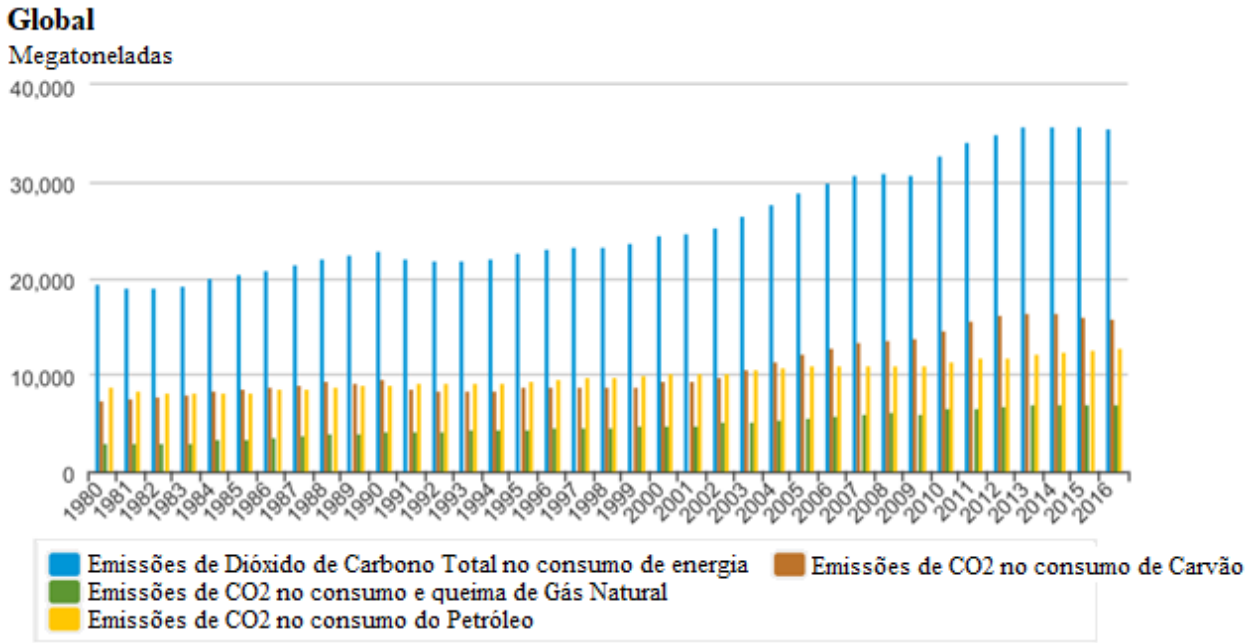


Figura 5 Emissão de CO_2 Global com base no consumo de combustíveis fósseis.

Fonte: IAE, 2017

3.4.1 Contexto Energético Global

Avaliando o contexto global de emissão de CO_2, nota-se que países desenvolvidos são os que possuem maior produção energética devido a sua infraestrutura e meios de produção intensos, além disso, em países que estão em fase de desenvolvimento econômico a produção energética e a ampliação dela são essenciais, sendo estimado um aumento anual de 2,2% no consumo energético global. Em 2016, os seis países com maior geração elétrica

foram os responsáveis por 73% de emissões de CO_2 ,demonstrado na Figura 6 (IEA, 2012; METZ & DAVIDSON, 2007).

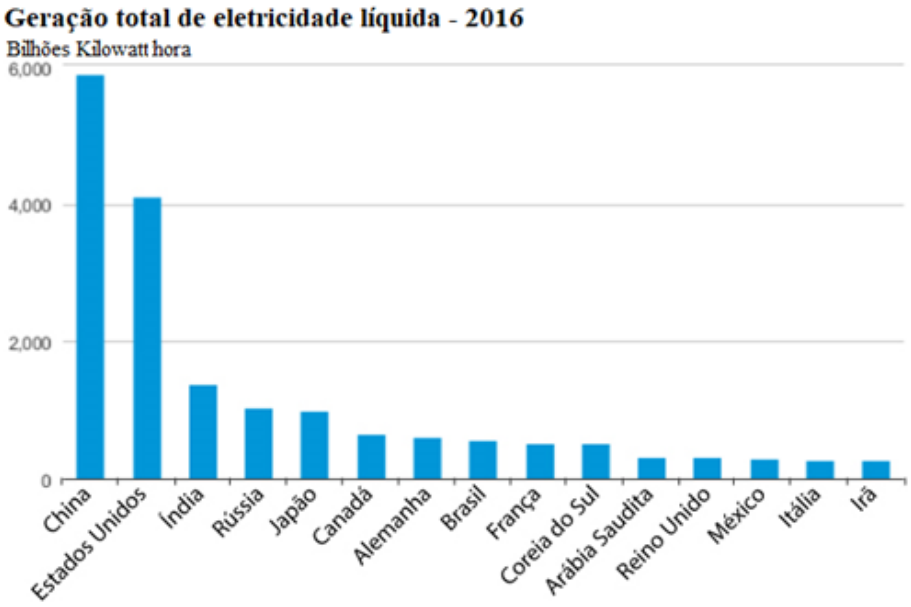


Figura 6 Geração de eletricidade global anual

Fonte: U.S. Energy Information Administration

As matrizes energéticas variam de acordo com os recursos e reservas disponíveis no país, sendo a queima de combustíveis fósseis ainda a fonte energética mais utilizada, dominando a oferta mundial de energia primária. Países como Índia e China possuem termoelétricas como suas principais fontes de energia, principalmente as movidas a carvão, resultando em uma contribuição de 40% nas emissões de CO_2 globais por geração de energia. Além das termoelétricas já instaladas, ainda há investimentos para futura ampliação e maior contribuição delas na geração elétrica da maioria dos países, causando um aumento da queima de combustíveis fósseis para o abastecimento das centrais de transformação energética. São planos baseados em fontes primárias limitadas e não renováveis, resultando em emissões de GEEs através da oxidação do carbono, presente no combustível utilizado.

A China, um dos países que mais cresceu nos últimos anos, pretende aumentar a produção energética queimando carvão mineral, sendo previsto uma emissão de 3 Gt de CO_2 na atmosfera até 2025, outro exemplo sendo o Japão, na qual aumentou em 80% a geração de energia por combustíveis fósseis após o acidente de Fukushima. (BARROS, 2007; LEGGETT,2007;IEA, 2012).

A Figura 7 aponta as fontes energéticas mais utilizadas em países desenvolvidos.

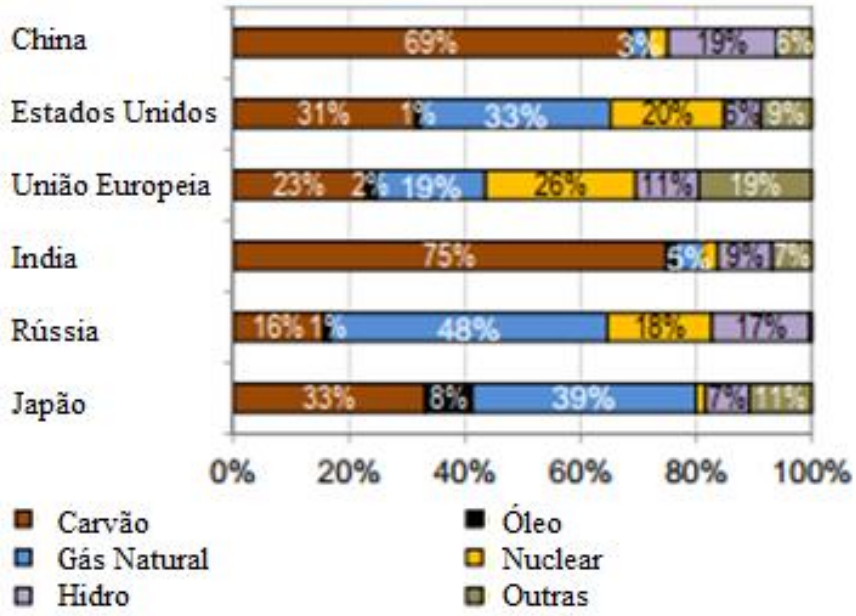


Figura 7 Geração de Eletricidade por fonte
Fonte: IAE, 2012

Nota: Em “Outras” estão incluídas fontes geotermais, solares, por ondas e as eólicas.

3.4.2 Contexto Energético Brasileiro

O Brasil por razão da diversidade hidrológica existente em suas bacias, possui mais de 60% de sua produção elétrica utilizando energia renovável produzida por hidroelétricas, porém há uma parte significativa de eletricidade proveniente de termoelétricas. A principal função de termoelétricas na geração de energia no país é como fonte estratégica para o Setor Empresarial e como meio de prevenção para subsidiar o sistema elétrico em anos hidrológicos desfavoráveis. (MME, 2007).

No Brasil é previsto um cenário para 2050, apontando consumo de energia elétrica a 1250TWh/ano. Comparado com o consumo de 526 TWh/ano de 2017 observa-se que será necessária a instalação de uma potência energética adicional expressiva. Quando trata-se de sistemas hidrelétricos é notável uma dificuldade de expansão, principalmente no atendimento de condições regulatórias e tecnológicas de natureza socioambiental que restringem seu desenvolvimento. Mesmo optando por essa fonte de energia, e em um cenário onde eleva-se para 80% o uso do potencial hídrico do país, o mesmo resultará na produção de 120 GW adicionais aos 164 GW de potência hoje instalados, não atendendo as previsões

de demandas futuras e indicando a necessidade de uma diversificação da matriz energética (WWF, 2007; MME, 2007).

O país passou por diversas alterações de matrizes energéticas em sua estrutura de fornecimento de eletricidade e ainda possui tendências de mudanças em suas fontes energéticas, principalmente no uso do combustível utilizado em termoelétricas. A Figura 8 mostra que em 1970 as principais fontes de eletricidade eram compostas de termoelétricas, responsáveis por 86% do consumo de eletricidade no país com a maioria movida a lenha e carvão vegetal. Dados mais recentes mostram que a estrutura de fornecimento de energia mudou, ampliando as fontes de combustível para termoelétricas, iniciando o uso do gás natural, e o aparecimento de usinas nucleares, além do início da geração por fontes não convencionais. Em um cenário proposto para 2030, as termoelétricas movidas a gás natural irão ter crescido 11% quando comparadas ao ano 2000, sendo esse tipo de usina a que possui maior crescimento em comparação as demais. Ocorrerá também uma maior diversificação das matrizes, sendo 77% do consumo nacional satisfeito por usinas hidráulicas e usinas movidas a gás natural, cana de açúcar e petróleo até 2030 (GORINI, 2005).

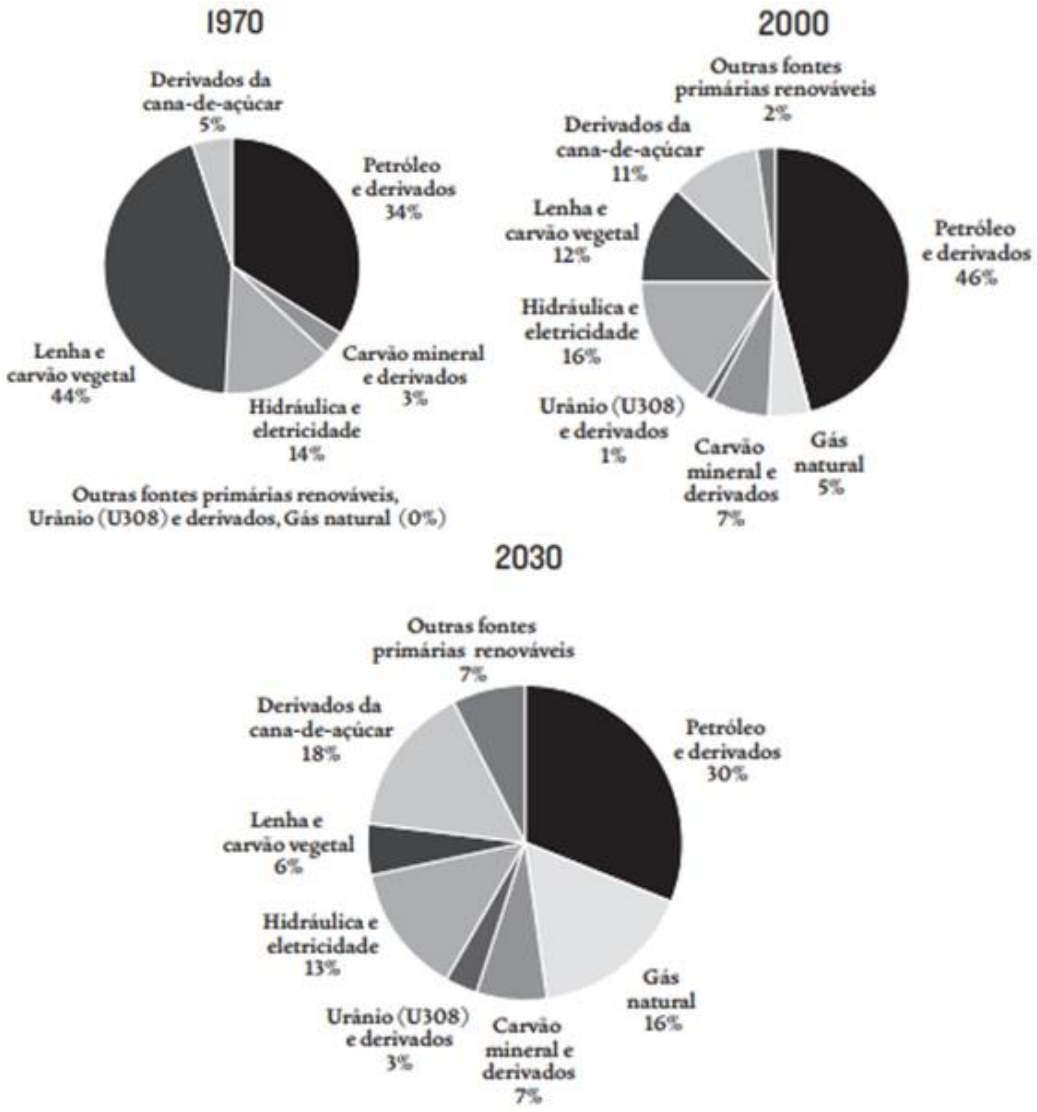


Figura 8 Produção de energia elétrica brasileira.

Fonte: GORINI, 2005

A diversificação da matriz elétrica contribuirá para um crescimento nas emissões de CO_2 caso forem baseadas em queima de combustíveis. Em um leilão ocorrido em 2005, cerca de 70% da energia disponível foi vendida para termoelétricas movidas a combustíveis fósseis, acarretando uma adição de 3.286 MW na produção de eletricidade. Consequentemente houve um aumento de 2,8% nas emissões totais de CO_2 do país e um aumento de 11% no total de emissões de CO_2 no Setor Elétrico (WWF, 2007).

3.5 ENERGIA TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL

3.5.1 Conceito Técnico

Energia termelétrica é o termo utilizado para definir a geração de energia elétrica a partir de um fluxo contínuo de calor causado por diferencial de temperatura. A entrada de uma fonte de calor em um conduto promove um fluxo de massa que percorrerá o caminho de maior para menor temperatura. Acrescentando uma máquina térmica ao conduto, é possível converter a energia térmica em energia mecânica, para, enfim, transformá-la em eletricidade. Nas usinas termelétricas a gás natural, a primeira etapa do processo consiste na mistura de ar comprimido com o gás natural a fim de se obter a combustão. O resultado é a emissão de gases em alta temperatura, que provocam o movimento das turbinas a gás conectadas aos geradores de eletricidade, responsáveis pela produção de eletricidade no ciclo aberto. Como ainda há muita perda de calor nesse tipo de geração, muitos locais optam pelo ciclo combinado de turbina a gás, onde o calor perdido é recirculado para um gerador de recuperação, responsável por aquecer a água e gerar o vapor (ANEEL, 2008).

O vapor é direcionado para uma turbina a vapor conectada a um gerador e assim é capaz de gerar 50% mais eletricidade do que as turbinas a gás de ciclo aberto (Jacobson, 2019). Por outro lado, devido a sua simplicidade, a geração por ciclo aberto responde mais rapidamente as variações de potência, sendo capaz de atender uma alta demanda com mais rapidez do que a de ciclo combinado. Dessa forma, é muito utilizada para suprir situações imediatas, mesmo que a emissão de CO_2 acabe sendo maior que no ciclo combinado (ANEEL, 2008).

O gás natural é um dos insumos utilizados para a geração de energia na termelétrica. É formado nas últimas etapas da decomposição da matéria orgânica no subsolo terrestre durante milhões de anos. Como o petróleo é resultado das primeiras etapas da degradação, na maioria dos casos, a exploração de gás natural e petróleo estão relacionadas. No passado, o gás associado aparecia como um subproduto do campo de petróleo, entretanto, sua produção somente se efetivou com a comprovação de um mercado que remunere todos os investimentos na cadeia de produção, transporte e distribuição (MME,2007).

3.5.2 Contexto Global

O interesse pela exploração do gás natural na matriz energética global acentuou-se durante os anos 80, devido ao crescimento substancial do consumo energético, transformando-se na fonte de energia de origem fóssil a registrar maior crescimento no

mundo (ANEEL, 2008). Com o passar do tempo, o interesse pela sua exploração apresentou-se diretamente relacionada à busca de fontes alternativas ao petróleo menos agressivas ao meio ambiental. A Figura 9 apresenta o crescimento percentual do consumo do gás natural ao longo dos anos. O petróleo ainda é dominante no mercado energético, porém observa-se seu decrescimento percentual ao longo dos anos. Em contrapartida, o gás natural alcançou 23,4% do consumo de energia primária global e seu crescimento apresentou-se contínuo ao longo dos anos. O carvão, mostrou oscilações em seu consumo e, atualmente, a tendência é de reduzir sua participação percentual no consumo energético global. É interessante também observar um crescimento do consumo energético por energias renováveis, principalmente depois de 2007. Depois de 10 anos, atingiu a representatividade de 3,6% do consumo global.

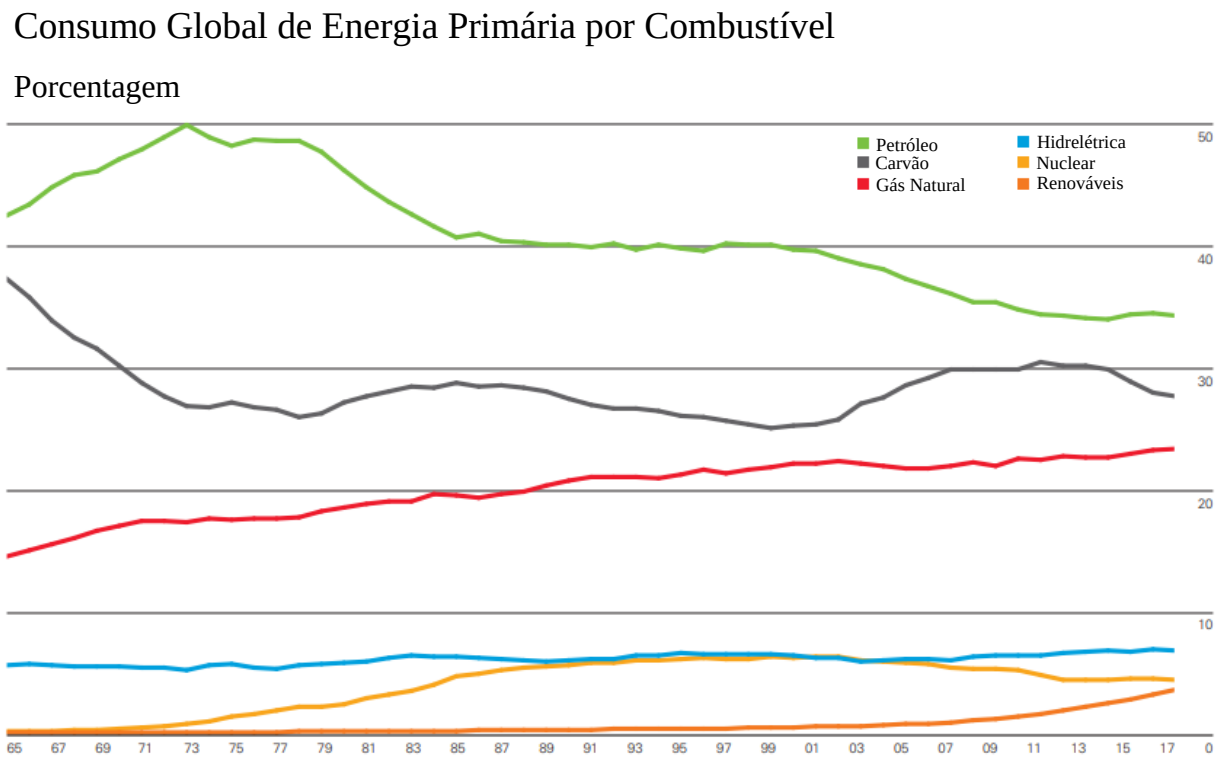


Figura 9 - Porcentagem de energia primária global por combustível
Fonte: BP, 2018

Apesar do aumento do consumo de gás natural, nem todas as regiões do mundo possuem reservas para o incremento em sua produção energética. Muitas vezes o consumo excede a própria capacidade de produção, ocasionando em acordos políticos entre países para a importação do combustível. O Gráfico 1 representa a porcentagem por região das reservadas totais provadas de Gás Natural no mundo no ano de 2017, de acordo com as fontes disponibilizadas por BP (2018).

Existe uma diferença entre detenção de reserva e a produção de gás natural. Existem países que consomem mais do que sua capacidade de exploração territorial, entretanto, ainda assim, apresentam uma produção maior que países que possuem o insumo em abundância. Essa contradição se deve ao fato da elaboração de políticas entre os países detentores de reservas e países consumidores para a importação da matéria bruta, da qual sofrerá os beneficiamentos para seu uso no território do país estrangeiro. Não obstante, muitas vezes essa importação da matéria bruta ainda não sacia a demanda local, sendo necessário a compra do gás natural já beneficiado de outros produtores. No Gráfico 1 e Figura 10 é possível comparar a oferta e demanda do gás natural nos continentes. A Europa apresenta claramente essa demanda.

De acordo com os dados da BP (2018), apresentou no ano de 2017 uma produção de 208 mtoe (*million tonnes of oil equivalent* ou mega tonelada equivalente de petróleo) e um consumo de 457,2 mtoe, ou seja, seu consumo é maior que o dobro de sua produção. Outro continente que apresentou uma maior demanda foi a Ásia, responsável por produzir 522 mtoe e consumir 661,8 mtoe de gás natural no mesmo ano.

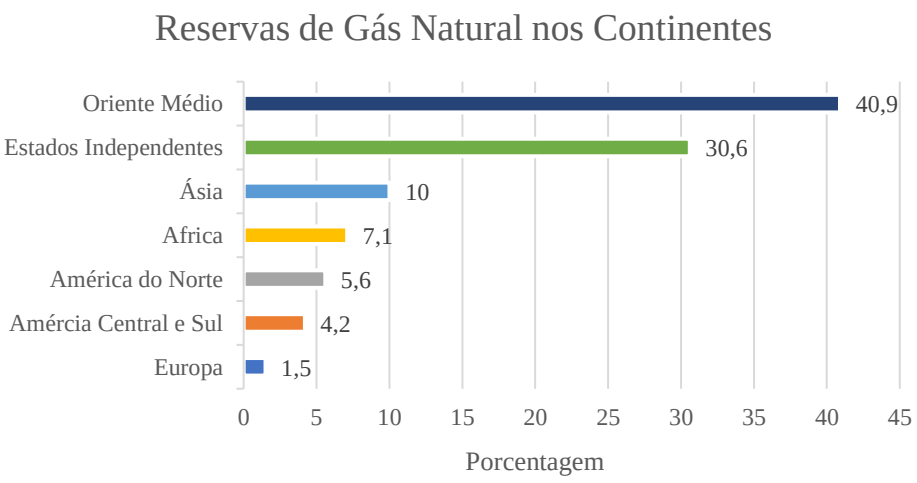


Gráfico 1 - Porcentagem das Reservas de Gás Natural provadas por região
Fonte: BP, 2018

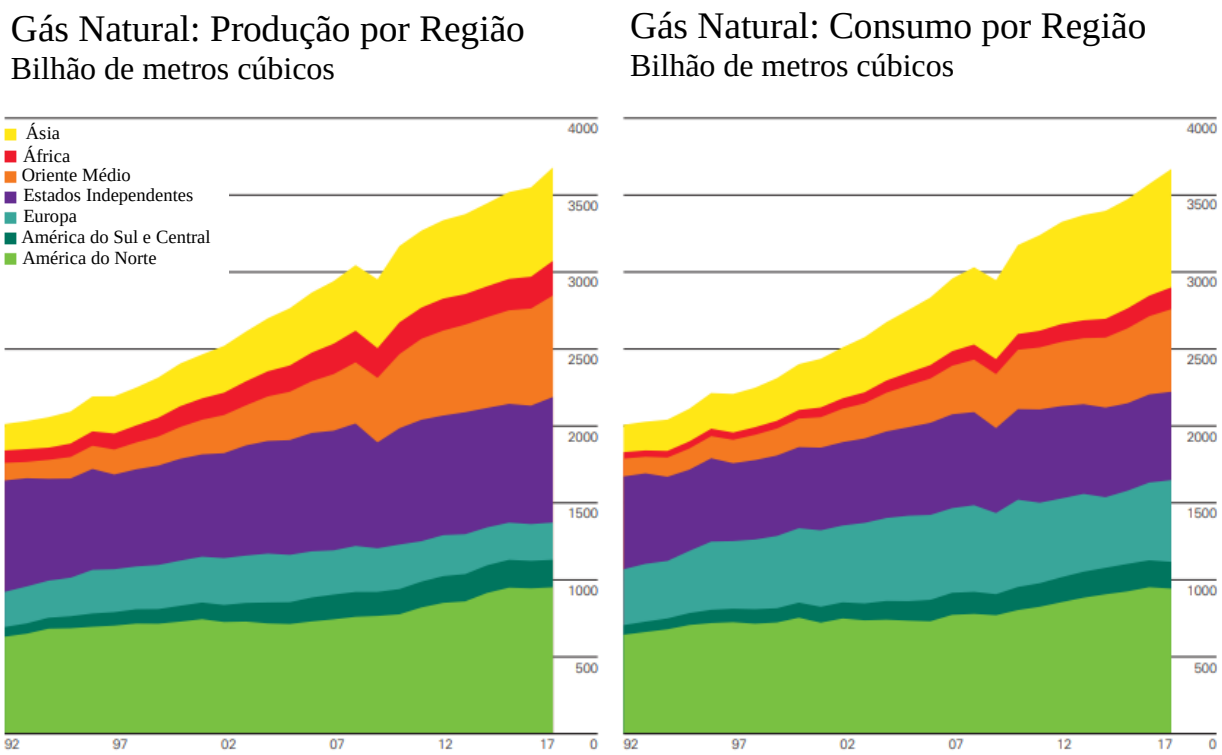


Figura 10 – Comparação entre a produção de gás natural nos países e seu consumo.
Fonte: BP, 2018

3.5.3 Contexto Brasileiro

De acordo com os dados disponibilizados pela BP (2018) no ano de 2017 o consumo da América do Sul demonstrou-se ligeiramente menor do que sua capacidade produtiva. Dentro dessa estatística, o Brasil, entretanto, apresentou um consumo maior que sua produção, representada por cerca de 27,5 mtoe e consumo de 38,3 mtoe de gás natural. No Gráfico 2 é apresentado a crescente produção do Brasil em gás natural. Observa-se uma tendência de consumo mais disforme, representada, principalmente, pelos períodos de crise econômica (2008) e de racionamento energético (2014/2015).

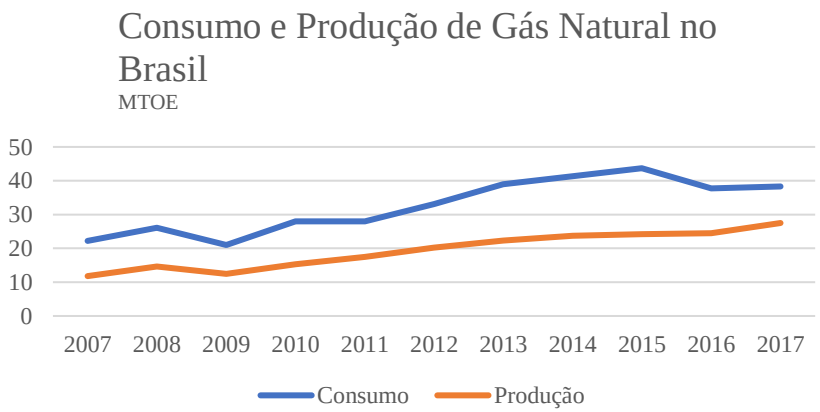


Gráfico 2 - Evolução do consumo e produção de Gás Natural no Brasil ao longo de 10 anos.
Fonte: BP, 2018

Como o plano energético nacional brasileiro não é autossuficiente em relação ao uso do gás natural, o país acaba por importar o combustível de outro local da América do Sul, a Bolívia. O transporte do gás natural é realizado por meio de gasodutos até as centrais de distribuição de ambos países, seja para o uso em indústrias, comércios, serviços, residências ou no setor de eletricidade. O transporte através de gasodutos é o modal mais difundido de escoamento de gás natural, sendo normalmente a alternativa mais econômica para o transporte de grandes volumes de gás natural em regime de fornecimento contínuo, ocorrendo a altas pressões (MME., 2007). Atualmente o transporte é distribuído ao longo da costa do Oceano Atlântico e com ramificações no eixo do Centro-Oeste pelo gasoduto Brasil-Bolívia, que possui 3150 km.

Até o ano de 2017, de acordo com BP (2018), os três maiores produtores da América do Sul foram Venezuela (37,4 mtoe), Argentina (37,1 mtoe) e Brasil (27, mtoe). A Bolívia aparece em quarto lugar, com 17,1 mtoe. Segundo ANEEL (2008), a influência da produção Latina de gás natural é pouco expressiva no mercado mundial, representando aproximadamente 4% do total. A importância da produção é, portanto, regional. A Figura 11 ilustra a infraestrutura de gasodutos presentes no Brasil. É possível observar as duas conexões dos dutos que interligam a Bolívia com os Estados do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

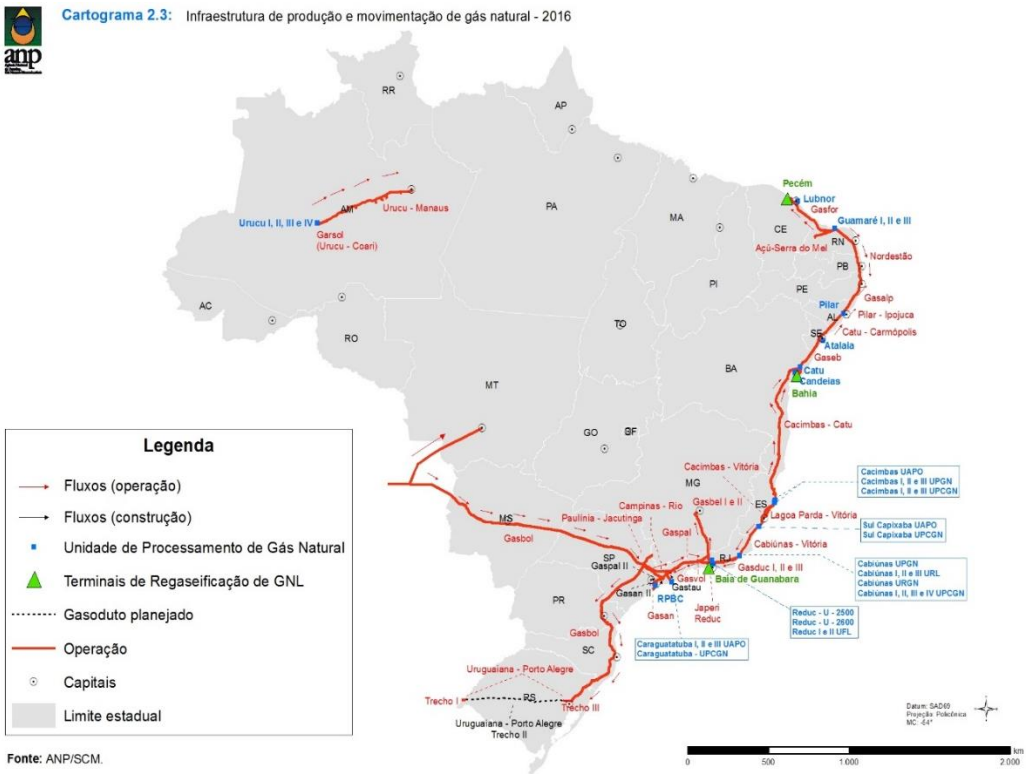


Figura 11 - Gasodutos construídos e em planejamento no Brasil.
Fonte: ANP, 2016

Apesar das reservas substanciais de gás natural do Brasil e as grandes expectativas em torno da grande quantidade de recursos localizados na camada pré-sal, o setor de gás natural ainda é relativamente subdesenvolvido (LEAL; REGO; RIBEIRO, 2019). Tal fato pode ser comprovado ao visualizar a Figura 10, onde as menores regiões de produção e consumo do insumo é a África e América do Sul e Central. Ainda de acordo com Leal, Rego, Ribeiro (2019), o incentivo para o uso de usinas termoelétricas a gás natural no país partiu originalmente de respostas de emergência às demandas energéticas, como as secas severas. A crise de eletricidade em 2001, por exemplo, acabou trazendo o tema do desenvolvimento da indústria do gás natural para o topo da agenda (MME, 2007). Por conseguinte, a crise hídrica em 2014-2015 reergueu os debates sobre fontes alternativas para geração de eletricidade.

O Plano Nacional de Energia Elétrica para 2030, escrito em 2007, previu uma potência instalada de gás natural de cerca de 10.040 MW e de, pelo menos, 12.490 MW para 2011. De acordo com os dados do International Energy Agency (2018), convertendo a unidade de energia de TJ para MW, a potência nos anos de 2010 e 2011 foram, respectivamente, 18.424 MW e 20.892 MW. As projeções validadas no plano continuam,

portanto, otimistas quanto ao aumento de uso desse tipo de energia. Na Figura 12 observa-se o crescimento da potência de eletricidade por gás natural no Brasil ao longo dos anos.

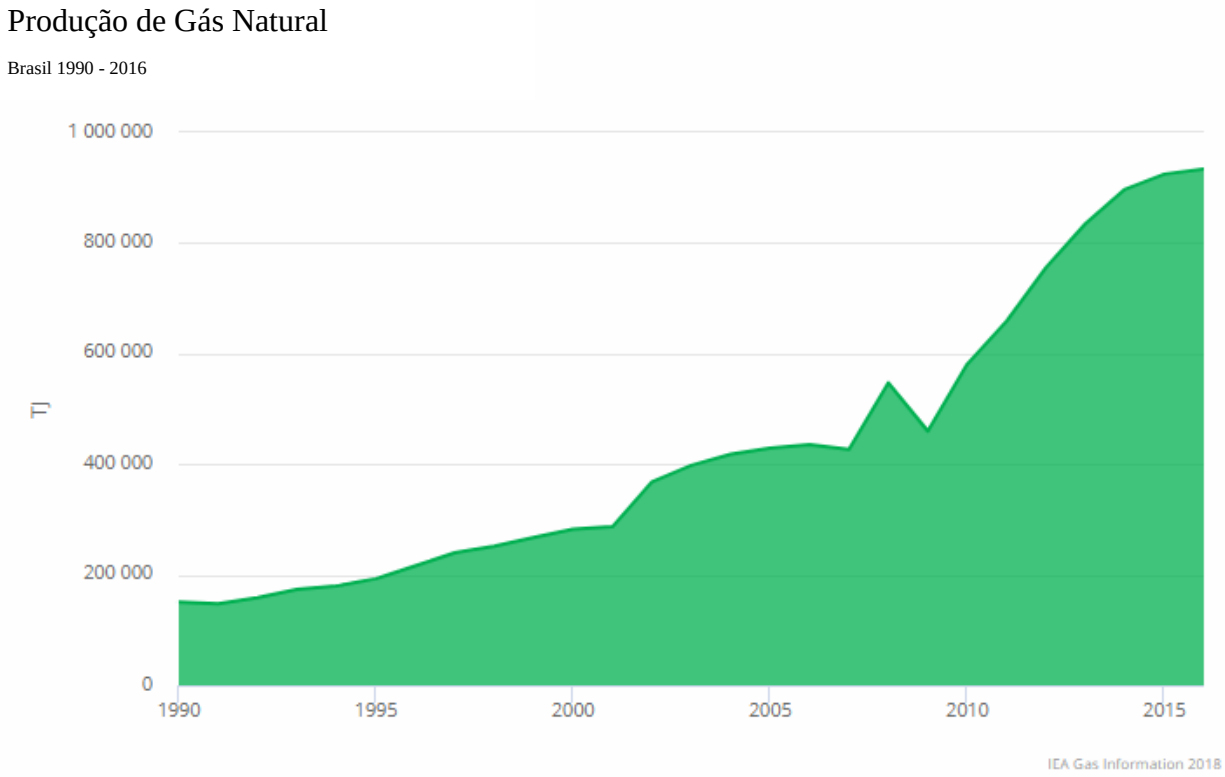


Figura 12 - Crescimento na Geração de Eletricidade por Gás Natural no Brasil
Fonte: International Energy Agency, 2018

A entrada do gás natural no sistema energético brasileiro deve estar pautada em políticas coesas sobre o assunto. Após o início da instalação do gasoduto Brasil-Bolívia, o governo brasileiro elaborou o primeiro programa para o incentivo de implementação de usinas termelétrica no país por meio da divulgação para a utilização de gás natural entre os consumidores do setor industrial e comercial, o Programa Prioritário de Termeletricidade – PPT, instituído pelo Decreto n° 3.371, de 24 de fevereiro de 2000. Entretanto, de acordo com Turdera (2009), o programa não se concretizou na forma prevista pela falta de coordenação e planejamento do sistema de energia elétrica como um todo. Na sequência, em 2009 foi aprovada uma Lei específica para o Gás Natural, a Lei n° 11.909 de 2009, ou Lei do Gás. A princípio, essa Lei aborda o incentivo para a entrada de agentes privados no setor de transporte do insumo para promover a expansão de sua malha de gasodutos. Conforme salienta Leal; Rego; Ribeiro (2019), a ideia de criar um mercado competitivo, no entanto, ainda não foi concreta devida a participação ativa da estatal Petrobrás em todos os segmentos

relacionados à produção, ao transporte e ao fornecimento e distribuição do gás natural. A competição, por sua vez, garante que preços de mercado convergem para custos marginais induzindo uma eficiente alocação e recursos (NEWBERRY, 1989). Novamente, em 2013, um novo projeto de lei é estabelecido para apresentar medidas de fomentação da indústria de Gás Natural no país, alterando a Lei n° 11.909/2009, a PL n° 6407/2013. No mês de fevereiro de 2019, a PL foi desarquivada na Câmara e colocou novamente em pauta a disseminação do uso do gás natural no sistema energético brasileiro.

O aumento do interesse no insumo, não só no Brasil, como no mundo todo, está pautado em várias razões, dentre as quais:

- Surpreendente crescimento das reservas;
- Combustível fóssil que menos polui;
- Amplo uso nos segmentos industriais e comerciais;
- Consolidação de mercados de gás natural;
- Tecnologias novas com melhor desempenho e eficiência;
- Crescentes pressões ambientais.
- Alto preço do petróleo;
- Monetizar reservas de gás;
- Ampliar mercado de trabalho para profissionais da área;
- Carência de fontes de energia para atender demanda em grande escala;
- Diversificação da matriz energética (TURDERA, 2009).

3.5.4 Aspectos Ambientais

Nos tópicos abordados, o autor menciona dois aspectos ambientais na vantagem de uso do gás natural. Como qualquer outro combustível fóssil, a fonte é composta por moléculas de hidrocarbonetos, mais especificamente, o metano. Sua combustão promove uma liberação de energia em forma de calor e a quebra de suas moléculas, gerando o dióxido de carbono e a água. Ao contrário dos outros combustíveis fósseis como o petróleo e o carvão, o gás natural é considerando um insumo limpo devido a menor porcentagem de nitrogênio e enxofre em sua composição. Tais elementos provocam a liberação de óxidos de nitrogênio e dióxidos de enxofre, gases poluentes e gases de efeito estufa. Petróleo e carvão

também emitem partículas de cinza ao meio ambiente quando há combustão incompleta dos combustíveis. Essas substâncias não queimam, mas ficam flutuando na atmosfera e contribuindo com a poluição (TURDERA, 2009). O gás natural por sua vez, não lança cinza ou particulado ao meio ambiente, ainda produz uma quantidade reduzida de hidrocarbonetos reativos, enxofre e óxido de nitrogênio em sua combustão conforme pode ser observado na Tabela 3.

Em qualquer uso do gás natural, seja para indústrias, comércios ou geração de energia elétrica, o maior fator de impacto é a emissão de gases de efeito estufa como o CO, que reage com o Oxigênio na atmosfera gerando CO_2, e o N_2O. Como esses gases estão relacionados às mudanças climáticas e suas consequências para a sociedade, as questões ambientais estão entre os principais limitadores da expansão de usinas termelétricas movidas a derivados do petróleo (MME, 2007), principalmente depois do Acordo de Paris em 2016. Por outro lado, a necessidade de diversificação do sistema energético mundial promove o desenvolvimento de tecnologias e mecanismos para reduzir os impactos causados diretamente ao ar, de modo a aumentar a eficiência da geração de energia e reduzir os gases impactantes ao meio ambiente.

Tabela 3 - Emissões de GEE na combustão do diesel e do gás natural.

Combustível e tecnologia de combustão	Unidades	SO_2	N_2O	CO_2
Diesel (caldeiras industriais)	kg/m³	17,04	2,4	0,6
Gás Natural (caldeiras de grande capacidade, com queima frontal)	kg/m³	-	0,0048	0,001344
Gás Natural (caldeiras de grande capacidade, com queima tangencial)	kg/m³	-	0,00272	0,000384

Fonte: LORA, 2001

Apesar de ser considerada uma fonte de energia “limpa”, a exploração do gás natural ainda provoca impactos ambientais tanto no espaço marinho, como no terrestre. Em terra, a exploração, prospecção e produção podem provocar alterações e degradação do solo. No mar, além da interferência no ambiente, há a possibilidade de ocorrência de vazamentos do óleo, o que coloca em riso a fauna e flora aquática (MME, 2007).

3.6 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

3.6.1 Conceito Técnico

A absorção da radiação eletromagnética leva a efeitos elétricos em gases, líquidos e sólidos. Esses efeitos podem ser usados para gerar eletricidade em certos semicondutores de estado sólido (MELIß; KLEEMANN, 1988). As células fotovoltaicas são estruturas feitas majoritariamente de silício dopado, capazes de transformar a radiação solar incidente em

corrente contínua a partir da movimentação dos elétrons entre os polos positivos e negativos. Um dos requisitos básicos da célula solar é, portanto, a presença de um campo elétrico interno para poder usar o efeito fotovoltaico no semicondutor (MELIß; KLEEMANN, 1988). Os painéis fotovoltaicos são formados por um conjunto de células fotovoltaicas e podem ser interconectados de forma a permitir a montagem de arranjos modulares que, em conjunto, podem aumentar a capacidade de geração de energia elétrica (SILVA, 2015).

Segundo Meliß, Kleemann (1988), o efeito fotovoltaico foi descoberto por Becquerel no ano de 1839, porém seu uso só se iniciou em 1954 para fins espaciais com o desenvolvimento de placas solares de silício monocristalino para satélites. Apenas em 1973 a tecnologia passou a ser usada em solos terrestres como uma alternativa para o petróleo durante a "Crise do Petróleo".

3.6.2 Contexto Global

Se durante a década de 70 o desenvolvimento das placas solares foi justificado como uma das saídas econômicas para a crise, atualmente o interesse pelo sistema no âmbito político e social se modificou, colocando em debate os problemas ambientais causados pelo uso de combustíveis fósseis para a geração de energia.

Pautado neste contexto, principalmente com os incentivos estabelecidos pelos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU e metas do Acordo de Paris, muitos países começaram a buscar alternativas para a diversificação da matriz energética, atentando-se também, as questões ambientais quanto à redução de GEE. Dentre elas, a energia solar fotovoltaica enquadra-se como uma alternativa de substituição às fontes de origem fóssil responsáveis por liberar CO_2 na atmosfera, um dos gases causadores do efeito estufa (SILVA, 2015). Nos dados disponibilizados na última pesquisa realizada *pela International Energy Agency* (2018), o fornecimento total mundial de energia primária por sistemas solares fotovoltaicos de 2010 a 2016 mostrou um acréscimo de geração de energia em 100 vezes, passando da produção de 32.190 GWh para 328.038 GWh.

O Brasil, entretanto, ainda se apresenta emergente no contexto de incentivos políticos para a produção e uso do sistema apesar de seu potencial solar. Os dados disponibilizados pela Global Solar Atlas (2017) e pela *International Energy Agency*(2018) mostram que o país apresenta uma média anual de irradiação solar na escala de 1534 kWh/m^2 a 2264 kWh/m^2, distribuída por todo território nacional para uma produção de 85 GWh no ano de 2016 (Figura 13). Observa-se, também, que o uso de energia primária por fontes solares apresenta uma ascensão relativamente recente, a partir de 2012. Tal crescimento se justifica

após a ANEEL editar a Resolução Normativa ANEEL n° 482, de 17 de abril de 2012, estabelecendo as condições gerais para o acesso de microgerações e minigerações distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica, no qual injeta-se a energia produzida na rede, sendo tal energia abatida do consumo da própria unidade ou de outra do mesmo titular (NASCIMENTO, 2017).

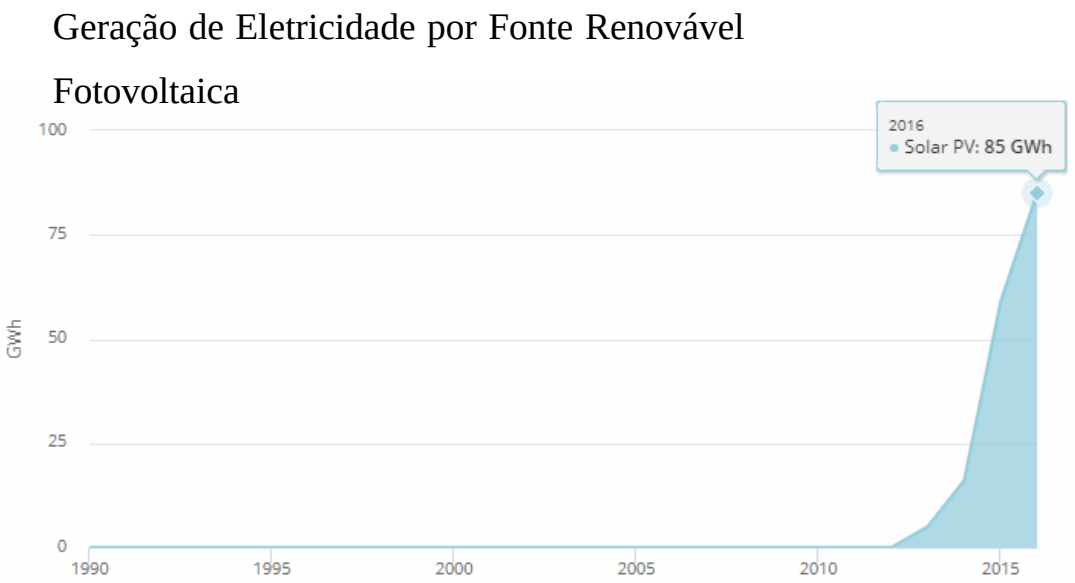


Figura 13 - Geração de energia no Brasil por fonte fotovoltaica.
Fonte: International Energy Agency, 2018

Inserida em um contexto diferente, encontra-se a Alemanha, quarto país com maior produção de energia fotovoltaica entre os anos de 1990 a 2016 (MME, 2017). A nível de comparação, o menor índice de irradiação solar no Brasil apresenta-se ainda 28% mais alto do que os maiores níveis da Alemanha (Anexo 2). Ainda assim, a Alemanha aponta um crescimento no uso de energia solar desde 2005 chegando a apresentar, em 2016, uma geração energética quase 448 vezes maior que o total produzido no Brasil no setor (Figura 14).

O Brasil possui, portanto, expressivo potencial para geração de energia elétrica a partir de fonte solar, contando com níveis de irradiação solar superiores aos de países onde projetos para aproveitamento de energia solar são amplamente disseminados, como Alemanha, França e Espanha (NASCIMENTO, 2017).

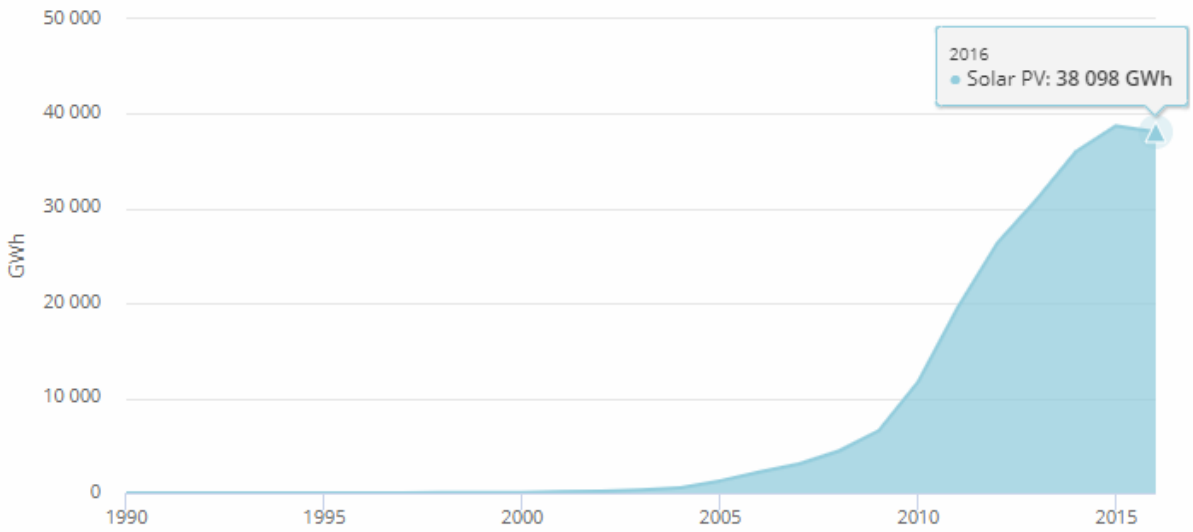


Figura 14 - Geração de energia na Alemanha por fonte fotovoltaica.
Fonte: International Energy Agency, 2018

3.6.3 Contexto Brasileiro

No Brasil existem dois tipos de uso para a energia fotovoltaica: o sistema isolado e o distribuído. O sistema isolado funciona como geração e consumo independente. A geração de energia alimentará diretamente a demanda energética do local, sendo necessário, muitas vezes o uso de baterias individuais para armazenar o excedente de energia produzida durante o dia. Esse sistema é normalmente indicado para locais remotos, onde a distribuição de energia é dificultada.

Por outro lado, existe o sistema distribuído, onde a energia produzida é conectada à rede de distribuição, aumentando a capacidade de todo o sistema energético. Quando utilizada em microgerações residenciais, a produção local promove um crédito para os usuários nas contas de luz. Quando uma residência acaba consumindo mais do que o produzido, a rede elétrica abastece normalmente, sendo debitada apenas a diferença do consumo excedente.

Foi a partir do Acordo de Paris em 2015 que a preocupação do país aumentou com as metas assumidas para a redução dos impactos climáticos. De acordo com o MME, o Brasil comprometeu-se a reduzir emissões de gases de efeito estufa em 37% e 43% nos anos de 2030 e 2050, respectivamente. Um dos objetivos para alcançar tal meta é uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030. De acordo com os dados disponibilizados pelo *International Energy Agency* (2018), a geração de energia por sistemas solares fotovoltaicos já cresceu em mais de cinco vezes entre os anos de 2014 a 2016, saindo de uma geração de aproximadamente 16 GWh para 86 GWh,

respectivamente. Ao considerar apenas a faixa de melhor irradiação (6,0 a 6,2 kWh/m²) no Brasil e apenas em áreas já antropizadas, estima-se a possibilidade de instalação de 307 GWp em centrais fotovoltaicas, com geração aproximada de 506 TWh/ano. Dada a demanda atual de eletricidade e as projeções para 2050, essas grandezas são extremamente significativas (EPE, 2018).

Apesar do crescimento registrado, a maior dificuldade para a utilização dos sistemas fotovoltaicos no Brasil reside no custo das células fotovoltaicas (MME, 2007). De acordo com o Plano Nacional de Energia - PNE 2030, o Brasil é o maior exportador de sílica do mundo, porém o beneficiamento do material é feito em territórios estrangeiros, encarecendo o valor final do material fotovoltaico para uso nacional. Um dos incentivos propostos no PNE 2030 é fomentar, no país, a instalação de indústrias de beneficiamento do silício para fabricá-lo no grau de pureza solar em indústrias de baixas emissões de GEE. Dessa forma, os custos das células seriam reduzidos de modo a tornar o uso do sistema fotovoltaico vantajoso e poder competir com o mercado internacional.

Atualmente já existem diversos programas para o uso e disseminação de informações sobre a energia fotovoltaica, principalmente em residências. Alguns deles são listados por SILVA (2015) referente aos incentivos governamentais no Brasil até o ano de 2015. Dentre eles, destaca-se: Descontos na Tarifa de Uso dos Sistemas de Transmissão e na Tarifa de Uso dos Sistemas de Distribuição, Venda Direta a Consumidores, Sistema de Compensação de Energia Elétrica para a Microgeração e Minigeração Distribuídas, Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores, Redução de Imposto de Renda, Investimentos BNDES e Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Todos esses incentivos permitem uma aproximação dos consumidores de diversos nichos para reduzir as incertezas quanto ao modelo energético solar, auxiliando na disseminação inicial da fonte solar.

O crescimento da demanda de placas fotovoltaicas pelos consumidores provoca um aumento de produção nas empresas que oferecem a prestação do serviço, bem como a competência do serviço. Dessa forma, o preço dos equipamentos e custos de instalação se reduzem, barateando o custo da geração de energia por fotovoltaica a ponto de compará-lo com outras fontes geradoras de energia, termo conhecido como *grid parity*. A Figura 15 apresenta a redução do preço dos sistemas fotovoltaicos distribuídos no Brasil entre os anos de 2013 e 2017. Os resultados levam em consideração a média entre os preços informados pelas empresas instaladoras/integradoras e empresas fabricantes/revendedoras. Desde o início da pesquisa, em 2013, o valor dos sistemas apresentou uma queda de cerca de 30%,

resultado muito bom, considerando-se que a redução nos preços de instalação leva ao aumento do número de conexões à rede (IDEAL, 2018). Outra análise observada foi a redução do preço dos módulos fotovoltaicos proporcional ao aumento da potência instalada devido à economia de escala, ou seja, máxima utilização no uso do produto com baixo custo de produção.

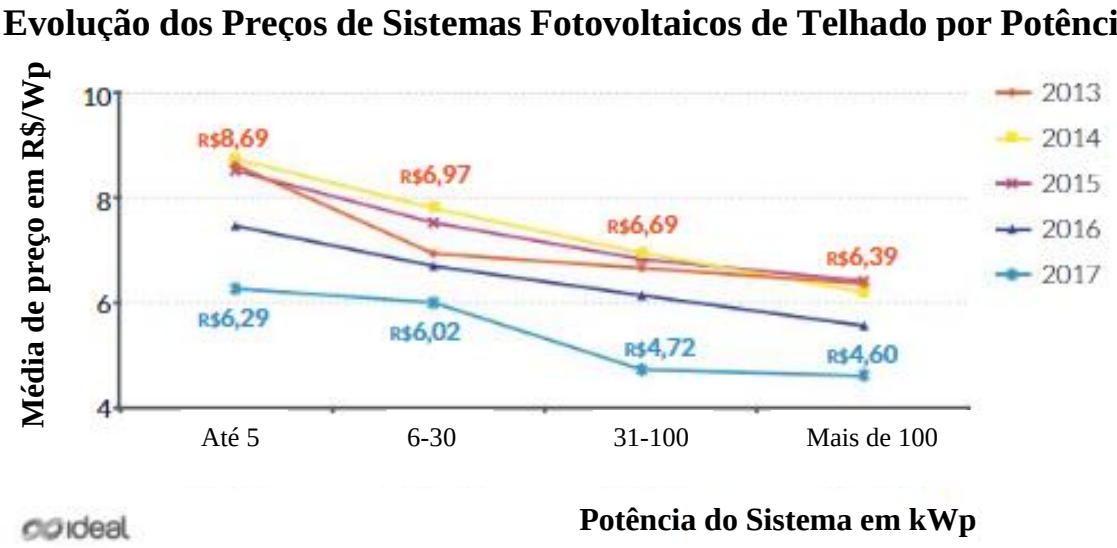


Figura 15 - Evolução dos sistemas fotovoltaicos de telhado por alcance de potência.
Fonte: IDEAL, 2018

O desenvolvimento energético no mundo foi o ponto focal para a redução de gases de efeito estufa e mudanças climáticas. A medida em que há o aumento da demanda de produtos fotovoltaicos, seu preço de mercado reduz de forma a incentivar ainda mais a adoção do modelo. Todavia, é importante que na avaliação da sustentabilidade das alternativas, além dos impactos financeiros, sejam considerados os impactos ambientais. Segundo Hastik et al. (2015 apud IPCC, 2011; RESCH et al., 2008) uma das formas de elaborar a avaliação é por meio do ciclo de vida dos produtos, levando em consideração a emissão de carbono, a demanda energética e uso da água para sua produção.

3.6.4 Aspectos Ambientais

Os painéis fotovoltaicos, apesar de serem considerados uma das alternativas mais limpas e com maior praticidade de instalação em diversos locais do planeta, não deixa de pontuar alguns impactos ambientais desde seu processo de fabricação até o uso de forma centralizada (usinas fotovoltaicas) ou domésticos (geração distribuída em edifícios). Alguns dos impactos mencionados por Abbasi e Abbasi (1999) são referentes à poluição das águas

pluviais pela existência de substâncias tóxicas nas placas solares. Frisa a existência do Cádmio e Telúrio utilizado para fabricar um tipo de coletor que utiliza um painel de filme fino. Porém, apesar de serem mais baratos, os dados de Irena (2016) apontam que este tipo de painel representa apenas 5% das tecnologias do mercado e é limitado devido a toxicidade do cádmio, a baixa disponibilidade de telúrio e a baixa eficiência na geração. Não obstante, os processos industriais atuais são capazes de controlar o contato da água com estes componentes tóxicos (EPE, 2018). A opção pelas placas de silício, por sua vez, provoca um resultado indireto na superprodução do material, reduzindo seu preço no mercado e, consequentemente, o preço das placas solares pela unidade energética produzida. A média dos preços dos painéis solares de silício são apresentados na Figura 16. No período de um ano. o Brasil apresentou uma queda no preço de aproximadamente 24%.

Preço dos Módulos Fotovoltaicos de Silício no Mercado

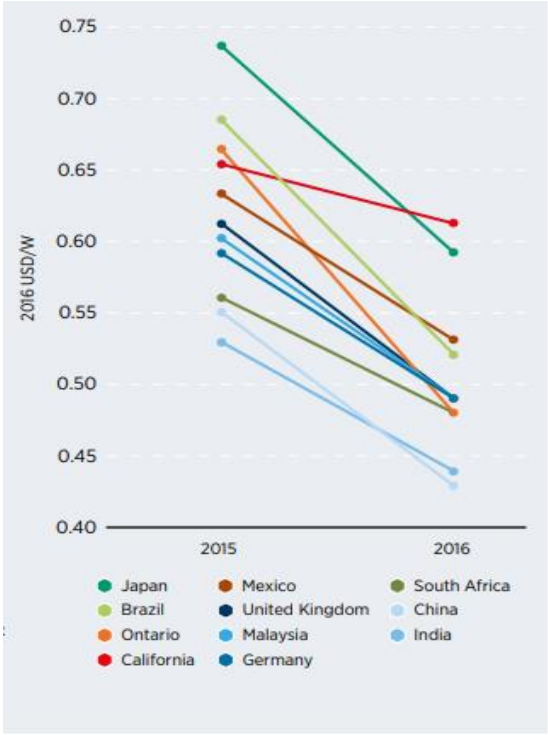


Figura 16 – Média anual dos preços dos módulos por Mercado em 2015 e 2016.
Fonte: IRENA, 2017

Outro tópico abordado por Abbasi e Abbasi (1999) foi a geração de resíduos não recicláveis. De acordo com Padoan, Altimari e Pagnanelli (2018), o baixo custo do silício no mercado provocou a desvantagem da recuperação do material de placas antigas pelos processos consolidados da reciclagem. A heterogeneidade das placas também dificulta a separação dos materiais para o fim. Jordan e Kurtz (2012) analisam que o tempo de vida das

placas solares excedem a recomendação de 25 anos adotada pela garantia das fabricantes. Entretanto, após o tempo estimado da garantia, grande parte das placas são descartadas. Como no Brasil o uso dos coletores solares começou a crescer substancialmente em 2012, a partir de 2035 o país aumentará o volume do material em aterros sanitários. Os produtos antioxidante, anticongelamento e de refrigeração existentes no painel podem ser lixiviados pela água da chuva após seu descarte e contaminar os corpos hídricos.

Quanto à fase de instalação das placas em terrenos, Abassi e Abassi (1999) destaca sobre a compactação do solo para o nivelamento do local, aumentando o risco de erosões e o uso de herbicidas para impedir o crescimento de plantas onde serão instaladas as placas. A existência de múltiplas placas no solo pode provocar a alteração do microclima local devido ao desvio de ventos e a mudança da paisagem. O sombreamento resultante da instalação do parque fotovoltaico acaba alterando o habitat de organismos vivos do solo. De acordo com Hastik et. al. (2015), o cercamento da área pode representar barreiras para espécies da fauna local. Vale ressaltar que todos os impactos ambientais citados no parágrafo se referem apenas à instalação de placas fotovoltaicas no solo em grandes quantidades, os chamados Parques Fotovoltaicos. Esses impactos de instalação podem ser aplicados para demais construções de indústrias geradoras de eletricidade. Tanto Hastik et. al. (2015) quanto Abassi e Abassi (1999) não observam impacto algum no meio ambiente na instalação de sistemas fotovoltaicos em edifícios, com exceção do impacto visual e da reflexão da luz solar, tampouco mencionam sobre os impactos na fase de operação.

3.7 APLICAÇÃO LEVELIZED COST OF ENERGY

Após as convenções adotadas pelo Acordo de Paris, o Brasil busca alternativas para suprir sua demanda energética por meio do desenvolvimento e diversificação de tecnologias e fontes para aumentar a produção de eletricidade do país. Estudos utilizam métodos para monetizar e comparar as diversas fontes energéticas incluindo os aspectos ambientais, como a emissão do carbono e geração de GEE, a fim de mostrar a viabilidade e custo benefício da adoção de investimentos em um determinado tipo de matriz energética no Sistema Interligado Nacional (SIN), levando em consideração os impactos ambientais consequentes. É o caso do custo nivelado *Levelized Cost of Energy* (LCOE), que permite incluir parâmetros na análise para mostrar um valor representativo do custo-benefício do investimento em uma fonte energética.

O estudo de Leal, Rego, Ribeiro (2017) teve como foco principal a realização de uma análise comparativa entre as tecnologias de geração termelétrica mais empregadas: gás

natural, biomassa, carvão mineral e óleo combustível. Para isso, forneceu uma análise compreensiva de aspectos econômicos e ambientais de cada tecnologia pelo LCOE, com o impacto adicional da emissão de metano como uma externalidade importante. O tópico do estudo foi pautado no crescimento da geração elétrica por termelétrica em comparação com as hidrelétricas e utilizou o gás natural como a fonte comparativa de menores impactos ambientais, devido as suas menores emissões de dióxido de carbono e outros gases GEE.

O gás natural é apresentado como uma transição sustentável brasileira a fim de substituir tecnologias poluentes, porém não deixa de considerar as externalidades ambientais pelo uso do insumo, principalmente relacionadas às porcentagens de escape do gás metano pelas tubulações dos gasodutos. Por fim, indicou que a geração de energia elétrica por gás natural mostrou uma competitividade eficiente comparada com outras fontes termelétricas nos âmbitos econômicos e ambientais, mesmo considerando as externalidades. Os resultados calculados pelo método LCOE mostraram vantagens de eficiência de até 135% do gás natural comparado com outros insumos, como o carvão mineral e lenha.

Uma outra pesquisa faz uma revisão dos métodos utilizados pelo LCOE para qualquer tipo de fonte energética e aplica os resultados para a geração de energia fotovoltaica. De acordo com Brenker, Pathak, Pearce (2011), o LCOE para geração fotovoltaica tende a ser bastante elevado quando comparado a outras alternativas e as barreiras econômicas permanecem o principal impedimento para uma sociedade movida a energia renovável. Entretanto, comprova um crescimento mundial de 40% até 2011 no uso de energia fotovoltaica, resultado da redução preços de manufatura em cerca de 100 vezes entre 2000 e 2010 e dos incentivos do governo para produtores e consumidores. Uma das formas de demonstrar a viabilidade do uso de uma fonte de energia é por meio do cálculo LCOE, desde que sejam consideradas premissas realistas e justificadas, incluídos financiamentos reais atualizados e inseridas as considerações tecnológicas e variabilidade geográficas. Pontua ainda que muitas vezes a metodologia é criticada por não incluir a vida útil correta das tecnologias e não contabilizar os custos totais das indústrias, como descomissionamento, a geração de carbono e externalidades ambientais. Exemplifica um estudo realizado na Califórnia que, mesmo considerando a vida útil das placas fotovoltaicas abaixo do real, atribuiu projeções realistas para variáveis, como valores de indexação da inflação e tipos de financiamento, resultando em um LCOE menos caro que outras fontes tradicionais na Califórnia, como as indústrias a gás natural.

Uma ferramenta online foi desenvolvida por Rhodes et. Al. (2016) para contabilizar as externalidades ambientais no cálculo do LCOE de diversas fontes de energia, incluindo

gás natural e fotovoltaica para os municípios dos Estados Unidos. A ideia central era fornecer uma plataforma maleável para a entrada de resultados de cada região, visto que o cálculo do LCOE depende dos custos dos parâmetros de cada local. O cálculo inicia-se com a fórmula padrão do LCOE, demonstrada na etapa de metodologia deste estudo, para posteriormente adicionar algumas externalidades, como: N_2O, particulados considerados poluentes atmosféricos, emissões de CO_2, emissões de CH_4 de escape e as emissões do ciclo de vida de cada fonte energética. Os critérios de custos foram considerados para cada local com base no impacto à saúde humana, para posteriormente serem internalizados nos custos de geração elétrica. O objetivo do trabalho foi criar uma simulação interativa que permitisse a visibilidade dos impactos nos custos de geração de energia elétrica. Dessa forma, seria possível criar melhores diálogos e políticas regionais entre os decisores políticos.

Levando em consideração as análises de custo nivelado para as fontes de energia termelétrica por gás natural e fotovoltaica com base na metodologia aplicada por Rhodes et. al. (2016), pretende-se considerar as externalidades ambientais de tais fontes energéticas aplicadas aos parâmetros nacionais com o objetivo de demonstrar, quantitativamente, a viabilidade e benefícios de uso de cada uma no território, visando, principalmente, as condições estabelecidas no Acordo de Paris e ODS em relação a redução de GEE na atmosfera para combater os problemas de mudanças climáticas.

3.8 TAXA DAS EXTERNALIDADES

O conceito de externalidade ocorre quando a realização de uma interação voluntária entre comprador e vendedor afeta um terceiro a qual não faz parte dessa interação, podendo ser afetado positivamente ou negativamente, sendo possível englobar como externalidades negativas do mercado a poluição ambiental, resultado do consumo e produção desenfreados. Uma externalidade como definição não pode estar atribuída a um valor sobre malefícios ou benefícios causados por ela, sendo assim, a partir do momento que a externalidade é internalizada, transformada em valor monetário, a mesma deixa de existir (OPENSTAX,2015; E.SOARES,1999).

De acordo com o economista Arthur C. Pigou as questões, como poluição ambiental, podem ser corrigidas internalizando no sistema de preços os danos causados por essas externalidades, porém a falta de dados existentes gera dificuldades ao relaciona-las a fatores econômicos. Essas externalidades estão atribuídas ao aumento de *custos sociais*, sendo formado pelos *custos privados* de uma empresa somados com os *custos externos da poluição* que são repassados para terceiros com prejuízos a saúde, redução da possibilidade de

recreação, influenciar nos valores de propriedade, entre outros impactos negativos gerados por poluição (A.PIGOU, 1932).

No ponto de vista da economia, a falta da capacidade de internalizar os custos externos da poluição é visto como uma falha de mercado, devido ao fato de empresas poderem aumentar a produção sem consequências, visando o benefício privado e diminuindo o benefício social, enquanto aumentam o custo social que será pago por terceiros. De acordo com Pigou, a falha de mercado onde o interesse privado não internaliza o custo social é referida como *desserviços incidentais não cobrados* e poderia ser corrigida através da implementação de uma taxa. Essa taxa, chamada de taxa pigouviana ou imposto pigouviano, serve como mecanismo para atribuir ao poluidor os custos externos e equilibrar os benefícios, podendo ser utilizado como instrumento de políticas ambientais possuindo como princípio: poluidor-pagador (OPENSTAX,2015; A.PIGOU, 1932).

De acordo com (NERY, P. F, 2014).

> *"Na teoria econômica, o imposto pigouviano é concebido como um imposto capaz de corrigir uma externalidade.[...]O imposto seria capaz de internalizar a externalidade: isto é, fazer com que o próprio gerador da poluição pagasse o custo da poluição. Cabe observar que a motivação do imposto não seria de criar um custo, mas apenas de transferir um custo já existente — que estaria sendo pago por terceiros (ex: sociedade) — a quem de fato seria responsável por ele (o poluidor)."* (NERY, P. F, 2014)

No Gráfico 3 abaixo é demonstrado como é o comportamento em um mercado competitivo quando há aplicação de um imposto pigouviano.

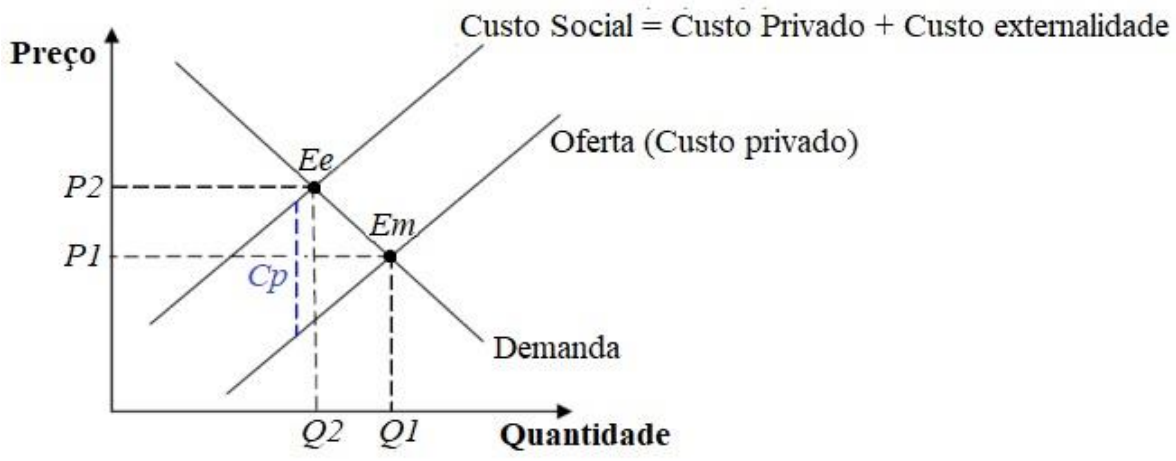


Gráfico 3 - Comportamento do mercado com internalização da externalidade.

Inicialmente nas curvas de oferta e demanda são apenas considerados os benefícios e custos privados, neste caso é dado como Preço e Quantidade do produto, não refletindo os custos sociais devido ao fato da externalidade (poluição),decorrente da sua atividade, não estar sendo contabilizada sendo somente avaliado o preço e a quantidade de produtos, definidos como $P1$ e $Q1$ respectivamente, gerando um ponto chamado Equilíbrio de Mercado, Em, visando o equilíbrio entre Custo privado e Demanda. Quando se introduz um Imposto Pigouviano por unidade de poluição (custo da externalidade gerada por uma unidade de poluição), Cp, gera-se um custo adicional para os produtores, obrigando assim a incorporar em seus custos privados os prejuízos causados pelas externalidades negativas, resultando no ponto de Equilíbrio Eficiente,Ee, equilibrando Custo Social e a Demanda, resultando em $P2$ e $Q2$ (HUBBARD; O'BRIEN, 2010).

O imposto pigouviano compatibiliza os custos econômicos com os custos ambientais, sendo os custos ambientais os efeitos monetários resultantes da poluição caracterizados como custo externo, podendo ser transformados em tributos ambientais, sendo um instrumento efetivo para incentivar a adoção de tecnologias mais limpas e minimizar impactos sobre o meio ambiente (NERY, P. F, 2014).

Através da 21° Conferência das Partes (COP21) da UNFCC em Paris foi definido o Acordo de Paris, cujo objetivo é mitigar as ações que intencificam a mudança do clima como também fortalecer a capacidade de prevenção dos países que sofrerão impactos provenientes desta mudança. Aprovado por 195 países, na qual tendem a investir no contexto sustentável, principalmente nas reduções das emissões de gases de efeito estufa, cada nação apresentou sua contribuição para a redução de emissões de GEE e construção de seus próprios compromissos. Alguns países para atender as especificações do Acordo de Paris, adotaram a utilização dos tributos ambientais sobre o carbono como meio de desencentivar a utilização de tecnologias que utilizam combustíveis fósseis (BRASIL,2019).

De acordo com o Banco Mundial (2018), o tributo ambiental é calculado com base nos custos de externalidades de gases de efeito estufa e sua relação com as mudanças climáticas, que por meios indiretos geram custos sociais, como os gastos na saúde por doenças de veiculação hídrica, eventos climáticos extremos como furações e tempestades, perda de propriedade por inundações e diminuição da produção agrícola por razão de seca. Após coleta dos valores em um período de tempo, os mesmos são distribuídos pela emissão que aquele país gera.

A entrada do Brasil para a adoção de um valor de taxa de carbono está prevista para 2020, com estudos em andamento para avaliar os custos dos impactos causados pelas mudanças climáticas nos setores da economia, como indústria , transporte e serviços, além dos custos na perda de serviços ecossistêmicos como diminuição de florestas e alteração de uso da terra (CEBS,2016).

3.8.1 Preço Mínimo de Carbono

O *Carbon Price Floor* podendo ser chamado de Preço Mínimo de Carbono, ou PMC, é uma política utilizada no Reino Unido para dar suporte ao programa de controle de emissões da União Europeia (*EU Emission Trading System*) a qual visa diminuir em 40% das emissões de GEE produzidos até 2030 e atingir a meta de redução de 80% até 2050. Entrada em vigor desde 2013, o PMC é aplicado em fontes de energia derivada de combustíveis fósseis, utilizando o princípio de poluidor-pagador, é realizada uma cobrança pelo governo nas unidades de CO_2 produzidas de usinas geradoras de eletricidade afetando a decisão de investimentos no setor energético, beneficiando tecnologias com baixa geração de GEE ao mesmo tempo que aumenta o custo de atividades geradoras desses gases (HIRST, D. 2018).

De acordo com a Revisão de Custo de Energia, em 2017 foi gerando £1 bilhão em impostos diretamente dessa política, resultando no desincentivo de investimentos em produções de energia elétrica utilizando fontes fósseis, como também afetando diretamente a produção de dióxido de carbono. A Figura 17 mostra o comportamento das usinas termelétricas movidas a carvão.

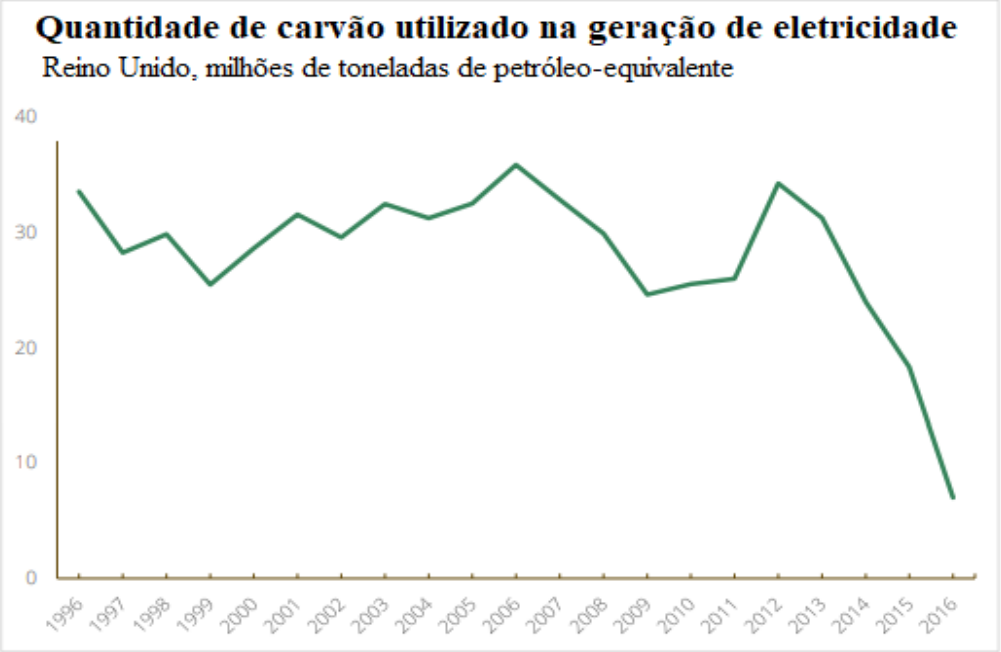


Figura 17- Comportamento da indústria produtora de eletricidade com base no carvão mineral
Fonte: BEIS, Digest of UK Energy Statistic, Table 5.3

O PMC é calculado utilizando os custos das externalidades no Reino Unido geradas pelas emissões de carbono, como o aumento dos seguros em lugares onde sofrerão com o aumento do nível do mar e os custos com a saúde devido a problemas provenientes da mudança de clima e presença de material particulado, sendo o PMC o principal instrumento utilizado para a correção da falha de mercado associada a externalidades ambientais no Reino Unido (HIRST,D. 2018; BANCO MUNDIAL, 2018).

O mesmo se encontra constante em £30/tonCO_2 até 2030 e aumenta para £70/tonCO_2 após 2030, este aumento está relacionado aos danos causados pelo aumento de GEE caso a concentração de CO_2 total continue com a taxa de crescimento atual. Devido a concentração de gases serem menores atualmente os danos causados por cada emissão geram custos menores, porém conforme a concentração de gases de efeito estufa aumentam, também aumentam seus custos de externalidades, se tornando mais frequentes e intensos, necessitando de um reajuste no instrumento tarifário (NEWBERY, D et al,2018).

3.8.2 Lei de Preços de Carbono

O comprometimento de Singapura em combater a mudança climática fez com que o país estabelecesse metas como redução de 16% das emissões de GEE de suas atividades

produtivas até 2020 e redução de 36% das emissões medidas em 2005, com sua estabilização em 2030 (NATIONAL ENVIRONMENT AGENCY,2019).

O *Carbon Pricing Act*, podendo ser chamado de Lei de Preços de Carbono (LPC), entrou em operação em janeiro de 2019 para dar suporte as emendas da Lei de Conservação de Energia, associadas aos compromissos ambientais definidos por Singapura. Além de impor um preço por emissão de GEE para ser pago pelos produtores, o LPC impôs obrigações sob os geradores de reportar anualmente suas emissões, separando os geradores entre Tributável (emite mais que 25000tCO_2eq) e Reportável (emite mais que 2000tCO_2eq), podendo estar isento desse instrumento caso sua emissão anual gerada for menor que 2000tCO_2eq (SINGAPURA, 2018;MENG,T *et al*, 2019).

O LPC é um instrumento a qual tenta internalizar as externalidades impostas pelo aumento de GEEs em Singapura, onde a mudança climática, embora global, provoca danos locais. (IPCC,2017;NERY,P.F 2014) De acordo com a *National Climate Change Secretariat*, (Secretaria Nacional de Mudanças Climáticas), entre 1972 até 2014, a temperatura anual em Singapura passou de 26,6°C para 27,7°C e o nível do mar em seu litoral passou a subir de 1,2 mm para 1,7 mm por ano entre 1975 e 2009, sendo esta a externalidade mais preocupante, devido a 30% de seu território estar a menos de 5 m acima do nível do mar. O ciclo de chuvas no país está se intensificando, resultando não apenas na ocorrência do primeiro ciclone perto do equador em 2001 causando enchentes na região, como também períodos mais intensos de estiagem, afetando o fornecimento de água e a intensificação de chuvas repentinas, sobrecarregando o sistema de drenagem e aumentando casos de vetores de doenças como a dengue.

A aplicabilidade do LPC é realizada através dos valores fixos de S$5/ton$CO_2$eq até 2023 para adequação das indústrias,após esse período poderá variar entre S$10/ton$CO_2$eq e S$15/tonCO_2eq até 2030, obrigando também os poluidores a se responsabilizarem com relatórios anuais de suas emissões para serem verificados pela Agencia Nacional do Meio Ambiente.(NATIONAL ENVIRONMENTAL AGENCY, 2019) De acordo com ALLEN & GLEDHILL, o que torna a aplicação do LPC eficaz é sua fundação definida na determinação das emissões e comunicação destes dados pelo poluidor e na posterior verificação, tanto quantitativamente como qualitativamente, dessas informações por um agente externo.

3.8.3 Sistema de Preços Baseados em Resultados

De acordo com a abordagem Pan-Canadense de Precificação do Carbono, a monetização do CO_2 não possui como propósito a geração de receitas, mas serve como um instrumento eficiente para potencializar investimentos com tecnologias mais limpas e eficientes, para geração de um crescimento sustentável e ao mesmo tempo mitigar as mudanças climáticas. Com o intuito de cobrar os custos dos efeitos da poluição foi então criado o *Output Based Pricing System*, podendo ser chamado de Sistema de Preços Baseados em Resultados, ou SPBR, entrando em vigor no dia 1 de janeiro de 2019.

O SPBR é atribuído a atividades que geram emissões iguais ou superior a 50000 toneladas de carbono, é um valor pago por tonelada de GEE que ultrapassa uma quantidade previamente estabelecida na qual varia com o tipo de atividade realizada pelo poluidor, podendo ser 80%, 90% ou 95% dependendo do nível competitivo da atividade já atuando, para novas industrias no setor energético e que utilizam combustíveis fosseis o controle será dado a partir de qualquer emissão, para tecnologias limpas como eólicas e solar possam se tornar mais competitivas. Quando um poluidor emite menos GEE ele poderá trocar por créditos para anos posteriores ou vender para outras indústrias gerando um incentivo para aplicação melhor eficiência energética. Embora seja aplicado para grandes emissores, o SPBR pode ser requisitado voluntariamente por indústrias que emite a quantidade igual ou maior que 10000 toneladas de carbono. (CANADA, 2019)

As externalidades decorrentes das mudanças climáticas impactam o Canadá de diversas formas e intensidades diferentes. O país tem enfrentado ondas de calor, como a que ocorreu em Quebec em 2018, impactando diretamente a saúde da população resultando em mais de 50 mortes derivados desse incidente, o derretimento de suas geleiras tanto em topos montanhosos como na região Ártica, impactando a biodiversidade da região, os povos nativos locais e o nível do mar, sendo uma ameaça para 8 das 10 províncias que fazem fronteiras com o oceano. A alteração no ciclo de chuvas aumentou a incidência tanto de incêndios florestais, recentemente o ocorrido em 2016 resultou na destruição de mais de 2400 casas, como também de tempestades em orlas marinhas ocasionando enchentes com nível alto de salinidade na água, contaminando lençóis freáticos e água superficial, além dos danos em infraestrutura. As apólices de seguro canadenses pagaram C$400 milhões de dólares para incidentes relacionados ao clima entre 1983 e 2004, somente na última década o valor chegou a C$1 bilhão. Atualmente, as estimativas apontam um prejuízo de C$43 bilhões na economia do país até 2050, através de impactos diretos ou indiretos relacionados ao clima (CCCR,2019; CLIMATE REALITY PROJECT, 2018).

De acordo com os Regulamentos do Sistema de Preços Baseados em Resultados, o SPBR é um instrumento que impulsiona a inovação em eficiência energética, de aspecto punitivo caso o poluidor emita GEE acima do padrão da sua atividade, ou de aspecto recompensador com créditos para guardar e vender para outras companhias caso consiga produzir emitindo menores quantidades que o padrão da sua atividade. Através de uma análise criteriosa no custo das externalidades para sua internalização, como também do comportamento de mercado é fixado para um valor inicial de C$20 dólares/ton$CO_2$eq para o ano de 2019 e aumenta C$10 dólares/ton$CO_2$eq a cada ano, até 2022.

3.9 ESTUDO DE CASO

A metodologia para aplicação do LCOE contabilizando os custos ambientais na geração de eletricidade das termelétricas a gás natural e de solar fotovoltaica, será empregada no setor residencial do Distrito Federal, responsável por aproximadamente 34% do consumo total de energia na região de acordo com a EPE (2018), com projeções de crescimento do consumo em até 2,5% ao ano.

O Distrito Federal encontra-se dentro do bioma do cerrado, caracterizado por duas estações bem delimitadas: o verão chuvoso, de outubro a abril e o inverno seco, de maio a setembro. A região do Cerrado se destaca do ponto de vista hidrológico e ambiental. Oito das doze grandes regiões hidrográficas brasileiras recebem água de rios que nascem neste bioma. Para a manutenção dos processos de produção e distribuição de água pelos rios do Brasil é fundamental a adequada gestão dos solos e dos recursos hídricos do Cerrado (EMBRAPA, 2003).

Com o passar dos anos, a dinâmica bem definida do regime das chuvas vem apresentando modificações. De acordo com Veloso (2018), as chuvas no cerrado diminuíram 8,4% nas últimas três décadas. Tal alteração reflete na redução do abastecimento dos corpos hídricos e o equilíbrio de toda a bacia hidrográfica.

Conforme discutido anteriormente, as emissões de GEE agravam as mudanças climáticas e tais efeitos já podem ser observados no cerrado, por exemplo, devido a alteração do regime das chuvas. Dessa forma, foi escolhido o Distrito Federal como um cenário para avaliar o custo das emissões de gases de efeito estufa e o efeito distribuído pela população de cerca de 3 milhões de habitantes.

4. METODOLOGIA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dentro das perspectivas referente a escolha de uma determinada fonte de energia e as intensas discussões e debates acerca do impacto das emissões de gases de efeito estufa no aquecimento global, este estudo procurou apresentar uma metodologia baseada na aquisição de dados, para realizar uma comparação do custo da energia elétrica quando parte desses impactos ambientais são incluídos como despesas.

Na Figura 18 apresenta-se o fluxograma com os passos de elaboração do estudo. Cada etapa de cálculo é representada por uma cor diferente. Os cálculos para uma mesma base de dados são diferenciados pelo dégradé das respectivas cores.

Nos retângulos de tons azuis são representadas as aquisições da base de dados secundários referente ao setor escolhido (residencial) e os dados das fontes energéticas solar fotovoltaica e termelétrica a gás natural. À direita do retângulo encontram-se as informações de entrada para os cálculos da base de dados.

Os resultados calculados na primeira etapa servirão para elaborar os dados derivados, referente a precificação do carbono nas elipses de tons alaranjados. Nessa etapa é necessário estimar a quantidade de GEEs emitidos durante o ciclo de vida dos sistemas adotados.

Por fim, tanto os dados da primeira etapa, como os da segunda serão internalizados no cálculo da LCOE. O resultado induzirá em um custo social comparativo entre a tecnologia do sistema solar fotovoltaico e de termelétrica a gás natural.

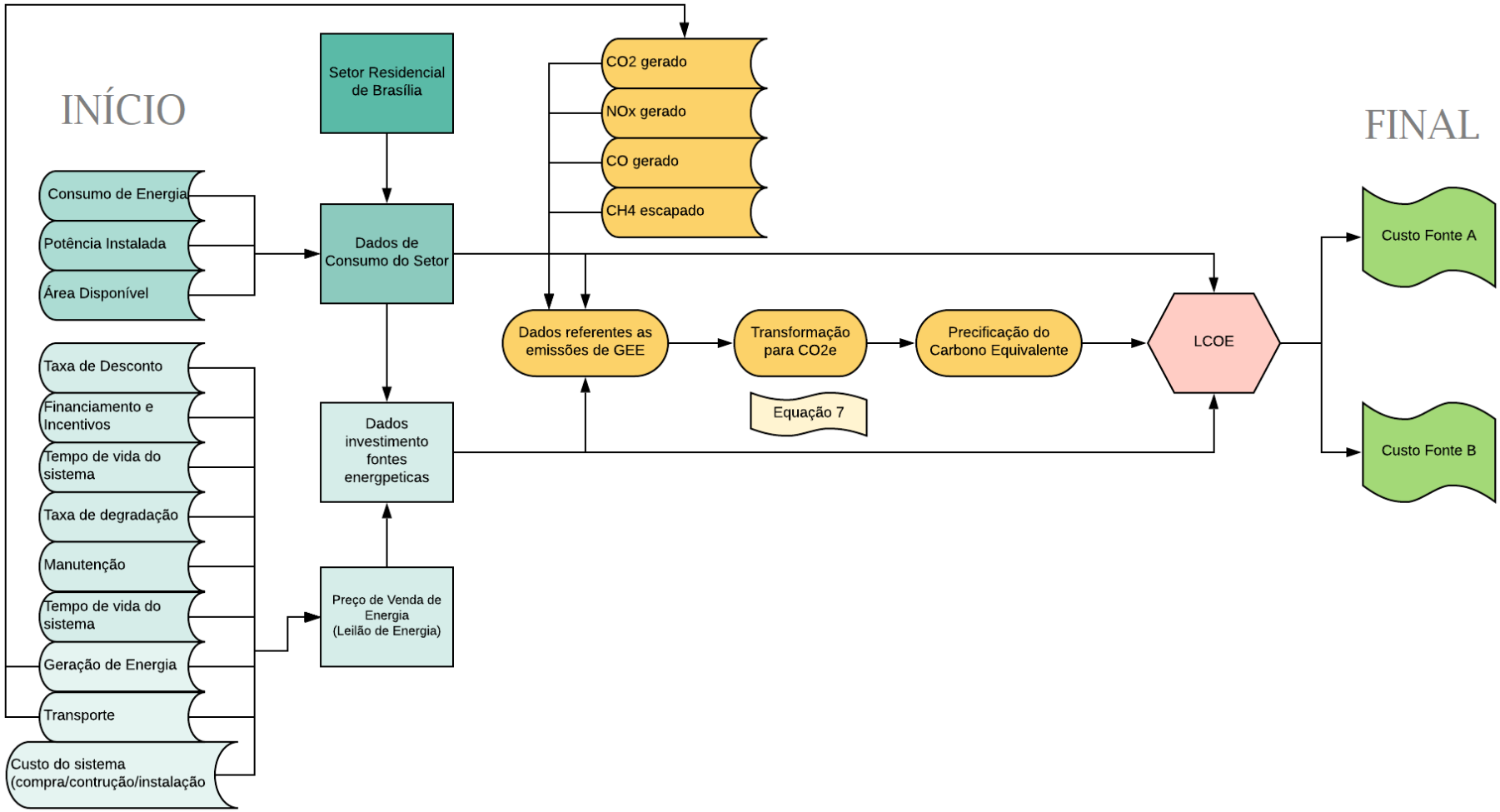


Figura 18 - Fluxograma da Metodologia do Projeto

4.2 POTÊNCIA INSTALADA

Durante o processo de geração de energia sempre há perdas associadas a potência instalada resultando em valores maiores que a demanda. O primeiro passo, portanto, é determinar a demanda a partir do consumo energético no setor residencial do Distrito Federal.

As perdas para a geração de energia estão associadas às características técnicas de cada tecnologia. As placas fotovoltaicas, por exemplo, por ter produção intermitente, deve ser considerado o período de incidência solar no local onde será instalada e a performance da placa (*Performance Ratio),* que leva em consideração o rendimento do módulo com a eletricidade produzida e capaz de produzir. A termelétrica a gás natural por outro lado, leva em consideração o Fator de Capacidade (FC), vale ressaltar que o FC adotado para este estudo é o valor mais otimista encontrado, foi determinado pela razão entre a produção de eletricidade em um período e a máxima eletricidade que poderia ter produzido nesse mesmo período.

O lapso de geração de energia por fotovoltaica necessita de maior potência instalada para dada quantidade de energia gerada, aumentando seu custo de implementação. Entretanto, por ser uma fonte de energia não renovável, quando o custo da eletricidade é somado ao custo ambiental associado à sua geração, a termelétrica a gás natural tende a apresentar resultados mais elevados devido a constante queima de combustíveis fósseis. Na Tabela 4 são apresentados os valores adotados para cada parâmetro técnico e as Equação 1 e Equação 2 demonstram o cálculo para determinar a potência de cada tecnologia.

$$P_{picoFV} = \frac{\frac{E_{resBSB}}{365}}{I * PR}$$

Equação 1 - Cálculo da potência de pico para energia solar fotovoltaica.

$$P_{picoGN} = \frac{\frac{E_{resBSB}}{365 * 24}}{FC}$$

Equação 2 - Cálculo da potência de pico para termelétrica a gás natural

Onde,

E_{resBSB} = Média do consumo de energia anual no período de 25 anos para o setor residencial em Brasília (MWh).

I = Irradiação Média Solar (kwh/m²/dia)

PR = Performance Ratio, varia entra 0,7 e 0,8.

FC = Fator de capacidade. Difere para termelétrica a gás natural de ciclo simples e ciclo combinado.

Para a obtenção do valor de irradiação solar foi consultado a base de dados do programa SunData, do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio S. Brito

(CRESESB,2019), a qual disponibiliza informações de 350 medidores da radiação solar média mensal. Foram pegos a incidência da radiação em um ângulo de 15° de todos os dias dos 12 meses mensurados nos 3 medidores presentes em Brasília. Escolheu-se a incidência solar em um ângulo de 15° pois, de acordo com Portal Solar (2019) para a otimização dos painéis fotovoltaicos adota-se o ângulo igual ao da latitude (-15,780 no caso de Brasília) voltado para o Norte.

$$I = \frac{MM_1 + MM_2 + MM_3}{3}$$

Equação 3- Cálculo da Irradiação mensal total

MM_i= Média Mensal da Irradiação Solar do Medidor i

Tabela 4 - Valores utilizados como características técnicas para a instalação.

	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 (m²)[8]	1,98	-	-

4.2.1 Disponibilidade de Área

Os sistemas geradores de eletricidade devem ser projetados de tal forma que sejam capazes de suprir as potências determinadas pelas Equação 1 e Equação 2. Tratando-se da energia fotovoltaica, uma grande vantagem é a praticidade das instalações. No caso do Distrito Federal, foi verificada a viabilidade das instalações apenas nos telhados de residências.

Um estudo da *World Wildlife Fund (*WWF), ou Fundo Mundial da Natureza, elaborado por Schutte, Raquel e Rodrigues (2016) apresentou resultados sobre a quantidade de casas e prédios para os bairros do Distrito Federal, bem como as áreas de telhados de alguns desses bairros. Com esses dados foi possível determinar uma área de telhado o suficiente para a geração de energia do setor residencial do Distrito Federal. É importante

D

[4] Performance Ratio adotado conforme Hsu,D.. et al,2012.
[5] Irradiação Solar dado pela CRESESB,2019.
[6] Fator de Capacidade retirado de EPE ,2018.
[7] Potência admitida de acordo com placa PHK-36-SÉRIE-4BB
[8] Área admitida de acordo com placa PHK-36-SÉRIE-4BB

ressaltar que nem todos os bairros foram considerados. A ordem de consideração para cada um deles seguiu o *ranking* de IDH e a quantidade de residências, isso porque quanto maior o IDH, maior a possibilidade de o consumidor arcar com o investimento das placas solares fotovoltaicas. Como o estudo fornecia a área média de telhados de apenas alguns bairros, utilizou-se o *software* Google Earth para estimar as áreas de telhado dos bairros complementares.

Para a geração de energia por gás natural é necessário a construção de uma usina fixa. Dessa forma, a única consideração feita sobre a viabilidade de área, seria um local livre e legalmente viável dentro do Plano Diretor de Ordenamento do Distrito Federal (PDOT-DF).

4.3 CUSTO NIVELADO DE ENERGIA

O modelo de cálculo *Levelized Cost of Energy* (LCOE) ou Custo Nivelado de Energia, é uma ferramenta para avaliar um sistema energético em relação a sua concorrência e construir uma relação de custo privado de diferentes gerações de energia por meio do custo nivelado. O nivelamento do LCOE é realizado por meio da divisão do custo anual da construção e manutenção da fonte energética pela quantidade de eletricidade fabricada em seu período de vida resultando, assim, em um preço por unidade de energia gerado ($/MWh).

Apesar de ser eficiente para quantificar os custos de uma tecnologia, o método direto de cálculo do LCOE, todavia, está suscetível a entrada de valores incorretos, incompletos e desatualizados.

No estudo elaborado por Branker, Pathak e Pearce (2011), foram destacados os principais equívocos de parâmetros usados para o cálculo da LCOE. A partir do conhecimento de tais parâmetros é possível elaborar uma metodologia para a entrada dos valores reais e coerentes. Podemos citar:

Taxa de desconto: A taxa de desconto é o custo de capital utilizado para uma análise de retorno, dando base para escolhas de investimentos, resultando no grau de viabilidade do empreendimento sendo atribuindo um valor para uma quantia de dinheiro atual que será recebida em algum momento no futuro. Essa previsão é fundamental para determinar o valor da tecnologia para investidores terem conhecimento dos riscos a que irão se submeter, pois quanto mais alta a taxa de retorno, maior o lucro do investimento a curto prazo. Essa decisão pode pesar no momento de escolha da tecnologia mais competitiva. A taxa de desconto deve ser analisada para cada país.

Custo do sistema, financiamento e incentivos: O custo de sistema representa a despesa de projeto, a escolha do tipo de sistema e sua instalação. Há também um custo administrativo que engloba o valor do seguro e interconexões. O custo de financiamento é tanto para o método escolhido como também para o custo público onde serão inseridos os juros. A linha de financiamento deve ser mantida a mesma para todas as tecnologias comparadas. No cálculo básico do LCOE, não são contabilizados os custos de impactos negativos econômicos e ambientais além dos impactos negativos à saúde, porém será apresentada a versão expandida do cálculo para a inclusão das externalidades ambientais.

Tempo de vida do sistema: É considerado tempo de vida desde o início da operação do sistema até o momento em que o custo de operação e manutenção possui um aumento significativo a tal ponto que não se torna economicamente viável manter o sistema comparado com sua eficiência de produção.

Taxa de degradação e produção de energia: É um fator redutor da eficiência de geração de energia devido ao desgaste do sistema.

O estudo apresentou uma revisão dos parâmetros utilizados no LCOE para a obtenção de um valor que reflete as condições reais de mercado a partir do cálculo de vários dados de entrada referente ao investimento e custo da tecnologia. Por outro lado, apresenta algumas lacunas ainda não consideradas no cálculo que podem influenciar nas tomadas de decisões. Um desses parâmetros são os impactos ambientais de uma determinada fonte de energia.

Para incluir as externalidades ambientais e outras lacunas, Rhodes et. al. (2017) desenvolveram um método de expansão da LCOE capaz de internalizar o custo ambiental de algumas externalidades-chave no custo de geração elétrica, como a emissão de GEE da operação do sistema durante todo o ciclo de vida.

4.3.1 Cálculo da LCOE

A Equação 4 apresentada a fórmula para o cálculo da LCOE padrão e em seguida a Equação 5 acrescenta ao cálculo a parcela do custo das emissões de GEE.

$$LCOEa = \frac{\Pi custocapital\ x\ CRF + O\&Mfixo}{8760\ x\ CF} + O\&Mvariável + HR\ x\ \Pi combustível \quad (1)$$

Equação 4 - Cálculo da LCOE

Onde,

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

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

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

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

HR: taxa de calor (MMBtu/MWh);

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

CRF: fator de recuperação do capital (Equação 5)

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

Equação 5 - Cálculo do Fator de Recuperação do Capital

Onde:

i = taxa de juros;

n = número de anos para custear a dívida.

Para incluir os custos ambientais, soma-se o valor LCOE com o valor das externalidades:

$$LCOEamb = LCOE + \sum_{j\in\theta} Rj\ x\ Dj \qquad (3)$$

Equação 6 - Cálculo Custo Nivelado de Energia Ambiental

Onde:

R_j = taxa de emissão do poluente *j* em CO_2eq ($tonCO_2eq$ /MWh)

D_j = custo da externalidade *j* ($/$tonCO_2eq$);

Θ = poluentes analisados (N_2O, CO_2 e CH_4).

O cálculo apresentado na Equação *4* demonstra o custo total do investimento, incluindo o lucro, ajustado pela taxa de juros no período. O custo de operação fixo entra na soma do investimento total e ambos dependem da quantidade de energia que será produzida de acordo com a potência instalada para que seja possível analisar os gastos e retornos. O valor de 8760 representa a quantidade de horas para um ano, porém a análise pode variar para o período desejado. O preço do combustível representa o insumo que será utilizado para a geração de calor, portanto é necessário determinar o quanto de calor é necessário para a produção de uma unidade de energia. Dessa forma, o preço do combustível é pautado em função da unidade de calor utilizada, sendo apenas considerado para análise do LCOE de termelétricas. Os custos variáveis de operação e manutenção são realizados de acordo com desgaste da usina durante a geração de eletricidade, portanto depende diretamente da atividade do sistema e a quantidade de energia que ele produz. Por fim, para contabilizar os impactos, é necessário calcular o total de sua emissão e internalizá-lo com o respectivo preço obtido pela comparação com o CO_2eq.

Conforme já mencionado, o cálculo da LCOE pode apresentar equívocos relacionados aos parâmetros considerados. Como o âmbito para este estudo é focar no custo das externalidades ambientais resultantes das emissões de GEE, procurou-se considerar um LCOE já calculado dos leilões de energia, de a aumentar a acurácia do estudo devido a confiabilidade dos dados de entrada.

O dado utilizado foi do Leilão de Energia Nova A-6 de 18/10/2019, realizado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). O preço final da energia elétrica é calculado pelo LCOE. Dessa forma, partiu-se do pressuposto que tal cálculo seria o mais próximo da realidade, visto que estaria considerando os investimentos atuais para tal geração, incentivos governamentais e o *payback* ao longo da vida útil da geração para o mercado. Os resultados do leilão podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Preço médio da venda de energia do Leilão de Energia Nova A-6 de 2019

Tipo de Instalação	**Preço (R$/MWh)**
Energia Solar	84,39
Gás Natural	188,56

O valor da Energia Solar tem diminuído consideravelmente com o passar dos anos através de subsídios dados pelo governo e avanço na tecnologia de geração, como pode ser observado no Gráfico 4.

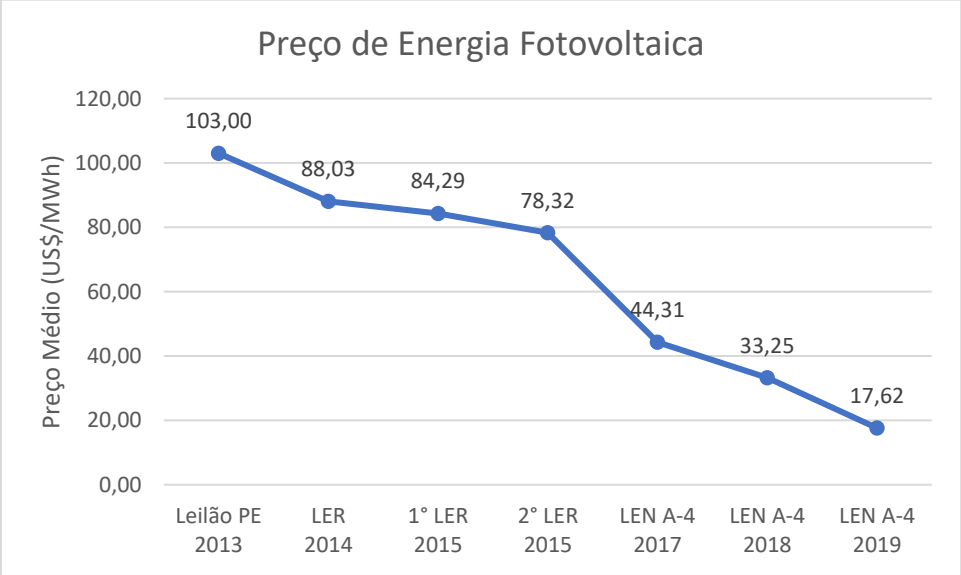


Gráfico 4 – Evolução do preço da fonte solar fotovoltaica em leilões de energia do mercado regulado
Fonte: ABSOLAR, 2019 adaptada

4.4 EMISSÕES DE GEE

Para incluir no cálculo da LCOE o custo associado às externalidades ambientais, resultantes do uso da tecnologia termelétrica a gás natural ou solar fotovoltaica, foi mensurado as emissões de GEE resultantes do ciclo de vida dos produtos, ou seja, desde a extração da matéria prima, transporte, instalação, operação e descomissionamento das instalações. As informações pertinentes para essas emissões foram adquiridas por meio de revisões bibliográficas de estudos de Análise do Ciclo de Vida (ACV) para as placas solares e para a geração de energia por combustão do gás natural. As ACV contabilizam os gases de efeito estufa emitidos diretamente da geração de eletricidade como também as emissões indiretas, associados as características da tecnologia empregada e ao combustível utilizado.

4.4.1 Cálculo do Carbono Equivalente

Para melhor aplicabilidade e inclusão dos principais gases que causam o efeito estufa, Metano (CH_4) e o Óxido Nitroso (N_2O), será definida uma padronização através dos seus respectivos potenciais de aquecimento global (GWP) retirados do IPCC 2014 (AR5) para um horizonte de 100 anos, sendo suas unidades o Dióxido de Carbono Equivalente. A equivalência pode ser realizada pelos cálculos da Equação 7:

$$28 * Emissão\ de\ CH_4 = CO_2eq\ de\ CH_4$$

$$265 * Emissão\ de\ N_2O = CO_2eq\ de\ N_2O$$

Equação 7 - Definição da equivalência entre o gás de efeito estufa com o dióxido de carbono.

4.5 ENERGIA SOLAR

A ACV referente à energia solar envolve desde a extração e transporte dos materiais necessários para produzir os painéis e módulos, a energia gasta na fabricação dos mesmos, até a construção da planta, manutenção e descomissionamento. Como é uma das fontes energéticas que mais cresce, existem muitos estudos relacionados ao seu ciclo de vida. Para a possível comparação e obtenção das características de desempenho concisas das placas solares, foi seguida a bibliografia de Hsu et al. (2012). Nessa publicação foram analisados 397 estudos referentes a ciclos de vida de placas fotovoltaicas e suas emissões de GEE. Observou as características físicas e tecnológicas utilizadas nos painéis e a acurácia das informações desenvolvidas nos estudos para realizar uma harmonização dos resultados, de forma a diminuir a variabilidade gerada por dados inconsistentes e compará-los de acordo com os tipos de painéis, montagem e manutenção necessários.

A primeira etapa da seleção foi efetuada com base na quantidade de dados fornecidos e suas representações. Estudos realizados com dados insuficientes ou realizados antes de 1980 foram filtrados e retirados devido à resultados inconclusivos e obsolescência da tecnologia analisada, respectivamente. Os critérios para a segunda seleção foram:

Qualidade: A análise deveria seguir os procedimentos e princípios da ISO 14040:2006, abordado os potenciais impactos ambientais ao longo da utilização do produto, da sua fabricação e disposição final;

Transparência: Os métodos utilizados para obtenção dos resultados tal como suas fontes, características do produto estudado e dados de entrada utilizada para análise devem estar demonstrados e completos;

Relevância: O estudo deverá prover uma contextualização da tecnologia e da sua utilidade para o presente e futuro.

Após as duas etapas de pré-seleção, foi realizada ainda uma seleção minuciosa sobre a importância dos dados e informações de cada artigo com o propósito do estudo que será desenvolvido. Embora mesmo após a 2° filtração de dados, muitos não apresentavam consistência para as aplicações do estudo de Hsu et al. (2012), muitos não possuíam dados dos gases emitidos durante o ciclo de vida das placas fotovoltaicas embora apontassem os danos ambientais, outros utilizam aplicações que não serviriam para o escopo do trabalho. Outro fator foram as informações duplicadas, sendo um artigo a fonte de outro, utilizando os mesmos dados, porém sem resultados significantes, originais ou aprimorados. No fim das seleções restaram 13 estudos e 41 estimativas que tiveram seus dados harmonizados. Os parâmetros analisados para cada uma das seleções foram:

1. Eficiência do Módulo: O percentual de conversão da energia solar para uma corrente elétrica direta;
2. Performe Ratio: A proporção de corrente alternada produzida, contabilizando as perdas no sistema;
3. Irradiação: Fluxo de energia do Sol, em kWh/m². ano;
4. Tempo de vida do sistema: Quantidade de anos que um painel fotovoltaico opera até que sua habilidade de produz eletricidade seja comprometida significamente.

4.5.1 Dados de Entrada

Para melhor aproximação de resultados referentes à Brasília e a realidade brasileira foram adotados como características para este estudo a Irradiação de Brasília, obtida previamente e transformada para kWh/m².ano de acordo com a Equação 8. O tempo de vida

escolhido foi de 25 anos baseado na garantia dos módulos fotovoltaicos, Mesmo que o tempo de vida das placas podem exceder esse período, conforme descrito por Jordan, Kurtz (2012), grande parte das placas são descartadas logo após a conclusão da garantia, limitando o período de 25 anos para a análise deste estudo.

$$Irradiação\ Anual = Irradiação\ média\ diária\ x\ Quantidade\ de\ dias\ em\ um\ ano$$

Equação 8 - Transformação de irradiação média diária para irradiação anual.

De acordo com Portal Solar (2019), módulos de tecnologia policristalina - Si são as mais acessíveis financeiramente e segundo Frankl (2005), é a mais utilizada no mercado, como aponta o Gráfico 5. Foi admitido a eficiência de acordo com o módulo PHK-36-SÉRIE-4BB disponibilizado pelo catalogo comercial, escolhida devido a sua maior potência em comparação as outras placas no mercado.

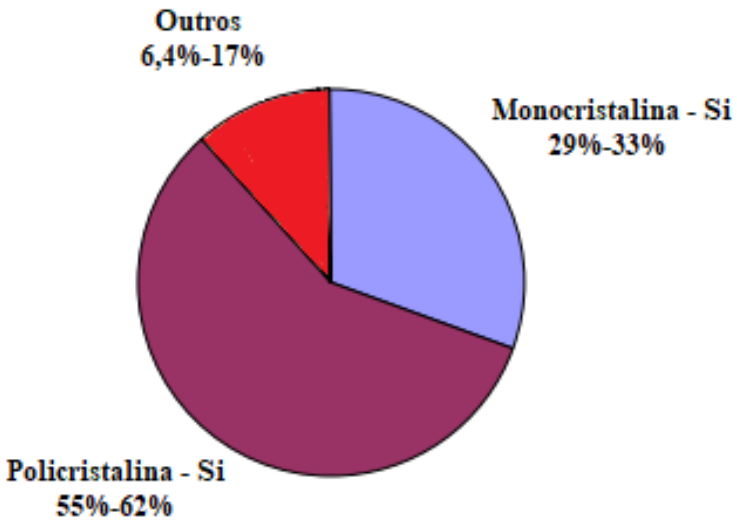


Gráfico 5 - Tipos de módulos presentes no mercado.

Como o escopo do trabalho é o consumo residencial, o potencial de área para a instalação de painéis fotovoltaicos será habitações já construídas. Foram contabilizadas as características de *Perfomance Ratio* de painéis solares instalados em telhados, levemente inclinados com suas faces voltadas para o norte, disponíveis nos valores harmonizados de Hsu et al. (2012).

Tabela 6 - Características da placa fotovoltaica.

Parâmetros do Sistema	Valor
Eficiência do Módulo Policristalino – Si	17,46
Performance Ratio (Telhados)	75%
Tempo de Vida	25 anos

4.5.2 Análise de Emissão de GEE

No estudo de Hsu et al. (2012) foi realizado cálculos de emissões de gases de efeito estufa por unidade de eletricidade gerada g/kWh, onde os dados de entrada são os dados de estudos que passaram por suas seleções, harmonizados e utilizados na Equação 9. A equação GHG foi a mais utilizada dentro dos 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.

$$GHG = \frac{W}{I \; x \; n \; x \; PR \; x \; LT \; x \; A}$$

Equação 9 - Determinação do peso emitido de GEE para cada 1 kWh produzido

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

Como o estudo realizado por HSU et al. (2012) calcula a média do GHG harmonizado, tanto com irradiação anual de 1700 kWh/m².ano quanto com 2400 kWh/m².ano foi atribuído à média de ambos os valores para comparar o resultado de GHG obtido para irradiação anual de Brasília.

O valor de *W* é obtido através de uma manipulação da Equação 9 e a utilização dos parâmetros harmonizados da bibliografia, para posteriormente ser utilizado com as características de uma usina fotovoltaica de Brasília. O valor de GHG para cálculo de *W* obtido no estudo de Hsu et al. (2012) não inclui as emissões de Metano e Óxido Nitroso

durante o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos porém, de acordo Frankl et al (2005), as emissões de ambos gases contabilizam em 6% o valor total de GHG, sendo essa porcentagem acrescentada ao valor de GHG do estudo para descobrir o W, através da Equação 10 formulada abaixo.

$$W = (GHG\ x\ 1{,}06)\ x\ I\ x\ n\ x\ PR\ x\ LT\ x\ A$$

Equação 10 - Cálculo do peso dos gases emitidos durante o Ciclo de Vida

Os parâmetros utilizados para determinar *W* do estudo de Hsu et al. (2012) estão definidos na Tabela 7:

Tabela 7 - Parâmetros utilizados para descobrir o W

Parâmetros harmonizados	**Valores**
Quantidade total de GEE por 1 kWh produzido	55 g CO_2eq/MWh
Irradiação	1700 kWh/m².ano
Eficiência do Módulo multicristalino	12.3%
Performance Ratio (telhados)	0,75
Tempo de Vida do Sistema	25 anos
Área do Módulo	1 m²

Para efeitos de comparação entre resultados, houve a transformação de unidades de *g CO_2eq/kWh* para *ton CO_2eq/MWh* como determinada na Equação 11.

$$1\ g\ CO_2eq\ /kWh = 0{,}001\ ton\ CO_2eq\ /\ MWh$$

Equação 11 - Transformação de g *CO_2eq* /kWh para ton *CO_2eq* / MWh

4.6 GÁS NATURAL

A ACV realizada para o gás natural abrange desde a extração da matéria prima até o seu descarte. Existe uma grande porção de estudos fornecendo resultados de análises específicas para o gás natural, portanto os resultados podem variar entre os parâmetros calculados.

A fim de elaborar um único documento contendo um resultado coerente sobre as ACV, O'Donoughue et. al. (2014) desenvolveu uma metodologia para a harmonização dos

resultados de 254 publicações sobre o uso de eletricidade de gás natural. Primeiramente elaborou uma filtragem de três etapas para excluir resultados inconsistentes para a análise, como em publicações muito antigas (antes de 1980), publicações que não consideravam mais de uma etapa do ciclo de vida e as que não definiam bem o método da ACV.A filtragem dos dados seguiu os passos descritos na metodologia da Energia Solar por Hsu et. Al (2012). Em seguida aplicou uma harmonização sistemática e técnica nos dados. A harmonização verifica a ocorrência de resultados próximos a limites de estimativa de diferença entre si (entre 25% e 75%), ou seja, os valores consistentes. Dados fora dessa estimativa têm seus parâmetros ajustados para uma média dos resultados consistentes. A harmonização sistemática realiza uma comparação de dados equivalentes, enquanto a técnica ajusta as condições operacionais representativas da geração de energia por gás natural.

Como o resultado do estudo de O'Donoughue et. al.(2014) só apresenta o CO_2eq. total de toda a ACV do gás natural, uma das fontes utilizadas para a harmonização foi consultada para identificar o processo de todo cálculo da ACV. Skone (2012) descreve a metodologia utilizada pela *National Energy Technology Laboratory* (NETL) para estimar as emissões de cada GEE na ACV do gás natural. Os processos relacionados à geração de energia pela termelétrica a gás natural foram divididos em três etapas:

1. Aquisição da Matéria Prima (AMP):
    - Extração da matéria prima;
    - Processamento da matéria prima;
2. Transporte da Matéria Prima (TMP):
    - Construção dos gasodutos;
    - Operação dos gasodutos;
    - Gases de escape.
3. Instalação para a Conversão de Energia (ICE):
    - Construção da usina;
    - Operação da usina;
    - Descomissionamento da usina.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) criou no ano de 1972 um compilado de Fatores de Emissões (FE) atmosféricas resultante das mais variadas atividades, denominado AP-42. A combustão do gás natural, por exemplo, enquadra-se neste documento e apresenta FE em unidade de massa por quantidade molecular de gases (lb/scf) atualizados pela última vez em 1998.

Skone (2012) reuniu resultados técnicos característicos de cada uma das três etapas citadas: AMP, TMP e ICE a partir das características técnicas das indústrias termelétricas. Dentre eles, podemos citar: localização do poço de perfuração, gasto energético para o processamento do gás natural, material utilizado no gasoduto, emissões de metano de escape em função da distância do gasoduto, potência da usina e quantidade de gás utilizado para a geração de eletricidade. Por fim, ajustou as unidades de cada processo e aplicou os fatores de emissão da AP-42, resultando nas emissões de GEE para cada etapa.

Através dos resultados de Skone (2012) foi possível verificar a acurácia das emissões de GEE de acordo com a quantidade de $CO_{2eq.}$ resultante da harmonização das 254 publicações de O'Donoughue et. al. (2014).

4.7 CUSTO SOCIAL DO CARBONO

Um dos instrumentos utilizados para internalizar as externalidades e desincentivar as atividades geradoras de GEE é a precificação do carbono. Atua com a adoção de uma tarifa, calculada com uma equivalência do custo que o carbono gera na economia, ou no meio ambiente através da modificação de serviços ecossistêmicos. A precificação de carbono baseia-se no princípio de poluidor-pagador, expresso por um valor tributário a cada quantidade de CO_2 produzida, diminuindo a lucratividade e aumentando o custo do investimento conforme a atividade emite CO_2, tornando tecnologias que produzem baixas emissões mais atrativas e competitivas.

O custo social do carbono é importante na decisão de políticas públicas e tomadas de decisões sobre um investimento devido ao custo externo marginal que cresce a cada aumento de emissão. Nele pode ser incluído o custo de oportunidade ambiental para serviços ecossistêmicos, como também o valor monetário de custo na saúde, na produção agropecuária, entre outras atividades, que as externalidades causam.

Com os valores das emissões geradas tanto das termelétricas a gás natural como da usina fotovoltaica, multiplica-se as emissões obtidas a cada 1 MWh para o total necessário para atender o consumo residencial de Brasília:

$$GHG\ Brasília = GHG_i\ x\ Consumo\ Elétrico\ Residencial\ de\ Brasília$$

Equação 12 - Geração de gases de efeito estufa produzidos para atender o consumo residencial.

Onde,

GHG Brasília = Emissão de Gases de Efeito Estufa para atender o consumo residencial de Brasília

GHG_i = Emissão de CO_2eq e da usina utilizando tecnologia *i*

i = Termoelétrica Ciclo Simples, Termoelétrica Ciclo Combinado, Painéis Fotovoltaicos

Através das emissões geradas pelo consumo residencial de Brasília e a produção, instalação e descomissionamentos das usinas para atender esse consumo, podemos aplicar o custo social do carbono adotados por países como o Canada (CAN), Singapura (SGP) e os do Reino Unido (GBR).

Com a Equação 13 abaixo, atribui-se custos de carbono a cada emissão gerada. Os valores do custo de carbono se encontram nas respectivas moedas de cada país, sendo utilizado fatores de conversão do dia 16/10/2019 para transformação em reais (R$).

$$\text{Custo Emissão Total} = \text{GHG Brasília}_{i} \text{ x (Custo Carbono Canada x 3,15)}$$

$$\text{Custo Emissão Total} = \text{GHG Brasília}_{i} \text{ x (Custo Carbono Singapura x 3,04)}$$

$$\text{Custo Emissão Total} = \text{GHG Brasília}_{i} \text{ x (Custo Carbono Reino Unido x 5,34)}$$

Equação 13 - Custo do Carbono em cada país

Sendo,

GHG Brasília_{i} = Emissão de GEE de Brasília utilizando tecnologia i

i = Termoelétrica Ciclo Simples, Termoelétrica Ciclo Combinado, Painéis Fotovoltaicos

4.7.1 Internalização das Externalidades

Por meio dos valores monetários atribuídos ao custo por emissão de carbono, é possível a geração do custo social, sendo ele a soma do custo privado (custo de manutenção, investimento, operação, entre outros) com o custo do carbono (custo dado às externalidades negativas que o aumento de gases de efeito estufa causam). No escopo desse trabalho, baseado no artigo de Rhodes et. al. (2016), o custo social é chamado de LCOE ambiental. Definido na Equação 14 abaixo:

$$LCOEamb = LCOE + \sum_{i \in \theta} \text{Custo Emissão Total}_{i}$$

Equação 14 - Cálculo do Custo Social

Onde:

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

$LCOEamb$ = Levelized Cost of Electricity Ambiental, representando o Custo Social em R$;

Custo Emissão Total $_i$ = Emissão Gerada de CO_2eq 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).

4.7.2 Análise de Sensibilidade

A metodologia descrita por todo o estudo é responsável por gerar resultados diretos às condições escolhidas para a análise. Por outro lado, os dados nem sempre são constantes e podem estar sujeitos a variações relacionadas à economia, política ou até mesmo técnica. A energia fotovoltaica, por exemplo, vem participando da revisão da Instrução Normativa (IN) 482/2012, a qual estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências (ANEEL 2012).

A ANEEL sugere na revisão da Resolução 482 que a energia injetada na rede de distribuição da concessionária seja apenas parcialmente compensada pela distribuidora, como forma de remunerar os custos de transmissão e distribuição da energia (SOLARVOLT, 2019). A compensação de energia seria realizada em diferentes cenários, sendo o mais discutido atualmente a alternativa 5, responsável por uma perda de 63% do aproveitamento da compensação de energia, e um reaproveitamento de apenas 37% dos créditos da energia injetada.

Já para o gás natural, existem políticas recentes de incentivo para a exploração e desenvolvimento do recurso, como o "Novo Mercado de Gás", firmado pelo comitê no Decreto nº 9.934, de 24 de julho de 2019. Esta política visa melhorar o aproveitamento do gás oriundo do Pré-sal da Bacia de Sergipe/Alagoas e de outras descobertas, ampliar investimentos em infraestrutura de escoamento, processamento, transporte e distribuição de gás natural, aumentar a geração termelétrica a gás e ainda retomar a competitividade da indústria (MME, 2019). Estima-se que essa política seja capaz de reduzir o preço do combustível de US$ 14 por MMBTU para US$ 6 ou US$ 7.

Dentro dessas realidades, foram analisados cenários para a análise de sensibilidade dos resultados:

1. Custo Social de acordo com o valor do custo privado do Leilão de Energia Nova A-6 de 2019;
2. Cenário hipotético em que a energia por gás natural e a fotovoltaica possuem o mesmo custo privado, estabelecido pela média entre os dois valores do Leilão de Energia Nova A-6 de 2019 (Equação 15);

3. Cenário hipotético em que a Alternativa 5 da revisão da IN 482/2012 aumentasse o custo privado da energia fotovoltaica em 37% (Equação 16), enquanto o do gás natural apresentasse um crescimento linear até 2020, dado pela média das diferenças de preços de valores de 2015 a 2019 (Equação 17).
4. Cenário hipotético em que o preço do gás natural reduza para US$ 6 por MMBTU, implicando em uma redução de 37,93% no valor da LCOE do Leilão de Energia Nova A-6 de 2019. Essa redução foi calculada a partir da diferença dos resultados da LCOE indicada na Equação 4 com base nos dados do estudo da EPE (2018), do estudo de Skone (2012), do cálculo de CF pela razão entre a média de consumo do Distrito Federal pela potência instalada da termelétrica a gás natural e do cálculo do CRF demonstrado na Equação 5, onde *i* é 6,5 % e n é 25 anos. O dado de entrada do $\Pi_{combustível}$ foi substituído pelo valor de US$ 10 e posteriormente U$ 6, corrigido para reais na cotação do dólar de 10/11/2019, no valor de R$4,16. É importante destacar que o LCOE foi calculado nesta etapa apenas para estimar a redução do preço do gás natural, porém utilizou parâmetros de diferentes fontes de modo a implicar na discrepância com o valor de venda do Leilão de Energia. O valor da LCOE para a fotovoltaica será o mesmo do Cenário 3.

$$Custo\ Equivalente\ Energias = \frac{Leilão\ 2019\ FT * Leilão\ 2019\ GN}{2}$$

Equação 15 - Cálculo da média equivalente de ambas energias em 2019.

$$Custo\ Privado\ Fotovoltaica = Leilão\ 2019 * 1{,}37$$

Equação 16 - Cálculo do aumento hipotético do custo de energia fotovoltaica em 2020.

$$Custo\ Privado\ Gás\ Natural = \frac{\sum Leilão\ ano\ (n+1) - Leilão\ ano\ (n)}{ano\ final - ano\ incial}$$

Equação 17 - Cálculo da média da diferença de custo ao longo dos anos para o gás natural.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os parâmetros técnicos adotados para a geração de energia elétrica por solar fotovoltaica ou termelétrica a gás natural promoveram resultados de custo para um cenário capaz de suprir o consumo de energia elétrica residencial de Brasília em um período de 25 anos. Além do custo normal de venda da energia elétrica para a fotovoltaica ou para a termelétrica a gás natural, incluiu-se o custo da externalidade ambiental causada pelas emissões de GEE do ciclo de vida das alternativas. Esse custo foi estimado de acordo com precificações do carbono de três países de diferentes continentes.

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes à potência de cada instalação, à viabilidade de instalação em Brasília e o custo de cada uma. A partir desses resultados, serão discutidos outros cenários a partir da análise de sensibilidade de dados variáveis.

5.1 Potência Instalada

O último Anuário Estatístico de Energia Elétrica, publicado pela EPE (2018), apresentou o consumo do setor residencial do Distrito Federal com o ano base 2017, um total de 2.187.000 MWh/ano. Como será analisado um período de 25 anos, projetou-se um crescimento anual nesse consumo em 2,5% ao ano e foi determinada uma média de 3.156.542 MWh. A demanda média, foi obtida dividindo o consumo anual pela quantidade de horas no ano. Vistos na Tabela 8

Tabela 8 - Consumo de energia elétrica

Consumo Residencial de Brasília			
E_{resBSB} (MWh)	3.156.542	3.156.542	3.156.542

Utilizando a média de consumo de energia elétrica do setor residencial com o crescimento de 2,5% ao ano em um período de 25 anos e os parâmetros apresentados na Tabela 4, a Equação 1 e 2 geraram as seguintes potências apresentadas na Tabela 9 para as instalações.

Tabela 9 - Potência instalada para cada tecnologia suprir o consumo de energia elétrica residencial do DF.

Tipo de Instalação	Potência Instalada (MW)
Ciclo Simples	1201
Ciclo Combinado	515
Fotovoltaica	2112

A termelétrica a gás natural de ciclo combinado apresenta vantagem quanto à menor necessidade de potência instalada, porém em casos onde há uma grande variação do consumo de energia elétrica, a de ciclo simples pode ser mais adequada devido a sua facilidade em oscilar a geração de energia. Como um sistema fotovoltaico opera apenas no período de luz solar no dia, necessita de uma potência quase cinco vezes maior que a do ciclo combinado para atender o mesmo consumo residencial de Brasília. O Gráfico 6 compara as potências instaladas em escala para atender o consumo elétrico residencial de Brasília.

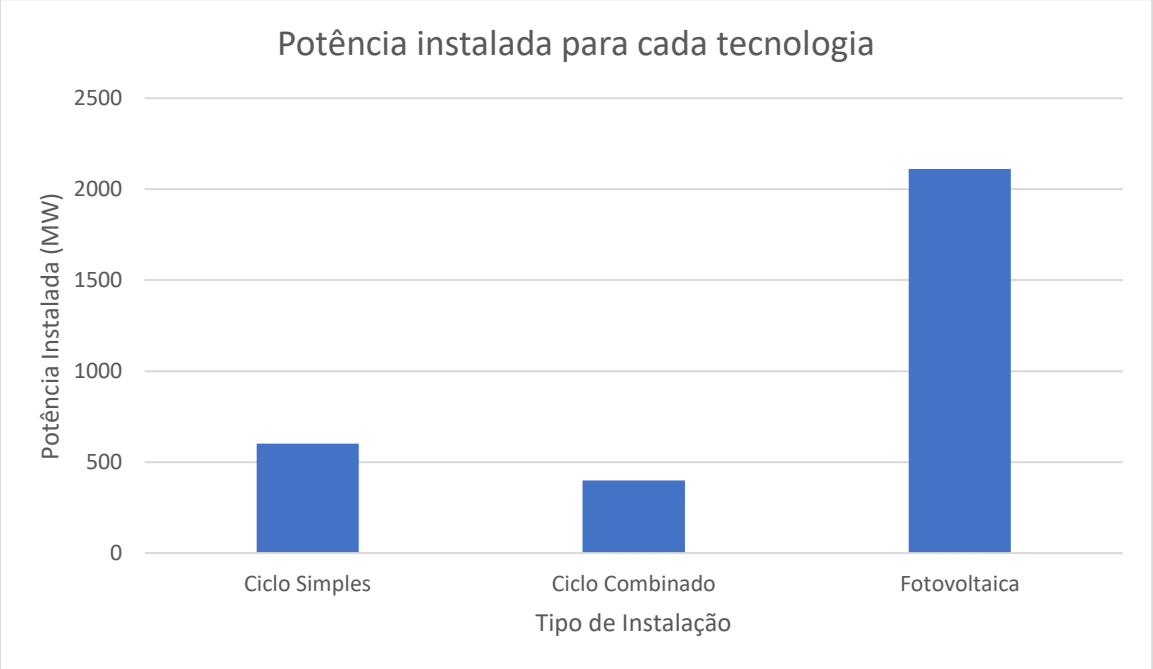


Gráfico 6 - Comparação da potência instalada para cada tipo de tecnologia de geração de energia elétrica

5.2 Disponibilidade de Área

Como a construção da usina termelétrica a gás natural seria realizada apenas em uma área livre do Distrito Federal seguindo o uso e ocupação do solo e o PDOT do DF, a análise

da disponibilidade de área focou em atender a demanda de 2.112 MW da geração de energia por sistemas fotovoltaicos em telhados de casas e edifícios residenciais.

Considerando as características das placas fotovoltaicas apresentadas na Tabela 4, foi possível obter o número de placas necessárias para atender a demanda de geração de energia por meio da razão entre a demanda e a potência de cada placa. Com a potência de 345W para as placas, seriam necessárias 6.121.329 unidades de módulos fotovoltaicos. Para uma área de 1,98 m² por placa, o total de área necessária para o sistema seria de 12.096.137,56 m².

A Tabela 10 e Tabela 11 apresentam os resultados da quantidade de casas e prédios e suas respectivas áreas de telhado para cada bairro do Distrito Federal considerado.

Tabela 10 - Quantidade de casas e área de telhado em bairros do DF.

	Telhados de Casas	
Bairros	Quantidade de casas	Área das Casas (m²)
Cruzeiro	2.331	410,33
Lago Norte	8.100	410,33
Lago Sul	8.720	410,33
Park Way	5.220	410,33
Brasília	7.977	410,33
Jardim Botânico	7.380	410,33
Guará	18.450	350,00
Taguatinga	44.394	200,00
Sobradinho I	13.625	200,00

Tabela 11 - Quantidade de prédios e área de telhado em bairros do DF.

Telhados de Prédios		
Bairros	Quantidade de Prédios	Área dos Edifícios (m²)
Brasília	5.963	1.051
Sudoeste/Octogonal	230	1.051
Noroeste	46	1.051
Cruzeiro	722	1.051
Águas Claras	722	300

O melhor local para a instalação das placas fotovoltaicas em telhados depende da localidade e configuração espacial, de modo a criar o melhor aproveitamento da luz solar diária. Dessa forma, nem todo telhado pode ser aproveitado. A área útil de telhados é obtida multiplicando a área total por um fator conservador de aproveitamento de 30% (EPE, 2014). A área útil total de telhados em prédios e casas obtida foi de 12.568.650,40 m². Vale ressaltar que essa é uma estimativa do valor real, visto que a quantidade de prédios de alguns bairros foi quantificada visualmente pelos blocos existentes no CEP de cada quadra.

Pode-se observar que utilizando o total das residências dos bairros apresentados na Tabela 10 e Tabela 11, a área útil total de telhados disponíveis é superior à área necessária para a instalação de todo o sistema fotovoltaico. Dessa forma, parte-se do pressuposto que um dos bairros não teria 100% de adesão à instalação dos sistemas fotovoltaicos, portanto foi possível considerar apenas metade das residências de Sobradinho I para a instalação dos painéis no telhado de modo a se aproximar mais à área necessária para a demanda energética do sistema com um total de 12.159.900,37 m².

No Gráfico 7 é representado a aproximação das áreas utilizando o total de residências disponíveis em Sobradinho I, ou apenas metade, com o objetivo de se aproximar mais com a área necessária para o sistema fotovoltaico do Estudo de Caso.

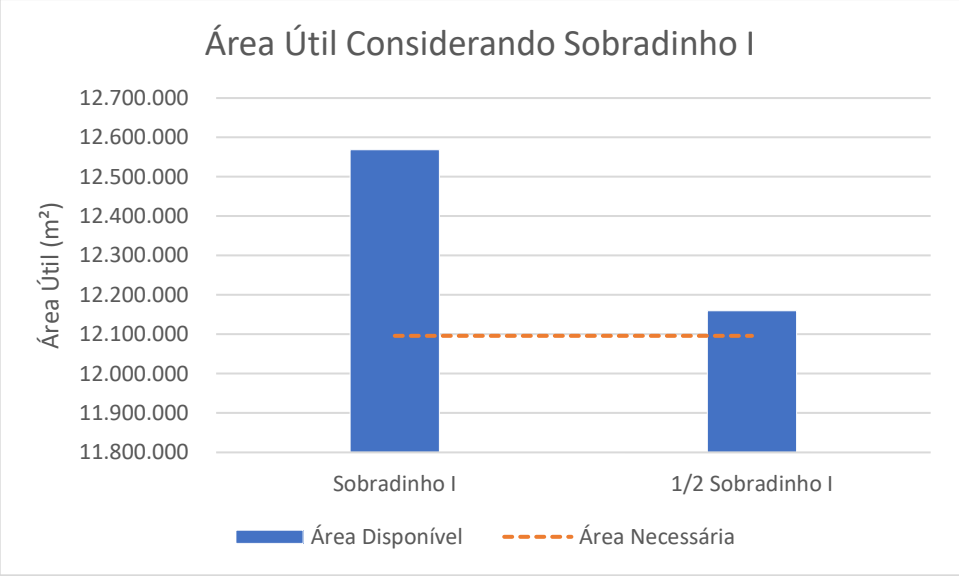


Gráfico 7 - Comparação do uso total da área de telhados de Sobradinho I ou apenas metade

Com esses resultados foi possível concluir que o Distrito Federal possui área suficiente para atender o consumo de energia residencial de Brasília. Mesmo estabelecendo um crescimento otimista de consumo de energia de 2,5% ao ano e considerando apenas alguns bairros foi possível extrapolar a estimativa feita para o consumo em um horizonte de

25 anos. Caso o consumo de energia seja maior do que o calculado, ainda existirá áreas de telhados disponíveis para aumentar a potência do sistema para geração de energia elétrica.

5.3 Cálculo da LCOE

Conforme mencionado na metodologia, os resultados deste trabalho serão baseados no custo da energia do Leilão de Energia Nova A-6 de outubro de 2019. Entretanto, esse valor é constantemente modificado a partir de novos incentivos ou desincentivos para a geração de energia elétrica.

A fotovoltaica, por exemplo, tem apresentado um decrescimento do custo ao longo dos anos. O aumento da eficiência das placas e de incentivos governamentais são alguns dos fatores responsáveis pelo barateamento do tipo de energia. Atualmente, o custo do megawatt hora dessa fonte é inferior ao do gás natural.

Por outro lado, é necessário considerar outros cenários de custo, pois desde 2018 vêm acontecendo a revisão da Resolução Normativa (REN) n°482/2012, cuja estabelecia a possibilidade de abater 1 kWh consumido por 1 kW gerado. Essa equivalência deixava de considerar os custos das linhas de transmissão, encarecendo para os demais usuários da rede, que não instalaram geração própria. Dessa forma, a ANEEL dispôs de alternativas para serem votadas em audiências públicas a fim ajustar essa defasagem de custo a partir do ano de 2020. O resultado do ajuste resultará no aumento do custo da geração de energia por fotovoltaica e, consequentemente, o custo de venda no leilão. Atualmente a alternativa colocada para a votação reduz cerca de 63% do aproveitamento da compensação da energia.

O Gás Natural, por sua vez, apresentou um incentivo com a criação do Comitê de Monitoramento da Abertura do Mercado de Gás Natural, instituído pelo Decreto n°9934/2019, com a finalidade de monitorar a implementação das ações necessárias à abertura do mercado de gás natural de modo a tornar o mercado para o gás mais competitivo. Há uma previsão de que o custo do gás por milhões de Btu possa reduzir quase pela metade.

O Gráfico 8 demonstra a variação do custo da energia termelétrica para gás natural e para solar fotovoltaica ao longo dos anos. Os dados foram retirados dos resultados consolidados do Leilão de Energia Nova da CCEE do ano de 2019, porém este tipo de leilão apresentava preços de vendas para a energia fotovoltaica a partir de 2017, iniciando-se a partir desse ano a análise comparativa para ambas as fontes energéticas do estudo. Foi realizada uma média dos preços de venda dos leilões de energia nova para cada ano. É possível observar que desde o ano de 2017, a energia fotovoltaica apresentou resultados de vendas inferiores ao do gás

natural. A facilidade de compra dos módulos fotovoltaicos e o incentivo na compensação de energia são grandes fatores que contribuíram para essa discrepância.

Com o ajuste da REN n°482/2012 essa diferença do preço de ambas energias tornar-se-á mais próximos, visto que a alteração para a fotovoltaica está prevista para o ano 2020. O Gráfico 9 apresenta um cenário considerando um aumento de 37% no preço da venda de energia de 2019 da fotovoltaicas. Já para o gás natural, foi considerado que o preço continuou dentro da média dos três anos. Essa análise faz referência ao Cenário 3, que será discutido mais adiante. Como o Gás Natural ainda não possui uma data prevista para políticas públicas decorrentes do Decreto n° 9934/2019, o Cenário 4 ainda não entrará na análise para 2020, mas será discutido mais à frente.

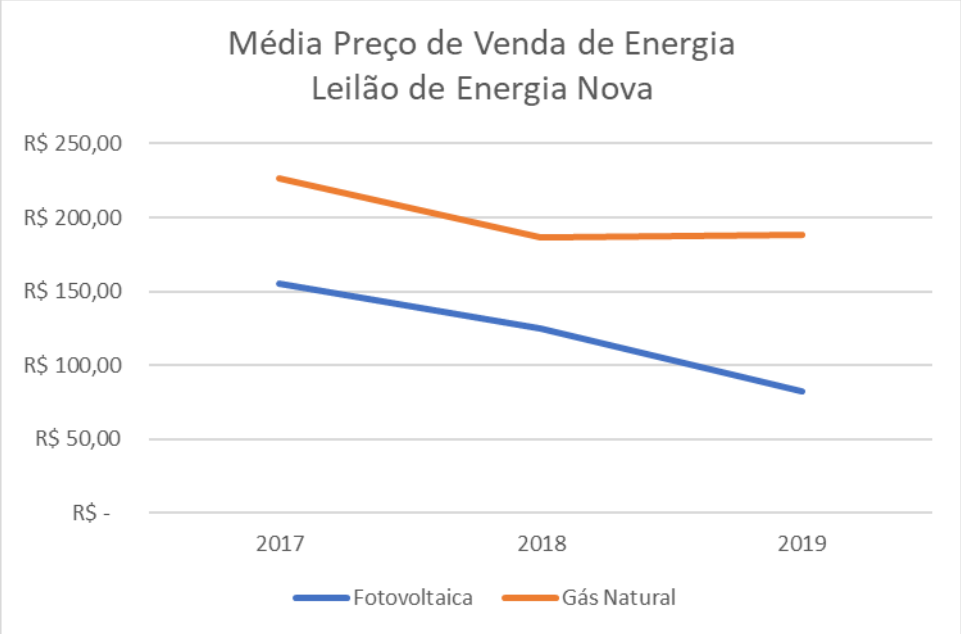


Gráfico 8 - Variação do preço de venda de energia pela CCEE ao longo dos anos.
Fonte: CCEE (2017, 2018, 2019*)*

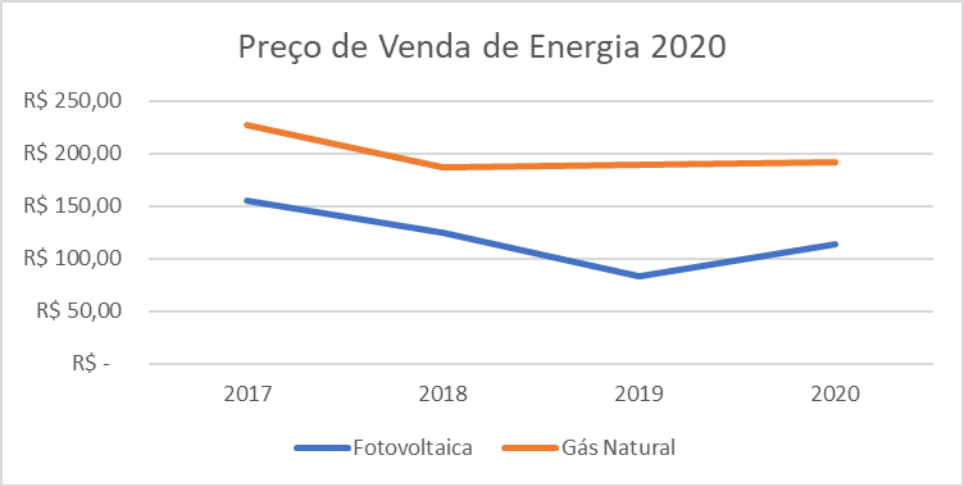


Gráfico 9 - Cenário do aumento do preço da energia fotovoltaica devido à atualização da REN 482/2012 EM 2020.
Fonte: CCEE (2017, 2018, 2019)

O aumento do preço para a geração de energia em rede do sistema fotovoltaico reduzirá o incentivo de adoção dos sistemas pelos geradores residenciais, isso porque o tempo de recuperação do capital irá se alongar. A principal motivação para a instalação dos sistemas residenciais parte do princípio da redução de gastos em contas de energia da residência, porém no cenário de aprovação da alternativa na atualização da REN n° 482/2012, esse abate do valor da conta com a geração de energia estará limitado por critérios relacionados à distribuição de eletricidade.

A discrepância no preço entre geração fotovoltaica em comparação com as termelétricas a gás natural poderá reduzir a perspectiva de incentivo de geração de energia limpa por parte do governo. A alternativa poderá ser compensada na geração por termelétrica a gás natural, pois seria a solução considerada menos poluente dentre as opções de recursos não renováveis, além do descobrimento de novas reservas de gás natural no território (Bacia de Santos por exemplo) e adesão de programas governamentais como o Novo Mercado de Gás. Por outro lado, por mais que essa fonte de energia não emita tantos poluentes como o óleo diesel, por exemplo, ainda está contribuindo para o aumento de GEE na atmosfera devido a queima de combustíveis fósseis.

5.4 Emissões de GEE

O cálculo da LCOE para o custo privado de uma determinada fonte energética para a geração de energia não leva em consideração algumas externalidades ambientais, refletidas indiretamente na saúde da sociedade. No ano de 2019 o custo da energia termelétrica a gás

natural e do solar fotovoltaico ficaram praticamente igualados, sendo que a fotovoltaica apresentou um custo levemente menor.

O estudo de Skone (2012) forneceu os resultados de emissões para os três tipos de gases em cada etapa do ciclo de vida do Gás Natural. Os resultados são apresentados na Tabela 12. Como esses dados foram baseados em fatores de emissões atualizados pela última vez em 1998 pela US EPA AP-42, a comparação dos resultados harmonizados de O'Donoughue et. al. (2014) foi essencial para verificar a acurácia dos resultados. Na Tabela 13 são organizados os maiores, menores e a média de valores em massa por energia de todos os estudos analisados.

Tabela 12 - Resultado de emissão de GEE nas termelétricas a Gás Natural.
Fonte: Skone (2014) adaptado

Emissão de Gases de Efeito Estufa (ton/MWh)						
Tipo Tecnologia	GEE	AMP[1]	TMP[2]	ICE[3]	Emissões	GWP 100 anos
Turbina a Gás Ciclo Simples	CO_2	3,21E-02	6,08E-03	6,04E-01	6,42E-01	1
	N_2O	1,04E-04	7,59E-09	1,30E-08	1,04E-04	265
	CH_4	2,94E-03	1,18E-03	1,20E-06	4,12E-03	28
	Total CO_2eq 100 anos	1,42E-01	3,91E-02	6,04E-01	**7,85E-01**	
Ciclo Combinado	CO_2	2,08E-02	3,95E-03	3,93E-01	4,18E-01	1
	N_2O	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	28
	Total CO_2eq 100 anos	7,45E-02	2,55E-02	3,93E-01	**4,93E-01**	

Fonte: Skone (2014) adaptado.
[1] Aquisição da Matéria Prima
[2] Transporte da Matéria Prima
[3] Instalação para a Conversão de Energia

Tabela 13 - Harmonização dos resultados de emissões de Gases de Efeito Estufa.

Harmonização Gases de Efeito Estufa (ton/MWh)		
Turbina a Gás Ciclo Simples	**Média**	0,60
	Mínimo	0,49
	Máximo:	0,99
Ciclo Combinado	**Média**	0,45
	Mínimo:	0,31
	Máximo:	0,68

Fonte: O'Donoughue et. al. (2014) adaptado.

Conforme observado em ambas tabelas, o resultado de carbono equivalente total calculado por Skone (2012) encontra-se dentro do limite de mínimo e máximo para a turbina

a gás de ciclo simples e aproximadamente 0,2 ton/MWh discrepante da média harmonizada por O'Donoughue et. al. (2014). Já o ciclo combinado apresentou as emissões dentro da média de análise dos estudos, apresentados no Gráfico 10.

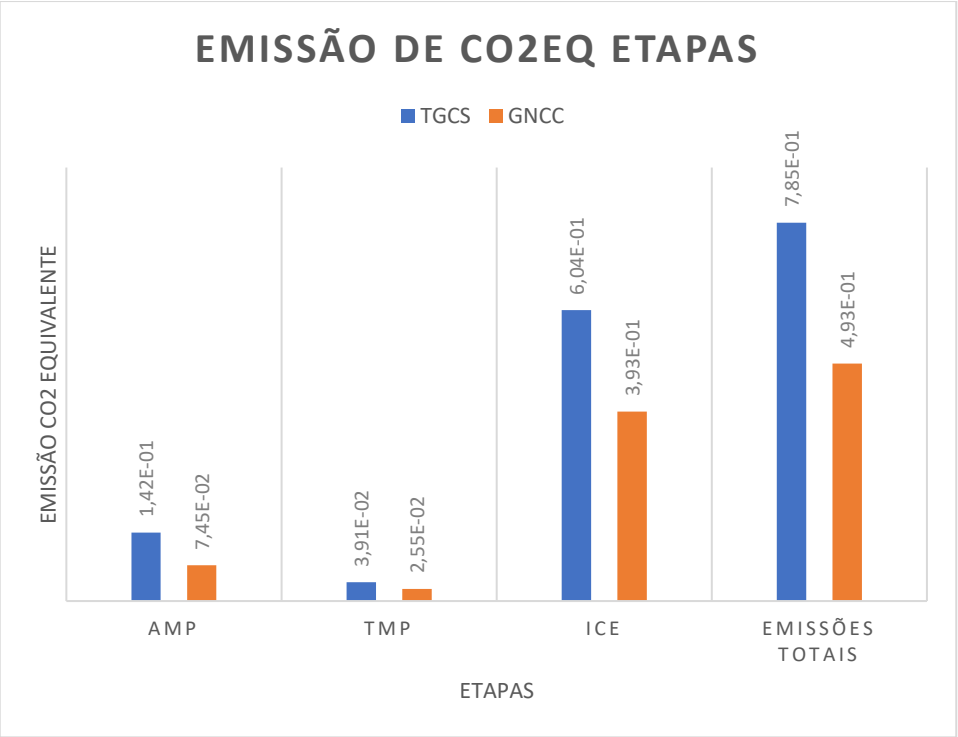


Gráfico 10 - Comparação de emissões de GEE em CO_2eq em termelétrica a gás natural de ciclo simples e de ciclo combinado

O Gráfico 10 apresenta a diferença das emissões de GEE em cada etapa da geração de energia para termelétrica Turbina a Gás de Ciclo Simples (TGCS) e de Gás Natural de Ciclo Combinado (GNCC). Observa-se uma menor emissão para a de ciclo combinado, visto que parte das emissões são recicladas para o aquecimento de uma turbina a vapor. Entre todas as etapas, o ICE apresentou maiores emissões devido à combustão contínua do Gás Natural ao longo de 25 anos.

A análise quantitativa da geração de GEE no Ciclo de Vida da Fotovoltaica foi retirada do artigo de Prennushi,G. (2007), referente a painéis fotovoltaicos policristalinos inclinados, instalados em telhados de habitações já construídas, ou seja, as mesmas características dos painéis utilizados neste trabalho. Os níveis de radiação, a eficiência do módulo, *o Performance Ratio*, todavia, são significativamente diferentes. Por esse motivo, as características dos painéis de Prennushi (2007) será usada apenas como análise das emissões de GEE em cada etapa do ciclo de vida das fotovoltaicas.

Tabela 14- Emissão de GEE no ciclo de vida da fotovoltaica.

Emissão de Gases de Efeito Estufa (ton/MWh)						
Tipo Tecnologia	GEE	Construção	Operação	Descomissionamento	Emissões Totais	GWP 100 anos
Fotovoltaica	CO_2	4,670E-02	0,00	7,51E-04	4,75E-02	1
	N_2O	1,12E-04	0,00	1,23E-06	1,13E-04	265
	CH_4	8,16E-05	0,00	3,01E-07	8,19E-05	28
	Total CO_2eq 100 anos	**7,87E-02**	0,00	**1,09E-03**	7,98E-02	

Fonte:: Prennushi,G. (2007) adaptado

É possível identificar no Gráfico 11 a etapa onde possui maior contribuição para o efeito estufa é o da construção da usina pois inclui a fabricação e o transporte dos painéis, além de sua instalação. Essas emissões chegam a ser muito próximas das emissões medidas para a construção de uma termelétrica de ciclo combinado. As emissões geradas nessa etapa são relativas ao diâmetro das placas, o material utilizado, a tecnologia empregada e a pureza do silício. Inovações na área de produção utilizando menos energia reduziriam essas externalidades. Como os painéis necessitam de baixa manutenção e não operam por meio da combustão, o resultado foi de que não há geração de gases de efeito estufa durante a etapa de operação.Existem, entretanto, emissões durante o descomissionamento causada pela quantidade de materiais retirados em sua desmontagem, no transporte e processamento.

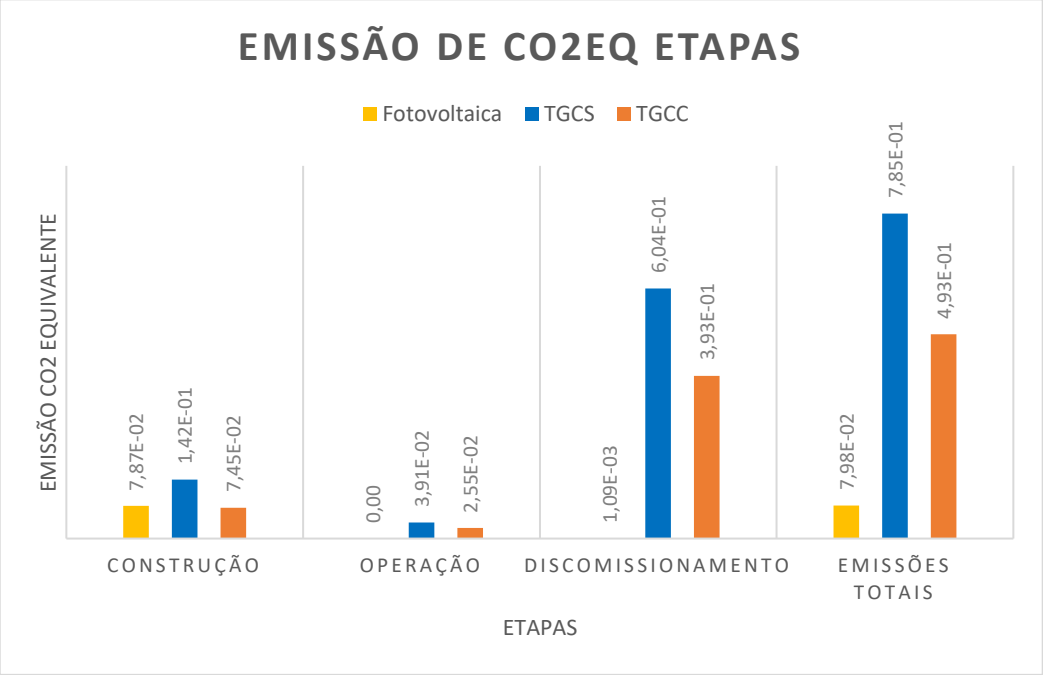


Gráfico 11 – Comparação de emissões de GEE em *CO_2eq* em usina fotovoltaica e termelétrica a gás natural

Para geração de resultados mais atuais e qualitativos, foi obtido o valor da emissão de CO_2eq total do ciclo de vida de fotovoltaica utilizando a Equação 10 e os dados retirados de Hsu et al (2012) devido atualidade do estudo e a obtenção de dados harmonizados para 25 anos, demonstrados na Tabela 15 abaixo:

Tabela 15- Dados referentes ao cálculo de w

Dados	
Irradiação (Kwh/m²/ano)	1700
Eficiência do Módulo (%)	12,3
Performance Ratio (%)	75
Tempo de Vida (anos)	25
Area (m²)	1
GHG (g/kWh)	55
W (g)	**228572,4**

Com a estimativa da emissão de CO_2eq total do ciclo de vida das placas fotovoltaicas (W) é utilizada a Equação 9 com a entrada dos dados de irradiação de Brasília e a eficiência do módulo referente a placa PHK-36-SÉRIE-4BB, para o cálculo da emissão total de g/kWh em CO_2eq. O resultado em seguida foi comparado com os valores harmonizados médios para uma irradiação de 1700 Kwh/m²/ano e 2400 Kwh/m²/ano apresentados por Hsu et. al (2012) a qual tiveram um acréscimo de 6%, contabilizando assim o CH_4 e o N_2O. Todos os valoresm em g/kWh foram convertidos para ton/MWh através da Equação 11. Os dados de entrada, tão como o resultado, estão disponíveis na Tabela 16 abaixo:

Tabela 16- Cálculo GHG de Brasília

Dados	
Irradiação (KWh/m²/ano)	1993
Eficiência do Módulo (%)	17,4
Performance Ratio (%)	75
Tempo de Vida (anos)	25
Area (m²)	1
w (g)	228572,4
GHG (g/kWh)	**35,15**

O cálculo do valor de GEE emitido por MWh utilizando uma placa recebendo 1700 Kwh/m²/ano de irradiação, com eficiência no módulo entre 12,3% e 13%, gera uma média de emissão harmonizada de 0,048 ton/MWh. Entretanto, quando se compara o resultado

entre um sistema recebendo 2400 ton/MWh com um sistema instalado em Brasília com as características da Tabela 16, com irradiação de 1993 Kwh/m²/ano e utilizando as características tecnológicas atuais (módulo até 5,1% mais eficiente) a mesma gera quase a mesma emissão por MWh, com uma irradiação incidente 16,9% menor. A comparação é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 - Harmonização dos resultados de emissões de Gases de Efeito Estufa.

Harmonização Gases de Efeito Estufa (ton/MWh)		
Fotovoltaica	Resultado	0,035
	Min 2400	0,034
	Max 1700	0,048

Fonte: Hsu et al (2012) adaptado

5.5 Custo da externalidade

A precificação da externalidade foi realizada monetizando as emissões de CO_2eq de acordo com o custo de carbono cobrado pelos países Canadá, Singapura e os do Reino Unido. Utilizando a Equação 12 e transformando a moeda de cada país para real foi gerada a seguinte Tabela 18 para 25 anos.

Tabela 18- Custo do Carbono

TARIFA	$/tonCO₂					
Carbon Price Floor (GBR)						
2019 - 2030	£	30,00	R$	160,20		
2030 - 2045	£	70,00	R$	373,80		
Carbon Pricing Act (Sgp)						
2019-2023	$	5,00	R$	5,00	R$	15,20
2023-2045	$	10,00	R$	15,00	R$ 30,4 ou R$ 45,6	
Output Based Pricing System (Canada)						
2019	$	20,00	R$	63,00		
2020	$	30,00	R$	94,50		
2021	$	40,00	R$	126,00		
2022 - 2045	$	50,00	R$	157,50		

O produto entre o preço do carbono em diferentes países e as emissões de carbono decorrente das etapas de funcionamento de uma usina, seja fotovoltaica ou termelétrica a gás natural, resulta na parcela do LCOE Ambiental adicionada ao LCOE retirado dos leilões de energia. Dessa forma, é possível comparar qual o acréscimo no preço da energia quando se leva em consideração as externalidades provocadas pela emissão de gases de efeito estufa na sociedade. Como observado no Gráfico 12, o custo do carbono varia ao longo dos anos.

As emissões de carbono, por sua vez, foram consideradas ao longo de 25 anos. Será considerado, portanto, um único preço do carbono para cada precificação por meio de uma média de seus valores ao longo dos anos.

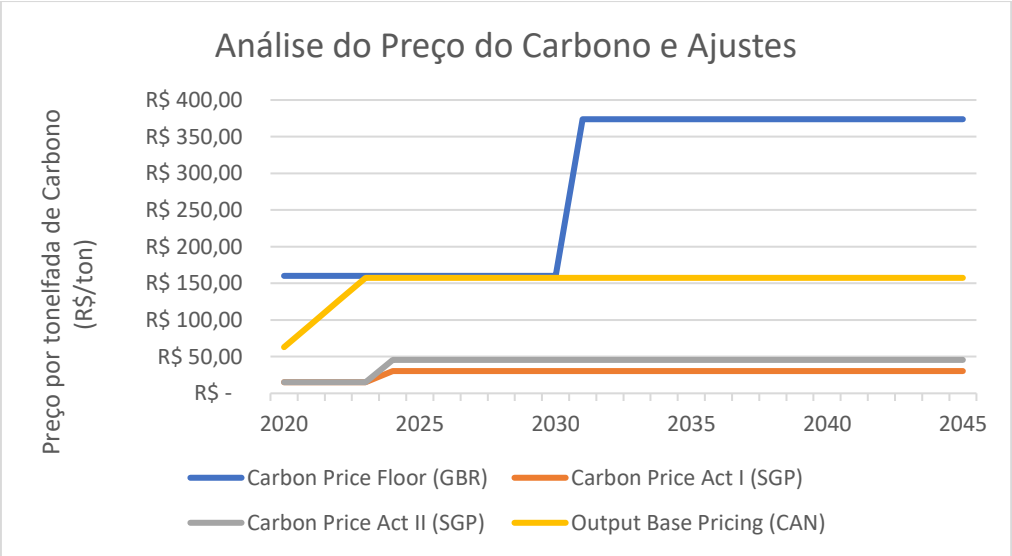


Gráfico 12 - Evolução dos preços do carbono por tipo de precificação ao longo dos anos

O Gráfico 13 apresenta os resultados do cálculo do custo ambiental. Cada precificação foi estabelecida de acordo com a moeda local de cada país, ou seja, os países do Reino Unido utilizam a libra esterlina, Singapura utiliza o dólar singapuriano e o Canadá utiliza o dólar canadense. Como a libra esterlina apresento o maior valor para o real, cerca de R$ 5,00 comparado com R$3,00 dos outros países, o resultado do custo médio das emissões foi maior para o Reino Unido (*Carbon Price Floor*). É possível observar a diferença dos custos de emissões para cada tecnologia. A fotovoltaica apresenta custos ambientais muito inferiores à termelétrica a gás natural de ciclo simples, por exemplo.

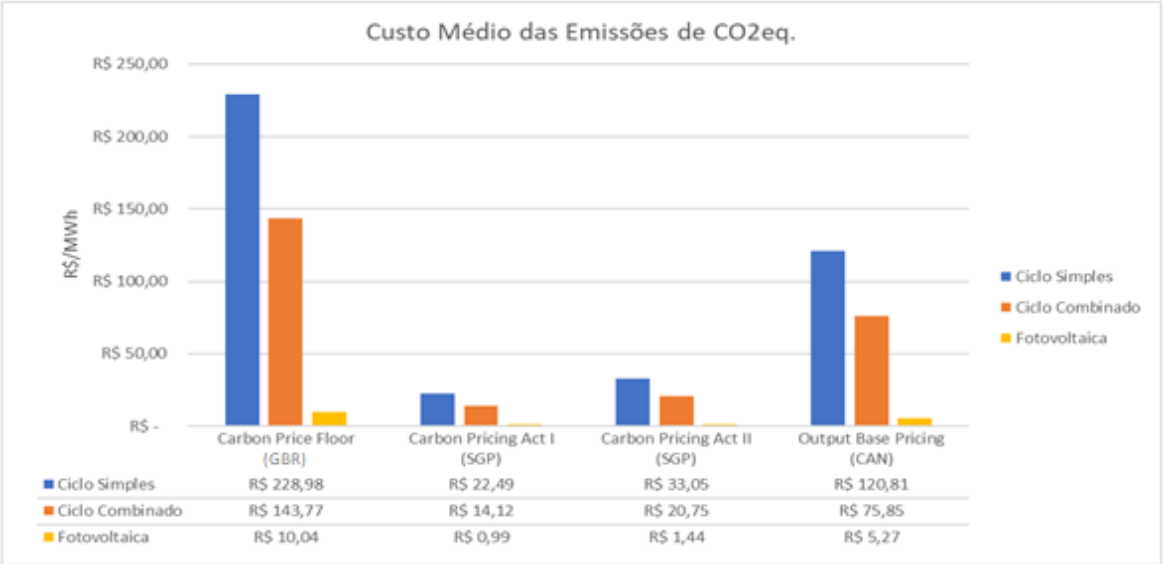


Gráfico 13 – Custo das emissões de GEE em R$/MWh

A precificação do carbono atua como uma ferramenta para custear a degradação do meio ambiente e seus reflexos na sociedade. Os resultados apresentados no Gráfico 13 são apresentados na unidade de R$/MWh, porém ainda não é claro em pensar como este custo se aplica na sociedade. Para uma melhor análise deste ponto, será considerado quantos reais será gasto no total para atender ao consumo médio de energia elétrica do Distrito Federal. Esse resultado representa o custo adicional que um poluidor deveria arcar devido as externalidades negativas das emissões de GEE refletidas para cada cidadão do Distrito Federal. Considerando a quantidade de habitantes do Distrito Federal em 2019 ajustada pela média do crescimento populacional em 0,99% ao longo de 25 anos, é possível fazer uma análise mais focada sobre o quanto este valor pode ser significante para cada cidadão (Tabela 19).

Tabela 19 - Análise do custo das externalidades ambientais aplicado para a população do Distrito Federal.

População DF ajustada	**3.441.089 habitantes**			
	Custo pelo Consumo Anual (R$)			
	Carbon Price Floor (GBR)	**Carbon Pricing Act I (SGP)**	**Carbon Pricing Act II (SGP)**	**Output Base Pricing (CAN)**
Ciclo Simples	722.793.788,03	70.994.462,91	104.318.394,47	381.328.341,64
Ciclo Combinado	453.817.797,52	44.575.024,48	65.497.995,15	239.423.181,27
Fotovoltaica	31.691.681,97	3.124.976,61	4.545.420,52	16.634.976,49
Custo Anual por Cidadão (R$)				

	Carbon Price Floor (GBR)	Carbon Pricing Act I (SGP)	Carbon Pricing Act II (SGP)	Output Base Pricing (CAN)
Ciclo Simples	210,05	20,63	30,32	110,82
Ciclo Combinado	131,88	12,95	19,03	69,58
Fotovoltaica	9,21	0,91	1,32	4,83

No custo por cidadão da Tabela 19 é apresentado a quantia por ano que seria convertida para cada cidadão, caso uma das precificações de carbono fossem adotadas. Observa-se que os maiores valores são proporcionais às tecnologias com maiores emissões.

Caso as externalidades indiretas das mudanças climáticas afetasse a saúde humana como, por exemplo, com a desnutrição ou doenças de veiculação hídrica devido a mudança do regime das chuvas, parte do custo das externalidades poderia ser investido para a mitigações de tais problemas. Supondo que esse custo anual seria retornado à cada cidadão para ter acesso à um médico, apenas o *Carbon Price Floor* ou o *Output Base Price* seriam capazes de pagar uma consulta por ano[9]. Ou seja, o investimento para o cidadão só seria necessário, pois a adoção da própria tecnologia foi um estímulo para a redução da qualidade de vida.

Por outro lado, a adoção de uma tecnologia renovável como a fotovoltaica implicaria em um impacto menor ao meio ambiente e sociedade. O baixo custo das emissões resultantes principalmente da produção e transporte dos painéis poderiam ser aplicados em incentivos para a própria geração de energia renovável.

5.6 LCOE Ambiental

Ao propor um investimento em políticas públicas voltadas ao desenvolvimento sustentável para a redução das externalidades ambientais decorrentes das emissões de GEE, existiria uma contradição da necessidade de propor essas políticas *versus* o sistema de geração de energia utilizado. No Gráfico 14 é apresentado o custo total da LCOE Ambiental de cada tecnologia, representada pela soma do preço de venda do 30° Leilão de Energia Nova com o custo das externalidades.

D

[9] Preço de uma consulta médica com clínico geral foi de R$110,00, consultado pelo Dr. Consulta. https://www.drconsulta.com/servicos/consultas

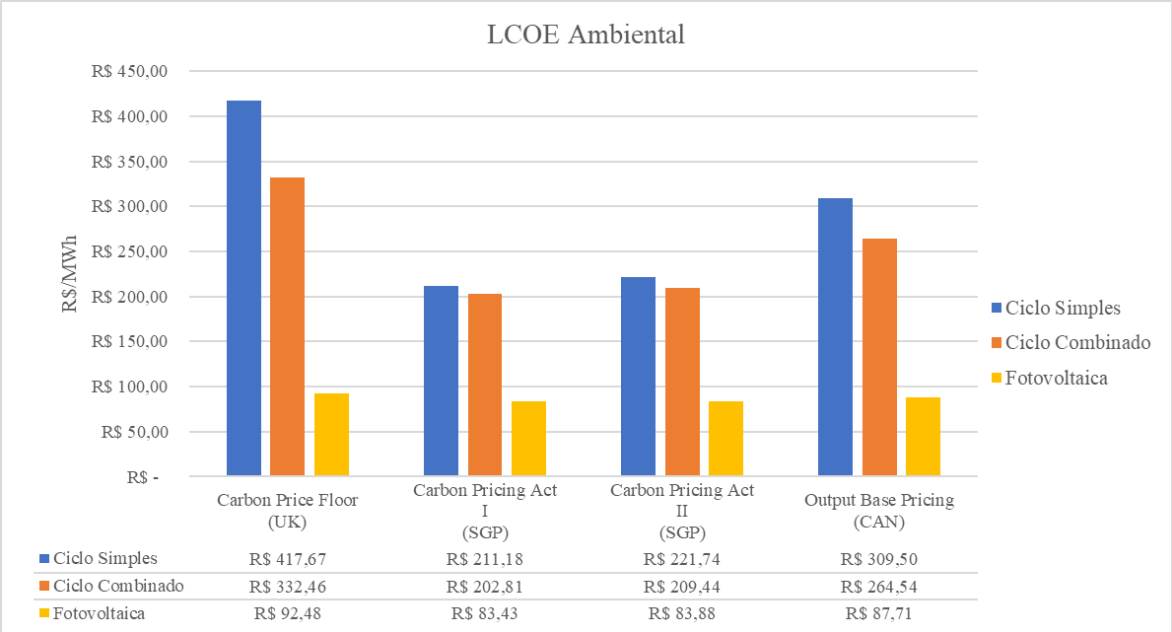


Gráfico 14 - Custo total da LCOE Ambiental para cada tecnologia

A energia termelétrica a gás natural de ciclo simples apresenta um maior valor devido às suas emissões de GEE ao meio ambiente. Observa-se que o custo da fotovoltaica permanece praticamente constante para cada taxa pigouviana, reflexo do baixo custo das emissões de GEE, ou seja, o custo total da LCOE Ambiental é representado pelos investimentos técnicos calculados pelo leilão de energia.

É importante observar ainda que a necessidade do aumento da matriz energética é inevitável, porém atualmente existem discussões e políticas para que esse investimento ocorra de forma a preservar da melhor forma o meio ambiente. O Acordo de Paris entra nessa perspectiva, a fim de reduzir a quantidade de emissões de GEE na atmosfera. Os caminhos das políticas públicas brasileiras estão indo de encontro ao objetivo desse acordo ou das ODS, visto que o governo atualmente propõe medidas que resultam na redução de incentivos à geração por fotovoltaicas e investimentos no Mercado Novo de Gás Natural.

O objetivo desse estudo foi apresentar que não é apenas o custo privado envolvido na escolha de uma tecnologia não renovável. Existem fatores que devem ser internalizados nesse custo. Apesar dos modelos de precificação do carbono ainda não serem normatizados quanto a consideração de cada impacto ambiental, já é um início para o desincentivo do uso das tecnologias de geração de energia por combustíveis fósseis, como a termelétrica a Gás Natural.

A seguir são apresentados os resultados referentes a porcentagem do custo capital e do custo da externalidade para o total da LCOE Ambiental apresentada no Gráfico 15 ao Gráfico 26 para cada cenário. A análise utilizou apenas uma das precificações: *Output Base*

Price, do Canadá. A seleção foi realizada, pois os valores do *Carbon Price Floor* apresentarem-se maiores devido ao valor da libra esterlina no Brasil. Ao fazer uma média das três precificações, a do Canadá é a que mais se aproxima. Além disso, como observado na Tabela 19, o custo do *Output Base Price*, ainda que bai*xo*, é aplicável para incentivos na saúde ou em outras políticas públicas, diferentemente do *Carbon Price Act I e II* de Singapura.

1

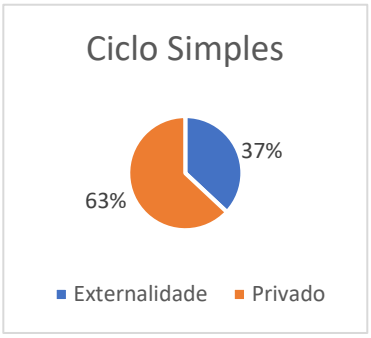


Gráfico 15 - Contribuição na LCOE Ciclo Simples Cenário 1

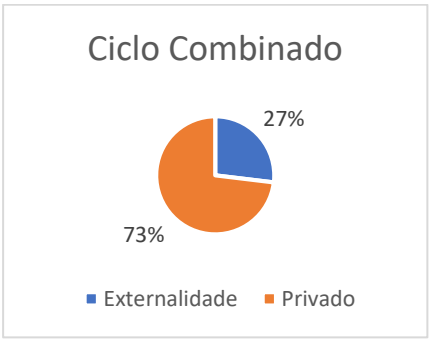


Gráfico 16 - Contribuição na LCOE Ciclo Combinado Cenário 1

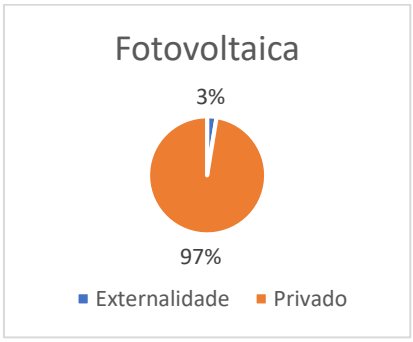


Gráfico 17 - Contribuição na LCOE Fotovoltaica Cenário 1

2

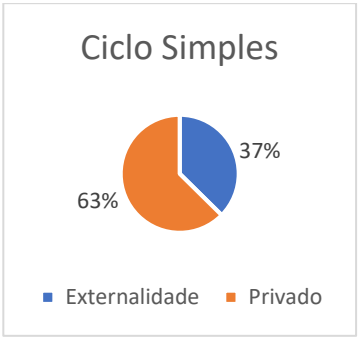


Gráfico 18 - Contribuição na LCOE Ciclo Simples Cenário 2

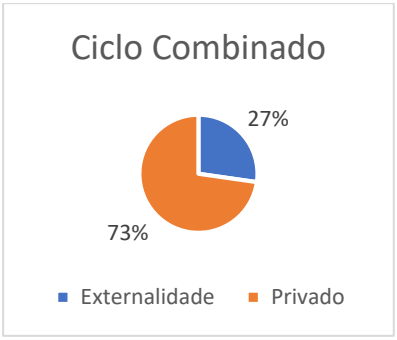


Gráfico 19 - Contribuição na LCOE Ciclo Combinado Cenário 2

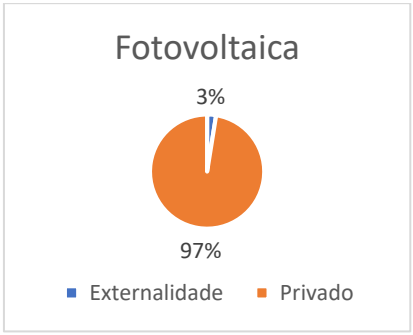


Gráfico 20 - Contribuição na LCOE Fotovoltaica Cenário 2

3

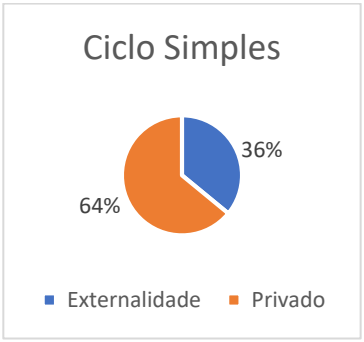


Gráfico 21 - Contribuição na LCOE Ciclo Simples Cenário 3

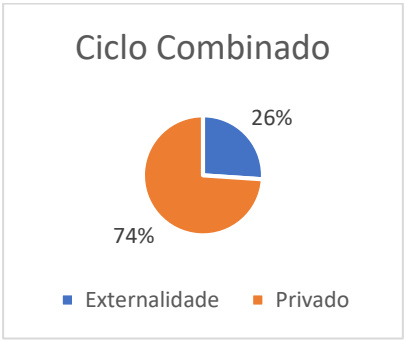


Gráfico 22 - Contribuição na LCOE Ciclo Combinado Cenário 3

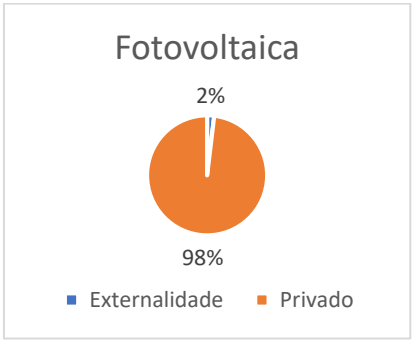


Gráfico 23 - Contribuição na LCOE Fotovoltaica Cenário 3

4

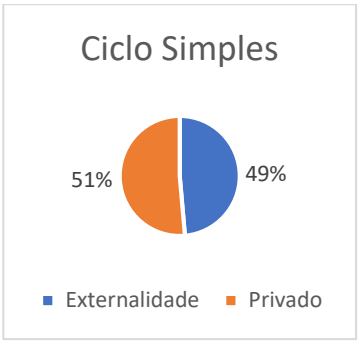


Gráfico 24 - Contribuição na LCOE Ciclo Simples Cenário 4

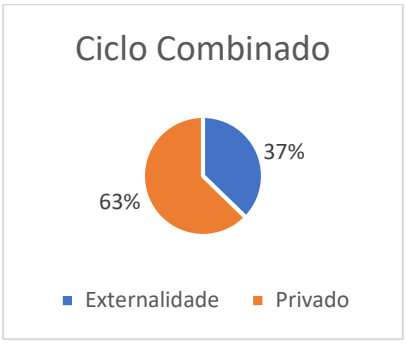


Gráfico 25 - Contribuição na LCOE Ciclo Combinado Cenário 4

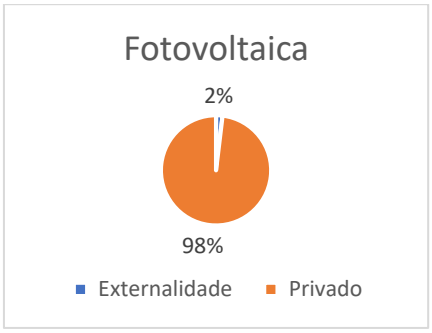


Gráfico 26 - Contribuição na LCOE Fotovoltaica Cenário 4

Na

Tabela 20 é apresentado o resultado da LCOE Ambiental. Para cada um desses cenários. Observa-se nos gráficos acima que, com a redução do custo do gás natural, o custo privado e das externalidades chega a ser quase o mesmo para a termelétrica de ciclo simples. Isso é um caso a se pensar, pois as externalidades ambientais podem ser tão relevantes de forma que seja quase o mesmo custo do que o investimento privado na tecnologia.

Tabela 20 - Resultado da LCOE Ambiental para cada tecnologia em cada cenário em R$/MWh.

		Custo Privado	Custo Externalidade				LCOE Amb. (Custo Social)			
		Leilão de Energia	GBR	SGP I	SGP II	CAN	GBR	SGP I	SGP II	CAN
2019 Cenário 1	Ciclo Simples	R$ 205,95	R$ 228,98	R$ 22,49	R$ 33,05	R$ 120,81	R$ 434,93	R$ 228,44	R$ 239,00	R$ 326,76
	Ciclo Combinado	R$ 205,95	R$ 143,77	R$ 14,12	R$ 20,75	R$ 75,85	R$ 349,72	R$ 220,07	R$ 226,70	R$ 281,80
	Fotovoltaica	R$ 198,75	R$ 10,04	R$ 0,99	R$ 1,44	R$ 5,27	R$ 208,79	R$ 199,74	R$ 200,19	R$ 204,02
		Leilão de Energia	GBR	SGP I	SGP II	CAN	GBR	SGP I	SGP II	CAN
2019 Hipotético Cenário 2	Ciclo Simples	R$ 202,35	R$ 228,98	R$ 22,49	R$ 33,05	R$ 120,81	R$ 431,33	R$ 224,84	R$ 235,40	R$ 323,15
	Ciclo Combinado	R$ 202,35	R$ 143,77	R$ 14,12	R$ 20,75	R$ 75,85	R$ 346,12	R$ 216,47	R$ 223,10	R$ 278,20
	Fotovoltaica	R$ 202,35	R$ 10,04	R$ 0,99	R$ 1,44	R$ 5,27	R$ 212,39	R$ 203,34	R$ 203,79	R$ 207,62
		Leilão de Energia	GBR	SGP I	SGP II	CAN	GBR	SGP I	SGP II	CAN
2020 Cenário 3	Ciclo Simples	R$ 215,23	R$ 228,98	R$ 22,49	R$ 33,05	R$ 120,81	R$ 444,22	R$ 237,72	R$ 248,28	R$ 336,04
	Ciclo Combinado	R$ 215,23	R$ 143,77	R$ 14,12	R$ 20,75	R$ 75,85	R$ 359,00	R$ 229,35	R$ 235,98	R$ 291,08
	Fotovoltaica	R$ 272,28	R$ 10,04	R$ 0,99	R$ 1,44	R$ 5,27	R$ 282,32	R$ 273,27	R$ 273,72	R$ 277,55
		Leilão de Energia	GBR	SGP I	SGP II	CAN	GBR	SGP I	SGP II	CAN
Cenário 4	Ciclo Simples	R$ 127,69	R$ 228,98	R$ 22,49	R$ 33,05	R$ 120,81	R$ 356,67	R$ 150,18	R$ 160,74	R$ 248,50
	Ciclo Combinado	R$ 127,69	R$ 143,77	R$ 14,12	R$ 20,75	R$ 75,85	R$ 271,46	R$ 141,81	R$ 148,44	R$ 203,54
	Fotovoltaica	R$ 272,28	R$ 10,04	R$ 0,99	R$ 1,44	R$ 5,27	R$ 282,32	R$ 273,27	R$ 273,72	R$ 277,55

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho foi desenvolvido de forma a comparar os custos sociais das emissões de gases de efeito estufa na geração elétrica para uma termelétrica a gás natural e a solar fotovoltaica a partir do cálculo da LCOE Ambiental. O cálculo do custo privado foi baseado nos dados do Leilão de Energia, enquanto o das externalidades de emissões de GEE foram adquiridas por meio de revisões bibliográficas com algumas modificações para atender as características técnicas atuais e do estudo de caso. Foram adotados três custos ambientais para o carbono de diferentes países: *Carbon Price Floor,* do Reino Unido; *Carbon Pricing Act,* de Singapura e *Output Base Pricing,* do Canadá.

Os resultados obtidos para o LCOE Ambiental para a termelétrica a gás natural de ciclo simples, ciclo combinado e fotovoltaica, respectivamente, foi de 228,98 R$/MWh; 143,77 R$/MWh e 10,04 R$/MWh para o *Carbon Price Floor*. Os resultados do *Carbon Pricing Act* foram calculados para dois cenários diferentes de aumento do custo do carbono, resultando em 22,49 R$/MWh; 14,12 R$/MWh e 0,99 R$/MWh para o primeiro cenário e 33,05 R$/MWh; 20,75 R$/MWh e 1,44 R$/MWh para o segundo. Por fim, para o *Output Base Pricing* os resultados foram de 120,81 R$/MWh; 75,85 R$/MWh e 5,27 R$/MWh. Observa-se um custo 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.

Para a geração de resultados, entretanto, existiram algumas limitações durante a aquisição de informações referentes aos dados, como a qualidade e quantidade de informações referentes as metodologias utilizadas para quantificar as emissões de GEE de cada sistema. Como são sistemas que estão em crescimento no mercado, houve certa dificuldade para a obtenção de informações atualizadas, principalmente, para as placas fotovoltaicas. Muitas das informações eram referentes à módulos já considerados obsoletos atualmente, como a eficiência e *Performance Ratio*. Outro ponto a ser considerado para a geração de energia fotovoltaica é a disponibilidade das áreas de telhado. Alguns bairros receberam uma estimativa grosseira de área pelo Google Earth, reduzindo a acurácia do resultado. Recomenda-se para trabalhos futuro uma análise mais criteriosa para essa área.

Quanto a precificação do carbono, por mais que países adotem tarifas para internalizar seu custo em cima do poluidor, os valores são ajustados de forma a se encaixar no mercado competitivo. Mesmo sendo um problema global, a adesão de um imposto pigouviano varia de acordo com cada país, onde um imposto muito alto afeta a produção e a economia do

mesmo. Dessa forma, a adoção de um custo para o carbono acaba sendo arbitrária para cada país, dificultando uma média global para o custo dessas externalidades.

O GWP em 100 anos utilizado varia de acordo com a taxa do gás sendo liberado para a atmosfera e seu tempo de vida. Ao analisar os dados tabelados pelo IPCC de outros anos, foi observado que a mudança entre cada coeficiente utilizado era baixa, não interferindo significativamente nos resultados. Porém quando se compara com GWP em 20 anos, foi visto diferença nos resultados de metano, devido a um menor tempo de vida comparado com o dióxido de carbono e óxido nitroso. Por ser mais utilizado na comunidade científica foi escolhido o GWP em 100 anos mais atual, recomendando uma análise futura para a utilização do GWP em 20 anos para observar o comportamento do metano.

Para outras análises futuras, recomenda-se a adoção dos outros três Estudos de Casos possíveis citados na metodologia do trabalho. Além disso, a projeções do aumento do custo das fotovoltaicas devido à revisão da REN 482/2012 foi pautada em apenas na alternativa mais discutida para o caso. Recomenda-se que em trabalhos futuros sejam apresentadas análises de sensibilidade com todas essas alternativas e um estudo na área do custo social do carbono no Brasil.

7. 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 maio. 2019.

AMEYAW, B. et al. **Investigating, forecasting and proposing emission mitigation pathways for CO 2 emissions from fossil fuel combustion only: A case study of selected countries. Energy Policy**, 2019.

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

ANEEL. **Resolução Normativa Nº482**. 2012.

BARNETT, J.; ADGER, W. N. Climate change , human security and violent conflict. v. 26, p. 639–655, 2007.

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.

BERNER, R. A.; LASAGA, A. C. Modeling the Geochemical Carbon Cycle. [s.l: s.n.]. v. 260

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.].

CANADA. **Output- Based Pricing System**. Disponível em: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/pricing-pollution-how-it-will-work/output-based-pricing-system.html> Acesso em: 19 setembro. 2019.

CCEE. **Biblioteca VirtualResultado Consolidado dos Leilões**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/acesso_rapido_header_publico_nao_logado/biblioteca_virtual?tipo=Resultado>. Acesso em: 1 nov. 2019

CHENG, L. et al. 2018 **Continues Record Global Ocean Warming**. v. 36, n. March, p. 249–252, 2019.

COMPETITIVO, S. E. **Agenda Elétrica Sustentável 2020**.2007

DEVELOPMENT, H. (2016). **Human Development Report 2016 Human Development for Everyone**.2016

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.

EMBRAPA CERRADOS. **O Cerrado**. Disponível em: <http://www.cpac.embrapa.br/unidade/ocerrado/>. Acesso em: 10 dez. 2019.

EPE, **Plano Nacional de Energia 2030, Volume 5- Geração Termelétrica – Gás Natural**, 2007.

EPE. **Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil** – Condicionantes e Impactos. 2014.

EPE. **Matriz Energética Nacional 2018.** Disponível em: <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>. Acesso em: 11 jun. 2019.

EPE**. Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050**. p. 91, 2018.

ERNMENTA, I.; NEL, L. P. A. **Climate Change 2014 Synthesis Report.** [s.l: s.n.].

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED; NATIONS. **The State of World Fisheries and Aquaculture.** 2014. Rome:

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.

HUBBARD, R. G.; O'BRIEN, **A. Introdução a economia**. In: 2° ed. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA, 2010.

HUSSAIN, M. et al. **Regional and sectoral assessment on climate-change in Pakistan : Social norms and indigenous perceptions on climate-change adaptation and mitigation in relation to global context**. Journal of Cleaner Production, v. 200, p. 791–808, 2018.

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

IAE. **Key World Energy Statistics**. 2017.

IDEAL - Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina. **O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica** – Edição 2018. Disponível em <http://www.institutoideal.org/biblioteca>. Acesso em: maio de. 2019.

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

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

IRENA - RENEWABLE ENERGY AGENCY INTERNATIONAL. **Renewable Power Generation Costs in 2017**.2018

JACOBSON, M. Z. **Evaluation of Coal and Natural Gas With Carbon Capture as Proposed Solutions to Global Warming, Air Pollution , and Energy Security 3 . 1. Why Not Use Natural Gas as a Bridge Fuel** 2019.

KING, A. W. et al. **The First State of the Carbon Cycle Report (SOCCR) The North American Carbon the Global Carbon Cycle. Assessment,** v. 2–2, n. November, p. 242 pp., 2007.

KLEEMANN M.; MELISS, M. **Regenerative Energie** quellen. Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo: Springler-Verlag, 1988.

LEAD, C. et al. **Human Well-being across Scenarios**. 2005.

LEAL, F. I.; REGO, E. E.; DE OLIVEIRA RIBEIRO, C. **Natural gas regulation and policy in Brazil: Prospects for the market expansion and energy integration in Mercosul. Energy Policy**, v. 128, n. January, p. 817–829, 2019.

LEGGETT, J. K. Global **Warming: Greenpeace Report. Oxford**: [s.n.]. Disponível em: <https://allsinalg.firebaseapp.com/aa525/global-warming-greenpeace-report-by-jeremy-k-leggett-0192177818.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2019.

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.

LORA, E. S**. Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transportes**. 2da. Edição, Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2002.

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. (2008). **Água e mudanças climáticas.** Retrieved from http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/publicacoes/2008/Marengo_x1a.pdf

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

METZ, B.; DAVIDSON, O. Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change.,2007.

Ministério das Minas e Energia – MME, 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.

NASCIMENTO, R. L. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas. Estudo Técnico Câmara dos Deputados**, p. 1–46, 2017.

NEWBERRY, W. G., Handbook for Riggers, Calgary, Alberta, 1989.

Pacheco, M. R. P. dos S., & Helene, M. E. M. (2006). **Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO2. Estudos Avançados,** 4(9), 204–220. https://doi.org/10.1590/s0103-40141990000200010

PACHECO, M. R. P. DOS S.; HELENE, M. E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO2. Estudos Avançados, v. 4, n. 9, p. 204–220, 2006.

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

PIGOU, A. C. **The Economics of Welfare**. 4th. ed. London: Macmillian & Co, 1932.

SÁ, E. et al. **Climate change and pollutant emissions impacts on air quality in 2050 over Portugal. Atmospheric Environment**, v. 131, p. 209–224, 2016.

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

SAÚDE, O. M. DA. **Mudança Climática e Saúde: Um Perfil do Brasil**. Brasília: [s.n.].

SCHUTTE, A.; RAQUEL, L.; RODRIGUES, D. J. **Potencial da Energia Solar Fotovoltaica de Brasília.** 2016.

SILVA, R. M. **Energia Solar: dos incentivos aos desafios. Texto para discussão nº 166. Brasília. Senado Federal**, 2015

SINGAPURA. **Carbon Pricing Act**. Disponível em: < https://sso.agc.gov.sg/Acts-Supp/23-2018/Published/20180601?DocDate=20180601#pr11-> Acesso em:19 setembro 2019

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

T.M.I. MAHLIA**. Emissions from electricity generation in Malaysia**. Renewable Energy, v. 27, n. 2, p. 293–300, 2002.

TIMMERMANN, A. et al**. ENSO response to greenhouse warming Ä o frequency in Increased El Nin a climate model forced by future greenhouse warming**. n. January 1999, 2015.

TURDERA, E. M. V. **Disponibilidade de Energia Termelétrica a Gás Natural na Região Centro-Oeste. Dourados**: [2009].

UK. **Carbon Price Floor and the price support mechanism** Disponível em: < https://poweringpastcoal.org/assets/docs/members/House_of_Commons_Library_Briefing_Note_on_CPS_SN05927.pdf> Acesso em:19 setembro 2019.

UNB CIÊNCIA. **Chuvas no Cerrado diminuíram 8,4% em três décadas**. Disponível em: https://www.unbciencia.unb.br/biologicas/34-engenharia-florestal/569-chuvas-no-cerrado-reduziram-8-4-em-tres-decadas. Acesso em: 10 dez. 2019.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **Human Development Report 2016: Human Development for Everyon**e. 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

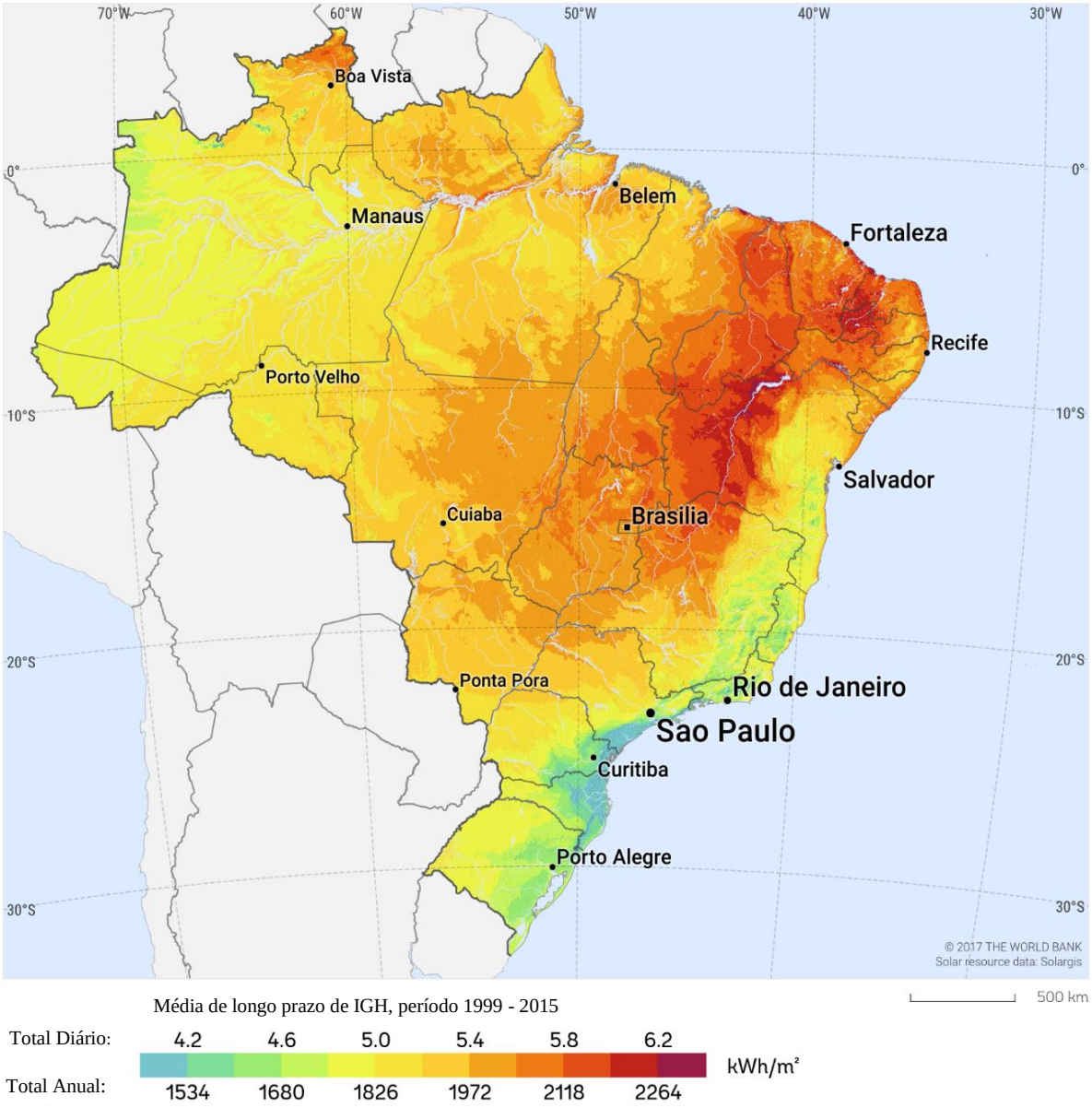
WWF **Agenda elétrica sustentável 2020: estudo de cenários para um setor elétrico brasileiro eficiente, seguro e competitivo.** Brasília,2007

APÊNDICES

APÊNDICE A - MAPA DE RECURSO SOLAR BRASIL

IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL

BRASIL



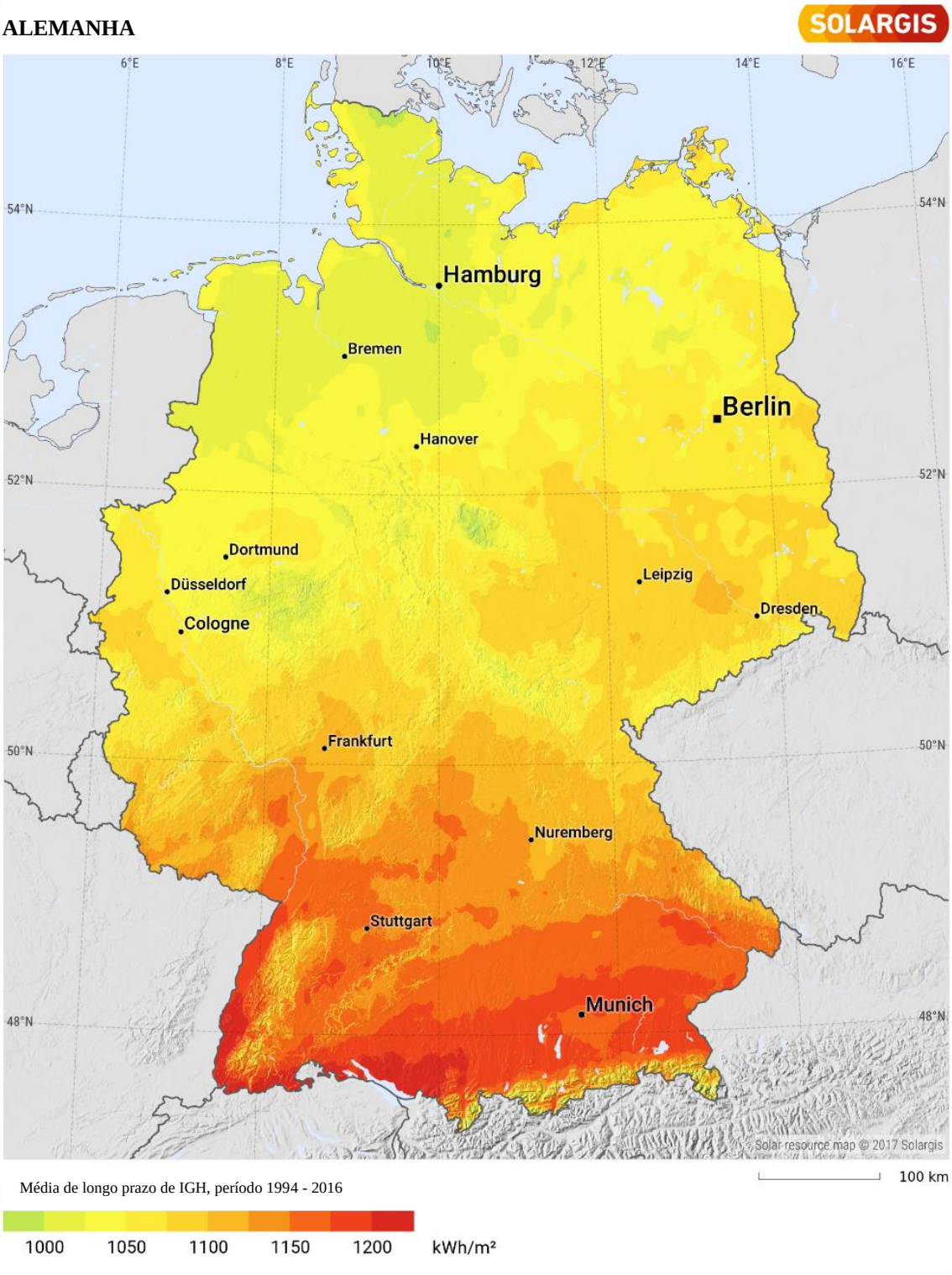
Anexo 1 - Média Anual do Total Diário da Irradiação Horizontal Brasil.

FONTE: SOLARGIS, 2017

APÊNDICE B - MAPA DE RECURSO SOLAR ALEMANHA

IRRADIAÇÃO GLOBAL HORIZONTAL

ALEMANHA



Anexo 2 - Média Anual do Total Diário da Irradiação Horizontal Alemanha.

FONTE: SOLARGIS, 2017