



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO SOCIOECONÔMICO
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
GRADUAÇÃO EM RELAÇÕES INTERNACIONAIS

KAIO DE ASSIS RAMOS

**TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: Conceituações, Recursos Energéticos e
Perspectivas para a Alemanha e os EUA**

Florianópolis
2018

KAIO DE ASSIS RAMOS

**TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: Conceituações, Recursos
Energéticos e Perspectivas para a Alemanha e os EUA**

Monografia submetida ao curso de Relações Internacionais da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito obrigatório para a obtenção do grau de Bacharelado.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Roberto Voigt

Florianópolis
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS

A Comissão Examinadora resolveu atribuir a nota 8,5 ao aluno Kaio de Assis Ramos na disciplina “CNM 7280 – Monografia” pela apresentação deste trabalho.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Marcio Roberto Voigt

Prof. Alexandre Busko Valim

Prof. Dr. Rogério Santos da Costa

Florianópolis
2018

Dedico este trabalho a todos os colegas – tenha eu testemunhado ou não – cujas saúdes mentais foram gradualmente acometidas pelos inexoráveis âmbito e didática universitários. Aos que se constrangeram ou foram constrangidos, que se calaram e acreditaram ser incapazes de vingar neste meio. Que esconderam, atrás de sorrisos pelos corredores, almas em choro. Aos que, entre a cruz das expectativas e a espada do fracasso e da decepção profissional, lentamente entenderam a natureza excludente da academia e a ironia do mercado de trabalho vindouro. A vocês, que não estavam sozinhos.

Agradecimentos

À minha mãe e ao meu pai, que me tomaram pela mão e me ensinaram o mundo, e a quem devo os frutos de meus esforços, mais do que a mim mesmo. Ao meu irmão, o amigo de sangue que escolheram por mim. À minha esposa, por ser minha companheira e meu porto. Aos meus Professores – em especial ao Professor Márcio Voigt – que, dotados de empatia, didática construtiva e experiência, foram verdadeiros faróis nessa jornada.

“Adversidade apresenta uma pessoa a si mesma.”

- Autor desconhecido, adaptado

RESUMO

O presente trabalho visa a lançar luz sobre a dinâmica mundial de produção, consumo e depleção de energia e recursos energéticos, bem como sobre as principais políticas energéticas em curso na Alemanha e nos Estados Unidos da América. Para tanto, a pesquisa parte da elucidação de conceitos introdutórios ao tema, com vistas a facilitar seu adequado acompanhamento. Em seguida, as fontes convencionais de energia – renováveis e não-renováveis – são analisadas quanto às suas particularidades, às tecnologias de exploração utilizadas e às suas contribuições na dinâmica energética mundial. Após, as leituras distintas de Klare e Yergin acerca do cenário de escassez de recursos energéticos são analisadas. Por fim, lançamos luz sobre as principais políticas energéticas nos países supracitados, verificando se estas os conduzem a uma possível transição energética.

ABSTRACT

This paper aims to shed light on the global dynamics of production, consumption and depletion of energy and energy resources, as well as on the main energy policies in progress in Germany and the United States of America. For this, the research starts with the elucidation of introductory concepts related to the theme, as to facilitate a proper understanding. Next, conventional sources of energy - renewable and non-renewable - are analyzed for their particularities, the technologies of exploitation used and their contributions in the world energy dynamics. Afterwards, the different readings of Klare and Yergin on the scenario of energy resources scarcity are analyzed. Finally, we shed light on the main energy policies in the countries mentioned above, verifying if they lead to a possible energy transition.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: “Intensidade energética mundial e TPES, 2010-2015”.....	22
Gráfico 2: “Produção total mundial ¹ de energia primária por fonte [2015]”.....	28
Gráfico 3: “Consumo global de energia primária [1800-2016]”.....	29
Gráfico 4: “Produção [esquerda] e consumo [direita] anuais de carvão por regiões em Mtoe, 1992-2017”.....	31
Gráfico 5: “Preços do carvão em dólares por tonelada, 2002-2017”.....	32
Gráfico 6: “Produção [esquerdo] e consumo [direito] mundial de gás natural por região em bcm, 1992-2017”.....	34
Gráfico 7: “Preços do gás natural em dólares por milhões de BTUs, 2000-2017”.....	35
Gráfico 8: “Produção (esquerda) e consumo (direita) de petróleo por região em milhões b/d, 1992-2017”.....	36
Gráfico 9: “Porcentagens da produção elétrica via fontes nucleares por país ou região, 1960-2015”.....	39
Gráfico 10: “Porcentagens de opiniões contrárias à energia nuclear influenciadas pelo acidente em Fukushima, 2011”.....	40
Gráfico 11: “Geração de Eletricidade Renovável por Fonte em 2015”.....	42
Gráfico 12: “Crescimento em Produção de Eletricidade Renovável [2011-2015]”.....	42
Gráfico 13: “Produção mundial de eletricidade via FV, 2005-2015 (TWh)”.....	44
Gráfico 14: “Tendências de custo total da instalação de painéis FV em larga escala em países selecionados, 2010-2017”.....	45
Gráfico 15: “Produção de eletricidade eólica por região, 2005-2015 (TWh)”.....	47
Gráfico 16: “LCOE médio de projetos eólicos terrestres em 12 países, 1983-2016”.....	48
Gráfico 17: “Produção ¹ mundial hidrelétrica por região (TWh), 1971-2015”.....	50
Gráfico 18: “Custos totais de instalação e médias ponderadas globais por projeto de usinas hidrelétricas, 2010-2017”.....	52
Gráfico 19: “Variações e médias ponderadas dos custos totais de instalação de usinas hidrelétricas por países/regiões, 2010-2016”.....	53
Gráfico 20: “Quotas da produção de energia renovável mundial em 2015”.....	55
Gráfico 21: “Custos totais de instalação de tecnologias alimentadas por biomassa por país/região”.....	57
Gráfico 22: “LCOE e médias ponderadas por projeto de geração de eletricidade via bioenergia por matéria-prima e país/região, 2000-2016”.....	58

Gráfico 23: “Tendências em energia renovável (produção elétrica) [2005-2015]”	61
Gráfico 24: “Custos totais de instalação por projeto geotérmico, tecnologia e capacidade, 2007-2020”	63
Gráfico 25: “Produção final de petróleo bruto nos EUA baseada em supostas reservas iniciais de 150 e 200 bilhões de barris”	65
Gráfico 26 : “Pico de Hubbert e a efetiva produção de petróleo nos EUA”	66
Gráfico 27: “Porcentagens de Energia Renovável no TFEC, 2004-2014”	80
Gráfico 28: “Novos investimentos globais em fontes renováveis em países desenvolvidos, emergentes e em desenvolvimento, 2006-2016”	80
Gráfico 29: “Crescimento econômico, consumo de eletricidade e energia, emissões de gases do efeito estufa, 1990-2017”	85
Gráfico 30: “Consumo energético nos EUA por fonte energética, 2017”	88
Gráfico 31: “Consumo de energia primária nos EUA por fontes principais, 1950-2015”	89
Gráfico 32: “Subsídios energéticos Federais e suporte (anos fiscais 2013-2016)”	90
Gráfico 33: “Consumo energético por fonte (modelo de referência), 1990-2050”	91

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo Geral e Problematização	13
1.1.1 Objetivos Específicos.....	13
1.2 Justificativa	14
1.3 Revisão de Literatura e Metodologia de Pesquisa	14
1.3.1 Divisão dos Capítulos	15
2 CONCEITUAÇÕES RELEVANTES	17
2.1 Energia	17
2.1.1 Formas de Energia	18
2.1.2 Unidades de Medida	19
2.2 Classificações das Fontes de Energia	20
2.2.1 Fontes de Energia Renováveis e Não-Renováveis	20
2.2.2 Fontes Primárias e Secundárias de Energia	21
2.3 Intensidade Energética e Eficiência Energética	21
2.4 Segurança Energética	23
3 RECURSOS ENERGÉTICOS: PRODUÇÃO, CONSUMO E ESCASSEZ	27
3.1 Fontes de Energia Não-Renováveis Convencionais	28
3.1.1 Carvão Mineral	30
3.1.2 Gás Natural	33
3.1.3 Petróleo Bruto	35

3.1.4 Urânio e Energia Nuclear.....	37
3.2 Fontes de Energia Renováveis Convencionais	41
3.2.1 Energia Solar.....	43
3.2.2 Energia Eólica	46
3.2.3 Energia Hidrelétrica e Marítima	49
3.2.4 Bioenergia	54
3.2.5 Energia Geotérmica.....	59
3.3 A Escassez de Recursos Energéticos	64
3.3.1 A Teoria do Pico de Hubbert	64
3.3.2 Michael Klare e a “Corrida pelo que ainda resta”	67
3.3.3 Daniel Yergin e os “Riscos na superfície”	71
4 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: ALEMANHA E EUA	77
4.1 Transição Energética	77
4.2 Alemanha	81
4.2.1 <i>Energiewende</i>	81
4.2.2 Metas e Políticas	83
4.3 EUA	86
4.3.1 Políticas Energéticas	86
4.3.2 Produção e Consumo Energético.....	88
5 CONCLUSÕES	93
6 REFERÊNCIAS	97
7 ANEXOS	105

1 INTRODUÇÃO

A história de nossa espécie engloba a existência de variadas civilizações, que com maior ou menor intensidade registraram suas trajetórias, seus marcos, avanços ou regressos em nosso planeta. Mais especificamente nos últimos séculos vivenciamos a consolidação de uma grande civilização cada vez maior e abrangente, com seus ramos interconectando civilizações outrora menores em diversas localidades geográficas em um dinâmico e inequívoco processo de globalização. Este processo, descrito como uma crescente integração internacional em decorrência de trocas de produtos, ideias, opiniões sobre o mundo, economia, política e outros aspectos culturais (ALBROW e KING, 1990) possibilita e molda paulatinamente o âmbito internacional.

O desenvolvimento de diversas áreas, impulsionado fortemente por inovações tecnológicas constantes, encontrou no processo de globalização um catalisador que de modo inédito permitiu ampliar suas facetas. Este crescimento, contudo, potencializou também alguns de nossos mais antigos problemas: embora alcancem dimensões inéditas, as civilizações não se diferem essencialmente de suas semelhantes anteriores que permearam nossa história – pelo contrário, alguns aspectos são patentes em todas, tais como o consumo de recursos, incluindo recursos energéticos, para seus desenvolvimentos.

Com efeito, o Sistema Internacional (SI) está em franco crescimento demográfico. Estima-se que até 2030 a população mundial alcançará 8,5 bilhões, subindo para 9,7 até 2050 e 11,2 bilhões até 2100. Este vertiginoso aumento populacional não se encerra em uma ou outra área – é presente em múltiplas áreas do planeta. Embora a China e Índia atualmente figurem como países mais populosos, com 19% e 18% da população mundial, respectivamente, será o continente africano que deverá demonstrar maior taxa de crescimento populacional. Neste continente, as populações de 28 dos 54 países irão dobrar até 2030, sendo que 10 destes – incluindo Angola, Somália e Uganda – deverão quintuplicar suas populações até 2100 (UNRIC, 2015).

Entender esta acelerada expansão demográfica mundial significa perceber a igualmente crescente demanda pelos supracitados recursos, necessários para seu desenvolvimento. Nações necessitam de recursos e o consumo desenfreado destes se revelou tão observável quanto seu próprio crescimento. De fato, em aproximadamente 20 anos nosso planeta terá aumentando sua demanda por energia em torno de 30% a 40%. Atender a esta intensa necessidade energética traz à tona questões ambientais, de segurança, tecnológicas e políticas, dentre outras. É seguro

dizer que, sendo gestão energética um dos alicerces do desenvolvimento das diversas nações, a escassez de recursos e os modos de atenuá-la configuram um potencial reequilíbrio do mundo moderno (YERGIN, 2014).

A iminente depleção de diversos dos recursos mais utilizados, em paralelo com a também gradativa descontinuação de vários outros em virtude de suas consequências cada vez mais inaceitáveis para o meio ambiente, coloca atores em posição de alerta. Não somente nações, mas também grandes corporações, multinacionais, veem nestes novos tempos a ameaça que este reequilíbrio pode significar. A escassez, acima de tudo, demonstra que a usual estratégia estatal de acumulação de poder se revelará ineficaz eventualmente. É *mister* diversificar; e, acima disso, aumentar a eficiência destes recursos alternativos. Cumpre ressaltar: a gestão energética é um fator relevante quando analisados os colapsos de civilizações nos séculos passados de nossa história (KLARE, 2012).

Os dois países que analisaremos, Estados Unidos da América (EUA) e Alemanha, encontram-se diante destes desafios, ainda que com suas respectivas particularidades. Diferentes, também, são os entraves que deverão transpor caso embarquem em um processo de transição energética para alcançarem o objetivo de suprir suas demandas com fontes renováveis e eficientes, superando este grande obstáculo da escassez que desponta mais e mais preocupantemente em seus horizontes. Enquanto a Alemanha, como veremos, possui metas estabelecidas que devem ser mantidas independentemente de administrações diferentes, os EUA enfrentam embates internos dentro de seu Congresso, com votações em intervalos regulares para aprovar ou não as porcentagens dos impostos a serem revertidas ao desenvolvimento de fontes de energia renováveis (OCHS e FRIEDEBURG, 2014).

Estes países possuem um espectro de opções, como implementação de metas para acelerar uma transição energética para fontes renováveis de energia, ou como a militarização de territórios antes intocados, como o Ártico, Amazônia e Antártida, em busca de recursos finitos. As particularidades de seus territórios e economias os colocam em situações distintas, ainda que ambos procurem formas de aumentar suas seguranças energéticas como condição essencial para continuarem seus desenvolvimentos econômicos.

Demais atores internacionais, como corporações, que falham em manter suas competitividades nestes tempos de transição são constantemente assimiladas, ora por corporações maiores, ora pelos governos em si. Neste espectro parece haver dois caminhos principais para este novo rearranjo mundial: uma corrida pelo que ainda resta ou uma corrida pela adaptação; este segundo sendo apontado como a melhor aposta e a alternativa que levará

os países a consolidarem suas posições dominantes ou emergirem como novas potências no futuro próximo, em cerca de duas décadas (KLARE, 2012).

Deste modo, este tema, como procuraremos demonstrar, revela-se baseado em um fenômeno contemporâneo e intimamente ligado à forma como as relações internacionais estão ocorrendo e ocorrerão no futuro a curto, médio e até mesmo longo prazo. Acreditamos ser válida sua exploração e que a investigação desta transição em foco poderá enriquecer substancialmente o debate acadêmico e auxiliar em futuras análises de cenários no que tange as demandas energéticas dos Estados e como estes as atenderão nestes novos tempos de aparente irreversível escassez de alguns dos mais utilizados recursos energéticos.

1.1 Objetivo Geral e Problematização

O objetivo principal deste trabalho é lançar luz sobre a dinâmica mundial contemporânea de produção e consumo de energia, bem como a possibilidade de depleção de recursos energéticos e as políticas energéticas na Alemanha e nos EUA. Através das fontes selecionadas (apresentadas na subseção 1.3), pretendemos apresentar o leitor a conceitos introdutórios ao tema, prosseguindo para um levantamento das diferentes fontes energéticas convencionais, as tecnologias de exploração utilizadas e suas contribuições na produção energética mundial. Em seguida, abordaremos diferentes prognósticos concernentes à escassez dos recursos energéticos finitos. Por fim, listaremos as principais políticas energéticas dos dois países supracitados, verificando se estas os conduzem a uma possível transição energética, respondendo assim à pergunta: **em que medida a dinâmica atual de produção e demanda energética conduz a Alemanha e os EUA a adotarem políticas de transição energética?**

1.1.1 Objetivos Específicos

Mais particularmente, os objetivos específicos são os que seguem:

- I. Descrever conceitos relevantes, permitindo acompanhar adequadamente a pesquisa que será feita.
- II. Verificar o estágio atual de produção, consumo e escassez dos recursos energéticos convencionais.
- III. Listar as principais políticas energéticas atuais na Alemanha e nos EUA, verificando se são voltadas a uma possível transição energética.

1.2 Justificativa

A gradativa escassez de várias das fontes convencionais de recursos energéticos traz à tona um cenário desafiador, com dois caminhos mais patentemente expostos: uma corrida pelo que ainda resta ou uma corrida pela adaptação a novos meios de produção energética (KLARE, 2012). Dois países ocupando notáveis posições de potências no SI se preparam para transpor este desafio: de um lado, os EUA, hegemonia econômica, política, cultural e militar (DUONG, 2017) e do outro a Alemanha, a maior economia da Europa e quarta maior do mundo em PIB nominal (WDI, 2017). Especialistas destes dois países fazem suas previsões, colocando líderes políticos e da iniciativa privada diante deste grande dilema: como satisfazer a vertiginosa demanda energética de suas economias e populações, ambas em acelerado crescimento, diante de um horizonte com recursos energéticos cada vez mais reduzidos? Este cenário reúne elementos relevantes nas Relações Internacionais, justificando uma investigação sobre a produção e demanda energética, bem como políticas, desafios e perspectivas imputadas a estas nações centrais caso uma transição assim esteja ocorrendo.

1.3 Revisão de Literatura e Metodologia de Pesquisa

A investigação se dará à luz de dados obtidos através de publicações de elevada relevância por parte agências e organizações internacionais, como a *International Renewable Energy Agency* (IRENA)¹, a *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century* (REN21²), a BP³ e a *International Energy Agency* (IEA)⁴ e seus relatórios periódicos oficiais, como

¹ Fundada em 2009 em Bonn, Alemanha, a “*International Renewable Energy Agency*” – IRENA é uma organização intergovernamental que apoia países em suas transições para um futuro de fontes sustentáveis de energia, além de servir como plataforma para cooperação internacional, centro de excelência e repositório de conhecimento sobre políticas, tecnologias, recursos e finanças relacionadas a energia renovável. Atualmente conta com 153 países membros, além da União Europeia, com mais 26 em processo de ingresso (IRENA, 2018a).

² Fundada em Junho de 2004 em Bonn, Alemanha, a REN21 (Do inglês “*Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*” é uma organização internacional voltada à facilitação da troca de conhecimento, do desenvolvimento de políticas e da ação conjunta para uma rápida transição global a energias renováveis (REN21, 2018).

³ Antiga *British Petroleum*, a “BP PLC” foi fundada em 2001 após uma série de alterações de marca e aquisições de outras empresas. Atualmente, é uma multinacional britânica no ramo de exploração de recursos fósseis, cujo foco está mudando para fontes renováveis. Possui diversos braços voltados para a pesquisa e publicação de relatórios energéticos (BP, 2018a).

⁴ Estabelecida em 1974 em Paris, França, a Agência Internacional de Energia (“*International Energy Agency*” – IEA) foi inicialmente projetada para auxiliar países a coordenar uma resposta coletiva a grandes interrupções no fornecimento de petróleo, como ocorrido na crise de 1973/74. Atualmente, a IEA defende políticas voltadas ao aprimoramento da confiabilidade, acessibilidade e sustentabilidade de energia para seus 30 países membros e além, focando em quatro áreas principais: segurança energética, desenvolvimento econômico, consciência ambiental e parceria com países membros, especialmente grandes economias emergentes (IEA, 2018a).

“*Rethinking Energy*”, “*Renewable Power Generation Costs*” e “*World Energy Outlook*”, este último amplamente tido como o padrão-ouro no tocante à análise energética. Agências oficiais de informação dos países selecionados, como a *U.S. Energy Information Administration (EIA)*⁵ nos EUA e a *Deutsche Energie-Agentur (dena)*⁶ na Alemanha, seus relatórios oficiais “*Annual Energy Outlook*” e “*The Energy of the Future*”, respectivamente, bem como suas políticas energéticas, também serão estudadas.

Serão consideradas, ainda, as leituras e previsões acerca deste tema realizadas por teóricos e pesquisadores desta área, dentre as quais destacamos as obras de Daniel Yergin (2014)⁷ e Michael Klare (2012)⁸. Yergin, uma das principais autoridades em energia, geopolítica e economia global, é autor de vários best-sellers e ganhador do “Prêmio Pulitzer de Não-Ficção Geral” em 1992. Klare, com sua extensa carreira acadêmica voltada para questões de guerra e paz, competição por recursos e assuntos internacionais, é autor de quatorze livros e centenas de ensaios. Selecionamos suas obras devido às suas amplamente reconhecidas contribuições para a área e por serem pautadas em leituras distintas quanto à escassez de recursos energéticos, enriquecendo nossa investigação.

Por fim, dada a natureza majoritariamente estatística das fontes, o processo de pesquisa será descritivo, sendo a apresentação de resultados realizada de modo quantitativo através da coleta e análise de dados relevantes, do levantamento teórico e da descrição de conceitos fundamentais. A pesquisa, ainda, será principalmente documental, com vistas a ampliar o leque de materiais utilizáveis disponíveis, sobretudo os relatórios estatísticos supracitados. Através destas fontes e métodos pretendemos atender satisfatoriamente aos objetivos propostos na subseção 1.1.1, “Objetivos Específicos”.

1.3.1 Divisão dos Capítulos

O presente trabalho é dividido em seis capítulos, sendo o primeiro o capítulo introdutório, no qual esta subseção e demais parâmetros da pesquisa estão inseridos. O segundo

⁵ Divisão do *U.S. Department of Energy (DoE)*, a *U.S. Energy Information Administration (EIA)* é a principal agência de coleta, análise e disseminação de informações sobre energia dos EUA (EIA, 2018a).

⁶ Fundada no ano 2000 em Berlin, Alemanha, a Agência Alemã de Energia (em alemão “*Deutsche Energie-Agentur – dena*”) é o centro alemão especializado em eficiência energética, fontes renováveis de energia e sistemas energéticos inteligentes. A dena (sigla originalmente em minúsculas) é também considerada a “Agência da Transição Energética Aplicada” na Alemanha.

⁷ YERGIN, D. **A Busca: Energia, Segurança e a Reconstrução do Mundo Moderno**. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2014.

⁸ KLARE, M. T. **The Race for What's Left: The Global Scramble for the World's Last Resources**. Nova Iorque: Picador, 2012.

capítulo se destina à descrição de conceitos relevantes e introdutórios, inerentes ao tema e objetivos propostos, como Energia, bem como outros conceitos nos quais este se desdobra, como fontes energéticas, eficiência energética e segurança energética. O terceiro capítulo busca nas publicações de autoridades da área de recursos energéticos e em fontes oficiais de alta relevância (mencionadas na subseção 1.3) elementos para verificar o estágio atual de produção, consumo e escassez destes recursos. O quarto capítulo aborda o conceito de Transição Energética e verifica a existência de um processo assim na Alemanha e nos EUA através do levantamento das principais políticas energéticas em curso. O quinto capítulo é reservado para as conclusões deste trabalho, incluindo nossa resposta para a pergunta proposta no capítulo 1.1, além de sugestões para a continuação desta pesquisa e para sua utilização em trabalhos futuros. O sexto e último capítulo é composto unicamente pelas referências consultadas na elaboração desta pesquisa.

2 CONCEITUAÇÕES RELEVANTES

Para que possamos adentrar adequadamente o tema que pretendemos explorar, algumas conceituações se fazem relevantes. Neste capítulo abordamos as que consideramos introdutórias; as demais são elucidadas ao longo dos próximos capítulos.

2.1 Energia

De início, desejamos lançar luz sobre a problematização contemporânea concernente à definição de “Energia”, bem como expor nosso raciocínio ao adotar determinada conceituação, na qual grande parte dos termos abordados neste trabalho se apoiará.

Energia é conceituada de diversas formas, em também variados contextos, que escalam de definições coloquiais a definições dotadas de elevado rigor científico. Mesmo dentre estas últimas, encontra-se considerável grau de desalinhamento – seja por se tratar de um conceito interdisciplinar abordado em áreas de estudo como Química, Física, Biologia, Economia e Política (KURNAZ e CALIK, 2009) ou por ser uma noção abstrata (O'CONNELL, 2016), o conceito de Energia é multifacetado. Com efeito, definições podem variar de habilidade de causar mudança (CHISHOLM, 1992) a substância distribuída, armazenada e fluente no espaço (FALK, HERRMANN e SCHIMID, 1983) e resultado de processos celulares, metabólicos e enzimáticos (NELSON e COX, 2013).

“Mas ‘o que é energia?’ é uma pergunta *física* e requer uma resposta física”, aponta Jennifer Coopersmith, doutora em Física pela Universidade de Londres, em “*Energy, the Subtle Concept*”⁹. Não obstante, mesmo dentro da Física as dificuldades de definição deste termo são patentes. Citando Feynman (Nobel de Física em 1965), por vezes referido como “o grande explicador”¹⁰, em “*The Feynman Lectures on Physics*” (FEYNMAN, LEIGHTON e SANDS, 2005), ela abstratamente afirma: “(...) energia é aquilo que é *definido* por sua propriedade de ser conservado”¹¹. Em seguida, porém, logo apresenta as limitações desta definição, comparando-a com supor que um sintoma de doença possui apenas uma causa, e não várias, inter-relacionadas. Embora considere Feynman (2005) “o melhor livro de explicação de Física desde ‘*Duas Novas Ciências*’¹²”, Coopersmith ressalta que “às vezes energia *não* é conservada

⁹ (COOPERSMITH, 2015, p. 356, grifo do autor, tradução nossa).

¹⁰ Cf. “*The Great Explainer: The Story of Richard Feynman*” (LEVINE, 2009).

¹¹ *Ibid.*, p. 356, grifos do autor, tradução nossa.

¹² Cf. (GALILEI, 1914), “pai da ciência moderna” (COHEN, 2011) e (HAWKING, 2009).

(o sistema sendo investigado não está isolado)”, ponderando: “quando não se sabe ainda o que energia é, como se pode ter certeza de que o sistema está, de fato, isolado?”¹³.

As conceituações acima, ainda, claramente sequer arranham a superfície destas áreas de estudo e ignoram completamente outras tantas, como Astrofísica e Física Quântica, onde “Energia” assume definições que fogem definitivamente ao escopo desta pesquisa. Logo, diante desta multitude de conceituações para um mesmo termo, cumpre estabelecer uma que atenda aos nossos objetivos.

Uma alternativa, utilizada pela “maioria dos cientistas”, define que “Energia é capacidade de realizar trabalho” (KURNAZ e CALIK, 2009, p. 2, tradução nossa), noção adotada, também, pela EIA (2017), uma de nossas fontes selecionadas. Neste sentido, todo tipo de trabalho a ser realizado necessita de uma determinada quantia de energia, condição *sine qua non* para sua realização. Embora alvo de críticas por sua demasiada superficialidade¹⁴, Coopersmith considera que “esta é provavelmente a melhor definição reduzida de Energia, aplicável em grande parte dos casos, especialmente em Física Clássica”¹⁵. Ademais, esta definição é compatível com a concepção de que “energia não é um fim em si mesmo, mas um ingrediente crítico em todos os esforços econômicos, essencial para a provisão de todas as necessidades humanas (...)” (IRENA, 2017a, p. 17, tradução nossa), onde o escopo desta pesquisa, “Transição Energética”, bem como de outros conceitos nela abordados, está contido.

Portanto, feito este esclarecimento, destacamos que esta é a definição aqui utilizada e na qual os demais termos relacionados aqui explorados se apoiam, dada sua capacidade de consubstanciar objetivamente este multifacetado termo sem prejuízo dos objetivos deste trabalho.

2.1.1 Formas de Energia

Energia é usualmente encontrada em duas principais formas: cinética e potencial. Em linhas gerais, trata-se da energia contida em um objeto, sendo a primeira decorrente de seu movimento e a segunda de diferentes fatores, como a posição em relação a outros objetos (gravitacional), os tipos de ligações químicas entre suas moléculas (química), distorção de sua forma (elástica) e a sua carga elétrica (elétrica) (JAIN, 2009). Energia pode ser convertida de

¹³ Ibid., p. 356, grifos do autor, tradução nossa.

¹⁴ Cf. (LEHRMAN, 1973), “*Energy is not the ability to do work*”.

¹⁵ Ibid., p. 357, tradução nossa.

cinética para potencial e vice-versa, respeitando a “Lei da Conservação da Energia”¹⁶. Um exemplo deste tipo de transformação é visto quando o carro de uma montanha russa atinge o ponto mais alto do percurso, onde sua energia potencial gravitacional é maximizada e seu movimento em relação aos trilhos é mínimo. Em seguida, ao iniciar sua descida, esta forma de energia se converte gradualmente em cinética, conferindo ao carro maior velocidade; e o processo é revertido ao iniciar a próxima subida (VIEGAS, 2005). Energia é obtida para uso final através de diferentes conversões, em diferentes fontes energéticas, que exploraremos no capítulo 3, “Recursos Energéticos: Produção, Consumo e Escassez”.

2.1.2 Unidades de Medida

Energia, enquanto grandeza, é medida de diferentes modos. No Sistema Internacional de Unidades (SIU), a unidade de medida é o “Joule”, que se refere à energia utilizada na aplicação de uma força de um Newton pela distância de um metro. Energia é também medida por unidades que não fazem parte do SIU, tais como calorias (cal), *British Thermal Units* (BTUs) e *tonne of oil equivalent* (Toe). Calorias são definidas como a quantidade aproximada de energia necessária para elevar a temperatura de um grama de água em um grau Celsius sob a pressão de uma atmosfera. BTUs, por sua vez, se referem à quantidade aproximada de energia para elevar a temperatura de uma libra (*pound*) de água em um grau Fahrenheit, também sob a pressão de uma atmosfera. Um Toe, como indica o nome, é a quantidade de energia liberada pela queima de uma tonelada de petróleo bruto.

Para a medição da produção de energia elétrica, a unidade usualmente utilizada no SIU e em relatórios oficiais é “Watt-hora” (Wh), que representa a quantidade de Watts produzida em uma hora. Fora do SIU, utiliza-se comumente o “Watt elétrico” (We), que mede a capacidade de produção elétrica “útil” de usinas, após subtrair perdas energéticas em forma de calor, atrito ou afins. Embora semelhantes, “Wh/e” (leia-se “Watt-hora ou Watt elétrico”) são unidades que medem energia em condições distintas, daí a necessidade de entendê-las. Quantidades maiores de eletricidade são comumente apresentadas conforme seus múltiplos de milhar, de “Quilowatt-hora/elétrico” (kWh/e, que equivale a 10^3 Wh/e), “Megawatt-hora/elétrico” (MWh/e, equivalente a 10^6 Wh/e), “Gigawatt-hora/elétrico” (GWh/e, equivalente a 10^9 Wh/e) a “Terawatt-hora/elétrico” (TWh/e, equivalente a 10^{12} Wh/e). Maiores multiplicadores existem, seguindo este padrão de incrementos.

¹⁶ Cf. (FEYNMAN, LEIGHTON e SANDS, 2005).

Para fins de comparação: a IEA oferece uma ferramenta de conversão de unidades, segundo a qual uma caloria equivale a aproximadamente 4,1 Joules, um BTU a aproximadamente 1055 Joules, um Watt a aproximadamente $3,6 \times 10^3$ Joules e um Toe a aproximadamente 4187×10^{20} Joules (IEA, 2018b).

Estas unidades, particularmente, são amplamente utilizadas nos relatórios de produção e consumo de energia publicados regularmente por governos e agências internacionais, vários dos quais analisaremos neste trabalho. O preço do gás natural, por exemplo, é comumente cotado em “dólares por milhão de BTUs” (mmBTU), enquanto “Mtoe” (um milhão de Toes) é a unidade principal usada para medir imensas quantidades de energia fóssil em relatórios energéticos e “Dólares/TWh” é uma unidade comumente usada para medir o custo de produção em usinas elétricas.

2.2 Classificações das Fontes de Energia

O amplo espectro de fontes de energia existente pode ser classificado de diferentes modos. Nesta subseção, veremos duas das principais classificações.

2.2.1 Fontes de Energia Renováveis e Não-Renováveis

Esta categorização, largamente empregada, dispõe as fontes de energia entre fontes renováveis e fontes não-renováveis, a depender da capacidade de renovação destas fontes através de processos que ocorrem naturalmente e com frequência suficiente para evitar seu esgotamento dentro de uma escala de tempo relevante para o ser humano (STEAD e STEAD, 2009). Em outras palavras, as fontes de energia que se renovam naturalmente em frações de tempo relevantes para a humanidade e sua demanda são consideradas renováveis. Inversamente, fontes de energia que não se renovam rapidamente o suficiente para promover extração econômica sustentável são consideradas não-renováveis (EIA, 2017).

Fontes de energia renováveis convencionais (isto é, mais usualmente utilizadas) são energia solar, geotérmica, eólica, hidrelétrica (que abrange também fontes como energia maremotriz, ondomotriz e de correntes marítimas) e bioenergia (composta por fontes como biodiesel, etanol, resíduos e lenha de reflorestamento) (ELLABBAN, ABU-RUB e BLAABJERG, 2014). Fontes de energia não-renováveis, por sua vez, compreendem recursos fósseis de origem orgânica (como petróleo, xisto betuminoso, turfa e gás natural), além de minerais e minérios metálicos, incluindo o urânio utilizado em usinas nucleares (EIA, 2017).

Recursos energéticos não-renováveis precisam estar localizados em regiões com altas concentrações para justificar explorações econômicas e comumente são encontrados em territórios específicos de um número limitado de países. Fontes renováveis, por outro lado, se estendem por largas áreas geográficas, aumentando a possibilidade de exploração rentável (IEA, 2012).

2.2.2 Fontes Primárias e Secundárias de Energia

Outra classificação das fontes de energia as divide entre primárias e secundárias. Fontes de energia primárias são as que ocorrem naturalmente, antes de transformações decorrentes da ação humana. Neste grupo estão recursos como o carvão, lenha, urânio natural, petróleo bruto e gás natural, bem como a luz do sol, o vento, rios, marés e quedas d'água (com potencial para gerar energia hidrelétrica) e fontes geotérmicas. Fontes de energia secundárias, por outro lado, são decorrentes da transformação de fontes primárias, como o petróleo refinado e a energia elétrica. Estas são comumente utilizadas como transporte de energia para o consumo final. Observa-se, assim, que as fontes secundárias não produzem energia – apenas contém energia oriunda das fontes primárias (HANANIA e DONEV, 2018).

2.3 Intensidade Energética e Eficiência Energética

O conceito de intensidade energética se refere ao custo energético derivado do desenvolvimento do PIB de um país ou região. Em outras palavras, trata-se da quantidade de energia necessária para produzir um dólar internacional¹⁷ do PIB. Inversamente, eficiência energética analisa o total de atividade ou produção que pode ser realizada com uma dada quantidade de energia, efetivamente medindo a eficiência, em termos de consumo energético, com que o desenvolvimento é promovido em diferentes países. Assim, reduzir a intensidade energética é um caminho para aumentar a eficiência energética (EERE, 2018).

No caso de eficiência energética, porém, múltiplas causas podem levar ao seu aumento, dificultando a adequada mensuração deste fator. Inovações tecnológicas e mudanças estruturais na economia de um país, bem como mudanças comportamentais em sua população, ou fatores culturais e tendências temporárias, além da alternância entre estações e fenômenos

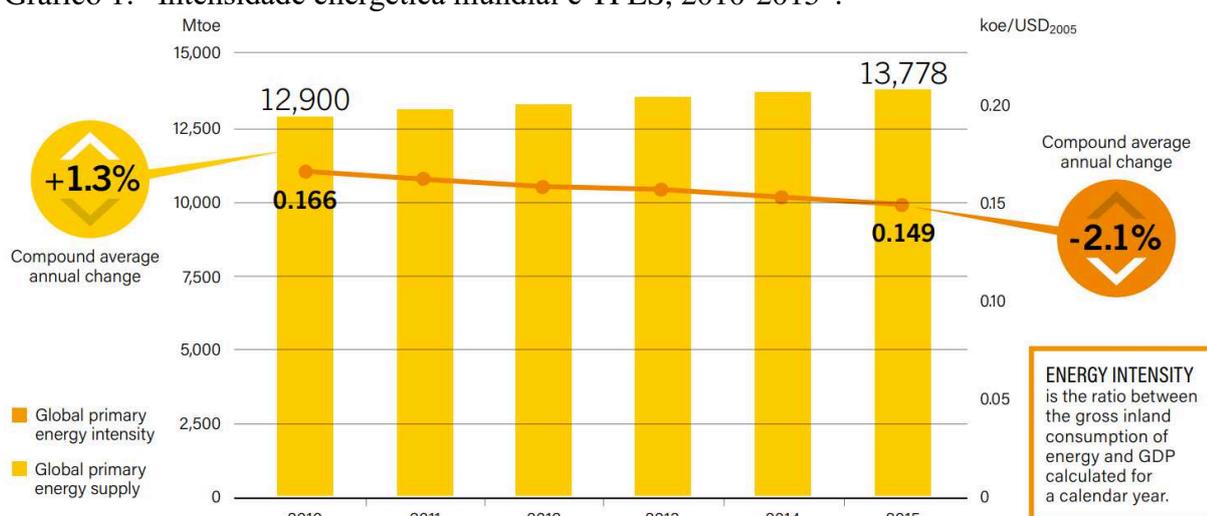
¹⁷ Conforme *The World Bank*, um dólar internacional, baseado na paridade do poder de compra, é capaz de comprar no país e período ora analisado uma quantia de bens e serviços comparável ao que um dólar dos EUA compraria nos EUA no mesmo período (TWB, 2018).

meteorológicos pontuais, são todos elementos que podem causar diferenças no padrão de consumo energético deste país em determinado momento, não sendo, contudo, por eles próprios, perenes. Por esse motivo, a intensidade energética é medida como forma de verificar, ainda que aproximadamente, o grau de eficiência energética em determinado país ou região. A intensidade energética primária é medida através da TPES¹⁸ por unidade de PIB, útil para verificar a demanda geral de energia e emissão de gás do efeito estufa. Caso tome-se como referência o TFEC¹⁹ por unidade de PIB, obtém-se a intensidade energética final, que melhor reflete a eficiência no consumo final de energia. Intensidade energética primária é mais utilizada em relatórios energéticos por utilizar dados mais confiáveis e que estão disponíveis mais cedo (Ibid.) e (REN21, 2017a, p. 149).

O aumento dos custos das diferentes fontes energéticas possui uma relação causal comprovada com a redução da intensidade energética em diferentes países e seus setores – preços elevados tendem a incentivar inovações tecnológicas e mudanças comportamentais nos usuários finais de energia. Do mesmo modo, a queda nos custos pode causar um efeito inverso (IEA, 2016, p. 283).

Os anos de 2010 a 2015 registraram uma queda generalizada na intensidade energética média mundial, conforme vemos no *Gráfico 1*, que ilustra a intensidade energética primária (linha contínua alaranjada), medida em *kilograms of oil equivalent* por dólar internacional de 2005, sobreposta à TPES (colunas em amarelo), em cada ano.

Gráfico 1: “Intensidade energética mundial e TPES, 2010-2015”.



Fonte: (REN21, 2017a, p. 150).

¹⁸ Do inglês “*Total Primary Energy Supply*”, TPES significa “Oferta Total de Energia Primária”. Cf. subseção 2.2.2 do presente trabalho.

¹⁹ Do inglês “*Total Final Energy Consumption*”, TFEC significa “Consumo Energético Final Total”, calculado pela soma de toda a energia utilizada em determinado país ou região (HANANIA e DONEV, 2017).

Com uma queda de 2,6% em 2015, a intensidade energética primária mundial excedeu a média anual do período analisado, que foi de 2,1%. Alguns países, principalmente emergentes, são responsáveis por esta queda, com destaque para a China, cuja intensidade energética primária decresceu 5,8% em 2015, sua TPES aumentando em 0,9% e seu PIB em 6,9%. O Brasil e o Vietnã, por outro lado, têm observado aumento em suas intensidades energéticas primárias desde 2012 (REN21, 2017a, p. 150).

Aumentar a eficiência energética é um objetivo comum em variados países. Para além da razão evidente de realizar mais trabalho com as mesmas quantidades de energia, um aumento na eficiência reduz a dependência que um país tem de fontes energéticas, em muitos casos importadas, efetivamente aumentando sua segurança energética (Cf. subseção 2.4). Além disso, considerando a matriz energética mundial fortemente dependente de fontes fósseis, que veremos mais detalhadamente no capítulo 3, diminuir o consumo energético significa reduzir emissões nocivas ao meio-ambiente (REN21, 2017a, p. 149) e (IEA, 2017d, p. 18-19).

2.4 Segurança Energética

O conceito de segurança energética se refere à junção de segurança de Estado e recursos energéticos. Como vimos, acesso à energia está intimamente ligado com a capacidade dos países de desenvolverem suas economias, com todos os fatores a ela associados. A IEA define segurança energética como a disponibilidade ininterrupta de fontes energéticas a um preço acessível. Duas dimensões principais decorrem deste conceito: segurança energética a curto e longo prazo. A primeira se refere à capacidade de reação diante de disrupções súbitas do equilíbrio entre oferta e demanda. A segunda, a investimentos voltados ao acesso à energia de acordo com desenvolvimento econômico e sustentabilidade (IEA, 2011).

Outro artigo²⁰, que concorda com a definição proposta pela IEA, bem como com as duas dimensões, segue descrevendo quatro camadas inerentes ao conceito, quais sejam: resiliência operacional de curto prazo, vulnerabilidade técnica, dependência econômica e suscetibilidade política. Em linhas gerais, o grau de segurança energética é elevado à medida que são aprimoradas a capacidade de reagir a interrupções súbitas de fornecimento energético, as tecnologias que permitem acompanhar novas tendências energéticas, a independência

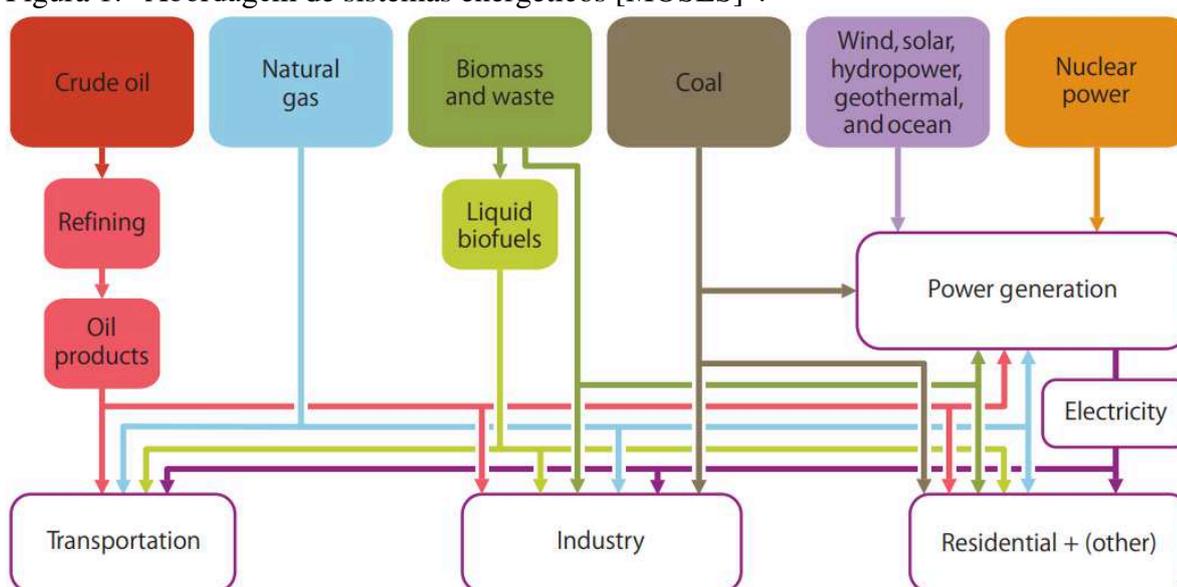
²⁰ Cf. (KISEL, *et al.*, 2016), “*Concept for Energy Security Matrix*”.

econômica do setor energético e a suscetibilidade à influência de políticas externas (KISEL, *et al.*, 2016, p. 2-3).

Diferentes medidas podem ser tomadas para aumentar a segurança energética em determinado país. No setor de eletricidade, por exemplo, a adoção de fontes capazes de atender prontamente a picos de demanda eleva a resiliência das malhas elétricas. A manutenção de estoques de segurança de diferentes recursos energéticos é outra medida amplamente adotada por países, por vezes coordenada por agências internacionais, como é atribuição da IEA em relação ao petróleo²¹. Diversificar fontes de energia e investir em estabilidade política reduzem a vulnerabilidade energética e suscetibilidade a políticas externas. E, como vimos na subseção 2.3, aumentos em eficiência energética comumente resultam em maior segurança energética (Ibid., p. 8).

Um mecanismo de análise de segurança energética foi desenvolvido pela IEA. Cunhado de MOSES²², ele se destina à observação da segurança de oferta de sete fontes energéticas principais: petróleo bruto, gás natural, carvão, bioenergia e resíduos, hidroeleticidade, energia geotérmica e energia nuclear. Através deste mecanismo, a IEA diagnostica vulnerabilidades nas matrizes energéticas e acompanha a evolução da segurança energética de seus países membros. Sua abordagem considera o sistema energético como um todo, desde o fornecimento de recursos energéticos até seu uso final, passando por suas transformações e distribuição, conforme a ilustrado na *Figura 1*.

Figura 1: “Abordagem de sistemas energéticos [MOSES]”.



²¹ Conforme vimos na nota de rodapé 4, a IEA foi criada para facilitar o aprimoramento da segurança energética de seus países-membros após embargo do petróleo de 1973/4.

²² Do inglês “*Model of Short-Term Energy Security*” (Modelo de Segurança Energética a Curto Prazo).

Fonte: (IEA, 2011, p. 8).

Atualmente, o MOSES analisa a vulnerabilidade associada às fontes primárias em diferentes países, calculando como estas podem afetar a disponibilidade de energia secundária, destinada ao uso final. No contexto de segurança energética, essa análise sistêmica permite entender o processo inteiro de produção de energia, identificando vulnerabilidades em diferentes partes com o potencial de afetar os serviços de cada país, que recebem avaliações de acordo com uma escala referente aos seus desempenhos.

Apesar destas medidas, bem como o sistema implementado pela IEA, serem eficazes em medir e elevar a segurança energética de países, esta permanece um conceito baseado em fatores que podem ser subjetivos e não mensuráveis²³. Assim, métodos para fortalecer e assegurar o suprimento constante e acessível de recursos a países são reinventados constantemente, colocando este conceito em posição de elevada prioridade nas agendas energéticas de virtualmente todos os países.

²³ Cf. (RADOVANOVIĆ, FILIPOVIĆ e PAVLOVIĆ, 2016), onde a dificuldade de mensuração de segurança energética e possíveis alternativas são discutidas.

3 RECURSOS ENERGÉTICOS: PRODUÇÃO, CONSUMO E ESCASSEZ

“The meek shall inherit the Earth, but not its mineral rights.”

- Jean Paul Getty

Até este ponto, começamos a estruturar a premissa de que o Sistema Internacional está em franco crescimento na medida em que diversas nações que o compõe adentram, também, processos de inequívoco desenvolvimento. O processo de globalização em curso propicia um notável grau de aprofundamento das relações entre países e demais atores internacionais, elevando fatores como aumento do PIB, crescimento demográfico, desenvolvimento tecnológico e comércio internacional a novos patamares, inéditos.

No entanto, algumas características deste franco crescimento, como o consumo de recursos energéticos, se revelam igualmente presentes e em proporções equivalentes. Inclua-se, também, a razão acelerada a que economias emergentes, como o notável caso da China, inserem-se na dinâmica de produção e consumo energético mundial. Com efeito, Yergin, cunhando o termo “globalização da demanda de energia”, demonstra as novas dimensões que a crescente demanda energética mundial, enquanto problema a ser enfrentado, passa a assumir. “Bilhões de pessoas estão ingressando na economia global; deste modo, sua[s] renda[s] e uso[s] de energia aumentam. (...) Como o mundo vai lidar com essa questão quando bilhões de pessoas deixarem de consumir três barris [de petróleo ao ano] *per capita* e passarem a consumir seis?” (YERGIN, 2014, p. 12, grifo do autor).

Esta globalização da demanda energética revela um novo enfoque deste assunto, que é somado aos usuais ciclos de abundância e escassez de recursos, movidos em grande parte por descobertas de novas fontes energéticas e/ou aprimoramento de tecnologias de exploração. Klare aponta que “até relativamente recentemente, a busca mundial de energia e recursos minerais era em sua maior parte prerrogativa de poucas potências industriais estabelecidas, lideradas pelos EUA, Japão, Alemanha, Reino Unido e França” (KLARE, 2012, p. 16, tradução nossa). Ao adentrarem gradativamente nesta dinâmica energética, novos atores adotam posturas semelhantes às das potências consolidadas, procurando respaldo para suas demandas energéticas e intensificando a demanda globalizada.

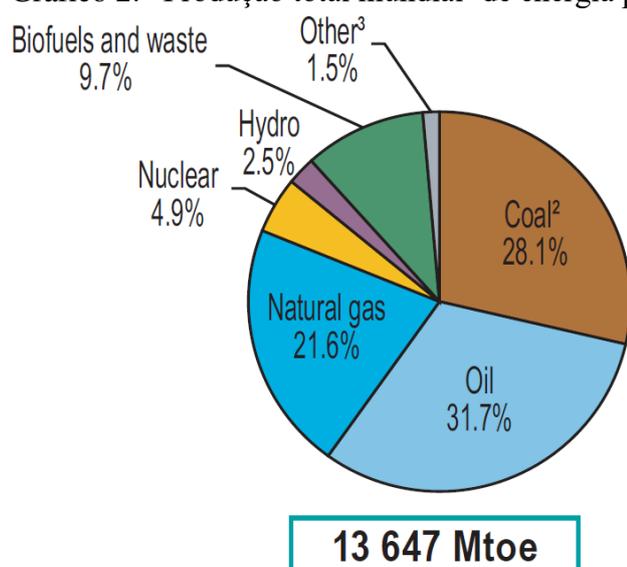
A seguir, à luz de dados e análises teóricas relevantes, investigaremos a forma como, neste cenário, esta demanda globalizada é atendida, reunindo as fontes de energia mais exploradas e averiguando prognósticos atuais referentes à escassez destas.

3.1 Fontes de Energia Não-Renováveis Convencionais

Conforme discutimos na subseção 2.2.1, fontes energéticas que não são capazes de se renovar em escala de tempo relevante para a exploração humana são comumente classificadas como não-renováveis. As fontes convencionais deste grupo mais significativas na dinâmica energética mundial são o carvão mineral, o gás natural, o petróleo e o urânio, sendo todas, com exceção desta última, de origem fóssil.

Embora, como veremos, nossa análise das fontes energéticas renováveis convencionais (seção 3.2) demonstre considerável crescimento da capacidade de produção energética através de processos limpos e renováveis, a análise do *mix* atual de fontes energéticas revela que a demanda mundial é majoritariamente suprida por recursos fósseis. O relatório “*Key World Energy Statistics*” de 2017, publicado pela IEA, revela que do total geral mundial de 13 647 Mtoes de energia produzida em 2015, apenas 13,7% foi a partir de fontes renováveis – os esmagadores 86,3% restantes foram oriundos de fontes não-renováveis, sendo 81,4% destes de fontes fósseis. O *Gráfico 2* ilustra as contribuições das principais fontes energéticas neste ano.

Gráfico 2: “Produção total mundial¹ de energia primária por fonte [2015]”.



Fonte: (IEA, 2017a, p. 6).

1: “Mundo” inclui aviação internacional e *bunker* [combustível] marinho.

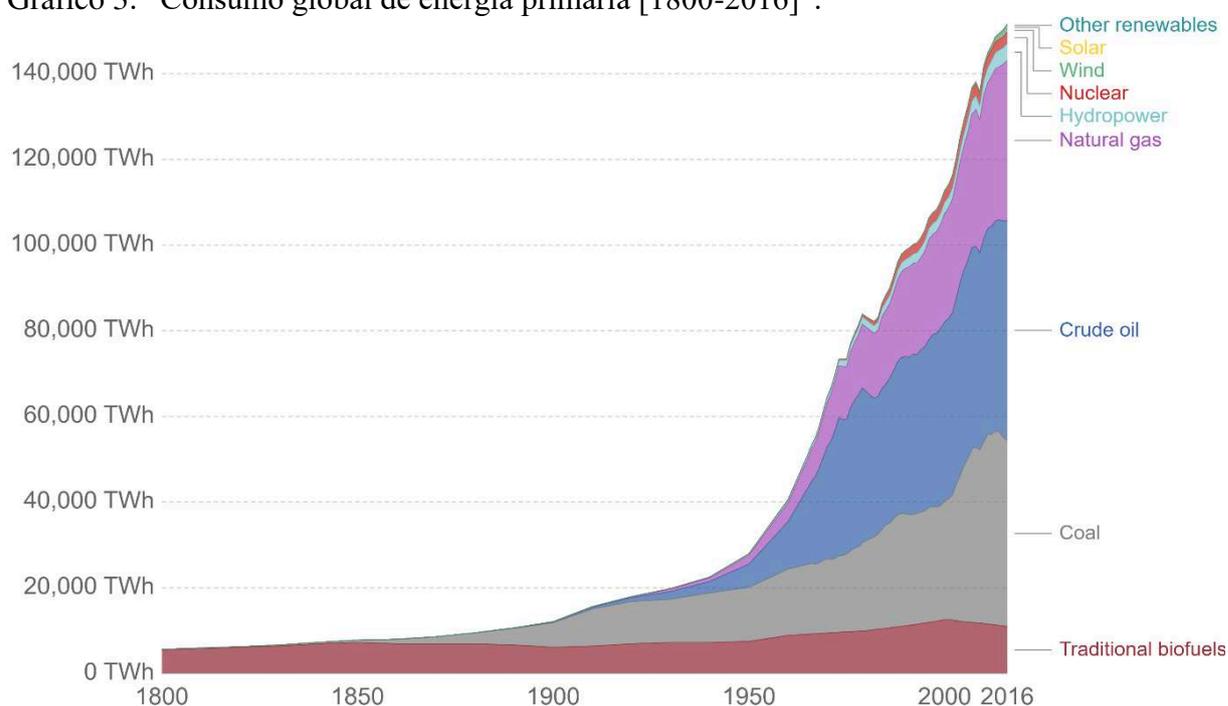
2: Neste gráfico, turfa e xisto betuminoso estão agregados com carvão.

3: Inclui fontes geotérmicas, solares, eólicas, maremotriz/ondomotriz/oceânica, calor e outros.

Fontes não-renováveis, seja por suas ofertas e disponibilidades, por seus custos atraentes ou por suas elevadas capacidades de produção energética (ou a combinação destes fatores), gradualmente se consolidaram. Mais especificamente os recursos fósseis foram e são catalisadores do desenvolvimento humano – as grandes quantidades de energia produzidas através da exploração destes recursos impulsionaram revoluções e possibilitaram a implementação de tecnologias inovadoras, como a máquina a vapor e o motor de combustão interna. “Nos dois últimos séculos, seres humanos se tornaram dependentes de quantidades sempre crescentes de energia para suprir o aumento demográfico e evolução dos padrões de vida. Com o aumento da demanda, fontes [energéticas] mudaram” (UNGER, 2013, p. 5, tradução nossa).

De fato, o *Gráfico 3* demonstra que suas posições centrais na matriz energética mundial de 2015 não são exclusividades deste ano ou de anos recentes, mas o resultado de uma tendência gradualmente consolidada e nitidamente observável se analisadas as produções energéticas nos últimos séculos.

Gráfico 3: “Consumo global de energia primária [1800-2016]”.



Fonte: (RITCHIE e ROSER, 2018b).

Colocadas em perspectiva, as capacidades de produção energética das fontes renováveis, promissoras e atraentes como podem ser, esmaecem ante as fontes fósseis. Partindo do consumo energético mundial total de 5 652,78 TWh em 1800 para 151 548,48 TWh em 2016, a demanda energética aumentou 26 vezes. O consumo de recursos fósseis, contudo,

registrou um aumento muito mais significativo: de 97,22 TWh para 132 051,53 TWh durante o mesmo período, o aumento foi de colossais 1358 vezes.

As fontes não-renováveis, porém, trazem consigo variadas adversidades. Os recursos fósseis produzem elevadas quantidades de gás carbônico (CO₂), considerados os principais poluentes atmosféricos e causadores do efeito estufa. Este último, dada a liberação anormal de CO₂ na atmosfera, é paulatinamente elevado da condição de fenômeno positivo, imprescindível para a manutenção da temperatura adequada para a vida humana na Terra, para o nível de temido agente de mudança climática generalizada. Uma série de consequências nefastas decorrem desta mudança, que vão de fenômenos meteorológicos extremos (como enchentes, secas, calor ou frio extremos, tempestades e ciclones) a aumento dos níveis dos oceanos, dentre outros (RITCHIE e ROSER, 2008c).

Mesmo a energia nuclear, produzida a partir de urânio (um recurso mineral não-renovável e não-fóssil), encontra grandes obstáculos. Para além da dificuldade (tão antiga quanto a própria tecnologia) de destinação adequada dos resíduos radioativos, acidentes em usinas nucleares ao longo da história desta fonte energética causaram uma onda de temor internacional, levando a processos de descontinuação em já numerosos países, por vezes em virtude de clamores populares (RAMANA, 2009).

Some-se a isso os diferentes prognósticos relacionados à escassez destes recursos não-renováveis, elemento preocupante para diversas nações e instigador de processos de transição energética que despontam no mundo. Deste modo, estas fontes, embora centrais na produção energética mundial, encontram-se em conturbada situação. Nas próximas subseções, lançaremos luz sobre suas particularidades, capacidades produtivas, custos e perspectivas.

3.1.1 Carvão Mineral

Carvão mineral é uma fonte energética não-renovável fóssil, sólida, que ocorre naturalmente, embora não com frequência suficiente para atender a demanda humana antes de sua depleção. Formado há 250-300 milhões de anos, carvão é composto primariamente por carbono, embora diferentes concentrações deste resultam em diferentes tipos de carvão, como antracito e carvão betuminoso. Este último é o tipo mais abundante e economicamente explorável no mundo, tornando-se também o principal tipo utilizado na produção de eletricidade (STRANGE, 2009).

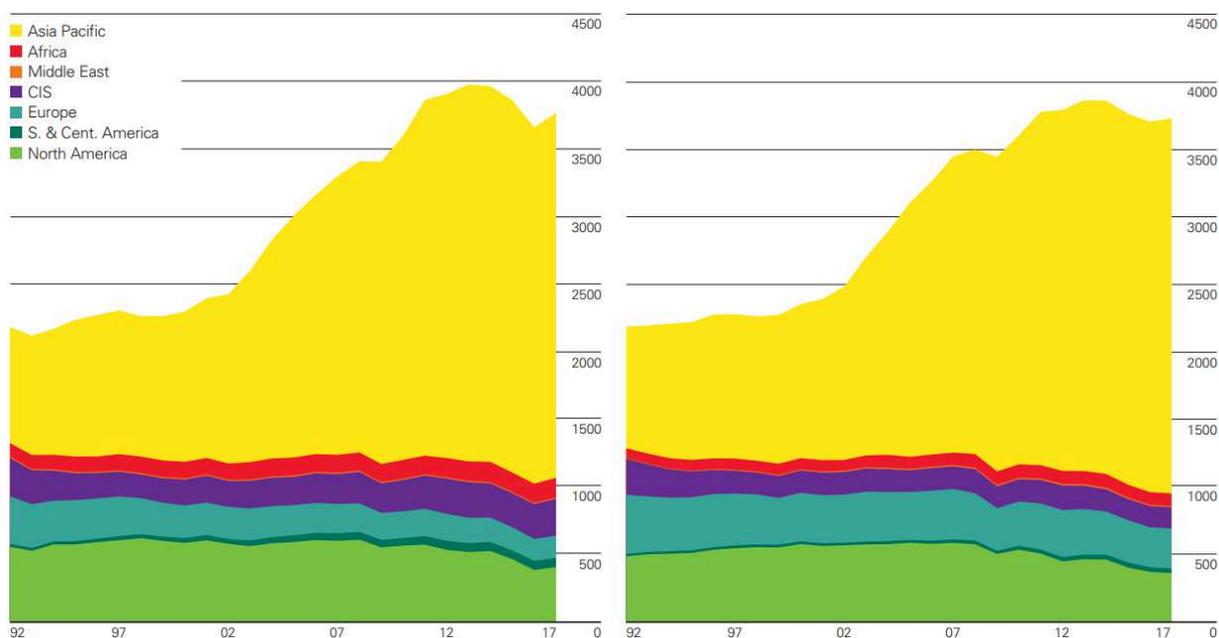
A “química complexa da combustão de carvão envolve centenas de variedades de fases gasosas, sólidas e líquidas” (BLANDER e SINHA, 2010, p. 340). Em linhas gerais, a energia

química contida nas ligações químicas entre seus átomos e moléculas é liberada em forma de luz e calor através de sua queima. Para a produção elétrica, o calor produzido é direcionado a geradores elétricos, mais comumente de turbinas (EIA, 2017).

Carvão foi a primeira fonte fóssil de energia, com registros de seu uso datando de até 4000AC, na China. Como vimos no *Gráfico 3*, o carvão (em cinza) permaneceu sendo a única fonte fóssil em uso até meados de 1870, quando duplamente seu consumo passou a ser muito mais pronunciado e o consumo de petróleo, ainda que de modo bastante tímido (quase imperceptível no gráfico) também foi iniciado. Este período coincide com meados da Revolução Industrial, elemento ao qual o elevado crescimento do consumo desta fonte fóssil é comumente atribuído (RITCHIE e ROSER, 2018b).

Com um consumo mundial de 43 403,14 TWh em 2016 produzidos através da combustão de carvão, esse recurso continua sendo uma fonte energética central na dinâmica energética mundial, representando uma parcela de 32,87% entre petróleo e gás natural, as três fontes fósseis convencionais (Ibid.). Como tal, sua produção e consumo anuais registraram relativo crescimento, conforme o *Gráfico 4*.

Gráfico 4: “Produção [esquerda] e consumo [direita] anuais de carvão por regiões em Mtoe, 1992-2017”.



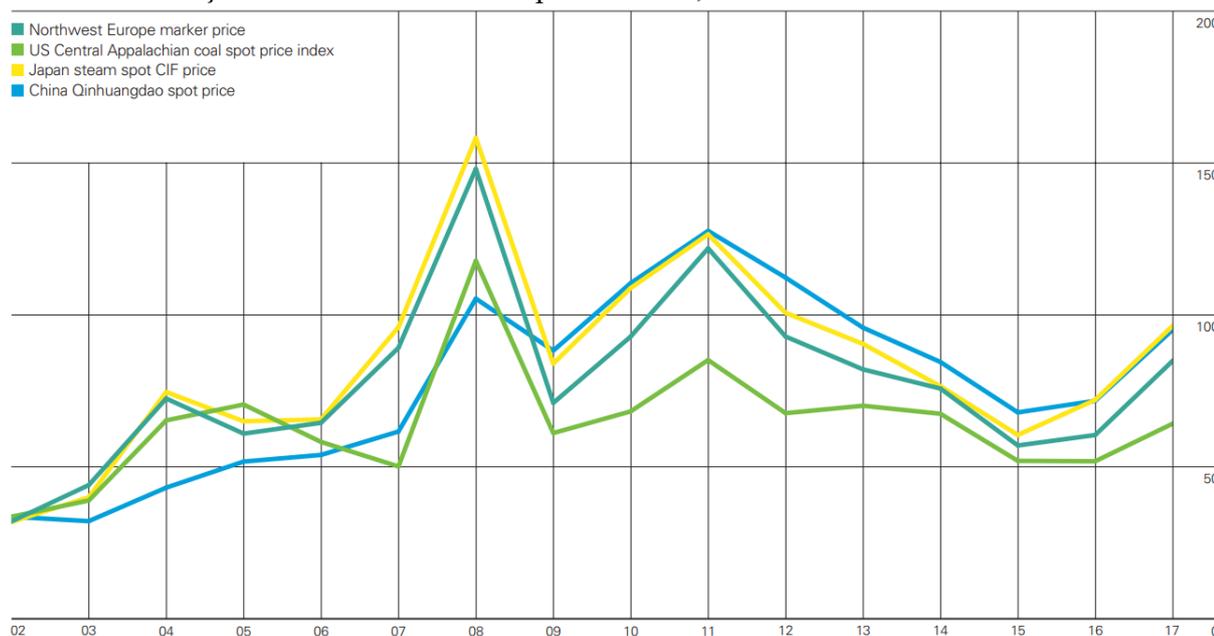
Fonte: (BP, 2018b).

Observa-se que a produção mundial de carvão aumentou em 105 Mtoes (ou 3,2%) de 2016 para 2017, a mais acelerada taxa de crescimento desde 2011. Paralelamente, o consumo mundial neste mesmo ano cresceu 25 Mtoes, liderado pela Índia (18 Mtoes) e China (4 Mtoes).

O ano de 2013, contudo, parece ter registrado “picos” de produção e consumo relativamente bem pronunciados, com subseqüentes anos de queda na produção seguindo (BP, 2018b). Embora esta tendência ainda não tenha sido confirmada, ela se deve em parte a políticas de descarbonização implementadas em economias de alta renda, como os EUA e União Europeia, que objetivam reduzir seus consumos em 40% e 60%, respectivamente (IEA, 2016). O aumento do consumo na China de apenas 4 Mtoes, embora significativo, é também resultado de políticas governamentais afins. A IEA prevê que este decréscimo no consumo por parte de algumas nações, contrabalançado pelo acréscimo em outras, deverá ser a tendência mundial até, pelo menos, 2022, levando à expressão “década de estagnação do carvão” (IEA, 2017c).

Segundo esta agência, ainda, os preços do carvão deverão depender fortemente da economia chinesa, maior produtora e ainda maior consumidora desta fonte fóssil. O *Gráfico 5* sumariza a evolução dos preços até 2017.

Gráfico 5: “Preços do carvão em dólares por tonelada, 2002-2017”.



Fonte: (BP, 2018b).

Ainda que sua descontinuação tenha sido iniciada em vários países, o reiterado consumo elevado em outros, principalmente a Índia e China, permitem que o preço não despenque fortemente devido a um choque de oferta. A década de estagnação do carvão prevê uma situação de relativa estabilidade até 2022, ao fim de cujo período o preço e o consumo deverão ser dependentes da economia chinesa e economias asiáticas, respectivamente.

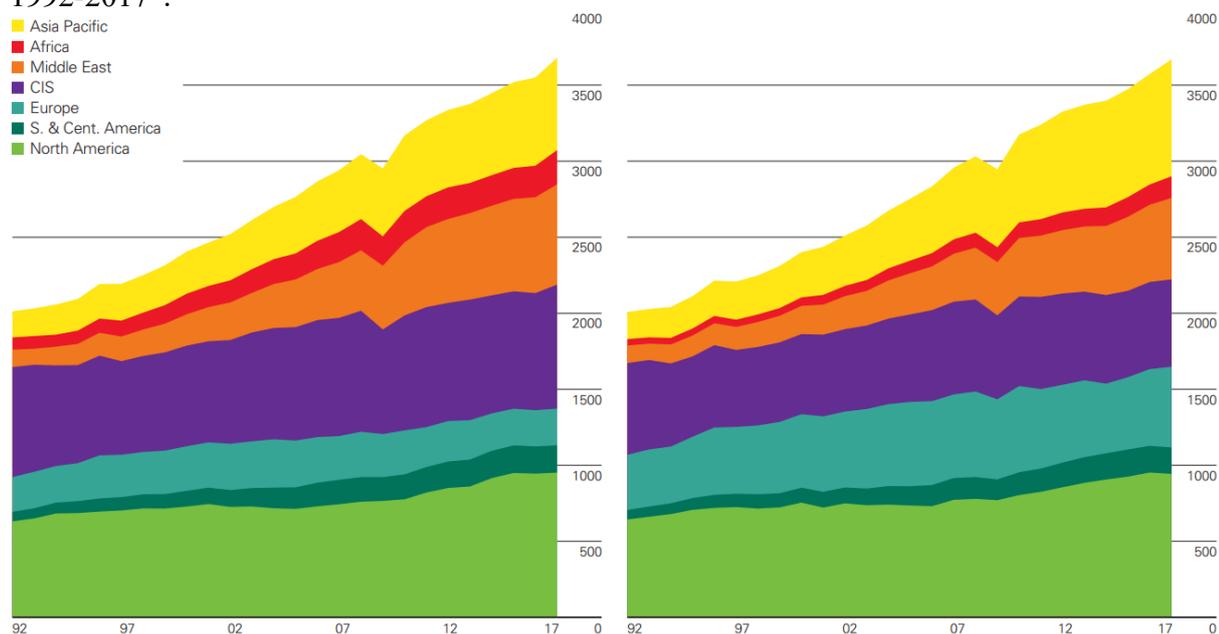
3.1.2 Gás Natural

O gás natural, uma mistura gasosa de hidrocarbonetos, é uma fonte energética de origem fóssil e não-renovável. Esta mistura é inodora e incolor – seu cheiro característico decorre de aditivos com o objetivo de facilitar a detecção de vazamentos. É composta majoritariamente por metano, com até 20% de outros gases presentes e, embora seja considerado “limpo” em relação ao carvão e petróleo nas formas líquida e sólida, sua queima libera de CO₂, o maior responsável pelo aquecimento global. Com registros de seu uso alcançando 900AC na China, reservas de gás natural foram descobertas na Inglaterra pela primeira vez em 1659, e em 1815 nos EUA (SOHN, 2009).

A formação do gás natural é semelhante à do petróleo – ambos são resultado de matéria orgânica soterrada por camadas de sedimentos, prensadas e aquecidas no subsolo ao longo de centenas de milhões de anos. No entanto, o resultado tende a ser gás natural em regiões mais profundas, onde a temperatura média a que a matéria orgânica é submetida é maior. Em sua forma convencional, o gás é localizado através de estudos realizados por geólogos, para então ser extraído através da perfuração e exploração cuidadosa de poços (EIA, 2017).

Como vimos no Gráfico 2, o gás natural foi responsável por 21,6% do total de energia produzida no mundo em 2015, colocando-o em posição central na dinâmica energética mundial, juntamente com o carvão e o petróleo. A produção e o consumo, deste modo, segue os padrões elevados das demais fontes fósseis centrais, como visto no Gráfico 6 que a mede em bilhões de metros cúbicos (bcm).

Gráfico 6: “Produção [esquerdo] e consumo [direito] mundial de gás natural por região em bcm, 1992-2017”.



Fonte: (BP, 2018b).

Segundo o gráfico, de 2016 a 2017 a produção mundial de gás natural aumentou em 131 bcm (4%), valor bastante elevado se considerada a média anual global de 2,2% no período analisado. Na liderança deste aumento, está a Rússia e o Irã, responsáveis por 46 e 21 bcm, respectivamente. O consumo neste ano seguiu o padrão de crescimento, subindo 96 bcm (3%), taxa mais elevada desde 2010. A China foi a maior responsável pelo aumento no consumo, seguida pela região do Oriente Médio e a Europa, com 31, 28 e 26 bcm, respectivamente (BP, 2018b).

Os preços do gás natural, medidos dólares por milhões de BTUs, podem variar de acordo com variados fatores, como o aumento da oferta e de estoques, variações entre estações em diferentes países e o custo relativo de combustíveis competidores. Além disso, os preços variam largamente de acordo com o produtor ou distribuidor, como podemos ver no *Gráfico 7*.

Gráfico 7: “Preços do gás natural em dólares por milhões de BTUs, 2000-2017”.



Fonte: (BP, 2018b).

O gráfico demonstra a correlação existente entre diferentes produtores principais no cenário de produção e distribuição de gás natural mundial. A correlação entre preços, que se manteve até meados de 2009, foi amplamente afetada no intervalo de 2010 até 2015, cenário explicado no relatório “*Gas Medium-Term Market Report*” de 2015 da IEA como decorrência de quedas nos preços de fontes competidoras, incluindo de recursos renováveis (IEA, 2015). A retomada da correlação, por sua vez, é explicada pela atuação crescente da Henry Hub (linha vermelha) como âncora de preços após aumento da participação dos EUA enquanto exportadores de gás natural (BP, 2018b).

A despeito da variação demonstrada neste gráfico, contudo, os preços devem continuar acessíveis a consumidores produtores ou localizados próximos a fontes. Nos casos em que transporte do gás por extensas distâncias se faz necessário, o preço pode se tornar pouco competitivo, mesmo com os preços relativamente reduzidos atuais (IEA, 2016, p. 163).

3.1.3 Petróleo Bruto

Petróleo é uma fonte energética não-renovável e fóssil, derivada de uma mistura formada predominantemente por compostos baseados em hidrocarbonetos, embora possa conter quantidades significativas de nitrogênio, enxofre, oxigênio e pequenas quantidades de níquel e outros elementos. Assim como o gás natural, sua origem é matéria orgânica prensada ao longo de centenas de milhares de anos em condições de elevada temperatura e reduzida

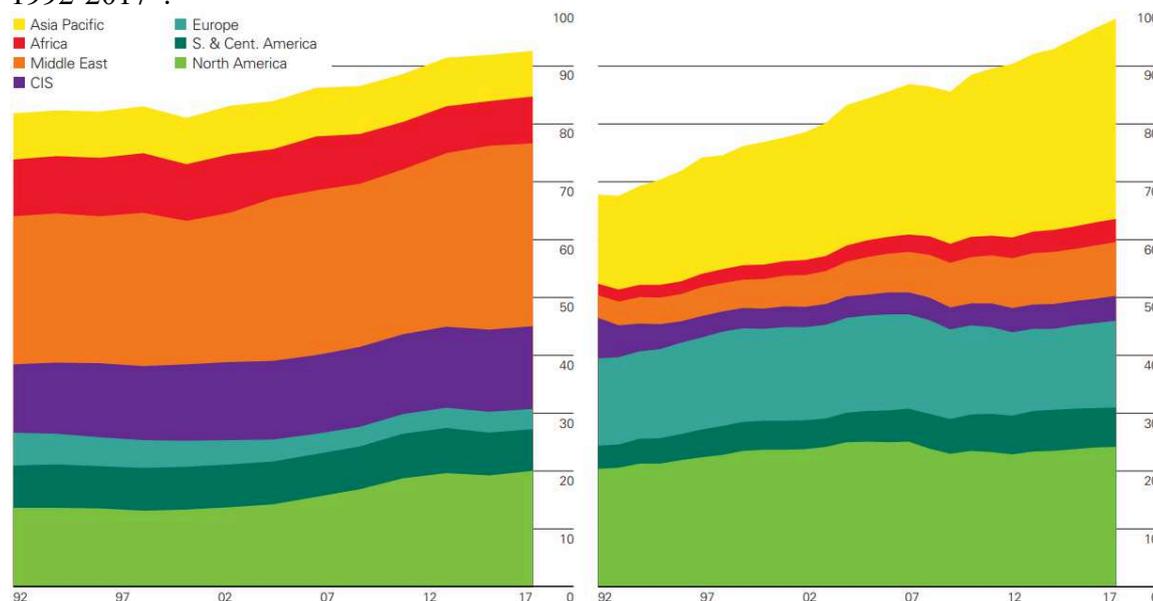
concentração de oxigênio. Em sua forma convencional, o petróleo bruto é extraído das reservas subterrâneas através da perfuração de poços. Os processos de exploração desta fonte fóssil evoluíram drasticamente desde 1863, quando o primeiro poço foi perfurado próximo a Pensilvânia, nos EUA (CHENIER, 2009).

Existem variadas formas de petróleo bruto, com milhares de composições diferentes, que variam drasticamente entre si. Ainda assim, é possível fracionar a mistura com relativa precisão de diferentes modos, como através da elevação gradual da temperatura, afetando diferentes frações com pontos de ebulição distintos. As frações podem variar largamente, partindo de gases resultantes da mistura, que ebulam a menos de 20°C, até óleos altamente pesados, a ebulir apenas acima de 350°C. Acima disso, considera-se petróleo em sua fase sólida, denominado asfalto (WITTCOFF, 1996).

Enquanto fonte de energia, o petróleo é comumente utilizado para produzir eletricidade, calor ou para propelir veículos, como os movidos por motores de combustão interna. Os métodos são variados, a depender da fração do petróleo bruto sendo utilizada, mas em linhas gerais, a energia potencial química é convertida em calor durante a combustão.

Conforme observamos no *Gráfico 2*, o petróleo foi responsável pela produção de nada menos do que 4 326,099 Mtoes de energia em 2015, uma parcela de 31,7% da produção total mundial naquele ano. Os números referentes à produção e consumo deste recurso fóssil, em milhões de barris por dia (b/d), acompanham estas notáveis taxas de produção energética, conforme vemos no *Gráfico 8*.

Gráfico 8: “Produção (esquerda) e consumo (direita) de petróleo por região em milhões b/d, 1992-2017”.



De acordo com os gráficos, a produção mundial de petróleo em 2017 aumentou de modo bastante tímido – apenas 0,6 milhões b/d. Excetuando a América do Norte (verde claro) e África (vermelho), as regiões analisadas tiveram produções totais apenas moderadas ao final do período analisado. O consumo, por outro lado, cresceu em média 1,7 milhões b/d no mundo – pelo terceiro ano consecutivo acima da média anual de 1,1 milhões de b/d verificada ao longo da última década. O Anexo 1: “Preços do petróleo bruto em dólares por barril, 1861-2017” demonstra a variação do preço do petróleo bruto em dólares por barril ao longo de, basicamente, toda a história de exploração desta fonte energética.

A partir de meados de 2010, observa-se a queda acentuada nos preços, que atingem o vale de pouco mais de 40 dólares por barril antes de esboçarem ligeira recuperação. Segundo o relatório “*World Energy Outlook*”, publicado em 2016 pela IEA, os pontos-chave desta queda abrupta são o aumento extraordinário da produção de xisto betuminoso nos EUA, uma variação não-convencional de petróleo bruto, além da decisão de membros centrais da OPEC²⁴ de evitar a restrição da produção para manter preços (IEA, 2016, p. 108).

As perspectivas do petróleo, na condição de fonte não-renovável e fóssil de energia, são assunto de acalorado debate contemporâneo. A subseção 3.3 do presente trabalho aborda mais a fundo diferentes análises acerca do futuro deste recurso energético.

3.1.4 Urânio e Energia Nuclear

O urânio, por si só, não é uma fonte energética. Em sua variação comum, é um metal que ocorre em abundância similar ao níquel, sendo cerca de cem vezes mais comum que a prata. Até meados da Segunda Guerra Mundial, o urânio comum era relativamente desimportante, usado apenas para um punhado de fins ordinários. Contudo, sua importância foi revolucionada com a descoberta de que é possível alcançar fissão nuclear com relativa facilidade através de uma de suas formas – o U-235 (EIA, 2017).

Ainda assim, esta forma (ou isótopo) do urânio é encontrada em apenas 0,711% do urânio que ocorre na natureza. Para aumentar a concentração deste isótopo em quantidades significativas e torná-lo uma fonte de energia, o metal precisa passar por variados processos,

²⁴ Fundada em 1960, Bagdá, a “Organização dos Países Exportadores de Petróleo – OPEP (em inglês, “*Organization of the Petroleum Exporting Countries*” – OPEC) é uma organização intergovernamental permanente que conta com 14 países exportadores de petróleo membros. Com sede em Viena, seu objetivo é coordenar e unificar os preços de petróleo entre seus membros para garantir preços justos e seguros a produtores de petróleo; um suprimento eficiente, regular e econômico para países consumidores; e um retorno de capital justo aos que investem na indústria (OPEC, 2018).

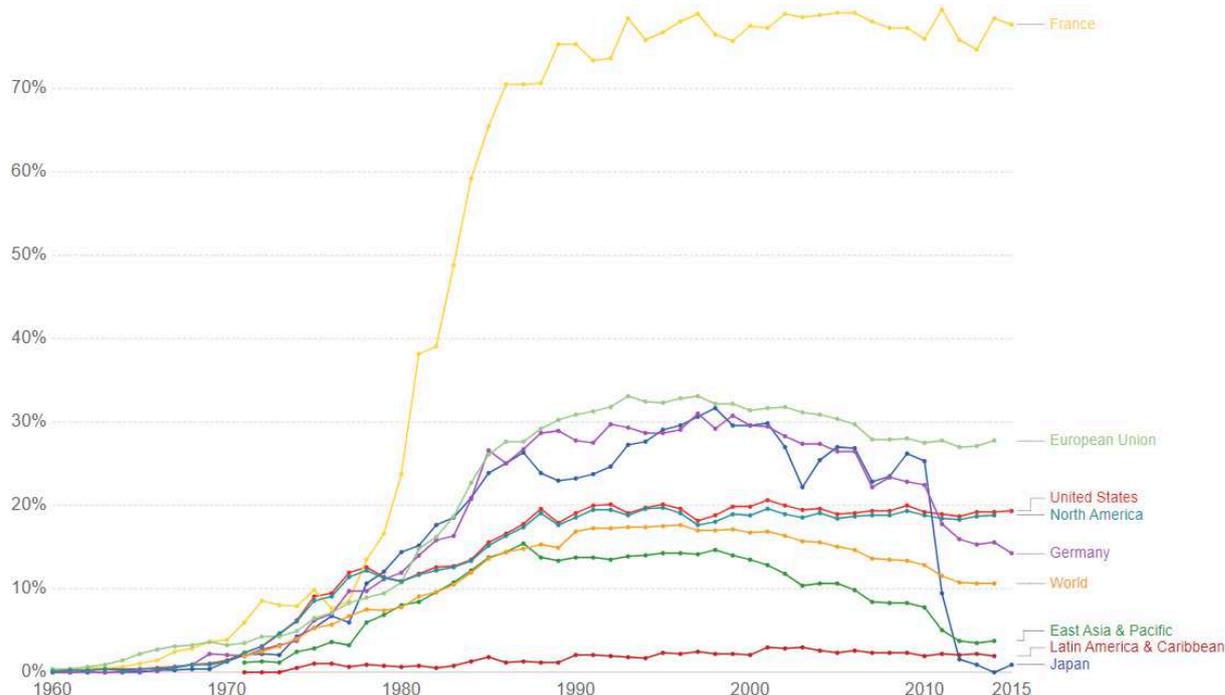
notadamente o de enriquecimento. Este processo envolve a aplicação de técnicas voltadas à separação lenta e gradual dos isótopos do urânio, resultando em concentrações infimamente maiores do isótopo desejado em cada etapa concluída. Ao final do processo, obtém-se uma massa de urânio com concentrações de U-235 muito maiores do que é possível encontrar na natureza. Para o uso em reatores nucleares, as concentrações finais mais comuns são entre 2-5% – um aumento considerável sobre a concentração original de 0,711% (USNRC, 2012).

Este isótopo é, então, utilizado na maioria dos reatores nucleares, que extraem a energia em forma de calor liberada na fissão nuclear de seus átomos, direcionando-o a turbinas de geradores elétricos (WNA, 2018a). Os tipos de reatores evoluíram gradualmente, avançando em ditas “gerações”²⁵, que vão da I, de 1950, até a IV, ainda em desenvolvimento. A implementação de novas tecnologias é norteadas por fatores-chave, quais sejam: custo-benefício, segurança, securitização e não-proliferação, adequação da malha elétrica, factibilidade de comercialização e o ciclo do combustível, este último abrangendo aumento na eficiência do consumo de urânio e minimização de resíduos nucleares (GOLDBERG, 2011).

Com um consumo mundial de 2 616,54 TWh em 2016, conforme vimos no *Gráfico 3*, a participação da energia nuclear no *mix* energético mundial tem sido bastante tímida. Como discutimos acima, esta fonte energética encontra diversos obstáculos, diminuindo paulatinamente sua utilização em diversas partes do mundo, conforme vemos no *Gráfico 9*, que analisa a produção elétrica no mundo através de fontes de energia nuclear.

²⁵ Cf. (GOLDBERG, 2011), “*Nuclear Reactors: Generation to Generation*”.

Gráfico 9: “Porcentagens da produção elétrica via fontes nucleares por país ou região, 1960-2015”.



Fonte: (RITCHIE e ROSER, 2018a) via IEA e The World Bank.

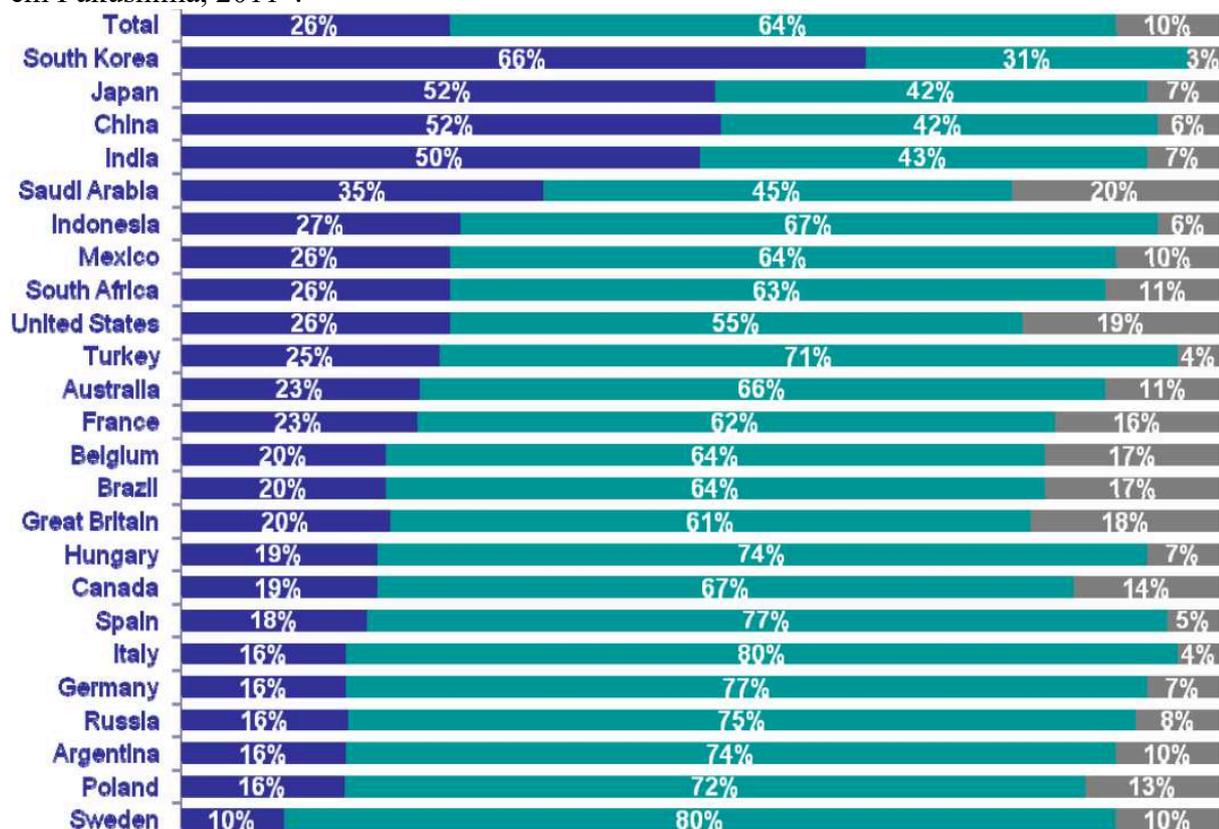
É possível observar, no gráfico, uma tendência à queda na produção elétrica nuclear em variadas regiões do mundo. Ainda que a França permaneça fortemente dependente desta fonte energética, terminando 2015 com uma parcela de 77,67%, a redução da produção elétrica nuclear em países como Alemanha e Japão contribuíram para reduzir a média mundial, que também registra uma queda consistente, desde 2010. O Japão, diga-se, registrou uma queda dramática em decorrência do desligamento generalizado de reatores nucleares após o terrível acidente nuclear de Fukushima em 2011²⁶.

A despeito do desenvolvimento tecnológico, focado nos fatores-chave supracitados, a energia nuclear ainda possui um elevado custo, bem como um impacto ambiental elevado através de seus resíduos radioativos. O componente principal do custo é a construção de novos reatores. À medida que novos modelos de reatores, de gerações mais avançadas, são desenvolvidos, novos projetos de construção são necessários. Juntamente com os demais componentes dos custos – a obtenção e enriquecimento de urânio e a destinação adequada de seus resíduos, a fonte de energia nuclear perde em competitividade para suas concorrentes, como o carvão e o petróleo, principalmente em regiões com fácil acesso a estas fontes fósseis (WNA, 2018b).

²⁶ Cf. (IAEA, 2016), “*Fukushima Nuclear Accident*”.

Outro fator de impacto na descontinuação do uso de energia nuclear são os acidentes nucleares. Ao longo da história, três acidentes principais, sendo o supracitado caso de Fukushima o último deles, criaram uma onda de temor generalizado em várias regiões do mundo. Oposições populares ao uso desta fonte energética contribuem significativamente para a adoção de políticas voltadas à exploração de outras fontes energéticas. O *Gráfico 10* demonstra os resultados de uma pesquisa de opinião realizada entre 6 e 21 de Maio de 2011, aproximadamente dois meses após o desastre de Fukushima. A amostra foi de 18 787 participantes, entre 16-64 anos de idade, localizados ao redor do globo. Uma pergunta foi realizada aos participantes: “Você indicou se opor energia nuclear para a produção elétrica. Você tinha esta opinião antes ou decidiu se opor recentemente por causa dos eventos no Japão?” (IPSOS, 2011, p. 5, tradução nossa). Os participantes puderam escolher entre três alternativas, distribuídas no gráfico: “recentemente”, em azul escuro; “antes”, em azul turquesa; e “nenhum dos dois”, em cinza.

Gráfico 10: “Porcentagens de opiniões contrárias à energia nuclear influenciadas pelo acidente em Fukushima, 2011”.



Fonte: (IPSOS, 2011).

Observa-se o notável efeito nas opiniões das pessoas na amostra selecionada – 52% dos entrevistados no Japão decidiram se opor à fonte nuclear de energia em decorrência do acidente

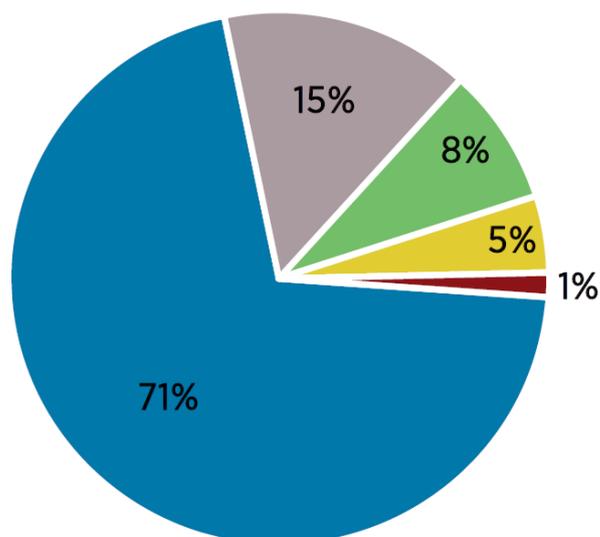
nuclear. O total geral, de 26%, revela que mais de um quarto dos entrevistados tiveram suas opiniões mudadas. Estes resultados evidenciam a extensão do temor causado por desastres deste tipo. Assim, embora exista grande controvérsia sobre a factibilidade e os impactos ambientais da energia nuclear, os números parecem mostrar que seu uso tem sido reduzido ao longo dos últimos anos. Esta tendência, ainda que recente e não confirmada, pode indicar a descontinuação gradual e eventual desuso desta fonte energética.

3.2 Fontes de Energia Renováveis Convencionais

Como visto, fontes de energia renováveis são comumente encontradas em largas áreas geográficas, aumentando as possibilidades de exploração. São fontes consideradas alternativas à malha energética mundial, fortemente dependente de recursos energéticos fósseis não-renováveis. O potencial das fontes renováveis de suprir a demanda energética mundial é amplamente discutido entre especialistas, embora exista um consenso sobre a disparidade entre as tecnologias utilizadas na exploração de recursos energéticos renováveis e de recursos não-renováveis, estes com fontes já consolidadas, como o petróleo, o gás natural e o carvão.

Segundo relatório anual publicado pela IRENA, no ano de 2015 as fontes de energia renováveis convencionais produziram um total de 5512 TWh, sendo a hidroeletricidade responsável por 3893 TWh deste total, seguida pela energia eólica (826 TWh), bioenergia (456 TWh), energia solar (256 TWh), energia geotérmica (81 TWh) e energia marítima (1 TWh) (IRENA, 2017b). O *Gráfico 11* ilustra a participação destas fontes de energia na produção mundial de eletricidade de fontes renováveis para este ano.

Gráfico 11: “Geração de Eletricidade Renovável por Fonte em 2015”.

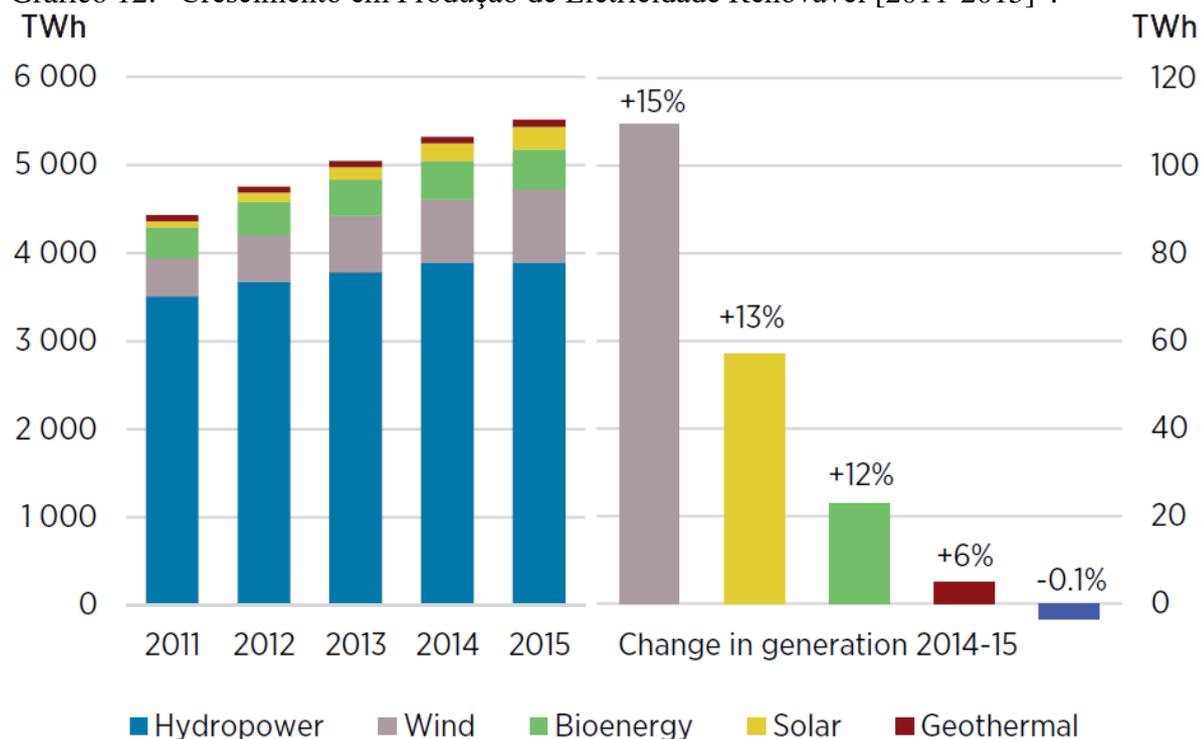


■ Hydro ■ Wind ■ Bioenergy ■ Solar ■ Geothermal

Fonte: (IRENA, 2017b).

Os números de 2015 não representam um episódio isolado – verifica-se uma tendência ao aumento na produção de eletricidade através de fontes renováveis nos anos anteriores. O *Gráfico 12* revela que este crescimento é, senão, modesto, ainda que inequívoco, culminando no total geral de 5512 TWh de energia sustentável produzida em 2015.

Gráfico 12: “Crescimento em Produção de Eletricidade Renovável [2011-2015]”.



Fonte: (IRENA, 2017b)

O ano de 2015 observou o aumento de 1.100 TWh em produção elétrica a partir de fontes renováveis em relação a 2011. De 2014 para 2015, o crescimento foi de 3,5% – não em decorrência das fontes hidrelétricas (cuja produção se manteve constante), mas sim do crescimento reiterado da produção eólica, que atingiu notáveis 15% em relação ao ano anterior.

O horizonte das energias renováveis revela-se, de fato, promissor. Os números crescentes nos relatórios de produção energética parecem trazer elementos almejados, como segurança energética e sustentabilidade, cada ano mais para perto de um contexto de efetiva factibilidade. Nas próximas subseções, analisaremos as fontes energéticas renováveis convencionais e as tecnologias empregadas em suas explorações, bem como seus custos de implementação e suas respectivas contribuições no total geral de produção energética sustentável mundial ao longo dos últimos anos.

3.2.1 Energia Solar

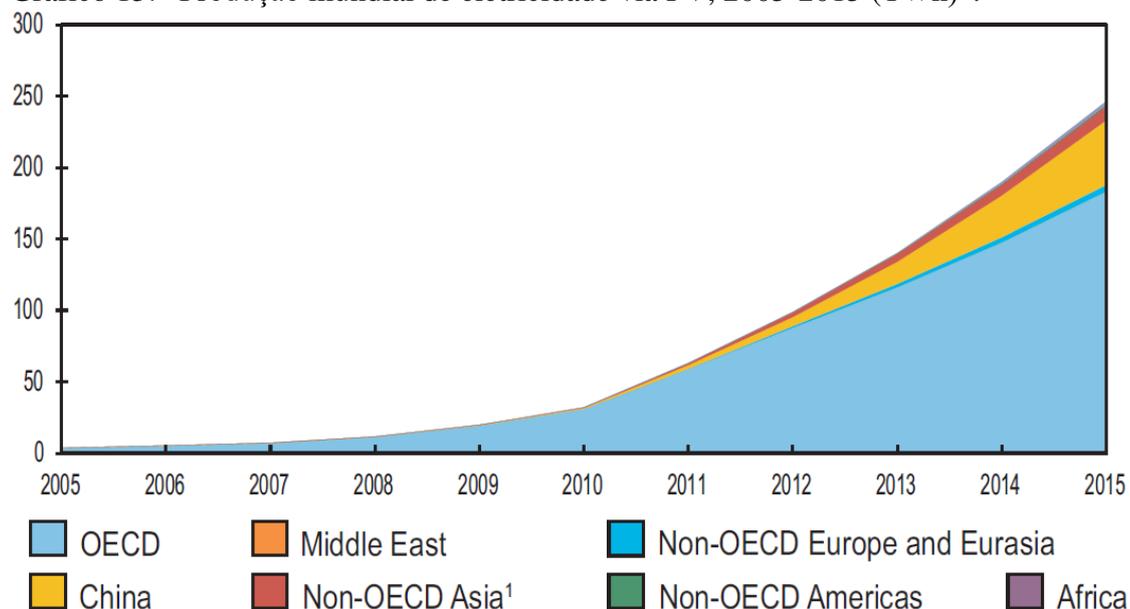
Energia solar é o nome comumente dado à produção de eletricidade ou calor através da luz solar. Para a produção de eletricidade, são empregados dois métodos principais. O primeiro, conhecido como Energia Solar Concentrada (ESC), faz uso da manipulação dos raios solares, concentrando-os com o uso de lentes ou refletores em pontos específicos onde geradores térmicos de eletricidade estão localizados (LAW, PRASAD, *et al.*, 2014). O segundo método faz uso de painéis solares construídos com materiais semicondutores para gerar eletricidade através do efeito fotovoltaico (FV). Os fótons presentes na luz solar atingem os átomos destes painéis, elevando a energia de seus elétrons. Estes últimos, mediante energia solar suficiente, separam-se dos íons e são recapturados, gerando energia potencial elétrica com a separação das cargas (BÖER, 2009). A produção de calor através de energia solar se dá através de “coletores solares” ou “coletores simples”, que aquecem quando expostos à luz solar e comumente são utilizados para aquecimento de água ou de ar (NORTON, 2014).

O método ESC possui a vantagem de armazenar parcialmente o calor produzido pela luz solar através do aquecimento de sais, tornando estas usinas solares capazes de operar em parte do período noturno, ao passo que o armazenamento eficiente de eletricidade ainda é um problema que diminui a eficácia do método fotovoltaico e o torna menos confiável em períodos de alta demanda. Contudo, em condições atmosféricas impróprias, o método ESC sofre considerável decréscimo em sua produtividade, fator largamente atenuado pela capacidade do método fotovoltaico de produzir eletricidade mesmo com incidência difusa de radiação solar. Em linhas gerais, a tecnologia ESC tem largamente perdido espaço para a fotovoltaica à medida

que esta se torna mais eficiente e seus custos são reduzidos. Em 2015, a tecnologia ESC foi responsável pela produção de 9939 GWh em comparação com 243 714 GWh produzidos por painéis fotovoltaicos (IRENA, 2018c). Não obstante, a ESC pode ser considerada uma tecnologia complementar eficaz enquanto formas economicamente viáveis de armazenamento de eletricidade produzida por painéis fotovoltaicos não são implementadas (SHEMER, 2018).

A IEA, em seu relatório “*Key World Energy Statistics*” (2017), demonstra o crescimento notável da produção de eletricidade através da implementação de painéis FV durante o período de 2005 a 2015. O *Gráfico 13*, retirado deste relatório, revela sobremaneira que os países membros da OCDE²⁷ juntos são responsáveis pela maior parte do crescimento, embora a contribuição da China no referido período seja também considerável.

Gráfico 13: “Produção mundial de eletricidade via FV, 2005-2015 (TWh)”.



Fonte: (IEA, 2017a, p. 24).

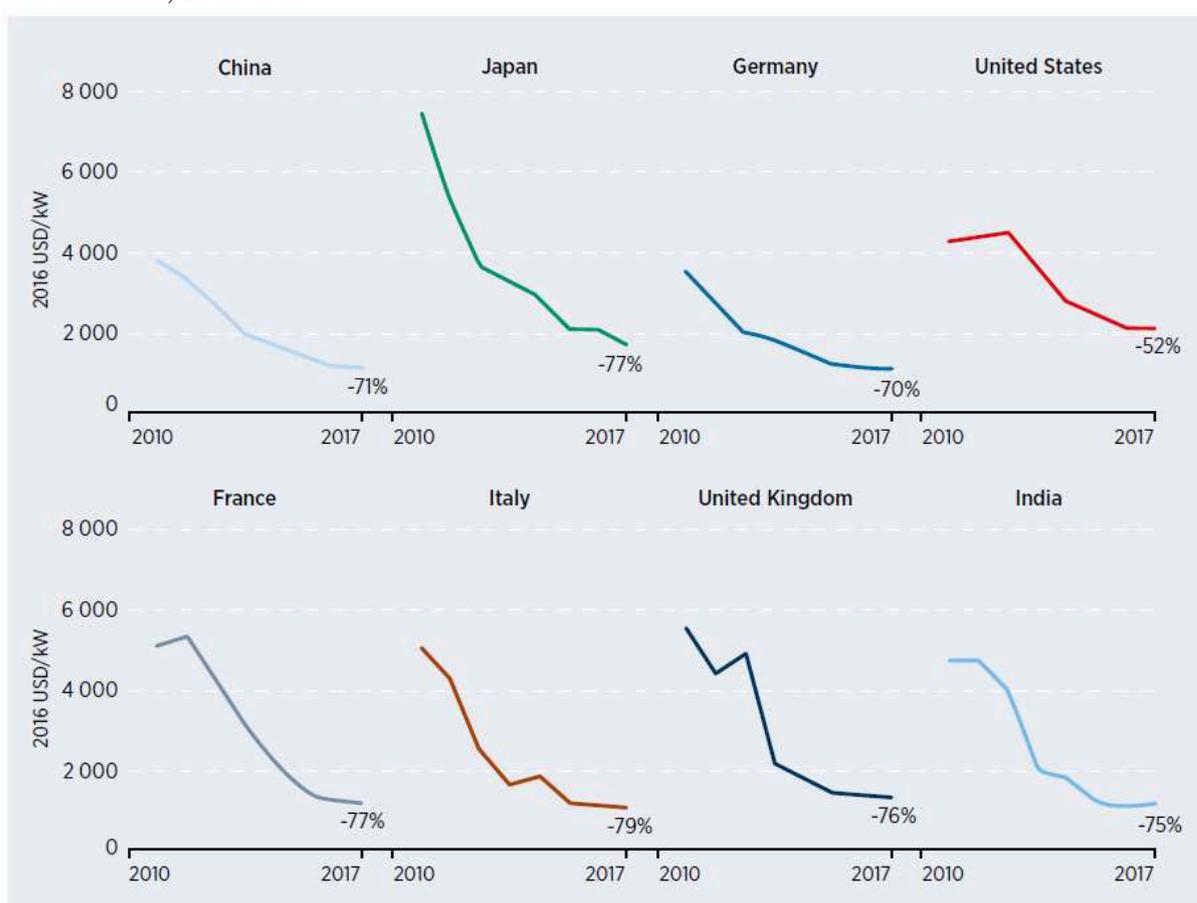
Em 10 anos, com um crescimento de 4 TWh em 2005 para 247 TWh em 2015, a produção elétrica através de painéis solares FV aumentou em 6175%. A China, país não-membro da OCDE, aumentou sua produção em mais de 10 vezes, mais notadamente a partir de 2010.

Comparativamente, o custo da instalação desta tecnologia caiu em larga medida ao longo da última década. Ainda que fortemente dependente de tecnologias que aumentem a

²⁷ Fundada em 1961 em Paris, a “Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico” (OCDE, em inglês “OECD”) é uma organização internacional voltada a promover políticas para melhorar o bem-estar econômico e social de pessoas ao redor do mundo. Atualmente, conta com 37 países membros, dentre os quais muitos dos países desenvolvidos, como Alemanha, EUA, Canadá, Reino Unido e Japão, além de países emergentes como México e Chile (OECD, 2018), “*About OECD*”.

eficiência de produção e acessibilidade aos painéis FV, bem como das condições geográficas locais (com destaque para fatores como incidência média de radiação solar e média de dias ensolarados), é observável uma tendência ao decréscimo dos custos em vários países. O *Gráfico 14*, extraído do relatório anual “*Renewable Power Generation Costs in 2017*” publicado pela IRENA em 2018, ilustra este ponto. Medidos em dólares estadunidenses (USD) por quilowatt (kW), os custos eram notavelmente mais díspares em 2010 do que em 2017, quando eles parecem atingir níveis semelhantes, mesmo entre nações em diferentes localizações geográficas e níveis de desenvolvimento econômico.

Gráfico 14: “Tendências de custo total da instalação de painéis FV em larga escala em países selecionados, 2010-2017”.



Fonte: (IRENA, 2018b, p. 65).

O decréscimo acentuado no custo da instalação dos painéis FV não é um fator isolado e, embora os custos sejam diferentes entre países (dados fatores intrínsecos como os distintos elementos geográficos supracitados e oferta de matérias-primas usadas na produção dos painéis), a disparidade entre os custos para diferentes nações deve continuar diminuindo ao

passo que mercados menores amadurecem com seus respectivos crescimentos e a competição entre produtores aumenta (IRENA, 2018b).

3.2.2 Energia Eólica

O vento, enquanto fonte de energia primária, há muito é utilizado por sua capacidade de realizar trabalho, através de instrumentos como velas navais, moinhos ou asas. Para a produção de energia elétrica, contudo, usinas eólicas empregam aerogeradores. Conforme Burton *et al* (2001), trata-se de turbinas montadas no topo de bases verticais, que podem alcançar a faixa de 80 metros de altura. O eixo da turbina, que pode ser vertical ou horizontal, determina diferentes modelos de hélice que podem ser empregados. O desenho das hélices é feito com vistas a otimizar aerodinamicamente a captação do vento, que, dotado de energia cinética, atinge e rotaciona as hélices. Estas, por sua vez, são ligadas a um gerador elétrico que converte a energia cinética recém-adquirida em energia elétrica. Com a mutabilidade da direção do vento em mente, modelos industriais de aerogeradores possuem sensores de direção e velocidade do vento, que detectam mudanças e reposicionam as hélices de acordo, de modo a aumentar a eficiência da conversão de energia.

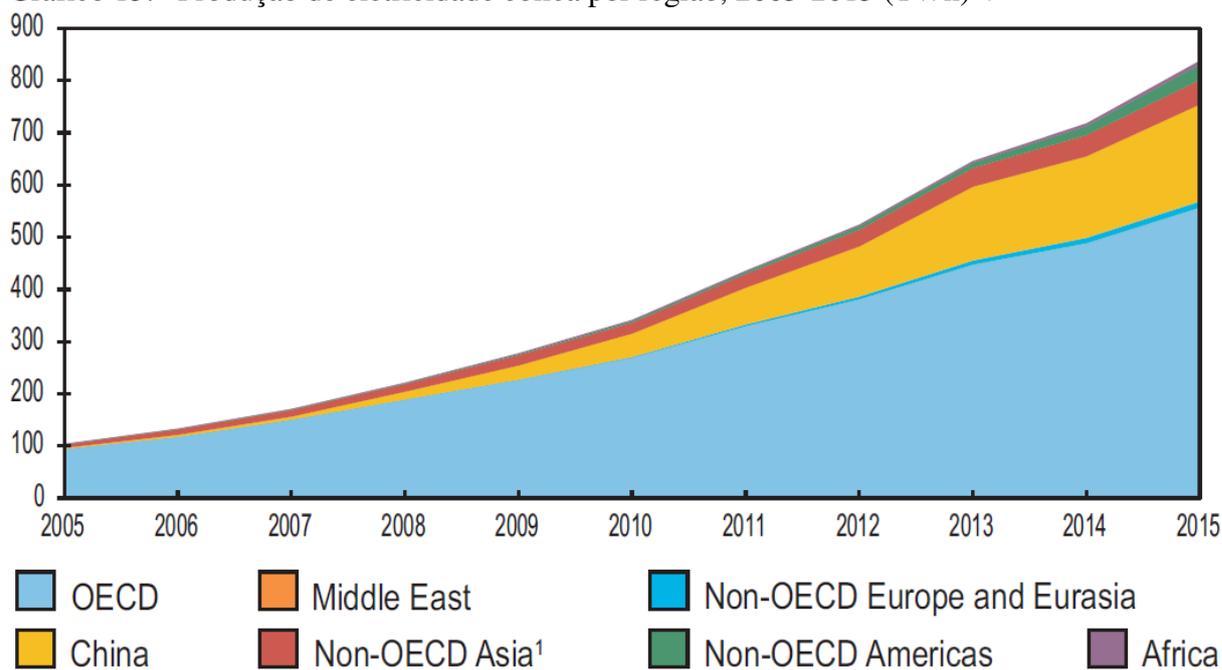
No entanto, a eficiência média da conversão de energia cinética para energia elétrica através da captação do vento não ultrapassa 59,3%, conforme previsto pelo “Coeficiente de Betz”. Absorver 100% da energia cinética do vento significaria que este, após passar pela turbina, teria velocidade final zero, o que é fisicamente impossível. Além disso, mesmo tendo perdido apenas parte de sua energia cinética e com sua velocidade reduzida, a massa de ar resultante serve de obstáculo para o fluxo vindouro, diminuindo a eficiência. Por fim, o desgaste e desajuste natural dos componentes do aerogerador implicam em ainda maiores quedas na eficiência. Por isso, estima-se que atualmente aerogeradores consigam alcançar aproximadamente 80% do limite estabelecido pelo Coeficiente supracitado (BURTON, SHARPE, *et al.*, 2001).

Não obstante, novas tecnologias, inovações em materiais utilizados em suas composições e nos desenhos de hélices tendem a atenuar os fatores supracitados que resultam em reduzida eficiência. Some-se a isso que energia eólica, além de explorar uma fonte energética primária renovável e vastamente disponível, é uma alternativa viável para suprir demandas energéticas em localizações remotas no globo terrestre e causa um reduzido impacto relativo ao meio-ambiente. Usinas eólicas, ainda, podem ser instaladas em alto-mar (*offshore*), alternativa ainda em estágios iniciais, dispendiosa e pouco expressiva (vide *Gráfico 23*), mas

com potencial de atenuar obstáculos por vezes enfrentados pelas usinas *onshore*, como espaço físico limitado, bem como aproveitar fluxos de vento relativamente mais constantes e desobstruídos.

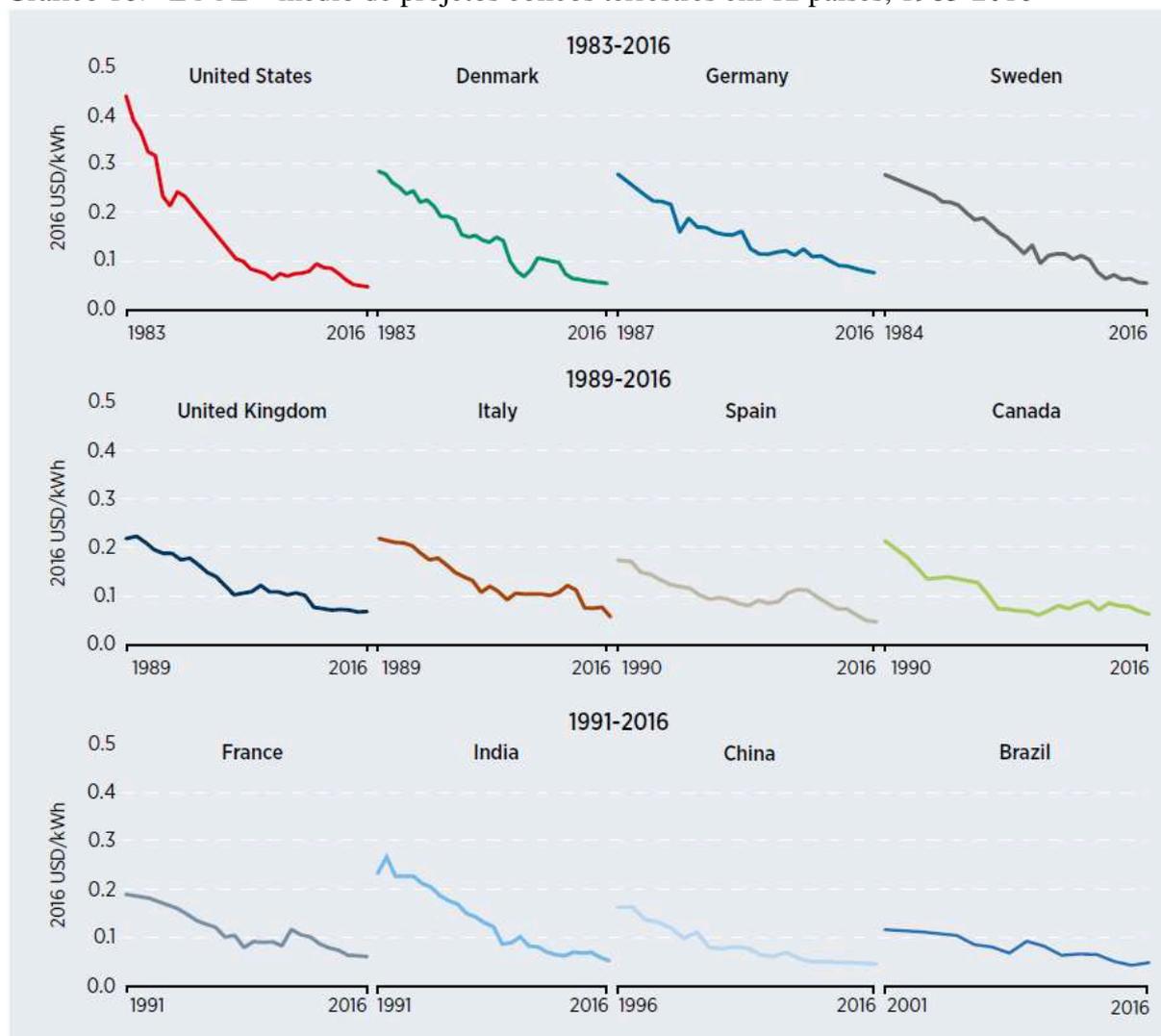
A produção de eletricidade através de usinas eólicas registrou um aumento de 15% de 2014 para 2015, como vimos acima; e esta não é uma particularidade deste ano, como podemos observar no *Gráfico 15*.

Gráfico 15: “Produção de eletricidade eólica por região, 2005-2015 (TWh)”.



Fonte: (IEA, 2017a, p. 22).

O aumento de 805% na produção de eletricidade por usinas eólicas (de 104 TWh em 2005 para 838 TWh em 2015) demonstra que a exploração do vento, enquanto recurso energético, tem sido paulatinamente desenvolvida, permitindo que este contribua com 14,9% do total mundial de eletricidade renovável produzida em 2015 (IRENA, 2018c). O resultado deste aperfeiçoamento segue o padrão de barateamento do processo de instalação observado na energia solar, conforme exposto no *Gráfico 16*.

Gráfico 16: “LCOE²⁸ médio de projetos eólicos terrestres em 12 países, 1983-2016”

Fonte: (IRENA, 2018b, p. 111).

Para as usinas eólicas, o LCOE é calculado levando em consideração os custos totais de instalação, a produtividade do vento na região, as características técnicas das turbinas eólicas utilizadas, custos de operação e manutenção, custo do capital (referente aos investimentos e créditos necessários) e vida econômica útil do projeto (IRENA, 2018b). Os custos de instalação de usinas eólicas em diferentes países, embora amplamente diversos em décadas passadas, atualmente aparentam atingir níveis muito semelhantes, revelando que a energia eólica, assim como a solar, segue uma curva de aprendizado e desenvolvimento com tendências à maior acessibilidade e competitividade da exploração deste recurso renovável.

²⁸ Do inglês “*Levelised Cost of Electricity*”, LCOE significa “Custo Nivelado de Eletricidade”. É medido em dólares por *Watts*-hora e calculado somando todos os custos esperados de uma usina (incluindo a construção e a manutenção), corrigidos pela inflação e divididos pela produção total de eletricidade esperada durante sua vida útil. O resultado serve para estimar a factibilidade de diferentes usinas elétricas no competitivo cenário de produção de energia elétrica (EIA, 2018b).

3.2.3 Energia Hidrelétrica e Marítima

O aproveitamento da energia cinética contida no fluxo de água em diferentes localizações geográficas é, como no caso da energia eólica, atividade humana histórica – registros de moinhos, canais, bombas, serras e aparatos hidráulicos similares datam de um passado longínquo, alcançando os séculos XII e XIII²⁹, e possivelmente além. Usinas hidrelétricas são capazes de converter esta energia cinética em eletricidade, que é transportada para o consumo final.

A exploração se dá através de diferentes técnicas, sendo as principais empregadas nas usinas hidrelétricas com água represada (chamadas de convencionais), usinas reversíveis e usinas ao longo de rios, bem como nas usinas marítimas (que exploram energia maremotriz e ondomotriz). Embora difiram em relação às técnicas de produção, todas buscam converter a energia cinética contida na água em movimento em energia elétrica através do uso de geradores elétricos. As usinas convencionais o fazem através do represamento de grandes volumes de água, situados o mais alto possível em relação a turbinas aquáticas para maximizar a energia potencial gravitacional que se transforma em energia cinética a ser captada. As usinas reversíveis atuam de modo similar, embora não como geradoras de eletricidade, mais assemelhando-se a “baterias” – seus reservatórios de água são utilizados mediante alta demanda de eletricidade e posteriormente reabastecidos artificialmente através de bombas, utilizando a eletricidade excedente em períodos de demanda reduzida. Usinas ao longo de rios direcionam o fluxo natural das águas para suas turbinas. Usinas de marés aproveitam o movimento das águas decorrente das marés e usinas de ondas contam com flutuadores, que se movimentam verticalmente de acordo com a ação das ondas e que são acoplados a geradores (WEC, 2016a, p. 12-13).

Embora usinas hidrelétricas e marítimas contribuam para a produção mundial de eletricidade renovável, são as usinas hidrelétricas (e, dentre essas, as convencionais) que possuem o maior potencial produtor e mais comumente são empregadas. Uma tecnologia “madura e confiável”, a hidroeletricidade é uma tecnologia renovável “extremamente atraente” pelo custo reduzido da eletricidade que produz, além de sua produção elétrica consistente³⁰, em

²⁹ Cf. (SHAKIR, 1979), “*The Book of Ingenious Devices*”.

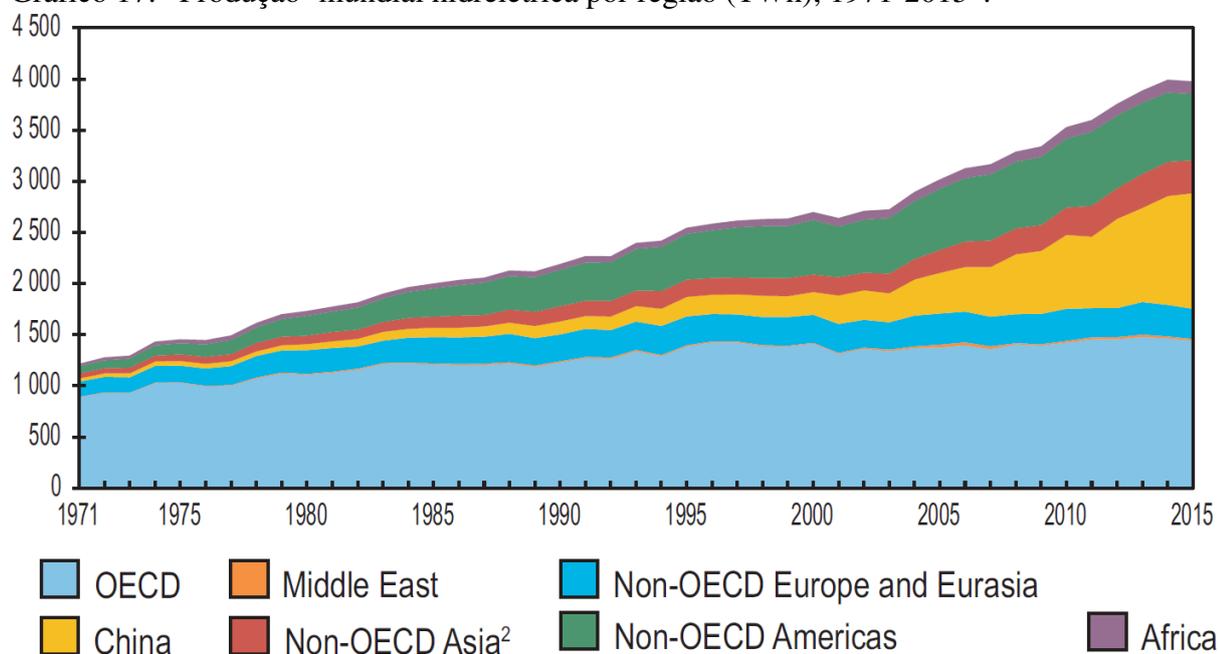
³⁰ Usinas hidrelétricas convencionais permitem controlar a produção elétrica com o gerenciamento do fluxo da água represada. Usinas ao longo de rios possuem capacidade de armazenamento de água quase nula, sendo o variável fluxo de água presente o maior determinante da quantidade de eletricidade produzida (IRENA, 2018b).

contraposição à Energia Renovável Variável (VRE)³¹ de outras fontes renováveis. Some-se a isso, ainda, a capacidade de atender a flutuações da demanda elétrica minuto a minuto, inclusive operando eficientemente com cargas reduzidas (a 1% ou 2% de sua capacidade total) se necessário, feito que muitas usinas térmicas a carvão e antigas usinas térmicas a gás natural não conseguem equiparar (IRENA, 2018b, p. 115).

De fato, como vimos no *Gráfico 12*, hidroeletricidade é a maior fonte de eletricidade renovável existente – do total mundial produzido em 2015, esmagadores 70,4% (3 899 341 GWh) foram oriundos de usinas hidrelétricas, comparados com 963 GWh produzidos por usinas marítimas, o que equivale a menos de 0,0% deste mesmo total (IRENA, 2018c). Assim como as fontes renováveis supracitadas, os números da produção hidrelétrica não são resultados de apenas um ano em particular, mas de um crescimento consistente observável se analisadas as produções anuais nas últimas décadas. O

Gráfico 17 demonstra este crescimento e, além disso, revela que embora a produção hidrelétrica agregada em países da OCDE tenha sido visivelmente superior entre a década de 70 e a segunda metade da década de 90, são as regiões e países externos à organização os maiores responsáveis pelo aumento da produção mundial a partir de meados do ano 2000.

Gráfico 17: “Produção¹ mundial hidrelétrica por região (TWh), 1971-2015”.



³¹ Do inglês “Variable Renewable Energy” (VRE), “Energia Renovável Variável” se refere a fontes energéticas renováveis (como solar e eólica) cujas produções elétricas sofrem flutuações devido às suas próprias naturezas e às suas respectivas tecnologias de exploração. Este fator, somado às defasadas malhas elétricas atuais, obstaculiza o suprimento adequado da também flutuante demanda elétrica. Contudo, a implementação em larga escala de fontes VRE (IRENA, 2018d) e desenvolvimento de malhas elétricas flexíveis (IEA, 2018c) são tidas como medidas que estão progressivamente viabilizando a utilização destas fontes energéticas para atender adequadamente às demandas elétricas mundiais.

Fonte: (IEA, 2017a, p. 20).

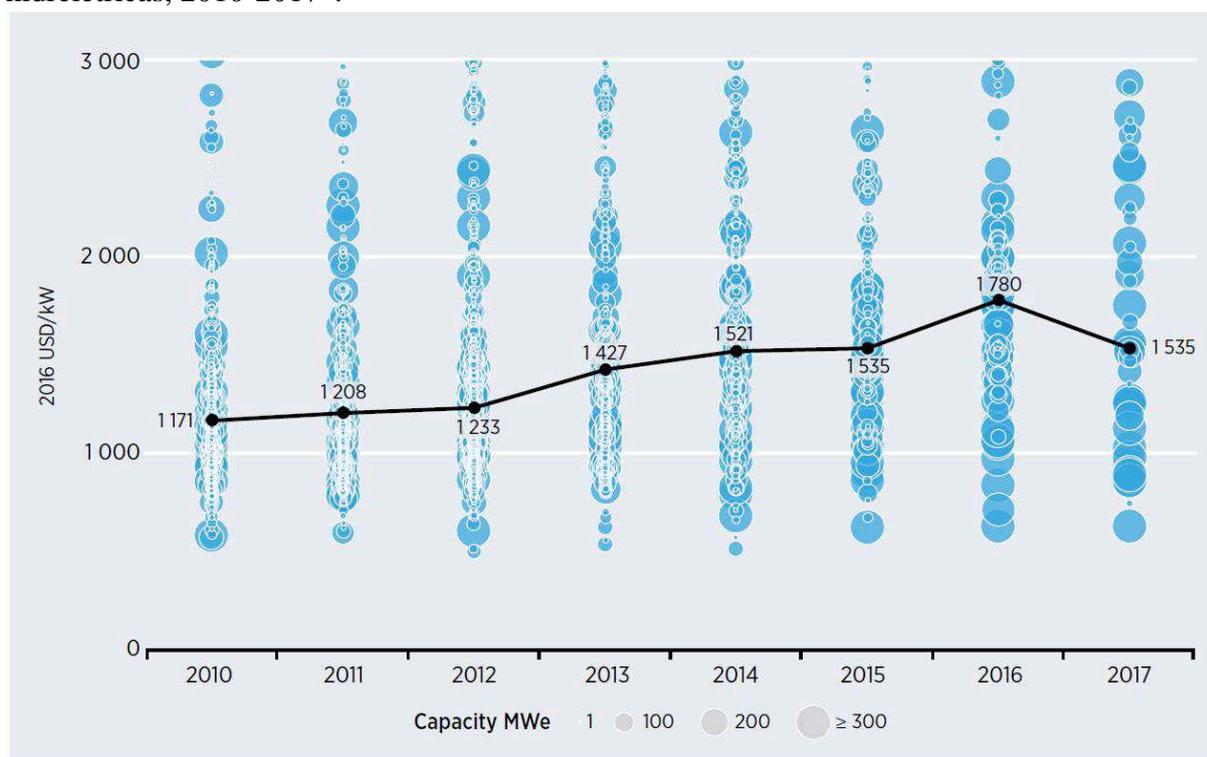
1: Inclui eletricidade produzida por usinas reversíveis.

2: “Non-OECD Asia” exclui a China.

Em 1973, a produção mundial hidrelétrica foi de 1296 TWh, dos quais 71,8% (930 TWh) se deveu a países membros da OCDE. No entanto, o ano de 2016, com produção mundial de 3978 TWh (um salto de quase 307%), observa apenas 36,3% (1444 TWh) de contribuição destes países, que neste intervalo aumentaram suas produções conjuntas em 272%. Em comparação, apenas a China registrou aumento superior a 30 vezes sua produção hidrelétrica neste mesmo período, enquanto países americanos não-membros, destacados pela cor verde, aumentaram suas produções em 735%. Comparada às fontes solar e eólica, a produção hidroelétrica de países membros da OCDE registrou um crescimento bastante moderado nos últimos anos – o aumento na produção hidrelétrica mundial ficou preponderantemente a cargo dos países emergentes, não-membros, que multiplicaram diversas vezes suas produções. Para entender este cenário precisamos, como esperado, analisar os custos de instalação de usinas para esta fonte energética.

Conforme relatório oficial publicado pela agência IRENA (2018b), a hidroeletricidade é uma tecnologia intensiva em capital, com dois componentes de custo principais: trabalhos civis de construção – seja das usinas em si ou da infraestrutura prévia necessária – e custos relacionados aos equipamentos eletromecânicos. Usinas com capacidade de produção superior a 10 Megawatts elétricos (MWe) são mais intensivas no primeiro componente de custo; as demais, no segundo. Além disso, projetos hidrelétricos são altamente específicos quanto aos territórios onde são executados, com estudos e planejamentos distintos para cada usina – realizados adequadamente, os estudos podem evitar erros dispendiosos em etapas seguintes. Os custos totais de instalação, sugere o relatório, tipicamente oscilam entre uma base de 500 USD/KW e um pico de 4500 USD/KW. No *Gráfico 18*, vemos a evolução anual dos custos totais de instalação de usinas hidrelétricas, em USD de 2016 por kW. Neste gráfico, cada círculo azul representa um projeto hidrelétrico, com seu tamanho a depender da capacidade de produção, medida em MWe. A série representada pela linha horizontal preta é a média ponderada global do custo de instalação de usinas hidrelétricas. Esta média considera a capacidade de produção de cada projeto, diferindo de uma média aritmética simples onde apenas a quantidade de projetos seria considerada.

Gráfico 18: “Custos totais de instalação e médias ponderadas globais por projeto de usinas hidrelétricas, 2010-2017”.



Fonte: (IRENA, 2018b, p. 117).

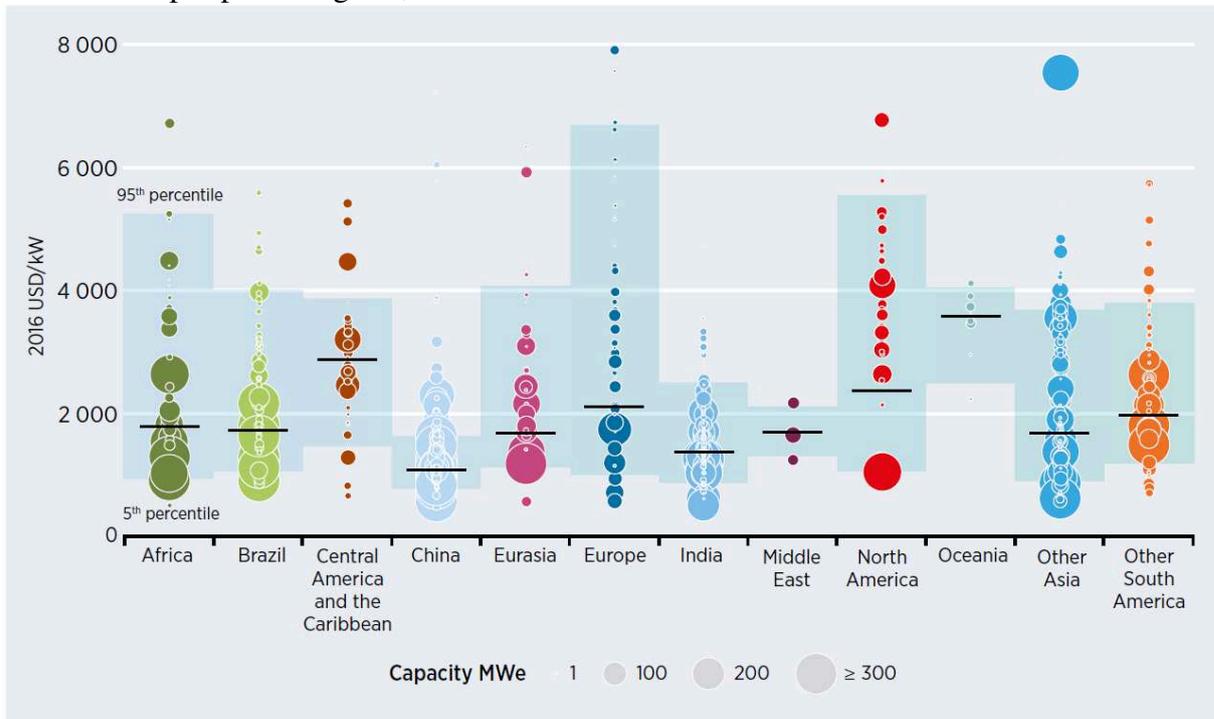
Percebe-se que a média ponderada mundial dos custos cresce ao longo dos anos, diferentemente do observado nas fontes solar e eólica, cujos custos de instalação têm decrescido substancialmente (*Gráfico 14* e *Gráfico 16*). O ano de 2016 registrou os maiores valores no intervalo analisado, atingindo a média ponderada global de 1780 2016 USD/kW em decorrência de aumentos nos custos médios totais na Ásia, Eurásia e América do Norte, enquanto as demais regiões demonstraram custos médios voláteis. O cruzamento de dados oriundos do *Gráfico 17* e do *Gráfico 18* parece revelar uma relação causal entre a média global dos custos e a produção hidrelétrica mundial na medida em que países-membros da OCDE, cujo aumento da produção hidrelétrica no período analisado foi relativamente reduzido, estão concentrados na Europa e América do Norte, regiões que observaram o aumento dos custos totais médios de instalação de usinas (*Ibid.*, p. 118).

Esta possível relação causal entre custos e produção parece se confirmar no

Gráfico 19, que ilustra as variações dos custos totais de instalação e as médias ponderadas por países e regiões. Neste gráfico, a série apresentada pelos traços horizontais pretos são, novamente, as médias ponderadas dos custos totais, embora desta vez medidas por país ou região. Estas médias consideram o diâmetro dos círculos, estes representando as capacidades de produção de diferentes usinas instaladas ao longo do período analisado. As

colunas em azul-claro são a variação de 5% a 95% dos custos totais de instalação para cada seção vertical.

Gráfico 19: “Variações e médias ponderadas dos custos totais de instalação de usinas hidrelétricas por países/regiões, 2010-2016”.



Fonte: (IRENA, 2018b, p. 118).

A variação do custo de instalação, representada pelas colunas em azul-claro, alcança extremos opostos na Europa e na China. A América do Norte também apresenta uma variação elevada, demonstrando que a instalação de novas usinas nesta região e período teria custos nitidamente mais elevados do que no Brasil no mesmo período, por exemplo. Embora parte destes projetos (círculos) estejam fora destas colunas (usinas cujos custos totais estão abaixo dos 5% ou acima dos 95% esperados), a maioria segue a variação prevista.

Possíveis explicações para estes diferentes custos entre as regiões analisadas incluem a instalação de usinas em locais menos apropriados, como regiões longínquas e distantes de malhas de distribuição elétrica, ou regiões com menor potencial hidrelétrico, resultando em maiores custos de desenvolvimento e de produção elétrica. Inversamente, regiões onde ainda resta elevado potencial hidrelétrico a ser explorado, como na China e Brasil, tipicamente apresentam os menores custos de instalação. As claras diferenças entre as médias ponderadas de custo em países/regiões como a China (aproximadamente 1500 USD/kW) e a Oceania (cerca de 3700 USD/kW) refletem a já discutida alta especificidade dos projetos hidrelétricos, principalmente quanto aos locais de instalação (Ibid., p. 118-119).

Assim, a análise dos dados parece indicar que estas substanciais diferenças de custos totais de instalação entre regiões causam as também diferentes produções anuais, como visto no *Gráfico 17: “Produção¹ mundial hidrelétrica por região (TWh), 1971-2015”* *Gráfico 17*. Mais do que isso, o esgotamento de regiões com elevado potencial hidrelétrico contribui para o aumento do custo médio ponderado mundial de instalação de usinas, observado no *Gráfico 18*. Por estes motivos, acredita-se que o potencial hidrelétrico na maior parte dos países membros da OCDE foi esgotado. Não obstante, de 2010 a 2016 os 3624 projetos hidrelétricos espalhados pelo mundo que são acompanhados por esta agência apresentaram médias ponderadas de seus LCOEs³² abaixo de 0,10 USD/kWh em quase todas as regiões do globo, vários destes atingindo o vale de 0.02 USD/kWh, demonstrando suas ainda notáveis competitividades e reiterando a posição desta fonte energética no *mix* energético mundial (Ibid., p. 122).

3.2.4 Bioenergia

Bioenergia é uma fonte energética; sua energia provém da energia potencial química contida na biomassa. Esta, por sua vez, é definida como matéria orgânica recente (em contraposição aos combustíveis fósseis) derivada de plantas ou animais, bem como rejeitos e resíduos orgânicos, disponíveis em frequência suficiente para serem considerados recursos renováveis. Biomassa pode ser utilizada para diferentes fins, como na forma de combustível para cozimento de alimentos e aquecimento de ambientes ou para a geração de calor e eletricidade em usinas modernas. A combustão da biomassa, contudo, não é a única forma de obter energia desta fonte renovável – procedimentos químicos (com emprego de substâncias químicas) ou bioquímicos (utilizando bactérias e outros microrganismos para fermentação ou compostagem) são capazes de transformar biomassa em biogases ou líquidos altamente convenientes e produtivos (IRENA, 2015a).

As tecnologias de exploração bioenergética mais amadurecidas e comercialmente disponíveis são a combustão direta, a co-combustão, a digestão anaeróbia, a incineração de resíduos sólidos e a cogeração (ou CHP³³) (IRENA, 2018b). A combustão direta se refere à

³² Cabe ressaltar, contudo, que o cálculo do LCOE para a hidroeletricidade (assim como para a bioenergia) é menos relevante do que para outras fontes renováveis, pois considera apenas o custo nivelado da eletricidade e desconsidera outras finalidades que as usinas podem ter, como a supracitada capacidade de atender flutuações da demanda minuto a minuto. Produzir eletricidade pode não ser o único objetivo da construção de uma usina hidrelétrica, fator que duplamente justifica a instalação de usinas em locais infra ideais (com elevado LCOE) e contribui para o aumento das médias ponderadas de LCOEs desta tecnologia (IRENA, 2018b).

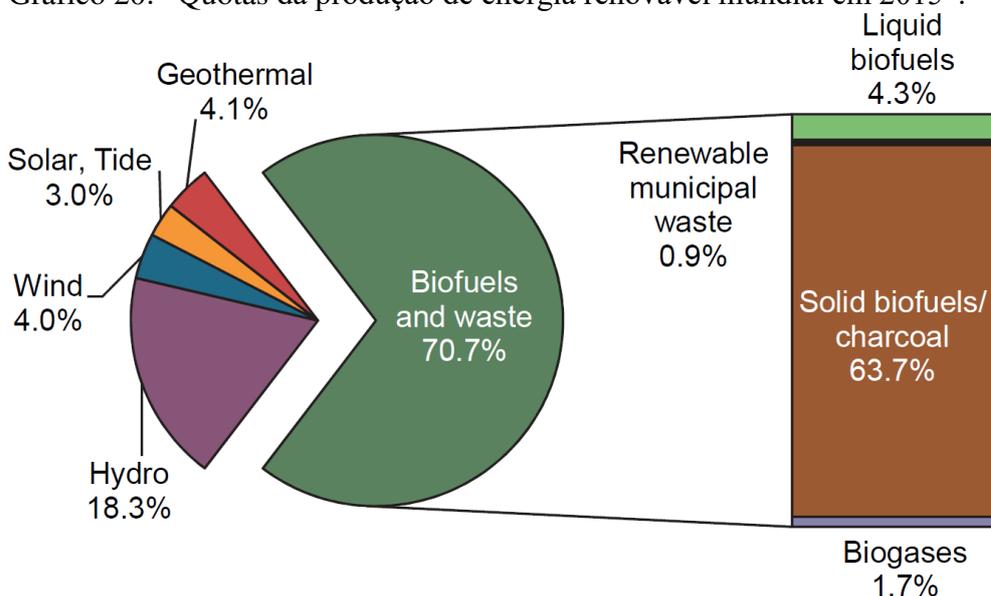
³³ Do inglês “*Combined Heat and Power*”, “Eletricidade e calor combinados”.

queima direta de matéria-prima, ao passo que a co-combustão realiza a queima de biomassa em caldeiras originalmente desenhadas para a combustão de carvão mineral, em conjunto com esta fonte energética fóssil. A digestão anaeróbia por microorganismos resulta na produção de biogás ou biocombustíveis líquidos, com eficiência a depender do grau de putrescibilidade do tipo de biomassa utilizada. A incineração de resíduos sólidos, comumente obtidos regionalmente, é a combustão de matéria orgânica encontrada em lixos e rejeitos. A cogeração/CHP, por fim, é a combustão de biomassa em geradores elétricos que produzem simultaneamente eletricidade e calor utilizável, fator que permite alcançar níveis mais elevados de eficiência. Assim como já discutido em outras fontes energéticas, todas estas tecnologias objetivam a conversão da energia (neste caso, potencial química) contida na biomassa em calor e/ou eletricidade (IRENA, 2015a).

Devido ao seu uso não-comercial generalizado em países em desenvolvimento, a biomassa figura como fonte renovável de energia com maior produção mundial. Isto é, embora tenhamos visto no *Gráfico 11* que bioenergia tenha correspondido a apenas 8% da produção elétrica oriunda de fontes renováveis em 2015, quando analisada a produção de *energia renovável* a contribuição desta fonte energética é muito mais representativa, alcançando notáveis 70,7% da produção mundial neste mesmo ano. Logo, apenas uma pequena quantia deste recurso é destinada à produção elétrica atualmente – a maior parte é empregada na geração de calor, como veremos a seguir. O

Gráfico 20 ilustra as contribuições das diferentes fontes renováveis na produção energética em 2015.

Gráfico 20: “Quotas da produção de energia renovável mundial em 2015”.



Fonte: (IEA, 2017b, p. 3).

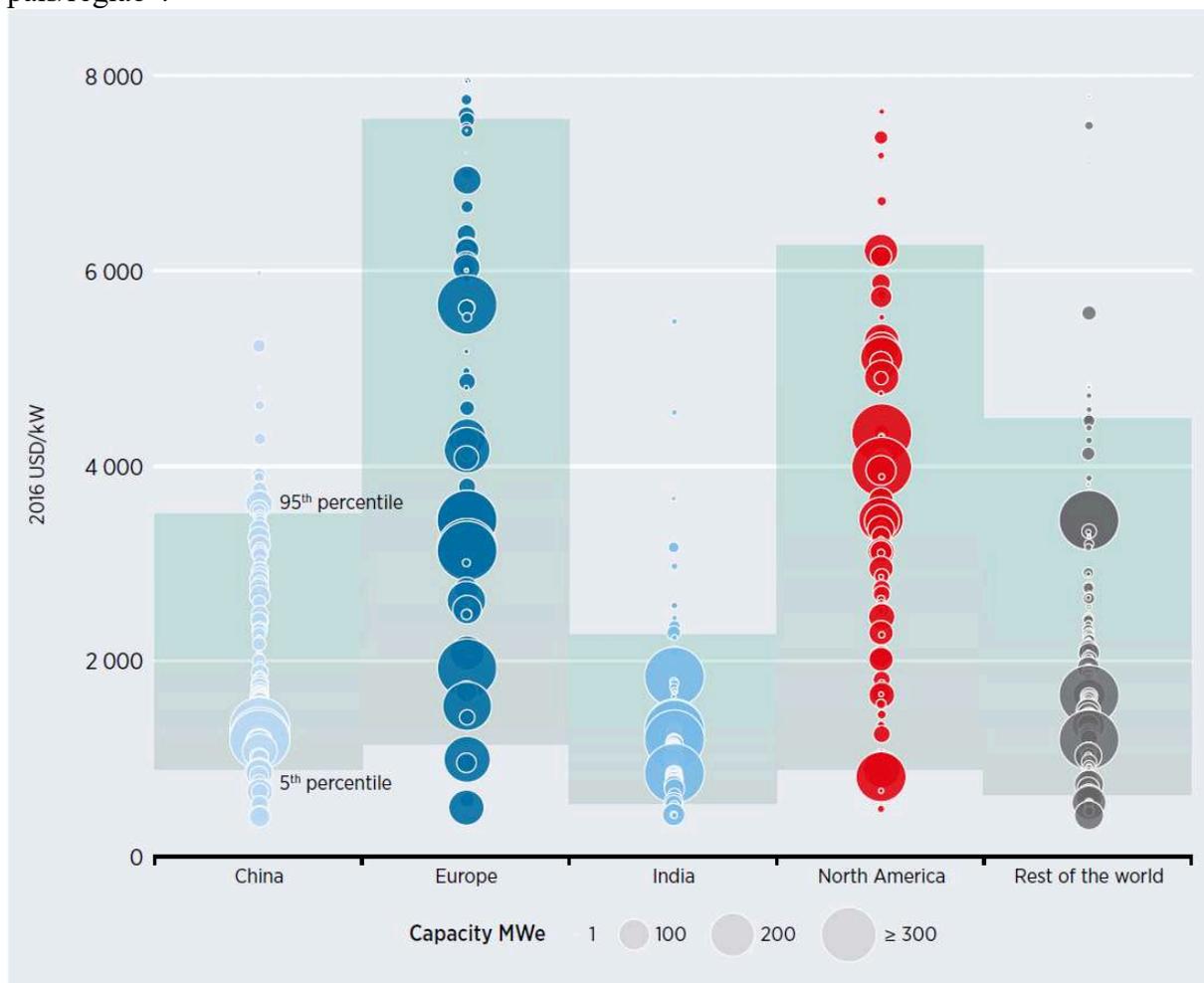
Nota-se que dos 70,7% totais referentes à produção mundial de bioenergia em 2015, 63,7% são derivados de biocombustíveis sólidos e carvão vegetal – isso equivale a mais de 90% da produção oriunda desta fonte energética. Destes, estima-se que aproximadamente 70% são utilizados com eficiência energética muito baixa, primariamente para fins domésticos e não-comerciais (como culinária e aquecimento residencial), em países em desenvolvimento³⁴. O restante é utilizado em usinas modernas na produção de calor ou eletricidade, com eficiência média bastante elevada (IRENA, 2015a). Os biocombustíveis líquidos, biogases e rejeitos orgânicos municipais possuem, cada um, participações muito menores neste total.

Esses números demonstram que esta fonte energética é explorada quase que inteiramente em sua forma primária, sem transformações decorrentes da ação humana. Ainda assim, estima-se que o emprego destas tecnologias supracitadas está se intensificando rapidamente no mundo (Ibid., p. 5), com grande potencial de redução de custos a longo prazo mediante desenvolvimento dessas tecnologias ainda pouco difundidas (IRENA, 2018b).

Os fatores que mais influenciam nos custos de produção de usinas bioenergéticas são a região, o tipo e a disponibilidade de biomassa utilizada e o grau de preparação ou conversão de matéria-prima necessário; os maiores custos de instalação são os custos planejamento, engenharia e construção, manuseio de combustível e maquinário de preparação e demais equipamentos. Além disso, ressalta-se que os custos em países em desenvolvimento são notoriamente mais reduzidos, fator atribuído à quantidade disponível de biomassa que ocorre naturalmente *in loco* (dispensando em grande medida o comércio de matérias-primas, sujeito a flutuações de preços de mercado), bem como aos maquinários mais baratos, em alguns casos permitidos por legislações ambientais menos exigentes. O *Gráfico 21* demonstra os custos totais de produção de bioenergia por país e região dos projetos bioenergéticos registrados pela IRENA até 2016. As colunas em azul-claro representam as variações de custo de instalação e os diâmetros dos círculos são as capacidades de produção das usinas.

³⁴ “Principalmente pelo uso não-comercial de biocombustíveis sólidos, países fora da OCDE são os principais usuários de energia renovável, representando 72,3% do total mundial de produção de recursos renováveis” (IEA, 2017b, p. 4, tradução nossa).

Gráfico 21: “Custos totais de instalação de tecnologias alimentadas por biomassa por país/região”.



Fonte: (IRENA, 2018b, p. 130).

Os dados apresentados neste gráfico parecem reforçar a premissa de que o custo é relativamente menor em regiões e países menos desenvolvidos economicamente. De todos os países registrados, a Índia apresenta os menores custos de instalação, variando de USD 450/kW a USD 2600/kW, seguida pela China, com custos entre USD 450/kW e USD 3600/kW; ambos os países consideravelmente abaixo da média mundial (em cinza) e substancialmente abaixo de regiões como Europa e América do Norte, onde opções tecnológicas demandam projetos mais heterogêneos e mais caros.

O cálculo do LCOE para bioenergia é, como no caso da hidroeletricidade, altamente variável, dada a sua também ampla gama de matérias-primas e tecnologias de exploração energética – mais de 17 tipos principais de biomassa são utilizados atualmente através das cinco tecnologias supracitadas, já amadurecidas, sem considerar novas tecnologias, em estágio embrionário, que estão sendo testadas. Ademais, como vimos, regiões com maior ou menor oferta de biomassa, bem como legislações ambientais mais ou menos rígidas, afetam largamente

os custos de produção. O *Gráfico 22* demonstra as variações de custos e médias ponderadas de LCOEs para projetos bioenergéticos em diferentes regiões e países.

Gráfico 22: “LCOE e médias ponderadas por projeto de geração de eletricidade via bioenergia por matéria-prima e país/região, 2000-2016”.



Fonte: (IRENA, 2018b, p. 134).

Com variados projetos alimentados por um grande leque de matérias-primas e situados majoritariamente dentro das variações de custos para cada país ou região, o gráfico reafirma as diferentes tendências de custos e médias ponderadas de LCOEs também para a produção elétrica em usinas de biomassa. Estima-se que na Índia e na China os LCOEs médios sejam, respectivamente, próximos de USD 0,05/kWh e USD 0,06/kWh, ao passo que na Europa e América do Norte oscilem entre USD 0,08/kWh e USD 0,09/kWh – uma desvantagem competitiva considerável.

Não obstante, a produção de energia em usinas de biomassa, assim como nas usinas hidrelétricas (vide nota de rodapé 32), pode não ser o único objetivo dos projetos bioenergéticos

– usinas de incineração de rejeitos, por exemplo, comumente são instaladas com vistas a atenuar questões sanitárias em centros urbanos através da destinação adequada dada ao lixo produzido, muito embora o LCOE destas usinas seja pouco competitivo em relação a outros tipos de biomassa. Some-se a isso o supracitado horizonte otimista de desenvolvimento de novas tecnologias e o baixo custo de manutenção das usinas (Ibid., p. 130-133), fatores que, analisados em conjunto, levam especialistas a prever um aumento na produção bioenergética mundial de 424 TWh em 2011 para 1204 TWh em 2030 (IRENA, 2015a, p. 19), sinalizando a gradativa consolidação desta fonte energética renovável.

3.2.5 Energia Geotérmica

A energia geotérmica é um recurso energético renovável derivado do calor advindo do núcleo do planeta, que cruza o manto terrestre e desponta na crosta terrestre, para então ser transportado para a superfície através de fluidos. As fontes são regiões da superfície terrestre com fluxos anômalos e contínuos de elevado calor, em profundidades rasas o suficiente para permitir exploração econômica. Em alguns casos, águas subterrâneas naturais carregam naturalmente este calor para a superfície; em outros, água precisa ser artificialmente injetada no subsolo para aproveitar o calor existente em camadas secas. Uma fonte energética testada e amadurecida, o calor proveniente da energia geotérmica é utilizado desde tempos pré-históricos, através de fontes termais. Dependendo das características das fontes, a energia extraída pode ser utilizada diretamente na forma de calor ou para a produção elétrica, sendo que esta última foi gradualmente introduzida no início do século XX (IRENA, 2018e), (WEC, 2016b).

As fontes geotérmicas são divididas em três classificações principais, a depender da temperatura de suas energias geotermiais exploráveis: “alta temperatura” (acima de 180°C), “temperatura intermediária” (101°C-180°C) e “baixa temperatura” (30°C-100°C). Outras subclassificações levam em consideração os mecanismos que controlam o movimento e concentração de calor, bem como suas configurações geológicas particulares (WEC, 2016b). Estas características são determinantes na escolha dos tipos adequados de usinas geotérmicas a serem instaladas, que atualmente variam entre usinas de vapor direto, usinas geotérmicas aprimoradas³⁵, usinas de ciclo binário e usinas de *flash* de vapor (ou “usinas de *flash*”); estas duas últimas são as mais comumente utilizadas em nível mundial (IRENA, 2018b).

³⁵ Do inglês “*Enhanced Geothermal Systems*” (EGS).

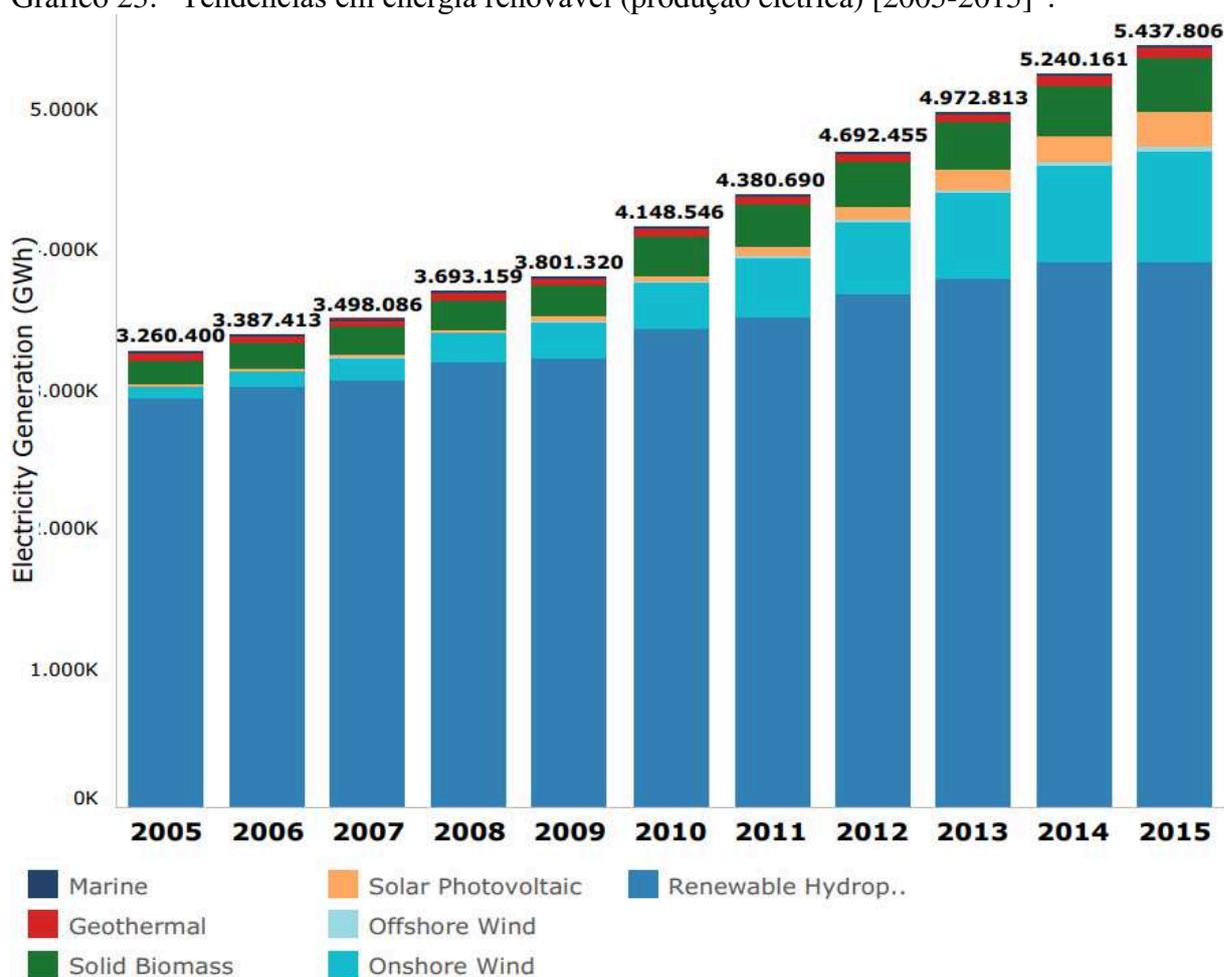
Usinas de vapor direto exploram o calor oriundo das fontes através do redirecionamento dos vapores para utilização em aquecimento de ambientes, de estufas e para fins industriais³⁶. Usinas geotérmicas aprimoradas são ainda protótipos a utilizar tecnologias em estágios iniciais de desenvolvimento, baseadas na injeção de água no subsolo para viabilizar a extração de calor em áreas onde há potencial geotérmico, mas que são secas. Usinas de ciclo binário permitem a produção de eletricidade mesmo a partir de fontes de baixa temperatura – a mistura de água e vapor extraída das fontes é direcionada para um sistema fechado de troca de calor, onde um fluido secundário com ponto de ebulição muito inferior ao da água é aquecido até sua vaporização, para então ser direcionado às turbinas dos geradores elétricos³⁷. Por fim, usinas de *flash* de vapor produzem eletricidade em fontes de alta temperatura (acima de 180°C), extraindo a mistura bifásica de água e vapor, separando-os e utilizando o vapor para girar as turbinas. Em algumas usinas de *flash* a água resultante é utilizada múltiplas vezes antes de retornar ao subsolo para reaquecimento, elevando a eficiência do processo (WEC, 2016b).

Como vimos no *Gráfico 11*, a contribuição das fontes geotérmicas na produção mundial de eletricidade em 2015 foi de apenas 1%, valor que sobe para 4,1% neste mesmo ano se considerada a produção energética mundial, conforme disposto no *Gráfico 20*. Estes dados demonstram a diminuta participação desta fonte energética no *mix* energético mundial. Mais do que isso, o *Gráfico 23* ilustra que a evolução da produção geotérmica de eletricidade tem sido apenas modesta, senão virtualmente nula, entre 2005 e 2015.

³⁶ A título de curiosidade: mais de 90% da demanda de aquecimento da Islândia é suprida por usinas de vapor direto, que direcionam o calor extraído para radiadores e outros dispositivos de troca de calor espalhados pelas cidades. Sua capital, Reykjavík, possui o maior sistema de aquecimento distrital do mundo, sendo este, também, alimentado por calor geotérmico (WWF, 2012).

³⁷ Inaugurada em 2006, a usina de ciclo binário localizada na fonte geotérmica de “*Chena Hot Springs*”, na cidade de Fairbanks, Alasca, é capaz de produzir eletricidade a partir de fluidos com temperatura de apenas 57°C, aproximadamente (ERKAN, HOLDMANN, *et al.*, 2008).

Gráfico 23: “Tendências em energia renovável (produção elétrica) [2005-2015]”.



Fonte: (IRENA, 2018e).

Partindo do total de 62 664 GWh em 2005 para 80 906 GWh em 2015, a energia geotérmica registrou um crescimento de apenas 22,5% (média de 2,25% ao ano) na sua produção elétrica total, valor notavelmente inferior às demais fontes renováveis, aqui discutidas.

As causas deste crescimento limitado são variadas. Por um lado, a necessidade de utilização de água como forma de extração do calor frequentemente envolve projetos de usinas geotérmicas em disputas legais, principalmente contra legislações de conservação ambiental rígidas e incompatíveis com as atividades exploratórias. Isso vale também para a natureza das fontes geotérmicas, muitas vezes sob a forma de patrimônios naturais (como fontes termais, gêiseres e afins) ou que são frequentemente associadas a valores culturais, tendo sido protegidas por estritas legislações antes que as tecnologias disponíveis permitissem a exploração geotérmica (WEC, 2016b).

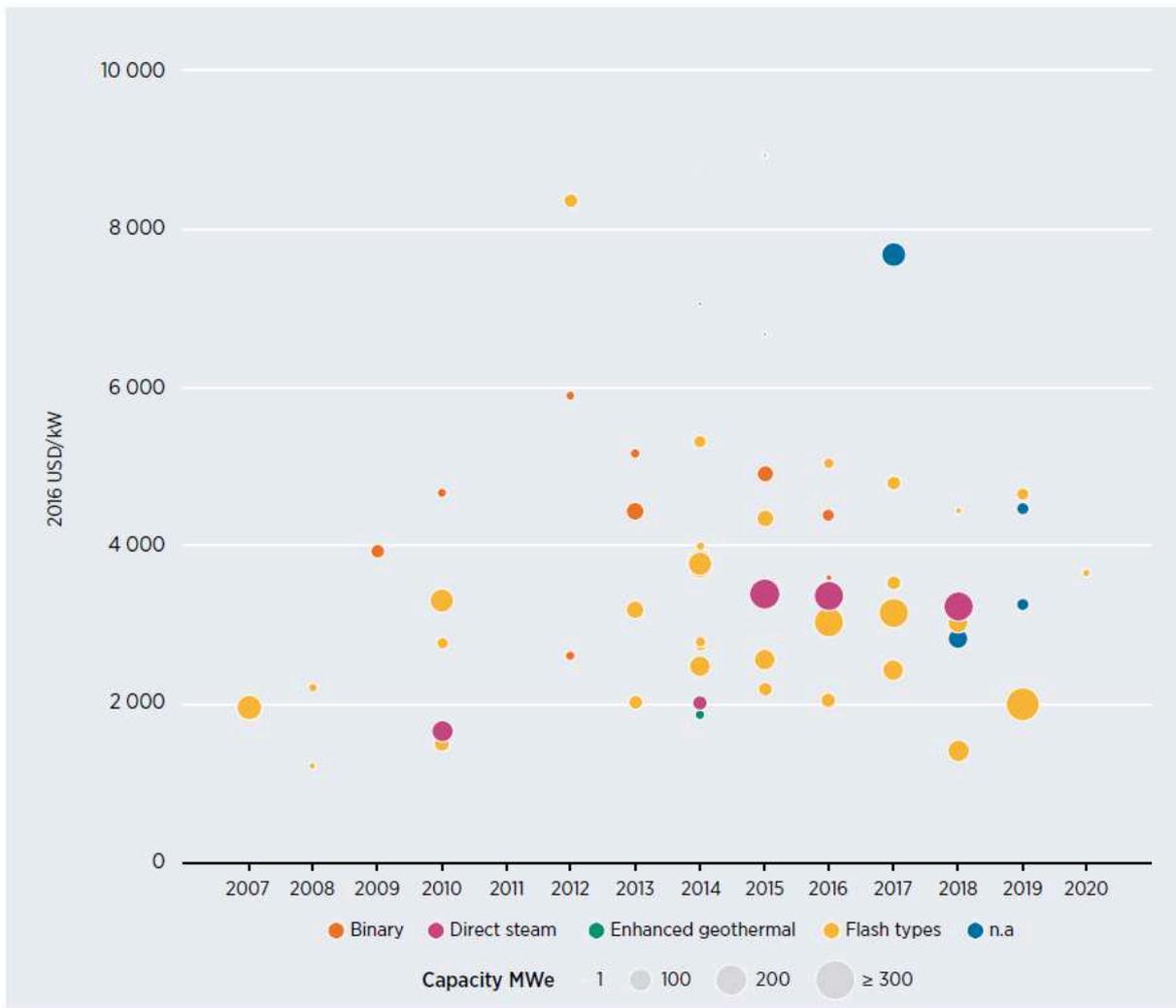
Com efeito, ao longo do século XIX nascentes geotérmicas foram paulatinamente colocadas sob a égide do Estado ou Coroa em países como Austrália, Nova Zelândia, Canadá e

EUA; muitas destas fontes permanecem inacessíveis à exploração, fator que ainda causa dificuldades para muitos países tentando instalar suas primeiras usinas. No Chile, por exemplo, a reforma de legislações que protegem o campo de gêiseres conhecido como “*El Tatio*” é obstaculizada pelo crescente reconhecimento de direitos aborígenes sobre suas águas e recursos geotérmicos. O acesso a esta e às demais fontes em situações similares comumente demandará extensivas negociações, reconhecimentos de direitos e culturas e compensações por possíveis impactos ao meio-ambiente e terras alienadas (Ibid., p.8).

Outra causa são os custos, que por vezes podem se configurar como proibitivos e de difícil transposição. Usinas geotérmicas são consideradas relativamente intensivas em capital, com cinco componentes principais do custo total: exploração de recursos e avaliação de custos, custos de perfuração (que podem ser repetidos, dada a chance média de 60-90% de sucesso³⁸), infraestrutura do campo, construção da usina e custos de desenvolvimento, manutenção e conexões da usina à malha elétrica. O mapeamento extensivo prévio dos recursos geotérmicos em dada localização, embora dispendioso e demorado, pode reduzir significativamente os custos de instalação, permitindo que estes atinjam notáveis valores reduzidos, na ordem de USD 560/kW, contanto que implementados em localizações com fontes geotérmicas já mapeadas e conhecidas, ou onde a infraestrutura existente possa ser aproveitada. Casos assim, contudo, são exceções – o custo médio de instalação de usinas atuais varia entre USD 2000 a 5000/kW, conforme ilustrado no *Gráfico 24*.

³⁸ (IRENA, 2018b, p. 138, *apud* Hance, 2005; GTP, 2008).

Gráfico 24: “Custos totais de instalação por projeto geotérmico, tecnologia e capacidade, 2007-2020¹”.



Fonte: (IRENA, 2018b, p. 139).

1: [Estimativa].

O LCOE da energia geotérmica é determinado pelos custos totais de instalação e de manutenção da usina, bem como a sua vida útil econômica e a média ponderada do custo de capital. Entre 2007 e 2014, os LCOEs da energia geotérmica variaram entre USD 0,04/kWh para projetos de aperfeiçoamento de campos já existentes e USD 0,14/kWh para novos projetos em localizações ainda intocadas. Entre 2014 e 2020, contudo, os LCOEs parecem seguir a tendência de redução de custos totais de instalação observados no *Gráfico 24*, embora esta tendência deva ser interpretada cuidadosamente, dada a quantidade ainda bastante reduzida de usinas geotérmicas existentes e a natureza altamente específica dos locais onde podem ser instaladas.

3.3 A Escassez de Recursos Energéticos

A investigação da dinâmica de produção energética mundial através das diversas fontes de recursos energéticos convencionais colocou em evidência não somente o tremendo aumento do consumo de recursos energéticos ao longo dos últimos séculos, mas principalmente a preocupante dependência em relação aos recursos não-renováveis. Ainda que fontes renováveis tenham sido gradualmente desenvolvidas, assumindo assim parcelas cada vez maiores desta produção energética mundial ao longo dos últimos anos, suas contribuições somadas ainda são muito pequenas. Observamos, também, que o *mix* energético no curto e médio prazo, ainda, deverá continuar sendo fortemente composto por estas fontes finitas de energia.

Este cenário de elevada dependência energética de um número limitado de recursos é visto com apreensivos olhares por pesquisadores e especialistas, muitos dos quais apontando sinais consistentes e generalizados de escassez despontando em várias fontes dos mais utilizados recursos energéticos. Um dos principais argumentos utilizados para demonstrar o esgotamento gradativo de recursos finitos é a chamada “Teoria do Pico”, que tenta prever o ponto de inflexão a partir do qual as fontes não-renováveis passarão a produzir quantidades menores de recursos, gradativa e irreversivelmente. Na próxima subseção investigaremos esta teoria e nas subseções 3.3.2 e 3.3.3 veremos, além de diferentes prognósticos acerca da depleção de recursos finitos, as considerações sobre a Teoria do Pico realizadas por dois pesquisadores especializados e influentes no ramo de produção energética.

3.3.1 A Teoria do Pico de Hubbert

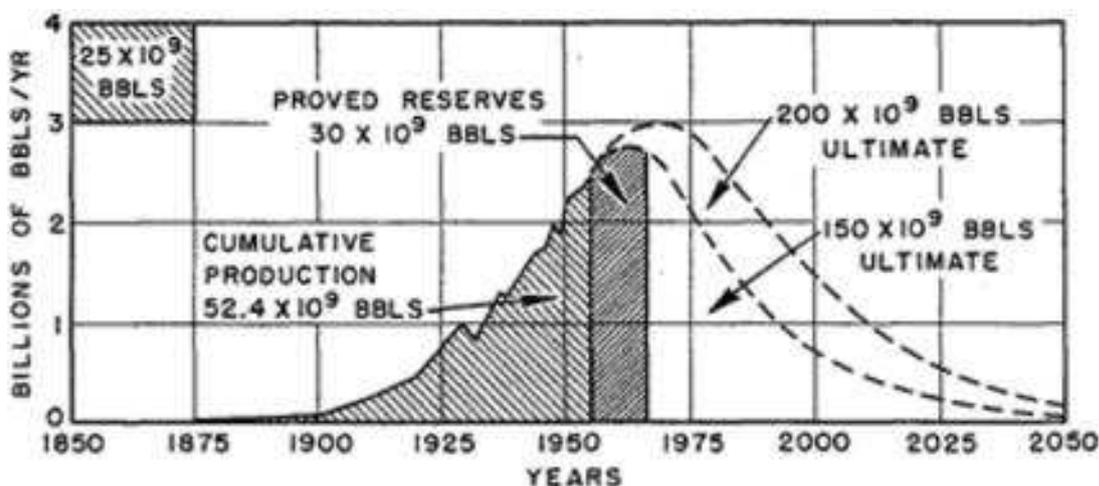
A “Teoria do Pico de Hubbert³⁹”, também conhecida como “Curva de Hubbert”, é possivelmente a teoria a mais famosa de uma série de previsões sobre o esgotamento de recursos finitos em virtude de uma exploração contínua e desenfreada. Publicada em 1956, esta teoria previa que a produção mundial de petróleo invariavelmente seguiria uma curva com concavidade voltada para baixo, descrevendo um crescimento, um ápice e uma queda (RITCHIE, 2017).

Apontado por Yergin como o cientista que inseriu a física e a matemática na geologia (YERGIN, 2014, p. 245), Hubbert se diferenciou de outros defensores da escassez de petróleo

³⁹ Marion King Hubbert (1903-1989), Ph.D. em Geologia e Física (1937), foi um cientista aclamado cujas pesquisas em geologia estrutural, mecânicas da deformação da terra e física do movimento subterrâneo levaram a vastas mudanças na forma como petróleo e gás natural são explorados (NARVAEZ, 1989).

por basear suas afirmações em uma série elaborada de cálculos. Suas análises estimaram a quantidade total de petróleo no território dos EUA entre 150 e 200 bilhões de barris, dos quais 52,4 bilhões já haviam sido extraídos e 6,6 milhões adicionais eram extraídos diariamente à época. Hubbert (1956, p. 24) descreveu que “a curva deverá culminar em meados de 1965 e então deverá declinar a uma taxa comparável à sua taxa anterior de crescimento”. A curva, propriamente dita, é ilustrada através de um dos gráficos publicados juntamente com sua tese, conforme *Gráfico 25*.

Gráfico 25: “Produção final de petróleo bruto nos EUA baseada em supostas reservas iniciais de 150 e 200 bilhões de barris”.



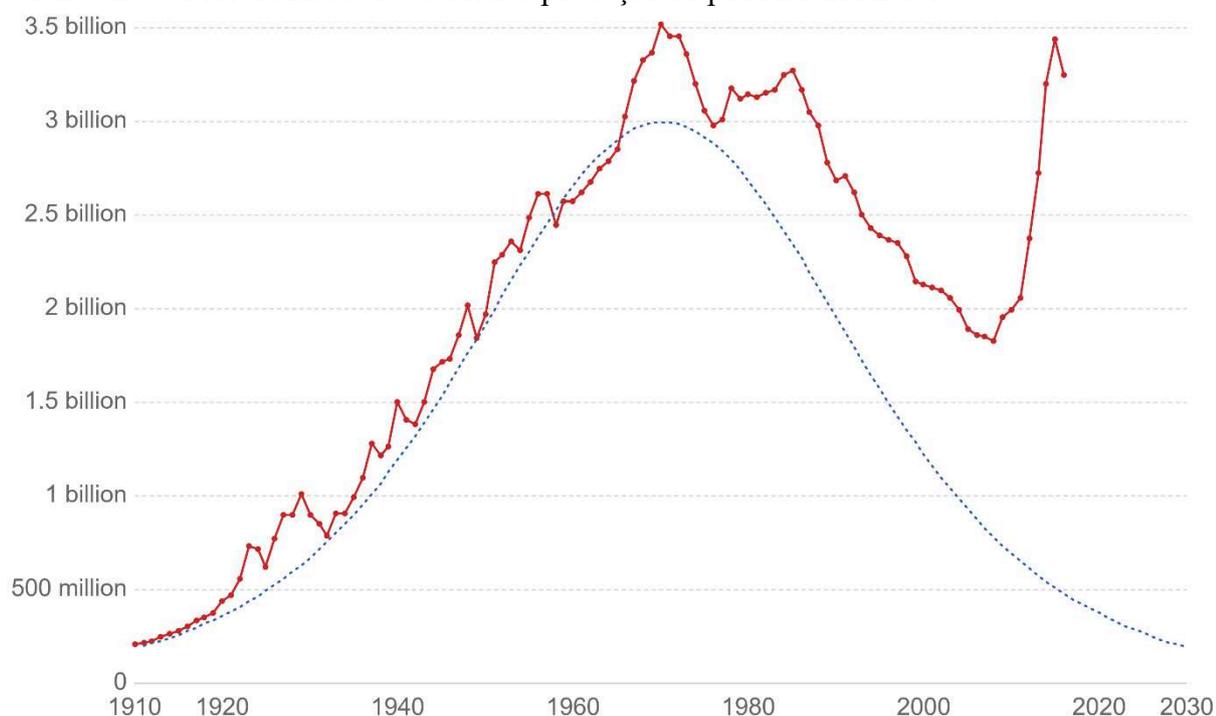
Fonte: (HUBBERT, 1956, p. 22).

Dois cenários são apresentados no gráfico: o primeiro calcula a taxa média de decréscimo na produção com base nas reservas prováveis de $150 \cdot 10^9$ barris de petróleo; o segundo considera um estoque otimista, com 50 bilhões de barris adicionais em reservas ainda inexploradas. Independentemente do cenário, seja a reserva total de petróleo nos EUA 150 ou 200 bilhões de barris, a curva demonstra que os dias de produção exponencial desta fonte fóssil estariam contados; este seria, conforme a teoria, o destino de todas as jazidas, exploradas ou ainda intocadas, deste recurso finito.

Suas análises, contudo, foram largamente ignoradas até 1970, quando suas previsões acerca do pico da produção de petróleo nos EUA pareceram ter finalmente se concretizado, ainda que com uma margem de 17% de erro. A produção havia atingido um pico e os anos posteriores registraram seu declínio generalizado. No entanto, o temido declínio da produção nos anos que se seguiram foi ocasionalmente interrompido em decorrência da descoberta de novos poços e novas tecnologias, conforme demonstrado no *Gráfico 26*, que sobrepõe a

produção efetiva de petróleo nos EUA (representada pela linha contínua em vermelho) à Curva de Hubbert (linha pontilhada em azul).

Gráfico 26 : “Pico de Hubbert e a efetiva produção de petróleo nos EUA”.



Fonte: (RITCHIE, 2017).

Se, em meados de 1970, o Pico de Hubbert finalmente ascendeu ao grau de reconhecimento que seus seguidores até hoje julgam merecido, sendo confirmada empiricamente pela análise da produção nas décadas subsequentes, em 2008 novas tecnologias de exploração e fontes de petróleo, principalmente fontes não convencionais⁴⁰ (como xisto e areias betuminosas), reverteram drasticamente o então inevitável declínio calculado, algo que Hubbert não previu. Ademais, mesmo à época do pico da curva, a produção nos EUA ainda era 17% acima do calculado, erro estatístico reiterado pelos críticos da teoria.

Não obstante, a Teoria do Pico, com uma sólida base matemática, não foi descartada. Sendo o petróleo um dos alicerces fundamentais da produção energética mundial, sua extração sendo controlada cuidadosa, intensa e incessantemente, torna-se compreensível que o declínio em sua produção média nos EUA, verificado ao longo de nada menos do que 38 anos, tenha marcado severamente uma perspectiva nefasta de escassez no pensamento de muitos especialistas em produção energética. Com efeito, embora tenha sido originalmente desenvolvida com base na produção de petróleo dos EUA, seu cerne está sustentado na premissa

⁴⁰ Não confundir com fontes renováveis de energia.

de que recursos naturais não-renováveis estão destinados a escassear eventualmente. Uma corrente de estudos sobre a escassez destes recursos, alicerçados por esta teoria, foi desencadeada em anos subsequentes, e a discussão não parece estar próxima de uma conclusão.

3.3.2 Michael Klare e a “Corrida pelo que ainda resta”

“A corrida em que estamos provavelmente será a última deste tipo.”

- Michael Klare

Michael Klare é um pesquisador contemporâneo com uma vasta carreira acadêmica voltada para os assuntos de guerra e paz, competição por recursos e assuntos internacionais. Ao longo de sua carreira, Klare consistentemente defendeu a tese de que a sempre crescente demanda energética mundial, associada à baixa eficiência energética, têm causado a exploração desenfreada de recursos energéticos não-renováveis, que inevitavelmente viriam a escassear.

Na obra que selecionamos (2012), sua mais recente, o argumento central de Klare avança para um próximo nível: o pico de produção das mais utilizadas fontes energéticas já foi atingido e a escassez generalizada de recursos já começou. Para ele, isso é visível sobremaneira na forma de uma “corrida pelo que ainda resta”, frase que dá título à sua obra e é central em sua argumentação. A invasão gradual do que chama de “últimas fronteiras” de recursos, em uma busca inédita por materiais cada vez mais escassos, seria um elemento inegável do grau de escassez atual no mundo (KLARE, 2012, p. 15).

Klare abre sua obra com o cenário desenhado em decorrência da demanda e escassez generalizados de recursos, elementos inversos, que acirram a supracitada corrida. Citando o Ártico, região que até recentemente provocava pouco interesse nos países circundantes – “exceto quando teve parte nos cenários armagedônicos da competição nuclear entre os EUA e a URSS⁴¹” (Ibid., p. 6, tradução nossa) –, mas cuja negligência histórica está mudando na medida em que estudos geológicos apontam a existência de recursos fósseis convencionais em seu território, o autor exemplifica a forma como as potências estão buscando recursos em locais antes intocados.

⁴¹ União das Repúblicas Socialistas Soviéticas.

No caso desta região, um dos principais estopins foi um estudo sistemático das reservas de gás e petróleo nas regiões do Círculo Polar Ártico realizado pela USGS⁴² em 2008⁴³, que revelou “nesta área, que ocupa meros 6% da superfície terrestre”, 13% e 30% das reservas mundiais de petróleo e gás natural, respectivamente, ainda não descobertas – “equivalentes a 412 bilhões de barris de petróleo”. Esta publicação, juntamente com outros estudos relacionados, teria desencadeado uma “febre do ouro” na região ártica⁴⁴.

Mas “não somente o Ártico(...)”, defende Klare, citando projetos de exploração em curso em áreas que vão do pré-sal brasileiro, com depósitos estimados de 100 bilhões de barris de petróleo (localizados abaixo de 2,4km de água e mais 4km de camadas comprimidas de sal, areia e rocha), às reservas na costa leste de Sacalina, no extremo oriente do território Russo (uma área suscetível a ciclones e terremotos e com uma temperatura média de 40°C negativos durante o inverno); “(...) e não somente petróleo”, apontando o cobre, cobalto, níquel, titânio e outros minerais vitais em demanda vertiginosa recente devido ao forte crescimento asiático, mas cujas minas conhecidas já passaram seus picos de produção. De fato, Klare demonstra que esforços semelhantes de busca de recursos em localizações intocadas e/ou inóspitas estariam sendo realizados em todo o mundo (Ibid., p. 8-11, tradução nossa).

Em verdade, “em jogo está a continuação da Era Industrial”, que tem registrado, desde a Revolução Industrial, o consumo sempre crescente de matérias-primas e fontes energéticas como madeira, ferro, cobre, estanho e carvão mineral, de início, e petróleo, gás natural, urânio e titânio, dentre outros, em tempos mais recentes. Governos e corporações, defende o autor, reconhecem o esgotamento “terrivelmente acelerado” das reservas de recursos existentes, a serem exauridas no “futuro não tão distante”. “A única forma de países assegurarem um suprimento adequado destes materiais e manterem suas economias funcionando é adquirir novas reservas, subdesenvolvidas, nas poucas localizações que não foram completamente drenadas ainda” (Ibid., p. 12, tradução nossa).

Assim, percebe-se que o argumento central de Klare (2002) de que o ápice da capacidade de produção de recursos (não somente energéticos) foi atingido para a maior parte das fontes já existentes é congruente com a concepção geral a Teoria do Pico de Hubbert. E, acima disso, a atual exploração desenfreada por recursos, impulsionando países e atores da

⁴² Fundada em 1879 e com sede em Virginia, EUA, o “Serviço Geológico dos Estados Unidos” (em inglês “*United States Geological Survey*” - USGS), é uma agência científica voltada aos estudos de ameaças naturais, saúde do meio-ambiente e impactos no clima, bem como da água, energia, minerais e outros recursos naturais dos quais os EUA dependem (USGS, 2018).

⁴³ (USGS, 2008), “*90 Billion Barrels of Oil and 1,670 Trillion Cubic Feet of Natural Gas Assessed in the Arctic*”.

⁴⁴ Ibid., p. 7, tradução nossa.

iniciativa privada a realizar buscas em regiões até então intocadas – as ditas “fronteiras finais” – agrava sobremaneira este cenário de escassez. De fato, para Klare

Virtualmente todas as zonas com recursos estão agora sendo exploradas; exceto por áreas extremas como o Ártico, o Congo, o fundo do oceano e rígidas formações rochosas, não há mais para onde ir. Por essa razão, a invasão das fronteiras finais do mundo tem um significado único. O que expropriarmos destas áreas representa tudo o que resta das reservas outrora abastadas de recursos do planeta. O mais provável é que estejamos olhando para os últimos campos de petróleo, depósitos de urânio, minas de cobre e reservas de muitos outros recursos vitais (Ibid., p.16, tradução nossa).

Embora sua análise sobre a crescente escassez em curso leve em consideração fatores que esta Teoria não previu, como as supracitadas descobertas de novas fontes, incluindo fontes não-convencionais de recursos energéticos fósseis, bem como de novas tecnologias, Klare considera que a tendência geral, ainda que adiável, é o esgotamento paulatino. Os fatores centrais em seu discurso – a demanda crescente de recursos e a limitação física de fontes – permanecem inalterados e, portanto, o resultado deverá ser também.

Por um período, o desenvolvimento de novas tecnologias permite a exploração rentável de recursos destas localizações mais severas. Mas a lógica do esgotamento é inflexível. Cada novo avanço em técnicas de mineração e perfuração leva à exploração de reservas de difícil acesso, até que esses depósitos, também, são exauridos – e então o ciclo de exploração e produção recomeça em circunstâncias ainda mais exigentes (Ibid., p.23, tradução nossa).

Citando um levantamento sistemático das maiores jazidas de petróleo no mundo realizado pela IEA e publicado em seu relatório *World Energy Outlook* de 2008, o autor destaca os resultados preocupantes: de 2003 a 2007, a queda média natural da produção em fontes que já alcançaram seu pico foi de aproximadamente 9% ao ano, sendo 8,7% em 2003 e 9,7% em 2007 – aumento de um ponto percentual em apenas 5 anos. O emprego de algumas técnicas artificiais, como a injeção de nitrogênio para elevar a pressão subterrânea, pode aumentar a produção de jazidas temporariamente, a exemplo do ocorrido no campo de petróleo de *Cantarell*, no México, onde esta técnica foi empregada ao custo de 6 bilhões de dólares. Contudo, o resultado colateral é a aceleração proporcional do esgotamento destes poços, colocando a produção eventual e invariavelmente em queda novamente (Ibid., p. 21-31, tradução nossa).

Por fim, tecendo seus argumentos sobre a existência de um “padrão consistente”, Klare afirma que o padrão de crescimento substancial da produção de petróleo na segunda metade do século XX, seguido pelo “esgotamento generalizado” de reservas existentes no início do século

XXI, vale para muitos dos minerais altamente relevantes, incluindo os minérios já citados nesta subseção e outros minerais de uso especializado, como a platina e o tântalo (Ibid., p.32-34).

Klare aponta, ainda, que a exploração das supracitadas regiões de difícil acesso, com todos seus elevados custos inerentes, será prerrogativa de “um punhado de empresas gigantes”, enquanto as demais tenderão a “encolher, falir ou ser absorvidas” pelas primeiras. Esta lógica, defende, aplica-se às nações.

Embora países, ao contrário de corporações, não sejam suscetíveis a ataques diretos e absorção por seus competidores, eles estão destinados a lutar por suas posições relativas na hierarquia econômica e política global – com tudo que isso significa para a prosperidade e bem-estar de suas populações. As nações que tiverem sucesso em garantir suprimentos de materiais vitais alcançarão posições elevadas na ordem mundial, enquanto as que falharem despenarão (Ibid., p. 218, tradução nossa).

Este cenário conflituoso, para Klare, é, senão, já uma realidade, com pouco espaço para conjecturas. O autor é enfático, literal e pungente em suas análises. “Para ver os sinais dessa luta se intensificando, é preciso apenas abrir um jornal diário relevante” (Ibid., p. 209, tradução nossa). “Cada ator central na corrida pelo que ainda resta fará o que estiver a seu alcance para avançar sua própria posição, enquanto empenha-se sem misericórdia em eliminar ou subjugar todos os outros” (Ibid., p. 215, tradução nossa).

No entanto, há um cenário alternativo: a corrida pela adaptação. Esta alternativa, defende, é o melhor curso para as nações e demais atores internacionais, pois, novamente, os recursos não-renováveis deverão continuar sendo finitos. A adaptação a esta nova realidade resultaria em substanciais recompensas, como descrito pelo autor:

Há, contudo, outro caminho que a humanidade poderia tomar. Em vez de correr pela extração do que ainda resta de recursos vitais da Terra, poderes políticos e corporativos centrais poderiam se engajar na *corrida pela adaptação*: uma disputa pelos primeiros lugares na adoção de novos materiais, métodos e dispositivos que libertarão o mundo de sua dependência da oferta de recursos finitos. Tal corrida seria motivada pela compreensão de que, cedo ou tarde, todos os países serão forçados a se ajustar a uma vida de escassez extrema de recursos – e que quem conseguir realizar esta transição mais cedo colherá vantagens significativas. A corrida pela adaptação recompensará os governos, empresas e comunidades que liderarem o desenvolvimento de processos industriais e sistemas de transporte eficientes e sustentáveis, e punirá os que persistirem no apego aos hábitos atuais. Em última instância, poder e riqueza não advirão do controle de recursos em escassez, mas do domínio de novas tecnologias (Ibid., p. 227, tradução nossa, grifo do autor).

Concluindo seu livro com um olhar sobre este caminho alternativo, Klare faz menção de diversos obstáculos presentes nesta corrida pela adaptação – muitos dos quais já discutimos em nosso trabalho –, como os custos de desenvolvimento contínuo, implementação e aprimoramento de tecnologias voltadas à extração de recursos renováveis. Estas, aliadas a

significativos aumentos em eficiência energética, figuram como passos dispendiosos, em ambos tempo e recursos financeiros, mas que alicerçam este futuro alternativo.

Para Klare, embora esta adaptação não possa ocorrer rapidamente, dada nossa imensa dependência de recursos fósseis e demais matérias-primas finitas, a inegável lógica da depleção destes recursos, somada às consequências cada vez mais inaceitáveis ao meio-ambiente, eventualmente tornarão as práticas industriais atuais insustentáveis. Logo, cumpre iniciar a transição, posto que o processo será longo e a permanência no caminho da corrida pelo que resta, cada vez mais onerosa (Ibid., p. 228, tradução nossa).

3.3.3 Daniel Yergin e os “Riscos na superfície”

“(...) Muitos dos riscos mais decisivos ocorrerão ‘na superfície’. A lista é longa, e os riscos são de ordem econômica, política e militar.”

- Daniel Yergin

Daniel Yergin é considerado uma autoridade central em assuntos relacionados a energia, geopolítica e economia global; é pesquisador e autor de livros de sucesso e ganhador do “Prêmio Pulitzer de Não-Ficção Geral” em 1992⁴⁵. Sua perspectiva acerca da escassez de recursos energéticos, voltada primariamente para a produção mundial de petróleo, é notavelmente mais moderada do que a de Klare, colocando-se contrário a previsões que toma como “alarmistas”. Yergin discorda fortemente, também, da Teoria do Pico de Hubbert, tendo tecido durante sua carreira numerosas argumentações voltadas a apontar as falhas e incoerências desta polêmica predição.

Na obra selecionada (2012⁴⁶), Yergin novamente expõe seus pontos-de-vista acerca do temor referente à escassez de petróleo, concentrados majoritariamente no capítulo de título “*O mundo está ficando sem petróleo?*”. Logo de início, Yergin cita defensores da Curva de Hubbert e seus então discursos: “‘uma crise sem precedentes paira no horizonte’, escreve um defensor da teoria do pico. (...) ‘guerra, fome, recessão econômica, possivelmente até a extinção do *Homo sapiens*’”. No entanto, para o autor, “este medo – de que o petróleo vai acabar – tem um

⁴⁵ (YERGIN, 1990), “*The Prize: The Epic Quest for Oil, Money and Power*”.

⁴⁶ Em alguns momentos o autor não referencia suas fontes, conforme destacaremos a seguir.

nome: pico do petróleo”, sendo que este viria sendo adiado continuamente. (YERGIN, 2014, p. 239, grifos do autor).

Para Yergin, a teoria do pico é baseada no fim da tecnologia e oportunidade, momento que delimitará o término de inovações significativas na produção de petróleo ou no desenvolvimento de novos recursos. Em verdade, defende, embora o pico seja a imagem mais conhecida, a maneira mais apropriada de visualizar o futuro da produção mundial de petróleo é um “platô”, que ainda se encontra a décadas de distância, e a partir do qual haverá um gradual declínio (Ibid., p. 240).

O temido pico, conforme argumenta, há tempos vem sendo adiado, sendo esta a quinta vez na história em que o mundo estaria ficando sem petróleo⁴⁷. A primeira, em 1885, foi uma concepção generalizada e equivocada sobre a escassez deste recurso, formada em sua maior parte por simples desconhecimento da natureza das jazidas de petróleo. “(...) o petróleo que vinha do interior da terra era misterioso: os poços poderiam jorrar petróleo e depois secar por razões totalmente desconhecidas. As pessoas começaram a temer que o petróleo do mundo fosse acabar”. No entanto, novos poços foram descobertos em Oklahoma, Ohio e Texas, garantindo a oferta (Ibid., 241).

A segunda vez, expõe, foi em meados de 1914-1920, no contexto da Primeira Guerra Mundial. Os aparatos militares, com destaque para os tanques de guerra, demandavam quantidades elevadas de petróleo, bem como crescia a demanda interna nos EUA, impulsionada pelo advento dos carros populares com motores de combustão interna, causando no ano de 1918 uma alta recorde nos preços da gasolina. No entanto, novas tecnologias, como a sísmica, permitiram o melhor mapeamento de fontes de petróleo, levando a grandes descobertas. “Na década de 1920, em vez da escassez permanente, o mercado começava a nadar em petróleo (Ibid., p. 242-243).

O fim da Segunda Guerra Mundial assinalou a terceira onda generalizada de receio concernente ao fim do petróleo, intensificada pela transição dos EUA, de produtor de petróleo, para importador. Nesta vez, assim como na segunda, novas descobertas de campos de petróleo, estes no Oriente Médio, somadas ao desenvolvimento de novas tecnologias, levaram à alta da oferta de petróleo. A queda resultante no preço nesta ocasião levou cinco países exportadores de petróleo a fundarem a Opep em 1965, com o objetivo de defender suas receitas. “O petróleo continuou barato, conveniente e abundante, tornando-se o combustível para o milagre econômico do pós-guerra na França, Alemanha, Itália e Japão” (Ibid., p. 243-244).

⁴⁷ Cf. *Anexo 1: “Preços do petróleo bruto em dólares por barril, 1861-2017”*., para ilustrar a narrativa de Yergin.

A quarta vez em que o petróleo pareceu estar acabando foi condizente com a data prevista pela Teoria do Pico. Em 1970, descreve Yergin, a demanda atingiu a capacidade de produção à época. Somado a isso, houve o embargo do petróleo por parte dos países árabes exportadores, em resposta ao fornecimento de armas a Israel por parte dos EUA na guerra Árabe-Israelense de 1973. Disrupções adicionais no fluxo de petróleo para os Estados Unidos se deram entre 1978-1981, em decorrência da mudança de poder no Irã após a Revolução Iraniana, levando à duplicação do preço do barril de petróleo, que já havia quadruplicado em 1973. Ainda assim, “o temor de uma escassez permanente provocou uma busca frenética de novas fontes e o acelerado desenvolvimento de recursos”. O descobrimento de novas fontes no norte do Alasca e no mar do Norte, juntamente com políticas governamentais em países industriais de incentivo ao uso do carvão e da energia nuclear, além de maior eficiência em automóveis, reverteu o quadro. “O impacto foi enorme – e surpreendentemente rápido. Em cinco anos, o que deveria ser a escassez permanente transformou-se em um enorme choque de oferta (Ibid., p. 244).

No início do século XXI, com a entrada de grandes economias emergentes na dinâmica de produção e consumo de petróleo, o “fantasma da escassez”, como descreve Yergin, voltou a ganhar mais relevância – pela quinta vez. Além disso, crescentes preocupações acerca da mudança climática reforçaram argumentos favoráveis à descontinuação de fontes fósseis de energia. E, como antes, a Teoria do Pico de Hubbert foi evocada, suas previsões tomando forma à medida que a demanda alcança os níveis mundiais de capacidade de produção de petróleo, que novamente parecem ter atingido o ápice da curva, passando a cair. O autor aponta, no entanto, que a produção mundial de petróleo, como antes, não segue a curva e continua subindo (Ibid., p. 245).

Yergin lança a pergunta, “por que o suprimento de petróleo continua aumentando?”, e prontamente inicia sua argumentação sistemática contrária ao Pico de Hubbert. Para ele, Hubbert elaborou uma projeção “audaciosa e, pelo menos superficialmente, precisa”, mas errou quando “deixou de fora da análise dois elementos de suma importância: progresso tecnológico e preço”. Como resultado, a real produção de petróleo nos EUA em 2010, de 5,9 milhões de barris produzidos diariamente, era quatro vezes superior à estimativa de Hubbert, que apontava o limite de produção a partir de 1971 em 1,5 milhão de barris por dia (Ibid., p. 248).

Em primeiro, ao alegar “ter pressuposto totalmente a inovação, inclusive as que ainda não tinham ocorrido”, Hubbert teria colocado de fora de sua previsão uma parte fundamental do problema. Yergin afirma:

A história geral da indústria de petróleo e gás (...) é uma história de avanços tecnológicos. Desenvolvem-se as novas tecnologias para identificar novos recursos e produzir mais nos campos existentes. Por exemplo, em um campo de petróleo típico, apenas cerca de 35-40% do petróleo existente é produzido utilizando-se os métodos tradicionais. Hoje, vem sendo desenvolvida e aplicada uma tecnologia destinada a elevar essa taxa de recuperação. Isso inclui a introdução do campo petrolífero do futuro. Sensores são empregados em todas as partes do campo, inclusive nos poços. Isso melhora drasticamente a clareza e abrangência dos dados e a comunicação entre o campo e os centros de tecnologia das empresas, permitindo aos operadores utilizarem recursos computacionais mais poderosos para processar os dados que chegam (Ibid., p 249-250).

Segundo o autor, a nova tecnologia de sensores, caso efetivamente adotada, permitiria aos novos “campos petrolíferos digitais” ao redor do mundo recuperarem, também, “uma enorme quantidade de petróleo adicional” de poços já existentes, estimados em 125 bilhões de barris, “quase o equivalente às reservas do Iraque” – tamanho seria o impacto do desenvolvimento desta tecnologia (Ibid., p. 250, *apud* MAUGERRI, 2009 e IHS CERA, 2005).

O segundo fator, o preço do petróleo, também foi subestimado por Hubbert, conforme explica Yergin. “Hubbert insistiu também que o preço não era importante. A economia – as forças da oferta e da demanda – era, segundo ele, irrelevante para as reservas físicas finitas de petróleo que pode ser extraído do solo”. O autor julga difícil compreender por que, até hoje, os ditos “seguidores” da Teoria do Pico concluiriam que o preço e seus componentes, perfeitamente aplicáveis em tantos outros âmbitos, não seriam relevantes para a produção de petróleo. Assim, lançando mão de uma noção elementar de oferta e demanda, Yergin explica:

A atividade aumenta quando os preços sobem; a atividade diminui quando os preços caem. Preços mais altos estimulam a inovação e encorajam as pessoas a encontrarem formas novas e criativas de aumentar a oferta. As “reservas provadas” de que tanto se fala não são apenas um conceito físico que dá conta de um volume fixo e armazenado. São também um conceito econômico – quanto pode ser recuperado pelos preços predominantes – e são contabilizados apenas quando se fazem investimentos. E trata-se de um conceito tecnológico, pois os avanços na tecnologia farão com que recursos que não eram fisicamente acessíveis ou economicamente viáveis tornem-se reservas recuperáveis (Ibid., p. 249).

Assim, Yergin demonstra, até este ponto, não somente a noção precipitada e repetidamente incorreta de que o petróleo está acabando definitivamente, mas também as notáveis contribuições à produção mundial impulsionadas pelo preço do petróleo e pelas inovações tecnológicas. O temido “pico” na curva de produção é, então, substituído por um “platô”, lento, gradual e definido por estes dois elementos – preço e inovação tecnológica – que Hubbert teria ignorado em seus cálculos.

Com efeito, o autor defende que os impactos destas inovações são tão relevantes a ponto de mudar estruturalmente o cenário de reserva e produção da indústria petrolífera. Ele ilustra

sua argumentação com os resultados de um estudo⁴⁸ realizado pelo USGS, revelando que, em verdade, “86% das reservas de petróleo dos EUA são resultado não das estimativas da época da descoberta, mas sim de revisões e adições realizadas ao longo do seu desenvolvimento”. Outro exemplo⁴⁹, cita, foram as reservas provadas de petróleo no mundo ao final de 2009, que eram de 1,5 trilhão de barris, quantidade levemente superior à constatada no início daquele mesmo ano. “Isso significa que as descobertas, revisões e adições foram suficientes para substituir todo o petróleo produzido em 2009 – um padrão comum a muitos anos” (Ibid., p. 251). Um terceiro estudo mencionado revela a tendência ao crescimento da produção mundial de petróleo:

O mundo produziu cerca de um trilhão de barris de petróleo desde o nascimento da indústria petrolífera, no século XIX. Atualmente, acredita-se que existam pelo menos cinco trilhões de barris de recursos petrolíferos, dos quais 1,4 trilhão está suficientemente desenvolvido e técnica e economicamente acessível para contar como reservas provadas e prováveis. (...) A capacidade de produção líquida mundial deve crescer de cerca de 93 milhões de barris por dia em 2010 para cerca de 110 milhões de barris por dia até 2030. Ou seja, um crescimento de aproximadamente 20% (Ibid., p. 253, *apud* JACKSON, *et al.*, 2010).

Portanto, para Yergin, as quantidades físicas de petróleo não são motivo de preocupações alarmistas, observadas nas narrativas baseadas na Teoria do Pico; as reservas estão, senão, seguindo um padrão de crescimento – e não de decréscimo – consistente ao longo dos anos e décadas. Considerando estes argumentos e números, ficam claras as limitações desta teoria, descritas pelo autor, justificando a guinada da produção de petróleo nos EUA no início do século XXI (conforme visto no *Gráfico 26*), em direção contrária à previsão de Hubbert.

Outros fatores seriam, estes sim, relevantes para a previsão da produção mundial no futuro – os chamados “riscos na superfície”. Yergin os considera fatores sensatos e de suma importância, mas que pouco se relacionam com as reservas físicas de petróleo disponíveis. Conforme defende:

(...) Muitos dos riscos mais decisivos ocorrerão “na superfície”. A lista é longa, e os riscos são de ordem econômica, política e militar. Que políticas os governos criarão, que termos exigirão, como serão implementadas as suas escolhas e qual será a qualidade e validade do processo decisório? Os países proporcionarão às empresas acesso ao desenvolvimento de recursos e as empresas terão licença para operar? O que está acontecendo com os custos no campo de petróleo? Qual é a relação entre as companhias estatais e as tradicionais empresas internacionais de petróleo? Qual o nível de estabilidade de um país e qual o peso interno das ameaças de guerra civil, corrupção e criminalidade? Qual a relação entre o governo central e as regiões e províncias? Quais são as ameaças de guerra e turbulências em diferentes partes do

⁴⁸ Este estudo não foi referenciado pelo autor.

⁴⁹ O autor não referenciou esta fonte.

mundo? Qual o grau de vulnerabilidade ao terrorismo no sistema de abastecimento? (Ibid., p. 240).

Estes, os “aspectos acima do solo⁵⁰”, são uma série de questões de igualmente difícil predição e elevada importância, considera, notavelmente mais relevantes do que as quantidades de petróleo ainda disponíveis no mundo – estas estão claramente traçadas, não havendo, então, “uma crise no horizonte”, senão uma que envolva os supracitados riscos.

Yergin conclui afirmando que, no que tange petróleo, alguns países já atingiram o pico de suas demandas, tendendo a diminuir seus consumos deste recurso fóssil. Contudo, outros tantos, emergentes, estão apenas agora entrando na dinâmica energética mundial. Suas populações, com crescentes poderes de compra, demandarão muito mais energia – o reflexo da “demanda agregada”. “Como isso será resolvido? Que tipo de *mix* energético tornaria isso possível sem crises e confrontos? As respostas a essas perguntas serão fundamentais para o futuro” (Ibid., p. 738).

Para ele, tendo em vista os riscos da superfície, há um elemento que possibilita e favorece o desenvolvimento de soluções:

(...) O que nos motiva a termos confiança é a disponibilidade crescente do que pode ser o recurso mais importante de todos: a criatividade humana. (...) A globalização da demanda pode estar moldando as necessidades do amanhã. Contudo, ela vem acompanhada pela globalização da inovação (Ibid., p. 743).

Com todas as variáveis destas questões “acima do solo” em foco, “há riscos conflitos, crise e interrupção”, tornando importante sobremaneira as “condições para o florescimento da criatividade” sejam sempre mantidas. Ao colocar a tecnologia como elemento central, a evoluir junto com o espírito humano, Yergin atribui certo caráter de infundável à busca por energia, segurança e reconstrução do mundo moderno, que dá nome ao seu livro (Ibid.).

⁵⁰ Consideramos a obra de Yergin (2014) um bom ponto-de-partida para lançar luz sobre os ditos “riscos na superfície” que o autor enuncia, embora ele não os elucide completamente.

4 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA: ALEMANHA E EUA

Até aqui, lançamos luz sobre conceitos importantes relacionados à produção e consumo de energia, bem como as fontes energéticas convencionais, suas características, relevâncias e custos, e as diferentes perspectivas acerca de suas depleções. Neste capítulo, desejamos aplicar o que investigamos na forma de uma análise sobre as principais políticas energéticas atuais na Alemanha e nos EUA, no intuito de verificar se estão conduzindo estas nações a uma possível transição energética.

Para isso, primeiramente analisaremos o conceito de transição energética em si, para então adentrarmos as particularidades de cada uma destas duas grandes nações.

4.1 Transição Energética

O conceito de transição energética está relacionado à mudança estrutural fundamental e generalizada de fontes de energia em um determinado intervalo temporal. O relatório intitulado “Transições Energéticas Globais” realizado pelo Conselho Energético Mundial afirma que “Mudanças fundamentais no setor energético, também chamadas de transições energéticas, ocorrem mundialmente e não são um fenômeno isolado”, embora variem em termos de “motivações e objetivos, instigadores e governança, desafios e oportunidades (HAUFF, BODE e NEUMANN, 2014, p. 2, tradução nossa).

Fenômenos de transição energética com maior ou menor visibilidade foram registrados em diferentes momentos de nossa história. O livro “*Children of the Sun*”⁵¹ argumenta que o domínio do fogo foi o estopim de uma transição energética fundamental em nossa história. Com ele, tivemos acesso à energia contida em novas fontes orgânicas de biomassa que antes nos eram inacessíveis, produzindo calor e iluminação onde e quando desejávamos, além de nos permitir aprimorar substancialmente a eficiência energética das fontes usuais de até então – os alimentos. Seja por tornar deglutíveis os que, crus, não o eram, ou por “pré-digerir” os demais, nos conferindo acesso a maiores reservas de nutrientes, o fogo revolucionou nosso acesso à energia e permitiu um crescimento demográfico exponencial de nossa espécie (CROSBY, 2006).

⁵¹ Cf. (CROSBY, 2006), “*Children of The Sun: A History of Humanity's Unappeasable Appetite for Energy*”.

No artigo “*Energy Transitions in History*”⁵², a transição “lenta” para o carvão (que contribuía em apenas 10% da produção energética na Inglaterra e País de Gales em 1560, passando para 35% em 1660 e atingindo 93% em 1860) é discutida, impulsionada por quatro fatores: inovações tecnológicas, incentivos econômicos, preços atrativos e desenvolvimento do comércio regional. O primeiro se refere à reforma estrutural das técnicas de produção energética, das caldeiras das indústrias até as chaminés das casas, estas para permitir a vazão adequada da fumaça quando o carvão era queimado para aquecimento domiciliar. Os segundo e terceiro fatores concernem a redução gradual dos preços do carvão, que se tornaram acessíveis em relação aos salários e incentivaram a população a inovar em soluções de adaptação à nova fonte energética. O quarto, o sucesso britânico de globalizar a economia da Europa moderna, criando conexões comerciais que favoreceram o crescimento econômico e maior demanda energética (ALLEN, 2013, p. 11-12).

Quando se considera o tema de transição energética, três setores energéticos são comumente analisados: os setores elétrico, de aquecimento/resfriamento e de transporte. Atualmente, a introdução gradual de fontes energéticas renováveis aponta para uma nova transição energética. Por trás, estão motivadores altamente relevantes, como a segurança energética, a sustentabilidade ambiental e as oportunidades de crescimento econômico através do desenvolvimento de novas indústrias e geração de empregos. Conforme artigo do *World Economic Forum*⁵³, há cinco obstáculos principais a serem transpostos para alcançarmos uma nova transição energética nos dias de hoje: diversificação, armazenamento, rentabilidade, eficiência energética e estrutura legal (WEF, 2016).

Diversificação das fontes renováveis convencionais, juntamente com pontuais suprimentos de fontes fósseis em descontinuação, é fundamental para atender a crescente demanda energética mundial. O armazenamento de energia é imprescindível para estabilizar e dinamizar a produção energética perante as flutuações da demanda. A rentabilidade das novas fontes energéticas é indispensável, seus custos precisam ser competitivos no amplo cenário energético mundial. Exemplo de iniciativa eficiente neste aspecto são as diferentes tarifas de incentivo (*feed-in-tariffs*), contratos de longo prazo oferecidos a produtores de energia renovável, voltados a reduzir e estabilizar os custos da produção, propiciando a rentabilidade de novos investimentos. A eficiência energética precisa ser continuamente aprimorada, com diferentes ações para diferentes contextos, mas que resultem sobremaneira no menor consumo energético e maiores produções e realização de serviços. Por fim, para evitar distúrbios na

⁵² Cf. (ALLEN, 2013), “*Energy Transitions in History: The Shift to Coal*”.

⁵³ Cf. (WEF, 2016), “*5 steps towards a clean energy future*”.

saudável competitividade que deve existir entre produtores, uma estrutura completa de leis e metas deve ser elaborada, que direcione investidores às novas fontes em detrimento das atuais, fósseis (Ibid.).

Dentro do grupo deste último exemplo, um notável exemplo é o Acordo de Paris. Criado em 12 de Dezembro de 2015 e até o momento⁵⁴ assinado e ratificado ou aderido por 177 países e a União Europeia (UNTC, 2018), este tratado internacional busca, conforme seu segundo artigo,

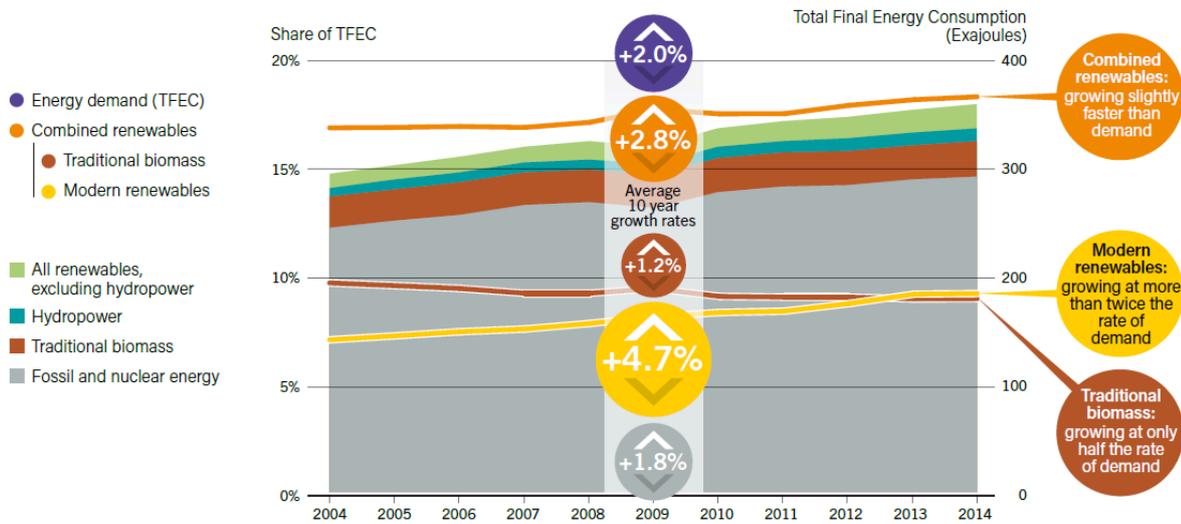
- (...) Fortalecer a resposta global à ameaça da mudança climática, no contexto do desenvolvimento sustentável e esforços para erradicar a pobreza, incluindo através:
- (a) da conservação do aumento da temperatura média global seguramente abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais e dos esforços em busca da limitação do aumento da temperatura em 1,5°C acima de níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e impactos da mudança climática;
 - (b) da crescente habilidade de adaptação aos impactos adversos da mudança climática e de nutrição da resiliência climática e do desenvolvimento de baixas emissões de gases do efeito estufa, de modo que não ameacem a produção de alimentos; e
 - (c) de fazer investimentos financeiros consistentes com o caminho em direção à baixa emissão de gases do efeito estufa e desenvolvimento de resiliência climática (UNFCCC, 2015, p. 2, tradução nossa).

Apesar desta iniciativa e de seu grande número de países aderentes, um relatório⁵⁵ recente da REN21 mostra que a transição para fontes renováveis não está sendo rápida o suficiente para atingir as metas estabelecidas no Acordo de Paris. As políticas e promessas nacionais dos países signatários, somadas, poderiam limitar o aquecimento global médio em cerca de 2,3-3,5°C, nas melhores estimativas. Apesar da diminuição de 2,6% na intensidade energética média mundial entre 2014 e 2015, trazendo a média anual para 2,1% entre 2010 e 2015, a redução de novos 2,6% deve ser atingida anualmente no futuro para atingir a meta de eficiência energética. “Cada ano que ficarmos atrás da média deverá ser compensado no futuro” (REN21, 2017, p. 10). O Gráfico 27 ilustra o crescimento das contribuições das fontes renováveis em comparação com fontes fósseis e com o TFEC mundial entre 2004 e 2014.

⁵⁴ 20 de Junho de 2018.

⁵⁵ Cf. (REN21, 2017), “*Advancing the Global Renewable Energy Transition*”.

Gráfico 27: “Porcentagens de Energia Renovável no TFEC, 2004-2014”.



Fonte: (REN21, 2017, p. 10).

Observa-se o crescimento notável de 4,7% das fontes renováveis (em amarelo, excluindo a bioenergia), que foi superior a duas vezes o aumento do TFEC mundial (em roxo), de 2,0%. Comparativamente, no mesmo período o aumento do consumo energético de fontes fósseis e nucleares foi de apenas 1,8%. Apesar de serem valores relativos, os números são promissores no que tange a gradual consolidação das fontes renováveis no *mix* energético mundial. Os investimentos em fontes energéticas renováveis contam uma história similar, conforme vemos no Gráfico 28.

Gráfico 28: “Novos investimentos globais em fontes renováveis em países desenvolvidos, emergentes e em desenvolvimento, 2006-2016”.



Fonte: (REN21, 2017, p. 12)

Embora o total mundial de investimentos em fontes renováveis tenha caído dramaticamente 23% entre 2015 e 2016, a média tem crescido ao longo dos anos no período analisado. Esta queda é atribuída à desaceleração de investimentos na China, que redirecionou fundos para o desenvolvimento de sua malha elétrica nacional, a fim de melhor aproveitar o potencial de suas novas fontes renováveis. Novos investimentos de 360 bilhões de dólares são esperados da China até 2020, consolidando sua posição como país central na transição energética mundial. É notável, também, o aumento de investimentos por parte de países emergentes e em desenvolvimento, que nos últimos anos do período analisado parecem disputar pela liderança em relação aos países desenvolvidos (REN21, 2017, p. 12).

Assim, embora em estágios iniciais, não se pode desconsiderar o salto quantitativo e qualitativo de uma nova transição energética no mundo, através da introdução paulatina de fontes energéticas renováveis na dinâmica energética mundial. O quão rápido esta transição se dará, contudo, permanece uma questão central em análises energéticas e climáticas.

4.2 Alemanha

A Alemanha é um caso de elevada notoriedade em termos de políticas energéticas. Como veremos, este país está empreendendo nada menos do que um projeto altamente audacioso de transição energética para fontes renováveis, afastando-o de fontes não-renováveis em um período de plenas descobertas de novos recursos fósseis não-convencionais. Uma série de medidas governamentais estão sendo implementadas desde o início da década de 1990 e os resultados são observados atenciosamente por atores do mundo inteiro, intrigados com esta perspectiva de inserção nacional em um futuro drasticamente independente de recursos energéticos finitos. Nas próximas subseções, lançaremos luz sobre o processo de transição energética, bem como sobre as políticas energéticas em curso e o progresso já realizado.

4.2.1 *Energiewende*

A crise energética de 1973, decorrente do aumento do preço e corte do suprimento de petróleo por parte de países árabes exportadores, somada à interrupção adicional na oferta de petróleo após a mudança de poder durante a Revolução Iraniana, levou países a reagirem de modos diferentes. Nesse contexto, o lobby da energia nuclear na Alemanha passou a ganhar maior relevância, apresentando esta fonte energética como alternativa para a instabilidade do

petróleo. Assim, o início histórico da transição energética na Alemanha é baseado em ações contínuas e impactantes de movimentos sociais, ativistas e partidos de esquerda que se opunham majoritariamente à energia nuclear enquanto alicerce da matriz energética nacional (HOCKENOS, 2015).

Cunhado em 1980, o termo *Energiewende*⁵⁶ era utilizado por defensores de energias alternativas ao passo que temas como fontes energéticas renováveis e mudança climática gradativamente ganharam notoriedade ao longo dos anos. Após numerosos embates políticos entre o lobby nuclear e seus opositores, em 1991 a primeira *feed-in-tariff* (FIT) alemã, uma das primeiras do mundo, foi instituída. Em 1998, a coligação *Red-Green* (união entre socialdemocracia e políticas sustentáveis) foi alçada ao poder democraticamente. Embora o termo *Energiewende* não tenha sido utilizado em sua campanha, a coligação prometeu priorizar a “proteção climática, expansão de energias renováveis, eficiência energética e sustentabilidade”, colocando a transição energética na agenda nacional. O termo foi popularizado por Merkel após o desastre de Fukushima (Ibid., p. 103-105).

Ademais, conforme discutimos na subseção 3.1.4, os desastres em reatores nucleares ao longo da história contribuíram para a formação de uma onda de temor generalizado acerca dos terríveis perigos que essa fonte energética causar. Para a Alemanha, este fator é especialmente relevante. Não foi até 1986, com o desastre nuclear de Chernobyl, que a disputa entre o lobby nuclear e seus opositores tomou a devida proporção. A região norte da Alemanha foi atingida por uma nuvem radioativa emanada da usina nuclear, colocando cidadãos alemães em uma funesta polvorosa, receosos por suas vidas. “A incapacidade dos soviéticos de anunciar o acidente, a reação inicial apaziguante do governo alemão e as incertezas sobre os riscos à saúde colocaram o país em pânico (...) Muitos não queriam sair de suas casas por dias. Foi como se estivéssemos em guerra de novo, vivendo em bunkers”. Uma grande parcela dos defensores da energia nuclear, incluindo conservadores, mudaram de opinião após a infame tragédia (Ibid., p. 102, tradução nossa).

Este cenário é ilustrado no

: apenas 16% da população alemã que participou da pesquisa mudou para uma opinião contrária após o desastre nuclear de Fukushima, em 2011 – 77% já possuíam opiniões contrárias a esta fonte energética anteriormente ao desastre. Ainda assim, este desastre incitou a chanceler Angela Merkel a ordenar o desligamento imediato dos três reatores nucleares mais antigos ainda

⁵⁶ Do alemão, “*energie*”: energia; e “*wende*”: mudança, virada.

em funcionamento na Alemanha, bem como formular um plano de desligamento acelerado dos demais até 2022 (Ibid., p. 105).

4.2.2 Metas e Políticas

Atualmente, a transição energética alemã encontra-se em um estágio relativamente avançado, com metas claramente estabelecidas para seus três setores energéticos principais – eletricidade, aquecimento/resfriamento e transporte. A *Energiewende* pode ser acompanhada através do relatório⁵⁷ oficial de monitoramento do *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*⁵⁸ (BMWi), publicado a cada três anos. A última edição deste relatório, que traz dados do ano de 2015, demonstra que as políticas da transição energética alemã se baseiam em três aspectos principais: reduzir a emissão de gases do efeito estufa, aumentar a produção de energia através de fontes renováveis e aumentar a eficiência energética. As metas deste processo e o progresso realizado podem ser vistos na *Tabela 1*.

⁵⁷ (BMWi, 2016), “*The Energy of the Future: Fifth "Energy Transition" Monitoring Report*”.

⁵⁸ Em português, “Ministério Federal da Economia e Energia”.

Tabela 1: “Metas quantitativas da transição energética e situação atual (2015)”.

	2015	2020	2030	2040	2050
Greenhouse gas emissions					
Greenhouse gas emissions (compared with 1990)	-27.2%*	at least -40%	at least -55%	at least -70%	-80% to -95%
Renewable energy					
Share of gross final energy consumption	14.9%	18%	30%	45%	60%
Share of gross electricity consumption	31.6%	at least 35%	at least 50%	at least 65%	at least 80%
			Renewable Energy Sources Act 2025: 40 to 45%	Renewable Energy Sources Act 2035: 55 to 60%	
Share of heat consumption	13.2%	14%			
Share in transport sector	5.2%	10%**			
Efficiency and consumption					
Primary energy consumption (compared with 2008)	-7.6%	-20%			
Final energy productivity (2008–2050)	1.3%/year (2008–2015)	2.1%/year (2008–2050)			
Gross electricity consumption (compared with 2008)	-4.0%	-10%			
Primary energy consumption in buildings (compared with 2008)	-15.9%				
Heat consumption in buildings (compared with 2008)	-11.1%	-20%			
Final energy consumption: transport (compared with 2005)	1.3%	-10%			

Fonte: (BMWI, 2016, p. 7).

A tabela reflete as metas, tidas como audaciosas, de implementação da transição energética até 2050. Some-se a meta de realizar o desligamento completo de todos os reatores nucleares ainda em funcionamento até 2022.

Para alcançar estas metas, o governo da Alemanha desenvolveu diferentes planos de políticas energéticas, específicas para cada componente de seu setor energético. Para a produção de eletricidade renovável, o plano “*Erneuerbare-Energien-Gesetz*”⁵⁹ (EGG), nascido em 1991, foi reformado e reintroduzido em 2000. O objetivo principal deste plano era oferecer *feed-in tariffs* para garantir aos produtores de eletricidade renovável preços fixos, acima do mercado, pelos quais poderiam vender a suas produções durante 20 anos. O plano sofreu outras duas reformas – a primeira em 2014 e a última em 2017.

Nestas reformas, a venda de eletricidade se tornou compulsória para todos que a produzem, favorecendo a ampliação da oferta. Além disso, as *feed-in tariffs* são mantidas para

⁵⁹ Em inglês: “*Renewable Energy Sources Act*”.

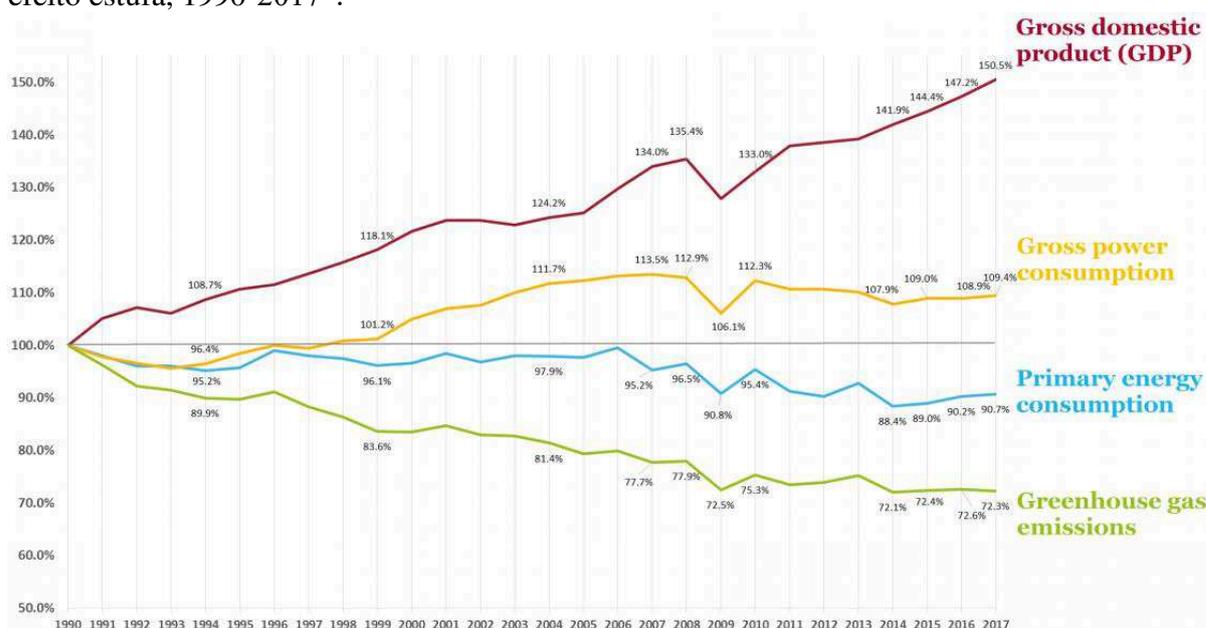
produtores pequenos, com reduzidas capacidades produtivas. Produtores maiores, no entanto, passam a disputar pelos preços em leilões. Nestes, os grandes produtores fazem propostas contendo os preços a que estão dispostos a vender a eletricidade que produzem – os menores preços vencem o leilão e são garantidos pelo governo, por também 20 anos (AMELANG, 2016) e (BMW, 2016, p. 19).

Para o aumento da eficiência energética, o plano *National Action Plan on Energy Efficiency* (NAPE) foi implementado. Tido como um conjunto de estratégias de curto e longo prazos voltadas ao aprimoramento da eficiência energética, este plano tem três objetivos principais. O primeiro, aumentar a eficiência energética no setor de edifícios; o segundo, estabelecer a eficiência energética como modelo de negócio, capaz de gerar retornos para investimentos; e o terceiro, desenvolver a responsabilidade individual sobre eficiência energética (BMW, 2016, p. 30).

Através destes planos centrais de políticas energéticas, a Alemanha foi capaz de atingir notáveis resultados em sua transição energética. O setor de eletricidade lidera os resultados positivos, com fontes renováveis contribuindo em 31,6% da eletricidade total produzida em 2015. Os setores de aquecimento/resfriamento e transporte ainda dependem fortemente de recursos não-renováveis e são apontados como próximos passos para a *Energiewende*.

O Gráfico 29 ilustra a variação do PIB, do consumo bruto de eletricidade e de energia primária, bem como da emissão de gases do efeito estufa, de 1990 até 2017.

Gráfico 29: “Crescimento econômico, consumo de eletricidade e energia, emissões de gases do efeito estufa, 1990-2017”.



Fonte: (APPUNN, BIELER e WETTENGEL, 2018).

Observa-se, juntamente com os resultados expostos na Tabela 1, que as políticas energéticas em curso na Alemanha estão alinhadas com a realização de uma transição energética para fontes renováveis. O notável progresso deste país, a despeito de todas as dificuldades inerentes a uma mudança estrutural deste calibre, tem sido substancial, com importantes estágios concluídos. Não obstante, as metas de curto prazo, para 2020, não devem ser atingidas – a *Energiewende* agora foca nas metas de médio prazo. A reforma de algumas de suas políticas demonstra que o governo tem aprendido com este processo e os anos que seguem serão decisivos para esta iniciativa alemã.

4.3 EUA

Com a maior economia mundial em termos de PIB, além de ocupar a posição de hegemonia internacional, os EUA estão também em segundo lugar no ranking de países que mais consomem energia, com a China liderando. Seu *mix* energético, altamente dependente de fontes não-renováveis, bem como os recursos para supri-lo, são temas centrais da segurança energética deste país. Suas políticas energéticas possuem mecanismos de incentivo a energias renováveis, mas que são altamente dependentes de aprovações regulares em seu Congresso e cujo sucesso, embora perceptível, tem sido apenas moderado. Nas próximas subseções, verificaremos as principais políticas energéticas deste país, a fim de descobrir se estas o conduzem para uma possível transição energética para fontes renováveis.

4.3.1 Políticas Energéticas

Em 18 de Abril de 1977, seguindo a crise energética de 1973, o então Presidente Jimmy Carter discursou para a nação dos Estados Unidos. Neste discurso, Carter procurou estabelecer a crise energética como o “equivalente moral da guerra”. No ano seguinte, assinou o “*National Energy Act*”, e em 1980 o “*Energy Security Act*”. Juntos, estes plano de medidas impactaram na economia estadunidense sob a forma de incentivos para fontes energéticas renováveis, bem como de conceitos como conservação de energia, eficiência energética, diversificação de fontes energéticas, controle da oferta e demanda e inovação tecnológica (USBR, 1978) e (ROBINSON, 2015).

Ao longo das décadas que se seguiram, diferentes políticas energéticas foram implementadas nos EUA, seja na forma de novas leis ou de reformas de leis existentes. Por

exemplo, o “*Energy Policy Act*” de 1992 permitiu a liberalização do mercado de eletricidade e suas reformas de 2005 e 2007 apoiaram fontes renováveis de eletricidade e biocombustíveis. No que tange as fontes renováveis, as políticas energéticas dos EUA variam em nível federal e estadual, sendo as primeiras norteadas pela crescente preocupação nacional com segurança energética e as segundas, com atividade econômica e mitigação de gases do efeito estufa. Em nível federal, mecanismos de incentivo à produção de energia renovável compreendem os incentivos fiscais para produção elétrica (*production tax credits*) e para investimentos (*investment tax credits*), além de *feed-in tariffs* e outros subsídios gerais⁶⁰ (IRENA, 2015b, p. 28).

Dentre estas formas de subsídio, os *tax credits* são os mais importantes para o desenvolvimento de fontes renováveis nos EUA. No entanto, a forma como são concedidos resultam em suas repetidas expirações, demandando renovações constantes e fomentando incertezas nos mercados de energia renovável. “Por exemplo, o revés substancial nas instalações eólicas nos EUA em 2013 deriva de o Congresso ter hesitado até janeiro daquele ano para renovar os *tax credits* referentes à energia eólica”. Após renovados, os incentivos fiscais impulsionam o desenvolvimento de projetos, até expirarem novamente após alguns poucos anos; e a renovação não é garantida. Assim, apesar de sua elevada importância, a implementação de incentivos de longo prazo, a exemplo dos *feed-in tariffs* válidos por 20 anos oferecidos na Alemanha, é fundamental para a confiabilidade deste incentivo e sua eficiência como política energética (OCHS e FRIEDEBURG, 2014, p. 10).

Em nível estadual, os “*Renewable portfolio standards*” (RPS) figuram como importante mecanismo de promoção do desenvolvimento de energias renováveis. Os RPS determinam que uma porcentagem da eletricidade de um estado seja proveniente de fontes renováveis, tipicamente através de produtores privados. Embora abarquem diferentes fontes, como energia geotérmica, solar e de biomassa, na prática a maior parte de RPS são atingidos por energia eólica (STOKES e BREETZ, 2017, p. 79).

Apesar de dispor de variados mecanismos de incentivo à produção renovável, e a despeito de reconhecer a importância da diversificação de sua matriz energética para aumentar sua segurança energética, os EUA permanecem fortemente dependentes de fontes de energia não-renováveis, principalmente fósseis, como veremos na próxima subseção.

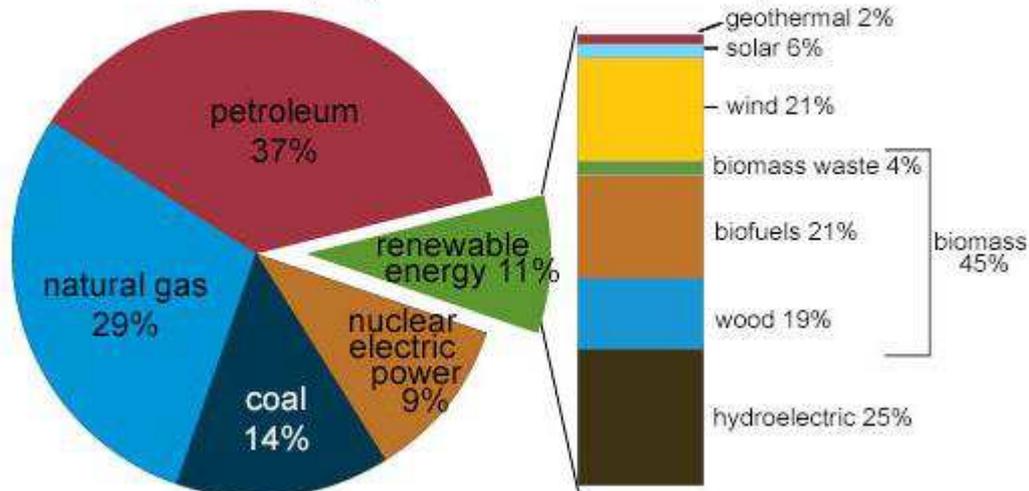
⁶⁰ Cf. (STOKES e BREETZ, 2017), “*Politics in the U.S. energy transition: Case studies of solar, wind, biofuels and electric vehicles policy*”, onde subsídios e outras políticas energéticas nos EUA são ricamente discutidos.

4.3.2 Produção e Consumo Energético

Segundo a IEA, em 2017 o variado *mix* de fontes energéticas dos EUA foi composto por proporções assimétricas entre recursos renováveis e não-renováveis, conforme ilustrado no *Gráfico 30*.

Gráfico 30: “Consumo energético nos EUA por fonte energética, 2017”.

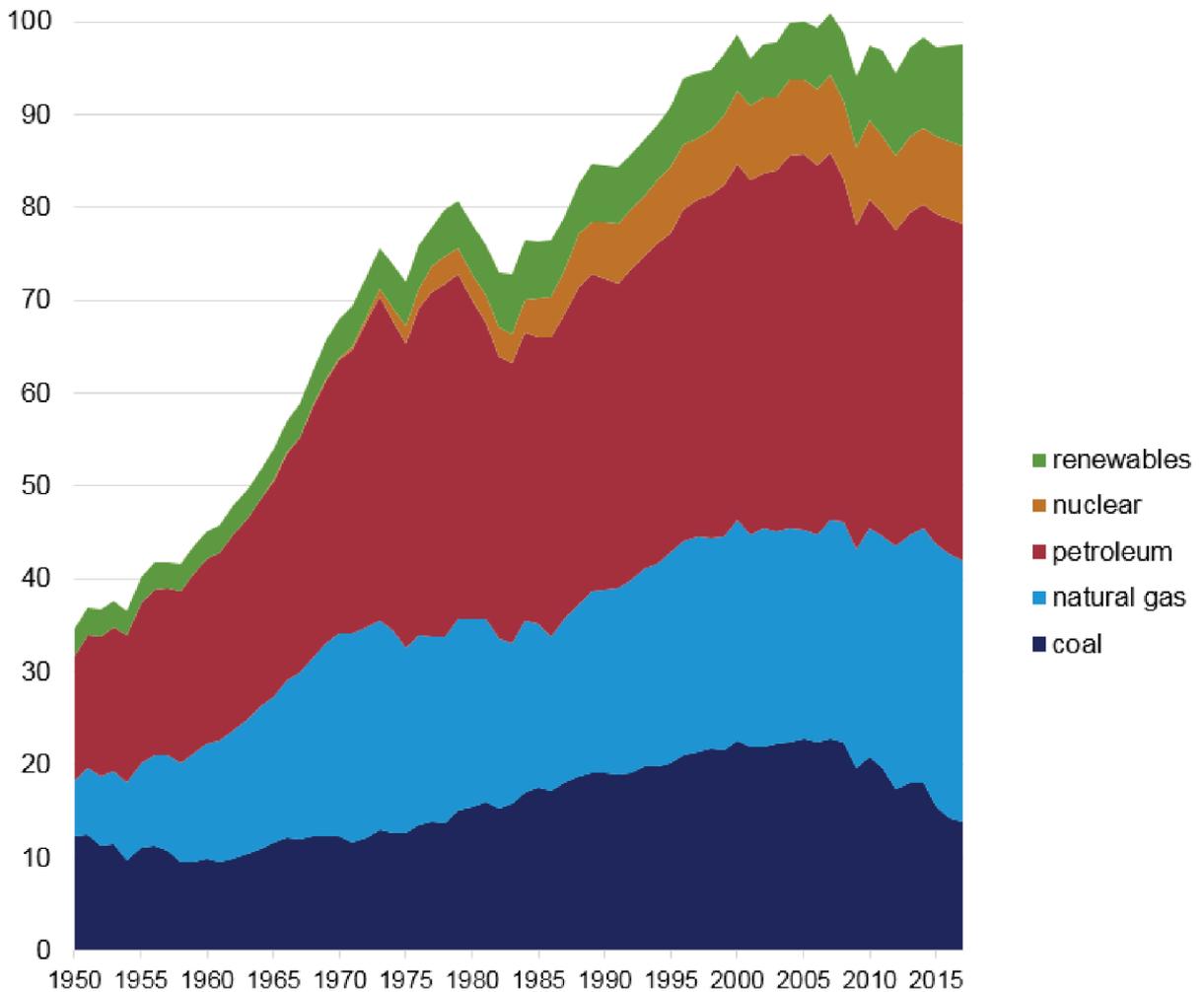
Total = 97.7 quadrillion
British thermal units (Btu)



Fonte: (EIA, 2018c).

A produção energética por fontes renováveis atingiu 11% neste ano, dos quais a energia eólica, de biocombustíveis e hidrelétrica são fatores fundamentais, com 21%, 21% e 25%, respectivamente. A contribuição das fontes renováveis na produção energética total neste ano teve valor notavelmente reduzido se comparado aos 37% e 29% atingido pelo petróleo e gás natural. E esta tendência pode ser observada em anos anteriores, como mostra o *Gráfico 31*.

Gráfico 31: “Consumo de energia primária nos EUA por fontes principais em quadrilhões de BTUs, 1950-2015”.

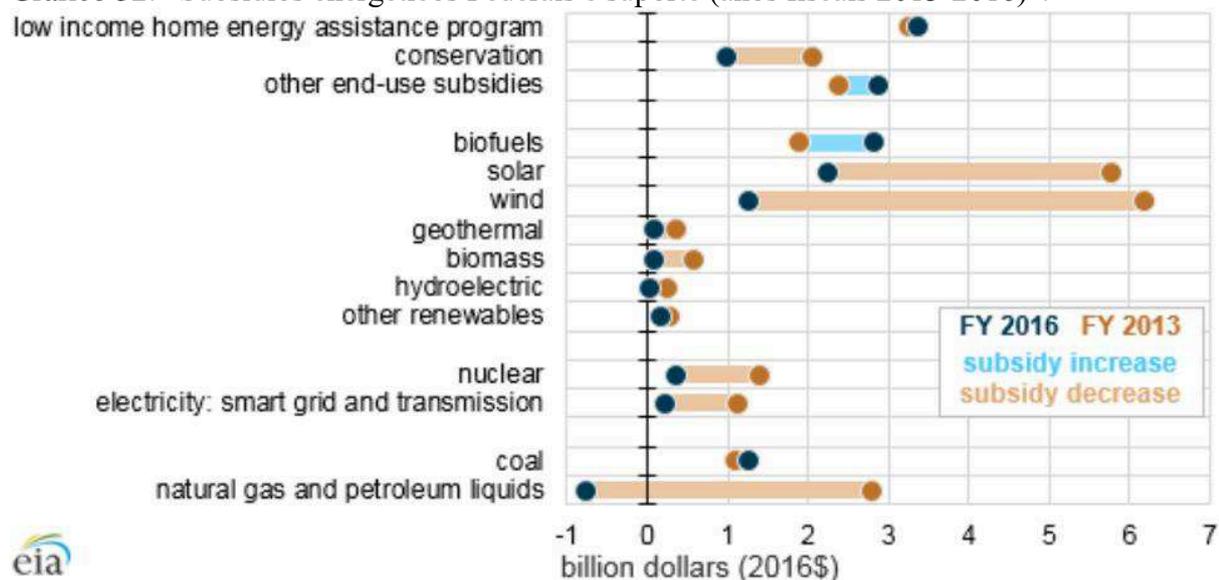


Fonte: (EIA, 2018c).

Observa-se o grau de consolidação do petróleo enquanto fonte energética, já em 1950. Esta tendência de consumo de fontes fósseis vem se repetindo anualmente e não parece demonstrar sinais de mudança, a despeito dos incentivos e políticas energéticas discutidas acima. Some-se a isso as descobertas recentes de fontes de recursos não-convencionais fósseis, como o gás xisto, cuja representação na produção nacional de gás natural subiu de 20% em 2010 para 50% em 2013. O choque de oferta destas fontes tenderá à redução de seus custos e consequente maior competitividade face às fontes renováveis (IRENA, 2015b, p. 16-17).

Este cenário é sobremaneira desanimador se considerado o corte generalizado de subsídios governamentais outrora destinados a várias fontes energéticas renováveis, como ilustrado no *Gráfico 32*.

Gráfico 32: “Subsídios energéticos Federais e suporte (anos fiscais 2013-2016)”.



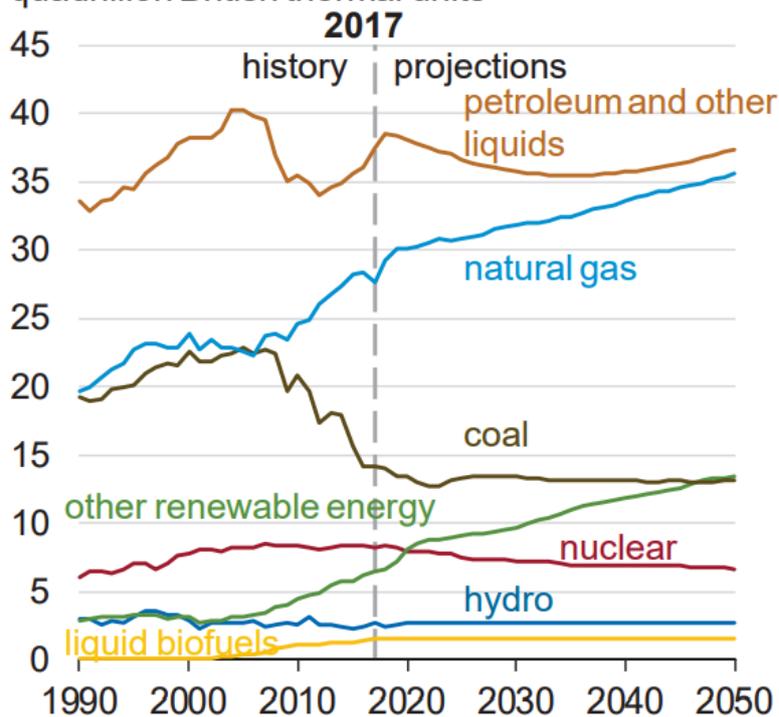
Fonte: (EIA, 2018d).

No gráfico, várias categorias de fontes energéticas são elencadas, bem como os valores dos subsídios, em bilhões de dólares. Os pontos em bege são os valores dos subsídios antes do corte, em 2013; os pontos azuis são os valores após o corte, em 2016. Assim, verifica-se o corte de subsídios em quase todas as fontes energéticas (incluindo as fontes não-renováveis na base do gráfico), com exceção dos biocombustíveis. Alguns cortes, como os referentes às energias eólica e solar, são notavelmente drásticos. Segundo a EIA, os cortes relacionados às fontes renováveis, em particular, devem-se à expiração de *tax credits* aplicados em 2009, que não foram renovados (EIA, 2018d).

Considere-se, também, que no 1º de junho de 2017, o Presidente Trump manifestou sua intenção de abandonar o Acordo de Paris, em linha com sua política de governo “*America First*”. De acordo com o Artigo 28 deste acordo, isso não poderá ocorrer antes de três anos após sua ratificação nos EUA, que foi em 22 de abril de 2016, e mais um ano após a notificação oficial de saída, totalizando quatro anos. Dado o teor do Acordo de Paris, esta decisão indica um possível redirecionamento de suas políticas energéticas para fontes de energia fósseis.

Por fim, as previsões constantes do relatório oficial da EIA, “*Annual Energy Outlook*” de 2018 demonstram que não deverá haver uma mudança estrutural no padrão de consumo energético dos EUA, conforme demonstrado no *Gráfico 33*. Neste modelo de referência, a projeção para 2050 é realizada supondo um crescimento anual do PIB de 2%, enquanto o consumo energético cresce em 0,4% ao ano.

Gráfico 33: “Consumo energético por fonte (modelo de referência), 1990-2050”.
quadrillion British thermal units



Fonte: (EIA, 2018e).

Embora a eficiência energética dos EUA tenha aumentando em 59% desde 1990 (OCHS e FRIEDEBURG, 2014, p. 3), o crescimento do PIB conforme este modelo de referência representará um consumo equivalente de fontes energéticas fósseis, com destaque para o petróleo e o gás natural. O consumo energético de fontes renováveis deverá crescer substancialmente, sinalizando uma maior participação destas fontes no *mix* energético nacional. Ainda assim, ao final do período analisado, sua contribuição será drasticamente inferior às fontes fósseis já consolidadas.

Portanto, apesar da implementação e reforma paulatina de políticas energéticas, com vistas a introduzir mecanismos de subsídio e incentivo de produção energética através de fontes renováveis, a matriz energética dos EUA deverá continuar fortemente dependente de combustíveis fósseis não-renováveis. O considerável crescimento das fontes renováveis até 2050 não deve ser menosprezado e pode sinalizar a estabilização de um precedente de relativo sucesso a atrair melhores subsídios e investimentos privados. Ainda assim, não há sinais de que as políticas energéticas dos EUA estejam conduzindo o país a uma possível transição energética, pois conforme vimos na subseção 4.1, para que este cenário se configure como tal, seria necessária a mudança estrutural do sistema energético deste país, com a produção energética transitando para fontes renováveis em detrimento de fontes não-renováveis.

5 CONCLUSÕES

A dinâmica contemporânea de produção e consumo de energia no mundo está em um período de transição. Para além das preocupações ambientais – muito pertinentes e cientificamente estabelecidas –, paira no ar, entre os países e demais atores internacionais, a noção inequívoca de que o sistema energético atual é insustentável. Quanto a isso, parece não haver dúvida, mesmo entre as autoridades do ramo energético que consultamos, Michael Klare e Daniel Yergin. O que compete prever, agora, é quando e como o modelo atual de exploração de recursos energéticos esgotará o que resta de recursos não-renováveis.

Não é sem surpresa que vemos este assunto sendo tão fortemente debatido. Gestão energética é um elemento central na história de diferentes civilizações que já existiram ou ainda existem em nosso planeta. Ainda que as nações possuam características extremamente particulares, derivadas de fatores históricos, culturais, econômicos, geográficos e muitos outros, todas colocam suas seguranças energéticas em posição central para suas sobrevivências. O suprimento constante e acessível de recursos energéticos é fundamental para que as economias mundiais continuem se desenvolvendo.

Ao longo dos últimos séculos, diferentes fontes energéticas compuseram o *mix* energético mundial. Mais do que isso, transições energéticas ocorreram em variados momentos de nossa história. Da energia muscular humana, a converter em trabalho as calorias assimiladas através da ingestão de diferentes nutrientes, ao domínio do fogo e o acesso às fontes de biomassa, passando para o advento das fazendas e plantações, com o domínio sobre a força animal, e seguindo para novas fontes, como o carvão, que dá início ao cenário de consumo de fontes fósseis que até hoje perdura. A humanidade progressivamente moldou o meio-ambiente no processo de construção de diferentes civilizações e as fontes energéticas tiveram, desde o vero início, papel central em nossa história.

Hoje em dia, ainda que estejamos fortemente habituados à exploração de fontes não-renováveis para a obtenção da energia de que necessitamos, está claramente estabelecida a noção de que estes recursos são finitos. Por conta disso, diferentes prognósticos são lançados, com leituras distintas acerca do intervalo de tempo de que ainda dispomos até o esgotamento destes recursos, ao ponto em que suas extrações se tornam economicamente inviáveis.

No entanto, uma nova transição paira no horizonte – desta vez, para fontes de recursos energéticos renováveis em uma escala de tempo relevante para o ser humano. Como vimos, as várias opções de fontes renováveis convencionais de hoje oferecem perspectivas promissoras,

demonstrando que, mediante investimento financeiro e desenvolvimento tecnológico, serão capazes de suprir em grande medida a demanda energética mundial, compondo assim um novo *mix* energético sustentável, renovável e acessível.

Conscientes disso, algumas nações estão tomando a liderança da transição para fontes energéticas renováveis. A Alemanha é um exemplo, a investir esmagadoras quantias de recursos financeiros, através de consolidadas políticas governamentais, em esforços voltados a reduzir a inércia de um sistema energético consolidado e dependente de fontes não-renováveis, paulatinamente redirecionando-o para fontes renováveis. Os Estados Unidos, apesar de estarem engajados em ampliar a contribuição de fontes renováveis em sua matriz energética, atualmente esbarram em obstáculos na implementação de políticas de incentivo à produção energética renovável, essenciais para manter a competitividade destas fontes e atrair maiores investimentos.

Logo, como pudemos constatar, embora seja possível dizer que as duas nações investem no desenvolvimento de recursos energéticos renováveis, elas encontram-se em estágios diferentes nesta possível transição. Não foram verificadas, dentre as políticas energéticas e as perspectivas de produção energética nos EUA, os elementos necessários para constatar a existência de um processo de transição energética. O mesmo não pode ser dito da Alemanha, que se encontra atualmente a todo vapor (ou a todo vento), engajada neste processo, gradualmente transitando para fontes renováveis através de uma série de políticas energéticas sendo implementadas e reformadas com vistas a superar os obstáculos decorrentes da transição.

Assim, nosso intuito com esta singela pesquisa é que sirva como instrumento do pesquisador de relações internacionais, ciências políticas ou ciências econômicas – e, evidentemente, de todos que se interessarem pela leitura – que desejar se inteirar do tema “transição energética” e “exploração de recursos energéticos”, mesmo nos casos em que uma apresentação a conceitos introdutórios se fizer necessária. Os relatórios que selecionamos são fontes primárias, às quais recorrem grandes autores deste tema, e a maior parte delas está atualizada até os últimos três anos.

Por fim, esta pesquisa não esgotou – e isso é bastante claro – os temas por ela abordados. Partindo de nossos resultados, é possível pesquisar uma multitude de temas relacionados, tamanha a abrangência do macro tema que analisamos. Por exemplo: a transição energética na China e na Índia, as perspectivas das fontes fósseis não-convencionais e da energia de fusão nuclear, as leituras pessimistas quanto à transição energética na Alemanha, as implicações da decisão do governo Trump de sair do Acordo de Paris, as significâncias da transição energética para os diferentes cenários de mudança climática, as possíveis ligações entre as visões de Klare

e Yergin e as correntes Neorrealista e Institucionalista Liberal, respectivamente... enfim, numerosas são as possibilidades. Seja qual for o caminho escolhido, não há dúvidas de que esta área de estudo terá muitíssimas possibilidades interessantes de pesquisa e exploração.

6 REFERÊNCIAS

1. ALBROW, M.; KING, E. **Globalization, Knowledge and Society**. Londers: Sage, 1990.
2. ALLEN, R. C. Rachel Carson Center Perspectives. **Energy Transitions in History: The Shift to Coal**, Munich, v. 2, p. 102, 2013.
3. AMELANG, S. Clean Energy Wire. **Germany's energy transition revamp stirs controversy over speed, participation**, 2016. Disponível em: <<https://www.cleanenergywire.org/dossiers/reform-renewable-energy-act>>. Acesso em: 08 Junho 2018.
4. APPUNN, K.; BIELER, F.; WETTENGEL, J. Clean Energy Wire. **Germany's energy consumption and power mix in charts**, 2018. Disponível em: <<https://www.cleanenergywire.org>>. Acesso em: 10 Junho 2018.
5. BABONES, S. American hegemony is here to stay. **The National Interest**, 2015. Disponível em: <<http://nationalinterest.org/feature/american-hegemony-here-stay-13089>>. Acesso em: 10 Maio 2018.
6. BLANDER, M.; SINHA, S. Calculations of the influence of additives on coal combustion deposits. **Argonne National Laboratory**, 28 Maio 2010. 340-346.
7. BMWI. **The Energy of the Future: Fifth "Energy Transition" Monitoring Report**. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. Berlin, p. 156. 2016.
8. BÖER, K. W. Chemistry Explained: Foundations and Applications. **Solar Cells**, 2009. Disponível em: <<http://www.chemistryexplained.com/Ru-Sp/Solar-Cells.html>>. Acesso em: 30 Maio 2018.
9. BP. **BP. What we do**, 2018a. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/what-we-do.html>>. Acesso em: 07 Junho 2018.
10. BP. **BP Statistical Review of World Energy**. BP. London. 2018b.
11. BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. 1^a. ed. New Jersey: Wiley, 2001.
12. CHENIER, P. Chemistry Explained. **Petroleum**, 2009. Disponível em: <<http://www.chemistryexplained.com/Ny-Pi/Petroleum.html>>. Acesso em: 06 Junho 2018.
13. CHISHOLM, D. Some energetic thoughts. **Physics Education**, 1992. 215-220.
14. COHEN, H. F. **How Modern Science Came into the World: Four Civilizations, One 17th-Century Breakthrough**. Amsterdam: Amsterdam University Press, 2011.
15. COOPERSMITH, J. **Energy, the Subtle Concept: The discovery of Feynman's blocks from Leibniz to Einstein**. Oxford: Oxford University Press, 2015.

16. CROSBY, A. W. **Children of The Sun: A History of Humanity's Unappeasable Appetite for Energy**. New York: Norton, 2006.
17. DUONG, T. **Hegemonic Globalisation: U.S. Centrality and Global Strategy in the Emerging World Order**. Londres: Routledge, 2017.
18. EERE. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. **Energy Intensity Indicators: Efficiency vs. Intensity**, 2018. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/analysis/energy-intensity-indicators-efficiency-vs-intensity>>. Acesso em: 07 Junho 2018.
19. EIA. **Energy Explained**, 2017. Disponível em: <<https://www.eia.gov/energyexplained/>>. Acesso em: 05 Maio 2018.
20. EIA. Energy Information Administration. **About EIA**, 2018a. Disponível em: <<https://www.eia.gov/about/>>. Acesso em: 13 Maio 2018.
21. EIA. **Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2018**. EIA. [S.l.], p. 20. 2018b.
22. EIA. Energy Information Administration. **U.S. Energy Facts Explained**, 2018c. Disponível em: <https://www.eia.gov/energyexplained/?page=us_energy_home>. Acesso em: 11 Junho 2018.
23. EIA. Energy Information Administration. **Federal financial interventions and subsidies in U.S. energy markets declined since 2013**, 2018d. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=35932>>. Acesso em: 13 Junho 2018.
24. EIA. **Annual Energy Outlook**. Energy Information Administration. Washington, p. 74. 2018e.
25. ELLABBAN, O.; ABU-RUB, H.; BLAABJERG, F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014. 748-764.
26. ERKAN, K. et al. Understanding the Chena Hot Springs, Alaska, geothermal system using temperature and pressure data from exploration boreholes. **Geothermics - International Journal of Geothermal Research and its Applications**, Amsterdam, v. 37, n. 6, p. 565-585, Dezembro 2008.
27. FALK, G.; HERRMANN, F.; SCHIMID, G. B. Energy forms or energy carriers? **American Journal of Physics**, Salt Lake City, 7 Março 1983. 1074-1077.
28. FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **The Feynman Lectures on Physics**. 2^a. ed. Boston: Addison–Wesley, 2005.
29. GALILEI, G. **Discourses and Mathematical Demonstrations Relating to Two New Sciences**. New York: The Macmillan Company, 1914.

30. GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4^a. ed. São Paulo: Atlas S.A., 2002.
31. GOLDBERG, S. M. **Nuclear Reactors: Generation to Generation**. Massachusetts: American Academy of Arts & Sciences, 2011.
32. GTP. **Geothermal tomorrow 2008**. Geothermal Technologies Program. Washington, DC., p. 32. 2008.
33. HANANIA, J.; DONEV, J. Energy Education. **Total final consumption**, 2017. Disponível em: <http://energyeducation.ca/encyclopedia/Total_final_consumption>. Acesso em: 06 Junho 2018.
34. HANANIA, J.; DONEV, J. Energy Education. **Primary energy**, 2018. Disponível em: <http://energyeducation.ca/encyclopedia/Primary_energy>. Acesso em: 07 Junho 2018.
35. HANCE, C. N. **Factors affecting costs of geothermal power development**. US Department of Energy. Washington, DC., p. 64. 2005.
36. HAUFF, J.; BODE, A.; NEUMANN, D. **Global Energy Transitions: A comparative analysis of key countries and implications for the international energy debate**. Berlin: “Energy for Germany” editorial team, 2014.
37. HAWKING, S. Galileo and the Birth of Modern Science. **American Heritage’s Invention & Technology**, Rockville, v. 24, p. 36, 30 Abril 2009.
38. HOCKENOS, P. CLEW Yearbook. **Energiewende – the first four decades**, Berlin, 22 Junho 2015. 88-105. Disponível em: <<https://www.cleanenergywire.org/dossiers/history-energiewende>>. Acesso em: 08 Junho 2018.
39. HUBBERT, M. K. Nuclear Energy and the Fossil Fuels. **American Petroleum Institute**, Houston, Junho 1956. 1-40. Disponível em: <<http://www2.energybulletin.net/node/13630>>. Acesso em: 04 Junho 2008.
40. IAEA. International Atomic Energy Agency. **Fukushima Nuclear Accident**, 2016. Disponível em: <<https://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima>>. Acesso em: 07 Junho 2018.
41. IEA. **The IEA Model of Short-term Energy Security (MOSES)**. International Energy Agency. Paris, p. 48. 2011.
42. IEA. International Energy Agency. **Energy Technology Perspectives**, 2012. Disponível em: <<http://www.iea.org/Textbase/npsum/ETP2012SUM.pdf>>. Acesso em: 13 Maio 2018.
43. IEA. **Gas Medium-Term Market Report**. IEA. [S.l.]. 2015.
44. IEA. **World Energy Outlook**. International Energy Agency. Paris, p. 684. 2016.
45. IEA. **Key World Energy Statistics**. International Energy Agency. [S.l.]. 2017a.

46. IEA. **Renewables Information: Overview**. International Energy Agency. Paris, p. 11. 2017b.
47. IEA. International Energy Agency. **Coal 2017**, 2017c. Disponível em: <<https://www.iea.org/coal2017/>>. Acesso em: 06 Junho 2018.
48. IEA. **Energy Efficiency 2017**. International Energy Agency. [S.l.], p. 143. 2017d.
49. IEA. International Energy Agency. **About - Our Mission**, 2018a. Disponível em: <<https://www.iea.org/about/ourmission/>>. Acesso em: 02 Junho 2018.
50. IEA. Unit Converter. **International Energy Agency**, 2018b. Disponível em: <<https://www.iea.org/statistics/resources/unitconverter/>>. Acesso em: 13 Maio 2018.
51. IEA. System Integration. **International Energy Agency**, 2018c. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/renewables/systemintegration/>>. Acesso em: 01 Junho 2018.
52. IHS CERA. The Benefits of DOFF: A Global Assessment of Potential Oil Recovery Increases. **IHS CERA**, 19 Agosto 2005.
53. IPSOS. **Global Citizen Reaction to the Fukushima Nuclear Plant Disaster**. Ipsos Group S.A. Paris, p. 13. 2011.
54. IRENA. **Biomass For Heat and Power**. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, p. 28. 2015a.
55. IRENA. **Renewable Energy Prospects: United States of America**. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, p. 120. 2015b.
56. IRENA. **REthinking Energy 2017**. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, p. 129. 2017a.
57. IRENA. **Renewable Energy Highlights**. IRENA. [S.l.]. 2017b.
58. IRENA. IRENA. **About Irena**, 2018a. Disponível em: <<http://www.irena.org/aboutirena>>. Acesso em: 01 Junho 2018.
59. IRENA. **Renewable Power Generation Costs in 2017**. IRENA. Abu Dhabi, p. 160. 2018b.
60. IRENA. International Renewable Energy Agency. **Featured Dashboard - Capacity and Generation**, 2018c. Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboardF>>. Acesso em: 02 Junho 2018.
61. IRENA. Variable Renewable Energy. **International Renewable Energy Agency**, 2018d. Disponível em: <<http://www.irena.org/power/Variable-Renewable-Energy>>. Acesso em: 01 Junho 2018.
62. IRENA. International Renewable Energy Agency. **Geothermal Energy**, 2018e. Disponível em: <<http://www.irena.org/geothermal>>. Acesso em: 01 Junho 2018.

63. ISO. **ISO 13600: Technical energy systems - Basic concepts**. International Organization for Standardization. Switzerland, p. 2. 1997. tradução nossa.
64. JACKSON, P. et al. "Peak Oil" Postponed Again. **IHS CERA**, Outubro 2010.
65. JAIN, M. C. **Textbook Of Engineering Physics**. New Delhi: PHI Learning, v. 1, 2009.
66. KISEL, E. et al. Concept for Energy Security Matrix. **Energy Policy**, 29 Abril 2016. 9.
67. KLARE, M. T. **The Race for What's Left: The Global Scramble for the World's Last Resources**. Nova Iorque: Picador, 2012.
68. KURNAZ, M. A.; CALIK, M. A thematic review of 'energy' teaching studies: focuses, needs, methods, general knowledge claims and implications. **Energy Education Science and Technology**, Trabzon, 07 Janeiro 2009. 1-26.
69. LAW, E. W. et al. Direct normal irradiance forecasting and its application to concentrated solar thermal output forecasting – A review. **Solar Energy**, p. 287-307, Outubro 2014.
70. LEHRMAN, R. L. Energy Is Not The Ability To Do Work. **The Physics Teacher**, New York, v. 11, n. 1, p. 15-18, Janeiro 1973.
71. LEVINE, H. **The Great Explainer: The Story of Richard Feynman**. Greensboro: Morgan Reynolds, 2009.
72. MAUGERRI, L. Squeezing More Oil from the Ground. **Scientific American**, p. 56-63, Outubro 2009.
73. NARVAEZ, A. The New York Times. **M. King Hubbert, 86, Geologist; Research Changed Oil Production**, 1989. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/1989/10/17/obituaries/m-king-hubbert-86-geologist-research-changed-oil-production.html>>. Acesso em: 04 Junho 2018.
74. NELSON, D. L.; COX, M. M. **Lehninger: Principles of Biochemistry**. New York: Freeman and Company, 2013.
75. NORTON, B. **Harnessing Solar Heat**. New Delhi: Springer, 2014.
76. OCHS, A.; FRIEDEBURG, C. **Energy Transitions in Germany and the United States: Transatlantic Perspectives, Challenges, and the Way Forward**. Worldwatch Institute. Washington, p. 26. 2014.
77. O'CONNELL, C. What is energy? **Cosmos - the science of everything**, 2016. Disponível em: <<https://cosmosmagazine.com/physics/what-is-energy>>. Acesso em: 15 Maio 2018.
78. OCS. Oklahoma Climatological Survey. **Earth's Energy Budget**. Disponível em: <<http://okfirst.mesonet.org/train/meteorology/EnergyBudget.html>>. Acesso em: 15 Maio 2018.

79. OECD. The Organisation for Economic Co-operation and Development. **Better Policies For Better Lives**, 2018. Disponível em: <<http://www.oecd.org/about/>>. Acesso em: 30 Maio 2018.
80. OPEC. Organization of the Petroleum Exporting Countries. **About us**, 2018. Disponível em: <http://www.opec.org/opec_web/en/about_us/24.htm>. Acesso em: 07 Junho 2018.
81. RADOVANOVIĆ, M.; FILIPOVIĆ, S.; PAVLOVIĆ, D. Energy security measurement – A sustainable approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16 Março 2016. 13.
82. RAMANA, M. V. Nuclear Power: Economic, Safety, Health, and Environmental Issues of Near-Term Technologies. **Annual Review of Environment and Resources**, California, 21 Novembro 2009. 127-152.
83. REN21. **Advancing the Global Renewable Energy Transition**. REN21. [S.l.], p. 45. 2017.
84. REN21. **Renewables 2017 - Global Status Report**. REN21. [S.l.], p. 302. 2017a.
85. REN21. REN21. **About Us**, 2018. Disponível em: <<http://www.ren21.net/>>. Acesso em: 07 Junho 2018.
86. RITCHIE, H. How long before we run out of fossil fuels? **Ourworldindata.org**, 2017. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/how-long-before-we-run-out-of-fossil-fuels>>. Acesso em: 05 Junho 2018.
87. RITCHIE, H.; ROSER, M. OurWorldInData.org. **CO₂ and other Greenhouse Gas Emissions**, 2008c. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>>. Acesso em: 02 Junho 2008.
88. RITCHIE, H.; ROSER, M. Energy Production & Changing Energy Sources. **OurWorldInData.org**, 2018a. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>>. Acesso em: 30 Maio 2018.
89. RITCHIE, H.; ROSER, M. Fossil Fuels. **OurWorldInData.org**, 2018b. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/fossil-fuels>>. Acesso em: 04 Junho 2018.
90. ROBINSON, B. PennState College of Earth and Mineral Sciences. **History of Major Energy Policy Landmarks**, 2015. Disponível em: <<https://www.e-education.psu.edu/geog432/node/116>>. Acesso em: 10 Junho 2018.
91. SAMUELSON, P. A.; NORDHAUS, W. D. **Microeconomics**. 17. ed. Nova Iorque: McGraw-hill Irwin, 2001.
92. SHAKIR, M. **The Book of Ingenious Devices**. New York: Springer, 1979.
93. SHEMER, N. Helios CSP - Solar Thermal Energy News. **As Concentrated Solar Power bids fall to record lows, prices seen diverging between different regions**, 2018. Disponível

em: <<http://helioscsp.com/as-concentrated-solar-power-bids-fall-to-record-lows-prices-seen-diverging-between-different-regions/>>. Acesso em: 30 Maio 2018.

94. SOHN, M. Chemistry Explained. **Fossil Fuels**, 2009. Disponível em: <<http://www.chemistryexplained.com/Fe-Ge/Fossil-Fuels.html>>. Acesso em: 06 Junho 2018.

95. STEAD, J. G.; STEAD, W. E. **Management for a Small Planet**. Nova Iorque: M.E. Sharpe, 2009.

96. STOKES, L. C.; BREETZ, H. L. Politics in the U.S. energy transition: Case studies of solar, wind, biofuels and electric vehicles policy. **Energy Policy**, Amsterdam, 21 Novembro 2017. 76-86.

97. STRANGE, A. N. Chemistry Explained. **Coal**, 2009. Disponível em: <<http://www.chemistryexplained.com/Ce-Co/Coal.html>>. Acesso em: 05 Junho 2018.

98. TWB. The World Bank. **What is an "international dollar"?**, 2018. Disponível em: <<https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/114944-what-is-an-international-dollar>>. Acesso em: 30 Maio 2018.

99. UNFCCC. **Paris Agreement**. United Nations Framework Convention on Climate Change. New York, p. 16. 2015.

100. UNGER, R. Energy Transitions in History: Global Cases of Continuity and Change. **RCC Perspectives**, Munich, n. 2, p. 5-15, 2013.

101. UNRIC. ONU projeta que população mundial chegue aos 8,5 mil milhões em 2030. **United Nations Regional Information Centre**, 2015. Disponível em: <<http://www.unric.org/pt/actualidade/31919-onu-projeta-que-populacao-mundial-chegue-aos-85-mil-milhoes-em-2030>>. Acesso em: 30 Abril 2018.

102. UNTC. **7. d) Paris Agreement**. United Nations Treaty Collection. [S.l.], p. 7. 2018.

103. USBR. **Public Utility Regulatory Policies Act of 1978**. United States Bureau of Reclamation. Washington, p. 31. 1978.

104. USGS. U.S. Geological Survey. **90 Billion Barrels of Oil and 1,670 Trillion Cubic Feet of Natural Gas Assessed in the Arctic**, 2008. Disponível em: <www.usgs.gov>. Acesso em: 5 Junho 2018.

105. USGS. U.S. Geological Survey. **About us**, 2018. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/about/about-us>>. Acesso em: 05 Junho 2018.

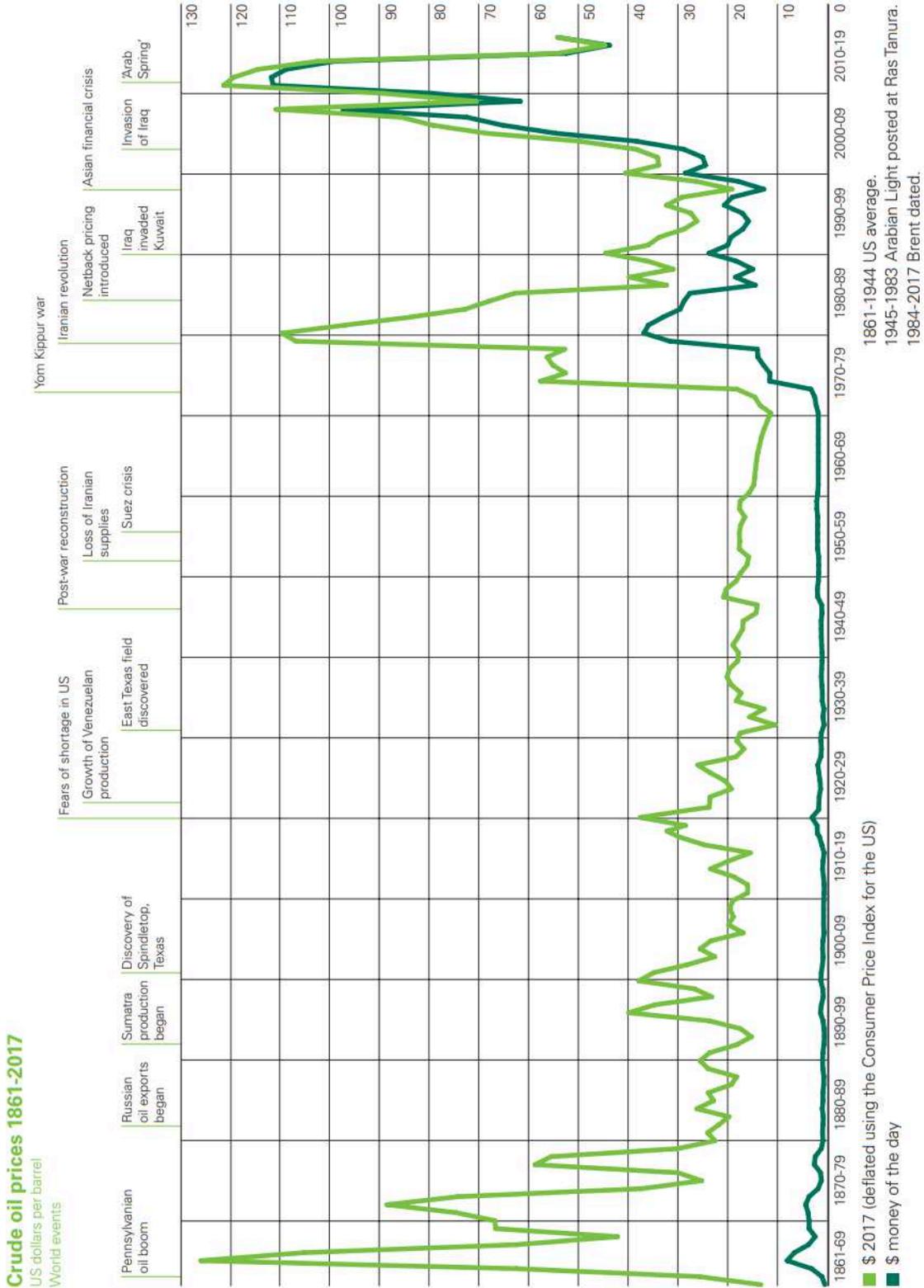
106. USNRC. **Introduction to Uranium Enrichment**. United States Nuclear Regulatory Commission. Rockville, p. 77. 2012.

107. VIEGAS, J. **Kinetic and Potential Energy: Understanding Changes Within Physical Systems**. 1ª. ed. New York: The Rosen Publishing Group, 2005.

108. WDI. World Development Indicators. **The World Bank**, 2017. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/26447/WDI-2017-web.pdf>>. Acesso em: 10 Maio 2018.
109. WEC. **World Energy Resources - Hydropower**. World Energy Council. [S.l.], p. 53. 2016a.
110. WEC. **World Energy Resources - Geothermal 2016**. World Energy Council. [S.l.]. 2016b.
111. WEF. World Economic Forum. **5 steps towards a clean energy future**, 2016. Disponível em: <<https://www.weforum.org/agenda/2016/01/five-key-steps-towards-a-clean-energy-future/>>. Acesso em: 07 Junho 2018.
112. WITTCOFF, H. **Industrial Organic Chemicals**. New York: John Wiley, 1996.
113. WNA. World Nuclear Association. **Nuclear Power Reactors**, 2018a. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>>. Acesso em: 06 Junho 2018.
114. WNA. World Nuclear Association. **Economics of Nuclear Power**, 2018b. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>>. Acesso em: 07 Junho 2018.
115. WWF. World Wide Fund for Nature. **Reykjavik geothermal energy**, 2012. Disponível em: <http://wwf.panda.org/wwf_news/?204451>. Acesso em: 02 Junho 2018.
116. YERGIN, D. **The Prize: The Epic Quest for Oil, Money, and Power**. New York: Simon & Schuster, 1990.
117. YERGIN, D. **A Busca: Energia, segurança e a reconstrução do mundo moderno**. Tradução de Rodrigues e Ana Beatriz. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2014.

7 ANEXOS

Anexo 1: “Preços do petróleo bruto em dólares por barril, 1861-2017”⁶¹.



Fonte: (BP, 2018b).

⁶¹ Cf. Subseção 3.3.3, “Daniel Yergin e os “Riscos na superfície”, para um resumo da variação histórica da oferta, demanda e preços do petróleo.