UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SUSTENTABILIDADE

KARINE ZORTEA DA SILVA

**Combustíveis alternativos para termelétricas no Brasil: comparativo quanto à emissão
de gases de efeito estufa e geração de energia elétrica**

São Paulo
2018

KARINE ZORTEA DA SILVA

Combustíveis alternativos para termelétricas no Brasil: comparativo quanto à emissão de gases de efeito estufa e geração de energia elétrica

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade.

Versão corrigida contendo as alterações solicitadas pela comissão julgadora em 11 de junho de 2018. A versão original encontra-se em acervo reservado na Biblioteca da EACH/USP e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (BDTD), de acordo com a Resolução CoPGr 6018, de 13 de outubro de 2011.

Área de Concentração:

Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientador:

Profa. Dra. Renata Colombo

São Paulo

2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO

(Universidade de São Paulo. Escola de Artes, Ciências e Humanidades. Biblioteca)
CRB-8 4936

Silva, Karine Zortea da

Combustíveis alternativos para termelétricas no Brasil:
comparativo quanto à emissão de gases de efeito estufa e
geração de energia elétrica / Karine Zortea da Silva ; orientadora,
Renata Colombo. – 2018
95 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-
Graduação em Sustentabilidade, Escola de Artes, Ciências
e Humanidades, Universidade de São Paulo
Versão corrigida

1. Combustíveis alternativos. 2. Biocombustíveis. 3.
Efeito estufa. 4. Energia elétrica - Geração. 5. Mudança
climática. I. Colombo, Renata, orient. II. Título

CDD 22.ed. – 662.88

Nome: ZORTEA DA SILVA, Karine

Título: Combustíveis alternativos para termelétricas no Brasil: comparativo quanto à emissão de gases de efeito estufa e geração de energia elétrica

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Sustentabilidade.

Área de Concentração:
Ciência e Tecnologia Ambiental.

Aprovado em: 11 / 07 / 2018

Banca Examinadora

Prof. Dr(a).	Ana Maria Pereira Neto	Instituição:	Universidade Federal do ABC
Julgamento:	Aprovado	Assinatura:	_____
Prof. Dr(a).	André Felipe Simões	Instituição:	Universidade de São Paulo
Julgamento:	Aprovado	Assinatura:	_____
Prof. Dr(a).	Célio Berman	Instituição:	Universidade de São Paulo
Julgamento:	Aprovado	Assinatura:	_____

Dedico esse trabalho a minha mãe, que me ensinou que o caminho do conhecimento é o melhor a ser seguido.

Agradecimentos

Agradeço a todos que influenciaram na minha vida acadêmica. Agradeço aos meus professores da escola, cursinho, graduação, especialização e mestrado, vocês sempre foram minha fonte de inspiração para superar todos os desafios da pesquisa, mesmo nos momentos de desespero. Agradeço a minha orientadora Renata Colombo pela sua dedicação e coragem de embarcar em novos temas da pesquisa. Agradeço a minha família e ao meu namorado, pela infinita paciência ao me acompanhar e apoiar nesse projeto. Agradeço meus amigos, por serem os únicos capazes de me fazer esquecer meus medos. Agradeço a vida, por me mostrar que contribuir para ciência é uma oportunidade e não apenas uma obrigação. Por fim agradeço, principalmente, a minha mãe, por seus cuidados ao acompanhar minha vida acadêmica – Você tornou isso possível.

Insanidade é continuar fazendo a mesma coisa e esperar resultados diferentes.

(ALBERT EINSTEIN)

RESUMO

SILVA, Karine Zortea da. **Combustíveis alternativos para termelétricas no Brasil:** comparativo quanto à emissão de gases de efeito estufa e geração de energia elétrica. 2018. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Versão Corrigida.

O objetivo geral deste trabalho foi elaborar uma ferramenta de análise comparativa de combustíveis para geração de energia elétrica, acessível para pesquisadores e tomadores de decisões. Para isso foi realizado inicialmente a contextualização dos temas: mudanças climáticas, segurança energética, energia elétrica e combustíveis. Posteriormente realizou-se o desenvolvimento da ferramenta para análise comparativa de combustíveis, com base nos dados físico-químicos e de emissões de GEE atrelados aos biocombustíveis englobados neste estudo. A ferramenta foi desenvolvida por dois métodos, um deles Individual, que compara dois combustíveis e apresenta os dados e informações comparativas sobre ambos, e o segundo Coletivo, na qual é possível comparar as informações sobre os combustíveis simultaneamente. Após a construção da ferramenta a mesma foi disponibilizada para consulta pública, através de divulgação no formato aberto. Ademais, foram elaborados rankings de comparação entre os combustíveis, com intuito de sumarizar as informações obtidas na ferramenta de cálculo numa escala de combustíveis promissores do ponto de vista de geração de energia, emissão de GEE e comparação entre as duas variáveis. Através dos resultados obtidos foi possível constatar que há biocombustíveis com maior capacidade energética do que os combustíveis de origem fóssil tradicionalmente utilizados; que todos os biocombustíveis analisados possuem menor emissão de gases de efeito estufa (GEE) atrelados as suas atividades em relação aos combustíveis fósseis; e que existem biocombustíveis com alta capacidade energética e baixa emissão de GEE que podem ser usados na geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Gases de efeito estufa. Biocombustíveis. Biomassa. Eletricidade.

ABSTRACT

SILVA, Karine Zortea da. **Alternative fuels for thermoelectric plants in Brazil:** comparative in relation to the emission of greenhouse gases and generation of electric energy. 2018. 95 p. Dissertation (Master of Science) – School of Arts, Sciences and Humanities, University of São Paulo, São Paulo, 2018. Corrected version.

The overall objective of this work was to develop a comparative analysis tool for biofuels for electric power generation, accessible to researchers and decision makers. For this, the contextualization of the following themes was initially carried out: climate change, energy security, electric energy and fuels. Subsequently, the tool for comparative fuel analysis was developed, based on physicochemical data and GHG emissions linked to the biofuels included in this study. The tool was developed by two methods, one Individual, which compares two fuels and presents data and comparative information on both, and the second Collective, in which it is possible to compare information on fuels simultaneously. After the construction of the tool the same was made available for public consultation, through disclosure in the open format. In addition, fuel comparison rankings were elaborated with the purpose of summarizing the information obtained in the calculation tool on a scale of promising fuels from the point of view of energy generation, GHG emission and comparison between the two variables. Through the results obtained it was possible to verify that there are biofuels with greater energy capacity than the fuels of fossil origin traditionally used; that all biofuels analyzed have a lower emission of greenhouse gases (GHG) tied to their activities in relation to fossil fuels; and that there are biofuels with high energy capacity and low GHG emissions that can be used to generate electricity.

Keywords: Climate change. Greenhouse gases. Biofuels. Biomass. Electricity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mudanças observadas na atmosfera, oceanos e criosfera	18
Figura 2 - Mudanças observadas no nível médio do mar, ciclo do carbono e na acidez dos oceanos	18
Figura 3 - Fatores naturais e antrópicos que influenciam as mudanças no sistema climático	20
Figura 4 - Forçantes Radiativas Naturais e Antropogênicas	21
Figura 5 - Principais forçantes do aquecimento global observado	23
Figura 6 – Modelos de comparação entre FR naturais e FR naturais e antropogênicas.....	24
Figura 7 - Resumo de variações nos diferentes cenários de RCPs.....	26
Figura 8 – Ações de gerenciamento de riscos	26
Figura 9 - Resumo das ações e mitigação setorial e transetorial	29
Figura 10 - Contribuição individual dos GEE.....	30
Figura 11 – Emissões de GEE por setor econômico	31
Figura 12 - Principais marcos de cooperação internacional sobre alteração no clima.....	35
Figura 13 – Emissões de GEE por setor econômico Brasileiro.....	37
Figura 14 - Principais marcos no Brasil sobre alteração no clima	39
Figura 15 – Consumo final de energia por fonte	40
Figura 16 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte.....	41
Figura 17 – Produção líquida mundial de eletricidade por fonte	44
Figura 18 – Esquema do ciclo a vapor (Rankine simples ideal), indicando os componentes empregados: condensador, bomba, caldeira e turbina vapor (com gerador para conversão final de energia mecânica em elétrica).	52
Figura 19 – Geração elétrica com ciclo combinado	55
Figura 20- Rotas Tecnológicas para transformar biomassa em energia elétrica, calor e combustível.....	56
Figura 21 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do biogás	57
Figura 22 – Modelo de Ferramenta de Cálculo Individual.....	72
Figura 23 – Ferramenta de Cálculo Individual de Carvão Mineral e Bagaço de Cana de Açúcar.....	74
Figura 24 - Modelo de Ferramenta de Cálculo Coletivo	76
Figura 25 - Ferramenta de Cálculo Coletivo a partir do Carvão Mineral.....	78
Figura 26 - Instruções Gerais ao Usuário da Ferramenta	79

Figura 27 – Simulação de cenário de substituição de combustível: gás natural por bagaço de cana de açúcar.....	82
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Projeção PDE 2026 de Eletricidade por Fonte	42
Tabela 2 - Mudança na Capacidade Instalada de Geração Elétrica no Sistema Interligado Nacional.....	43
Tabela 3 - Acompanhamento das Medidas NDC x Projeções PDE 2026	43
Tabela 4 – Participação (%) da Geração Elétrica no Brasil por Fonte de 2011 a 2016.	45
Tabela 5 – Participação de Tipos de Empreendimentos na Geração Elétrica Brasileira (Atual e Projetado).....	45
Tabela 6 - Combustíveis utilizados em geração térmica de eletricidade e sua capacidade instalada	68
Tabela 7 - Dados de poder calorífico inferior (PCI) e fatores de emissão (FE CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O) para os combustíveis sólidos	69
Tabela 8 - Dados sobre a densidade, poder calorífico inferior (PCI) e fatores de emissão (FE CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O) para os combustíveis líquidos.....	70
Tabela 9 - Dados sobre a densidade, poder calorífico inferior (PCI) e fatores de emissão de emissão (FE CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O) para os combustíveis gasosos	70
Tabela 10 – Ranking de combustível usados em Termelétricas por Poder Calorífico Inferior (PCI)	85
Tabela 11 - Ranking de combustível usados em Termelétricas por Posição de Poluente.....	86
Tabela 12 – Comparação entre combustíveis com base no potencial energético e emissões de GEE atreladas	87
Tabela 13 - Ranking dos Cinco Melhores Combustíveis Potencial Energético versus Poluentes	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
AFOLU	<i>Agriculture, Forestry and Other Land Use</i>
AGR	Agrícola
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AR5	<i>Fifth Assessment Report</i>
BEN	Balanco Energético Nacional
BIG	Banco de Informações de Geração
CCS	<i>Carbon capture and storage</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO _{2eq}	Dióxido de Carbono Equivalente
CO _{2eqR}	Dióxido de Carbono Equivalente Renovável
COP	Conferência das Partes
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FE	Fator de Emissão
FGV EAESP	Fundação Getúlio Vargas Escola de Administração de Empresas de São Paulo
FOLU	<i>Forestry and Other Land Use</i>
FR	Forçantes Radiativas
FWH	<i>Feed Water Heater</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	<i>Greenhouse Gases</i>
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GtCO _{2eq}	Giga Toneladas Dióxido de Carbono Equivalente
GVces	Centro de Estudos em Sustentabilidade
GW	<i>Gigawatts</i>
GWP	<i>Global Warming Potential</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEO	<i>International Energy Outlook</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>

Kcal	Quilocaloria
Kg	Quilograma
km ²	Quilometro quadrado
kW	Quilowatts
kWh	Quilowatts hora
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MMA	Ministério de Meio Ambiente
MW	Megawatts
N ₂ O	Óxido Nitroso
NDC	<i>Nationally Determined Contributions</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NO _x	Óxido de Nitrogênio
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PCI	Poder Calorífico Inferior
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
pH	Potencial Hidrogeniônico
Plano ABC	Plano para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura
PNE	Plano Nacional de Energia
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PPCDAm	Planos de Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal
PPCerrado	Planos de Prevenção e Controle do Desmatamento no Cerrado
ppm	Partes Por Milhão
PSMA	Plano Setorial da Saúde para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima
PSTM	Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima
RA	Resíduos Animais
RCP	<i>Representative Concentration Pathways</i>
RSU	Resíduo Sólidos Urbanos
SIN	Sistema Interligado Nacional
SindiEnergia	Sindicato da Indústria da Energia no Estado de São Paulo

TJ	Terajoule
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
WRI	<i>World Resources Institute</i>
WBCSD	<i>World Business Council for Sustainable Development</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	MUDANÇAS OBSERVADAS NO SISTEMA CLIMÁTICO.....	15
1.2	FATORES DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	18
1.3	FUTURO GLOBAL DA MUDANÇA DO CLIMA	24
1.4	ADAPTAÇÃO E MITIGAÇÃO.....	26
1.5	CONTRIBUIÇÃO SETORIAL DAS EMISSÕES DE GEE.....	29
1.6	COOPERAÇÃO INTERNACIONAL.....	32
1.6.1	O contexto da energia elétrica e as mudanças climáticas.....	41
1.7	SEGURANÇA ENERGÉTICA	46
1.8	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	49
1.9	PROCESSOS DAS TERMELÉTRICAS	50
1.9.1	Termelétrica com ciclo a vapor (Ciclo Rankine).....	51
1.9.2	Termelétrica com turbina a gás.....	53
1.9.3	Termelétrica de ciclo combinado.....	55
1.9.4	Geração de Bioeletricidade	55
2	OBJETIVOS.....	59
2.1	OBJETIVO GERAL.....	59
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	59
3	MÉTODOS	60
3.1	LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	60
3.2	COLETA DE DADOS EM LITERATURA CIENTÍFICA	60
3.3	COLETA DE DADOS COM EMPRESAS RELACIONADAS À ÁREA ENERGÉTICA	61
3.4	CRIAÇÃO DE PLANILHA DE DADOS	61
3.5	ELABORAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULOS E CONVERSÕES	62
3.6	CRIAÇÃO DAS FUNCIONALIDADES DA FERRAMENTA	65
3.7	DISPONIBILIZAÇÃO DA FERRAMENTA PARA CONSULTA PÚBLICA	66
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1	CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS.....	69
4.2	CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO	70
4.3	ELABORAÇÃO DO MANUAL DE INSTRUÇÃO DA FERRAMENTA.....	79
4.4	DIVULGAÇÃO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO.....	79

4.5	SIMULAÇÃO DE USO DA FERRAMENTA: CENÁRIOS DE SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS	80
4.6	RANKING DE CLASSIFICAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS	84
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Alterações singulares no sistema climático da história da Terra têm sido observadas nas últimas três décadas por cientistas ao redor de todo o mundo. Essas alterações são decorrentes do aumento médio da temperatura global que vem ocorrendo desde, aproximadamente, 1950. Esse aumento da temperatura provoca inúmeros impactos diretos e indiretos aos seres humanos e aos ecossistemas terrestres e serão potencializados se este aumento da temperatura não for controlado (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2013).

A elevação da temperatura está diretamente relacionada ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) por atividades humanas. Para conter as emissões é necessário planejar, investir e implantar medidas de mitigação de emissões. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês de *Intergovernmental Panel on Climate Change*) apontou em seu Quinto Relatório (AR5, sigla em inglês de *Fifth Assessment Report*) que é necessário investir em processos de redução de emissões, bem como em tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) atmosférico (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2013). Governos e instituições têm reunido esforços para entender e mitigar as alterações no clima a partir de acordos internacionais. O último, o Acordo de Paris, estabeleceu um compromisso, entre os países participantes, de manter o aumento da temperatura média global em no máximo 2 °C acima dos níveis pré-industriais. Na última década, os principais contribuintes para o crescimento das emissões de GEE foram a crescente demanda de energia e um aumento da participação do carvão como combustível (BRUCKNER *et al.*, 2014). Segundo dados da *International Energy Agency* (IEA) aproximadamente 82 % da energia produzida no mundo é proveniente de fontes fósseis, 31 % de óleo combustível, 29 % de carvão e 22 % de gás natural (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016).

O Brasil possui uma posição privilegiada nesse contexto por ter a matriz elétrica considerada predominantemente limpa. Em 2016 as fontes renováveis de energia representaram 82 % da oferta interna de energia elétrica no país, devido principalmente à geração elétrica por fonte hídrica (BRASIL, 2017a). Porém, esse cenário vem mudando nos últimos anos devido ao aumento da participação de usinas térmicas na geração da energia elétrica no país.

É possível aproveitar os recursos e tecnologias existentes no Brasil, bem como os recentes investimentos realizados na implantação das termelétricas, para geração de energia elétrica mais limpa. Para isso é necessária a utilização de biocombustíveis como fonte renovável. Dentro deste contexto, este trabalho realizou um levantamento sobre os combustíveis e biocombustíveis possíveis de serem usados na geração de energia elétrica e desenvolveu uma ferramenta capaz de fazer as correlações entre a produção energética destes combustíveis e suas respectivas emissões de GEE. Essa ferramenta foi desenvolvida com intuito de tornar acessível e prático o uso destas informações para os tomadores de decisão. Para entender a importância deste trabalho faz-se necessária a contextualização dos temas de mudanças climáticas, segurança energética e produção de energia elétrica.

1.1 MUDANÇAS OBSERVADAS NO SISTEMA CLIMÁTICO

O sistema climático terrestre tem apresentado uma série de mudanças relacionadas à variações na temperatura da atmosfera e do oceano, às quantidades de neve e gelo, ao nível do mar e às concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera e oceano. Essas alterações estão sendo constatadas em diversas pesquisas de observações paleoclimáticas, estudos teóricos e simulações, através de dados e informações obtidos ao redor do mundo, de forma independente (CUBASCH *et al.*, 2013).

Dados combinados da temperatura global da superfície terrestre mostram um aquecimento médio de 0,85 °C entre 1880 e 2012 (HARTMANN *et al.*, 2013). Dados mostram que o oceano também está se aquecendo, sendo que os 75 metros superiores aqueceram em média de 0,11 °C por década no período de 1971 a 2010 (RHEIN *et al.*, 2013). Essas alterações na temperatura da superfície terrestre e oceânica vêm influenciando diretamente nas precipitações e na salinidade dos oceanos. Estudos mostram que há mais regiões terrestres onde o número de precipitações fortes aumentou, enquanto em outros locais a precipitação diminuiu. Regiões de alta salinidade (onde a evaporação é mais intensa) se tornaram mais salinas, enquanto regiões de baixa salinidade (onde prevalece a precipitação) tornou-se mais fresca desde a década de 1950 (RHEIN *et al.*, 2013).

Nas últimas duas décadas as geleiras também apresentaram alteração em quase todo o mundo. As áreas de gelo da Groelândia e da Antártida perderam massa e o gelo marinho do

Ártico e a cobertura de neve¹ de primavera do Hemisfério Norte diminui em extensão. A extensão da cobertura de neve do Hemisfério Norte vem diminuindo desde meados do Século 20. Esta diminuição foi da ordem de 1,6 % por década entre março e abril, e em média 11,7 % por década no mês de junho no período de 1967 a 2012. Durante este período, a extensão desta cobertura de neve não mostrou aumento estatisticamente significativo em nenhum mês (VAUGHAN *et al.*, 2013). A extensão média anual do gelo do Ártico também vem diminuindo em todas as estações a uma taxa na ordem de 3,5 a 4,1 % por década (aproximadamente 0,45 a 0,51 milhões km² por década) no período de 1979 a 2012 (VAUGHAN *et al.*, 2013).

O nível do mar também tem apresentado variações. Desde meados do século 19 a taxa de aumento médio do nível do mar é maior do que a média dos dois milênios anteriores, sendo que no período de 1901 a 2010, o nível global do mar aumentou em média 0,19 metros. Cerca de 75 % deste aumento pode ser justificado pela perda de massa das geleiras e pela expansão térmica oceânica, o restante pode ter como contribuição a perda de massa de gelo da Groelândia e Antártica e o armazenamento de água na terra (CHURCH *et al.*, 2013).

Juntamente com as alterações apresentadas, tem sido constatado também um aumento significativo nas concentrações atmosféricas de GEE, tais como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), devido à atividade humana (CIAIS *et al.*, 2013). A Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA, sigla em inglês de *National Oceanic and Atmospheric Administration*) indica que as concentrações de CO₂ na atmosfera atingiram um pico histórico de 403,95 partes por milhão (ppm) na atmosfera em setembro de 2017 (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2017). Este dado é resultado de uma tendência crescente da concentração de CO₂ na atmosfera, desde aproximadamente 1979 (concentração de 335 ppm), período que se intensificou o modelo de desenvolvimento econômico baseado em combustíveis fósseis (DLUGOKENCKY; TANS, 2018).

Nos testemunhos de gelo² as concentrações de CO₂, CH₄, e N₂O excederam substancialmente as concentrações mais elevadas registradas durante os últimos 800 mil anos

¹ O nível da cobertura de neve é um importante variável de mudança climática devido à sua influência nos orçamentos de energia e umidade, alterando o albedo terrestre. Reduzir a cobertura de neve implica em absorver mais energia do sol.

² Um testemunho de gelo é uma amostra de gelo, em formato cilíndrico, proveniente da perfuração de uma geleira. Os registros dos testemunhos são a forma mais direta e detalhada de investigar as condições climáticas e atmosféricas passadas. A neve que precipita sobre as geleiras, a cada ano, guarda as concentrações atmosféricas de poeira, sal marinho, cinzas, bolhas de gases e poluentes humanos. Análises das propriedades físicas e químicas dos testemunhos de gelo podem revelar as variações climáticas do passado, que ocorreram há centenas

(DLUGOKENCKY; TANS, 2018). De 1750 a 2011, as emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis e produção de cimento lançaram em média 375 GtC³ para a atmosfera, enquanto para o desmatamento e outras mudanças de uso do solo e da terra são estimados cerca de 180 GtC, resultando em emissões cumulativas de 555 GtC. Destas emissões, estima-se que 43 % está acumulado na atmosfera, 27 % foi absorvido pelo oceano e 30 % está acumulado em ecossistemas naturais terrestres (CIAIS *et al.*, 2013).

Estima-se que a absorção destes 27 % dos GEE pelos oceanos tenha gerado um desbalanço químico, causando uma redução do pH da água, fenômeno conhecido como acidificação dos oceanos. Nos últimos 20 milhões de anos, o pH dos oceanos se manteve estável, sendo levemente alcalino (TURLEY; WILLIAMSON, 2012). Porém desde o início da Era Industrial o pH médio dos oceanos reduziu de 8,21 para 8,10, que corresponde a uma acidez 26 % maior. Esta diminuição do pH e a elevação de CO₂ dissolvido no oceano, leva a uma redução da concentração de íons carbonato, um aumento de íons bicarbonato na água e a diminuição da disponibilidade de carbonato. Como consequência, organismos vivos que dependem do carbonato para formar suas estruturas como, por exemplo, exoesqueleto e conchas, sofrem com sua escassez. A acidificação dos oceanos pode afetar a formação de recifes de corais, bem como sua longevidade, trazendo graves implicações para a biodiversidade e sustentabilidade ecológica, como repercussão negativa na produtividade dos oceanos e nas atividades socioeconômicas marinhas e costeiras (TURLEY; WILLIAMSON, 2012).

As Figuras 1 e 2 a seguir apresentam um resumo das informações a respeito das mudanças observadas no sistema climático, na atmosfera, oceano, criosfera, nível do mar, ciclo do carbono e acidificação dos oceanos.

de milhares de anos. Assim, os registros dos testemunhos de gelo podem ser usados para reconstruir a temperatura, a intensidade da circulação atmosférica, a precipitação, o volume dos oceanos, as poeiras atmosféricas, as erupções vulcânicas, a variabilidade solar, a produtividade biológica marinha, a extensão do gelo marinho e dos desertos, assim como as queimadas nas florestas (INCT DA CRIOSFERA, 2014).

³ 1 Giga tonelada de carbono = 1 GtC = 1015 gramas de carbono, que corresponde a 3,667 GtCO₂.

Figura 1 - Mudanças observadas na atmosfera, oceanos e criosfera

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

Figura 2 - Mudanças observadas no nível médio do mar, ciclo do carbono e na acidez dos oceanos

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

1.2 FATORES DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Considerando os períodos paleoclimáticos as mudanças que interferem no clima Terrestre são: i) os movimentos das placas tectônicas, que afetam o trajeto das correntes oceânicas e, consequentemente, a redistribuição de energia recebida do Sol pela Terra; ii) as mudanças na radiação solar que são as alterações na quantidade de radiação solar recebida pela Terra; iii) as mudanças na órbita terrestre, relacionadas à sua excentricidade (grau de alongamento da órbita elíptica da Terra, que varia em um ciclo entre 95 e 125 mil anos); iv) a obliquidade ou inclinação da Terra (inclinação do Equador na elíptica de 41 mil anos, aproximadamente) e v) a precessão dos equinócios (movimento do eixo da Terra frente a

estrelas fixas, de aproximadamente 23 mil anos), sendo as duas últimas denominadas de ciclos de Milankovitch⁴ (PRESS *et al.*, 2006).

Por meio da paleoclimatologia, é conhecido que a tendência nos níveis de CO₂ na atmosfera tem sido semelhante para cada ciclo glacial, de modo que, durante as transições de eras glaciais para interglaciais as concentrações atmosféricas de CO₂ sobem de aproximadamente 180 ppm para 280 a 300 ppm (STAUFFER, 2007). Nas eras interglaciais dos últimos 400 mil anos que precederam o período pré-industrial, no entanto, essa concentração de CO₂ manteve-se, em média, em 278 ppm (STAUFFER, 2007). Dentro destes 400 mil anos, a concentração de CO₂ atingiu 335 ppm pela primeira vez em 1979 e tem demonstrado contínua tendência de elevação, tendo ultrapassado os 400 ppm no ano de 2016 (DLUGOKENCKY; TANS, 2018). Desta forma, constata-se que os aumentos nas concentrações dos GEE das últimas décadas não estão associados somente aos processos paleoclimáticos. Diversos estudos científicos têm buscado definir as causas das alterações climáticas atuais. Sabe-se que substâncias, processos naturais e antrópicos são causadores das mudanças climáticas que alteram a quantidade de energia da Terra. Desta forma, os fatores das alterações climáticas foram quantificados e nomeados de Forçantes Radiativas (FR)⁵ (MYHRE *et al.*, 2013). As FRs quantificam as variações nos fluxos de energia no ano de 2011 em relação a 1750. FR positiva significa o aquecimento da superfície através da absorção de energia pelo sistema climático, enquanto FRs negativas significa arrefecimento. FR é estimado com base em dados *in situ*, observações remotas, nas propriedades dos gases e substâncias observadas e nos cálculos utilizando modelos matemáticos. A FR pode ser indicada com base na medição da concentração de cada substância ou, alternativamente, nas emissões de um composto, o que proporciona uma ligação mais direta com as atividades humanas. A FR antropogênica total das duas abordagens são idênticas quando se consideram todos os fatores.

As forçantes radiativas naturais que tem influência sobre o clima terrestre, porém em escalas temporais menores, são as atividades vulcânicas e a composição química da atmosfera. A atividade vulcânica é uma importante fonte de emissão de gases, aerossóis e vapores. Os gases de efeito estufa liberados durante o processo de vulcanismo tem o poder de

⁴ A variação orbital ou ciclos de Milankovitch ocorre periodicamente, fazendo com que a radiação solar chegue de forma diferente em cada hemisfério terrestre de tempos em tempos. Esta variação provoca as alterações glaciares, que são períodos de longos verões e longos invernos.

⁵ Forçante radiativa (FR) é a mudança no fluxo de energia causada por um impulso e é calculada na tropopausa ou no topo da atmosfera em unidades de Wm⁻², entre um estado de referência e um estado perturbado (FORSTER, *et al.*, 2007).

aquecimento da atmosfera, enquanto os aerossóis, que são as emissões predominantes durante a atividade vulcânica, provocam o resfriamento da temperatura terrestre (BAIRD, 2011). Em relação à composição química da atmosfera a concentração de vapor de água e menores contribuições de dióxido de carbono e metano sempre variaram ao longo dos tempos. A presença destes gases e vapores na atmosfera é o que possibilita temperaturas mais amenas no planeta, variando entre -15 °C e 15 °C. Na ausência dos mesmos, a temperatura na Terra seria de aproximadamente - 15 °C o que inviabilizaria, em grande parte do planeta, o modo de vida na forma a qual conhecemos hoje (BAIRD, 2011).

As forçantes radiativas antrópicas são aquelas que causam alteração no clima proveniente de ações realizadas pelo homem como, por exemplo, a combustão de combustíveis de origem fóssil, atividades industriais e mudança no uso do solo e da terra. Essas ações provocam emissões de GEE, principalmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrocarbonetos halogenados (gases que contêm flúor, cloro e bromo), gases de vida curta e aerossóis. A Figura 3 a seguir apresenta um resumo dos principais fatores/forçantes naturais e antropogênicos que influenciam as alterações no sistema climático.

Figura 3 - Fatores naturais e antrópicos que influenciam as mudanças no sistema climático

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

A influência dessas forçantes (fatores) foi quantificada e a Figura 4 apresenta as estimativas de forçamento radiativo em 2011 em relação a 1750, bem como as incertezas agregadas para os principais fatores das mudanças climáticas. Os valores são do forçamento

radiativo médio global, que divididos de acordo com os compostos ou processos emitidos resultam em uma combinação de fatores. As melhores estimativas do forçamento radiativo líquido são mostradas no formato de círculos pretos com intervalos de incerteza correspondentes; os valores numéricos são fornecidos à direita da figura, juntamente com o nível de confiança no forçamento líquido (MA - muito alto, A - alto, M – médio, B - baixo, MB - muito baixos. Os FRs baseados em concentrações para cada composto podem ser obtidos somando as barras de cor semelhante. O forçamento vulcânico não está incluído como a natureza episódica devido a difícil comparação com os outros mecanismos de forçamento. O forçamento radiativo antropogênico total é fornecido por três anos diferentes (2011, 1980 e 1950) em relação a 1750.

Figura 4 - Forçantes Radiativas Naturais e Antropogênicas

Fonte: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2013. Tradução livre pelo autor.

Conforme apresentado na Figura 4, o forçamento radiativo total é positivo e levou a uma maior absorção de energia do sol pelo sistema climático. A maior contribuição para o forçamento radiativo total é causada pelo aumento da concentração atmosférica de CO₂ desde 1750. A FR antropogênica total para 2011 em relação a 1750 é de 2,29 Wm⁻² e teve um

aumento mais rápido desde 1970, em comparação as décadas anteriores. Isso é causado por uma combinação crescente e contínua de emissão de GEE. A FR de emissões de gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 , N_2O e halocarbonetos) para 2011 em relação a 1750 é em média $3,00 \text{ Wm}^{-2}$. Apenas emissões de CO_2 provocaram um FR médio de $1,68 \text{ Wm}^{-2}$, e incluindo as emissões de outros gases que também contêm carbono, o FR de CO_2 é $1,82 \text{ Wm}^{-2}$, contribuindo com 60 % em relação aos demais GEE. As emissões de CH_4 isolado causou um FR médio de $0,97 \text{ Wm}^{-2}$, contribuindo com 32 % em relação aos demais GEE. As emissões de hidrocarbonetos halogenados de destruição do ozônio estratosférico causaram um FR líquido positivo médio de $0,18 \text{ Wm}^{-2}$, sendo que sua própria FR positiva ultrapassou o FR negativo da destruição do ozônio que eles têm induzido. Por fim, as contribuições de N_2O de FR médio $0,17 \text{ Wm}^{-2}$. Referente à contribuição das emissões de gases de vida curta, as emissões de monóxido de carbono (CO) induzem um FR positivo, enquanto que as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) induzem um efeito líquido negativo.

O FR do efeito total de aerossol na atmosfera, que inclui ajustes de nuvem devido a aerossóis, resulta de um forçamento negativo da maioria dos aerossóis, com exceção da contribuição positiva do carbono negro. Aerossóis e suas interações com as nuvens compensaram uma parte substancial do FR médio global de GEE, representando 27 % de redução em relação ao total FR médio de GEE. A forçante radiativa de aerossóis vulcânicos estratosféricos pode ter um grande impacto no clima para alguns anos após erupções vulcânicas. Várias pequenas erupções causaram um FR médio de $-0,11 \text{ Wm}^{-2}$ para os anos de 2008 a 2011, que é aproximadamente duas vezes mais forte do que nos anos de 1999 a 2002. A FR devido a alterações na radiação solar é estimada como $0,05 \text{ Wm}^{-2}$. As observações por satélite das mudanças totais de irradiação solar de 1978 a 2011 indicam que o último mínimo solar⁶ foi menor do que os dois anteriores.

Desta forma, conforme pode ser observado, a maior contribuição para forçante radiativa total é o aumento da concentração de CO_2 na atmosfera desde 1750. Observa-se também que FR positiva apresenta uma tendência crescente, comparando os anos de 1950 (com FR positiva média de $0,57 \text{ Wm}^{-2}$), a década de 1980 (com média de $1,25 \text{ Wm}^{-2}$) e 2011 (com média de $2,29 \text{ Wm}^{-2}$).

⁶ Durante o mínimo solar, que acontece aproximadamente a cada 11 anos, são observadas menos manchas escuras na superfície do Sol. Mais manchas significam em geral mais atividade e erupções no Sol e vice-versa. O número de manchas solares pode mudar de um ciclo para outro e, entre 2008 e 2009, observou-se o mais longo e fraco mínimo solar desde que os cientistas observam o Sol com instrumentação a bordo de sondas espaciais (a partir do início dos anos 1960) (AEB, 2011).

Durante o período de 1951 a 2010 os gases com efeito de estufa contribuíram com um aquecimento médio global da superfície de 0,5 °C a 1,3 °C. Considerando as contribuições de outras FR antropogênicas, incluindo o efeito de resfriamento dos aerossóis que provavelmente se situará no intervalo de -0,6 °C a 0,1 °C, a contribuição calculada das FR naturais média é de -0,1 °C a 0,1 °C e da variabilidade interna natural é de -0,1 °C a 0,1 °C. Juntas, essas contribuições avaliadas são consistentes com o aquecimento de aproximadamente 0,6 °C a 0,7 °C observado durante o período de 1951 a 2010 (Figura 5) (MYHRE *et al.*, 2013).

Estes dados do aumento de gases de efeito estufa na atmosfera, forçantes radiativas positivas, aquecimento observado e compreensão do sistema climático tornam evidente a existência da influência humana sobre o sistema climático (MYHRE *et al.*, 2013).

Figura 5 - Principais forçantes do aquecimento global observado

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

Estudos mostram ainda que é muito provável que as FR antropogênicas tenham contribuído substancialmente para o aumento do teor global de calor do oceano superior (0-700 m), observado desde a década de 1970. O mesmo vale para a influência antropogênica sobre o ciclo global da água desde 1960, onde se observa um aumento do teor de umidade na atmosfera, mudanças nos padrões de precipitações sobre a terra, intensificação das precipitações pesadas sobre regiões terrestres e mudanças na salinidade superficial e subsuperficial do oceano (MYHRE *et al.*, 2013).

A Figura 6 apresenta uma comparação da mudança climática observada no período de 1910 a 2010 com base em três indicadores de grande escala na atmosfera e o oceano: as mudanças nas temperaturas continentais do ar da superfície terrestre, as mudanças nas

temperaturas continentais do ar das superfícies terrestre e oceânica, e o conteúdo de calor no oceano superior. As tendências observadas através dos estudos estão representadas pela linha preta, sendo que a parte tracejada representa que a quantidade ou qualidade dos dados é adequada, porém possui uma maior incerteza, e a parte sólida da linha representa o período onde os dados possuem maior confiabilidade. As faixas sombreadas indicam a tendência, utilizando modelos de previsão (com intervalos de confiança de 5 a 95 %). A faixa sombreada azul apresenta os dados obtidos por modelos usando apenas as forçantes naturais e a faixa sombreada rosa os dados obtidos por modelos usando forçantes naturais e antropogênicas (MYHRE *et al.*, 2013). Através destes dados, além de verificar a relação causal entre o aumento da temperatura e o aumento das emissões de GEE observadas nas últimas décadas com a quantificação dos fatores de FR, é possível estimar também que as FR antropogênicas são as responsáveis pelas mudanças no Sistema Climático (MYHRE *et al.*, 2013).

Figura 6 – Modelos de comparação entre FR naturais e FR naturais e antropogênicas

Fonte: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2013. Tradução livre pelo autor.

Com relação às mudanças na radiação solar total em relação ao aumento na média global da temperatura superficial ao longo do período de 1986 a 2008, estudos de medições diretas via satélite de irradiação solar total mostram com muita confiabilidade de que esta variável não tem contribuído para este aumento de temperatura global (MYHRE *et al.*, 2013).

1.3 FUTURO GLOBAL DA MUDANÇA DO CLIMA

Sendo as emissões de GEE uma das forças responsáveis pelas mudanças climáticas na Terra, estima-se que as emissões contínuas destes gases nas próximas décadas venham gerar ainda mais aquecimento e mudanças em todos componentes do sistema climático. Para limitar estas alterações climáticas, uma das ações a serem tomadas é a redução substancial das emissões de GEE que, por sua vez, está impulsionada principalmente por fatores como tamanho da população, atividade econômica, estilo de vida, uso de energia, padrões de uso da terra, tecnologia e política climática (KIRTMAN *et al.*, 2013).

O IPCC apresentou no AR5 quatro caminhos para alterações no sistema climático com base nas concentrações de GEE na atmosfera durante o Século 21. Os caminhos foram elaborados em função das concentrações atmosféricas de emissões de GEE, emissões de poluentes do ar e mudanças no uso do solo e da terra. Este recurso denominado Caminhos de Concentração Representativos (RCP, sigla em inglês de *Representative Concentration Pathways*) incluem um cenário de mitigação rigoroso (RCP2.6), dois cenários intermediários (RCP4.5 e RCP6.0) e um cenário com emissões de GEE muito altas (RCP8.5) (KIRTMAN *et al.*, 2013). De acordo como RCP, as tendências atuais de emissões, sem esforços adicionais para restringir as emissões ("cenários de linha de base"), conduzem a caminhos que variam entre RCP6.0 e RCP8.5. O RCP2.6 é representante de um cenário que visa manter o aquecimento global provavelmente inferior a 2 °C em relação a temperatura do período pré-industrial. Em relação ao forçamento radiativo, RCP6.0 e RCP8.5 expressam a situação em que o pico de concentração de GEE na atmosfera não é atingido até o ano 2100. No RCP2.6 há um pico e posteriormente uma declinação e para RCP4.5 existe uma estabilização do cenário até 2100 (KIRTMAN *et al.*, 2013).

Cada RCP fornece um conjunto de dados espaciais, e especifica as concentrações anuais de gases de efeito estufa e as emissões antropogênicas até 2100. Os RCPs são baseados em uma combinação de modelos de avaliação integrada, modelos climáticos simples, química atmosférica e modelos globais de ciclo do carbono. Embora os RCPs abranjam uma ampla gama de valores, eles não cobrem toda a gama de emissões da literatura, particularmente para aerossóis (KIRTMAN *et al.*, 2013).

A Figura 7 apresenta um resumo das principais estimativas do futuro do clima através das variações nos ambientes naturais para os diferentes cenários de RCPs.

Figura 7 - Resumo de variações nos diferentes cenários de RCPs

Caminhos de Concentração Representativos (RCPs)				
Variações 2100	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Temperatura Em relação 1990	0,3 a 1,7°C	1,1 a 2,6°C	1,4 a 3,1°C	2,6 a 4,8°C
Oceano AMOC	< 11%		< 34%	
Criosfera Extensão de Gelo e Neve	Ártico < 43% Antártica < 15 a 55%		Ártico < 94% Antártica < 35 a 85%	
Criosfera Cobertura de Neve HN	< 7%		< 25%	
Criosfera Permafrost	< 37%		< 81%	
Nível dos Oceanos	> 0,26 a 0,55m	> 0,32 a 0,63m	> 0,33 a 0,63m	> 0,45 a 0,82m
pH Acidificação dos Oceanos	< 0,06 a 0,07	< 0,14 a 0,15	< 0,20 a 0,21	< 0,30 a 0,32

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

1.4 ADAPTAÇÃO E MITIGAÇÃO

Os riscos associados às mudanças climáticas devem ser gerenciados envolvendo ações de adaptação e mitigação, que irão implicar em impactos diretos a gerações futuras, economia e meio ambiente. Essas ações de adaptação e mitigação estão sintetizadas na Figura 8.

Figura 8 – Ações de gerenciamento de riscos

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

As ações de adaptação devem ser moldadas para um determinado lugar e contexto, não existindo uma abordagem padrão adequada para reduzir os riscos em todas as situações. As estratégias de adaptação devem considerar a dinâmica da vulnerabilidade e da exposição, as relações com os processos socioeconômicos, o desenvolvimento sustentável e a mudança climática. O planejamento e ações de adaptação podem ser reforçados através de atos complementares em todos os níveis (dos cidadãos aos governantes), e pode promover sinergias com o desenvolvimento e a redução do risco de desastres.

O primeiro passo para a adaptação às futuras alterações no clima é reduzir a vulnerabilidade e a exposição à variabilidade climática atual, através de estratégias que incluem ações com co-benefícios para outros objetivos como, por exemplo, ajudando a melhorar a saúde humana, os meios de vida, o bem-estar social e econômico e a qualidade ambiental (DENTON *et al.*, 2014).

Os processos de adaptação podem ser acelerados por instrumentos econômicos existentes, através de incentivos para antecipar e reduzir impactos como, por exemplo, as parcerias de financiamento público-privado, empréstimos, pagamentos por serviços ambientais, precificação adequada de recursos, multas e subsídios, regulações e normas, mecanismos de compartilhamento e transmissão de riscos (DENTON *et al.*, 2014).

Planejamento voltado apenas aos objetivos de curto prazo ou em antecipar as consequências pode resultar em má adaptação e aumentar a vulnerabilidade ou a exposição do grupo alvo no futuro (ou, ainda, a vulnerabilidade de outros povos, lugares ou setores). Respostas de curto prazo aos riscos relacionados à mudança do clima podem também limitar escolhas futuras como, por exemplo, o reforço na proteção de bens expostos que pode resultar na dependência de medidas futuras de proteção (DENTON *et al.*, 2014).

O processo de mitigação é uma intervenção humana para reduzir as fontes ou melhorar as emissões gases de efeito estufa. Medidas de mitigação são necessárias para limitar os efeitos da mudança climática e alcançar desenvolvimento sustentável e equidade, incluindo a erradicação da pobreza, porém não se limita a isso.

As mudanças climáticas têm as características de um problema de ação coletiva na escala global. As emissões de qualquer agente afetam outros agentes em qualquer lugar do mundo. Cooperação internacional é necessária, principalmente quando se trata da difusão e transferência de conhecimento e tecnologias ambientalmente saudáveis (VICTOR *et al.*, 2014).

As contribuições passadas e futuras de emissões GEE acumuladas são diferentes em cada país, que também enfrentam diferentes desafios. Cada país tem capacidade diferente de abordar estratégias de mitigação de adaptação, que variam conforme seus níveis de conhecimentos e circunstâncias locais (VICTOR *et al.*, 2014).

As políticas climáticas envolvem julgamento de valor e considerações éticas, que implica em diferentes interpretações da quantidade de mitigação necessária para evitar interferências perigosas no sistema climático. Entre outros métodos, a avaliação econômica é comumente usada para informar o projeto de política climática como, por exemplo, análise custo-benefício, análise de custo-efetividade, análise multicritérios e teoria da utilidade (VICTOR *et al.*, 2014).

A política climática pode ter objetivos múltiplos, coincidindo com outros objetivos sociais, criando a possibilidade de co-benefícios ou efeitos adversos. A integração e a adaptação podem influenciar positivamente ou negativamente na realização de outros objetivos sociais, como os relacionados à saúde humana, segurança alimentar, biodiversidade, qualidade ambiental local, acesso à energia, meios de subsistência e desenvolvimento sustentável. Da mesma forma que as políticas voltadas para outros objetivos sociais esta podem influenciar na realização da mitigação e dos objetivos de adaptação (VICTOR *et al.*, 2014).

A política climática pode considerar uma gama diversificada de riscos e incertezas, algumas difíceis de mensurar. Estimar com precisão os benefícios da mitigação significa levar em consideração toda a gama de possíveis impactos das mudanças climáticas, incluindo aqueles com altas consequências, mas uma baixa probabilidade de ocorrência. A escolha das ações de mitigação também é influenciada por incertezas e muitas variáveis socioeconômicas, incluindo a taxa de crescimento econômico e a evolução de tecnologia (VICTOR *et al.*, 2014).

A Figura 9 apresenta um quadro resumo das principais ações de mitigação setorial e transetorial apresentadas neste tópico.

Figura 9 - Resumo das ações e mitigação setorial e transetorial

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

1.5 CONTRIBUIÇÃO SETORIAL DAS EMISSÕES DE GEE

Estudos mostram que o total de emissões antropogênicas de GEE continuou a aumentar em 1970 a 2010, apesar do número crescente de políticas de mitigação da mudança climáticas adotadas neste período. Entre 2000 e 2010 as emissões aumentaram em média 1,0 giga toneladas dióxido de carbono equivalente (GtCO₂eq) por ano, o que corresponde a 2,2 %. No período de 1970 a 2000 este aumento foi de 0,4 GtCO₂eq, equivalente a 1,3 % (VICTOR *et al.*, 2014). Atualmente, do total de 49 GtCO₂eq emitido por ano, o dióxido de carbono (CO₂) continua a ser o principal gás emitido representando 76 % das emissões. Os demais 16 % é proveniente do metano (CH₄), 6 % do óxido nitroso (N₂O) e 2 % dos gases fluorados, conforme apresentado na Figura 10 (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014).

Figura 10 - Contribuição individual dos GEE

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

Desde 2000 as emissões de GEE têm crescido em todos os setores, exceto mudanças do uso do solo e da terra. Em 2010, 35 % de emissões de GEE foram provenientes do setor de fornecimento de energia, 24 % das mudanças do uso de solo e da terra, 21 % de processos industriais, 14 % do setor de transporte e 6,4 % dos edifícios. As emissões de GEE provenientes da queima de combustíveis fósseis e processos industriais foi o responsável por aproximadamente 70 % do total de GEE emitido. A Figura 11 apresenta dados das emissões antropogênicas de GEE mundiais por setor em Gt CO₂eq/ano (VICTOR *et al.*, 2014) no ano de 2010. O círculo interno mostra as emissões diretas de GEE (em % do total de emissões antropogênicas de GEE) de cinco setores econômicos. O meio círculo externo mostra como as emissões indiretas de CO₂ (em % do total de emissões antropogênicas de GEE) da produção de eletricidade e calor são atribuídas a setores de consumo final de energia. "Outras energias" refere-se a todas as fontes de emissão de GEE no setor da energia, que não a produção de eletricidade e calor. Os dados de emissões de agricultura, silvicultura e outros usos da terra (AFOLU, sigla em inglês de *Agriculture, Forestry and Other Land Use*) incluem as emissões de CO₂ terrestres provenientes de incêndios florestais, incêndios de turfa e decadência de turfa que se aproximam do fluxo líquido de CO₂ do subsetor de silvicultura e outros usos da terra

(FOLU, sigla em inglês de *Forestry and Other Land Use*). As emissões são convertidas em equivalentes de CO₂ com base no GWP100 (VICTOR *et al.*, 2014).

Figura 11 – Emissões de GEE por setor econômico

Fonte: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014. Tradução livre pelo autor.

Os crescimentos econômicos e populacionais continuam a serem os mais importantes motores do aumento das emissões de CO₂ mundiais, principalmente devido da combustão de combustíveis fósseis. O crescimento da população entre 2000 e 2010 manteve-se aproximadamente idêntico às três décadas anteriores, enquanto a contribuição do crescimento econômico aumentou acentuadamente. O aumento do uso de carvão em relação a outras fontes de energia inverteu uma tendência de longo prazo de descarbonização gradual do fornecimento de energia no mundo (VICTOR *et al.*, 2014).

Sem esforços adicionais para reduzir as emissões de GEE, além das existentes hoje, espera-se que o crescimento das emissões persistirá impulsionado pelo crescimento da população global e atividades econômicas. Em cenários sem mitigação adicional (linhas de base do RCP) estima-se que a temperatura média da superfície global aumentará em 2100 de 3,7 °C a 4,8 °C em comparação com os níveis pré-industriais, excedendo 450 partes por milhão (ppm) de CO₂eq e de 2030 a 2100 atingirá níveis de concentração de CO₂eq entre 750 a 1300 ppm (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014).

1.6 COOPERAÇÃO INTERNACIONAL

Dada às mudanças climáticas antrópicas, bem como a magnitude de suas consequências, a comunidade científica e os líderes das nações do mundo têm se mobilizado para minimizar os impactos associados a mudanças no clima. Diversas convenções, conferências, legislações e tratados que têm sido organizados, discutidos e regulamentados desde a década de 1970 (RIBEIRO, 2015). Pode-se destacar a criação do IPCC em 1988, que é responsável por avaliar o estado dos conhecimentos sobre mudanças climáticas; a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, sigla em inglês de *United Nations Framework Convention on Climate Change*), em 1992, que tem por objetivo estabilizar os gases de efeito estufa em um nível que impeça uma interferência perigosa no sistema climático (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2016); e o Protocolo de Quioto, em 1997, sendo o primeiro acordo internacional, vinculado a UNFCCC na qual um vínculo internacional de metas de redução de gases de efeito estufa foi adotado. O Protocolo de Quioto entrou em vigor em 2005 e o primeiro período do compromisso, assumido por 37 países industrializados signatários e pela Comunidade Européia, teve início em 2008 terminando em 2012. Neste período os países se comprometeram a reduzir as emissões de GEE em 5,2 % em média, em relação aos níveis de 1990 (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2016). O segundo período de compromisso começou em 2013, em que países signatários se comprometeram a reduzir as emissões de GEE em, pelo menos, 18 % abaixo dos níveis de 1990. Reconhecendo que os países desenvolvidos são os principais responsáveis pela elevação dos níveis de emissões de GEE, o Protocolo de Quioto prevê maior responsabilidade nas nações desenvolvidas sob o princípio de "responsabilidades comuns, mas diferenciadas".

Na 21ª Conferência das Partes (COP 21) da UNFCCC, foi aprovado um novo acordo com o objetivo central de resposta as mudanças climáticas globais, denominado “Acordo de Paris” em substituição ao protocolo de Quioto. O Acordo de Paris é um acordo político que inclui um elemento importante não praticado anteriormente sob a Convenção sobre Mudanças Climáticas: a ação coletiva de todos os países para reduzir emissões de GEE e se adaptar ao clima em mudança. O Acordo de Paris compromete os países participantes a reforçarem suas ações e resposta às mudanças climáticas globais, que também inclui o compromisso de ajudar os países em desenvolvimento a reduzir emissões de GEE, investindo 100 bilhões de dólares

por ano em medidas de combate à mudança do clima e adaptação, em países em desenvolvimento (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2015).

O acordo foi aprovado pelos 195 países Partes da UNFCCC, para reduzir emissões de GEE, com o compromisso de manter o aumento da temperatura média global em 2 °C⁷ acima dos níveis pré-industriais e buscar esforços para limitar o aumento de temperatura para 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. O Acordo de Paris definiu medidas de mitigação, adaptação, perdas e danos, financiamento, transferência, desenvolvimento de tecnologia, entre outras para que estas metas fossem alcançadas (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2015).

O Acordo de Paris busca um equilíbrio entre emissões de GEE antropogênicas e remoções por sumidouros (oceanos, árvores e plantas) na segunda metade do século. Esse objetivo está alinhado com Quinto Relatório do IPCC, que concluiu que as emissões de GEE líquidas de GEE devem ser próximas ou abaixo de zero para conter o aumento de temperatura abaixo dos 2 °C antes de 2100 (WATSON, 2016).

Dada a necessidade de uma redução significativa das emissões de GEE para alcançar o seu objetivo a longo prazo, o Acordo de Paris reconhece que deve ser alcançado um nível máximo (ou pico) de emissões o mais breve possível, entretanto, reconhece que esse “pico” demorará mais para os países em desenvolvimento (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2015).

Estudos mostraram que mais de 70 % da população mundial vive em países de renda média (UNITED NATIONS, 2015) e são responsáveis por 54 % das emissões globais de GEE (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014). Os dez maiores emissores de GEE são, na ordem decrescente, a China, os Estados Unidos, a União Europeia, Índia, Rússia, Indonésia, Brasil, Japão, Canadá e México (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2014). Sendo que, dos dez países, cinco são renda média (China, Índia, Indonésia, Brasil e México). Os cinco demais países possuem alta taxa de renda e são habitados por apenas 18 % da população mundial (UNITED NATIONS, 2015), portanto, possui maior emissão de GEE per capita.

A aviação internacional e a navegação não foram incluídas no Acordo de Paris, permitindo também que esses setores adiem ações para reduzir as emissões, sendo que

⁷O aumento de 2 °C na temperatura média global foi considerado o limite superior para além do qual os riscos e impactos negativos das mudanças climáticas devem aumentar rapidamente (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2013).

viagens e comércio internacional atualmente são responsáveis por 2 % das emissões globais de GEE (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014).

Para que o acordo entrasse em vigor era necessário que no mínimo 55 Partes da Convenção⁸ ratificassem o Acordo. O período de ratificação ficou aberto no período de 22 de abril de 2016, a 21 de abril de 2017 e foi ratificado por 168 de 197 Partes da Convenção (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2016).

As Partes da Convenção apresentaram seus próprios compromissos de mitigação às mudanças climáticas a partir das chamadas Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, sigla em inglês de *Nationally Determined Contributions*), que descreve como cada país pretende enfrentar as mudanças climáticas. AS NDC devem ser atualizadas a cada cinco anos e não são juridicamente vinculativas (UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2015).

Pela primeira vez, a maioria dos países em desenvolvimento fez esse tipo de acordo, sendo que a maioria deles estão em parte ou totalmente condicionados à provisão de finanças, tecnologia e capacitação, para sua plena implementação (WATSON, 2016).

O impacto coletivo das NDCs foi analisado por diversos estudos, que utilizaram metodologias e critérios diferentes para avaliação. Alguns estudos incluem todos os NDCs incondicionais e condicionais⁹, enquanto outros apenas incluem incondicionais, bem como diferentes pressupostos para harmonizar as informações incluídas nas NDCs e desenvolver projeções para o resto do século (WATSON, 2016).

O Relatório sobre a Lacuna de Emissões de 2014 desenvolvido pela UNEP aponta que, para o aumento da temperatura se manter abaixo de 2 °C, as emissões globais de GEE devem ser reduzidas em 22 % em 2030 em relação aos níveis de 2015, que está alinhado com o Quinto Relatório do IPCC. No entanto, se apenas compromissos incondicionais forem implementados, as emissões globais de GEE deverão aumentar 6 % em 2030 em relação aos níveis atuais. Se promessas incondicionais e condicionais forem totalmente implementadas, as emissões globais de GEE permanecerão aproximadamente com o mesmo nível atual (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2014). Como referência, sem as promessas do Acordo de Paris, as emissões globais de GEE são projetadas para um aumento de cerca de 20 % em 2030, em relação aos níveis atuais.

Desta forma, as conclusões sobre o impacto coletivo das NDCs variam, porém todos mostram um aumento real no compromisso dos países de combate as mudanças climáticas e

⁸Partes da Convenção são os países signatários da Convenção.

⁹ Sob condição, isto é, dependente da prática de determinado ato por parte do beneficiário.

coletivamente, representam uma contribuição para redução da trajetória atual de aumento das emissões globais de GEE. Além disso, as promessas são sujeitas a aprovação a nível nacional através de políticas, regulamentos e incentivos para sua implementação em cada país, podendo ser alteradas, aumentando ou reduzindo os objetivos de redução de emissão de GEE (WATSON, 2016).

Outra questão importante é se os países vão cumprir as metas de suas NDCs. Evidências do G20¹⁰ apontam que Brasil, China, União Europeia¹¹, Índia e Federação Russa estão no bom caminho para cumprir suas promessas; Austrália, Canadá, México e EUA provavelmente precisarão de novas ações e/ou compensações para cumprir suas promessas, de acordo com o governo e estimativas independentes, das emissões nacionais previstas em 2020. Não há conclusões para o Japão, a República da Coreia, Indonésia e da África do Sul devido a várias incertezas. A Argentina, Turquia e Arábia Saudita não propuseram promessas (WATSON, 2016).

A Figura 12 a seguir apresenta um cronograma resumo dos principais marcos da cooperação internacional a respeito das alterações no sistema climático.

Figura 12 - Principais marcos de cooperação internacional sobre alteração no clima

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

¹⁰ G20 (abreviatura para Grupo dos 20) é um grupo formado pelos ministros de finanças e chefes dos bancos centrais das 19 maiores economias do mundo mais a união europeia, sendo esses: África do Sul, Alemanha, Arábia Saudita, Argentina, Austrália, Brasil, Canadá, China, Coreia do Sul, Estados Unidos, França, Índia, Indonésia, Itália, Japão, México, Reino Unido, Rússia e Turquia.

¹¹ União Europeia é formada por: Alemanha, Hungria, Áustria, Irlanda, Bélgica, Itália, Bulgária, Letônia, Chipre, Lituânia, Croácia, Luxemburgo, Dinamarca, Malta, Eslováquia, Países Baixos, Eslovênia, Polónia, Espanha, Portugal, Estónia, Reino Unido, Finlândia, República Checa, França, Roménia, Grécia e Suécia.

O Brasil possui um contexto diferente do restante do mundo referente às emissões setoriais. Os setores mais poluentes no Brasil são respectivamente o setor agropecuário (32 %); energia (29 %); uso da terra, mudança do uso da terra e da floresta (28 %); processos industriais (7 %) e tratamento de resíduos (4 %), conforme detalhado na Figura 13 (BRASIL, 2016).

Figura 13 – Emissões de GEE por setor econômico Brasileiro

Fonte: BRASIL, 2016.

Diferente do apontado pelo IPCC em que as principais medidas de mitigação de GEE devem estar relacionadas à eficiência energética, o Brasil direciona seus esforços para redução de emissões de GEE nos setores mais poluentes, no caso o setor agropecuário e o setor de mudança do uso da terra e da floresta.

O Brasil é um dos países signatários da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e após a aprovação pelo Congresso Nacional o Brasil concluiu em 12 de setembro de 2016 o processo de ratificação do Acordo de Paris. No dia 21 de setembro o instrumento foi entregue às Nações Unidas (BRASIL, 2016).

A NDC do Brasil é composta pela promessa de reduzir as emissões de GEE em 37 % abaixo dos níveis de 2005 em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de GEE em 43 % abaixo dos níveis de 2005 em 2030, que representa respectivamente níveis de emissão de 1,0 GtCO₂e em 2025 e 0,8 GtCO₂e em 2030 (expressas em GWP100).

Para alcançar seu compromisso o Brasil seguirá as seguintes estratégias: i) aumentar a participação de biocombustíveis na matriz energética brasileira para aproximadamente 18 % até 2030, aumentando a oferta de etanol e a parcela de biodiesel na mistura do diesel e biocombustíveis avançados (segunda geração); ii) fortalecer o cumprimento do Código Florestal, em âmbito federal, estadual e municipal (incluindo fortalecer políticas e medidas com vistas a alcançar, na Amazônia brasileira, o desmatamento ilegal zero até 2030 e a compensação das emissões de gases de efeito de estufa provenientes da supressão legal da vegetação até 2030; restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas até 2030, para múltiplos usos; ampliar a escala de sistemas de manejo sustentável de florestas nativas, por meio de sistemas de georreferenciamento e rastreabilidade aplicáveis ao manejo de florestas nativas, com vistas a desestimular práticas ilegais e insustentáveis); iii) alcançar uma participação estimada de 45 % de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030 (incluindo expandir o uso de fontes renováveis, além da energia hídrica, na matriz total de energia para uma participação de 28 % a 33 % até 2030; e expandir o uso doméstico de fontes de energia não fóssil). Além dessas, também estão previstas atividades de fortalecimento de agricultura sustentável, promoção de novos padrões de tecnologias limpas, ampliação de medidas de eficiência energética, infraestrutura de baixo carbono, melhorias na infraestrutura de transportes e no transporte público em áreas urbanas (BRASIL, 2016).

O país também adotou medidas internas de adaptação à mudança do clima através da Lei nº 12.187/2009 – Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) (BRASIL, 2009) e

o Decreto regulamentador nº 7.390/2010, por meio de planos de ação setoriais e de combate ao desmatamento nos biomas. Os planos previstos abrangem cinco grandes setores econômicos, sendo esses: Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal - PPCDAm; Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado - PPCerrado; Plano para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC); Plano de Redução de Emissões da Siderurgia (que se encontra em fase de elaboração) e Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE. Estes planos foram revisados em 2013 e novos planos setoriais foram lançados (Indústria, Mineração, Saúde, Transporte e Mobilidade Urbana) (BRASIL, 2010). A Figura 14 apresenta um resumo cronológico dos principais acontecimentos históricos a respeito das alterações climáticas no contexto brasileiro e logo abaixo estão detalhados os objetivos e metas dos planos setoriais.

Figura 14 - Principais marcos no Brasil sobre alteração no clima

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

Detalhadamente, o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) apresenta as perspectivas de expansão futura do setor de energia sob a ótica do Governo até o ano de 2026. Para a próxima década é estimado que a população brasileira aumente em, aproximadamente, 13 milhões de pessoas (totalizando 220 milhões de habitantes), sendo esperado um maior crescimento nas regiões Norte e Centro-Oeste. A partir da estimativa do aumento da população brasileira, foi projetado um aumento da demanda de energia em consonância com o cenário econômico delineado, e o consumo final de energia aumenta a taxas mais modestas

(1,4 % a.a.) na primeira metade da década e acelera no segundo quinquênio (2,3 % a.a.), ou seja, a uma taxa média 1,9 % anuais entre 2016 e 2026, sendo a estimativa para o aumento do consumo de energia per capita em 13 % ao longo deste período. O PDE aponta as variações no consumo energético por fonte conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Consumo final de energia por fonte

Fonte: Brasil, 2017b.

Conforme apresentado na Figura 15, é esperado um aumento do consumo energético de gás natural, derivados de cana, eletricidade, e fontes variadas (incluindo biodiesel, lixívia, outras renováveis e não-renováveis). Por outro lado, é esperada uma redução no consumo energético de carvão mineral, lenha, carvão vegetal e derivados do petróleo.

Ao fim do período decenal, estima-se que a oferta interna energia evoluirá a uma taxa média de 3,3 % ao ano, sendo que as energias renováveis exibem um crescimento médio anual de 2,6 %, destacando-se o crescimento na oferta de fontes alternativas (energia eólica, solar, biodiesel e lixívia). Assim, estima-se um aumento no percentual de energias renováveis na matriz energética brasileira atingindo o patamar de 48 % em 2026, ou seja, 2 % a mais que em 2016. O PDE também destaca a redução da participação do petróleo e seus derivados na oferta interna total de energia, de 37 % em 2016 para 32 % em 2026, devido às perspectivas de substituição da gasolina por etanol e do óleo combustível e GLP por gás natural.

1.6.1 O contexto da energia elétrica e as mudanças climáticas

Referente à energia elétrica em 2016 as fontes renováveis de energia representaram, aproximadamente, 82 % da oferta interna de energia elétrica devida, principalmente, à geração elétrica por fonte hídrica, seguida da biomassa, eólica e uma pequena participação da solar (BRASIL, 2017a). Das fontes não renováveis, a predominante foi o gás natural, seguida pelo carvão e derivados do petróleo (BRASIL, 2017a), conforme detalhado na Figura 16.

Figura 16 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte

Fonte: BRASIL, 2017a.

O PDE aponta para o aumento da participação de fontes renováveis e redução de fontes não-renováveis, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Projeção PDE 2026 de Eletricidade por Fonte

Geração Centralizada	2016		2021		2025		2026	
	TWh	%	TWh	%	TWh	%	TWh	%
Hidráulica	377	65	513	69	554	64	556	62
Gás Natural	45	8	20	3	35	4	37	4
Carvão	16	3	10	1	14	2	15	2
Nuclear	16	3	15	2	15	2	26	3
Biomassa	23	4	30	4	38	4	40	4
Eólica	33	6	75	10	104	12	111	12
Solar (centralizada)	0	0	10	1	19	2	21	2
Outros	11	2	4	0	4	0	4	0
Subtotal (atend. Carga)	522	90	677	90	789	90	809	90
Autoprodução & Geração Distribuída	2016		2021		2025		2026	
	TWh	%	TWh	%	TWh	%	TWh	%
Biomassa	27	5	37	5	43	5	44	5
Solar	0	0	1	0	3	0	5	1
Hidráulica	4	1	4	1	5	1	5	1
Não renováveis	27	5	30	4	38	4	40	4
Subtotal (autoprod. & GD)	58	10	71	10	89	10	94	10
Total	580	100	748	100	872	100	903	100

Fonte: Brasil, 2017b.

Conforme listado na Tabela 1, as fontes de energia renováveis com exceção da hídrica corresponderão a 24 % da geração de energia elétrica em 2026, que, em comparação com 15 % em 2016, representa um aumento de aproximadamente 60 %. Já a fonte hídrica de geração centralizada será responsável por 62 % em 2026, apresentando uma pequena redução em comparação com 2016, em que era responsável por 65 % geração elétrica, totalizando assim a perspectiva de 87 % da energia elétrica partir de fontes renováveis.

As fontes não renováveis de gás natural, carvão e outras não-renováveis, apresentarão uma queda da participação de geração elétrica em 2026 em relação a 2016 de 8 para 4 % de gás natural, de 3 para 2 % de carvão e de 5 para 4 % de outras fontes não-renováveis, correspondendo assim a 10% de fontes não renováveis na matriz elétrica. Os demais 3 % será proveniente de fonte nuclear.

Ademais ao crescimento de fontes renováveis na produção de energia elétrica, o PDE apresenta os dados previstos para a mudança de Capacidade Instalada de Geração Elétrica no Sistema Interligado Nacional, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Mudança na Capacidade Instalada de Geração Elétrica no Sistema Interligado Nacional

	2016	2021	2026	2016-2026	
				Incremento	%
Capacidade Instalada de Geração Elétrica no Sistema Interligado Nacional ⁽⁶⁾ (GW)	148,4	179,4	212,5	64,1	43 %
Hidráulica ⁽⁷⁾	96,7	109	110,5	13,8	14 %
Nuclear	2	2	3,4	1,4	71 %
Térmica ⁽⁸⁾	2	23,4	23,2	2,3	11 %
PCH+Biomassa+Eólica+Solar	21	45	63,2	34,5	120 %
Alternativa Indicativa de Ponta	23,7	0	12,2	12,2	-

(6) Inclui as usinas já em operação comercial nos sistemas isolados, com previsão de interligação dentro do horizonte do estudo e considerando a motorização das usinas. Não inclui a capacidade instalada nos pontos de consumo (autoprodução).

(7) Inclui as parcelas nacional e importada da geração da UHE Itaipu.

(8) Contempla a geração a gás natural, carvão mineral, óleos combustível e diesel, gás industrial.

Fonte: Brasil, 2017b. Adaptado pelo autor.

Conforme apresentado na Tabela 2, está previsto um aumento significativo da capacidade de geração elétrica instalada do grupo de pequenas centrais hidrelétrica (PCH), seguido pelo aumento da Nuclear, Hidráulica e Térmica, respectivamente.

Segundo o PDE esses dados estão condizentes com o compromisso adotado no Acordo de Paris em 2015, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Acompanhamento das Medidas NDC x Projeções PDE 2026

INDICADORES		NDC	PDE 2026
		Ano de Referência 2025	
Eficiência energética	Eletricidade	8 %	4 %
Energia elétrica	Participação de eólica, solar e biomassa, incluindo GD e autoprodução	23 %	23 %
	Participação da hidroeletricidade na geração centralizada	71 %	71 %
Matriz energética	Participação de fontes renováveis, com exceção da hídrica	23 a 28 %	35 %
	Participação de bioenergia	18 %	20 %
	Participação total de fontes renováveis	45 %	49 %

Fonte: Brasil, 2017b. Adaptado pelo autor.

A composição da matriz elétrica brasileira coloca o Brasil em uma posição favorável quando comparada a matriz energética mundial. Segundo dados da *International Energy Outlook* (IEO), a média mundial da participação de fontes renováveis na geração de energia

elétrica em 2026 será de aproximadamente 28 %, sendo que o restante será proveniente de fontes não renováveis (aproximadamente 35 % de carvão, 22 % de gás natural, 25 % de combustíveis líquidos e 13 % de nuclear), conforme detalhado na Figura 17.

Figura 17 – Produção líquida mundial de eletricidade por fonte

Fonte: U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2017.

Apesar da condição favorável da matriz elétrica brasileira ser predominantemente limpa, bem como as perspectivas no PDE apontarem para o aumento de geração elétrica a partir de fontes renováveis, entre os anos de 2011¹² a 2016 observou-se um aumento da participação de fontes não-renováveis de gás natural e derivados do petróleo, que vai na contramão do discurso mundial descarbonização da matriz energética e dos compromissos assumidos no Acordo de Paris, conforme apresentado na Tabela 4. A matriz energética brasileira, que era composta principalmente por hidrelétricas (81,9 % em 2011), vem apresentando uma diversificação de fontes energéticas, e aumentando a participação de fontes energéticas de biomassa, eólica, solar, gás natural, carvão e derivados no período entre 2011 a 2016.

¹² Foi adotado análise a partir de 2011, pois foi o ano que o Brasil se tornou autossuficiente em oferta de energia elétrica.

Tabela 4 – Participação (%) da Geração Elétrica no Brasil por Fonte de 2011 a 2016.

Fontes Energéticas/Anos	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Hidráulica	81,9 %	76,9 %	70,6 %	65,2 %	64,0 %	68,1 %
Biomassa	6,6 %	6,8 %	7,6 %	7,3 %	8 %	8,2 %
Eólica	0,5 %	0,9 %	1,1 %	2,0 %	3,5 %	5,4 %
Solar	-	-	-	-	0,01 %	0,01 %
Total de renováveis	89,00%	84,60%	79,30%	74,50%	75,51%	81,71%
Gás Natural	4,4 %	7,9 %	11,3%	13 %	12,9 %	9,1 %
Derivados do Petróleo	2,5 %	3,3 %	4,4%	6,9 %	4,8 %	2,4 %
Carvão e Derivados	1,4 %	1,6 %	2,6%	3,2 %	4,5 %	4,2 %
Nuclear	2,7 %	2,7 %	2,4%	2,5 %	2,4 %	2,6 %
Total de não renováveis	11,00 %	15,5 0%	20,70%	25,60%	24,60%	18,30%

Fonte: Elaboração própria - Dados dos Relatórios Finais do Balanço Energético Nacional 2012 a 2017.

Ademais os tipos de empreendimentos de geração de energia elétrica e suas Potências Outorgadas (kW) pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), mostram um número significativo de termelétricas em operação e/ou construção (iniciada ou não iniciada) em relação as demais tipos, conforme apresentado na Tabela 5. As centrais geradoras que mais estão em fase de crescimento (em construção ou com construção não iniciada, mas outorgada) são solar fotovoltaica (161,68 %), usina termonuclear (67,84 %), pequena central hidrelétrica (39,67 %), central eólica (38,62 %) e usina termelétrica (15,17 %), respectivamente.

Tabela 5 – Participação de Tipos de Empreendimentos na Geração Elétrica Brasileira (Atual e Projetado)

Tipo	Potência Outorgada (kW)			Total de aumento previsto (%)
	Em operação	Em construção	Construção não iniciada	
Central Geradora Hidrelétrica	614.235	10.398	1.000	1,86 %
Central Geradora Undi-elétrica	50	0	0	0,00 %
Central Geradora Eólica	12.504.339	2.837.350	1.991.610	38,62 %
Pequena Central Hidrelétrica	5.046.629	314.180	1.687.620	39,67 %
Solar Fotovoltaica	1.025.962	693.532	965.291	161,68 %
Usina Hidrelétrica	101.883.450	1.254.100	694.180	1,91 %
Usina Termelétrica	42.900.665	2.957.244	3.549.866	15,17 %
Usina Termonuclear	1.990.000	1.350.000	0	67,84 %
Total	165965330	10.978.822	10504940	12,94 %

Fonte: Elaboração própria - Dados do Banco de Informações (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (março de 2018).

A diversificação da geração elétrica (Tabela 4) e, conseqüentemente, dos tipos de empreendimentos (Tabela 5), bem como as projeções do PDE de mudanças nas fontes elétricas estão relacionados a questões técnicas, econômicas, políticas e de segurança energética. Atualmente, a principal fonte elétrica no Brasil é a hídrica, porém, esse cenário está mudando devido à entrada de novas centrais termelétricas no Brasil devido ao aumento de demanda e crises hídricas que ameaçam a segurança energética. O tópico a seguir discorre sobre o tema da segurança energética e como isso interfere nas escolhas por fontes energéticas.

1.7 SEGURANÇA ENERGÉTICA

O conceito de segurança energética é mutável e apresenta características diferentes conforme se desenvolvem as interações entre os países e o conhecimento sobre fontes energéticas e cadeias de suprimentos.

Atualmente, a segurança energética está vinculada às relações entre nações e como elas interagem umas com as outras. A última década testemunhou um aumento substancial na demanda mundial de petróleo, principalmente pelo crescimento econômico dos países em desenvolvimento (em particular na China e na Índia). Este crescimento acarretou na segurança energética atual dependente do petróleo, que é um mercado sujeito à grandes variações de preço, disponibilidade de fornecimento, além de ser um mercado ameaçado por terrorismo, instável em algumas nações exportadoras, marcado por disputa por suprimentos, rivalidades geopolíticas e necessidades de energia dos países para impulsionar seu crescimento econômico (YERGIN, 2006). Ademais a segurança energética atual está relacionada com a instabilidade das fontes de fornecimento em funcionamento como, por exemplo, os apagões de energia nas costas leste e oeste dos Estados Unidos, Europa e Rússia e a falta crônica de energia elétrica na China, Índia e outros países em desenvolvimento. Outro fator associado a segurança energética é a interferência natural nas cadeias de fornecimento de energia como, por exemplo, os furacões Katrina e Rita que causaram inter rompimento simultâneo nos fluxos de óleo, gás natural e energia elétrica em 2005 (YERGIN, 2006).

As crises relacionadas à segurança energética mostraram que a mesma deve respeitar alguns princípios, sendo o primeiro e o mais antigo a diversificação das fontes energéticas, pois reduz o impacto em caso de interrupção no fornecimento de uma fonte. O segundo princípio é a resiliência, ou seja, ter uma "margem de segurança" no sistema de abastecimento

de energia como um amortecedor contrachocos e facilitador da recuperação após interrupções. A resiliência pode provir de vários fatores, incluindo produção sobressalente, reservas estratégicas, *backups* de equipamento, capacidade de armazenamento adequada ao longo da cadeia de abastecimento e o armazenamento de peças críticas para produção de energia elétrica e tributo, bem como planos cuidadosamente concebidos para responder a interrupções que podem afetar grandes regiões. O terceiro princípio é reconhecer a realidade de integração das fontes energética entre os países como, por exemplo, o mercado complexo do petróleo. O quarto princípio é a importância da disponibilização de informação e dados de qualidade, sendo necessária para que os mercados funcionem bem (YERGIN, 2006).

Ademais, Yergin (2006) também aponta, nos últimos anos, que é necessário expandir o conceito em outras duas dimensões, sendo essas: o reconhecimento da globalização do sistema de segurança energética e o reconhecimento do fato de que o todo da cadeia de fornecimento de energia precisa ser protegido. A interdependência energética e a crescente escala de comércio de energia requerem colaboração contínua entre produtores e consumidores para garantir a segurança de toda a cadeia de suprimentos.

A diversificação das fontes energéticas é necessária para segurança energética, mas também se faz necessária uma abordagem mais ampla levando em conta a rápida evolução do comércio global de energia, vulnerabilidades da cadeia de abastecimento, terrorismo e a integração de grandes novas economias no mercado mundial (YERGIN, 2006).

O setor energético brasileiro historicamente foi dominado pela energia elétrica de fontes hídricas. Após severas secas de 2001 e 2010 e, consequentes, falhas na oferta e intermitência de energia elétrica, o Brasil aumentou os investimentos na diversificação das fontes, a fim de aumentar a segurança energética. Uma crescente parcela de energia passou a ser gerada a partir de processos de eletricidade térmica, gerada a partir de combustíveis fósseis (carvão, gás natural, combustível petróleo e diesel), renováveis como biomassa (bagaço de cana-de-açúcar em particular) e, em menor grau, urânio (LUCON; ROMEIRO; FRANSEN, 2015).

Este setor de energia mais intensivo em carbono, associado a aumento da demanda de energia, resultando em uma tendência de aumento significativo das emissões de GEE. Essa tendência, no entanto, não é inevitável, o Brasil possui significativo potencial de energia renovável, oferecendo a oportunidade para o setor termelétrico de gerar energia limpa. O Greenpeace (2013 *apud* LUCON; ROMEIRO; FRANSEN, 2015) indica que reduções necessárias de emissões de GEE serão possíveis se as usinas Termelétricas que funcionam

com combustíveis fósseis forem alimentadas por outros tipos de combustíveis, à medida que o fornecimento de energia é expandido. O potencial de redução para o setor de energia é estimado em 11,7 Gt CO₂e (entre 2010 e 2030) ou uma média de 560 MtCO₂ anualmente.

Conforme apontado por Lucon, Romeiro e Fransen (2015) quatro opções políticas e implicações tecnológicas para mudança deste cenário podem ser adotadas:

1) Aumentar as fontes eólicas e solares na matriz energética nacional. Investir em fontes modernas de energia renovável (especialmente a energia eólica e solar) pode aumentar a segurança energética, reduzir as emissões de GEE e criar mais empregos no Brasil (PAO; FU, 2013). Embora o Plano Nacional de Energia (PNE 2050) indique a relevância de investir em energias renováveis modernas, existe uma estimativa de aumento de energia proveniente de plantas térmicas alimentadas a gás natural e carvão.

2) Promover a interligação em redes de fontes renováveis. Eletricidade renovável moderna integrada através de redes inteligentes¹³ representa uma questão central para aumento da eficiência e redução de custos e emissões de GEE do setor. Adicionalmente a interconexão em rede poderia ajudar a superar o problema da intermitência de energia. Para redução da vulnerabilidade climática do setor elétrico é necessário a integração de diferentes fontes de energia, aumentando a resiliência da infraestrutura energética. No Brasil novas oportunidades estão sendo criadas com a instalação de pequenas centrais hidrelétricas, reutilização de resíduos de biomassa para produção de energia e parques eólicos *offshore* (SOITO; FREITAS, 2011). Associadas às novas oportunidades, fontes renováveis intermitentes de energia, como o vento e a energia solar, podem ser usadas como fonte de energia complementar ou *backup*, apenas de não poderem garantir o fornecimento de energia ao longo de todo o ano.

3) Promover a integração da matriz com países vizinhos. A integração energética entre países é uma estratégia para melhorar a segurança energética, além de seu potencial para redução de custos. Países com excedente exportável de recursos energéticos (como Venezuela, Bolívia, Paraguai e Peru) e que compartilham fronteiras com outras que precisam importar energia para atender à demanda doméstica (como Argentina, Brasil, Chile e Uruguai) podem criar programas de parceria e comercialização. Integração transfronteiriça

¹³ As redes inteligentes de energia, ou do inglês *smart grid*, são uma nova arquitetura de distribuição de energia elétrica, mais segura e inteligente, que integra e possibilita ações a todos os usuários a ela conectados. Nesse conceito, o fluxo de energia elétrica e de informações se dá de forma bidirecional. Assim, a energia tradicionalmente gerada, transmitida e distribuída de forma radial a partir de instalações das concessionárias poderá, também, ser gerada e integrada às redes elétricas a partir de unidades consumidoras. Cria-se, então, a figura do prosumidor, aquele que é produtor e consumidor (produz e fornece energia à rede).

oferece a possibilidade de melhorar a gestão de sazonalidade, intermitência e complementaridade de diferentes fontes de energia renováveis, expandindo assim o potencial deles. Especificamente no Brasil, a integração energética poderia aumentar a confiabilidade e segurança do fornecimento de sistemas nacionais de energia hidrelétrica (EPE, 2014 *apud* LUCON; ROMEIRO; FRANSEN, 2015). Apesar disso, até 2014, apenas 25 % do potencial das hidrelétricas comuns entre o Brasil e países vizinhos foram explorados (EPE, 2014 *apud* LUCON; ROMEIRO; FRANSEN, 2015). Além das usinas hidrelétricas, Brasil e Uruguai lançou, em fevereiro de 2015, um parque eólico no Uruguai com capacidade de produção de 61,5 MW (o *Artillero's Park*). O governo também poderia incentivar a integração de energia através de tratados bilaterais focados no uso compartilhado dos recursos de água. Avaliações e investimentos para entender o potencial de geração de energia transfronteiriços são necessários.

4) Requisitos crescentes de eficiência energética para construções. Em vista do cenário energético nacional atual, o aumento dos requisitos de eficiência energética pode reduzir custos, probabilidade de escassez futura de energia e emissões de GEE. Do lado da oferta deve-se haver padrões de eficiência obrigatório, e do lado da demanda, mecanismos de descontos e taxas podem incentivar o mercado de equipamentos mais eficientes e menos poluentes. Em médio prazo, estima-se que sistemas descentralizados de edifícios possam ser ligados a redes inteligentes, trazendo reduções no consumo de eletricidade, bem como uma melhor estabilidade de fornecimento (menos interrupções) e menor carga geração de energia a partir de fontes poluentes (LANG; MUTSCHLER, 2012).

Complementarmente aos quatro elementos citados pelos autores, esse trabalho apresenta um quinto elemento que pode ser usado para melhorar a segurança energética: o uso de biomassa para produção elétrica, aproveitando as plantas Termelétricas existentes e reduzindo as emissões de GEE do setor (LUCON; ROMEIRO; FRANSEN, 2015).

Para entender melhor as possibilidades de uso de biomassas nas usinas termelétricas, o tópico a seguir apresenta as principais tecnologias existentes no Brasil para geração de eletricidade por empreendimentos térmicos.

1.8 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

A geração elétrica no Brasil é composta por três sistemas elétricos, que abrangem todo território nacional: o maior sistema de transmissão interligado abrange as regiões Sudeste, Sul

e Centro-Oeste e é responsável por mais de 70 % da capacidade instalada do Brasil; o segundo sistema interligado conecta as regiões Norte e Nordeste e representa quase 25 % da capacidade instalada total; e, por fim, o terceiro conjunto é formado por sistemas pequenos e isolados, localizados principalmente na região Norte (SCHAEFFER *et al.*, 2008). Os sistemas isolados respondem por menos de 5 % da capacidade instalada do país e a energia que produzem provém principalmente de usinas termelétricas. Esses três sistemas são chamados de Sistema Interligado Nacional (SIN), e permite transferir energia elétrica de uma região para outra, aproveitando as diferenças de estações do ano (SCHAEFFER *et al.*, 2008).

O sistema baseia-se em reservatórios para armazenamento plurianual (normalmente cinco anos) e turbinas de reserva para geração de energia adicional nos períodos chuvosos, para atender à curva de carga não apenas numa base contínua, mas também nas horas de pico e nas horas intermediárias. Os sistemas hidrelétricos interligados são complementados por usinas térmicas que entram em operação quando é preciso uma carga complementar a energia (principalmente nos períodos de grande carga) e nos períodos secos (quando a quantidade de água é insuficiente para alimentar as usinas hidrelétricas ou o valor para armazenar a água nos reservatórios é maior do que o custo da operação das termelétricas (SCHAEFFER *et al.*, 2008).

Os tópicos a seguir tratam a geração de energia elétrica a partir de tecnologias termelétricas utilizadas no Brasil, e mostram como é possível que as usinas operem com diferentes tipos de combustíveis renováveis e não renováveis (SCHAEFFER *et al.*, 2008).

1.9 PROCESSOS DAS TERMELÉTRICAS

As usinas termelétricas são as únicas que podem usar combustíveis diversos (fósseis ou renováveis) para conversão de energia. Os processos e tecnologias utilizados são diferentes para cada tipo de combustível, porém, independentemente do combustível utilizado, a geração de energia elétrica numa termelétrica é sempre baseada na conversão da energia térmica para energia mecânica, e esta por sua vez, transformada em energia elétrica (SONNTAG *et al.*, 2003).

A conversão da energia térmica em mecânica se dá através do uso de um fluido que produzirá, em seu processo de expansão e variação de temperatura, trabalho nas máquinas térmicas (turbinas ou motores). O acionamento mecânico do gerador elétrico, acoplado ao

eixo destas máquinas, permite a conversão de energia mecânica em elétrica (SONNTAG *et al.*, 2003).

As termelétricas funcionam a partir de processos denominados de ciclo a vapor (ou ciclo Rankine), ciclo simples (ou motor de combustão alternativo), ciclo com turbina a gás (ou motor de combustão rotativo) e ciclo combinado (ciclos a gás e a vapor) (STUCHI; TACONELLI; LANCHI, 2015). Além disso, as centrais termelétricas podem operar com o processo denominado de cogeração (o calor gerado no processo é reaproveitado em processos térmicos dentro ou fora da termelétrica) (SONNTAG *et al.*, 2003). Neste trabalho será discorrido a respeito das termelétricas que operam com o ciclo a vapor, uma vez que essas podem operar a partir de combustíveis diversos, foco desta pesquisa.

1.9.1 Termelétrica com ciclo a vapor (Ciclo Rankine)

Uma máquina térmica que trabalha a partir do ciclo Rankine (ciclo ideal das usinas de potência a vapor) utiliza, comumente, como fluido de trabalho, água. Este ciclo não envolve irreversibilidades internas e consiste em quatro processos: i) compressão isentrópica em uma bomba, onde a água entra no estado termodinâmico de líquido saturado e sai como líquido comprimido; ii) a água entra na caldeira como líquido comprimido e sai como vapor superaquecido (fornecimento de calor à pressão constante); iii) posteriormente ocorre uma expansão isentrópica na turbina a vapor, onde a água passa de vapor superaquecido para mistura (por exemplo, com título mínimo de 85 % para minimizar problemas de corrosão) e iv) para fechar o ciclo, ocorre rejeição de calor à pressão constante em um condensador (de mistura para líquido saturado) (Figura 18) (ÇENGEL, 2013).

Figura 18 – Esquema do ciclo a vapor (Rankine simples ideal), indicando os componentes empregados: condensador, bomba, caldeira e turbina vapor (com gerador para conversão final de energia mecânica em elétrica).

Fonte: Çengel, 2013.

Na prática, o processo de fornecimento de calor ocorre através da combustão externa de diferentes tipos de combustíveis sólidos e líquidos, tais como, derivados de petróleo, carvão, gás natural e biomassa (lenha, bagaço de cana, resíduos, etc.) (ÇENGEL, 2013). Esta combustão gera calor que entra em contato com o fluido de trabalho, transformando-o em vapor superaquecido. Este vapor, tendo a sua temperatura e pressão elevadas, se expande na turbina produzindo trabalho (trabalho mecânico, que movimenta um gerador elétrico que fica conectado ao eixo da turbina), tendo como produto final energia elétrica. Após o vapor superaquecido expandir na turbina, acontece a etapa de rejeição de calor no condensador, onde ocorre a transferência de calor para a água de resfriamento que flui através de um circuito separado. O líquido saturado, denominado de fluido recuperado ou água de alimentação, é bombeado do condensador para a caldeira a uma pressão maior e o fluido de trabalho completa o ciclo quando deixa a bomba (ÇENGEL, 2013).

O sistema à vapor sofre perdas de rendimento associados à presença de irreversibilidades na turbina, na bomba e no processo de combustão e à posterior transferência de calor dos produtos quentes da combustão para o fluido de trabalho do ciclo (para máquinas que operam com combustível fóssil) (SONNTAG *et al.*, 2003). Um método comumente utilizado para aumentar a eficiência térmica das termelétricas que trabalham com ciclo à vapor é o pré-aquecimento da água de alimentação antes que ela entre na caldeira,

denominado de processo de regeneração. O próprio vapor da turbina (extraído a uma alta temperatura) é utilizado para pré-aquecer a água de alimentação através de um pré-aquecedor de água de alimentação (AAA ou FWH, do inglês *Feed Water Heater*). Esta regeneração pode ser feita utilizando um aquecedor de água de alimentação aberto ou fechado (SONNTAG *et al.*, 2003). O AAA aberto consiste de um trocador de calor de tipo contato direto, no qual, correntes (de vapor extraído da turbina e de água de alimentação) à diferentes temperaturas se misturam para formar uma corrente a uma temperatura intermediária. As vazões das correntes que entram no AAA são definidas de forma que a corrente que sai dele está no estado de líquido saturado à pressão de extração. Os AAA fechados são trocadores de calor formado por tubos, por onde a água de alimentação e o vapor extraído da turbina percorrem independentemente. A temperatura da água de alimentação aumenta conforme o vapor extraído se condensa no exterior destes tubos. Uma vez que as duas correntes não se misturam, elas podem se apresentar a diferentes pressões. A eficiência térmica do ciclo regenerativo pode ser aumentada pela incorporação de vários aquecedores de água de alimentação a pressões apropriadamente escolhidas (SONNTAG *et al.*, 2003).

As eficiências das termelétricas movidas a ciclo a vapor é de 42 a 44 %, dependendo do tipo de combustível utilizado e dos ciclos regenerativos utilizados (STUCHI; TACONELLI; LANCHI, 2015).

1.9.2 Termelétrica com turbina a gás

O ciclo utilizado nas termelétricas operadas com turbinas a gás recebe o nome de ciclo Brayton (SONNTAG *et al.*, 2003). O ciclo Brayton ideal é composto pelas etapas de compressão adiabática isentrópica em um compressor; fornecimento de calor a pressão constante em uma câmara de combustão (trocador de calor); expansão adiabática isentrópica em uma turbina a gás e rejeição de calor a pressão constante para o ar ambiente. As termelétricas com turbinas a gás podem operar tanto de modo aberto como fechado. O modo aberto é o mais comum e consiste em um motor no qual um compressor é continuamente alimentado com ar atmosférico (fluido de trabalho) que é comprimido à uma pressão mais elevada. O ar comprimido entra numa câmara de combustão, onde é misturado com combustível ocorrendo a combustão. O resultado da combustão é um gás produto à elevada temperatura. O gás produto flui através de um conjunto de lâminas rotativas (turbina a gás) que se movimentam e conseqüentemente movimentam o eixo do gerador, ocorrendo a conversão de energia mecânica em elétrica. No modo fechado, o gás que deixa a turbina passa

por um trocador de calor, onde é resfriado antes de entrar novamente no compressor. O processo em ciclo aberto tem uma eficiência relativamente baixa, em torno de 36 % a 39 %, enquanto a de ciclo fechado pode atingir de 45-50 % de eficiência (STUCHI; TACONELLI; LANCHI, 2015).

A temperatura do gás na saída de uma turbina é normalmente bem acima da temperatura ambiente, tendo um potencial de reaproveitamento, aumentando a eficiência térmica das termelétricas. Desta forma, um processo de regeneração também é aplicado nas termelétricas que trabalham com este ciclo. Neste caso é utilizado um equipamento, denominado regenerador, que pré-aquece o ar que deixa o compressor antes do mesmo entrar no combustor. O regenerador utilizado é um trocador de calor do tipo contracorrente pelo qual o gás quente que deixa a turbina e o ar mais frio que sai do compressor passam em direções opostas. O gás de escape da turbina é resfriado, enquanto o ar que sai do compressor é aquecido. Com este pré-aquecimento do ar, o calor a ser adicionado para a etapa de combustão é reduzido aumentando a eficiência térmica da instalação (STUCHI; TACONELLI; LANCHI, 2015).

Outro recurso para a eficiência energética deste tipo de termelétrica é o uso de uma turbina de múltiplos estágios com um combustor com reaquecimento entre os estágios. Com o uso do combustor com reaquecimento, a temperatura na saída da turbina é maior do que sem reaquecimento, ocorrendo um potencial para regeneração aumentando a eficiência térmica (STUCHI; TACONELLI; LANCHI, 2015).

O trabalho líquido produzido pelo ciclo com turbina a gás também pode ser aumentado se o trabalho fornecido ao compressor for diminuído. Este recurso tem sido obtido utilizando o processo denominado de compressão em múltiplos estágios com resfriamento intermediário. Na prática, esse processo é realizado separando as interações de calor e trabalho em dois processos distintos, fazendo com que a compressão ocorra em estágios. Entre os estágios do compressor, os trocadores de calor, chamados inter-resfriadores, resfriam o gás. A temperatura mais baixa na saída do compressor aumenta o potencial para regeneração de modo que, quando o inter-resfriamento é usado em conjunto com a regeneração, pode resultar em um aumento considerável da eficiência térmica. Quando o reaquecimento e o resfriamento estão presentes simultaneamente, o trabalho líquido do ciclo é maior e o potencial para regeneração também (STUCHI; TACONELLI; LANCHI, 2015).

1.9.3 Termelétrica de ciclo combinado

Nas termelétricas de ciclo de potência combinado, os dois ciclos (Brayton e Rankine) são acoplados de tal forma que a energia transferida sob a forma de calor de um dos ciclos (turbina a gás) é utilizada como fonte de energia para acionar o ciclo a vapor (Figura 19) (SONNTAG *et al.*, 2003). Nessas centrais, os gases de exaustão do ciclo Brayton servem como fonte de calor para o ciclo a vapor, com eficiência na faixa de 55 a 58 % (com perspectivas de atingir uma eficiência de até 62 %) (STUCHI; TACONELLI; LANCHI, 2015).

Figura 19 – Geração elétrica com ciclo combinado

Fonte: Reis, 2011.

1.9.4 Geração de Bioeletricidade

A utilização da biomassa como matéria-prima para a produção de energia elétrica tem se demonstrado um processo bastante promissor. Biomassa, do ponto de vista energético, é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que, diretamente ou por transformação natural ou artificial (processos físicos, químicos ou bioquímicos), pode ser utilizada como fonte de energia em processos de conversão para seu uso final como energia mecânica, elétrica ou térmica.

A geração de bioeletricidade pode ocorrer através da queima direta da biomassa natural (como, por exemplo, bagaço de cana de açúcar) ou a biomassa pode ser submetido a

um pré-tratamento, como gaseificação ou biodigestão, para posteriormente ser aproveitada como combustível.

As principais rotas tecnológicas de transformação de biomassa apresentadas estão apresentadas abaixo na Figura 20.

Figura 20- Rotas Tecnológicas para transformar biomassa em energia elétrica, calor e combustível

Fonte: Çengel, 2013.

O aproveitamento da biomassa no ciclo a vapor pode ser tanto no ciclo de cogeração como em ciclos simples para geração elétrica. Na geração de bioeletricidade com ciclo a vapor, tradicionalmente era utilizado o procedimento das turbinas de contrapressão, porém este processo não gerava energia elétrica excedente para comercialização. Desta forma, aperfeiçoamentos foram realizados passando-se a operar o processo por meio da turbina de condensação/extração. Neste processo parte do vapor gerado é direcionado para o processo e a outra parte é extraída por turbinas de extração/condensação e condensados, melhorando o seu aproveitamento energético. O vapor direcionado ao processo passa pelo sistema turbogerador e gera somente energia elétrica. A cogeração (geração de energia elétrica e térmica), neste caso, acontece somente com o vapor que é extraído (SONNTAG *et al.*, 2003).

No aproveitamento da biomassa no ciclo a gás, a biomassa seca é encaminhada para o gaseificador e submetida a uma oxidação parcial. Nesta oxidação uma mistura de gases, cujo principal é o monóxido de carbono, é produzida para ser utilizada como gás combustível. Esta

mistura de gases, após passar por um sistema de limpeza, é injetado numa turbina a gás, juntamente com ar comprimido, onde termina o processo de combustão e impulsiona o turbogerador. Os gases após passarem pela turbina a gás são encaminhados para uma caldeira de recuperação, onde alimentam o ciclo vapor, configurando o processo denominado de ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa. Neste processo, biomassas sólidas como bagaço, palhas, lenha, lixo, entre outros, precisam ser submetidas a uma etapa de gaseificação antes de entrarem no processo. Os biocombustíveis líquidos e gasosos podem ser consumidos diretamente utilizando turbinas (SONNTAG *et al.*, 2003).

O processo de geração de bioeletricidade também pode ser realizado através do processo de decomposição anaeróbia da biomassa, que ocorre pelo processo de decomposição do material orgânico pela ação de microrganismos, na ausência de oxigênio, gerando metano, dióxido de carbono, alguns gases inertes e compostos sulfurosos. Essa mistura é denominada de biogás e pode ser utilizada diretamente para a geração de energia elétrica (apresentando poder calorífico entre 4.500 e 6.000 kcal/m³) ou tratada para separação e aproveitamento do metano puro (poder calorífico próximo ao do gás natural de 9400 kcal/m³), conforme apresentado na Figura 21 (SONNTAG *et al.*, 2003).

Figura 21 - Perfil esquemático do processo de produção de energia elétrica a partir do biogás

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008.

Conforme apresentado, as usinas de centrais térmicas podem utilizar uma vasta variedade de ciclos de potência e combustíveis para geração de energia elétrica. No contexto

atual da expansão das termelétricas na matriz energética brasileira, se faz necessária uma análise sobre os combustíveis mais adequados para esta aplicação, do ponto de vista econômico e ambiental. Esta análise, por sua vez, requer uma comparação entre os combustíveis tradicionalmente utilizados e aqueles que vêm se demonstrando inovadores e/ou promissores em relação a sua capacidade de conversão de energia e suas taxas de emissão de GEE.

Neste contexto, o presente trabalho realizou uma análise sobre combustíveis fósseis e biocombustíveis que podem ser empregados nas termelétricas, visando estabelecer uma correlação do potencial energético e emissões de GEE. Estes dados foram utilizados na construção de uma ferramenta de consulta pública que simule parâmetros dentro do cenário de mudanças de combustíveis.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver ferramenta para análise comparativa de combustíveis e biocombustíveis e disponibiliza-lo para tomadores de decisões de empresas privadas, instituições de ensino e pesquisa e órgãos/associações públicas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reunir informações bibliográficas atuais sobre os temas de mudanças climáticas, segurança energética, energia elétrica e combustíveis e biocombustíveis;
- Elaborar rankings de comparação entre os combustíveis, com intuito incentivar a diversidade energética na geração elétrica a partir do uso de biocombustíveis de forma a contribuir para ações de mitigação de emissões de GEE.

3 MÉTODOS

O desenvolvimento do presente trabalho foi realizado através de um levantamento bibliográfico a cerca do tema proposto, uma coleta de dados em literatura científica, uma coleta de dados com setores relacionados à área energética, a compilação dos dados obtidos, a criação de uma planilha de dados, a construção das equações de cálculos aplicadas à ferramenta, a construção das funcionalidades da ferramenta e disponibilização da ferramenta para acesso público.

3.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O trabalho iniciou-se através de uma revisão bibliográfica a cerca dos temas sobre mudanças climáticas, emissões de gases de efeito estufa, setor energético, segurança energética, produção de energia, centrais termelétricas e biocombustíveis. Visando obter informações aplicadas, bem como dados devidamente atualizados, foram utilizados relatórios nacionais, internacionais, dados e informações de agências relacionadas ao setor energético e gases de efeito estufa como, por exemplo, o *Fifth Assessment Report* do *Intergovernmental Panel on Climate Change*, *International Energy Outlook 2017*, a Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas do Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação, o Balanço Energético Nacional 2017 da Empresa de Pesquisa Energética, informações do *GHG Protocol* e outros. Ademais, foi realizado também um levantamento dos combustíveis tradicionais e inovadores utilizados em 2018 nas termelétricas através de consulta ao Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2016).

Adicionalmente foram realizadas consultas em artigos e livros científicos para: i) melhor compreensão do processo de produção de energia e do funcionamento das centrais termelétricas; ii) obtenção de dados globais sobre mudanças climáticas, emissões de gases de efeito estufa e segurança energética e iii) obtenção de informações sobre combustíveis já relatados em pesquisas científicas como potencialmente promissores para termelétricas.

3.2 COLETA DE DADOS EM LITERATURA CIENTÍFICA

Uma vez realizado o levantamento a cerca dos combustíveis empregados e/ou em potencial para ser empregado em termelétricas, foi necessária à obtenção dos dados físico-químicos e de emissão de GEE destes combustíveis para dar início a construção da ferramenta. Os parâmetros físico-químicos necessários para este estudo foram: densidade (para combustíveis gasosos¹⁴), poder calorífico inferior (PCI) e fator de emissão de gases de efeito estufa (FE). Os dados de densidade e poder calorífico foram obtidos principalmente no relatório do Balanço Energético Nacional, enquanto os dados de fator de emissão de GEE foram obtidos principalmente no *IPCC Guidelines* e na Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Além dessas fontes, foram utilizadas também literaturas científicas, principalmente para os combustíveis em estudo e/ou menos usuais.

3.3 COLETA DE DADOS COM EMPRESAS RELACIONADAS À ÁREA ENERGÉTICA

Alguns parâmetros físico-químicos de combustíveis utilizados para geração de energia elétrica apontados no BIG da ANEEL não foram identificados na literatura científica, devido sua característica inovadora. Desta forma, alguns parâmetros de combustíveis foram obtidos de manuais e catálogos de empresas de tecnologia energética. Neste caso, foram utilizados dados empresa nacional TECNOLOGIA EM CALOR LTDA e empresa Turca TEKNOPOLI.

3.4 CRIAÇÃO DE PLANILHA DE DADOS

Para a construção da ferramenta de consulta, objeto deste trabalho, o software Microsoft Office *Excel*[®] foi escolhido devido a sua característica acessível e de fácil compreensão. Para elaboração da ferramenta foi necessário listar os combustíveis que estão disponíveis para comparação, bem como seus parâmetros físico-químicos, e dados de fator de emissão de GEE de cada combustíveis. A segunda etapa da construção foi a inserção da equações e fórmulas para calcular a quantidade de energia gerada de cada combustível, e as emissões de GEE não-renováveis e renováveis atreladas aos mesmos. A partir dos resultados das equações foi proposto dois modelos de layouts para comparação dos combustíveis para fácil visualização do usuário.

¹⁴ Os valores de densidade de combustíveis gasosos foram utilizados para converter o PCI dos combustíveis gasosos de quilocaloria por metro cúbico (kcal/m³) para quilocaloria por quilos (kcal/cal).

3.5 ELABORAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE CÁLCULOS E CONVERSÕES

Após a obtenção e tabulação de todos os combustíveis, bem como de seus respectivos dados físico-químicos e de emissão de GEE, deu-se início a elaboração das equações matemáticas necessárias para a realização dos cálculos de conversões e correlações entre os combustíveis.

Para gerar a informação sobre quantidade de energia potencialmente gerada por cada combustível foram utilizados os parâmetros descritos na Equação 1 (em quilocaloria por quilowatt hora) e Equação 2 (em quilogramas por em Terajoule).

$$E_g = PCI/860 * Q_{comb} \quad (1)$$

Onde:

E_g = quantidade de energia gerada (kcal/kWh);

PCI = poder calorífico inferior do combustível (kcal/kg);

Q_{comb} = quantidade de combustível consumido (kg).

$$E_g = PCI \times 4,1868/10^9 * Q_{comb} \quad (2)$$

Onde:

E_g = quantidade de energia gerada (kg/TJ);

PCI = poder calorífico inferior do combustível (kcal/kg);

Q_{comb} = quantidade de combustível consumido (kg).

A quantidade total de energia gerada durante o processo, considerando a eficiência padrão de cada técnica ou equipamento de conversão da energia, também foi prevista na ferramenta (Equação 3).

$$E_t = E_g * \eta \quad (3)$$

Onde

E_t = quantidade de total de energia do combustível gerada (kg/TJ);

E_g = quantidade de energia do combustível (kg/TJ);

η = eficiência do equipamento (%)¹⁵.

Para os cálculos das emissões de GEE atreladas a cada combustível, primeiro foram calculadas as emissões em função dos gases individuais de dióxido de carbono (CO₂), metano

¹⁵ Cabe observar que não foi adotado faixas de intervalo de eficiência dos equipamentos conforme é comumente visto em manuais de equipamentos, pois se fossem aplicadas faixas de intervalos seriam usados apenas os dados médios, o que aumentaria o grau de imprecisão da ferramenta.

(CH₄) e óxido nitroso (N₂O), utilizando o fator de emissão (FE) de cada gás/combustível¹⁶, a quantidade de combustível utilizado¹⁷, e a eficiência de cada equipamento, conforme apresentado na Equação 4.

$$E_{(n),comb} = Et * FE_{(n),comb} \quad (4)$$

Onde:

$E_{(n),comb}$ = emissões do gás individual de efeito estufa, sendo (n) CO₂, CH₄ ou N₂O (kg), por tipo de combustível (kg/TJ);

Et = quantidade de energia gerada a partir do combustível consumido e eficiência do equipamento (TJ);

$FE_{(n),comb}$ = fator de emissão de cada gás individual de efeito estufa, sendo (n) CO₂, CH₄ ou N₂O (kg), por tipo de combustível (kg/TJ).

As emissões de GEE totais, representadas em dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}), foram então calculadas a partir conversão de cada gás de efeito estufa individual em CO_{2eq}, utilizando o potencial de aquecimento global (GWP¹⁸, sigla em inglês de *global warming potential*) de cada gás e a soma de todos os valores, conforme apresentado na Equação 5.

$$E_{CO2eq} = \Sigma (E_{CO2} * GWP) + (E_{CH4} * GWP) + (E_{N2O} * GWP) \quad (5)$$

Onde:

E_{CO2eq} = São as emissões totais do combustível em unidade de dióxido de carbono equivalente (kg);

$E_{CO2} * GWP$ = Emissões de CO₂ multiplicados pelo seu GWP (kg);

$E_{CH4} * GWP$ = Emissões de CH₄ multiplicados pelo seu GWP (kg);

$E_{N2O} * GWP$ = Emissões de N₂O multiplicados pelo seu GWP (kg).

Os valores de GWP dos gases acima referidos foram obtidos do IPCC (2007) e correspondem a Dióxido de Carbono (CO₂) GWP = 1; Metano (CH₄) GWP = 25; e Óxido Nitroso (N₂O) GWP = 298.

As emissões de GEE de combustíveis renováveis são divididas em duas partes: i) a parcela renovável, proveniente apenas das emissões individuais de CO₂ do combustível, e ii) a parcela não-renovável, proveniente das emissões dos demais gases de efeito estufa do combustível, no caso, CH₄ e N₂O.

¹⁶ O FE de cada gás/combustível está apresentado nas Tabelas 6, 7 e 8.

¹⁷ Método de acordo com a metodologia publicada pelo *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006).

¹⁸ O GWP adotado foi o GWP-100 que é o potencial de aquecimento global de cada gás individual de efeito estufa para o período de 100 anos. O GWP de cada GEE pode ser consultado no anexo A.

Essa diferença de cálculo das emissões de GEE de combustíveis renováveis ocorre devido ao fato de que o CO₂ emitido do combustível renovável é, primeiramente, absorvido pela planta durante seu período de crescimento, através da fotossíntese. Desta forma, no CO₂ emitido é considerada a parcela renovável do total de emissões do combustível renovável. Os demais gases de efeito estufa emitidos pelo mesmo combustível (no caso CH₄ e N₂O) são contabilizados como a parcela não renovável.

A parcela renovável é representada em dióxido de carbono equivalente renovável (CO_{2eqR}) e foi calculada a partir dos parâmetros de fator de emissão (FE) de CO₂ do combustível, da quantidade de combustível utilizado e da eficiência de cada equipamento, conforme apresentado na Equação 6.

$$CO_{2eqR} = Et * FE_{CO_2,comb} \quad (6)$$

Onde:

$E_{CO_{2eqR}}$ = emissões totais de CO₂ renováveis por tipo de combustível (kg/TJ);

Et = quantidade de energia gerada a partir do combustível consumido e eficiência do equipamento (TJ);

$FE_{CO_2,comb}$ = fator de emissão do CO₂ por tipo de combustível (kg/TJ).

A parcela não renovável é proveniente dos demais gases de efeito estufa emitidos pelo mesmo combustível (no caso CH₄ e N₂O), é representada em dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}) e calculada a partir dos parâmetros de fator de emissão (FE) de CH₄ e N₂O do combustível, da quantidade de combustível utilizado, e da eficiência de cada equipamento, conforme apresentado na Equação 7.

$$E_{(n),comb} = Et * FE_{(n),comb} \quad (7)$$

Onde:

$E_{(n),comb}$ = emissões do gás individual de efeito estufa, sendo (n) CH₄ ou N₂O (kg), por tipo de combustível (kg/TJ);

Et = quantidade de energia gerada a partir do combustível consumido e eficiência do equipamento (TJ);

$FE_{(n),comb}$ = fator de emissão de cada gás individual de efeito estufa, sendo (n) CH₄ ou N₂O (kg), por tipo de combustível (kg/TJ).

As emissões de GEE totais não renováveis dos combustíveis renováveis são representadas em dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}), e foram calculados a partir da conversão de CH₄ e N₂O em CO_{2eq}, utilizando seus respectivos GWP, e sequente soma de todos os valores, conforme apresentado na Equação 8.

$$E_{CO2eq} = \Sigma (E_{CH4} * GWP) + (E_{N2O} * GWP) \quad (8)$$

Onde:

E_{CO2eq} = São as emissões totais do combustível em unidade de dióxido de carbono equivalente (kg);

$E_{CH4} * GWP$ = Emissões de CH_4 multiplicados pelo seu GWP (kg);

$E_{N2O} * GWP$ = Emissões de N_2O multiplicados pelo seu GWP (kg).

3.6 CRIAÇÃO DAS FUNCIONALIDADES DA FERRAMENTA

A partir das adequações acima descritas, foi realizado o desenvolvimento da ferramenta no software Microsoft Office *Excel*[®], que compara automaticamente as emissões de gases de efeito estufa e poder energético de combustíveis renováveis e não renováveis. Essa comparação pode ser feita entre combustíveis renováveis, entre combustíveis não-renováveis ou entre combustíveis renováveis e não renováveis.

Foram desenvolvidos dois modelos de ferramenta sendo que o primeiro modelo compara dois combustíveis concomitantemente, em relação à quantidade de energia gerada e emissões de GEE.

Para isso foram gerados os campos onde o usuário seleciona o tipo de combustível já utilizado, insere a quantidade (em quilogramas) de combustível utilizado e a eficiência do equipamento¹⁹, bem como seleciona um combustível desejado para comparação e insere a eficiência do equipamento para esse novo tipo de combustível. Foram gerados também os campos onde a ferramenta automaticamente apresenta os resultados da quantidade (em quilogramas) de combustível necessário para substituição (de forma a obter a mesma quantidade de energia do primeiro combustível); apresenta os valores de energia gerada de cada combustível (em kWh e TJ) com e sem a eficiência do equipamento e apresenta os dados de emissões de GEE atrelada a cada uma das operações.

Foram criados também mecanismos para que este modelo de ferramenta gere simultaneamente três gráficos para melhor visualização das informações.

O segundo modelo da ferramenta foi desenvolvido de forma comparar um combustível selecionado com todos os demais combustíveis presentes na ferramenta, de forma concomitantemente.

¹⁹ Neste caso, se o equipamento apontar uma variação de eficiência, é possível utilizar a média.

Neste modelo também foi necessário a criação dos campos onde o usuário seleciona o combustível utilizado, insere a quantidade (em quilogramas) deste combustível e a eficiência do equipamento. Neste modelo foi criado também um dispositivo onde o usuário pode inserir diferentes valores de eficiência para os diferentes combustíveis. Foram gerados também os campos onde a ferramenta automaticamente apresenta os resultados comparativos de todos os combustíveis disponíveis na ferramenta, de forma que o usuário possa analisar todos os combustíveis de uma única vez.

Por fim, foi criada também uma aba contendo o manual de instrução para operação da ferramenta, na forma de itens de fácil leitura e compreensão.

3.7 DISPONIBILIZAÇÃO DA FERRAMENTA PARA CONSULTA PÚBLICA

Após a elaboração de todas as funcionalidades da ferramenta, bem como teste de *performance* da mesma, a planilha em Excel foi devidamente formatada para se tornar uma ferramenta de consulta dinâmica, interativa e adaptável às necessidades do usuário. Essa ferramenta foi então disponibilizada para consulta pública, de forma aberta. Ressalta-se que para utilização desta ferramenta se faz necessária o download da ferramenta pelo usuário que pode ser executado acessando do endereço da internet: <http://bit.ly/comparacaodebiocombustiveis>.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A revisão acerca dos temas de mudanças climáticas, energia elétrica, segurança energética, centrais termelétricas e biocombustíveis mostrou que mudanças observadas nos sistemas e ciclos naturais, evidenciam as alterações no sistema climático, sendo a elevação da temperatura média global a principal delas, que está diretamente relacionada ao aumento das emissões de GEE antropogênicas.

Para conter as alterações climáticas e gerenciar os riscos futuros são necessárias ações de mitigação e adaptação, moldadas ao lugar e contexto local, com planejamento em longo prazo, com foco na redução de emissões de GEE, através da cooperação internacional, hoje norteado pelo Acordo de Paris.

Diante deste cenário, algumas metodologias e ferramentas de contabilização de emissões de GEE têm sido apresentadas e usadas por instituições governamentais e privadas e instituições de ensino e pesquisa. A principal metodologia internacionalmente aceita para contabilização das emissões de GEE é o IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (2006). A partir desta metodologia foram criadas ferramentas de cálculo de emissões de GEE que facilitam e se adaptam às realidades e necessidades locais. A “*GHG Protocol*” é a ferramenta mais utilizada por instituições governamentais e empresariais atualmente sendo utilizada para quantificar e gerenciar suas emissões de gases com efeito de estufa. Esta ferramenta foi desenvolvida pelo *World Resources Institute* (WRI) em parceria com *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) (GREENHOUSE GAS PROTOCOL, 2012).

Inspirado em ferramentas como a “*GHG Protocol*”, esse trabalho teve como objetivo principal desenvolver uma ferramenta que pudesse ser utilizada por tomadores de decisões de instituições públicas e privadas de geração de energia elétrica. A ferramenta desenvolvida neste trabalho tem como diferencial a comparação de combustíveis sobre os parâmetros de quantidade de energia elétrica gerada por combustível e emissões de GEE associadas aos mesmos, facilitando a comparação de combustíveis, e observando o melhor “custo-benefício” para substituição parcial ou total de combustível com foco em redução de emissões de GEE.

Visando uma maior aplicabilidade para a ferramenta foram englobados tantos combustíveis sólidos quando os líquidos e gasosos, possíveis de serem empregados nas termelétricas. Dentre os combustíveis não-renováveis foram escolhidos combustíveis que são empregados atualmente neste setor energético, visando aplicação em qualquer simulação de

substituição de combustível que o usuário necessite. Dentre os renováveis foram escolhidos aqueles que atualmente já são utilizados para geração de energia em usinas térmicas. Na Tabela 6 estão apresentados todos os combustíveis contemplados na ferramenta, com sua respectiva origem e capacidade instalada (número de usinas que utilizam este combustível e potência em kW produzida atualmente).

Tabela 6 - Combustíveis utilizados em geração térmica de eletricidade e sua capacidade instalada

	Origem	Fonte energética	Nº de Usinas	Potencia (kW)	Total (%)*
Renováveis	Agroindustriais	Bagaço de Cana de Açúcar	402	11.167.735	26,89 %
		Biogás-AGR	2	948	0,00 %
		Capim Elefante	2	31.700	0,08 %
		Casca de Arroz	12	45.333	0,11 %
	Biocombustíveis líquidos	Óleos Vegetais	2	4.350	0,01 %
	Floresta	Carvão Vegetal	8	43.197	0,10 %
		Gás de Alto Forno - Biomassa	10	114.265	0,28 %
		Lenha Comercial	4	23.900	0,06 %
		Lixívia (licor negro)	18	2.542.616	6,12 %
		Resíduos Florestais/Madeireiros	55	425.197	1,02 %
	Resíduos animais	Biogás - RA	14	4.481	0,01 %
	Resíduos sólidos urbanos	Biogás - RSU	19	128.851	0,31 %
Não-Renováveis	Carvão mineral	Carvão Mineral ¹	16	3.699.070	8,91 %
		Gás de Alto Forno	10	375.330	0,90 %
	Gás natural	Gás Natural ²	166	12.819.149	30,86 %
	Petróleo	Gás de Alto Forno	1	1.200	0,00 %
		Gás de Refinaria	6	315.560	0,76 %
		Óleo Combustível	75	4.055.885	9,76 %
		Óleo Diesel	2156	4.711.474	11,34 %
		Outros Energéticos de Petróleo	18	1.028.328	2,48 %

*Percentual calculado com base na potência instalada.

¹Este combustível gera energia por dois processos diferentes sendo: calor de processo (2 usinas: 28.400 kW) e carvão mineral (14 usinas: 3.323.74kW).

²Este combustível gera energia por dois processos diferentes sendo: calor de processo (1 usina: 40.000 kW) e gás natural (165 usinas: 12.779.149 kW).

Elaboração própria - Dados do Banco de Informações (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (março de 2018).

No Brasil, a potência instalada energética de termelétricas é majoritariamente advinda de combustíveis fósseis (65 %) do que combustíveis renováveis (35 %), sendo o mais

amplamente utilizado o gás natural (30,86 %), seguido do óleo Diesel (11,34 %), óleo combustível (9,76 %) e carvão mineral (8,90 %). No entanto combustíveis renováveis, como o bagaço de cana de açúcar, tem se demonstrado com uma alternativa sustentável e de potencial aplicação, correspondendo atualmente a 26,88 % da energia gerada.

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS COMBUSTÍVEIS

O levantamento de dados a respeito dos parâmetros densidade, poder calorífico e fator de emissão de GEE para os combustíveis²⁰ citados na Tabela 6, estão apresentados nas Tabelas 7-9, de acordo com o estado físico dos combustíveis levantados.

Tabela 7 - Dados de poder calorífico inferior (PCI) e fatores de emissão (FE CO₂, CH₄, N₂O) para os combustíveis sólidos

Typo de Combustível	PCI (kcal/kg)	FE CO ₂ (kg/TJ)	FE CH ₄ (kg/TJ)	FE N ₂ O (kg/TJ)
Combustíveis não renováveis				
Carvão Mineral (Vapor 3100 kcal / kg)	2.950 ¹	94.600 ²	1 ³	1,5 ³
Carvão Mineral (Vapor 3300 kcal / kg)	3.100 ¹			
Carvão Mineral (Vapor 3700 kcal / kg)	3.500 ¹			
Carvão Mineral (Vapor 4200 kcal / kg)	4.000 ¹			
Carvão Mineral (Vapor 4500 kcal / kg)	4.250 ¹			
Carvão Mineral (Vapor 4700 kcal / kg)	4.450 ¹			
Carvão Mineral (Vapor 5200 kcal / kg)	4.900 ¹			
Carvão Mineral (Vapor 5900 kcal / kg)	5.600 ¹			
Carvão Mineral (Vapor 6000 kcal / kg)	5.700 ¹			
Carvão Mineral (vapor sem especificação)	2.850 ¹			
Combustíveis renováveis				
Carvão Vegetal	6.460 ¹	106.700 ²	200 ³	4 ³
Resíduos Florestais/ Madeireiros	3.300 ⁴	112.000 ³	30 ³	
Bagaço de Cana de Açúcar	2.130 ^{1**}	97.166 ²		
Casca de Arroz	3.300 ⁴	100.000 ³		
Capim Elefante	3.500 ⁵			
Lenha Comercial*	3.100 ¹	105.967 ²		

¹Fonte: Brasil, 2017a; ²Fonte: Brasil, 2010; ³Fonte: IPCC, 2006; ⁴Fonte: TEC, [20-]; ⁵Fonte: MAZZARELLA, 2007.

*Denominado de Lenha para Queima Direta no MCT (2010), com 50 % de umidade.

²⁰ O Biogás é obtido por diferentes origens (agroindustrial, resíduos animais e resíduos sólidos urbanos), porém na literatura não há diferenciação quanto aos dados de fator de emissão e por calorífico. Desta forma, todos os tipos de biogás foram tratados genericamente como Biogás para este trabalho.

**Bagaço com 50 % de umidade.

Tabela 8 - Dados sobre a densidade, poder calorífico inferior (PCI) e fatores de emissão (FE CO₂, CH₄, N₂O) para os combustíveis líquidos

Tipo de Combustível	PCI (kcal/kg)	Densidade (kg/m³)	FE CO2 (kg/TJ)	FE CH4 (kg/TJ)	FE N2O (kg/TJ)
Combustíveis não renováveis					
Óleo Diesel Puro*	10.100 ¹	840 ¹	74.100 ²	3 ³	0,6 ³
Óleo Combustível	9.590 ¹	1.000 ¹	77.400 ²		
Outros Energéticos de Petróleo	10.200 ¹	864 ¹	73.300 ²		
Combustíveis renováveis					
Lixívia (licor negro)	2.860 ¹	1.090 ¹	95.300 ²	3 ³	2 ³
Óleos vegetais	1.850 ¹	1.420 ¹	73.333 ²		0,6 ³

¹ Fonte: Brasil, 2017a; ²Fonte: Brasil, 2010; ³Fonte: IPCC, 2006.

*Lei 13.263/2016 prevê adição obrigatória de 10 %, em volume de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final, em até trinta e seis meses após a data dessa lei de 24/09/2014 (BRASIL, 2016).

Tabela 9 - Dados sobre a densidade, poder calorífico inferior (PCI) e fatores de emissão de emissão (FE CO₂, CH₄, N₂O) para os combustíveis gasosos

Tipo de Combustível	PCI (kcal/kg)	Densidade (kg/m³)	FE CO2 (kg/TJ)	FE CH4 (kg/TJ)	FE N2O (kg/TJ)
Combustíveis não renováveis					
Gás de Refinaria	8.400 ¹	0,780 ¹	57.600 ³	1 ³	0,1 ³
Gás de Alto Forno	875* ⁴	1,250 ⁶	260.000 ³		
Gás Natural (úmido)	7.348* ¹	0,740 ¹	56.100 ²		
Combustíveis renováveis					
Biogás**	6.106* ⁵	1,360 ⁷	54.600 ³	1 ³	0,1 ³

¹Fonte: Brasil, 2017a; ²Fonte: Brasil, 2010; ³Fonte: IPCC, 2006; ⁴Fonte: TEC, [20-]; ⁵Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008; ⁶Fonte: TEKNOPOLI, [20-]; ⁷Fonte: CETESB, 2006.

*Para padronizar os cálculos, o poder calorífico dos combustíveis foi transformado de kcal/m³ para kcal/kg, multiplicando os valores iniciais de PCI pelas suas respectivas densidades. Os valores originais são: Gás de Alto Forno - 700 kcal/m³; Gás Natural (úmido) – 9.930 kcal/m³; Biogás – 4500 kcal/m³.

**Corresponde ao biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos (RSU), agrícolas (AGR) e resíduos animais (RA), classificados pela ANEEL.

4.2 CONSTRUÇÃO E APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO

Com base nos dados das Tabelas 6 a 9, bem como das equações apresentadas foram desenvolvidos *os dois modelos de ferramenta*.

O primeiro modelo é o de Cálculo Individual: calcula a substituição de combustíveis comparando-os individualmente sob as perspectivas quantidade de energia gerada (com e sem eficiência do equipamento - η) e emissões de GEE atreladas àquela quantidade de energia.

O segundo modelo é o de Cálculo Coletivo: calcula a substituição de combustíveis comparando-os individualmente sob as perspectivas quantidade de energia gerada (com e sem eficiência do equipamento - η) e emissões de GEE atreladas àquela quantidade de energia;

A Figura 22 apresenta a imagem da ferramenta de Método Individual. Para o Cálculo Individual é necessário que o usuário insira as informações do combustível normalmente utilizado e do combustível que pretendesse utilizar para substituição do primeiro, bem como informar a eficiência do equipamento com cada combustível. Nas células amarelas da planilha o usuário deve, na sequência:

- i) Selecionar o tipo de combustível utilizado;
- ii) Inserir a quantidade do mesmo;
- iii) Informar a eficiência do equipamento (η);
- iv) Selecionar o combustível substituto;
- v) Informar a eficiência do equipamento com novo combustível substituto.

Figura 22 – Modelo de Ferramenta de Cálculo Individual

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

Automaticamente a ferramenta irá apresentar os dados de poder calorífico, fatores de emissão, quantidade de energia gerada com e sem a eficiência do equipamento, e as emissões de GEE tanto do combustível já utilizado como do substituto. A ferramenta irá apresentar também a quantidade de combustível substituto necessária para se manter a quantidade de energia gerada pelo combustível já utilizado.

Nesta tela aparecerão também três gráficos, sendo que o primeiro gráfico representa a diferença da quantidade de combustível necessário para gerar a mesma quantidade de energia entre o combustível usado e o substituto, as emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) e emissões de dióxido de carbono equivalente renováveis ($\text{CO}_2\text{e Renováveis}$). O segundo e o terceiro gráfico representam as mesmas informações, porém separadamente, ou seja, o segundo gráfico apresenta a diferença de quantidade de combustível e o terceiro gráfico as emissões atreladas (não renováveis e renováveis) de cada combustível.

A Figura 23 ilustra a aplicação da ferramenta utilizando os combustíveis carvão mineral 3100 e o bagaço de cana de açúcar. A partir da inserção de 1000 kg de carvão mineral com uma eficiência do equipamento de 50 % é possível obter os resultados do poder calorífico, fatores de emissão, quantidade de energia gerada (com e sem a eficiência do equipamento), as emissões de GEE de ambos os combustíveis e a quantidade de bagaço de cana de açúcar (1385 kg) necessária para se manter a mesma quantidade de energia gerada pelo carvão mineral 3100, ou seja, 3430 kWh (desconsiderando a eficiência do equipamento) e 1717 kWh (considerando a eficiência do equipamento). Através da Figura 23 é possível visualizar também os gráficos mostrando a diferença na quantidade de carvão mineral 3100 e bagaço de cana de açúcar, necessária para gerar as citadas energias, as emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) e emissões de dióxido de carbono equivalente renováveis ($\text{CO}_2\text{e Renováveis}$). A simulação e os resultados para todas as combinações de combustíveis possíveis deste modelo de cálculo individual, podem ser consultadas na ferramenta através do link <http://bit.ly/comparacaodebiocombustiveis>.

Figura 23 – Ferramenta de Cálculo Individual de Carvão Mineral e Bagaço de Cana de Açúcar

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

A Figura 24 ilustra o funcionamento do Método Coletivo. Para o Cálculo Coletivo é necessário que o usuário insira apenas as informações do combustível utilizado, bem como informar a eficiência do equipamento com cada combustível. Nas células amarelas da ferramenta o usuário deve, na sequência:

- i) Selecionar o tipo de combustível utilizado;
- ii) Inserir a quantidade do mesmo;
- iii) Informar a eficiência do equipamento (η);
- iv) Informar a eficiência do equipamento (η) para os demais combustíveis apresentados.

Automaticamente a ferramenta irá apresentar os dados de poder calorífico, fatores de emissão, quantidade de energia gerada com e sem a eficiência do equipamento, e as emissões de GEE tanto do combustível já utilizado como de todos os demais combustíveis presentes na ferramenta. A ferramenta irá apresentar também a quantidade de cada um dos combustíveis substitutos necessária para se manter a quantidade de energia gerada pelo combustível já utilizado.

Figura 24 - Modelo de Ferramenta de Cálculo Coletivo

Combustível utilizado			Dados - Poder calorífico e fator de emissão				Energia gerada - Sem eficiência do equipamento		Energia gerada - Com eficiência do equipamento		Emissões de gases de efeito estufa (GEE)				
Selecione o tipo de combustível	Quantidade (kg)	Eficiência do Equipamento (%)	PCI (kcal/kg)	FE CO ₂ (kg/TJ)	FE CH ₄ (kg/TJ)	FE N ₂ O (kg/TJ)	Gerada (kWh)	Gerada (TJ)	Total (kWh)	Total (TJ)	CO ₂ (kg)	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)	CO ₂ e (kg)	CO ₂ e Renováveis (kg)
	ii	iii													
Combustível substituto			Dados - Poder calorífico e fator de emissão				Energia gerada - Sem eficiência do equipamento		Energia gerada - Com eficiência do equipamento		Emissões de gases de efeito estufa (GEE)				
Combustível	Quantidade combustível necessário para substituição	Eficiência do Equipamento (%)	PCI (kcal/kg)	FE CO ₂ (kg/TJ)	FE CH ₄ (kg/TJ)	FE N ₂ O (kg/TJ)	Gerada (kWh)	Gerada (TJ)	Total (kWh)	Total (TJ)	CO ₂ (kg)	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)	CO ₂ e (kg)	CO ₂ e Renováveis (kg)
Carvão Mineral 3100	0	iv	2950	94600	1	1,5									
Carvão Mineral 3300	0	iv	3100	94600	1	1,5									
Carvão Mineral 3700	0	iv	3500	94600	1	1,5									
Carvão Mineral 4200	0	iv	4000	94600	1	1,5									
Carvão Mineral 4500	0	iv	4250	94600	1	1,5									
Carvão Mineral 4700	0	iv	4450	94600	1	1,5									
Carvão Mineral 5200	0	iv	4900	94600	1	1,5									
Carvão Mineral 5900	0	iv	5600	94600	1	1,5									
Carvão Mineral 6000	0	iv	5700	94600	1	1,5									
Carvão Mineral (Vapor sem Es	0	iv	2850	94600	1	1,5									
Óleo Diesel Puro	0	iv	10100	74100	3	0,6									
Óleo Combustível	0	iv	9590	77400	3	0,6									
Outros Energéticos de Petróleo	0	iv	10200	73300	3	0,6									
Gás de Refinaria	0	iv	8400	57600	1	0,1									
Gás de Alto Forno	0	iv	875	260000	1	0,1									
Gás Natural (úmido)	0	iv	7348,2	56100	1	0,1									
Carvão Vegetal	0	iv	6460	106700	200	4									
Resíduos Florestais/Resíduos	0	iv	3300	112000	30	4									
Bagaço de Cana de Açúcar	0	iv	2130	97166,67	30	4									
Casca de Arroz	0	iv	3300	100000	30	4									
Capim Elefante	0	iv	3500	100000	30	4									
Lenha comercial	0	iv	3100	105966,7	30	4									
Lixívia (licor negro)	0	iv	2860	95300	3	2									
Melaço (óleos vegetais)	0	iv	1850	73333	3	0,6									
Gás de Alto Forno - Biomassa	0	iv	875	260000	1	0,1									
Biogás	0	iv	6105,51	54600	1	0,1									

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

A Figura 25 ilustra a aplicação da ferramenta, simulando a substituição do combustível carvão mineral para todas as opções possíveis de combustíveis. A partir da inserção de 1000 kg de carvão mineral com uma eficiência do equipamento de 40 % é possível obter os resultados do poder calorífico, fatores de emissão, quantidade de energia gerada (com e sem a eficiência do equipamento), as emissões de GEE de ambos os combustíveis e a quantidade de todos os demais combustíveis necessária para se manter a mesma quantidade de energia gerada pelo carvão mineral 3100, ou seja, 3430 kWh.

Figura 25 - Ferramenta de Cálculo Coletivo a partir do Carvão Mineral

Combustível utilizado			Poder calorífico e fatores de emissão				Energia gerada (desconsiderando a eficiência do equipamento)		Energia gerada (considerando a eficiência do equipamento)		Emissões de gases de efeito estufa (GEE)				
Combustível	Quantidade (kg)	Eficiência do Equipamento (%)	PCI (kcal/kg)	FE CO ₂ (kg/TJ)	FE CH ₄ (kg/TJ)	FE N ₂ O (kg/TJ)	Gerada (kWh)	Gerada (TJ)	Total (kWh)	Total (TJ)	CO ₂ (kg)	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)	CO ₂ e (kg)	CO ₂ e Renováveis (kg)
Carvão Mineral 3100	1000	40	2950	94600	1,0	1,5	3430	0,01	1372	0,00	467	0,005	0,007	469,7	0

Combustível utilizado			Poder calorífico e fatores de emissão				Energia gerada (desconsiderando a eficiência do equipamento)		Energia gerada (considerando a eficiência do equipamento)		Emissões de gases de efeito estufa (GEE)				
Combustível	Quantidade (kg)	Eficiência do Equipamento (%)	PCI (kcal/kg)	FE CO ₂ (kg/TJ)	FE CH ₄ (kg/TJ)	FE N ₂ O (kg/TJ)	Gerada (kWh)	Gerada (TJ)	Total (kWh)	Total (TJ)	CO ₂ (kg)	CH ₄ (kg)	N ₂ O (kg)	CO ₂ e (kg)	CO ₂ e Renováveis (kg)
Carvão Mineral 3100	1000	40	2950	94600	1	1,5	3430	0,01	1372,1	0,00	467,36	0,00	0,01	469,70	
Carvão Mineral 3300	952	40	3100	94600	1	1,5	3430	0,01	1372,1	0,00	467,36	0,00	0,01	469,70	
Carvão Mineral 3700	843	40	3500	94600	1	1,5	3430	0,01	1372,1	0,00	467,36	0,00	0,01	469,70	
Carvão Mineral 4200	738	40	4000	94600	1	1,5	3430	0,01	1372,1	0,00	467,36	0,00	0,01	469,70	
Carvão Mineral 4500	694	40	4250	94600	1	1,5	3430	0,01	1372,1	0,00	467,36	0,00	0,01	469,70	
Carvão Mineral 4700	663	40	4450	94600	1	1,5	3430	0,01	1372,1	0,00	467,36	0,00	0,01	469,70	
Carvão Mineral 5200	602	40	4900	94600	1	1,5	3430	0,01	1372,1	0,00	467,36	0,00	0,01	469,70	
Carvão Mineral 5900	527	40	5600	94600	1	1,5	3430	0,01	1372,1	0,00	467,36	0,00	0,01	469,70	
Carvão Mineral 6000	518	40	5700	94600	1	1,5	3430	0,01	1372,1	0,00	467,36	0,00	0,01	469,70	
Carvão Mineral (Vapor sem Es	1035	40	2850	94600	1	1,5	3430	0,01	1372,1	0,00	467,36	0,00	0,01	469,70	
Óleo Diesel Puro	292	50	10100	74100	3	0,6	3430	0,01	1715,1	0,01	457,61	0,02	0,00	459,17	
Óleo Combustível	308	51	9590	77400	3	0,6	3430	0,01	1749,4	0,01	487,55	0,02	0,00	489,14	
Outros Energéticos de Petróleo	289	52	10200	73300	3	0,6	3430	0,01	1783,7	0,01	470,77	0,02	0,00	472,40	
Gás de Refinaria	351	53	8400	57600	1	0,1	3430	0,01	1818,0	0,01	377,05	0,01	0,00	377,41	
Gás de Alto Forno	3371	54	875	260000	1	0,1	3430	0,01	1852,3	0,01	1734,09	0,01	0,00	1734,45	
Gás Natural (úmido)	401	55	7348,2	56100	1	0,1	3430	0,01	1886,6	0,01	381,09	0,01	0,00	381,46	
Carvão Vegetal	457	56	6460	106700	200	4	3430	0,01	1920,9	0,01		1,38	0,03	42,83	738,00
Resíduos Florestais/Resíduos	894	57	3300	112000	30	4	3430	0,01	1955,2	0,01		0,21	0,03	13,67	788,49
Bagaço de Cana de Açúcar	1385	58	2130	97166,67	30	4	3430	0,01	1989,5	0,01		0,21	0,03	13,91	696,06
Casca de Arroz	894	59	3300	100000	30	4	3430	0,01	2023,8	0,01		0,22	0,03	14,15	728,71
Capim Elefante	843	60	3500	100000	30	4	3430	0,01	2058,1	0,01		0,22	0,03	14,39	741,06
Lenha comercial	952	61	3100	105966,7	30	4	3430	0,01	2092,4	0,01		0,23	0,03	14,63	798,37
Lixívia (licor negro)	1031	62	2860	95300	3	2	3430	0,01	2126,7	0,01		0,02	0,02	5,14	729,77
Melaço (óleos vegetais)	1595	63	1850	73333	3	0,6	3430	0,01	2161,0	0,01		0,02	0,00	1,97	570,62
Gás de Alto Forno - Biomassa	3371	64	875	260000	1	0,1	3430	0,01	2195,3	0,01		0,01	0,00	0,43	2055,22
Biogás	483	65	6105,51	54600	1	0,1	3430	0,01	2229,7	0,01		0,01	0,00	0,44	438,34

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

4.3 ELABORAÇÃO DO MANUAL DE INSTRUÇÃO DA FERRAMENTA

Visando instruir os usuários a efetuar a correta utilização da ferramenta, foi elaborado um manual de instruções ao usuário na forma de itens fácil e objetivo. A Figura 26 a seguir apresenta a imagem da tela contendo as referidas instruções.

Figura 26 - Instruções Gerais ao Usuário da Ferramenta

Ferramenta para comparação entre combustíveis para geração de Energia Elétrica	
Método Individual	<p>Para o Cálculo Individual é necessário que o usuário insira as informações do combustível normalmente utilizado e do combustível que pretendesse utilizar para substituição do primeiro, bem como informar a eficiência do equipamento com cada combustível. Nas células amarelas da planilha o usuário deve, na sequência:</p> <ol style="list-style-type: none">Faça o download da ferramenta;Selecionar o tipo de combustível utilizado;Insirir a quantidade do mesmo;Informar a eficiência do equipamento (η);Selecionar o combustível substituto;Informar a eficiência do equipamento com novo combustível substituto.
Método Coletivo	<p>o Método Coletivo que apresenta um comparativo entre o combustível usado pelo usuário e todos os demais simultaneamente. Para isso é necessário que o usuário insira apenas as informações do combustível utilizado, bem como informar a eficiência do equipamento com cada combustível. Nas células amarelas da ferramenta o usuário deve, na sequência:</p> <ol style="list-style-type: none">Faça o download da ferramenta;Selecionar o tipo de combustível utilizado;Insirir a quantidade do mesmo;Informar a eficiência do equipamento (η);Informar a eficiência do equipamento (η) para os demais combustíveis apresentados.

Ferramenta desenvolvida como parte da dissertação de mestrado da aluna Karine Zortea da Silva pelo Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade, da Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH-USP), sob orientação da Prof. Dra. Renata Colombo.

Contato: karine.z.silva@gmail.com

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

4.4 DIVULGAÇÃO DA FERRAMENTA DE CÁLCULO

Como forma de incentivar a difusão do conhecimento e na tentativa de que a ferramenta seja utilizada por tomadores de decisão, esta ferramenta foi disponibilizada em link aberto para download (<http://bit.ly/comparacaodebiocombustiveis>), sem travamento das células para checagem de fórmulas e enviada a empresas e instituições

que possam fazer uso da ferramenta ou indica-lo a quem tenha interesse. Para isso, foi selecionado as seguintes instituições:

- 1) Observatório do Clima: é uma rede que reúne entidades da sociedade civil com o objetivo de discutir a questão das mudanças climáticas no contexto brasileiro. O OC promove encontros com especialistas na área, além de articular os atores sociais para que o governo brasileiro assuma compromissos e crie políticas públicas efetivas em favor da mitigação e da adaptação do Brasil em relação à mudança do clima. Enviado através do link: <http://www.observatoriodoclima.eco.br/contato/>;
- 2) Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE): é uma sociedade civil sem fins lucrativos que representa os setores elétrico e eletrônico de todo o Brasil. Enviado diretamente para equipe de Sustentabilidade;
- 3) Sindicato da Indústria da Energia no Estado de São Paulo (SindiEnergia). Enviado através do link: <http://www.sindienergia.org.br/contato.asp?cod=60&n=1&p=0>;
- 4) Centro de Estudos em Sustentabilidade (GVces) da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas (FGV EAESP): é um espaço aberto de estudo, aprendizado, reflexão, inovação e de produção de conhecimento, composto por pessoas de formação multidisciplinar, engajadas e comprometidas, e com genuína vontade de transformar a sociedade. Enviado diretamente a equipe de Sustentabilidade através do link: <http://www.gvces.com.br/contact/new?locale=pt-br>.

4.5 SIMULAÇÃO DE USO DA FERRAMENTA: CENÁRIOS DE SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS

Para testar a aplicabilidade da ferramenta, será apresentado a seguir uma simulação de um cenário de substituição de combustíveis para geração de energia elétrica.

Conforme detalhado no item de introdução deste trabalho, na matriz de energia elétrica brasileira predomina a geração de energia elétrica por fontes hídricas (68,1 % em 2016), porém, nos últimos anos o Brasil tem investido nos últimos anos na ampliação da capacidade instalada de centrais térmicas para geração elétrica, aumentando a participação de fontes não renováveis na geração elétrica de 8,3 % em

2011 para 15,7 % em 2016²¹, conforme detalhado na Tabela 4, sendo que o combustível que representa a maior capacidade instalada das centrais térmicas brasileiras para geração de energia elétrica é o gás natural (30,86 %) seguido pelo bagaço de cana de açúcar (26,89 %).

Para simulação do uso da ferramenta, será adotado o cenário em que a produção elétrica por gás natural fosse totalmente substituída por bagaço de cana de açúcar. Para isso serão usados os dados de produção elétrica de 2016 do Brasil a partir desses dois combustíveis, sendo possível observar variáveis do ponto de vista energético e de emissões de GEE.

Segundo dados do Balanço Energético Nacional, a produção de energia elétrica do bagaço de cana de açúcar e gás natural no ano de 2016 foram:

- Bagaço de cana de açúcar gerou 10.979 MW de energia elétrica, que corresponde a 38831641²² quilogramas de bagaço de cana de açúcar;
- Gás natural gerou 12.965MW de energia elétrica, que corresponde a 13292477 quilogramas²³ de gás natural.

Utilizando esses dados na ferramenta desenvolvida obtém-se os resultados, apresentados na Figura 27.

²¹ Foi excluída participação de fontes nucleares pois as mesmas não fazem referência a geração energia elétrica por usinas térmicas.

²² Conforme mencionado anteriormente, a ferramenta de cálculo desenvolvida neste trabalho utiliza dados dos combustíveis em quantidade (massa), visto que é o indicador mais comum a ser monitorado por empresas e instituições. Como o Balanço Energético Nacional (BEN) apresenta uma perspectiva de quantidade de energia gerada, para utilização dos dados do BEN é necessário fazer conversões para calcular a quantidade de combustível utilizado para geração de energia elétrica e posteriormente utilizar esses dados na ferramenta, conforme segue: i) Transformar MW para MWh. Para isso é necessário apenas multiplicar pelo número de horas em um ano que é 8760 horas, conforme segue: (1) Bagaço de cana de açúcar: $10.979 \text{ MW} * 8760 \text{ horas} = 96176040 \text{ MWh}$ e (2) Gás natural: $12.965 \text{ MW} * 8760 = 113573400 \text{ MWh}$. ii) Transformar MWh para kWh (unidade usada na ferramenta). Para isso é necessário apenas multiplicar o valor de MWh por mil, conforme segue: (3) Bagaço de cana de açúcar: $96176040 \text{ MWh} * 100 = 96176040000 \text{ kWh}$ e (4) Gás natural: $113573400 \text{ MWh} * 100 = 113573400000 \text{ kWh}$. iii) Calcular a quantidade de combustível. Para isso é necessário dividir a quantidade de energia gerada (kWh) pelo Poder Calorífico Inferior do Combustível (bagaço de cana de açúcar 2130 kcal/kg e gás natural 7348 kcal/kg) e multiplicar por 860, conforme segue: (5) Bagaço de cana de açúcar: $96176040000 \text{ kWh} / 2130 \text{ kcal/kg} * 860 = 38831641 \text{ kg}$ e (6) Gás natural: $113573400000 \text{ kWh} / 7348 \text{ kcal/kg} * 860 = 13292477 \text{ kg}$.

²³ Idem ao anterior.

Figura 27 – Simulação de cenário de substituição de combustível: gás natural por bagaço de cana de açúcar

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

Conforme apresentado na Figura 27, mais especificamente no gráfico central, para o gás natural possa ser substituído pelo bagaço de cana de açúcar para geração de energia elétrica por centrais termelétricas é necessário 78 % mais combustível (bagaço de cana de açúcar) para se obter a mesma energia elétrica que a produzida pelo gás natural. Essa margem ocorre devido ao da diferença do Poder Calorífico Inferior (PCI) – que é quantidade de energia liberada na forma de calor por cada combustível. No caso, o gás natural (7348 kcal/kg) tem o PCI quase quatro vezes superior ao do bagaço de cana de açúcar (2130 kcal/kg), e, portanto, é necessário muito menos gás natural para produzir a mesma quantidade de energia de bagaço de cana de açúcar.

Em relação a diferença das emissões de GEE, no entanto, a redução utilizando o bagaço de cana de açúcar é significativa. O gás natural emite 7.778.474 kgCO₂e enquanto o bagaço de cana de açúcar emite 269.002 kgCO₂e para produzir a mesma quantidade de energia, ou seja, o bagaço de cana de açúcar emitiu apenas 3,46 % em relação ao gás natural.

Esta emissão consideravelmente menor, além de contribuir para os temas abordados neste trabalho, em especial o aquecimento global, mostra que mesmo com aumento da quantidade de combustível utilizado, é possível obter emissões da ordem de apenas 3,46 % de GEE.

Este cenário ilustra apenas uma possível situação que um tomador de decisão irá deparar, porém as escolhas de substituição de combustível devem estar alinhadas a estratégia do tomador de decisão. Atualmente, a maioria dos países do mundo apresentaram seus compromissos em reduzir as emissões de GEE, através do Acordo de Paris, e as simulações provenientes destas ferramentas podem contribuir para direcionar as decisões de escolha dos combustíveis alternativos mais pertinentes (com menor emissão de GEE atrelada) e direcionar o posicionamento do país.

Ademais, outros pontos não abrangidos na ferramenta também deverão ser considerados no momento de tomada de decisão, como, por exemplo, o valor dos combustíveis substitutos e substituídos, a adaptação da tecnologia para substituição de combustíveis em equipamentos de geração de energia, a oferta do combustível no mercado, bem como a logística para utilizá-lo. Esses pontos são muito variáveis e específicos em tempo e espaço e, portanto, não puderam ser abrangidos na ferramenta. Por fim, é necessário considerar também que a substituição de um combustível por outra não precisa ser total. Os combustíveis podem ser parcialmente substituídos, conforme disponibilidade, sazonalidade e custo-benefício.

4.6 RANKING DE CLASSIFICAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS

Conforme apresentado no item 4.5, a substituição de um combustível está sujeita a diversas variáveis que por vezes não podem ser totalmente controladas pelos tomadores de decisões, como, por exemplo, flutuações de preços.

Desta forma a ferramenta desenvolvida nesta pesquisa foi proposta com intuito de organizar os dados dispersos em literatura científica e promover de forma rápida e simultânea os dados de quantidade de energia e fatores de emissão gerados dentro de cenários de substituição de combustível de interesse do setor termelétrico.

No entanto, ademais às possíveis contribuições práticas desta ferramenta, essa pesquisa buscou demonstrar também, através de *rankings de comparação*, o potencial positivo e negativo dos combustíveis estudados. Esta informação pode ser útil durante avaliações de combustíveis para diversas atividades, em especial *o setor acadêmico*.

As Tabelas 10, 11 e 12 ilustram esta segunda funcionalidade e aplicabilidade da ferramenta desenvolvida, apresentando o ranqueamento dos combustíveis em diversas perspectivas.

A Tabela 10 apresenta o ranking sob a perspectiva energética, classificando os combustíveis com maior PCI para o combustível com menor PCI, classificando-os como o combustível com maior potencial energético para o com menor potencial energético. Conforme se pode observar, os cinco primeiros combustíveis mais energéticos são todos de origem fóssil, sendo o combustível denominado de “outros energéticos de petróleo” o mais energético, seguido por óleo diesel puro, óleo combustível, gás de refinaria e gás natural úmido, respectivamente.

Tabela 10 – Ranking de combustível usados em Termelétricas por Poder Calorífico Inferior (PCI)

Combustível	Potencial Energético	PCI
Outros Energéticos de Petróleo	1º	10.200
Óleo Diesel Puro	2º	10.100
Óleo Combustível	3º	9.590
Gás de Refinaria	4º	8.400
Gás Natural (úmido)	5º	7.348
Carvão Vegetal	6º	6.460
Biogás	7º	6.106
Carvão Mineral 6000	8º	5.700
Carvão Mineral 5900	9º	5.600
Carvão Mineral 5200	10º	4.900
Carvão Mineral 4700	11º	4.450
Carvão Mineral 4500	12º	4.250
Carvão Mineral 4200	13º	4.000
Carvão Mineral 3700	14º	3.500
Capim Elefante	15º	3.500
Resíduos Florestais/Resíduos de Madeira	16º	3.300
Casca de Arroz	17º	3.300
Carvão Mineral 3300	18º	3.100
Lenha comercial	19º	3.100
Carvão Mineral 3100	20º	2.950
Lixívia (licor negro)	21º	2.860
Carvão Mineral (Vapor sem Especificação)	22º	2.850
Bagaço de Cana de Açúcar	23º	2.130
Óleos Vegetais	24º	1.850
Gás de Alto Forno	25º	875
Gás de Alto Forno - Biomassa	26º	875

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

A Tabela 11 apresenta o ranking de combustíveis sob a perspectiva de poluição, classificando-os do menos poluente para o mais poluente (com base nas emissões de GEE atreladas a cada combustível). Nesta classificação os combustíveis renováveis ocuparam posições acima de combustíveis fósseis, sendo o gás de alto forno proveniente da biomassa e o biogás os combustíveis com menor emissão de GEE atrelada.

Tabela 11 - Ranking de combustível usados em Termelétricas por Posição de Poluente

Combustível	Posição de poluente (menos para o mais)
Gás de Alto Forno - Biomassa	1º
Biogás	2º
Óleos vegetais	3º
Lixívia (Licor negro)	4º
Bagaço de Cana de Açúcar	5º
Lenha comercial	6º
Resíduos Florestais/Resíduos de madeira	7º
Casca de Arroz	8º
Capim Elefante	9º
Carvão Vegetal	10º
Gás de Alto Forno	11º
Carvão Mineral (Vapor sem Especificação)	12º
Carvão Mineral 3100	13º
Carvão Mineral 3300	14º
Carvão Mineral 3700	15º
Carvão Mineral 4200	16º
Carvão Mineral 4500	17º
Gás Natural (úmido)	18º
Carvão Mineral 4700	19º
Carvão Mineral 5200	20º
Gás de Refinaria	21º
Carvão Mineral 5900	22º
Carvão Mineral 6000	23º
Óleo Combustível	24º
Outros Energéticos de Petróleo	25º
Óleo Diesel Puro	26º

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

A Tabela 12 a seguir ilustra o ranqueamento baseado na combinação das duas variáveis: PCI e emissões de GEE, classificando os quatro combustíveis considerados com melhor “custo-benefício”. Conforme apresentado na Tabela 10, os combustíveis fósseis não necessariamente possuem maior potencial energético, como por exemplo: o carvão vegetal e o biogás possuem maior PCI do que maioria dos carvões minerais; o capim elefante, os resíduos florestais/resíduos de madeira, e a casca de arroz possuem maior PCI do que carvão mineral 3300; a lenha comercial possui PCI maior do que o carvão mineral 3100; a lixívia (licor negro) possui PCI maior do que o carvão mineral sem especificação de vapor; e por fim, o

bagaço de cana de açúcar e os óleos vegetais possuem maior PCI do que o gás de alto forno. Em contrapartida na Tabela 11 é possível observar que todos os combustíveis renováveis possuem menor emissão de GEE atreladas a eles, informação já esperada visto que parte as emissões de combustíveis renováveis são consideradas como “renováveis”.

A Tabela 12 a seguir apresenta uma comparação entre as variáveis de PCI e emissões de GEE de cada combustível, utilizando a ferramenta de cálculo desenvolvida neste trabalho e normalizando a quantidade de energia gerada e as emissões de GEE a partir da mesma quantidade utilizada de cada um dos combustíveis.

Tabela 12 – Comparação entre combustíveis com base no potencial energético e emissões de GEE atreladas

Combustível	Potencial Energético	Posição de poluente
Outros Energéticos de Petróleo	1°	25°
Óleo Diesel Puro	2°	26°
Óleo Combustível	3°	24°
Gás de Refinaria	4°	21°
Gás Natural (úmido)	5°	18°
Carvão Vegetal	6°	10°
Biogás	7°	2°
Carvão Mineral 6000	8°	23°
Carvão Mineral 5900	9°	22°
Carvão Mineral 5200	10°	20°
Carvão Mineral 4700	11°	19°
Carvão Mineral 4500	12°	17°
Carvão Mineral 4200	13°	16°
Carvão Mineral 3700	14°	15°
Capim Elefante	15°	9°
Resíduos Florestais/Resíduos de Madeira	16°	7°
Casca de Arroz	17°	8°
Carvão Mineral 3300	18°	14°
Lenha comercial	19°	6°
Carvão Mineral 3100	20°	13°
Lixívia (licor negro)	21°	4°
Carvão Mineral (Vapor sem Especificação)	22°	12°
Bagaço de Cana de Açúcar	23°	5°
Óleos Vegetais	24°	3°
Gás de Alto Forno	25°	11°
Gás de Alto Forno - Biomassa	26°	1°

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

Desta forma uma comparação baseada nas duas variáveis mostra que apesar dos combustíveis fósseis possuírem, em geral, maior PCI e, portanto, maior potencial de quantidade de energia, é possível balancear os critérios de potencial energético com combustíveis menor poluentes, sendo que os quatro combustíveis mais promissores são carvão vegetal, biogás, capim elefante e resíduos florestais/resíduos de madeira, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 13 a seguir:

Tabela 13 - Ranking dos Cinco Melhores Combustíveis Potencial Energético versus Poluentes

Combustível	Potencial Energético	Posição de poluente
Carvão Vegetal	6°	10°
Biogás	7°	2°
Capim Elefante	15°	9°
Resíduos Florestais/Resíduos de Madeira	16°	7°

Fonte: Karine Zortea da Silva, 2018.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do levantamento bibliográfico, a cerca dos temas englobados neste estudo, conclui-se que a elevação da temperatura média global está diretamente relacionada às atividades antrópicas, sendo as responsáveis por 80 a 90 % das emissões de GEE, principalmente pelo uso de combustíveis fósseis (carvão e petróleo) em larga escala. Sendo o setor energético o principal responsável pelo montante de emissões de GEE emitidas a atmosfera todos os dias, para conter o aumento da temperatura terrestre, é necessário que os países invistam e incentivem a ampliação do uso de combustíveis de origem renováveis. Para que estas ações sejam pertinentes ferramentas de cálculo de emissões de GEE que permitam quantificar e gerenciar de forma simples e rápidas as emissões de gases com efeito de estufa, bem como avaliar a relação destas emissões com os combustíveis atualmente pertinentes são de extrema importância.

No Brasil como a matriz elétrica é predominantemente limpa, no entanto, tem aumentado a produção de energia através do acionamento de termelétricas, a ferramenta desenvolvida neste estudo vem contribuir com os tomadores de decisões para a simulação e decisão de substituição de combustíveis fósseis por renováveis, conforme a realidade de cada usina termelétrica, sem perdas energéticas. A ferramenta simula de forma individual ou coletiva a comparação entre combustíveis, facilitando a análise de comparação para substituição total ou parcial de combustíveis.

Conclui-se que a maior limitação da ferramenta é a própria divulgação da mesma, visto o limitado formato de divulgação utilizado neste trabalho. Porém, no intuito de aproximar o conhecimento desenvolvido na academia com a prática de mercado, entende-se que o formato de ferramenta cumpre seu papel de facilitador da comunicação de informações.

Através dos resultados apresentados pela ferramenta, conclui-se que biocombustíveis também são energeticamente vantajosos em comparação com alguns combustíveis fósseis, com a vantagem de ser uma fonte limpa e renovável de energia. A substituição de combustíveis pode ocorrer para combustíveis com menor emissão de GEE atrelada, contribuindo para baixa economia de carbono. Essa substituição pode ser realizada com altos investimentos como o aumento da eficiência das máquinas e/ou mudança de tecnologia de produção de energia elétrica, ou através de uma proposta incremental e de investimento inicial reduzido, como apresentada nesta ferramenta, na qual se utiliza uma tecnologia já existente para que a mesma reduza seu impacto negativo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das informações expostas ao longo deste trabalho é possível que outros trabalhos sejam desenvolvidos. Algumas possibilidades são: ampliar os tipos de combustíveis abrangidos na ferramenta de cálculo; adapta-lá para outros setores da economia; ampliar a forma de uso e divulgação da ferramenta; explorar as questões de disponibilidade, logística e preço de combustíveis e biocombustíveis.

Ademais, é possível também utilizar a ferramenta desenvolvida para criar cenários de substituição de combustíveis; aplicação em estudos de casos; e simular estimativas de redução de emissões de GEE no Brasil e analisar como essas colaborariam com as NDCs brasileiras.

REFERÊNCIAS²⁴

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração (BIG)**. Banco de dados eletrônicos. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

BAIRD, C. **Química Ambiental**. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844 p. ISBN: 8577808483, 9788577808489.

BRASIL. Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 10 dez. 2010. Seção 1, p. 4.

BRASIL. Lei Ordinária nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 29 dez. 2009. Sessão 1, p. 109.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Sumário Executivo. Brasília: MCTIC, 2016, 45 p. ISBN: 978-85-88063-18-1

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2014**: ano base 2013. Rio de Janeiro: EPE, 2014, 288 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2015**: ano base 2014. Rio de Janeiro: EPE, 2015, 292 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2016**: ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2016, 295 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2017**: ano base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2017a, 297 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. Brasília: MME/EPE, 2017b, 310 p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/0/PDE2026_versao_para_publicacao_08dez2017.pdf/f5d8f999-566d-4f5b-9167-d80b6ea8924e>. Acesso em: 03 ago. 2018.

BRASIL. Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada: Para Consecução Do Objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. **REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**. Brasília, DF, 27 set. 2016. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivos/clima/convencao/indc/BRASIL_iNDC_portugues.pdf>. Acesso em: 10 out. 2017.

²⁴ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023 (2002).

BRUCKNER, T. et al. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Energy Systems** United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2014, 1435 p. ISBN 978-1-107-65481-5.

CIAIS, P. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Carbon and Other Biogeochemical Cycles**. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p. ISBN 978-1-107-66182-0.

CHURCH, J.A. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Sea Level Chang**. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p. ISBN 978-1-107-66182-0.

CUBASCH, U. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Introduction**. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p. ISBN 978-1-107-66182-0.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7ª ed. São Paulo: Mcgraw Hill, 2013. 1048 p. ISBN: 9788580552003.

DENTON, F. et al. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate-resilient pathways: adaptation, mitigation, and sustainable development**. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2014, 1132 p. ISBN 978-1-107-64165-5.

DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide**. Banco de dados eletrônicos, 2018. Disponível em: < <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>>. Acesso em: 03 ago. 2018.

FORSTER, P. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing**. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p. ISBN 978-1-107-66182-0.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL. About the GHG Protocol, 2012. Disponível em: <<http://www.ghgprotocol.org/about-ghgp>>. Acesso em: 12 mai. 2015.

HARTMANN, D.L. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Observations: Atmosphere and Surface**. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p. ISBN 978-1-107-66182-0.

INCT DA CRIOSFERA. **Compreendendo as mudanças do clima pela análise de testemunhos de gelo**: descobrindo o passado para entender o futuro. Tradução: Flávia Dias de Souza Moraes, Enail de Souza Júnior e Jefferson Cardia Simões. EUA: Universidade de Maine, 2014, 26 p. Disponível em:

<<http://www.ufrgs.br/inctcriosfera/arquivos/Compreendendo%20as%20mudancas%20climaticas.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Summary for Policymakers. In: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p. ISBN 978-1-107-66182-0.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Summary for Policymakers. In: Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2014, 1435 p. ISBN 978-1-107-65481-5.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key World Energy Statistics**. France, 2017, 97 p.

KIRTMAN, B. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Near-term Climate Change: Projections and Predictability**. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p. ISBN 978-1-107-66182-0.

LANG, M.; MUTSCHLER, L. **Smart Grid Pilot Projects in Germany: First Project Completed**. German: Energy Blog. 2012. Disponível em: <<http://www.germanenergyblog.de/?p=11635>>. Acesso em: 11 mar. 2018.

LUCON, O.; ROMEIRO, V.; FRANSEN, T. **Bridging the Gap between Energy and Climate Policies in Brazil**. Policy Options to Reduce Energy-Related GHG Emissions. Brasil: Universidade de São Paulo, 2015, 92 p. ISBN: 978-1-56973-871-9.

MYHRE, G. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Anthropogenic and Natural Radiative Forcing**. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p. ISBN 978-1-107-66182-0.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Earth System Research Laboratory. Global Monitoring. Division National Oceanic and Atmospheric Administration. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide**. Banco de dados eletrônicos. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>>. Acesso em: 13 out. 2017.

PAO, H.; FU, H. Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, China/ Taiwan, v. 25, p. 381 – 392, 2013. DOI: 10.1016/j.rser.2013.05.004.

PRESS, F. et al. **Para Entender a Terra**. 4ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006, p.656. ISBN: 8536306114.

RIBEIRO, W.C. **A Ordem Ambiental Internacional**. 3ª ed. São Paulo: Contexto, 2015, 176 p. IBSN: 9788572441865.

RHEIN, M. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Observations: Ocean**. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p. ISBN 978-1-107-66182-0.

SCHAEFFER, C. et al. Mudanças Climáticas e Segurança Energética no Brasil. **Energy Policy**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 3, p. 879 – 889, 2009. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.10.029.

SOITO, J.; FREITAS, M. Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Rio de Janeiro, v.15, n. 6, p. 3165-3177, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.04.006

SONNTAG, R. E.; BOGNAKKE, C.; VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 6ª ed. Americana: Ed. Edgard Blücher, 2003, 730 p. ISBN: 978-8521207924.

STAUFFER, B. Ice Core Methods: CO₂ Studies. **Encyclopedia of Quaternary Science**, Elsevier, Amsterdam, v. 2, p. 1181-1189, 2007. DOI: 10.1016/B0-44-452747-8/00337-9

STUCHI, G.A.D.; TACONELLI, M.; LANCHI, V.A.B. **Geração Termelétrica: Principais componentes e tipos de centrais termelétricas**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2015.

TURLEY, C.; WILLIAMSON, P. **Ocean acidification in a geoengineering context**. Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, Inglaterra, v. 370, p. 4317-4342, 2012. DOI: 10.1098/rsta.2012.0167.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **The Emissions Gap Report: A UN Environment Synthesis Report**. Nairobi: UNEP, 2014, 117 p. ISBN: 978-92-807-3673-1.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Conference of the Parties 21. **Adoption of the Paris Agreement**. Paris: United Nations, 33 p. 2015. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>>. Acesso em: 03 ago. 2018.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Paris Agreement: Status of Ratification**. Base de dados eletrônicas. United Nations, 2016. Disponível em: <http://unfccc.int/paris_agreement/items/9444.php>. Acesso em: 12 out. 2017.

UNITED NATIONS. Key Findings and Advance Tables. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Population Prospects: The Revision**, 2015. New York, 372 p. 2015. ISBN: 9211515319.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **International Energy Outlook 2017**. Executive Summary. Estados Unidos, 2017, 3 p. Disponível em: <[https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2018.

VAUGHAN, D.G. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. **Observations: Cryosphere.** United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013, 1535 p. ISBN 978-1-107-66182-0.

VICTOR, C. et al. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Introductory Chapter.** United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2014, 1435 p. ISBN 978-1-107-65481-5.

WATSON, R. et al. **The Truth about Climate Change.** Buenos Aires: The Universal Ecological Fund, 13 p, 2016. ISBN: 978-0-9831909-1-2

YERGIN, D. Ensuring Energy Security: Old questions, new answers. **Foreign Affairs**, UE, v. 85, n. 2, 69-82 p, 2006. DOI: 10.2307/20031912.