

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

**EXTERNALIDADES AMBIENTAIS DA ENERGIA SOLAR  
FOTOVOLTAICA E DA ENERGIA TERMELÉTRICA A  
GÁS NATURAL: ESTUDO DE CASO NO CAMPUS DARCY  
RIBEIRO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**GUILHERME MACEDO DAS NEVES**

**ORIENTADOR: RAFAEL AMARAL SHAYANI**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL**

**BRASÍLIA/DF: JULHO/2019**

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

**EXTERNALIDADES AMBIENTAIS DA ENERGIA SOLAR  
FOTOVOLTAICA E DA ENERGIA TERMELÉTRICA A  
GÁS NATURAL: ESTUDO DE CASO NO CAMPUS DARCY  
RIBEIRO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**GUILHERME MACEDO DAS NEVES**

**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, Dr. (ENE/UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**CONCEIÇÃO DE MARIA ALBUQUERQUE ALVES, PhD (ENC/UnB)  
(EXAMINADORA INTERNA)**

---

**LEONARDO ZANDONADI MOURA, Me (ENC/UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 05 DE JULHO DE 2019.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

NEVES, GUILHERME MACEDO DAS

Externalidades ambientais da energia solar fotovoltaica e da energia termelétrica a gás natural: estudo de caso no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

xii, 63 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. Energia fotovoltaica

2. Externalidades ambientais

3. Termelétrica a gás

4. Universidade de Brasília

I. ENC/FT/UnB

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Neves, G.M. (2019). **Externalidades ambientais da energia solar fotovoltaica e da energia termelétrica a gás natural: estudo de caso no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília**. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 63 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Guilherme Macedo das Neves

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Externalidades ambientais da energia solar fotovoltaica e da energia termelétrica a gás natural: estudo de caso no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

GRAU / ANO: 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.

---

Guilherme Macedo das Neves  
[guilherme.macedo.amb@gmail.com](mailto:guilherme.macedo.amb@gmail.com)

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Cícero César e Maria Lúcia, e minha irmã, Aline, por terem sempre me apoiado e incentivado ao longo desses anos de universidade.

Ao professor Rafael Amaral Shayani por aceitar desenvolver esse tema proposto, que está dentro da área que mais me interessa na Engenharia Ambiental.

À toda equipe de professores que tive a oportunidade de receber seus ensinamentos, especialmente aos professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Ao programa Ciência sem Fronteiras, que durante a minha graduação me permitiu fazer intercâmbio no Canadá, onde pude aprimorar meus conhecimentos, ter diversas experiências diferentes e estagiar em um lugar espetacular atuando na área de energia renováveis. Com certeza, essa experiência foi a mais importante nessa caminhada universitária, me fazendo crescer muito como pessoa.

Aos amigos que fiz em todo meu processo de formação, fazendo parte de grandes momentos nessa vida universitária.

Pra todos que estiveram presentes nesses anos e contribuíram para minha formação acadêmica, muito obrigado.

## RESUMO

Tendo em vista o plano para crescimento da matriz de energia elétrica brasileira e os problemas ambientais da geração de elétrica, pesquisa-se sobre os benefícios ambientais da energia solar fotovoltaica em relação à termelétrica a gás, a fim de analisar e quantificar esses benefícios para 100% da energia elétrica consumida no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Para tanto, é necessário mensurar as emissões de gases poluentes da energia solar fotovoltaica e da energia termelétrica a gás para suprir totalmente o consumo de energia elétrica do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, quantificar os custos das externalidades ambientais da energia solar fotovoltaica e a energia termelétrica a gás, comparar os custos dos sistemas energéticos sem as externalidades ambientais, e relacionar os custos dos aspectos ambientais na comparação de custos econômicos dos sistemas energéticos. O custo de instalação de uma usina fotovoltaica no campus estudado é de 50 milhões de reais, em média. Realiza-se, então, uma pesquisa dos impactos dos gases do efeito estufa e poluentes do ar para a geração de energia a partir das duas fontes estudadas e dos custos dos sistemas. Diante disso, verifica-se que a energia termelétrica com ciclo combinado gera 10 vezes mais poluição de gases do efeito estufa do que a energia fotovoltaica para o estudo de caso, os gases do efeito estufa são mais emitidos do que os poluentes do ar, e 23% do custo total com externalidades para termelétrica a gás de ciclo combinado com média taxa de desconto e taxa específica média são referentes ao custo das externalidades ambientais, o que impõe a constatação de que a energia fotovoltaica é mais benéfica ambientalmente do que a energia termelétrica a gás.

**Palavras-chave:** energia fotovoltaica, externalidades ambientais, termelétrica a gás, Universidade de Brasília.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivo da Pesquisa.....</b>	<b>4</b>
1.1.1. Objetivo Geral.....	4
1.1.2. Objetivos Específicos.....	4
<b>1.2. Organização do Texto .....</b>	<b>4</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS .....</b>	<b>6</b>
2.1.1. Energia Fotovoltaica .....	6
2.1.2. Energia Hidráulica.....	10
<b>2.2. ENERGIAS NÃO-RENOVÁVEIS .....</b>	<b>12</b>
2.2.1. Energia Termelétrica a Gás Natural .....	12
<b>2.3. CENÁRIO ENERGÉTICO .....</b>	<b>16</b>
2.3.1. Mundial .....	16
2.3.2. Nacional .....	18
2.3.3. Distrito Federal.....	22
<b>2.4. GASES POLUENTES.....</b>	<b>23</b>
2.4.1. Efeito Estufa.....	26
2.4.2. Chuva Ácida.....	27
<b>2.5. ANÁLISE DE CUSTO.....</b>	<b>28</b>
2.5.1. Externalidades Ambientais.....	28

2.5.2.	Custo Social da Geração de Eletricidade .....	28
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.</b>	<b>Emissões de Gases do Efeito Estufa e Poluentes do Ar.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2.</b>	<b>Custo de Gases do Efeito Estufa e Poluentes do Ar .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.</b>	<b>Custo dos Sistemas Energéticos sem Externalidades Ambientais .....</b>	<b>41</b>
3.3.1.	Custo Total com Valores do Leilão de Energia .....	41
3.3.2.	Custo de Instalação.....	42
3.3.3.	Custo Total com Custo Nivelado da Energia ( <i>Levelized Cost of Electricity</i> ) 43	
<b>3.4.</b>	<b>Estudo de Caso: Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília .....</b>	<b>45</b>
<b>4.</b>	<b>Resultados e discussões .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1.</b>	<b>Resultado das Emissões .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2.</b>	<b>Resultado dos Custos das Externalidades Ambientais .....</b>	<b>49</b>
<b>4.3.</b>	<b>Resultado do Custo dos Sistemas com e sem as Externalidades Ambientais</b>	<b>51</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusões e Recomendações.....</b>	<b>58</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa da irradiação solar global no plano inclinado.....	8
Figura 2.2 - Preço médio dos sistemas fotovoltaicos no Brasil em 2018 por faixa de potência. .....	9
Figura 2.3 - Consumo de energia elétrica no mundo por país em 2017.....	16
Figura 2.4 – Consumo mundial de eletricidade por setor de 1971 a 2015 em megatonelada equivalente de petróleo (Mtep). ....	17
Figura 2.5 - Geração mundial da energia elétrica de 1971 a 2015 por fonte em terawatt-hora (TWh).....	18
Figura 2.6 - Geração de Energia Elétrica Total.....	19
Figura 2.7 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte. ....	19
Figura 2.8 - Projeções da produção (líquida) diária de gás natural convencional no Brasil até 2050.....	20
Figura 2.9 - Participação da geração hídrica e térmica a gás natural na matriz elétrica brasileira. ....	21
Figura 2.10 - Composição da matriz em 2050 - COPPE .....	22
Figura 2.11 - Atlas solarimétrico brasileiro, indicando que Brasília encontra-se em região de elevada irradiação.....	23
Figura 2.12 - Emissões mundiais de CO <sub>2</sub> a partir da combustão de combustíveis entre 1971 e 2015 por combustível (Mt de CO <sub>2</sub> ). ....	25
Figura 2.13 - Emissões de metano (t CO <sub>2</sub> e) por setor.....	25
Figura 2.14 - Emissões de gases de efeito (t CO <sub>2</sub> e) no mundo por gás. ....	27
Figura 3.1 - Fluxograma Metodologia. ....	32



Figura 4.1 – Porcentagem (%) do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC com 3% de taxa de desconto e taxa específica média. .....	53
Figura 4.2 – Porcentagem do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC com 5% de taxa de desconto e taxa específica baixa.....	54
Figura 4.3 – Porcentagem (%) do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para FV com 5% de taxa de desconto e taxa específica baixa....	54
Figura 4.4 - Porcentagem (%) do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC com 5% de taxa de desconto e taxa específica alta.	55
Figura 4.5 - Percentual (%) do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC e FV com diferentes taxas de desconto (TD) e taxas específicas do setor (TES).....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros técnico-econômicos de termelétricas a gás natural.....	15
Tabela 2.2 - Custos nivelados para a geração termelétrica a gás natural.....	15
Tabela 2.3 - Principais poluentes do ar.....	24
Tabela 3.1 - Taxas de emissão do ciclo de vida (g/kW(h)) de CO <sub>2</sub> -eq (GEE), as taxas de emissão de combustão das melhores tecnologias disponíveis no mercado (g/kWh) de poluentes atmosféricos e as taxas de emissões de CH <sub>4</sub> (g/kWh) associado às tecnologias consideradas.....	36
Tabela 3.2 - Hipóteses para o custo dos danos ambientais (R\$/ton), custos sociais, de CO <sub>2</sub> (combustão e não-combustão) e CH <sub>4</sub> (emissões fugitivas) para vida útil de 25 anos, associados às emissões de operação, implantação e descomissionamento.....	39
Tabela 3.3 - Hipóteses para o custo dos danos ambientais (R\$/ton) de poluentes do ar para vida útil de 25 anos, associados às emissões de operação.....	39
Tabela 3.4 - Dados para o cálculo do custo nivelado de energia (LCOE) para cada tecnologia diferente, usando como base valores da EPE.....	44
Tabela 3.5 - Dados utilizados para o estudo de caso no Campus Darcy Ribeiro da UnB, tendo em vista o que seria necessário para utilização da energia elétrica em 100% do campus. .	46
Tabela 4.1 - Emissões dos gases (ton) do efeito estufa e dos poluentes do ar para cada tipo de tecnologia no estudo de caso em 25 anos.....	48
Tabela 4.2 - Custos (R\$) das emissões dos gases de efeito estufa e dos poluentes do ar para cada tipo de tecnologia no estudo de caso em 25 anos.....	50
Tabela 4.3 - Custos (R\$) dos sistemas energéticos com e sem as externalidades ambientais para cada tipo de tecnologia no estudo de caso com 5% de taxa de desconto e baixa taxa específica do setor.....	52

## LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

BACT	Melhor tecnologia disponível comercialmente;
BAU	<i>Business as Usual</i>
CCS	Captura e sequestro de carbono;
CO <sub>2e</sub>	Gás carbônico equivalente;
CSC	Custo Social do Carbono
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro;
CSP	Energia Solar Concentrada
EIA	Administração de informação de energia dos Estados Unidos ( <i>U.S. Energy Information Administration</i> );
EPA	Agência de Proteção Ambiental ( <i>Environmental Protection Agency</i> )
FEE	Fator de Eficiência Energética
FV	Fotovoltaico
GEE	Gases de efeito estufa
IAM	Modelo Integrado de Avaliação
IEA	Agência Internacional de Energia ( <i>International Energy Agency</i> )
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IWG	Grupo de Trabalho Interagencial ( <i>Interagency Working Group</i> )
LCOE	Custo Nivelado da Energia ( <i>Levelized Cost of Electricity</i> )
MWh	Megawatt-hora

NAAQS	Padrão Nacional de Qualidade do Ar Ambiente
O&M	Custos de Operação e Manutenção
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PCH	Pequena central hidrelétrica
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
TD	Taxas de desconto
TES	Taxas específicas do setor
TGCC	Termelétrica a gás natural ciclo combinado
TGCS	Termelétrica a gás natural ciclo simples
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas
UTE	Usina Termelétrica de Energia

# 1. INTRODUÇÃO

No decorrer dos anos, a população tem aumentado consideravelmente e com ritmo cada vez mais acelerado. Isso faz com que setores de abastecimento da sociedade, como o setor elétrico, cresçam também, permitindo o desenvolvimento constante. A eletricidade proporciona desenvolvimento econômico e tecnológico, que são alguns dos fatores mais considerados entre as nações. Assim, percebe-se que há uma dependência grande dos seres humanos em energia no contexto atual.

A grande lacuna associada ao crescimento da produção energética é a baixa consideração das questões ambientais ligadas ao planejamento, o que resulta em problemas. A sociedade sempre se baseou na utilização de combustíveis fósseis para os diversos objetivos energéticos, isso mostra-se como um incômodo para o meio ambiente e para as futuras gerações pois eles são grandes poluentes e não são renováveis. Assim, provocando vários problemas ambientais, principalmente devido à poluição atmosférica, que causa o efeito estufa, mudanças climáticas e problemas respiratórios.

O sistema climático já é claramente influenciado pelos seres humanos, recebendo atualmente as emissões antrópicas de gases de efeito estufa mais altas da história. As recentes mudanças climáticas têm causado impactos generalizados nos seres humanos e meio ambiente (IPCC, 2014a).

As discussões sobre as questões ambientais se iniciaram nas últimas décadas por todo mundo e vêm aumentando cada vez mais, como é visto nas muitas conferências e encontros realizados por vários países. Diante dessa preocupação, em 1988, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) foi criado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) para fornecer aos legisladores avaliações regulares da base científica das mudanças climáticas, seus impactos e riscos futuros e opções de adaptação e mitigação (IPCC, 2018). Em sequência, o IPCC foi determinante para que houvesse a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (UNFCCC), o principal tratado internacional para reduzir o aquecimento global e lidar com as consequências das alterações climáticas. Em 1997, o Protocolo de Quioto estabeleceu compromissos reais a alguns países para a redução dos gases de efeito estufa (GEE) em pelo menos 5% abaixo dos níveis de 1990 no período de 2008 a 2012 (UNITED NATIONS,

1998). Esses eventos reforçam a ideia de redução de ações antrópicas que causem alterações de grande porte no meio ambiente.

A emissão sem precedentes de GEE causará maior aquecimento e mais mudanças duradouras em todo o clima mundial, aumentando a probabilidade de impactos severos, generalizados e irreversíveis para as pessoas e os ecossistemas. É necessário reduzir substancialmente as emissões de GEE para, em conjunto com a adaptação, limitar os riscos causados pelas alterações climáticas. Uma série de eventos já está sendo prevista, como ondas de calor com maior frequência, precipitações com maiores intensidades, aumento na temperatura dos oceanos, entre outros (IPCC, 2014a).

De todas as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, o setor energético é responsável por aproximadamente 63% das emissões e tem aumentado sua emissão de CO<sub>2</sub> nos últimos anos para valores cada vez mais altos. Desse modo, é de extrema importância que se transforme o setor energético para que se combata o problema da mudança climática (IEA, 2015).

Importante lembrar que alguns objetivos da Organização das Nações Unidas são grandes motivações para este trabalho. Os objetivos 3, 7, 11 e 13, respectivamente, se relacionam com questões de poluição, energia e sustentabilidade: promover uma vida saudável para as pessoas; promover a sustentabilidade na energia; transformar as cidades em cidades sustentáveis; e estabelecer medidas para combater as mudanças climáticas e seus impactos (ONU, 2019).

Diante desse contexto, onde há grande preocupação com a poluição e geração de energia, o presente trabalho busca propor uma forma de comparação entre duas fontes de energia distintas, a energia solar fotovoltaica e a energia termelétrica a gás, considerando questões ambientais.

A Universidade de Brasília, situada em Brasília, possui grande espaço territorial e edifícios que são predominantemente horizontais. Assim, favorecendo a utilização de energia fotovoltaica, ao analisar apenas sua parte estrutural.

O campus Darcy Ribeiro da UnB é utilizado por 40.000 pessoas, em média (UNB, 2012). Assim, causando um consumo de energia da UnB de aproximadamente 2.000.000 kWh/mês

(BERTASSO, 2016). Esse valor é necessário para a quantificação dos custos dos sistemas energéticos para o campus.

O presente estudo encontra-se dentro do âmbito da Chamada ANEEL N° 001/2016 "Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Estratégico de P&D: Eficiência Energética e Minigeração em Instituições Públicas de Educação Superior", e do Termo de Cooperação Técnica 502/2018, celebrado entre CEB Distribuição S.A. e Fundação Universidade de Brasília, intitulado "Geração Distribuída no Campus da Universidade de Brasília Integrada à Rede de Distribuição da CEB".

## **1.1. OBJETIVO DA PESQUISA**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Analisar e quantificar os custos das externalidades ambientais na utilização de energia solar fotovoltaica e na energia termelétrica a gás natural, a partir de um estudo de caso para 100% da energia elétrica consumida no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Quantificar as emissões de gases poluentes da energia solar fotovoltaica e da energia termelétrica a gás para suprir totalmente o consumo de energia elétrica do Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília;
- Quantificar os custos das externalidades ambientais negativas da energia solar fotovoltaica e a energia termelétrica a gás;
- Comparar os custos dos sistemas energéticos sem as externalidades ambientais;
- Relacionar os impactos das externalidades na análise econômica dos sistemas energéticos.

## **1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

Este trabalho foi organizado em 5 capítulos com a intenção de melhorar a compreensão do leitor.

O capítulo 2 visa expor ao leitor uma revisão bibliográfica que vai ajudar a compreender os principais conceitos e cenários do setor energético. Nessa seção, aborda-se também as questões necessárias para analisar os aspectos ambientais junto à economia.

O capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada e os dados necessários para desenvolver o estudo. Inicia-se introduzindo como se calculam os custos dos poluentes, a partir das emissões que ocorrem nas gerações de energia termelétrica a gás e solar fotovoltaica. Também, são mostradas 3 maneiras de calcular os sistemas sem as externalidades, além de introduzir as questões do estudo de caso, campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

Na próxima etapa, capítulo 4, os resultados, que foram obtidos de acordo com a metodologia e os materiais apresentados no tópico anterior, são expostos e discutidos. Neste capítulo, estão presentes várias tabelas e gráficos que simplificam o entendimento dos valores.



Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, mostrando os principais resultados e as recomendações para estudos futuros.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo apresentam-se os diferentes tipos de energia com seus aspectos positivos, negativos e econômico. Além disso, é exposto o cenário energético global, nacional e local com tendências de crescimento de tipos de energia relacionado à produção de gases poluentes, que são explicados logo após, juntamente com os impactos causados. Por fim, discute-se como são estabelecidos os custos de poluentes e seus impactos.

### **2.1. ENERGIAS RENOVÁVEIS**

O uso de energias renováveis é essencial para que se tenha a exploração dos recursos naturais de maneira adequada e se diminuam os impactos negativos no meio ambiente. Os ciclos naturais de transformação da radiação do sol, que provém a maior parte das fontes primárias de energia na Terra, originam as energias renováveis. Assim, essas energias são praticamente infinitas e não modificam o balanço térmico da Terra (PACHECO, 2006).

Dessa forma, são definidos diferentes tipos de energias renováveis de acordo com suas fontes de geração. As energias renováveis mais utilizadas são: hidrelétrica, geotérmica, solar fotovoltaica, solar térmica, maré/onda/oceano, eólica, biomassa, biogás, entre outras (IEA, 2017).

#### **2.1.1. Energia Fotovoltaica**

A energia solar fotovoltaica se origina a partir da conversão direta da luz em energia elétrica, que possui como essência o efeito fotovoltaico. O surgimento de uma diferença de potencial nas extremidades de material semicondutor causado pela absorção de luz é o resumo do efeito fotovoltaico, descrito por Edmond Becquerel em 1839 (EPE, 2016a).

Os aspectos positivos da utilização da energia fotovoltaica são muitos, principalmente quando comparados com energias não renováveis. Os recursos naturais são favorecidos na utilização desse tipo de energia. Os poluentes como gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, entre outros), materiais particulados, óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e monóxido de carbono (CO) não são emitidos enquanto ocorre a geração de energia pelos painéis fotovoltaicos, beneficiando o meio ambiente localmente e globalmente (EPE, 2016a). Desta forma, a sociedade também fica menos exposta a gases que podem prejudicar a saúde humana.

Um dos aspectos da energia fotovoltaica é sua flexibilidade de local para instalação. Na geração descentralizada, pequenas unidades, os telhados e o exterior de edificações podem ser utilizadas para implementação. Na geração centralizada, grandes usinas, de maior porte, acima de 5 MW, pode-se escolher as regiões com melhores níveis de irradiação.

Projetos caros e danos ao meio ambiente podem dificultar a chegada de energia em certas regiões. Regiões afastadas e de árduo acesso se beneficiam com a aplicação de energia fotovoltaica descentralizada, uma vez que permite a produção de energia localmente, evitando a construção de novas linhas de transmissão e perdas elétricas, o que causaria prejuízos socioambientais e econômicos (EPE, 2016a).

Existem também alguns aspectos negativos que podem ser observados na utilização da energia fotovoltaica. “A variabilidade extrema da geração fotovoltaica é uma das dificuldades técnicas mais significativas para inserção em larga escala da microgeração solar na rede de distribuição de baixa tensão.” (EPE, 2016a, p.360).

Em relação à fauna e a flora, é possível que haja impactos caso seja necessário desmatar uma área para a construção de um parque fotovoltaico. Entretanto, com um bom planejamento para a escolha do local, não é necessário causar esse impacto. Além disso, quando em funcionamento, a interferência dos painéis está apenas no uso do espaço.

Observam-se impactos na sociedade, que são menos relevantes do ponto de vista ambiental, como é o caso de interferências na infraestrutura local e perturbação da população. Entretanto, projetos paisagísticos e arquitetônicos podem diminuir esse efeito.

O Brasil é um país muito favorável para que se desenvolva energia solar fotovoltaica. O Brasil está localizado em sua maior parte na região entre os Trópicos de Câncer e de Capricórnio, onde ocorre a incidência bastante vertical dos raios solares. Isso também faz com que as diferentes estações do ano não tenham grande influência, deixando a média diária de sol constante ao longo do ano. Em Brasília, cada metro quadrado de módulos fotovoltaicos instalados é capaz de produzir 696 Wh/dia, se for considerado um sistema solar fotovoltaico com rendimento total em 12% e a irradiação solar diária de 5,8 kWh/m<sup>2</sup> dia (WWF, 2016).

A Alemanha é um país bastante desenvolvido na área de energia solar fotovoltaica e possui irradiação entre 900 e 1.250 kWh/m<sup>2</sup>. O Brasil, por sua vez, mais favorecido do que a maioria

dos países europeus, como é o caso da Alemanha, possui um maior nível de irradiação. Em quase todo o Brasil é conveniente que haja expansão da captação de energia proveniente dos raios solares quando analisada a faixa de variação de irradiação global horizontal anual de 1.500 a 2.200 kWh/m<sup>2</sup> (PEREIRA *et al.*, 2006). No mapa da Figura 2.1, se observa a quantidade de irradiação que atinge o Brasil. Em Brasília, onde está localizado a Universidade de Brasília, observa-se que a localização está na região de maior irradiação solar do Brasil.

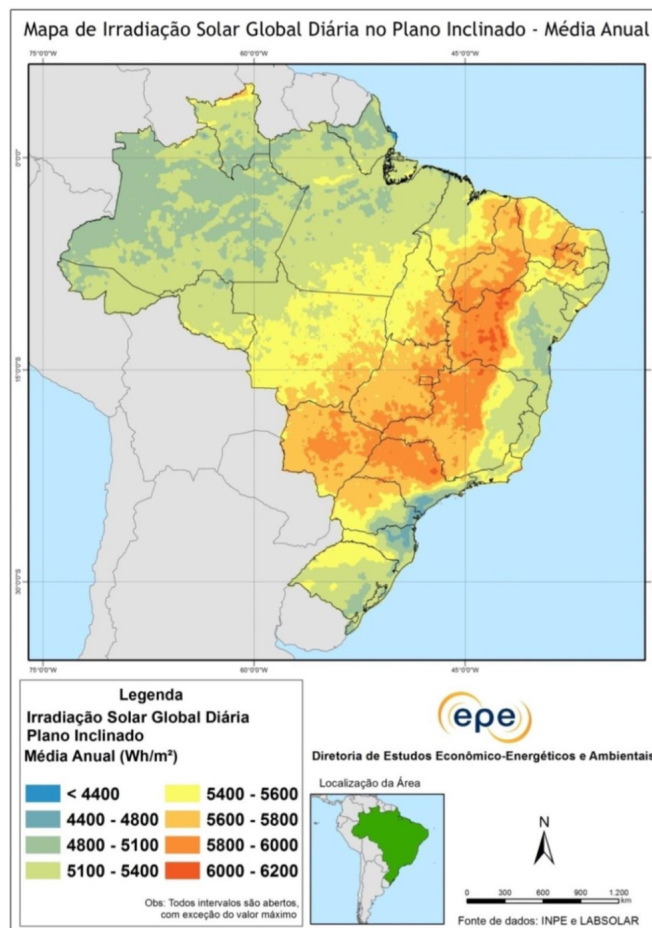


Figura 2.1 - Mapa da irradiação solar global no plano inclinado.

Fonte: (EPE, 2016a, p.329)

A irradiância pode ter muita variação em alguns locais, principalmente quando existe nebulosidade. As Horas de Sol Pleno servem para que se tenha uma análise melhor dos dados meteorológicos, pois representam a quantidade de horas em que a irradiância solar em um

local se mantém constante e igual a 1 kW/m<sup>2</sup> (CEPEL-CRESESB, 2014). Assim, é importante o uso das Horas de Sol Pleno para a análise de geração de energia fotovoltaica.

Em sistemas de energia fotovoltaica distribuída, geração junto ou próxima ao consumidor, e centralizada, vários aspectos, como localização, configuração, tipo e tamanho do sistema, variam os custos de investimento de sistemas fotovoltaicos. Em 2018, o custo de investimento em um sistema no Brasil era de R\$ 5,23/kWp em sistemas de 4 kWp, cerca de R\$ 3 mais barato do que no ano de 2014, mostrando como esse tipo de energia está ficando mais acessível (IDEAL, 2015). A Figura 2.2, representa os diferentes custos para a capacidade de potência do sistema.

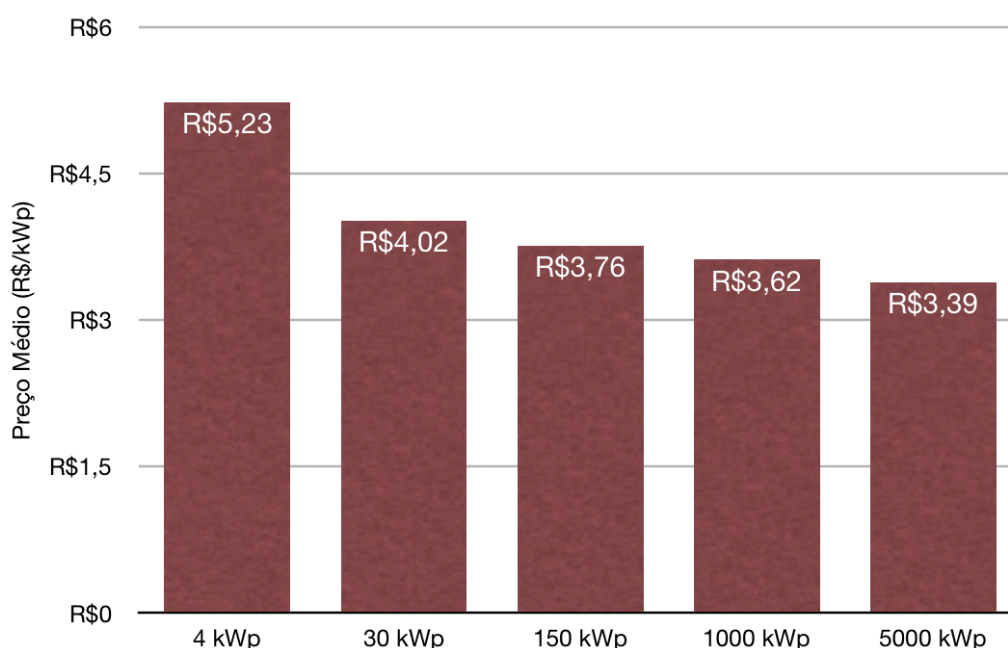


Figura 2.2 - Preço médio dos sistemas fotovoltaicos no Brasil em 2018 por faixa de potência.

**Fonte:** (GREENER, 2019)

O fato de estar concentrado em um só local reduz o valor para a implementação desse tipo de energia. Na geração fotovoltaica centralizada, a faixa de valores para o investimento está entre 5,12 R\$/Wp e 7,68 R\$/Wp (EPE, 2016a).

Localização é um fator crucial para o custo econômico, devido a questões de distância principalmente. Em sistemas isolados, como locais de difícil acesso, necessitam de baterias, o que deixa o custo mais alto do sistema (EPE, 2016a). Em 2012, o custo<sup>1</sup> total para sistema isolados no Brasil era, em média, 70,9 R\$/Wp, sendo que 39,1 R\$/Wp era apenas para equipamentos (GALDINO, 2012).

### **2.1.2. Energia Hidráulica**

As usinas hidrelétricas utilizam a diferença de nível entre os volumes de água, podendo ser natural, pelo relevo local, para converter a energia potencial em energia elétrica. Barragem, sistemas de captação e adução de água, casa de força e vertedouros são os elementos principais de usinas hidrelétricas (EPE, 2016a).

O aspecto econômico e a quantidade elevada de áreas propícias para a geração de energia no Brasil, fizeram a energia hidrelétrica ser a principal fonte do sistema elétrico brasileiro por muito tempo. O Brasil possui muitos rios e clima favorável, pois não há congelamento dos mesmos, o que faz ser um dos países que mais utiliza e desenvolve a área de energia hidrelétrica.

Muitas usinas hidrelétricas já estão instaladas no Brasil, o que torna a construção de novas usinas ainda mais difícil, seguido pela forte restrição ambiental, que causa grandes discussões, como é o caso do cancelamento do processo de licenciamento da hidrelétrica de São Luiz do Tapajós no Pará (GREENPEACE, 2016).

Outros fatores podem favorecer a instalação, algumas características da geração desse tipo de energia, tais como a flexibilidade na operação e capacidade de armazenamento, podem ser essenciais para a evolução de fontes renováveis intermitentes, como é o caso da energia eólica e solar fotovoltaica (EPE, 2016a). Assim, permitiria a produção de energia quando as fontes renováveis intermitentes não pudessem suprir a demanda elétrica da sociedade, reservando água (energia potencial) para produzir energia no momento necessário.

---

<sup>1</sup> Todas as conversões usadas no trabalho foram: 1 US\$ = R\$ 3,65, taxa média de venda (câmbio) do Dólar Americano em 2018 de acordo com o Banco Central Brasileiro.

Comparar quais fontes são menos influenciadoras para o efeito estufa é fundamental para que não ocorra o aumento exagerado desse efeito. As hidrelétricas não são grandes emissoras de gases do efeito estufa, comparadas a usinas termelétricas a gás, emitem até 18 vezes menos poluentes (JÚNIOR et al., 2013).

A água utilizada nas usinas hidrelétricas continua à disposição para outras atividades após a geração. Ela não é consumida, apenas utilizada como força para girar as turbinas que produzem a eletricidade, permitindo que se tenham outros objetivos de utilização da água que não atrapalhem o funcionamento da hidrelétrica, antes ou depois dos reservatórios.

Os aspectos negativos também estão presentes nas hidrelétricas. Para a construção de usinas de grande porte é necessário um financiamento muito alto, e seu aumento no número de unidades é fortemente debatido e dificultado devido aos problemas ambientais causados na implementação. Também, como as centrais hidrelétricas são construídas afastadas de regiões de alto consumo, torna-se necessário construção ou aprimoramento de linhas de transmissão de eletricidade (EPE, 2016a).

A maior parte dos problemas ambientais relacionados ocorrem devido ao reservatório de água construído. O regime hídrico do ambiente aquático é modificado devido ao barramento e a formação do reservatório, o que interfere no padrão de escoamento superficial e subterrâneo, antes e depois do local da barragem.

A qualidade da água pode ser impactada pelo processo de construção. Erosões e carreamento de sólidos acontecem por causa da exposição dos solos com a remoção da vegetação no processo de construção, influenciando na dinâmica da água e dos sedimentos associados à fase terrestre do ciclo hidrológico, e piorando a qualidade da água (EPE, 2016a).

A principal causa de poluentes em hidrelétricas é a degradação da matéria orgânica submersa na água. A decomposição da matéria orgânica de baixo da água ocorre com o surgimento dos reservatórios, isso pode acarretar na piora da qualidade da água do futuro reservatório (EPE, 2016a).

Os seres que habitam os locais antes de ações antrópicas de construção das usinas sofrem interferência. Os pescadores têm que se adequar ao ambiente ou ir para um novo local, causando interferência na fonte de renda dessas pessoas. As comunidades indígenas perdem parte de sua área de utilização. O aumento do número de pessoas, veículos, máquinas no

local e principalmente a retirada da vegetação, que causa dano direto à flora, causam a eliminação dos habitats da fauna terrestre (JÚNIOR et al., 2013).

## **2.2. ENERGIAS NÃO-RENOVÁVEIS**

As energias não-renováveis, como o próprio nome sugere, são energias que possuem fontes com longo tempo de renovação na natureza. Energias provenientes de combustíveis fósseis e energia nuclear são consideradas energias não-renováveis, devido ao enorme tempo geológico necessário para que se renovem no meio ambiente (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

### **2.2.1. Energia Termelétrica a Gás Natural**

O processo de uso do gás natural para geração de energia elétrica é relativamente simples. Nas usinas termelétricas, a conversão em eletricidade ocorre depois que se tem energia mecânica, que é concebida após a queima do gás, entrando em um ciclo térmico que resulta em potência mecânica e aciona o eixo de um gerador elétrico (EPE, 2016b).

Existem diferentes tipos de gases para uso em termelétricas (EPE, 2016b):

- Gás em formações fechadas - são encontrados em formações que possuem permeabilidade menor que 0,1 mD (mildarcy). O petróleo pode ser encontrado em conjunto com os reservatórios desse gás, devido à influência de flutuações hidrodinâmicas, porém isso não acontece necessariamente.
- Metano de Carvão (CBM) - o Metano de Carvão, também conhecido como gás natural de carvão (NGC), são encontrados aprisionados em camadas de carvão que atuam como geradoras e reservatórios para gases que tem como principal componente o metano (CH<sub>4</sub>). Pelo fato de acontecer o fenômeno da absorção nas camadas de carvão, é encontrado uma concentração maior do que em rochas reservatório de gás convencional.
- Gás de Xisto (*Shale Gas*) - são encontrados em reservatórios com alto teor de matéria orgânica e números muito pequenos de permeabilidade, que varia entre 0,000001 mD a 0,0001 mD. O fraturamento hidráulico, técnica usada para exploração de gás, e poços direcionais, como os poços horizontais, são necessários para a extração do Gás de Folhelho pois a permeabilidade é muito baixa, o que dificulta a extração sem essa técnica. A rocha geradora na fase de maturação da matéria orgânica age como



rocha reservatório para estocar o gás gerado no reservatório de gás de folhelhos, que compreende um sistema petrolífero independente, também possui características de rocha selante, não deixando o gás fugir para outros locais.

- Petróleo de Xisto (*Oil Shale*) - produzido em rochas de granulometria fina (folhelhos), que possuem uma quantidade moderadamente elevada de matéria orgânica (querogênio), que podem favorecer a produção de óleo e gás.
- Hidratos de Gás Natural - A partir de condições particulares de temperatura e pressão na natureza, chamada de zona de estabilidade de hidratos, os hidratos (ou clatratos), formações cristalinas constituída por moléculas de água e estabilizadas por moléculas gasosas em seu interior, são criados. Não há produção a nível comercial desse tipo de gás, e sua exploração e extração não tem relação com outras formas de gás não convencional.

Quando comparado a fontes de energia semelhantes, a termelétrica a gás possui uma importante vantagem em relação aos fatores ambientais. Entre os combustíveis fósseis, o gás natural é o menos poluente, o que tem aumentado sua relevância e presença na matriz elétrica (EPE, 2016b).

Por não dependerem de estar no local da fonte da energia para produção, podem se instalar em diferentes locais. As termelétricas a gás natural têm vantagem ao possuir flexibilidade moderada na sua instalação, mesmo que se necessite a disponibilidade e transporte o gás até a usina, que são fatores relevantes para sua localização. Essa flexibilidade e a necessidade de espaços pequenos para sua localização fazem com que não provoque muitos problemas socioambientais relacionados ao uso do solo e à sua implementação.

Se observam grandes impactos negativos das termelétricas, principalmente quando comparados com matrizes que não utilizam combustíveis fósseis. Apesar de possuir pontos positivos na localização, a região que estiver a usina termelétrica sofrerá danos na fauna e flora, modificação no uso do solo e transformação na paisagem (EPE, 2016b).

O uso de recursos hídricos é um fator preocupante no seu processo. A utilização de determinada tecnologia de resfriamento pode causar um alto consumo de água nas termelétricas, fazendo com que diminua a disponibilidade desse recurso para outras atividades (EPE, 2016b). Na maioria dos casos, a água utilizada para o resfriamento volta

parcialmente ao reservatório de origem em uma temperatura acima do normal, causando poluição térmica, e a outra parcela sobre evaporação.

Emissão de poluentes atmosféricos é um ponto de bastante preocupação relacionados à geração de energia termelétrica. A emissão de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), deterioram a qualidade do ar, causam efeitos negativos na saúde da população local e acidificação da água das chuvas, é bastante preocupante. Já a emissão de material particulado (MP) e óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) é bem menor (EPE, 2016b).

Atualmente, existe uma grande preocupação com fontes de emissão de gases de efeito estufa, visto que já se existem muitos estudos sobre os problemas da poluição. A emissão de gases de efeito estufa, principalmente o  $\text{CO}_2$ , é também ocorrida na queima do gás natural, o que colabora com o crescimento no nível desses gases e a alteração no clima global (EPE, 2016b). O fator de emissão de  $\text{CO}_2$  ( $\text{tCO}_2/\text{MWh}$ ) em uma usina a gás natural convencional é 50% menor do que em uma usina a carvão mineral (IPCC, 2006).

A água utilizada e o esgoto sanitário, efluentes líquidos produzidos, são aspectos que também precisam ser observados. A maior parte do efluente das usinas vem da utilização nos sistemas de resfriamento e nas caldeiras, chamados de água de processo. Modificações na qualidade do solo e de corpos aquáticos, causando também perturbação à vida marinha, podem ser causadas pelo lançamento da água de processo e do esgoto sanitário sem o tratamento adequado (EPE, 2016b).

A parte econômica é necessária para que se relacione com as outras matrizes menos poluentes. Os custos de investimento e de geração (operação e manutenção e consumo de combustível), a vida útil do empreendimento e uma taxa de desconto que se baseia nas preferências de remuneração do capital dos investidores foram considerados para definir o valor total na produção de um Megawatt-hora (MWh), chamando assim, de custo nivelado de energia. No planejamento de longo prazo da ampliação da oferta de geração de eletricidade, a seleção de investimentos acontece através da comparação das tecnologias com o custo nivelado (EPE, 2016b).

A utilização do gás natural pode ocorrer com diferentes tecnologias, os dois modos estudados neste trabalho são os mais comuns no mercado. A termelétrica com turbina a gás de ciclo simples é constituída de uma única turbina a gás para geração de energia e a termelétrica de ciclo combinado é semelhante à de ciclo simples, porém se acrescenta uma

turbina a vapor que aproveita o calor da turbina a gás para geração de energia, aumentando sua eficiência. Os parâmetros técnico-econômicos e os custos nivelados para termelétricas a gás natural estão disponíveis nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1 - Parâmetros técnico-econômicos de termelétricas a gás natural.

<b>Parâmetros</b>	<b>Unidades</b>	<b>Turbina a gás de ciclo simples</b>	<b>Turbina a gás de ciclo combinado</b>
Custo completo de UTE	US\$/kW	600 - 1000	900 - 1300
O&M fixo	US\$/kW.ano	13	18
O&M variável	US\$/MWh	4	6
Custo de combustível	US\$/MMBtu	10	10
Rendimento	%	35	55
Fator de capacidade	%	30	70

**Fonte:** (EPE, 2016b) adaptado.

Tabela 2.2 - Custos nivelados para a geração termelétrica a gás natural.

<b>Turbina a gás de ciclo simples</b>	<b>Turbina a gás de ciclo combinado</b>
US\$/MWh	US\$/MWh
127 - 140	84 - 90

**Fonte:** (EPE, 2016b) adaptado.

## 2.3. CENÁRIO ENERGÉTICO

### 2.3.1. Mundial

A eletricidade é essencial para as atividades cotidianas do mundo moderno, por isso seu consumo tende a crescer cada vez mais com o aumento da população. São poucas regiões, e inexpressivas em porcentagem, que não utilizam energia elétrica. Muitas atividades que utilizam eletricidade são necessárias para que se mantenha a saúde e o bem-estar da sociedade, como os hospitais, o desenvolvimento tecnológico e a manutenção do meio ambiente.

A Figura 2.3 mostra o consumo de energia elétrica no mundo por país em 2017. Ao analisar a figura é possível ver os dois países que mais consomem energia elétrica no mundo, China (o maior consumidor) e os Estados Unidos da América (EUA). A maior parte da África, onde o desenvolvimento é muito precário ainda, consome pouca eletricidade, isso se associa ao poder econômico desses locais.

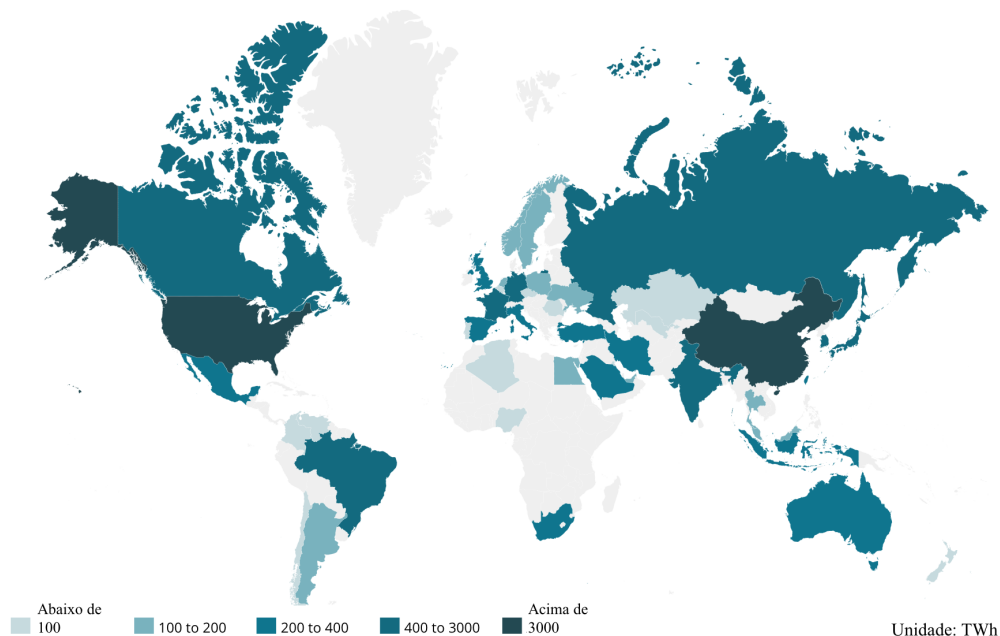


Figura 2.3 - Consumo de energia elétrica no mundo por país em 2017.

**Fonte:** ENERDATA. Electricity domestic consumption. Disponível em: <yearbook.enerdata.net>. Acesso em 11 de novembro de 2018 (modificado).

O consumo da eletricidade varia entre os diferentes setores. A Figura 2.4 mostra que todos as áreas têm aumentado o consumo de eletricidade, sendo que o setor industrial é o que mais consome.

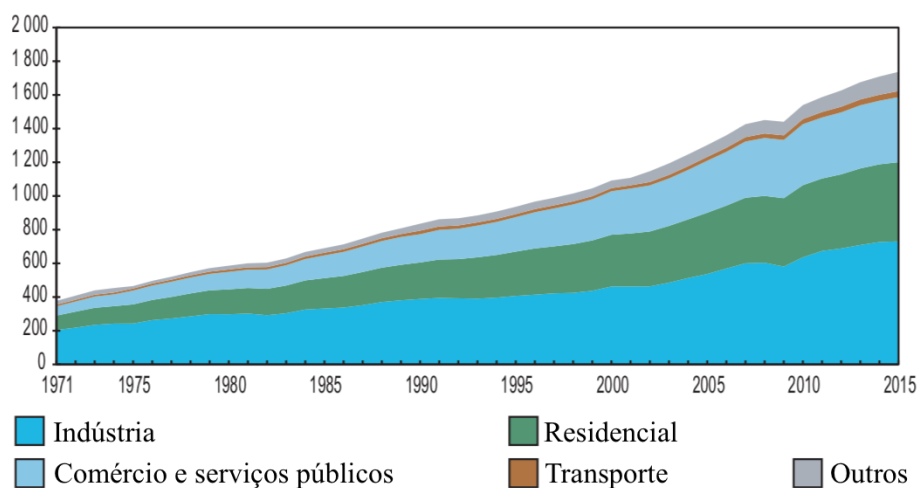


Figura 2.4 – Consumo mundial de eletricidade por setor de 1971 a 2015 em megatonelada equivalente de petróleo (Mtep).

**Fonte:** IEA – International Energy Agency. Key World Energy Statistics 2017. Disponível em: <[www.iea.org](http://www.iea.org)>. Acesso em 11 de novembro de 2018 (modificado).

Na Figura 2.5, o crescimento na utilização de todas as fontes na geração de energia elétrica é evidente, porém se observa que a energia proveniente das águas se manteve muito parecida no decorrer do tempo. A geração por queima de combustíveis fósseis, que já era alta, dobrou de tamanho entre 1971 e 2015, proporcionado pela facilidade e custo na utilização. A energia solar, inserida em outras fontes, tem pequena participação no contexto geral.

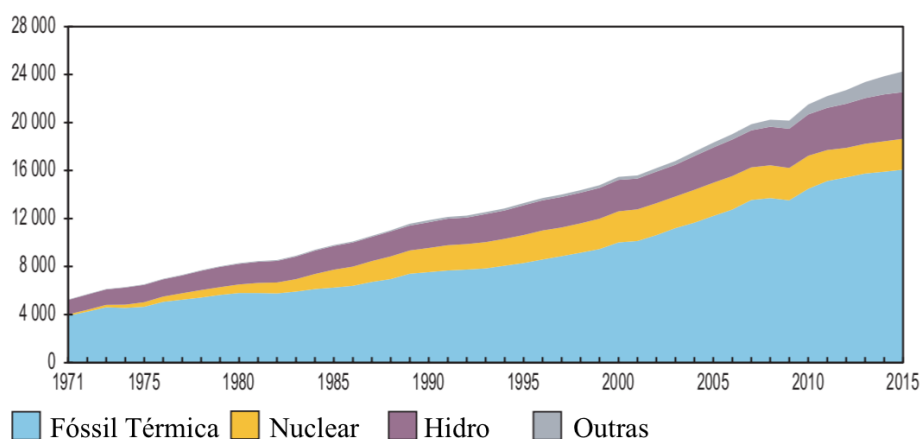


Figura 2.5 - Geração mundial da energia elétrica de 1971 a 2015 por fonte em terawatt-hora (TWh).

**Fonte:** IEA – International Energy Agency. Key World Energy Statistics 2017. Disponível em: <[www.iea.org](http://www.iea.org)>. Acesso em 11 de novembro de 2018 (modificado).

### 2.3.2. Nacional

Na origem da produção mundial de energia elétrica, era predominante o uso de energias não renováveis, principalmente por serem de uso fácil e imediato. No Brasil, por ser um país com muitos recursos naturais, especialmente com muitos corpos de água, adotou-se intensamente as energias renováveis (na sua maioria a energia hidrelétrica), como mostrado nas Figuras 2.6 e 2.7. Entretanto, a partir do século XXI, ocorreu um aumento considerável do uso de energia não-renováveis na matriz elétrica brasileira, o que preocupa quanto ao meio ambiente, por ser o tipo de energia mais prejudicial para o mesmo.

Considerando a energia solar no Brasil, a tendência, pelo favorecimento da região, é de que haja crescimento nesse setor. Países que utilizam bastante e já fizeram altos investimentos em energia solar fotovoltaica, como Alemanha, França, Reino Unido, Japão e Coreia do Sul, possuem irradiação máxima menor do que o valor mínimo encontrado no Brasil (WWF, 2016).

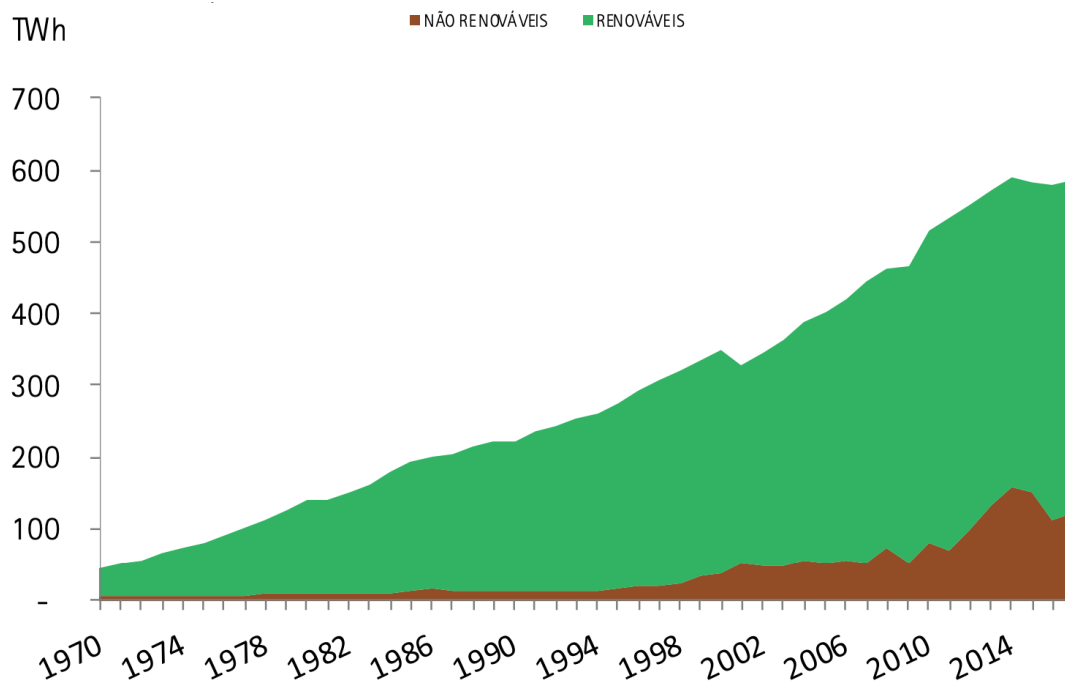
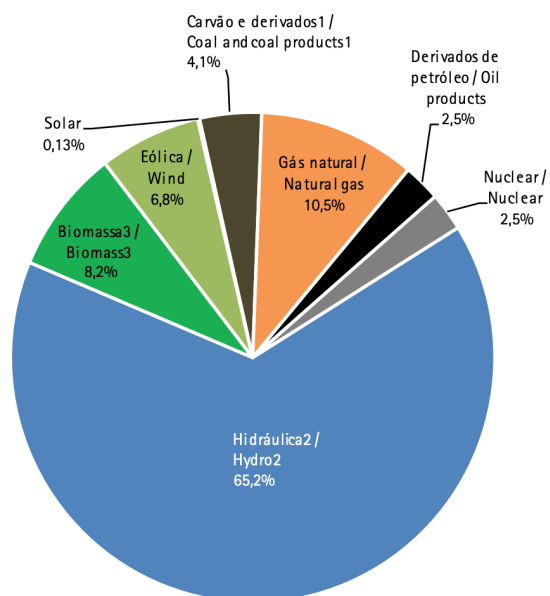


Figura 2.6 - Geração de Energia Elétrica Total.

Fonte: (EPE, 2018, p.116)



Notas / Notes:

1. Inclui gás de coqueria / Includes coke oven gas

2. Inclui importação de eletricidade / Includes electricity imports

3. Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações / Includes firewood, sugarcane bagasse, black-liquor and other primary sources

Figura 2.7 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.

Fonte: (EPE, 2018, p.16)

Considerando o histórico nacional de produção do gás natural, dado que ocorreu um crescimento substancial na sua produção, é esperado que se continue crescendo no decorrer dos anos, a expectativa de aumento é observada na Figura 2.8. O gás natural tem aparecido cada vez mais na participação da matriz energética nacional (MME, 2018). Desde 2012, o gás natural representa a segunda fonte na matriz energética nacional, atingindo essa posição após aumentar sua participação consideravelmente desde do ano 2000, como mostrado na Figura 2.9 (EPE, 2006b).

Na Figura 2.9, é possível notar que houve um crescimento no uso de gás natural para geração de eletricidade, já a hidrelétrica diminuiu sua participação na geração. Pelo que tudo indica, a tendência é de se manter essas curvas, assim, as termelétricas a gás natural ganharão cada vez mais força dentro do setor elétrico.

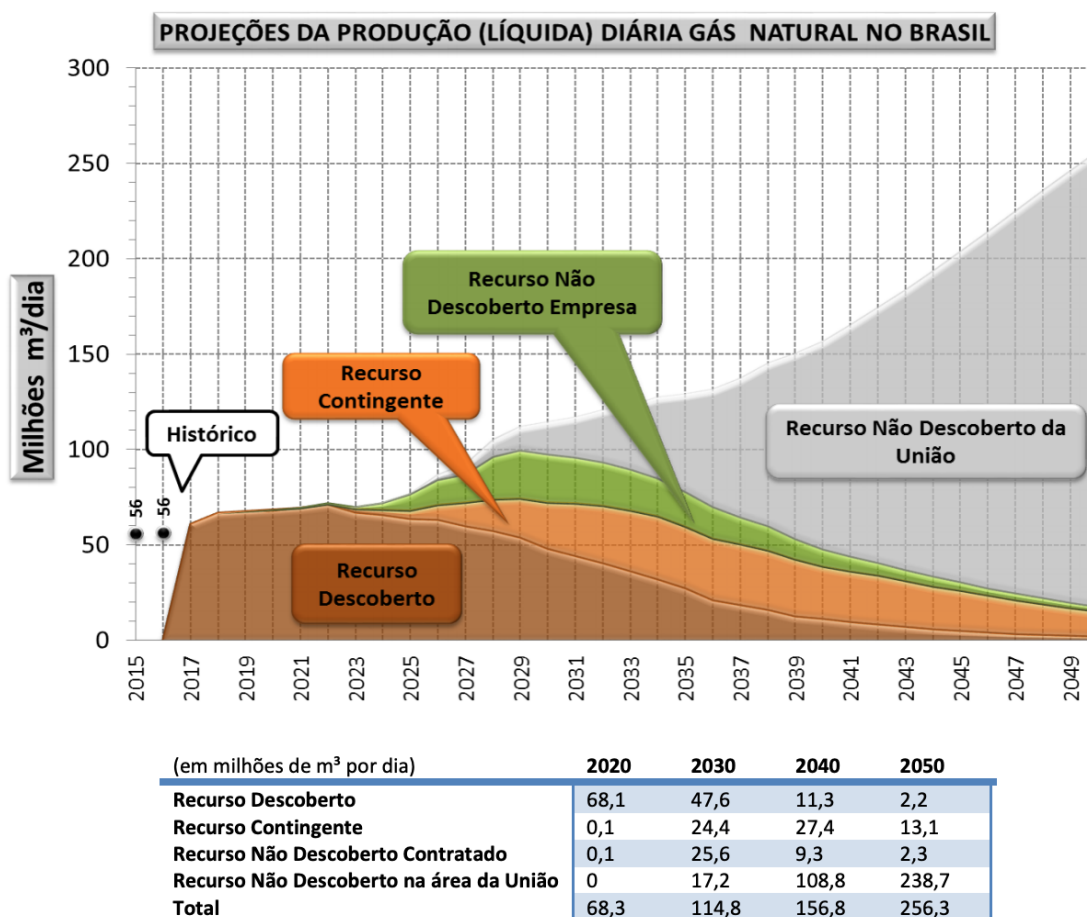


Figura 2.8 - Projeções da produção (líquida) diária de gás natural convencional no Brasil até 2050.

Fonte: (MME, 2018, p.25)



Os recursos da Figura 2.8 são divididos em recursos descobertos, já declarados comercialmente (reservas dos campos) ou que estão sob avaliação de exploração (recursos contingentes), e recursos não descobertos (recursos prospectivos), em áreas já contratadas por empresas e em áreas da União (não contratadas), de acordo com o conhecimento geológico das bacias sedimentares brasileiras (MME, 2018).

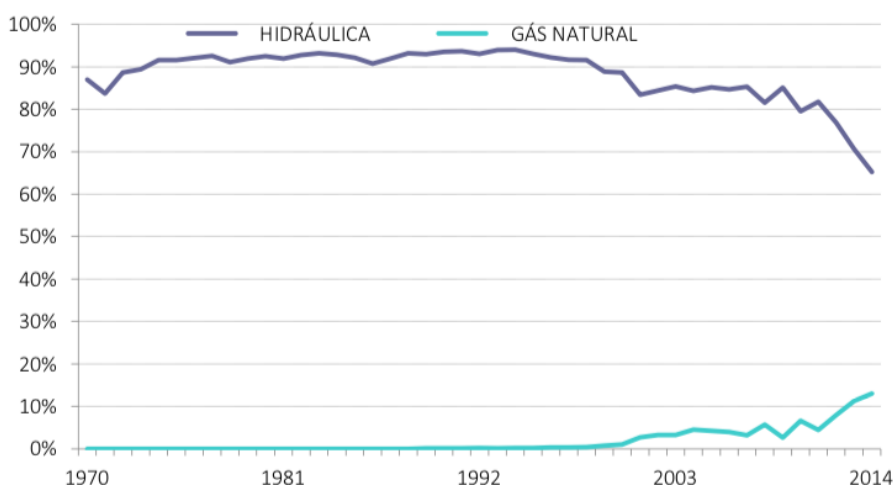


Figura 2.9 - Participação da geração hídrica e térmica a gás natural na matriz elétrica brasileira.

**Fonte:** (EPE, 2015 *apud* EPE, 2016b, p.59)

A Figura 2.10 mostra uma hipótese da COPPE para a composição da matriz elétrica brasileira em 2050, onde a geração hidrelétrica é predominante. Percebe-se que se não houver uma atenção especial para as energias renováveis, a energias provenientes de carvão e gás natural vão aumentar, causando aumento na poluição atmosférica. O cenário Fator de Eficiência Energética (FEE) representa o reflexo de programas de eficiência energética associados com a geração de energia solar descentralizada e o incentivo às energias renováveis. Com isso, não há tanta demanda de energia (PCE, 2015).

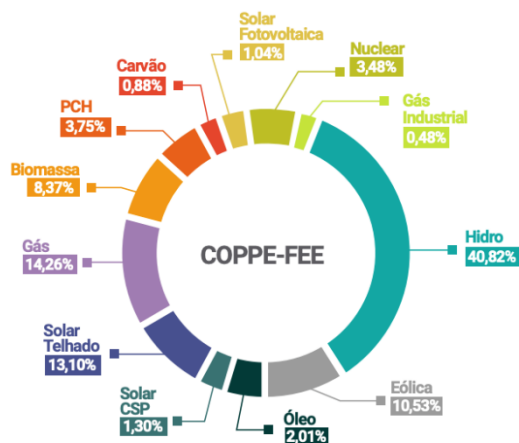


Figura 2.10 - Composição da matriz em 2050 - COPPE

Fonte: (PCE, 2015, p.58)

### 2.3.3. Distrito Federal

O Distrito Federal (DF) se encontra na região central brasileira, o que o deixa com características de várias regiões do Brasil, Figura 2.11. O uso da energia solar fotovoltaica é facilitado por sua posição geográfica e características climáticas locais, possibilitando uma elevada geração dessa energia pelo setor (WWF, 2016). Com média anual de 5,8 kWh/m<sup>2</sup> no plano inclinado, onde ocorre o melhor direcionamento possível dos raios solares, o DF possui valor médio de irradiação diária maior do que a média nacional (SAUAIA, 2015).

Quando se compara a área necessária para produção de energia solar fotovoltaica, percebe-se que não é preciso muito espaço para fornecer energia para uma região. Com toda sua região, área de 5.780 km<sup>2</sup>, o DF necessitaria somente de 24 km<sup>2</sup> de módulos fotovoltaicos para suprir toda a demanda de energia elétrica da unidade federativa (WWF, 2016).

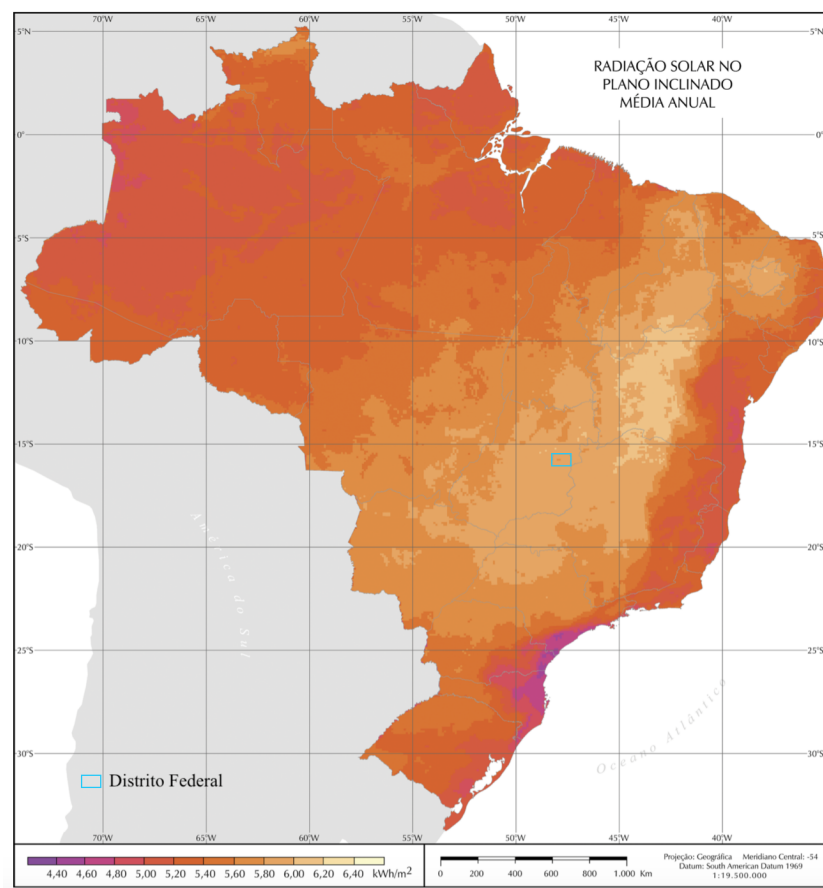


Figura 2.11 - Atlas solarimétrico brasileiro, indicando que Brasília encontra-se em região de elevada irradiação.

**Fonte:** (PEREIRA *et al.*, 2006) adaptado.

## 2.4. GASES POLUENTES

Poluentes do ar são substâncias que contaminam o ar de alguma maneira. Qualquer líquido, sólido ou gás que está presente no ar em uma concentração que pode causar problemas na saúde ou bem-estar dos seres humanos é considerado poluente do ar (COOPER; ALLEY, 2011).

Os poluentes principais são estabelecidos principalmente pelos seus danos. O Padrão Nacional de Qualidade do Ar Ambiente (*National Ambient Air Quality Standards - NAAQS*), nos Estados Unidos da América, estabeleceu poluentes padrões que são divididos em primários, emitidos diretamente, e secundários, formados na atmosfera inferior por reações químicas através de poluentes primários (COOPER; ALLEY, 2011). Os poluentes

primários e secundários que foram escolhidos como principais estão na Tabela 2.3, assim como suas características.

Tabela 2.3 - Principais poluentes do ar.

Classificação	Poluentes	Siglas	Observações
Primário	Materiais particulados	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub>	-
	Gás Carbônico	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> e outros GEE não são tipicamente tratados como poluentes do ar (RITCHIE; ROSER, 2018a)
	Diferentes Óxidos de Enxofre	SO <sub>x</sub>	Ex: SO <sub>2</sub>
	Diferentes Óxidos de Nitrogênio	NO <sub>x</sub>	Ex: NO <sub>2</sub>
	Monóxido de Carbono	CO	-
Secundário	Ozônio	O <sub>3</sub>	-
-	Compostos Orgânicos Voláteis	VOCs	-

**Fonte:** (COOPER; ALLEY, 2011).

A Figura 2.12 mostra as emissões de CO<sub>2</sub> da combustão de combustíveis, a partir dos Balanços Energéticos da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA) e das Diretrizes do IPCC de 2006, e excluem as emissões não-energéticas. As emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram no decorrer dos anos e tendem a crescer, onde o gás natural aumentou mais que o dobro na emissão de CO<sub>2</sub> entre 1971 e 2015.

O gás carbônico é altamente conhecido pelo seu potencial de efeito estufa, porém é também responsável por outros impactos. Silva *et al.* (2016) descreve que o gás carbônico lançado sem controle é um dos responsáveis pelo aumento no efeito estufa e nas chuvas ácidas, causando acidificação de rios e florestas, e problemas na fauna e flora; e causador de problemas na saúde humana devido à sua inalação.

O metano é um gás que tem o potencial de efeito estufa muito elevado, sua emissão tem aumentado e o setor energético junto com a agricultura são os que mais emitem esse tipo de gás, Figura 2.13.

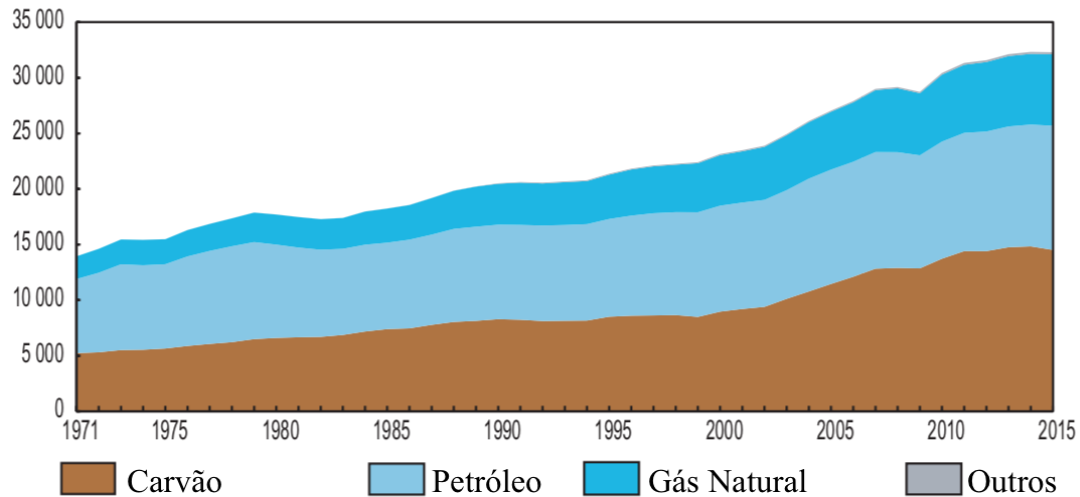


Figura 2.12 - Emissões mundiais de CO<sub>2</sub> a partir da combustão de combustíveis entre 1971 e 2015 por combustível (Mt de CO<sub>2</sub>).

Fonte: (IEA, 2017) adaptado.

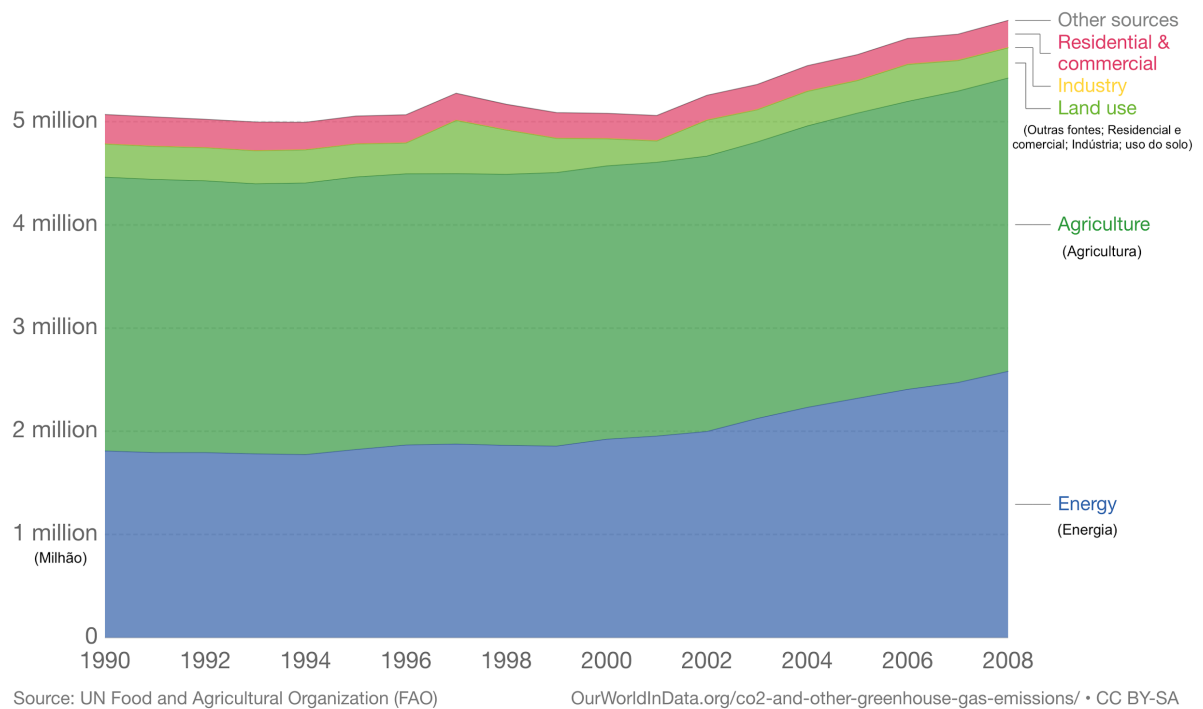


Figura 2.13 - Emissões de metano (t CO<sub>2</sub>e) por setor.

Fonte: (RITCHIE; ROSER, 2018b) adaptado.

### 2.4.1. Efeito Estufa

O efeito estufa mantém a temperatura da Terra estável, ocorre devido ao aquecimento da superfície do solo pela radiação solar e conseqüentemente aquece a atmosfera. Para que o efeito estufa funcione, a atmosfera do planeta tem que ser suficientemente transparente em comprimentos de onda visíveis para permitir que quantidades significativas de radiação solar sejam absorvidas pela superfície do planeta. A atmosfera também deve ser suficientemente opaca em comprimentos de onda térmicos para evitar que a radiação térmica emitida pela superfície do solo escape diretamente para o espaço (LACIS, 2012).

Os gases responsáveis por esse fenômeno são chamados de gases de efeito estufa (GEE). Lacis (2012) afirma que os GEE (e.g. vapor de água, gás carbônico, metano, óxido nítrico) são responsáveis pela retenção das radiações de onda longa na atmosfera terrestre, mas também há uma contribuição dos materiais particulados, como as nuvens e os aerossóis.

O gás carbônico é a medida para se analisar a quantidade de emissões de gases do efeito estufa, utiliza-se a medida dos gases em gás carbônico equivalente ( $CO_2e$ ). Ritchie e Roser (2018b) mostram, observado na Figura 2.14, que o gás carbônico é disparado o maior causador do efeito estufa, seguido metano e outros gases, respectivamente. O  $CO_2e$  é derivado da multiplicação da massa de emissões de um gás de efeito estufa específico pelo fator GWP100 equivalente. A soma de todos os gases em sua forma de  $CO_2e$  fornece uma medida do total de emissões de gases de efeito estufa. O GWP100 mede o impacto relativo de aquecimento de uma molécula ou massa unitária de um gás de efeito estufa em relação ao dióxido de carbono ao longo de um período de 100 anos (RITCHIE; ROSER, 2018b). Assim, essa medida,  $CO_2e$ , é a representação desses outros gases em forma de  $CO_2$ .

O principal problema do efeito estufa está na sua intensificação, visto que ele é essencial para a vida na Terra. Isso pode resultar em um aumento desordenado na temperatura do planeta, afetando a todos os seres vivos e ao meio ambiente.

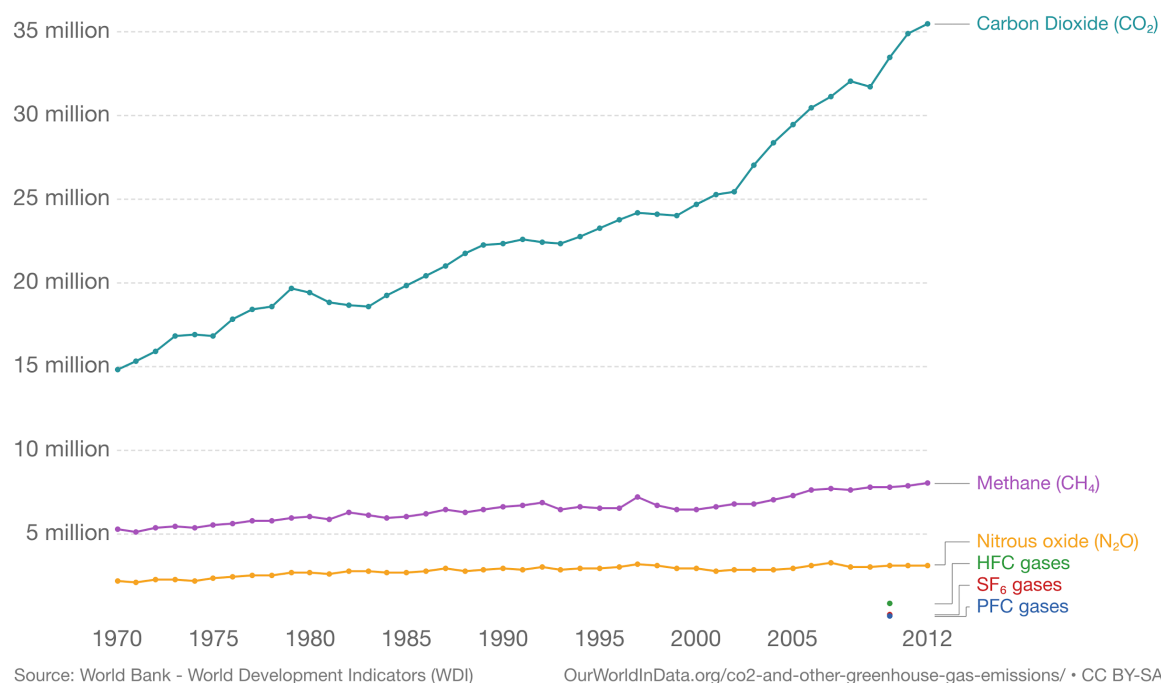


Figura 2.14 - Emissões de gases de efeito (t CO<sub>2</sub>e) no mundo por gás.

**Fonte:** (RITCHIE; ROSER, 2018b) adaptado.

#### 2.4.2. Chuva Ácida

Alguns óxidos são responsáveis pela chuva ácida, sendo que alguns são emitidos largamente com a ação antrópica. As emissões de SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> por várias fontes para a atmosfera causam a chuva ácida, eles se dissolvem na água atmosférica, formando ácidos na água da chuva (SIVARAMANAN, 2015; ESTADOS UNIDOS, 2016c).

Os efeitos da chuva ácida variam e podem ser muito graves ao meio ambiente. Sivaramanan (2015) explica que a chuva ácida remove alumínio do solo, levando-o para os corpos aquáticos próximos e intoxicando diversos seres aquáticos.

Na vegetação, a chuva ácida reduz a fotossíntese e o crescimento das plantas, também pode provocar o processo chamado de “*dieback*”, que causa escurecimento e queda das folhas. Ocorre, também, redução da biomassa (devido ao crescimento reduzido), danos ao sistema de raízes finas, diminuição de líquens, e redução da fertilidade do solo, pelo lixiviamento do potássio do solo, pela diminuição de fósforo, que causa redução da produção de frutas, acumulação de metais tóxicos, como o zinco e o alumínio. A toxicidade do alumínio retarda o crescimento da raiz e causa a perda de clorofila (SHARMA; KAUR, 1994 *apud* SIVARAMANAN, 2015).

## **2.5. ANÁLISE DE CUSTO**

### **2.5.1. Externalidades Ambientais**

As externalidades ambientais são uma classe exclusiva de efeitos externos do mercado. Ocorrem com os impactos ambientais das atividades de produção e consumo; quando geram benefícios, chamados de externalidades positivas, ou custos não compensados, chamados de externalidades negativas (EIDELWEIN *et al.*, 2017).

Nos dias atuais, é essencial que todo empreendimento considere três princípios fundamentais: a poluição é a responsabilidade daqueles que a geram; uma visão de longo prazo deve orientar todas as decisões e a contabilidade; e o governo é um meio de catalisar subsídios para o desenvolvimento de tecnologia limpa e crescimento, evitando a destruição ambiental (LARKIN, 2013 *apud* MANSILHA, 2018).

Estima-se que as atividades dos setores primários da economia causem custos ambientais externos de US\$ 7,3 trilhões por ano, em média, no mundo. De acordo com números de 2009, esse valor equivale a 13% da produção econômica (TRUCOST, 2013 *apud* EIDELWEIN *et al.*, 2017). Tentar evidenciar essas externalidades o quanto antes pode significar em menores custos para a economia e a sociedade ao longo dos anos. Por exemplo, ações de redução nas emissões de gases de efeito estufa, que é uma das principais fontes de externalidades ambientais, poderiam custar cerca de 1% do PIB global a cada ano, menos do que o atual dano estimado desses gases, 5% (STERN, 2007 *apud* EIDELWEIN *et al.*, 2017).

As externalidades ambientais precisam ser internalizadas na economia. Assim, é fundamental que se demonstre claramente como elas impactam o meio econômico e a sociedade, fazendo com que sejam entendidas pela a sociedade.

### **2.5.2. Custo Social da Geração de Eletricidade**

O custo social da geração de eletricidade refere-se ao custo para a sociedade, inclui os custos privados, suportados por pessoas físicas, empresas ou outras entidades privadas que realizam uma ação, e os custos externos sobre o meio ambiente e a sociedade, que atualmente não são expressos nos preços de mercado (WRC, 2007). Pode-se considerar diferentes questões ambientais para integrarem o custo. As interações ambientais são muito complexas, o que gera muitas incertezas. Além disso, muitos os impactos ocorrem longe da fonte da carga e com atrasos significativos (SAMADI, 2017).



O custo social do carbono (CSC) serve para medir a disponibilidade em pagar para evitar os danos futuros que resultariam de uma unidade de CO<sub>2</sub> emitida em um determinado ano, descontado a esse ano. Em princípio, o CSC abrange os impactos da mudança climática, incluindo agricultura, produção de energia, disponibilidade de água, saúde humana, comunidades costeiras, biodiversidade, inundações e assim por diante (MARTEN; NEWBOLD, 2012; KOPITS, 2015).

Kopits (2015) esclarece que o CSC fornece uma medida dos danos das emissões de CO<sub>2</sub> e, portanto, o benefício da redução na emissão. O custo social permite que se tenha uma análise consistente para a análise custo-benefício.

Embora as estimativas de danos agregados da mudança climática sejam úteis na formulação de políticas de mitigação de GEE, elas são frequentemente necessárias por razões políticas mais cotidianas. Os governos utilizam o CSC em decisões sobre a regulamentação ao implementar políticas de energia, como, por exemplo, padrões de combustível (IPCC, 2014b).

Deve-se enfatizar que o cálculo do CSC é altamente sensível à trajetória futura projetada das emissões e também a qualquer regime regulatório atual ou futuro. Devido ao seu potencial uso na formulação de políticas reguladoras de clima ou energia, os governos solicitam estimativas de CSC (IPCC, 2014b).

Existem várias dificuldades na determinação dos custos sociais, ou seja, a estimativa de custo da mudança no bem-estar social resultante de uma mudança marginal nas emissões. Para estimar o CSC, são normalmente usados os Modelos Integrados de Avaliação (IAMs), que estimam custos de um determinado nível de mudança climática. Um IAM combina um modelo econômico global com um modelo do sistema climático físico e o ciclo do carbono. Uma questão importante relacionada à variabilidade das estimativas do CSC é a incerteza relacionada às futuras mudanças climáticas, assim como seus impactos econômicos e o potencial das sociedades para se adaptarem (SAMADI, 2017).

Não se conseguiu muita informação sobre outras metodologias de custo de emissões, o que fez o custo social da eletricidade ser exclusivo nas considerações. Essa é uma área precisa de muitos estudos ainda. O fato do custo social ser utilizado por governos favoreceu a escolha desses valores.

### **3. METODOLOGIA**

No capítulo anterior, apresentaram-se as definições de dois tipos de energias renováveis, energia solar fotovoltaica e energia hidráulica, e um tipo de energia não-renovável, energia termelétrica a gás. Seus aspectos positivos e negativos também foram apresentados, podendo fazer, assim, uma comparação prévia e ambiental a partir da instalação e operação dos respectivos sistemas. Pode-se analisar inicialmente o potencial da energia solar fotovoltaica devido aos fatores externos para a sua geração de eletricidade.

Alguns aspectos econômicos foram citados e discutidos relacionados às fontes energéticas, porém apenas aspectos ligados às questões econômicas de materiais e de uso do recurso, desconsiderando o que os danos ambientais da utilização de cada um poderiam causar.

Para a análise utilizada nesse estudo, serão consideradas as comparações entre a energia solar fotovoltaica e energia termelétrica a gás. A escolha da energia solar fotovoltaica se deu devido ao fato de ser uma matriz renovável e com poucos impactos ambientais relacionados. Em relação à outra energia comparada, a seleção foi feita por ser a energia que está nos planos de crescimento do setor energético para maior aumento na produção.

Foram apresentados os cenários energéticos mundial, mostrando a relevância de cada fonte no mundo, e nacional, onde a energia hidráulica é a predominante, porém com menos poder de comparação nesse estudo, por não ser a principal matriz que irá crescer no Brasil.

O local para o estudo de caso é a Universidade de Brasília no Campus Darcy Ribeiro, local que possui bastante espaço na cobertura de seus edifícios, na maioria de poucos andares, e recebe grande quantidade de radiação solar, como mostrado e discutido no capítulo 2 deste trabalho. O Distrito Federal foi revisado, também, para conhecimento do seu potencial de energia fotovoltaica.

O estudo em foco visa fazer uma análise econômica comparativa da utilização das energias solar fotovoltaica e termelétrica a gás, utilizando no seu desenvolvimento fatores ambientais, que podem ser também impactantes na saúde humana, não apenas no meio ambiente. Assim, neste capítulo, serão descritos o procedimento metodológico e seus materiais necessários para sua execução. Primeiramente, são calculadas as emissões dos gases para as diferentes tecnologias. Depois, são calculados os custos dessas emissões e os custos das tecnologias sem as externalidades ambientais. Por último, é feita uma comparação econômica sobre os

valores com e sem as externalidades, e é definido quanto de impacto é gerado devido a quantidade de emissão de gases poluentes. Os valores utilizados são para o estudo de caso de implementação de energia solar fotovoltaica como fonte única de eletricidade no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, definindo seu tamanho necessário e os respectivos valores econômicos a partir da utilização de energia elétrica média do local.

O fluxograma deve ser seguido de acordo com o tipo de energia em análise e suas tecnologias. Para o estudo, serão considerados: energia solar fotovoltaica e energia termelétrica a gás, de ciclo simples (somente turbina a gás para geração de energia) e de ciclo combinado (acrescenta uma turbina a vapor que aproveita o calor da turbina a gás para geração de energia).

As fontes de dados foram diversas, apresentavam diferentes unidades monetárias e cotações. Então, todos os valores monetários utilizados foram convertidos para o real brasileiro (R\$) do ano de 2018 de acordo de acordo com a média das cotações diárias de 2018 em comparação ao dólar (\$).

Vale ressaltar que a metodologia se concentra na obtenção de valores das questões ambientais presentes no valor usual utilizado para os sistemas. Não há foco em como poderia ser construída uma usina fotovoltaica no âmbito na Universidade de Brasília, visto que trabalhos estudaram a implementação de painéis fotovoltaicos no campus estudado e comprovaram capacidade de utilização (BERTASSO, 2016; EVANGELISTA, 2018; GREGORIO, 2017).

Na Figura 3.1, a metodologia está expressa na forma de fluxograma, com as entradas, desenvolvimento e saídas definidas.

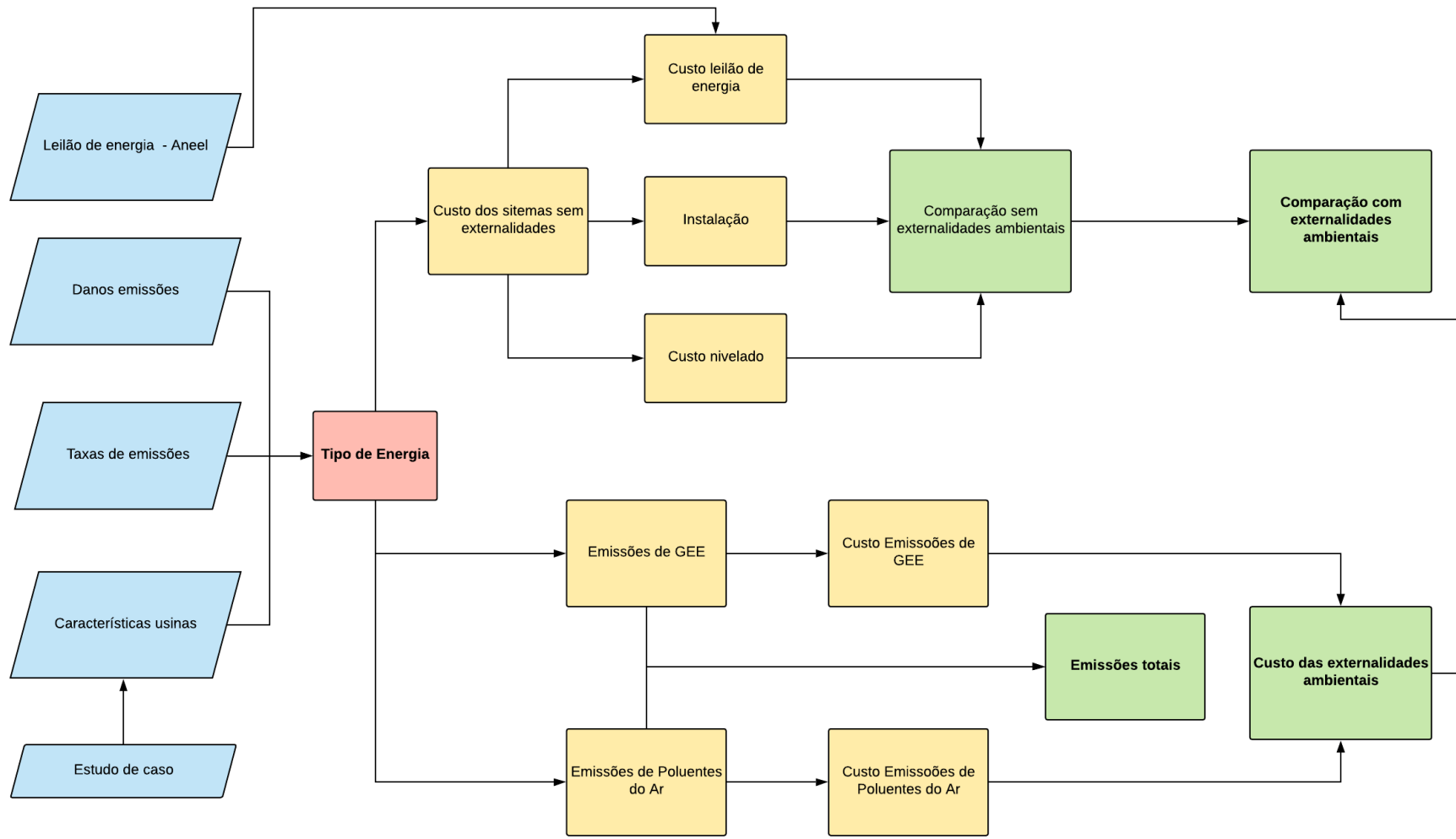


Figura 3.1 - Fluxograma Metodologia.

### 3.1. EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA E POLUENTES DO AR

O primeiro passo é o cálculo das emissões dos gases, onde foram considerados os gases do efeito estufa e os poluentes do ar. Para este estudo, é definido como relevante, para gases do efeito estufa, o gás carbônico e o metano; e para os poluentes do ar, o dióxido de enxofre, os óxidos de nitrogênio, e os materiais particulados de diâmetro menor que 10 e 2,5 micrómetros. Essas escolhas se deram pelo potencial de aquecimento global, efeito na saúde e disponibilidade de dados, como foi explicado na revisão bibliográfica.

A Equação (3.1) apresenta a somatória das emissões totais ( $Emissões_{Totais}$ ) a partir da escolha dos poluentes para análise, que será feita para as duas classificações de poluentes mencionadas anteriormente

$$Emissões_{Totais} = \sum_{j \in \theta} Emissões_{j,k} \quad (3.1)$$

Onde:

$Emissões_{Totais}$  : Emissões totais (toneladas);

$Emissões_{j,k}$  : Emissões tipo  $k$  de um poluente  $j$ , sendo  $\theta$  o conjunto de poluentes que inclui  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $PM_{10}$  e  $PM_{2,5}$  (toneladas).

Para fazer a somatória das emissões na Equação (3.1), é necessário calcular a emissão de cada poluente individualmente. Nesta etapa, é preciso saber qual é o tipo de emissão ( $k$ ) do poluente, de implantação, descomissionamento ou operação. Emissões de implantação e descomissionamento são emissões únicas que acontecem na construção da usina/materiais ou no processo de descomissionamento, respectivamente. As emissões de operação podem ser de combustão ou não. Quando há queima direta para a geração de energia, é considerado combustão. As emissões de não combustão são devidas ao vazamento pelas tubulações ou extração do combustível utilizado.

Quando  $k$  é de implantação ou descomissionamento, usa-se a Equação (3.2):

$$Emissões_{j,k} = R_{j,k} \times P \times 10^{-6} \quad (3.2)$$

Onde, na Equação (3.2):

$R_{j,k}$  : Taxa de emissão tipo  $k$  de um poluente  $j$  (g/kW);

$P$  : Potência da usina (kW).

Quando  $k$  é de operação, usa-se a equação (3.3):

$$Emissões_{j,k} = R_{j,k} \times C_m \times VU \times 10^{-6} \quad (3.3)$$

Onde, na Equação (3.3):

$R_{j,k}$  : Taxa de emissão tipo  $k$  de um poluente  $j$  (g/kWh);

$C_m$  : Consumo médio energia elétrica (kWh/ano);

$VU$  : Vida útil da usina (anos).

A Equação (3.2) utiliza valores de potência e taxa de emissão com unidades de massa por unidades de potência pois são dependentes da capacidade de operação da usina. Já a equação (3.3) é contínua, então precisa saber da produção de energia ao longo de todo o tempo de operação, utilizando assim a taxa de emissão com unidades de massa por unidades de energia e o consumo médio de energia no estudo de caso.

Os valores taxas de emissões podem ser observadas de acordo com a literatura. Rhodes *et al* (2017) assume os valores para as taxas em diferentes tecnologias, na Tabela 3.1. As taxas de emissão de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> para cada tipo de usina foram usadas para cada tecnologia a partir da *U.S. Energy Information Administration* (ESTADOS UNIDOS, 2013). As taxas de emissões da EIA assumem que a usina contém a melhor tecnologia comercial disponível (BACT). Estão dispostos os valores de emissões de ciclo de vida de não combustão associadas a cada tipo de usina (Mai *et al.*, 2012 *apud* RHODES *et al.*, 2017) e as taxas de combustão para os poluentes do ar (Rhodes *et al.*, 2017).

Pelos dados na Tabela 3.1, percebe-se energia solar fotovoltaica não emite gases na sua operação, então sua análise é feita na construção e finalização. Já a termelétrica apresenta mais influência na poluição no decorrer de sua operação.

Algumas variáveis podem causar interferências nos dados de poluentes do ar, como a influência de regiões frias ou quentes, cidades com problemas de poluição, pessoas com problemas de saúde, entre outros. Portanto, é fundamental analisar os dados utilizados para saber de onde são e como podem ser relacionadas com diferentes regiões.

No trabalho em questão, será estudado a cidade de Brasília, mais exclusivamente no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Com a escolha dos poluentes, pode se calcular a quantidade de emissões produzidas pela fonte. Será analisada, então, a produção de poluentes no decorrer dos anos, início e fim. Quando forem analisados os números de poluição, deve-se relacionar com a capacidade do tipo de energia termelétrica em cada ano e nas projeções para os próximos anos.

As emissões fugitivas do metano representam as emissões que escapam por algum processo do sistema energético, como a obtenção de combustível ou tubulações com vazamento.

Tabela 3.1 - Taxas de emissão do ciclo de vida (g/kW(h)) de CO<sub>2</sub>-eq (GEE), as taxas de emissão de combustão das melhores tecnologias disponíveis no mercado (g/kWh) de poluentes atmosféricos e as taxas de emissões de CH<sub>4</sub> (g/kWh) associado às tecnologias consideradas.

Tecnologia	Implantação (g CO <sub>2</sub> -eq/kW)	Operação* (g CO <sub>2</sub> -eq/kWh)	Descomissionamento (g CO <sub>2</sub> -eq/kW)	Combustão (g/kWh)					Fugitivo CH <sub>4</sub> * (g/kWh)
				SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	CO <sub>2</sub>	
Termelétrica a gás natural ciclo combinado (TGCC)	160.000	74,4	6390	0,003	0,022	0,054	0,05	341,5	1,58
Termelétrica a gás natural ciclo simples (TGCS)	6.800	85,8	98,6	0,005	0,133	0,054	0,05	517,9	2,39
Solar PV	1.630.000	0	37.800	0	0	0	0	0	0

\*: Assumindo uma taxa média de vazamento da estrutura e do metano de 1%.

**Fonte:** (RHODES *et al.*, 2017) adaptado.



### 3.2. CUSTO DE GASES DO EFEITO ESTUFA E POLUENTES DO AR

Sabendo como se calculam as emissões, é possível calcular os valores dos sistemas utilizados. Os custos econômicos das emissões ( $Custo_{emissões}$ ) é calculado a partir da somatória dos produtos de emissões pelo dano de cada poluente. Mais uma vez, o tipo de emissão  $k$  é importante para definir cada dano. Os danos financeiros mostram o prejuízo que os poluentes causam na economia, todos os valores estão em reais neste documento, pela quantidade de poluentes emitidos.

As externalidades nas Equação (3.4) refletem o custo das emissões no aquecimento global e na saúde humana. A emissões de gases com efeito de estufa estão numa base equivalente ao dióxido de carbono ( $CO_{2-eq}$ ) associada a emissões únicas no início (ou seja, a construção de uma central energética), emissões de operação de não combustão e combustão (ou seja, extração de combustível, combustão de  $CO_2$ , etc), e emissões de descomissionamento das centrais elétricas (RHODES *et al.*, 2017).

A Equação (3.4) mostra como se calcula os custos das emissões:

$$Custo_{emissões} = \sum_{j \in \theta} (Emissões_{j,k} \times Dano_{j,k}) \quad (3.4)$$

Onde:

$Custo_{emissões}$  : Custo econômico das emissões (R\$);

$Dano_{j,k}$  : Dano econômico da emissão tipo  $k$  de um poluente  $j$  (R\$/toneladas).

Os custos dessas emissões são calculados para as emissões de gases do efeito estufa e de poluentes do ar, separadamente. Essas externalidades serão incluídas nos valores dos sistemas elétricos escolhidos.

Danos contínuos de CO<sub>2</sub> por vida útil da usina podem ser achados em diferentes referências, porém foi usado como base o documento técnico do governo dos Estados Unidos. Os danos não relacionados com o CO<sub>2</sub> serão assumidos como iguais, independente da região. Entretanto, é necessário ressaltar que os danos causados pela poluição variam de acordo com a região, pois sofrem influência de fatores locais, como condições meteorológicas, densidade populacional e níveis de poluição existentes. Os danos associados às emissões de operação de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> serão padronizados entre as referências, porém não são iguais aos poluentes do ar, não sofrem apenas ação local pois estão relacionados ao aquecimento global, que é uma questão mundial, também. Esses danos causam problemas locais também, como aumento de precipitação, enchentes, secas e elevação do nível do mar.

As taxas do setor representam os valores que seriam aplicados para custear os danos dos poluentes do ar e se dividem em três grupos, valores altos, médios e baixos, pois de acordo com a variação de valores relatados na literatura recente para os custos desses poluentes na saúde humana. São descritos como alta, média e baixa taxa, representando as taxas que seriam aplicadas ao setor energético caso os poluentes do ar fossem levados em consideração. Assim sendo, essas taxas representam um valor otimista (baixa taxa do setor), um valor médio (média taxa do setor) e um valor pessimista (alta taxa do setor) para os danos causados. As baixas taxas específicas do setor são derivadas de Muller *et al.* (2011 *apud* BROWN *et al.*, 2017), as taxas médias são de NRC (2010 *apud* BROWN *et al.*, 2017), e as altas taxas de Fann *et al.* (2012 *apud* BROWN *et al.*, 2017). Esses danos foram gerados pela análise de problemas à população, mortalidades por poluição e exposição aos poluentes.

Os danos, custos sociais ou valor das externalidades, das usinas estão expostos na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3, de acordo com o tempo de vida das usinas, a taxa de desconto e a taxa do setor.

Tabela 3.2 - Hipóteses para o custo dos danos ambientais (R\$/ton), custos sociais, de CO<sub>2</sub> (combustão e não-combustão) e CH<sub>4</sub> (emissões fugitivas) para vida útil de 25 anos, associados às emissões de operação, implantação e descomissionamento.

Poluente	Dano	Tempo (Anos)	Taxa de desconto	
			5%	3%
CO <sub>2</sub>	Operação (R\$/ton)	25 (2020 até 2045)	61,84	190,39
	Implantação (R\$/ton)	0 (2020)	43,87	153,53
	Descomissionamento (R\$/ton)	25 (2020 até 2045)	84,08	233,95
CH <sub>4</sub>	Operação (R\$/ton)	25 (2020 até 2045)	3.029	6.184

**Fonte:** (ESTADOS UNIDOS, 2016a; ESTADOS UNIDOS, 2016b).

Tabela 3.3 - Hipóteses para o custo dos danos ambientais (R\$/ton) de poluentes do ar para vida útil de 25 anos, associados às emissões de operação.

Poluente	Dano	Tempo (Anos)	Taxa do setor		
			Baixa	Média	Alta
SO <sub>2</sub>	Operação (R\$/ton)	25 (2020 até 2045)	6.821	35.641	115.148
NO <sub>x</sub>			1.331	7.201	17.181
PM <sub>10</sub>			713	4.076	15.024
PM <sub>2,5</sub>			8.265	78.666	428.059

**Fonte:** (MENDELSON; NORDHAUS, 2011; NRC, 2010; FANN *et al.*, 2012 *apud* BROWN *et al.*, 2017).

Os danos contínuos do CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> foram estabelecidos de acordo com as médias dos anos de operação, que foi assumido de 2020 até 2045 (25 anos de vida útil). Fabricantes de módulos de silício cristalino garantem vida útil de 25 anos nos produtos (CRESESB, 2014). Isso foi necessário pois os valores desses custos variam no decorrer do tempo para esses gases, porém os valores de dano de operação dos poluentes do ar não sofrem variação no decorrer, apenas a taxa de desconto irá atuar no tempo.

As taxas de desconto servem para representar um valor no ano em análise de um pagamento futuro, ou seja, o quanto de dinheiro seria necessário agora para pagar os danos ambientais no futuro. As taxas de desconto usadas foram de 5% como representação do mercado brasileiro devido a taxa de juros brasileira ser próxima, e 3% como representação do mercado nos Estados Unidos da América (ESTADOS UNIDOS, 2016a; ESTADOS UNIDOS 2016b).

Observa-se que os valores para os danos das emissões de implantação e descomissionamento são diferentes e baseados no Custo Social do Carbono correspondente ao ano. Por exemplo, os danos causados pela construção de uma nova fábrica em 2020 são diferentes dos danos causados pelas emissões associado a demolição no fim da vida em 2045.

Os danos dos gases de efeito estufa são resultados de vários processos. A estimativa do CSC envolve 4 etapas, respectivamente: Conversão do PIB e população em emissões de CO<sub>2</sub>; Conversão das emissões de CO<sub>2</sub> em mudanças na temperatura global média; Estimativa do impacto da temperatura no ambiente físico e econômico; Descontar os danos climáticos, expresso em porcentagem do PIB (KOPITS, 2015).

O Grupo de Trabalho Interagencial (*Interagency Working Group* - IWG) utilizou Modelos Integrados de Avaliação (IAMs) para a obtenção dos valores dos gases do efeito estufa. Utilizou 3 Modelos Integrados de Avaliação (IAMs), DICE, PAGE e FUND. Aplicou-se um conjunto comum de suposições em cada modelo para: Trajetórias da população futura, crescimento econômico e emissões de GEE; Sensibilidade ao equilíbrio do clima - uma medida da resposta do sistema climático ao aumento das concentrações de GEE na atmosfera; Taxas de desconto (KOPITS, 2015). Esses IAMs, as melhores ferramentas para estimar o CSC, combinam processos climáticos, crescimento econômico e *feedbacks* (ESTADOS UNIDOS, 2016a; ESTADOS UNIDOS 2016b).

### 3.3. CUSTO DOS SISTEMAS ENERGÉTICOS SEM EXTERNALIDADES AMBIENTAIS

Após saber como se calculam as externalidades ambientais, que não são usadas nos cálculos tradicionais de custo energia, é necessário adicioná-las no custo de energia padrão. Assim, serão utilizados três modos de cálculo desses sistemas no mercado brasileiro: através do uso dos valores vendidos no leilão de energia da ANEEL, através do custo de instalação das usinas, e através do custo nivelado.

Os sistemas de energia fotovoltaica foram todos considerados *On-Grid*, ou seja, ligados direto à rede elétrica local. Não se faz necessário, então, analisar preços da instalação de baterias para carregamento no sistema.

#### 3.3.1. Custo Total com Valores do Leilão de Energia

O custo dos sistemas com os valores do leilão utiliza o consumo médio da UnB e a vida útil do sistema:

$$Custo_{leilão} = Valor_{Leilão} \times C_m \times VU \times 10^{-3} \quad (3.5)$$

Onde:

$Custo_{leilão}$  : Custo do sistema sem externalidades utilizando valores do leilão de energia (R\$);

$Valor_{Leilão}$  : Valor de venda da energia no leilão de energia da ANEEL (R\$/kWh)

### 3.3.2. Custo de Instalação

Custo de instalação está relacionado com os valores de investimentos para a construção dos sistemas. Representa um valor sem nivelamento dos anos. O custo de instalação para energia termelétrica está descrito na Equação (3.6):

$$Custo_{Instalação\ Ter} = Valor_{Usina} \times P \quad (3.6)$$

Onde:

$Custo_{Instalação\ Ter}$  : Custo de instalação da usina termelétrica sem externalidades (R\$);

$Valor_{Usina}$  : Valor do investimento por potência do sistema (R\$/kW)

$P$  : Potência do sistema (kW).

O custo de instalação para energia fotovoltaica está descrito na Equação (3.7):

$$Custo_{Instalação\ FV} = Valor_{Wp} \times P \times 10^3 \quad (3.7)$$

Onde:

$Custo_{Instalação\ FV}$  : Custo de instalação da usina fotovoltaica sem externalidades (R\$);

$Valor_{Wp}$  : Valor gasto por potência de pico (R\$/Wp).

### 3.3.3. Custo Total com Custo Nivelado da Energia (*Levelized Cost of Electricity*)

O custo nivelado da energia/eletricidade (LCOE) é uma medida tipicamente empregada para comparar diferentes tipos de geração de eletricidade, com unidade R\$/kWh, onde significa a quantidade de dinheiro gasta por uma fonte de eletricidade ao produzir um kWh de eletricidade durante sua vida útil. Rhodes *et al.* (2017) explica que o LCOE oferece várias vantagens, como a capacidade de normalizar custos em um formato consistente através de décadas e tipos de tecnologia. A projeção futura do LCOE para usinas de combustíveis fósseis e nucleares é bastante complicada devido à incerteza dos custos futuros de combustível, fatores de capacidade e regulação (RHODES *et al.*, 2017).

Há grande importância na utilização das externalidades ambientais para gerar um valor que entre nos cálculos de custo, principalmente pelo fato de matrizes menos poluentes, serem, na sua maioria, mais caras. No decorrer dos anos, houve tentativas de incluir as externalidades ambientais dentro dos custos de eletricidade (COHON, 2010; EPSTEIN *et al.*, 2011; WITTENSTEIN; ROTHEWLL, 2015 *apud* RHODES *et al.*, 2017).

O custo nivelado total pode ser obtido com a equação a seguir:

$$Custo_{Nivelado\ Total} = Custo_{Nivelado} \times VU \times C_m \times 10^{-3} \quad (3.8)$$

Onde:

$Custo_{Nivelado\ Total}$ : Custo nivelado total da usina (R\$);

$Custo_{Nivelado}$ : Custo nivelado da usina por produção de energia (R\$/MWh).

O custo nivelado total representa o valor completo (R\$) para uma usina produzir uma certa quantidade de energia em seu tempo de vida útil. O custo nivelado da energia (LCOE) é o valor necessário para produzir uma unidade de energia (R\$/MWh) e foi obtido através da calculadora do *Webber Energy Group* disponível na internet (WEBBER, 2014).

O *Webber Energy Group* é um grupo de pesquisa do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Texas em Austin que aborda questões críticas de energia e meio ambiente na interseção entre engenharia, política e comercialização. O grupo é composto, principalmente, por pesquisadores acadêmicos de graduação e pós-graduação, e profissionais de uma variedade de disciplinas de engenharia, política e ciência.

O LCOE considera os custos da usina ao longo de toda sua vida. Esses custos incluem construção, operação, financiamento, entre outros. A Tabela 3.4 expõe os valores de cada parâmetro utilizado no cálculo do LCOE para as diferentes tecnologias que serão comparadas no trabalho.

Tabela 3.4 - Dados para o cálculo do custo nivelado de energia (LCOE) para cada tecnologia diferente, usando como base valores da EPE

	<b>Unidade</b>	<b>TGCC</b>	<b>TGCS</b>	<b>FV</b>
Potência usina (MW)	MW	4	4	13,5
Fator de capacidade (%)	%	70	30	24
Custo do combustível	R\$/MMBtu	37	37	0
Taxa de calor	Btu/kWh	6550	9300	0
Custo fixo de operação e manutenção	R\$/kW-ano	66	48	69
Custo variável de operação e manutenção	R\$/MWh	22	15	0
Custo de investimento	R\$/kW	4021	2924	6397
Taxa de juros	%	5	5	5

**Fonte:** (EPE, 2016a; EPE, 2016b).



O valor de potência da usina para as termelétricas foi definido a partir da análise da demanda máxima nos dias úteis de 2017 na UnB, sendo 4 MW maior do que qualquer valor desse mesmo ano (GREGORIO, 2017). Entretanto, para suprir a mesma energia na geração fotovoltaica, o sistema deve ter uma potência maior, pois não há irradiação 24 horas por dia. Assim, foi definido 5h de sol pleno para suprir 2.000.000 kWh/mês, 66.667 kWh/dia, resultando em, aproximadamente, 13,5 MW para suprir a energia diária demandada.

### **3.4. ESTUDO DE CASO: CAMPUS DARCY RIBEIRO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

A Universidade de Brasília, situada em Brasília, possui grande espaço territorial e edifícios que são predominantemente horizontais. Assim, favorecendo a utilização de energia fotovoltaica, ao analisar apenas sua parte estrutural.

O campus Darcy Ribeiro da UnB tem a área total de 3.950.579,07 m<sup>2</sup>, onde 552.171,40 m<sup>2</sup> representa a área construída, e possui aproximadamente 40.000 pessoas usando seu espaço. (UNB, 2012). Isso mostra que este estudo serve para comparação com cidades pequenas, com o número de habitantes parecido.

A Tabela 3.5 mostra os valores utilizados para comparação entre as diferentes tecnologias no estudo de caso do trabalho, o Campus Darcy Riberio da Universidade de Brasília. Os valores de potência das usinas foram estabelecidos de acordo com o consumo médio de energia elétrica no campus Darcy Ribeiro da UnB (2.000.000 kWh/mês).

O consumo de energia da UnB foi utilizado como um valor médio, aproximado do valor presente na conta de energia da universidade. Os valores de ponta e fora de ponta foram somados, resultando num valor de 1.982.192 kWh/mês, arredondado para 2.000.000 kWh/mês (BERTASSO, 2016).

Tabela 3.5 - Dados utilizados para o estudo de caso no Campus Darcy Ribeiro da UnB, tendo em vista o que seria necessário para utilização da energia elétrica em 100% do campus.

Dados Estudo de Caso	Unidade	Valor
Consumo Médio Ano	kWh/ano	24.000.000
Consumo Médio Mês	kWh/mês	2.000.000
Consumo Médio Dia	kWh/dia	66.667
Potência FV Usina*	kW	13.500
Potência Gás Natural Max. Necessária*	kW	4.000
Vida Útil Usinas	Anos	25
Custo por Wp Usina FV*	R\$/Wp	3,66
Custo completo UTE TGCC médio*	R\$/kW	4.021,05
Custo completo UTE TGCS médio*	R\$/kW	2.924,40
LCOE UTE TGCC médio 5%*	R\$/MWh	318,03
LCOE UTE TGCS médio 5%*	R\$/MWh	453,28
LCOE FV médio 5%*	R\$/MWh	248,57

\*: Referente aos valores necessários para suprir a energia média consumida na UnB.

**Fonte:** (BERTASSO, 2016; GREENER, 2019; MGONJA; SAIDI, 2017; RHODES *et al.*, 2017).

A usina fotovoltaica não produz energia 24 horas por dia, precisando suprir a mesma quantidade de energia da termelétrica em menos tempo. Já a energia termelétrica pode produzir ao longo de todo o dia. Para a usina FV, foi estabelecido que seriam 5 horas de sol pleno, onde teriam que ser produzidos toda a energia diária necessária. Brasília recebe em média 5 horas de sol pleno por dia durante o ano todo (BERTASSO, 2016).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo, são apresentados os resultados e discussões dos valores obtidos a partir da metodologia utilizada para o campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília. Assim, são apresentados os resultados das emissões dos gases, os efeitos na economia desses gases, e os custos dos sistemas com e sem influência das externalidades ambientais. A partir disso, são feitas análises para observar como essas externalidades impactam no cálculo.

### **4.1. RESULTADO DAS EMISSÕES**

As quantidades de poluentes emitidos, em toneladas, foram calculadas e expostas na Tabela 4.1, onde são divididas em emissões de gases do efeito estufa e poluentes do ar. Nos gases do efeito estufa, estão o gás carbônico, no qual representa valores internos de outros gases pela equivalência mostrada nos dados utilizados, e o metano. O gás carbônico, dividido em emissões de implantação, de descomissionamento, de operação e totais, que é a somatória das dessas três emissões anteriores. O metano é decorrente das emissões fugitivas, que vazam durante os processos do sistema de energia. Os poluentes do ar são divididos nos 4 poluentes estabelecidos na metodologia.

Percebe-se que a emissão total de CO<sub>2</sub> da energia fotovoltaica é muito menor do que as termelétricas, sendo que comparado à termelétrica a gás de ciclo combinado, menos poluente, a diferença é de mais de 10 vezes. Analisando as etapas de emissão desse gás, nota-se que as termelétricas causam poluição no momento de geração de energia, relacionado direto com o consumo de combustíveis, o gás natural. Ao contrário, a energia fotovoltaica não causa poluição no momento de geração de energia, visto que a sua fonte é a irradiação solar, não ocorrendo nenhuma queima e produção de gases. Entretanto, no processo de confecção dos painéis e instalação ocorre uma grande liberação do gás, fazendo com que seja a energia mais emissora nessa etapa. Para todas as tecnologias, as emissões de descomissionamento são pequenas porcentagens do total, podendo ser consideradas irrisórias.

A emissão de metano está diretamente relacionada com as termelétricas e pela quantidade liberada pode ser considerável quando se analisa os danos específicos de cada gás. Lembrando que nos dados apresentados observou-se que o metano é mais prejudicial do que o gás carbônico, quando se considerar a mesma quantidade.

Tabela 4.1 - Emissões dos gases (ton) do efeito estufa e dos poluentes do ar para cada tipo de tecnologia no estudo de caso em 25 anos.

		Emissão GEE (ton)				Emissão Poluentes do Ar - Operação (ton)				
		CO <sub>2</sub>				CH <sub>4</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>
		Total	Implantação	Descomissionamento	Operação					
Energia Termelétrica Gás Natural	Ciclo Combinado	250.206	640	26	249.540	948	2	13	32	30
	Ciclo Simples	362.248	27	0,4	362.220	1.434	3	80	32	30
Energia Solar	Fotovoltaica	22.515	22.005	510	0	0	0	0	0	0

Sobre os poluentes do ar, a energia fotovoltaica também não causa nenhum problema, enquanto a termelétrica gera esses gases. A quantidade é bem pequena, porém será analisada junto com os danos, como no caso do metano.

#### **4.2. RESULTADO DOS CUSTOS DAS EXTERNALIDADES AMBIENTAIS**

Nesta seção, são mostrados os resultados para os custos das externalidades ambientais, os resultados mais importantes para a análise do estudo. Os resultados estão divididos em: custo dos gases do efeito estufa, e custo dos poluentes do ar separados e totais. Como o foco do estudo é avaliar a situação no campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, foram definidos como prioridade os valores com a taxa de desconto baixa, representante da situação brasileira, e a taxa baixa específica do setor, para trabalhar com valores mais otimistas. Entretanto, para os custos totais dos dois tipos de gases, foram expostos os valores para as duas taxas de desconto com as diferentes taxas específicas do setor, para que haja uma comparação. Lembrando que as diferentes taxas de desconto afetam apenas os gases do efeito estufa e as diferentes taxas específicas do setor, apenas os poluentes do ar.

Os valores na Tabela 4.2 representam os custos (R\$) das emissões dos gases de efeito estufa e dos poluentes do ar para cada tipo de tecnologia durante os 25 anos de uso para o campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

As taxas de desconto têm um papel significativo nos valores, a diferença chega a ser de até 3 vezes. Para o estudo, foi adotado a taxa de desconto de 5% para a análise principal, por ser representativo para o Brasil, como descrito no capítulo anterior. Comparando os 2 tipos de energia na emissão de gases do efeito estufa, percebe-se que a diferença é 20 vezes, em média, o que deve ter sido agravado pela emissão do metano, um grande causador do aquecimento global.

Nos custos dos poluentes do ar, as diferenças das taxas específicas do setor elétrico são grandes, mostrando que são de grande influência também. Entretanto, não se definiu qual seria a taxa mais realista, por representarem a variação na literatura dos valores de danos para os poluentes do ar.

Tabela 4.2 - Custos (R\$) das emissões dos gases de efeito estufa e dos poluentes do ar para cada tipo de tecnologia no estudo de caso em 25 anos.

		Custo GEE (R\$)		Custo Poluentes do Ar (R\$)			Custo da Emissão dos Poluentes do Ar (R\$) – taxa baixa do setor			
		5% taxa de desconto	3% taxa de desconto	Taxa baixa do setor	Taxa média do setor	Taxa alta do setor	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>
Energia Termelétrica Gás Natural	Ciclo Combinado	18.333.458	53.476.642	300.890	2.651.261	13.762.606	12.278	17.564	23.095	247.953
	Ciclo Simples	26.744.800	77.835.255	397.694	3.173.639	15.045.029	20.463	106.182	23.095	247.953
Energia Solar	Fotovoltaica	1.008.176	3.497.835	0	0	0	0	0	0	0

### **4.3. RESULTADO DO CUSTO DOS SISTEMAS COM E SEM AS EXTERNALIDADES AMBIENTAIS**

A Tabela 4.3 mostra os resultados dos sistemas, de acordo com as 3 maneiras explicadas, com e sem as externalidades. Nota-se, em todas as fontes, que o cálculo do custo de instalação representa o resultado mais barato, seguido pelo leilão de energia e o cálculo nivelado, respectivamente.

Entre o leilão de energia e o custo de instalação, pode-se observar que a diferença representa, em grande parte, o lucro para as empresas que vendem a energia no leilão. Já entre o leilão de energia e o nivelado, supõe-se que as taxas de descontos e valores mais conservadores causam essa diferença entre eles.

Analisando a diferença entre as tecnologias, nota-se que a fotovoltaica possui o custo de instalação mais caro, porém nos outros custos possui o menor valor. O valor do leilão de energia para a energia fotovoltaica representa que seus componentes estão ficando mais baratos e que também não há a necessidade de gastos com combustíveis.

Para os valores do leilão de energia das duas tecnologias de termelétricas, foi utilizado um único valor devido à referência não diferenciar o tipo de usina que vende a energia no leilão, que é compreensível, observando que a energia e a fonte são as questões principais no leilão.

É importante ressaltar que a utilização da energia está sendo considerada como 100% do tipo de tecnologia escolhida, ou seja, exclusiva.

Tabela 4.3 - Custos (R\$) dos sistemas energéticos com e sem as externalidades ambientais para cada tipo de tecnologia no estudo de caso com 5% de taxa de desconto e baixa taxa específica do setor.

	Custo sem externalidades (R\$)			Custo com externalidades (R\$)		
	Instalação	Leilão de Energia	Total Nivelado	Instalação	Leilão de Energia	Total Nivelado
TGCC	16.084.200	107.988.000	190.817.100	34.718.548	126.622.348	209.451.448
TGCS	11.697.600	107.988.000	271.969.200	38.840.094	135.130.494	299.111.694
FV	49.410.000	72.360.000	149.144.400	50.418.176	73.368.176	150.152.576

O valor gasto por potência de pico, utilizado no cálculo do custo de instalação na Tabela 4.3, foi de 5 MWp para a usina FV, referência com potência mais próxima do pretendido (13,5 MWp) (GREENER, 2019).

Nas figuras a seguir, serão mostradas as porcentagens da influência das externalidades no preço total com diferentes parâmetros. Foram utilizados os custos totais nivelados dos sistemas para essas análises por serem os valores mais elevados nas análises e que consideram muitos parâmetros em seus cálculos. Contudo, pode-se considerar que as escolhas serão as mais conservadoras possíveis e que qualquer outro valor para os sistemas acarretaria em um aumento considerável nas porcentagens das externalidades.

A Figura 4.1 apresenta a porcentagem do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para a termelétrica a gás natural de ciclo combinado (TGCC) com média taxa de desconto e taxa específica média. Assim, representando como seria a relevância das externalidades em um local com taxa de desconto média, como no caso do Estados Unidos. Quase um quarto do custo total da termelétrica a gás de ciclo combinado seria para os danos externalidade.



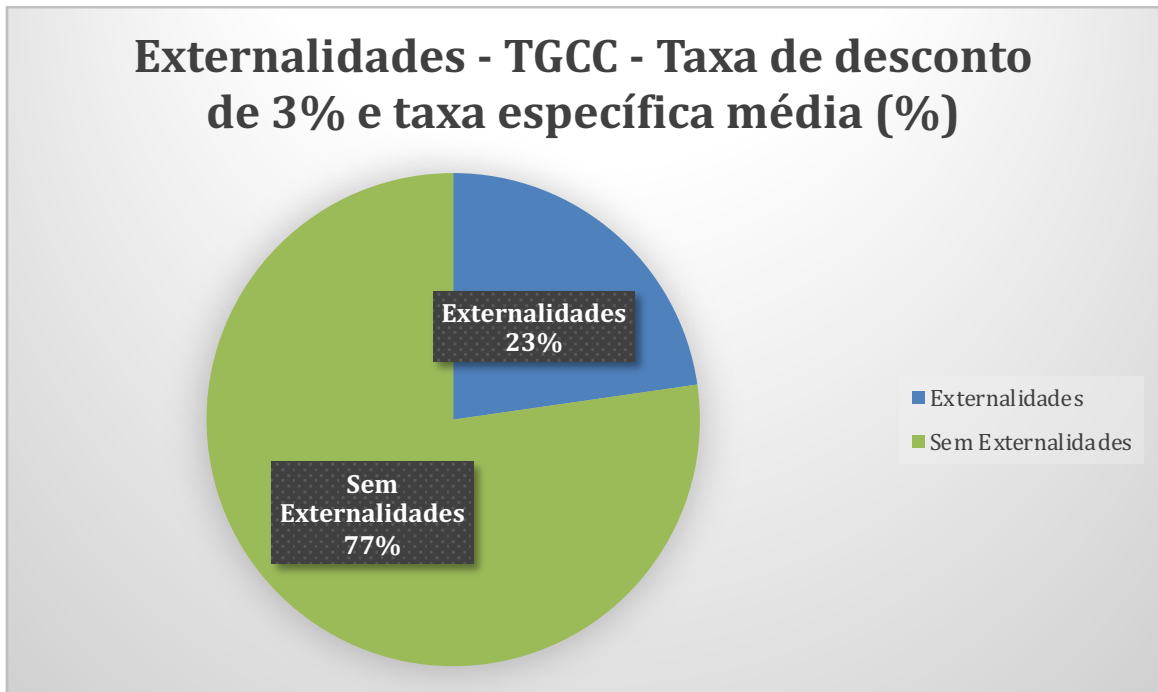


Figura 4.1 – Porcentagem (%) do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC com 3% de taxa de desconto e taxa específica média.

A porcentagem do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC com 5% de taxa de desconto e taxa específica baixa é mostrada na Figura 4.2. Esta figura apresenta o menor impacto possível da termelétrica a gás entre as relações mostradas, pois foram utilizadas as taxas que geram menos custos ambientais. Mesmo assim, 9% são referentes ao custo das externalidades ambientais, sendo um valor considerável e ainda mais poluente do que a energia fotovoltaica.

A Figura 4.3 representa uma análise semelhante da Figura 4.2, mas para a energia solar fotovoltaica. Constata-se que apenas 1% do custo total é o custo das externalidades ambientais, ou seja, quase desprezível. A maior parte dos custos das externalidades vem da construção dos sistemas fotovoltaicos, por exemplo, na obtenção da matéria prima para a construção dos painéis.

### Externalidades - TGCC - Taxa de desconto de 5% e taxa específica baixa (%)

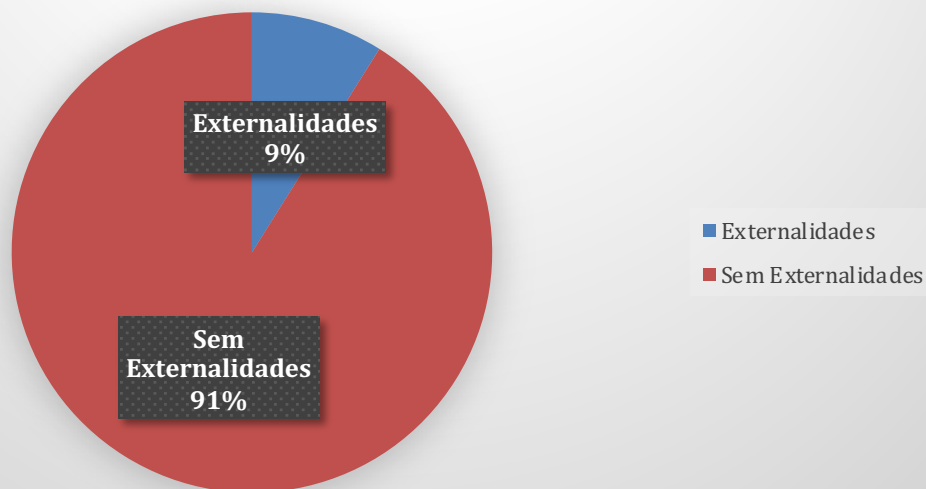


Figura 4.2 – Porcentagem do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC com 5% de taxa de desconto e taxa específica baixa.

### Externalidades - FV - Taxa de desconto de 5% e taxa específica baixa (%)

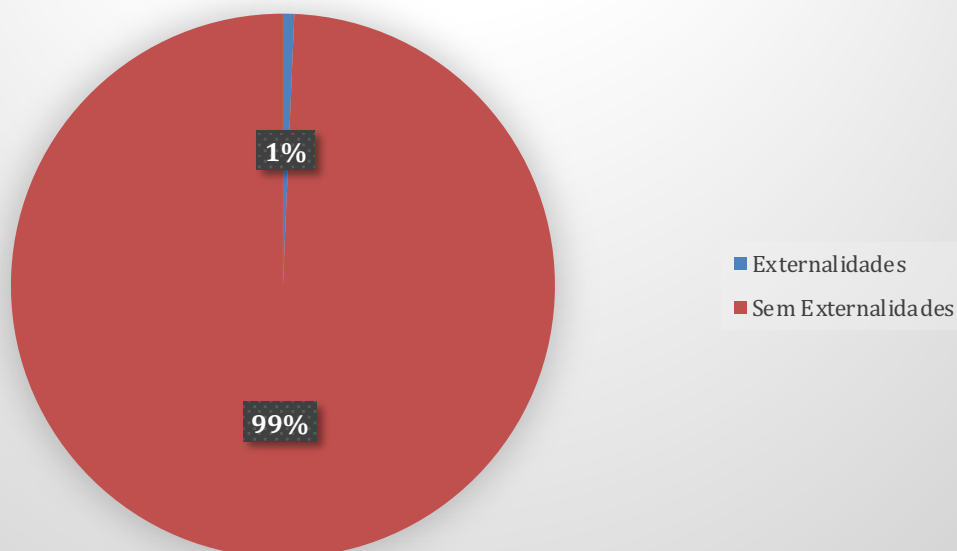


Figura 4.3 – Porcentagem (%) do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para FV com 5% de taxa de desconto e taxa específica baixa.

Por último, a Figura 4.4 a percentagem (%) do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC com baixa taxa de desconto e taxa específica alta. Verifica-se que as termelétricas aumentam ainda mais o custo das externalidades com a mudança da taxa específica do setor. Então, pode se dizer que a diferença na literatura para a taxa do setor, valores baixos e altos, causam 5% de diferença no custo das externalidades ambientais para as termelétricas a gás. Para a energia fotovoltaica, não ocorreu variação significativa em relação à figura com taxa específica baixa.

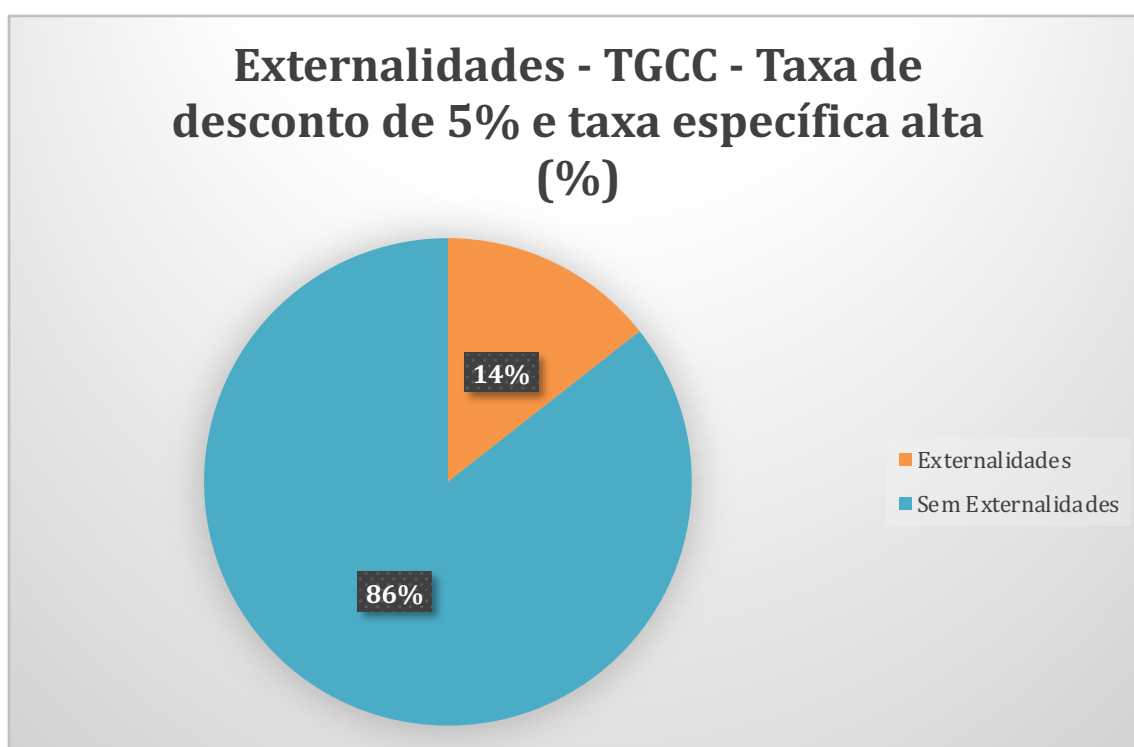


Figura 4.4 - Porcentagem (%) do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC com 5% de taxa de desconto e taxa específica alta.

Em 25 anos, nota-se que a energia fotovoltaica pode contribuir significativamente para que não ocorram danos a saúde das pessoas e mudanças climáticas. Em todas as relações, a energia fotovoltaica foi vantajosa.

O resultado mais expressivo se dá com a taxa de desconto média, aonde se tem o maior percentual das externalidades ambientais entre as figuras mostradas para as termelétricas a

gás, por motivos já apresentados no texto. Infere-se, portanto, que a mudança na taxa de desconto causa bastante alteração nos resultados e que os gases do efeito estufa possuem o papel principal nas externalidades.

A influência de cada tipo de externalidade no custo total do sistema é mostrada na Figura 4.5. Percebe-se que a mudança nas taxas específicas do setor gera uma diferença significativa no percentual dos poluentes do ar. Os custos dos sistemas fotovoltaicos são predominantemente os custos sem externalidades (em azul), mostrando o baixo impacto da energia fotovoltaica no meio ambiente.

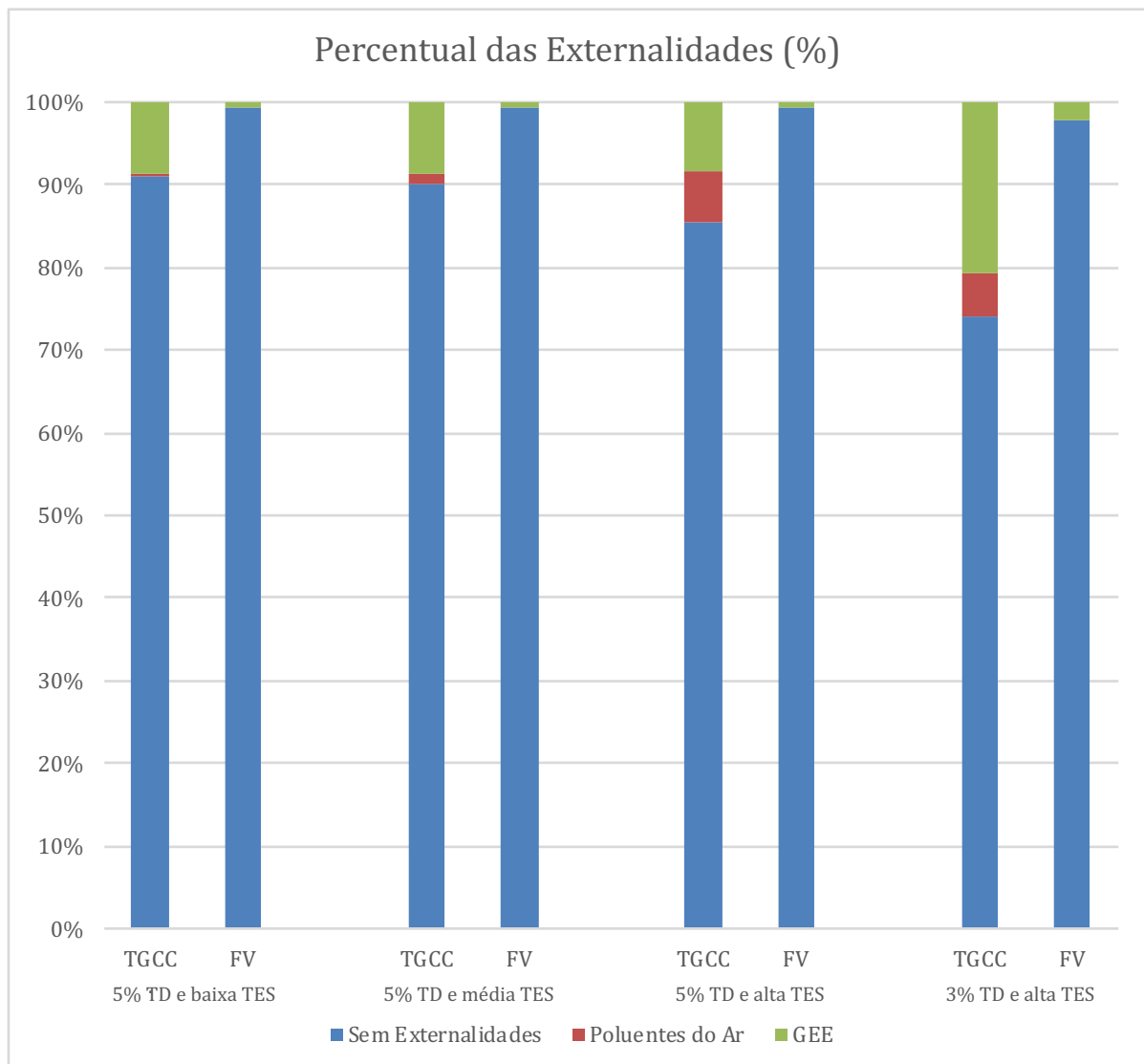


Figura 4.5 - Percentual (%) do custo das externalidades ambientais em relação ao custo total com externalidades para TGCC e FV com diferentes taxas de desconto (TD) e taxas específicas do setor (TES).

Os resultados com taxa específica baixa e taxa de juros baixa foram considerados como referência, pois são os valores mínimos em termos de ocorrência de poluição e economia. Assim, qualquer mudança nesses parâmetros causaria apenas acréscimo dos custos das externalidades, principalmente para as termelétricas a gás, visto que os danos mais significativos são ao longo dos anos e essas alterações afetam mais na geração de energia, onde a energia fotovoltaica não causa poluição.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considera-se que a universidade já é abastecida por energia proveniente da matriz elétrica brasileira e não seria necessário construir uma usina termelétrica apenas para a UnB. Para a tecnologia fotovoltaica é diferente, seria necessário construir uma nova e o tamanho para a UnB seria plausível de utilização, não sendo estritamente necessário a construção de uma usina maior para atender uma capacidade de energia além da UnB.

Por fim, é importante destacar que as relações dos seres humanos com o meio ambiente devem ser cada vez mais utilizadas, pois um tem efeito no outro. Esse tipo de análise mostra os impactos das externalidades ambientais em análise econômica de projetos. Vários setores não levam em conta essas externalidades, o que é um problema, visto os resultados desse trabalho para o setor energético. Espera-se que os resultados desse estudo sirvam para mais incentivo em pesquisas ambientais na área de energia e na utilização de energias renováveis, como é o caso da energia fotovoltaica. Assim, caminhar em busca do desenvolvimento sustentável por parte das empresas e do governo, e que a população esteja ciente dos problemas que o setor de energia elétrica causa sobre suas vidas.

Uma das principais conclusões do estudo de caso foi que, para o Campus Darcy Ribeiro da UnB, os valores de emissões são altos. As emissões de gases do efeito estufa das termelétricas são muito maiores do que a fotovoltaica. Os poluentes do ar são emitidos em menores quantidades, porém possuem efeitos diferentes e não ocorrem na energia fotovoltaica. Para a instalação da usina no campus, seria necessário o investimento de aproximadamente 50 milhões de reais.

As externalidades ambientais analisadas foram significativas nos custos dos sistemas. Os gases do efeito estufa foram mais relevantes do que os poluentes do ar. Para baixo custo, as emissões de gases do efeito estufa da energia termelétrica com ciclo simples custaram R\$ 26.744.800, enquanto na energia fotovoltaica, R\$ 1.008.176, mais de 20 vezes menor.

Quase 25% do custo total da TGCC com 3% de taxa de desconto e taxa específica média são das externalidades ambientais, mostrando como é significativo esse valor para esse tipo de energia elétrica. Na energia fotovoltaica, a porcentagem das externalidades no custo total é muito pequena. Mesmo variando as taxas de desconto e as taxas específicas do setor, os valores dos custos ainda ficaram altos e maiores para as termelétricas, como visto na Figura 4.5.

A evidência dos custos ambientais nas contas de energia vai fazer com que se tenha cada vez mais práticas para reduzir as externalidades, reduzindo os principais causadores de problemas ambientais.

É importante ressaltar as incertezas nos custos sociais dos poluentes, área que ainda carece de mais pesquisas por se tratar de danos subjetivos e esperados.

Para que se tenha continuidade e aperfeiçoamento em trabalhos futuros, são sugeridas algumas propostas:

- Analisar mais estudos de precificação dos danos ambientais dos poluentes;
- Calcular os custos nivelados diretamente com valores em reais;
- Adicionar mais gases poluentes do ar, como no caso dos compostos orgânicos voláteis (COVs), para que tenha mais efeitos desses poluentes na economia;
- Analisar outros impactos ambientais;
- Fazer fluxo de caixa para analisar em quanto tempo os investimentos dos sistemas seriam retornados.
- Analisar qual taxa do setor é a mais representativa;
- Fazer análise de sensibilidade;
- Utilizar taxas de juros para corrigir o dólar até 2018 e depois fazer a conversão para reais. Nesse trabalho, todas as conversões dos dólares para reais foram feitas com valores do ano de 2018 segundo os dados do Banco Central e não se considerou o ano específico do dólar em cada fonte específica.

## REFERÊNCIAS

- BERTASSO, R. M. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica de Sistemas Fotovoltaicos em Edifícios Públicos Universitários**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2016, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 100p.
- BROWN, K. E. et al. How accounting for climate and health impacts of emissions could change the US energy system. **Energy Policy**, [s.l.], v. 102, p.396-405, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.052>.
- CEPEL-CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Eletrobras. Rio de Janeiro, p. 529. 2014.
- COHON, J. L. **Hidden costs of energy: unpriced consequences of energy production and use**. Washington, DC: The National Academies Press, 2010.
- COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air Pollution Control: A Design Approach**. 4. ed. Long Grove, US: Waveland Press, 2011. 839 p.
- CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=publicacoes&task=livro&cid=481>> . Acesso em: 02 jun. 2019
- EIDELWEIN, F. et al. Internalization of environmental externalities: Development of a method for elaborating the statement of economic and environmental results. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 170, p.1316-1327, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.208>.
- ENERDATA. Global Energy Statistical Yearbook 2017. **Enerdata**, 2016. Disponível em: <[yearbook.enerdata.net](http://yearbook.enerdata.net)>. Acesso em: 11 nov. 2018.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional: Séries Históricas Completas**, 2015. Disponível em: <[www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br)>. Acesso em: 12 nov. 2018. Figura.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 452. 2016a.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 417. 2016b.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2018: base 2017**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, p. 292. 2018



- EPSTEIN, P. R. et al. Full cost accounting for the life cycle of coal. **Annals Of The New York Academy Of Sciences**, [s.l.], v. 1219, n. 1, p.73-98, fev. 2011. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1749-6632.2010.05890.x>.
- ESTADOS UNIDOS. INTERAGENCY WORKING GROUP. **Addendum to Technical Support Document on Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis under Executive Order 12866: Application of the Methodology to Estimate the Social Cost of Methane and the Social Cost of Nitrous Oxide**. [s.l.], 2016a. 20 p. Disponível em: <[https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/addendum\\_to\\_sc-ghg\\_tsd\\_august\\_2016.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/addendum_to_sc-ghg_tsd_august_2016.pdf)>. Acesso em: 30 maio 2019.
- ESTADOS UNIDOS. INTERAGENCY WORKING GROUP. **Technical Support Document - Technical Update of the Social Cost of Carbon for Regulatory Impact Analysis: Under Executive Order 12866**. [s.l.], 2016b. 35 p. Disponível em: <[https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc\\_co2\\_tsd\\_august\\_2016.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-12/documents/sc_co2_tsd_august_2016.pdf)>. Acesso em: 30 maio 2019.
- ESTADOS UNIDOS. EPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Acid Rain Program: 2005 Progress Report**. Washington, US: U.S. Environmental Protection Agency, 2016c. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/2005report.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2018.
- ESTADOS UNIDOS. EIA. U.S. Energy Information Administration. **Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants**. Washington, DC: EIA, 2013.
- EVANGELISTA, H. L. O. **Análise técnico-econômica de um sistema fotovoltaico para atender parcialmente o Instituto Central de Ciências da UnB**: Obtenção da energia necessária através de uma simulação termoenergética. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2018, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 163p.
- FANN, N. et al. Characterizing the PM2.5-related health benefits of emission reductions for 17 industrial, area and mobile emission sectors across the U.S. **Environment International**, [s.l.], v. 49, p.141-151, nov. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2012.08.017>.
- GALDINO, M. A. Análise de custos históricos de sistemas fotovoltaicos no Brasil. IV Congresso brasileiro de energia solar. **Anais...** 2012.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, n. 72, p.6-15, fev. 2007.
- GREENER. **Estudo Estratégico**: São Paulo: Enova Solar Energia Ltda, 2019. Color.
- GREENPEACE (Brasil). **Hidrelétrica no Tapajós está cancelada**. 2016. Disponível em: <<https://www.greenpeace.org/brasil/blog/hidreletrica-no-tapajos-esta-cancelada>>. Acesso em: 17 jun. 2019.

- GREGORIO, J. V. **Modelagem do sistema elétrico do Campus Darcy Ribeiro da UnB para avaliação da inserção de sistemas fotovoltaicos.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, 2017, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 173p.
- IDEAL. **O mercado brasileiro de geração distribuída fotovoltaica** - Edição 2015, 2015. Disponível em: <[http://issuu.com/idealeco\\_logicas/docs/2015\\_ideal\\_mercadogdfv\\_150901\\_final](http://issuu.com/idealeco_logicas/docs/2015_ideal_mercadogdfv_150901_final)>. Acesso em: 10 nov. 2018
- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy and Climate Change.** Paris: IEA, 2015. (World Energy Outlook Special Report).
- IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics 2017.** Paris: IEA, set. 2017. Disponível em: <[www.iea.org](http://www.iea.org)>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** 2006. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Synthesis Report.** Geneva, Switzerland: IPCC, 2014a. 151 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.** Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014b. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **History.** 2018. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/organization/organization\\_history.shtml](http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml)>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- JÚNIOR, A. M. et al. Vantagens e desvantagens da energia hidráulica. **Acta Iguazu,** Cascavel, v. 2, p.20-28, 2013.
- KOPITS, E. **Methodology for the U.S Government's Social Cost of Carbon Estimates:** [s.l.], 2015. 20 slides, color. Disponível em: <[https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/dbassesite/documents/webpage/dbasse\\_169500.pdf](https://sites.nationalacademies.org/cs/groups/dbassesite/documents/webpage/dbasse_169500.pdf)>. Acesso em: 30 maio 2019.
- LACIS, A. A. Greenhouse effect. In: LIU, Guoxiang. **Greenhouse Gases: Emission, Measurement and Management.** [s.l.]: Intech, 2012. p. 275-294.
- LARKIN, A. **Environmental debt: the hidden costs of a changing global economy.** New York, Eua: Palgrave Macmillan, 2013.
- MAI, T. et al. **Exploration of high-penetration renewable electricity futures.** Renewable Electricity Futures Study. p. 280. 2012.

- MANSILHA, R. B. et al. Environmental externalities in broiler production: An analysis based on system dynamics. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 209, p.190-199, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.179>.
- MARTEN, A. L.; NEWBOLD, S. C. Estimating the social cost of non-CO2 GHG emissions: Methane and nitrous oxide. **Energy Policy**, [s.l.], v. 51, p.957-972, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.073>.
- MGONJA, C. T.; SAIDI, H. Effectiveness on Implementation of Maintenance Management System For off-Grid Solar PV Systems In Public Facilities: A CASE STUDY OF SSMP1 PROJECT IN TANZANIA. **International Journal Of Mechanical Engineering And Technology**. [s.l], p. 869-880. jul. 2017.
- MME - Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. p. 173. Rio de Janeiro: MME, EPE, set. 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 11 de novembro de 2018
- MULLER, N. Z.; MENDELSON, R. Efficient Pollution Regulation: Getting the Prices Right. **American Economic Review**, [s.l.], v. 99, n. 5, p.1714-1739, dez. 2009. American Economic Association. <http://dx.doi.org/10.1257/aer.99.5.1714>.
- MULLER, N. Z. et al. Environmental Accounting for Pollution in the United States Economy. **American Economic Review**, [s.l.], v. 101, n. 5, p.1649-1675, ago. 2011. American Economic Association. <http://dx.doi.org/10.1257/aer.101.5.1649>.
- NRC - NATIONAL RESEARCH COUNCIL (Estados Unidos). **Hidden Costs of Energy: Unpriced Consequences of Energy Production and Use**. Washinton D.C: National Academies Press, 2010. 506 p.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em: 02 jun. 2019.
- PACHECO, F. **Energias Renováveis: breves conceitos**. Conjuntura e Planejamento, Salvador, n. 149, p.4-11, out. 2006.
- PCE - PLATAFORMA DE CENÁRIOS ENERGÉTICOS. **Cenários para a matriz elétrica 2050**: Aportes ao debate energético nacional e ao planejamento participativo de longo prazo. [s.l.]: Fundación Avina, 2015. 74 p.
- PLATAFORMA CENÁRIOS ENERGÉTICOS (PCE). **Cenários para a matriz elétrica 2050**: Aportes ao debate energético nacional e ao planejamento participativo de longo prazo. [s.l.]: PCE, 2015.
- PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos, SP: INPE, 2006. 60 p.

- RHODES, J. D. et al. A geographically resolved method to estimate levelized power plant costs with environmental externalities. **Energy Policy**, [s.l.], v. 102, p.491-499, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.025>.
- RITCHIE, H.; R., Max. **Air Pollution**. 2018a. Publicado no OurWorldInData.org. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/air-pollution/>>. Acesso em: 12 nov. 2018.
- RITCHIE, H.; ROSER, M. **CO<sub>2</sub> and other Greenhouse Gas Emissions**. 2018b. Publicado no OurWorldInData.org. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>>. Acesso em: 12 nov. 2018.
- SAMADI, S. The Social Costs of Electricity Generation—Categorising Different Types of Costs and Evaluating Their Respective Relevance. **Energies**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.1-36, 13 mar. 2017. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en10030356>.
- SAUAIA, R. L. **Proposta para a Energia Solar Fotovoltaica no GDF**. ABSOLAR. Novembro, 2015.
- SHARMA, B. K.; KAUR, H. **Environmental Chemistry**. 4. ed. Meerut, Índia: Goel Publishing House, 1994.
- SILVA, M. M. M. et al. Efeitos do dióxido de carbono na saúde e no meio ambiente. In: Pesquisas - Seminário interdisciplinar de produção científica, 5., 2016, Aparecida de Goiânia. **Anais...** Aparecida de Goiânia: Faculdade Alfredo Nasser, 2016. p. 1 - 4.
- SIVARAMANAN, S. **Acid Rain, Causes, Effects And Control Strategies**. 2015.
- STERN, N. **Stern Review: the Economics of Climate Change**. 2007.
- TRUCOST. **Natural Capital at Risk: the Top 100 Externalities of Business**. 2013.
- UNB - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (Org.). **UnB em Números**. 2012. Disponível em: <[http://www.dpo.unb.br/images/phocadownload/unbemnumeros/folder/Unbemnumeros\\_12.pdf](http://www.dpo.unb.br/images/phocadownload/unbemnumeros/folder/Unbemnumeros_12.pdf)>. Acesso em: 06 jun. 2019.
- UNITED NATIONS. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. 1998. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- WEBBER, M. E. **Levelized Cost of Energy Calculator**. 2014. Desenvolvida por Webber Energy Group. Disponível em: <[https://www.energy101.com/calculators/calculators/calculator\\_LCOE\\_old/index.html](https://www.energy101.com/calculators/calculators/calculator_LCOE_old/index.html)>. Acesso em: 12 jun. 2019.
- WITTENSTEIN, M.; ROTHEWILL, G. **Projected costs of generating electricity**. 2015. ed. Paris, França: International Energy Agency., 2015.
- WRC - WAIKATO REGIONAL COUNCIL (Nova Zelândia). **Environmental Costs of Electricity Generation**. [s.l.]: Waikato Regional Council, 2007. 31 p.

WWF - Brasil. **Potencial da Energia Solar Fotovoltaica de Brasília.** Brasília: WWF-Brasil, 2016.

ZILLES, R. et al. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012.