



UNIVERSIDADE D
COIMBRA



Ana Claudia Sant'Ana Pinto

**IMPACTOS DA GERAÇÃO RENOVÁVEL NO MIX
BRASILEIRO DE GERAÇÃO ELÉTRICA**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia para
Sustentabilidade orientada pelo Professor Doutor Pedro Manuel Soares
Moura e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da
Faculdade de Ciências e Tecnologia**

março de 2020

Agradecimentos:

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por me permitir chegar até aqui. Gostaria de agradecer também ao meu orientador o professor doutor Pedro Moura pela orientação e paciência ao longo desse trabalho. Sou muito grata também a minha família em especial ao meus pais Marly e Joaquim Fernando. Sem eles certamente nada seria possível. Agradeço aos meus colegas de trabalho pelo apoio e paciência especialmente ao Luiz, Henrique e Renata. Agradeço também ao Guilherme pela força e incentivo principalmente nos meses finais da produção da dissertação. Deixo um agradecimento especial a Bianca toda a sua orientação, dicas e auxílios foram primordiais para o andamento dessa dissertação.

Resumo:

O uso de fontes renováveis de energia tem crescido notavelmente em todo o mundo, sendo a energia eólica e fotovoltaica as fontes com maior penetração nas matrizes de geração de eletricidade. O Brasil, apesar de ter uma das maiores participações em geração renovável na matriz energética, devido ao uso da geração hidroelétrica, também se tem voltado para os movimentos de transição energética e tem diversificado a sua matriz. A geração eólica tem ganhado notoriedade nos últimos leilões de energia devido à sua competitividade e a energia fotovoltaica tem despontado como uma grande aposta para o futuro tanto na geração centralizada como distribuída.

A presente dissertação tem por objetivo estudar a matriz elétrica brasileira no horizonte a longo prazo. Para isso, foi realizada uma simulação do sistema elétrico brasileiro referente ao ano de 2018. Essa simulação foi realizada para avaliar a validade do modelo escolhido. A ferramenta escolhida para a realização das simulações foi o EnergyPLAN, um software de simulação de sistemas de energia que realiza as suas avaliações com base na distribuição do consumo e com foco nas fontes de energia renováveis.

Para o horizonte a longo prazo foram realizadas simulações para os anos de 2030, 2040 e 2050, com base nos cenários apresentados na Calculadora 2050. A ferramenta Calculadora 2050 é disponibilizada pela Empresa de Planejamento Energético (EPE) e tem como objetivo apresentar diferentes cenários energéticos para o planejamento de longo prazo.

Os cenários foram elaborados respeitando as características do Sistema Elétrico Brasileiro, tanto no que diz respeito a disponibilidade de recursos quanto nas apostas em tecnologias e investimentos. Foi considerada uma matriz elétrica futura com alto grau de penetração de energias renováveis.

No horizonte a longo prazo espera-se mudanças significativas na matriz elétrica brasileira. A diminuição na participação da matriz das hidroelétricas e o acréscimo das energias renováveis intermitentes causam uma necessidade de garantia de flexibilidade ao sistema provido pelas termoelétricas a gás natural, que por sua vez se tem mostrado uma fonte energética estratégica para o governo.

Palavras Chave: Brasil, energia renovável, mix de geração, geração distribuída, matriz elétrica.

Abstract:

The use of renewable energy sources has grown notably around the world, with wind and photovoltaic energy being the sources with the greatest penetration in the electricity generation matrices. Brazil, despite having one of the largest shares in renewable generation in the energy matrix, due to the use of hydropower generation, has also turned to energy transition movements and has diversified its matrix. Wind generation has gained notoriety in the latest energy auctions due to its competitiveness and photovoltaic energy has emerged as a major bet for the future in both centralized and distributed generation.

This dissertation aims to study the Brazilian electrical matrix in the long term. For this, a simulation of the Brazilian electrical system for the year of 2018 was performed to ensure the model calibration. The tool chosen for carrying out the simulations was EnergyPLAN, a power systems simulation software that performs its assessments based on the distribution of consumption and focusing on renewable energy sources.

For the long-term horizon, simulations were made for the years 2030, 2040 and 2050, based on the scenarios presented in the 2050 Calculator. The 2050 Calculator tool was provided by the Energy Planning Company (EPE) and aims to present different energy scenarios for long-term planning.

The scenarios were elaborated respecting the characteristics of the Brazilian Electric System, both with regard to the availability of resources and in betting on technologies and investments. In the future simulation, it was considered a future electrical matrix with a high degree of penetration of renewable energies.

In the long term, significant changes in the Brazilian electric matrix are expected. The decrease in the participation of the hydropower matrix and the increase in intermittent renewable energies cause a need to guarantee flexibility in the system provided by natural gas thermopower plants, which in turn has proved to be a strategic energy source for the government.

Keywords: Brazil, renewable energy, generation mix, distributed generation, electrical matrix.

Índice:

1. Introdução:.....	1
1.1 Motivação:.....	1
1.2 Objetivos:	1
1.3 Estrutura da Dissertação.....	2
2. Revisão da Literatura	4
2.1 A matriz elétrica mundial.....	4
2.2 Geração Distribuída	5
2.3 Planeamento Energético.....	6
2.4 Desafios das fontes renováveis não despacháveis	7
2.5 Energy Plan	10
3. Cenário Brasileiro de Energia	13
3.1 A Matriz Elétrica Brasileira	13
3.2 Características das fontes de geração de energia.....	14
3.3 Geração Distribuída	19
3.4 O Sistema Elétrico Brasileiro	22
4. Simulação do Sistema Elétrico Brasileiro ano 2018.....	26
4.1 Criação do modelo de referência no EnergyPlan	26
4.2 Dados Utilizados.....	27
4.3 Resultados	32
5. Simulação do Sistema Elétrico Brasileiro ano 2050.....	37
5.1 Criação do modelo para o horizonte de 2050:.....	37
5.2 Procura de Energia Elétrica:.....	38
5.3 Oferta de Energia Elétrica:.....	40
5.4 Análise dos Resultados:	45
5.5 Análise de Emissão de CO ₂ :.....	48
5.6 Discussão a respeito do planeamento a longo prazo no Brasil :.....	49
5.7 A transição energética e o caso brasileiro:.....	52
6. Conclusão e Trabalhos futuros:	55
6.1 Conclusão	55
6.2 Trabalhos Futuros:.....	56
Referências Bibliográficas:	58

Índice de Figuras:

Figura 1: Esquema comparativo entre a geração centralizada e a geração distribuída.	5
Figura 2: Representação da “duck chart”	8
Figura 3: Alternativas para maximizar a flexibilidade do sistema elétrico	9
Figura 4: Esquemático de funcionamento do EnergyPLAN	11
Figura 5: Potência de Hidrelétrica contratada nos últimos leilões de energia	16
Figura 6: Potência de Eólica contratada nos últimos leilões de energia.....	17
Figura 7: Potência de Fotovoltaica contratada nos últimos leilões de energia	17
Figura 8: Potência de Biomassa contratada nos últimos leilões de energia	19
Figura 9: Potência de Térmica a Gás Natural contratada nos últimos leilões de energia.....	19
Figura 10: Principais consumidores da energia gerada por geração distribuída no Brasil	20
Figura 11: Alterações propostas para a Resolução 482/2012	21
Figura 12: Estrutura do Setor Elétrico Brasileiro	22
Figura 13: Fluxograma das etapas necessária para a criação do modelo no EnergyPLAN.....	27
Figura 14: Procura de energia em 2018	28
Figura 15: Fator de capacidade mensal no ano de 2018.....	29
Figura 16: Tela do EnergyPLAN e fatores aplicados para correção do Fator de Capacidade.....	30
Figura 17: Metodologia da pesquisa	32
Figura 18: Geração de energia elétrica por fonte em 2018.....	33
Figura 19: Comparação mensal total entre as simulações do EnergyPLAN e os dados da ONS	33
Figura 20: Resultado gráfico com a comparação entre as fontes geradoras por mês para 2018..	35
Figura 21: Evolução da procura de energia elétrica.....	39
Figura 22: Resultado da Calculadora 2050	42
Figura 23: Evolução da capacidade instalada até 2050.....	44
Figura 24: Geração de energia elétrica para o ano de 2030.....	45
Figura 25: Geração de energia elétrica para o ano de 2040.....	46
Figura 26: Geração de energia elétrica para o ano de 2050.....	46
Figura 27: Complementariedade entre a geração Eólica e Hidroelétrica no ano de 2050.....	47
Figura 28: Geração de Energia Total nos anos de 2030, 2040 e 2050	48
Figura 29: Evolução da emissão de CO ₂ até 2050	49
Figura 30: Classificação dos recursos renováveis e não-renováveis.....	51
Figura 31: Expansão Indicativa de Referência	54

Índice de tabelas:

Tabela 1: Geração Elétrica por fonte no Brasil (GWh).....	13
Tabela 2: Evolução dos preços médios e de quantidade de energia comercializada nos leilões de energia.....	18
Tabela 3: Diferentes fontes de geração distribuída no Brasil	20
Tabela 4: Capacidade instalada das centrais brasileiras	28
Tabela 5: Detalhamento das termoeletricas por capacidade instalada e eficiência.....	31
Tabela 6: Tabela comparativa entre os resultados das simulações no EnergyPLAN e os dados da ONS.	34
Tabela 7: Comparação entre as fontes geradoras por mês para 2018	34
Tabela 8: Procura Setorial e Total até o ano de 2050 em TWh/ano.....	39
Tabela 9: Resultado da calculadora 2050 para os parâmetros escolhidos e exibidos na figura 2	43
Tabela 10: Resumo da capacidade instalada (dados alimentados no EnergyPlan)	43
Tabela 11: Potencial energético brasileiro (Mtep).....	50

1. Introdução:

Esse capítulo tem por objetivo explicar as motivações para o desenvolvimento da presente dissertação. Além disso, é feita uma exposição sobre os objetivos e também é mostrado a estrutura da presente dissertação.

1.1 Motivação:

A geração de energia a partir de fontes renováveis alcançou grande notoriedade nos últimos anos. Para ter uma matriz energética mais limpa e com menor emissão de gases de efeito estufa, muitos países têm introduzido uma percentagem maior de energias renováveis, como eólica e fotovoltaica, nos seus mix de geração de energia. O Brasil não é exceção e assumiu o compromisso de aumentar a participação de energias renováveis na sua matriz energética para 23% até 2030 (excluindo a geração hidroelétrica).

Nesse contexto, aumentou o interesse da geração de energia através da geração distribuída, principalmente usando energia solar fotovoltaica. Nos últimos anos, após a regulamentação do setor, a geração descentralizada vem crescendo e atraindo atenção, crescendo 264% entre 2017 e 2018 (MHR, 2018). Levando em consideração essa penetração crescente da geração de energia renovável, é importante estudar os possíveis problemas que podem ser causados pela matriz existente, a fim de mitigá-los e permitir uma penetração cada vez mais significativa de fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira.

1.2 Objetivos:

Essa dissertação tem por objetivo principal simular o cenário futuro do Sistema Elétrico Brasileiro considerando um cenário elevado de inserção de geração de energias renováveis. Para realizar as simulações, primeiramente será realizada uma calibração do modelo do Sistema Elétrico Brasileiro, tendo sido escolhido como referência o ano de 2018.

Além da calibração para o ano de 2018 será feito na ferramenta Calculadora 2050 o cenário escolhido com alta penetração de renováveis e inclusão da parcela referente a geração distribuída na simulação. Com os resultados da calculadora serão simulados os anos de 2030, 2040 e 2050.

Após as simulações, será realizada uma análise técnica dos sistemas com o objetivo de observar os problemas possíveis de acontecer, devido à alta penetração de energias renováveis. Com isso será realizada uma análise a respeito dos impactos do crescimento de implantação de termoeletricas principalmente a gás natural que são frequentemente utilizadas como fonte de geração complementar as fontes intermitentes.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta a motivação da dissertação e os seus principais objetivos para mostrar quais são as intenções ao escrever esse documento.

O segundo capítulo começa com uma discussão a respeito das mudanças que estão a ocorrer nas matrizes energéticas mundiais. Além disso, como essas mudanças geralmente estão relacionadas a um aumento de energias não despacháveis também será discutido nesse capítulo os problemas relacionados com a intermitência dessas fontes. Foi incluída uma discussão a respeito da geração distribuída e seus efeitos na matriz elétrica. Também será discutido o planejamento energético e as ferramentas usadas para tal. Por fim, será explorado o sistema adotado nessa dissertação, o EnergyPLAN.

O terceiro capítulo procura explicar o cenário elétrico brasileiro. Primeiro foi explorada a matriz elétrica brasileira, bem como suas particularidades. Depois foi explicado como ocorre o processo de contratação de novas centrais a partir do processo de leilão de energia. Por último, foi discutido como a geração distribuída tem sido tratada no Brasil, bem com todo o respetivo quadro regulatório .

O quarto capítulo trata das simulações do sistema para o ano de 2018. Nesse capítulo é explicada a simulação completa do sistema elétrico brasileiro para o ano de calibração do modelo. A simulação foi baseada nos dados reais obtidos através dos boletins e históricos de operação divulgados pela ONS(Operador Nacional do Sistema) tanto para potência instalada quanto para a geração horária de cada uma das fontes. Nesse capítulo é explicado como os dados foram extraídos, tratados e utilizados no EnergyPLAN. Também é realizada uma comparação entre os dados gerados pelo programa e os dados históricos.

Já no quinto capítulo, de posse do modelo já estruturado, são realizadas as simulações dos anos 2030, 2040 e 2050. Os dados de capacidade instalada para cada fonte bem como foram obtidos através da Calculadora 2050. Nesse capítulo são apresentadas as simulações e a análise dos resultados. Também é discutida a participação das termoelétricas, principalmente as de gás natural, que são complementares ao acréscimo de energia renovável apresentadas nas simulações. São também discutidos os efeitos causados no sistema com a maior inserção de energia renovável como fotovoltaica centralizada e distribuída e eólica.

O capítulo seis apresenta as conclusões do presente trabalho, assim como realiza as considerações finais, sugere pontos de melhoria e aponta possíveis trabalhos futuros.

2. Revisão da Literatura

Esse capítulo tem por objetivo apresentar um panorama do cenário energético mundial com suas recentes alterações e a maior integração de fontes de geração renováveis, que na sua maioria apresentam um alto grau de intermitência. Dentro de uma possível alternativa frente à alteração dos cenários energéticos é possível apontar a geração distribuída que também será discutida nesse capítulo. Também será abordado a questão do planejamento energético, bem como as ferramentas usadas. Por fim, será explicado com mais detalhes a ferramenta EnergyPLAN.

2.1 A matriz elétrica mundial

Nos últimos anos os governos em uma escala mundial têm se preocupado com segurança de fornecimento de energia. Para tal, têm sido perseguidos três objetivos, sendo designados como trilema da energia, sendo estes a segurança de fornecimento, acessibilidade e sustentabilidade. Embora muitas das vezes não seja possível atender a todos os critérios entende-se que seria necessário um equilíbrio entre esses fatores para se alcançar uma matriz de baixo carbono e com alta eficiência (Pupo-Roncallo et al, 2019).

Uma outra preocupação que vem atingindo diversos governos no mundo diz respeito às alterações climáticas. Corroborando para isso, a maioria dos países concordaram em fazer um esforço para lidar com tais mudanças no Acordo de Paris. Desde então, os países membros da OCDE anunciaram uma série de planos nacionais de transição energética que se concentram na expansão da geração de energia limpa e na redução da procura por meio de um consumo de energia mais eficiente (Lee et al, 2019).

Portanto, o crescimento de energia renovável tem sido significativo e tem sido a fonte dominante no que diz respeito a novas capacidades de geração. No ano de 2018 houve um acréscimo global de 2.354 GW de capacidade de geração proveniente de energia renovável e cerca de 61% dessa nova capacidade estava localizada na Ásia. Entende-se que as fontes renováveis de eletricidade são a chave para a descarbonização sendo

esperado que a participação de geração de eletricidade a partir de energias renováveis cresça do atual 25% para 86% em 2050 (IRENA, 2019).

2.2 Geração Distribuída

Os sistemas de energia geralmente consistem em centrais geradoras, rede de transporte, redes de distribuição, centros de consumo, sistema de proteção e equipamentos de controlo. Os sistemas tradicionais são compostos por grandes centrais que fornecem energia a diferentes consumidores por meio de redes de transporte e distribuição. Esse tipo de modelo de distribuição é denominado Geração Centralizada (Montoya-Bueno et al, 2016).

Por outro lado, o modelo de Geração Distribuída é um termo usado para geração de eletricidade em pequena escala, próximo do consumo. Ackermann et al., 2001 definiram geração distribuída como geração de energia elétrica dentro de redes de distribuição ou as instalações dos clientes. A EPA, 2018 definiu Geração Distribuída como uma variedade de tecnologias que geram eletricidade no local ou perto de onde serão usadas, como painéis solares e calor e energia combinados que podem servir a uma única estrutura, como uma casa ou empresa, ou parte de uma micro-rede, como em uma grande instalação industrial, uma base militar ou um grande campus universitário. Uma esquematização da geração distribuída pode ser observada na *Figura 1*.

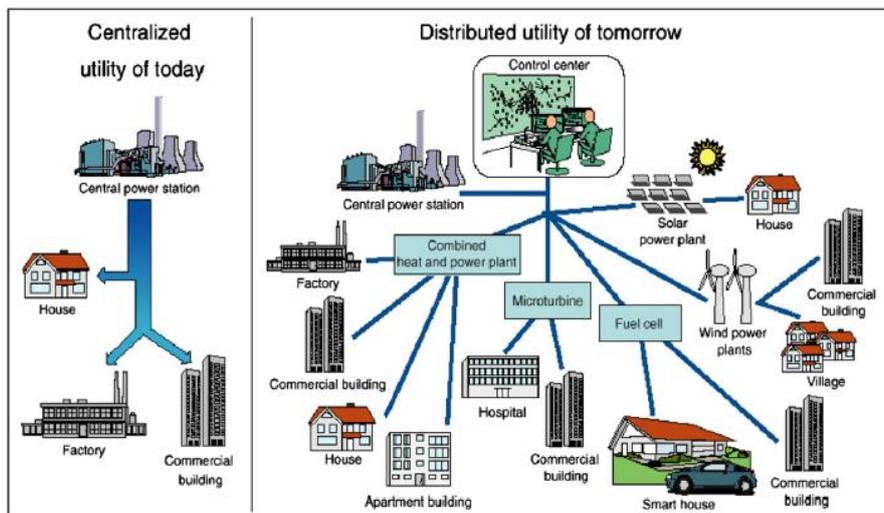


Figura 1: Esquema comparativo entre a geração centralizada e a geração distribuída.

Fonte: Viral et al, 2012

A integração de unidades de geração distribuída pode ter impacto em vários sistemas de energia. Em geral, as desvantagens estão relacionadas com as redes de distribuição que não foram projetadas para instalar a tecnologia e a variabilidade da produção renovável. Existem muitas vantagens relacionadas a aspetos técnicos, benefícios económicos e ambientais no uso da geração distribuída. Alguns desses benefícios são a redução das perdas, melhoria do perfil de tensão, aumento da eficiência energética geral, fiabilidade e segurança do sistema melhoradas e melhoria da qualidade da energia (Viral e Khatod, 2012).

2.3 Planeamento Energético

O planeamento energético tem vários significados diferentes. No entanto, um significado comum do termo é o processo de desenvolvimento de políticas de longo prazo para ajudar a guiar o futuro de um sistema energético, seja ele local, nacional, regional ou mesmo global. O planeamento geralmente é realizado dentro de organizações governamentais, mas também pode ser realizado por grandes empresas de energia, como empresas de energia elétrica ou produtores de petróleo e gás (Bhatia, 2014).

Tradicionalmente, o planeamento energético tem desempenhado um papel importante na definição da estrutura para regulamentos no setor de energia influenciando, por exemplo, que tipo de centrais de energia podem ser construídas ou que preços foram cobrados pelos combustíveis (Bhatia, 2014).

Nesse sentido, frente as alterações sofridas pelas matrizes elétricas ao redor do mundo, o planeamento energético desempenha um papel importante. Além de ser a ferramenta utilizada para a tomada de decisão para o futuro energético de um país ou uma região o planeamento também precisa contabilizar as características inerentes de cada fonte, como por exemplo, os desafios associados as fontes de geração não despacháveis e a necessidade de complementaridade quando há uma maior penetração destas em uma matriz energética.

2.4 Desafios das fontes renováveis não despacháveis

As fontes de energia renovável não despacháveis ganharam notoriedade no cenário mundial. O crescimento dessas fontes gera vários desafios ao sistema elétrico. Esses desafios são técnicos, operacionais e económicos, tendo impactos negativos na rede elétrica (Shah et al, 2015). As principais características que causam esse desafio, de acordo com o IEMA, 2016, são a variabilidade, a flutuação do despacho térmico e o impacto na rede de distribuição.

A variabilidade surge devido à disponibilidade do recurso, à medida que o sol e o vento sofrem variações de acordo com as condições climáticas. Por outro lado, a flutuação no despacho térmico ocorre devido à necessidade de compensar a variação da geração renovável, com uma mudança no despacho de fontes não despachadas, com impacto nos custos do sistema. Nos períodos de escassez de fontes renováveis, é necessário ter fontes de geração mais caras, aumentando as reservas. O impacto na rede de distribuição é causado principalmente pelas características modulares das usinas eólicas e fotovoltaicas, garantindo vantagens para sua instalação em pequena escala. Esse fato garante uma redução de custos e perdas nas linhas de transmissão e distribuição, mas traz alguns desafios relacionados à adequação do sistema de distribuição, como, por exemplo, o possível fluxo de energia bidirecional.

Quanto aos desafios associados à geração distribuída, Resch et al., 2017 citam algumas dessas tecnologias como causadoras de alimentação flutuante em redes elétricas, além de sobrecarga térmica de equipamentos de rede, aumento de tensão, aumento de níveis de falha, degradação da qualidade de energia, impacto na proteção da rede, efeito na operação de reguladores de tensão e comutadores e impacto nas perdas da rede. Para todo o sistema elétrico, alguns problemas mencionados são o aumento da demanda por energia de controle, aumento dos gargalos das linhas de transmissão e diminuição das reservas de fiação.

Alguns países com uma alta taxa de penetração de renováveis já sentem esses problemas. Na Alemanha, mais de 98% de 1,5 milhão de instalações fotovoltaicas estão ligadas à rede de distribuição de baixa tensão e geram eletricidade solar nas proximidades dos

consumidores. Como o fornecimento de energia solar ocorre predominantemente de maneira descentralizada, dificilmente requer a expansão da rede nacional de transporte alemã. A alta densidade de centrais de energia em uma seção de baixa tensão da rede pode resultar em excedente de geração nesta seção da rede em dias ensolarados. Nesse caso, os transformadores retornam a energia para a rede de média tensão. Em seções com alta densidade de geração, isso pode levar as estações do transformador ao limite. O congestionamento da rede e a dificuldade de escoamento de energia custam aos operadores da rede mais de 1 bilhão de euros em 2015. (Wirth, 2018).

Outro problema associado à alta taxa de penetração da geração fotovoltaica foi observado na Califórnia pelo operador de sistema independente da Califórnia (CAISO), onde o "gráfico de pato" avalia o potencial de "geração excessiva" que ocorre com o aumento da penetração da energia solar fotovoltaica (PV), tal como pode ser observado na *Figura 2*.

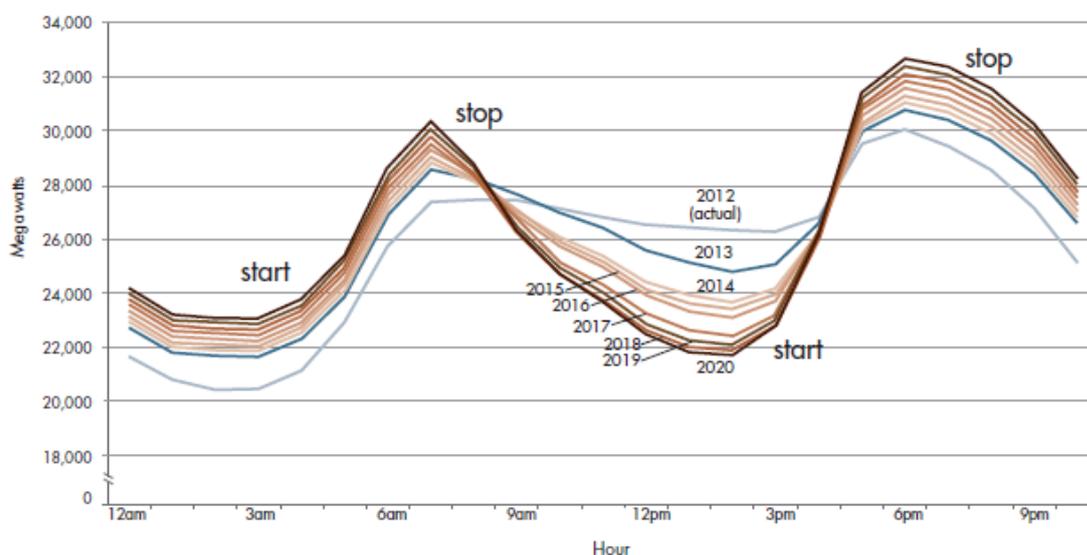


Figura 2: Representação da “duck chart”

Fonte: Desholm,2015

A diagrama *duck chart* do CAISO ilustra o desafio de acomodar a energia solar e o potencial de geração excessiva e redução de energia solar. No gráfico, cada linha representa a carga líquida, igual à carga normal menos a geração eólica e fotovoltaica. A "barriga" do pato representa o período de menor carga líquida, em que a geração fotovoltaica é máxima. A barriga cresce à medida que as instalações fotovoltaicas

aumentam entre 2012 e 2020. O gráfico de pato também aponta para o período de risco de geração excessiva, que pode resultar em energia reduzida (Desholm, 2015).

Durante condições de alta geração, o fornecimento de energia poderia exceder a procura, sem intervenção, geradores e certos motores conectados à rede aumentariam a velocidade de rotação, o que pode causar danos. Para evitar isso, os operadores do sistema equilibram cuidadosamente a oferta e a procura, aumentando e reduzindo a geração de centrais convencionais (Desholm, 2015).

Devido à natureza variável de tais fontes, é necessário tomar medidas para garantir a flexibilidade do sistema elétrico. Essas medidas podem ser divididas em quatro categorias: oferta, procura, armazenamento e infraestrutura de rede, como pode ser observado na *Figura 3* (Papaefthymiou et al, 2014).

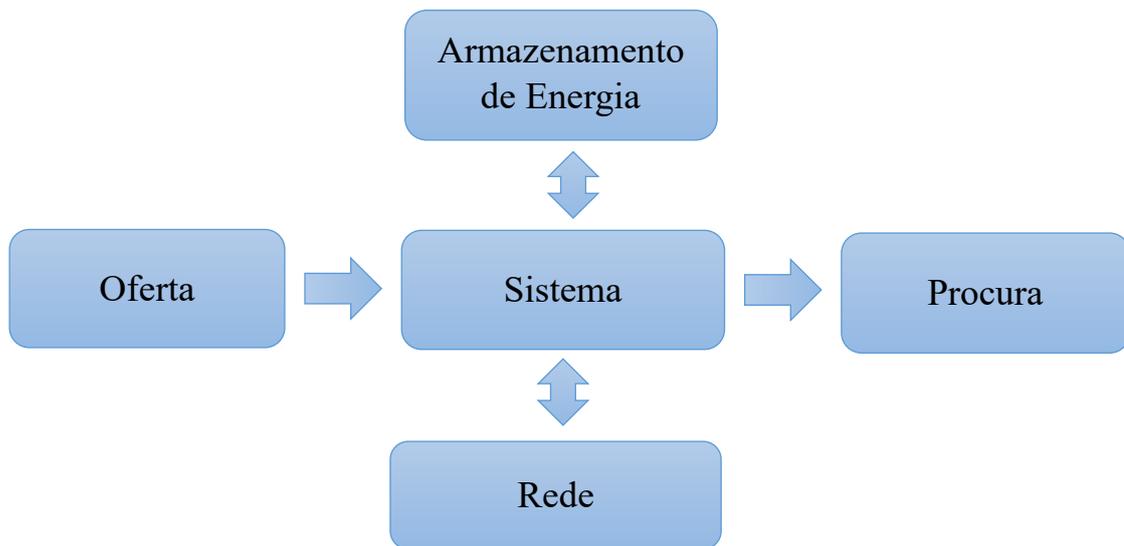


Figura 3: Alternativas para maximizar a flexibilidade do sistema elétrico

Fonte: Papaefthymiou et al, 2014

As categorias de fornecimento incluem fontes e tecnologias de geração elétrica que podem ser acionadas rapidamente, para atender à carga em tempos de indisponibilidade de fontes eólicas e solares. Quando se trata de armazenamento, trata-se de tecnologias que permitem o armazenamento de energia, tanto do lado da geração quanto da do consumo, como o armazenamento hidroelétrico de bombagem ou armazenamento em baterias. As medidas tomadas na área de infraestrutura de rede são medidas tomadas para dar amplitude, robustez e confiabilidade aos sistemas de transmissão e distribuição. Do

lado da procura, refere-se à implementação de programas como Gestão do Lado da Procura e *Demand Response* (Papaefthymiou et al, 2014).

2.5 Energy Plan

Existem diversas ferramentas para realizar planeamento energético. O EnergyPLAN é um modelo computacional de análise avançada de sistemas de energia que é amplamente utilizado para simular cenários de futuros energéticos focando principalmente na integração em larga escala de RES (Energias Renováveis) Dranka et al, 2019.

O EnergyPLAN foi desenvolvido e expandido continuamente desde 1999 na Universidade de Aalborg, na Dinamarca. A sua utilização é gratuita e é uma ferramenta fácil de usar, projetada em uma série de guias e programada em Delphi Pascal. O principal objetivo da ferramenta é auxiliar o desenho de estratégias nacionais ou regionais de planeamento energético, simulando todo o sistema energético: isso inclui fornecimento de calor e eletricidade, além dos setores industrial e de transporte. Todos os custos térmicos, renováveis, armazenamento, conversão, transporte podem ser modificados pelo EnergyPLAN.

É uma ferramenta determinística de input/output o desenho esquemático da ferramenta pode ser observado na *Figura 4*. As entradas gerais do modelo são as procuras, os tipos e a capacidade instalada das fontes de energia renováveis, capacidades de centrais de energia, custos e várias estratégias diferentes de regulamentação para importação, exportação e excesso de produção de eletricidade. As saídas usuais do modelo são saldos de energia e as produções anuais resultantes, consumo de combustível, importação e exportação de eletricidade e custos totais, inclusive os provenientes da troca de eletricidade (Lund et al, 2019).

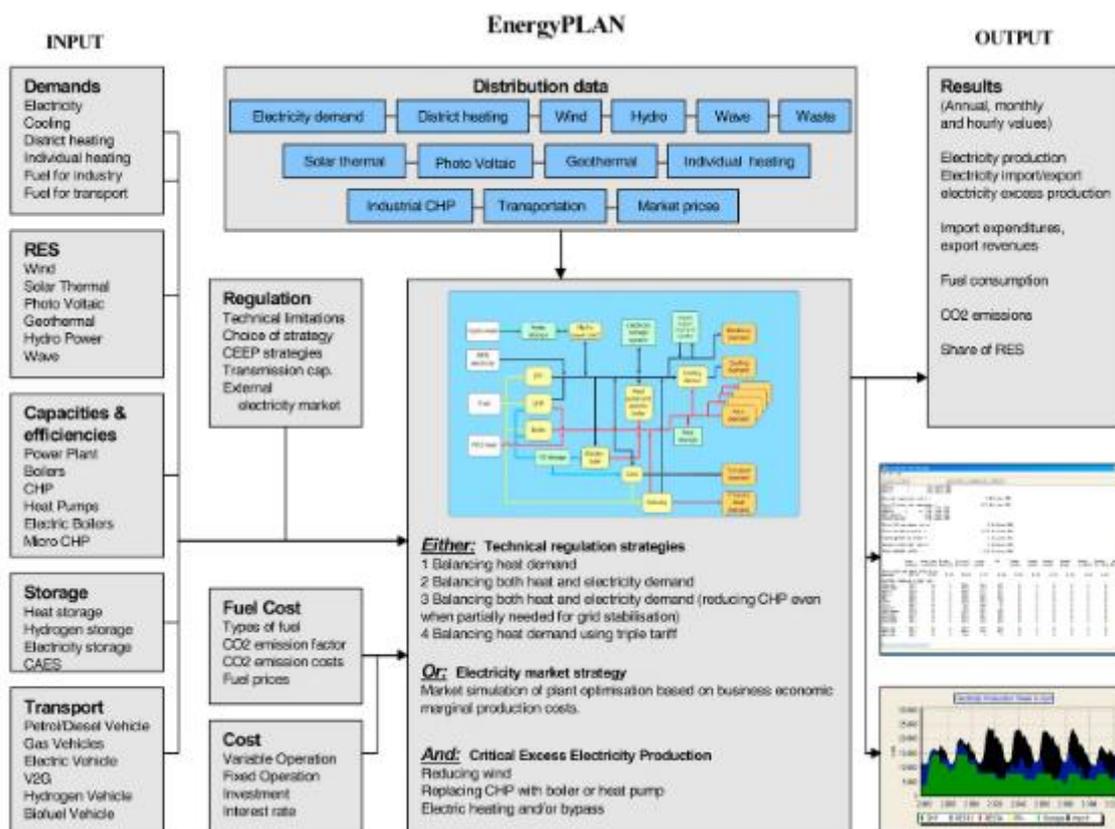


Figura 4: Esquemático de funcionamento do EnergyPLAN

Fonte: Ramos, 2018

Essa ferramenta tem sido utilizada e aplicada em diversos projetos de investigação que abordam principalmente matrizes 100% renováveis ou com alto grau de penetração de fontes renováveis. Ostergaard, 2015 mapeou 95 artigos que aplicavam ou citavam o EnergyPLAN, desses 45, ou seja, 47% utilizaram o modelo para estudar a integração de RES nos sistemas energéticos ou para estudar cenários de alta penetração de RES. Há diversos países com modelos já desenvolvidos de uso do EnergyPLAN, nomeadamente Áustria, China, Croácia, República Tcheca, Dinamarca, Alemanha, Finlândia, Hungria, Irlanda, Itália, Quênia, Letónia, Macedónia, México, Nova Zelândia, Noruega, Roménia, Servia, Tanzânia, Turquia e Reino Unido (EnergyPLAN, 2019).

Ramos 2018 destacou as principais vantagens de utilização da ferramenta tais como o fato de ser uma ferramenta amigável e com um período de aprendizagem curto. O EnergyPLAN é uma ferramenta projetada especialmente para estudar sistemas de energia futuros, mais do que os atuais sistemas. Outra característica destacada é o fato do modelo de simulação ser muito detalhado, permitindo ao utilizador modelar novas tecnologias e

cenários diferentes. Além de ser uma ferramenta usada continuamente para apoiar pesquisas acadêmicas e científicas.

3. Cenário Brasileiro de Energia

Esse capítulo tem por objetivo detalhar cada fonte que contribui para o cenário brasileiro de geração de energia. Tal inclui informações tais como o histórico, divisão da capacidade instalada por subsistemas e características operacionais de cada uma dessas fontes. Além disso, será abordado o processo de leilão de energia brasileiro, mecanismo o qual é contratado as novas centrais geradoras de energia para o sistema brasileiro.

3.1 A Matriz Elétrica Brasileira

A economia brasileira representa a nona maior economia do mundo, com um PIB de cerca de 1,8 trilhão de dólares (Gray, 2018). No setor de energia, o Brasil é o oitavo maior consumidor de energia. Em relação à geração de energia, o Brasil é um dos países com maior participação na geração de energia a partir de fontes de energia renováveis (EPE, 2019a).

O grande destaque brasileiro em fontes de energia renováveis é a geração hidroelétrica. Em relação à geração de energia a partir de fontes não renováveis destaca-se o gás natural com participação de 9,1%, derivados de petróleo com 1,5% e nuclear com 2,6%, conforme pode ser observado na Tabela 1 (EPE, 2019a).

Tabela 1: Geração Elétrica por fonte no Brasil (GWh)

Fonte de Geração	2014	2015	2016	2017	2018	Part. % (2018)
Hidroelétrica	373.439	359.743	380.911	370.906	388.971	64,7%
Gás Natural	81.073	79.490	56.485	65.593	54.622	9,1%
Derivados de Petróleo	30.834	25.014	11.808	12.458	9.293	1,5%
Carvão	18.385	18.856	17.001	16.257	14.204	2,4%
Nuclear	15.378	14.734	15.864	15.739	15.674	2,6%
Biomassa	44.987	47.394	49.236	50.740	51.876	8,6%
Eólica	12.210	21.626	33.489	42.373	48.475	8,1%
Outras	14.235	14.371	14.103	15.261	18.281	3,0%
Total	590.542	581.228	578.898	589.327	601.396	100,0%

Fonte: EPE,2019a

Essa grande dependência da energia hidroelétrica apresenta alguns desafios, como períodos prolongados de seca que diminuem substancialmente a geração de energia

devido à escassez de água nos reservatórios (Juarez et al, 2014). Além disso, foi observada uma transformação no modelo hidroelétrico, uma vez que a capacidade dos reservatórios, que sempre contribuíram para a estabilidade da geração no Brasil, foi reduzida nos últimos anos devido à menor disponibilidade de água. Por um longo período, o fornecimento de energia foi regulado através dos grandes reservatórios e complementado por centrais termelétricas em tempos de condições climáticas desfavoráveis. Atualmente, no entanto, essa capacidade foi reduzida. O crescimento da procura, a capacidade já explorada dos melhores reservatórios existentes e a resistência da sociedade aos impactos ambientais associados aos grandes reservatórios são as principais razões para essa mudança de paradigma (Castro et al, 2018).

Outro fator que expõe as mudanças eminentes na matriz elétrica brasileira é a crescente preocupação com a redução das emissões de gases de efeito estufa. Uma ação possível para auxiliar nessa redução é o aumento da participação de energias renováveis na matriz energética. Portanto, o Brasil assumiu o compromisso da COP 21 de aumentar a participação de energias renováveis para 23%, excluindo a geração hidroelétrica, até 2030 (Marcovitch, 2016). Em 2018, essa percentagem foi de 18% (EPE, 2019a) e, portanto, há expectativa de mudanças no cenário energético atual do Brasil, com maior participação das fontes eólica, solar e de biomassa na matriz energética.

Nesse contexto de mudanças, outra forma de geração de energia também experimentaram um crescimento expressivo como por exemplo a geração distribuída. A queda dos preços dos painéis fotovoltaicos e os avanços na regulamentação e incentivos previstos na Resolução Normativa nº 482/2012 incentivaram o aumento do uso da energia fotovoltaica (Castro et al, 2018).

3.2 Características das fontes de geração de energia

3.2.1 Hidrelétricas

O Brasil possui 12% da água doce superficial da Terra, tornando-se o país com uma das maiores redes fluviais, contando com 12 bacias hidrográficas. Além de possuir a central hidroelétrica de Itaipu, que é atualmente a maior hidrelétrica geradora de energia no mundo (Shimako, 2018).

O Brasil apresenta uma grande diversidade de hidroelétricas, porém as 5 que geram mais energia são a de Itaipu (Paraná), a de Belo Monte (Pará), a São Luiz do Tapajós (Pará), a de Tucuruí (Pará) e a de Santo Antônio (Rondônia).

Destaca-se que cerca de 40% do potencial hidroelétrico se encontra na Bacia Hidrográfica do Amazonas, porém, a maior produção de energia encontra-se na Bacia do Paraná, devido à central de Itaipu Binacional, que gera cerca de 15% da energia consumida no Brasil (Shimako, 2018).

Essas centrais representam, historicamente, a principal fonte de geração do sistema elétrico brasileiro, com cerca de 65% da capacidade instalada do parque gerador e cerca de 70% da geração elétrica brasileira total (ONS, 2019). Ao longo dos anos essa importância deve-se ao fato das hidroelétricas serem eficientes, competitivas economicamente e haver abundância de recurso.

Porém, nos últimos anos, tem havido uma queda expressiva no aproveitamento do potencial hidroelétrico brasileiro. Tal deve-se ao facto de persistirem questões relevantes relacionadas ao aproveitamento hidroelétrico, tais como os desafios da exploração do potencial remanescente na Amazônia; os elevados custos de investimentos dos projetos de grande porte nos anos iniciais de construção e a distância entre os novos aproveitamentos hidroelétricos e os grandes centros de consumo. Outras questões relacionadas a possíveis entraves a maior expansão da fonte hidráulica estão relacionadas com a ausência de remuneração para os atributos de flexibilidade operativa e armazenamento energético que as hidroelétricas fornecem ao sistema elétrico e o efeito das mudanças climáticas nos regimes hidrológicos e a vulnerabilidade do sistema frente às alterações (EPE, 2018a).

A Figura 5 corrobora com esse perfil indicando assim uma queda significativa da potência contratada de hidroelétricas nos últimos leilões de energia. Portanto, o Brasil para o planejamento de sua matriz elétrica encontra dificuldades na expansão da capacidade instalada de hidroelétricas sendo necessário assim compensação através de outras fontes de geração.

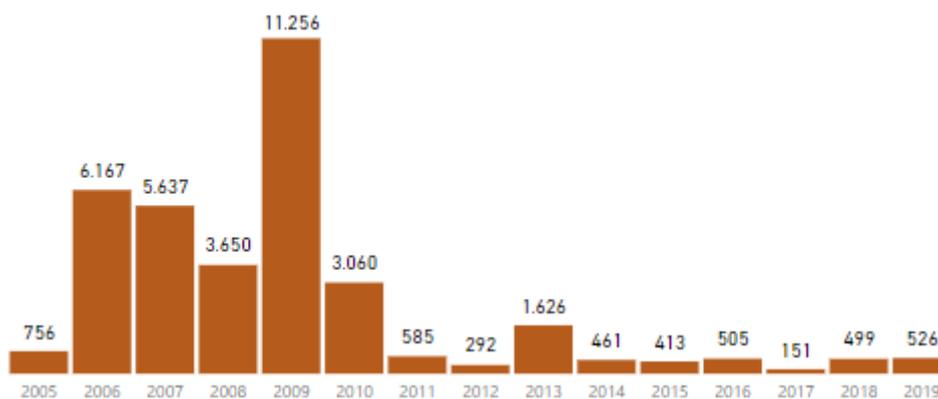


Figura 5: Potência de Hidrelétrica contratada nos últimos leilões de energia

Fonte: ANEEL, 2020

3.2.2 Nucleares

As centrais nucleares representam uma pequena parcela do parque gerador brasileiro. Atualmente há duas centrais em operação (Angra I e II) e mais uma (Angra III) que deve ter suas obras finalizadas nos próximos 5 anos (Agência Brasil, 2019). Embora o Brasil domine o ciclo de combustível nuclear e também tenha posse de uma das maiores reservas de Urânio no mundo não se vê no planejamento perspectivas de ampliação dessa forma de geração de energia (FGV, 2016).

3.2.3 Eólicas

A Energia Eólica representa cerca de 9% do parque gerador instalado no Brasil. O crescimento dessa forma de geração de energia começou em 2009 quando ocorreu o primeiro leilão de energia para contratação exclusiva de fonte eólica. No leilão LER n°. 03/2009 foram contratados 71 empreendimentos que contabilizavam 1.806 MW. Vale ressaltar que o Brasil possui uma das melhores condições de vento e alta competitividade na geração de energia eólica. Essa tecnologia hoje encontra-se consolidada e já conta com um parque instalado de 15,3 GW com perspectivas de ter em 2023 pelo menos 21 GW (Abeólica, 2019). Esse crescimento da geração de energia eólica pode ser observado na Figura 6 que apresenta a evolução da potência contratada nos últimos leilões de energia.

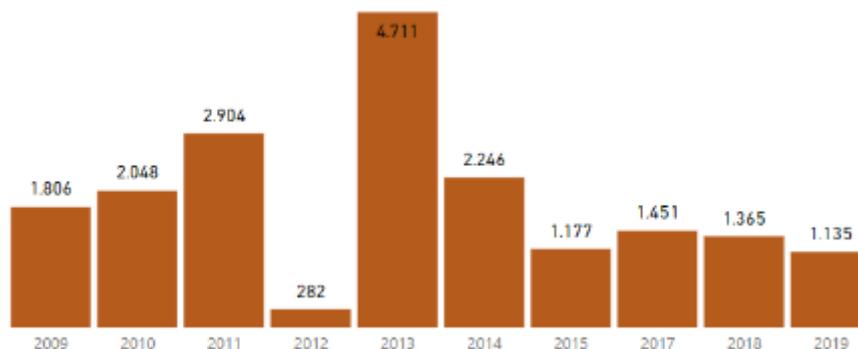


Figura 6: Potência de Eólica contratada nos últimos leilões de energia

Fonte: ANEEL, 2020

3.2.4 Fotovoltaicas

A geração de energia fotovoltaica centralizada ainda é insipiente na matriz elétrica brasileira representando cerca de 1% do parque gerador instalado, muito embora o Brasil possua altos níveis de insolação. A fonte solar foi incluída nos leilões de energia apenas a partir de 2013. Os resultados dos últimos leilões podem ser observados na Figura 7.

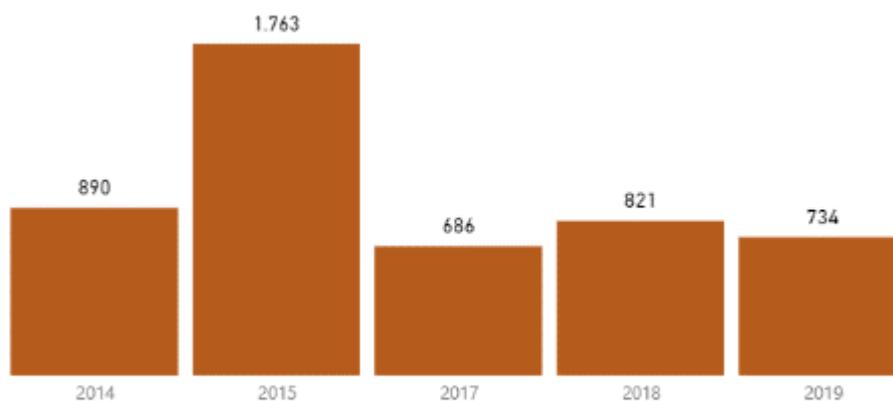


Figura 7: Potência de Fotovoltaica contratada nos últimos leilões de energia

Fonte: ANEEL, 2020

Nos últimos anos, a energia fotovoltaica tem experimentado redução de custos devido à inovação tecnológica, aumento de eficiência e economia de escala. Essa redução de custos também pode ser observada no mercado brasileiro, embora mais tardiamente do que em mercados globais. Conforme pode ser visto na *Tabela 2*, os preços médios da energia comercializada a partir de produção fotovoltaica decresceu de forma acentuada entre os leilões de 2014 até 2019.

Tabela 2: Evolução dos preços médios e de quantidade de energia comercializada nos leilões de energia

Leilão	Projetos contratados	Potência comercializada (MW)	Preço-teto (R\$/MWh)	Preço médio na data do leilão (R\$/MWh)	Preço médio atualizado ¹¹ (R\$/MWh)
LER/2014	31	890	262,0	215,1	282,0
1º LER/2015	30	834	349,0	301,79	364,13
2º LER/2015	33	929	381,0	297,75	353,65
A-4/2017	20	574	329,0	145,7	155,8
A-4/2018	29	807	312,0	118,1	131,2
A-4/2019	6	204	276,0	67,5	67,73
A-6/2019	11	530	209,0	84,39	84,39

Fonte: EPE, 2019b

Portanto, mesmo ainda tímida a energia Solar tem crescido em participação na matriz elétrica brasileira no mercado centralizado sua participação tem crescido de forma significativa nos últimos leilões de energia.

3.2.5 Termoelétricas

As termelétricas ocupam um lugar de importância na matriz elétrica brasileira. As principais fontes de combustível são a biomassa, gás natural, carvão e diesel. Contudo, a maior participação fica por conta do gás natural e da biomassa. Quanto a participação nos últimos leilões de energia as Figuras 8 e 9 representam a potência das centrais vencedoras nos últimos leilões. Entre os anos de 2017 e 2019 é possível visualizar uma grande potência instalada para termelétricas a gás natural. Esses projetos em sua maioria são associados ao formato de geração que tem sido adotado no Brasil aonde termelétricas a gás natural são vinculadas a terminais de GNL.

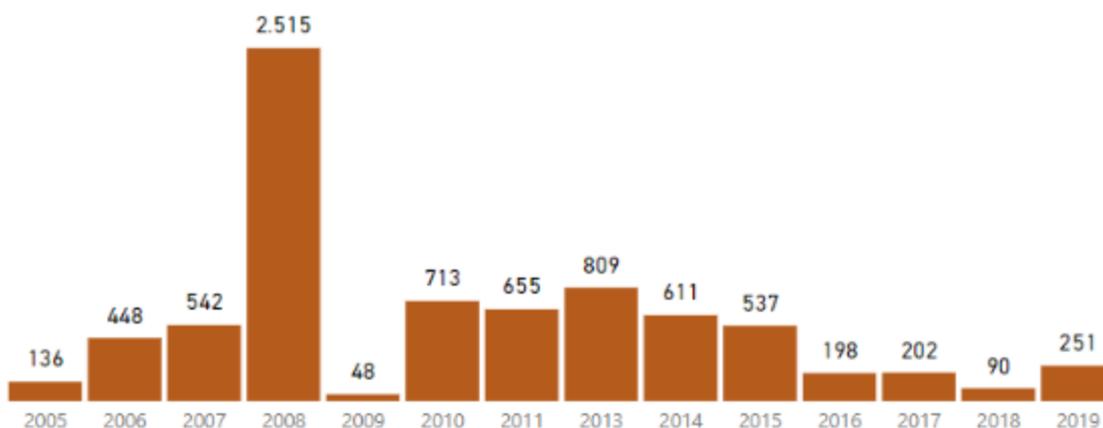


Figura 8: Potência de Biomassa contratada nos últimos leilões de energia

Fonte: ANEEL, 2020

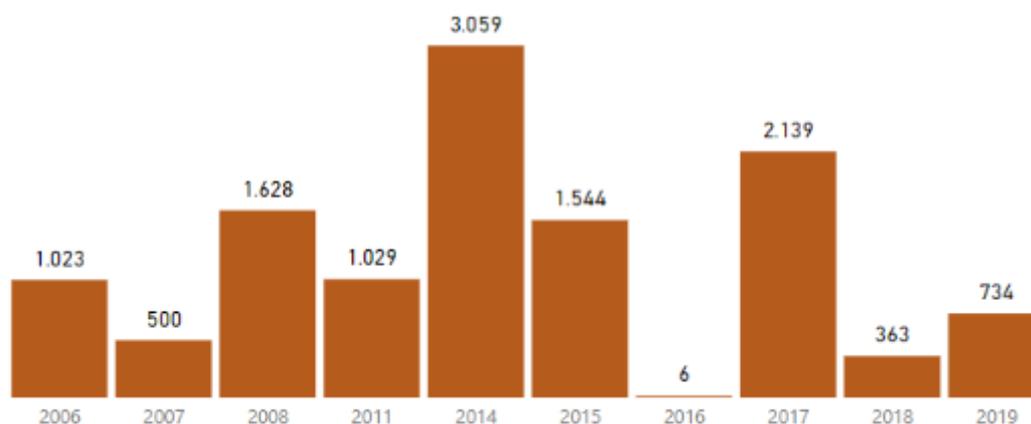


Figura 9: Potência de Térmica a Gás Natural contratada nos últimos leilões de energia

Fonte: ANEEL, 2020

3.3 Geração Distribuída

No Brasil, o conceito de geração distribuída é recente. A Resolução Normativa nº 482 da ANEEL, de 2012, afirma que os consumidores brasileiros podem gerar eletricidade própria a partir de fontes renováveis ou de cogeração qualificada e podem fornecer o excedente à rede de distribuição. A Resolução Normativa nº 687 de 2015 reviu a Resolução nº 482 e foram feitas algumas melhorias para reduzir custos e tempo para ligação de geração distribuída, adequar o sistema de compensação de eletricidade às condições gerais de fornecimento, aumentar o público-alvo e melhorar as informações na conta de energia. As regras em vigor desde março de 2016 definem microgeração distribuída como centrais com potência instalada menor que 75 kW e centrais de

minigeração distribuída com mais de 75 kW e menor ou igual a 5 MW. O sistema de medição adotado é o de medição líquida, onde a energia injetada na rede não é remunerada, mas é gerado um crédito. Esse crédito gerado quando a produção excede o consumo, pode ser utilizado posteriormente no consumo de energia e pode ser compensado em até 60 meses (ANEEL, 2018).

Em janeiro de 2019, o Brasil possuía cerca de 2.147 MW de capacidade instalada em geração distribuída. A fonte que se destaca por corresponder a cerca de 92% da energia instalada é a fotovoltaica, como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3: Diferentes fontes de geração distribuída no Brasil

UNIDADES CONSUMIDORAS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA		
Tipo	Quantidade	Capacidade (kW)
Hidroelétrica	100	96.681,80
Eólica	60	10.360,86
Fotovoltaica	170.528	1.976.624,16
Termoelétrica (Biomassa)	212	62.958,04
Total	170.900	2.146.624,86

Fonte: ANEEL, 2019a

A Figura 10 mostra os principais consumidores de energia gerada por geração distribuída. A maior parte do consumo é direcionada ao setor residencial e comercial.

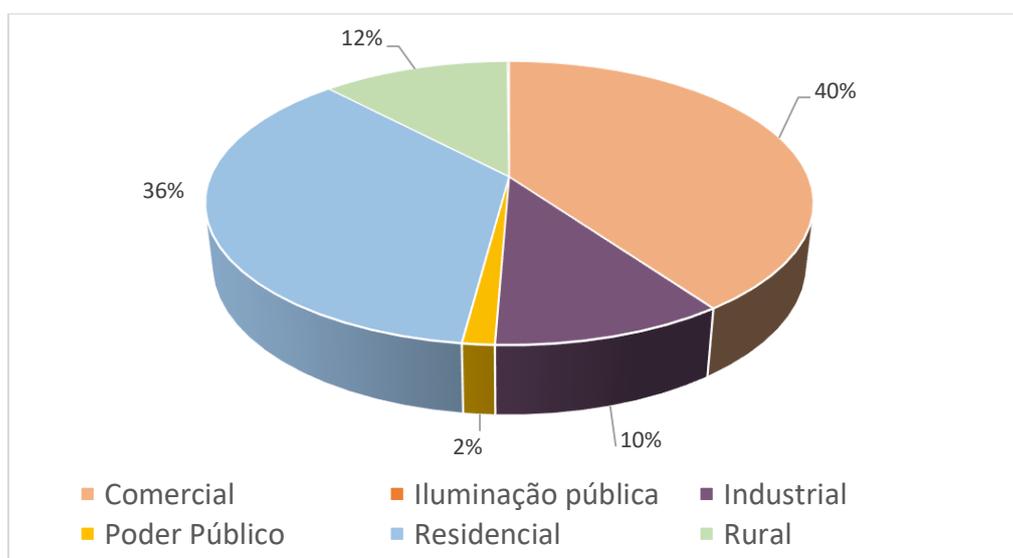


Figura 10: Principais consumidores da energia gerada por geração distribuída no Brasil

Fonte: ANEEL, 2019a

A resolução 482/2012 tinha a previsão de revisão no ano de 2019. Na regra atual, quando a compensação de energia se dá na baixa tensão, quem possui geração distribuída deixa de pagar todas as componentes da tarifa de fornecimento sobre a parcela de energia consumida que é compensada pela energia injetada. As alterações ao sistema de compensação propostas equilibram a regra para que os custos referentes ao uso da rede de distribuição e os encargos sejam pagos pelos consumidores que possuem geração distribuída. Isso vai permitir que a modalidade se desenvolva ainda mais e de forma sustentável (ANEEL, 2019b). O fluxograma indicando as alterações propostas pode ser observado na Figura 11.



Figura 11: Alterações propostas para a Resolução 482/2012

Fonte: ANEEL, 2019b

3.4 O Sistema Elétrico Brasileiro

O setor elétrico brasileiro é composto de um conjunto de instituições para garantir o seu funcionamento adequado. A estrutura do setor pode ser observada na Figura 12. Em seguida é apresentada uma breve descrição das instituições.

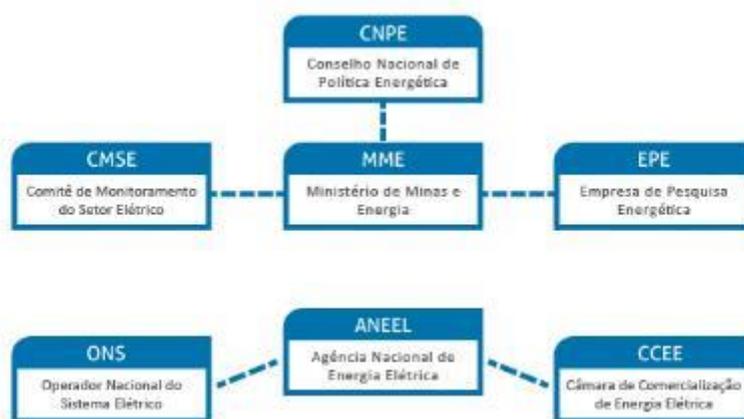


Figura 12: Estrutura do Setor Elétrico Brasileiro

Fonte: CCEE, 2019

O CNPE (Conselho Nacional de Políticas Energéticas) é o órgão de assessoria da Presidência da República responsável pela formulação de políticas nacionais e diretrizes de energia, objetivando, principalmente, o aproveitamento racional dos recursos energéticos do país, a revisão periódica da matriz energética e o estabelecimento de diretrizes para programas específicos. O MME (Ministério de Minas e Energia) é um órgão da administração federal direta responsável pelo planejamento e condução das ações do Governo Federal. O CMSE (Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico) é o grupo responsável por monitorizar e avaliar as condições de abastecimento e o desenvolvimento das atividades de geração, transporte, distribuição, comercialização, importação e exportação de energia elétrica, gás natural, petróleo e seus derivados. A EPE (Empresa de Pesquisa Energética) é uma empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia que tem como objetivo a prestação de serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético.

A ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) foi criada com o objetivo regular e fiscalizar a geração, transporte distribuição e a comercialização de energia elétrica no

país, em conformidade com as políticas e diretrizes nacionais. O ONS (Operador Nacional do Sistema) tem como objetivo o planejamento e o controle centralizado da operação de instalações de geração e transporte de energia elétrica no âmbito do SIN (Sistema Interligado Nacional). O despacho centralizado pelo ONS é realizado com vistas a otimização dos sistemas eletroenergéticos do país. A CCEE (Camara de Comércio de Energia Elétrica) tem como objetivo a viabilização da comercialização de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional, mediante a elaboração e execução de regras e procedimentos de comercialização. A CCEE também é responsável pela contabilização e liquidação das operações realizadas no mercado de curto prazo.

Além dessas entidades o sistema elétrico é composto de diversos outros agentes e por uma cadeia de serviços robusta. O sistema é composto pelas atividades de geração, transporte, distribuição e comercialização. As geradoras produzem a energia, as transmissoras a transportam do ponto de geração até os centros consumidores, de onde as distribuidoras a levam até a casa dos cidadãos. Há ainda as comercializadoras, empresas autorizadas a comprar e vender energia para os consumidores livres (MME, 2019).

Há também a divisão quanto ao ambiente onde é negociado essa energia. Além dos consumidores livres advindos do Mercado Livre há também o Mercado Cativo. O Mercado Cativo e o Mercado Livre existem paralelamente conduzindo as negociações de compra e venda de energia elétrica. A diferença é que no Mercado Cativo, ou Ambiente de Contratação Regulada (ACR), os consumidores são atendidos pelas distribuidoras de energia que possuem concessão para vender energia naquela região. Enquanto isso, no Mercado Livre a compra é feita pelos consumidores diretamente das comercializadoras, através de contratos bilaterais com condições livremente negociadas, como preço, prazo, volume (Beenergy, 2019).

O Mercado Cativo é destinado à compra e venda de energia elétrica entre geradores, importadores de energia e distribuidores, que adquirem energia visando atender à carga dos consumidores que não têm a opção de escolher seu próprio fornecedor, como residências, supermercados e comércios em geral. Nesse mercado, as distribuidoras contratam energia das geradoras por meio de leilões autorizados pelo governo e órgãos do setor que regulam, contabilizam e instituem regras (Beenergy, 2019).

Quanto aos leilões de energia, são realizados para expansão da oferta de energia elétrica. O leilão de energia elétrica foi um mecanismo introduzido na reforma do setor elétrico e consolidado com a efetiva participação de várias instituições do Setor Elétrico Brasileiro.

Há vários tipos de leilão de energia, porém, destaca-se três tipos principais conforme explicado a seguir (CCEE, 2019):

- **Leilão de Energia de Reserva:** Esse tipo de leilão visa a contratação da energia de reserva e foi criado para elevar a segurança no fornecimento de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), com energia proveniente de centris especialmente contratadas para esta finalidade seja de novos empreendimentos de geração ou de empreendimentos existentes.
- **Leilão de Energia Nova:** O leilão de energia nova tem como finalidade atender ao aumento de carga das distribuidoras. Neste caso são vendidas e contratadas energia de usinas que ainda serão construídas. Este leilão pode ser de dois tipos: A -5 (centrais que entram em operação comercial em até cinco anos) e A -3 (em até três anos).
- **Leilão de Energia Existente:** O leilão de energia existente foi criado para contratar energia gerada de centrais já construídas e que estejam em operação, cujos investimentos já foram amortizados e, portanto, possuem um custo mais baixo.

3.5 O Brasil e os Objetivos do Acordo de Paris

O Brasil, signatário do Acordo de Paris, se comprometeu em sua NDC (Contribuição Nacionalmente Determinada) à redução de 37% de suas emissões em 2025 (para todo o conjunto da economia), tendo como base as emissões de 2005, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030. Para isso, o país se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética

em 2030. A NDC do Brasil corresponde a uma redução estimada em 66% em termos de emissões de gases efeito de estufa por unidade do PIB (intensidade de emissões) em 2025 e em 75% em termos de intensidade de emissões em 2030, ambas em relação a 2005 (MMA, 2020).

É importante observar que não há distribuição formal de metas entre os diferentes setores, de forma que o país é livre para alocar seus esforços nas medidas mais custo-efetivas, podendo, portanto, atingir as metas por diferentes caminhos. Vale ressaltar que o Brasil ainda tem um caminho longo a percorrer para atingir padrões socioeconômicos comparáveis aos de países desenvolvidos. Por esse motivo, o consumo de energia per capita deverá aumentar consideravelmente até 2030. Portanto, não é esperada tendência de redução das emissões brutas do setor de energia. As emissões do setor serão crescentes, mesmo contando com ampla participação de fontes renováveis (EPE, 2020).

4. Simulação do Sistema Elétrico Brasileiro ano 2018

Neste capítulo será apresentada a simulação do Sistema Elétrico Brasileiro com a ferramenta EnergyPLAN. Para garantir que o modelo escolhido simule o sistema de energia corretamente, é necessário simular um ano de referência e comparar os resultados com os dados reais desse ano. Se os valores de saída de EnergyPLAN estiverem de acordo com os dados históricos, a validade do modelo é verificada. O modelo de referência será o ponto de partida para a avaliação das alterações nos próximos anos.

4.1 Criação do modelo de referência no EnergyPlan

O ano escolhido como cenário de referência foi o de 2018. Tantos os dados de capacidade instalada por fonte de energia, como os dados de geração horária estão presentes nos documentos nomeados de Boletim de Operação e do Histórico de Operação disponibilizados pelo ONS (ONS, 2019).

A Figura 13 retrata as etapas necessária para a criação do modelo de referência para o Energy Plan. Em um primeiro momento é realizada a recolha de dados do site da ONS e no site do MME. Foram utilizados os dados de capacidade instalada, dados de geração horária para cada fonte de energia, eficiência para termelétricas e fator de capacidade para as fontes renováveis. Para os dados de geração de energia o software necessita receber uma distribuição horária com um total de 8784 valores ao longo do ano como parâmetro de cálculo. Esse número de dados é compatível com ano bissexto, porém, a inclusão de mais 24 horas em anos não bissextos não altera os resultados. Em uma etapa posterior, após a recolha, os dados são organizados e colocados no formato correto para então, na próxima etapa, ocorrer o input dos dados no programa. Após isso, os resultados são gerados e então são comparados os dados simulados pelo Energy Plan com os resultados reais referentes ao ano de 2018.

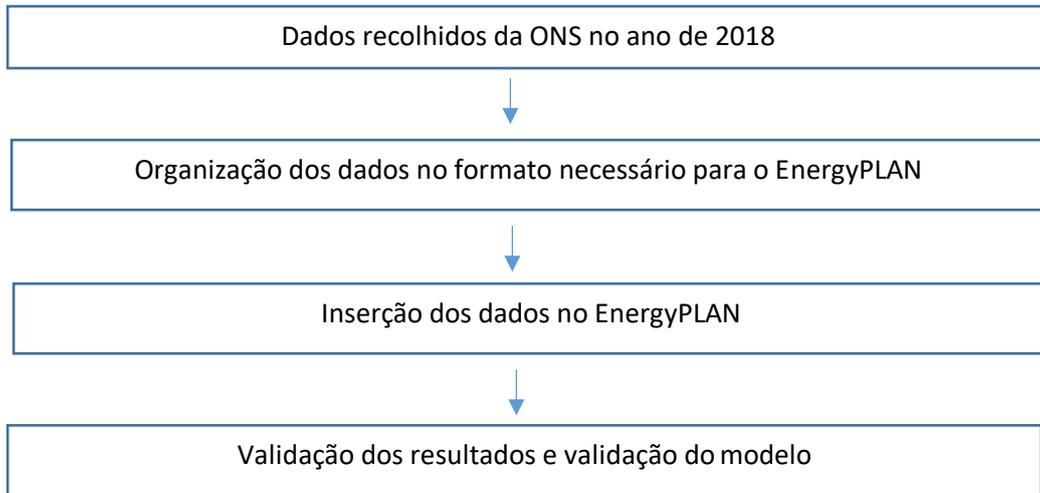


Figura 13: Fluxograma das etapas necessária para a criação do modelo no EnergyPLAN

Fonte: Elaboração Própria

4.2 Dados Utilizados

O primeiro cenário abordado é a simulação referente ao ano de 2018 e calibração do modelo para se obter um modelo de referência que servirá como base para as simulações seguintes.

O software necessita receber dados fidedignos para que a resposta seja fiável. Para tal optou-se por utilizar os dados disponibilizados no site da ONS nos documentos do Boletim de Operação e do Histórico de Operação e os dados disponíveis no Boletim de Monitoramento do Setor Elétrico publicado pelo MME.

O primeiro dado inserido foi a procura de energia elétrica no ano de 2018. Esse dado foi retirado do site da ONS no item Carga de Energia (ONS, 2019). No ano de 2018 o Sistema Elétrico Brasileiro apresentou um consumo de energia elétrica de 583.057 TWh conforme pode ser observado na Figura 14. Destaca-se que o consumo nos setores industrial, comercial e residencial corresponde por 80% da energia elétrica disponibilizada em 2018 (EPE,2019a).

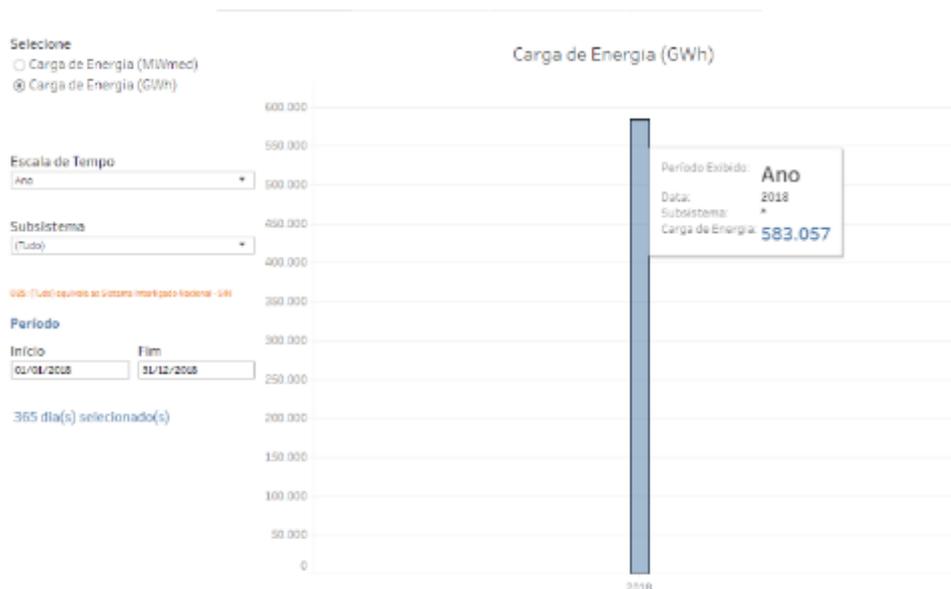


Figura 14: Procura de energia em 2018

Fonte: ONS, 2019

Os itens referentes à capacidade instalada foram retirados do Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico publicado mensalmente pelo Ministério de Minas Energia (MME, 2019). A Tabela 4 apresenta um resumo dos tipos de central e as respectivas capacidade instaladas em dezembro de 2018. Para a simulação referente ao ano de 2018 não foram consideradas informações referentes a Geração Distribuída por representar menos de 1% da capacidade total deste ano.

Tabela 4: Capacidade instalada das centrais brasileiras

Tipo	Capacidade (MW)	%
Hidroelétrica	104.139	64%
Termoelétrica	40.523	25%
Nuclear	1.990	1%
Eólica	14.391	9%
Fotovoltaica	1.798	1%
Total	162.841	100%

Fonte: ONS, 2019 ; MME, 2019

Alguns outros dados são necessários para a realização das simulações no Energy Plan. Um deles é o Fator de Capacidade (FC) que embora seja também calculado internamente pelo sistema, pode ser reajustado por um fator aplicado no próprio sistema do EnergyPLAN. Para as centrais eólicas e fotovoltaicas pode observar-se a evolução do

fator de capacidade na Figura 15. O Fator de Capacidade médio no ano de 2018 para as centrais eólicas e as fotovoltaicas foi de 0,42 e 0,24, respetivamente.

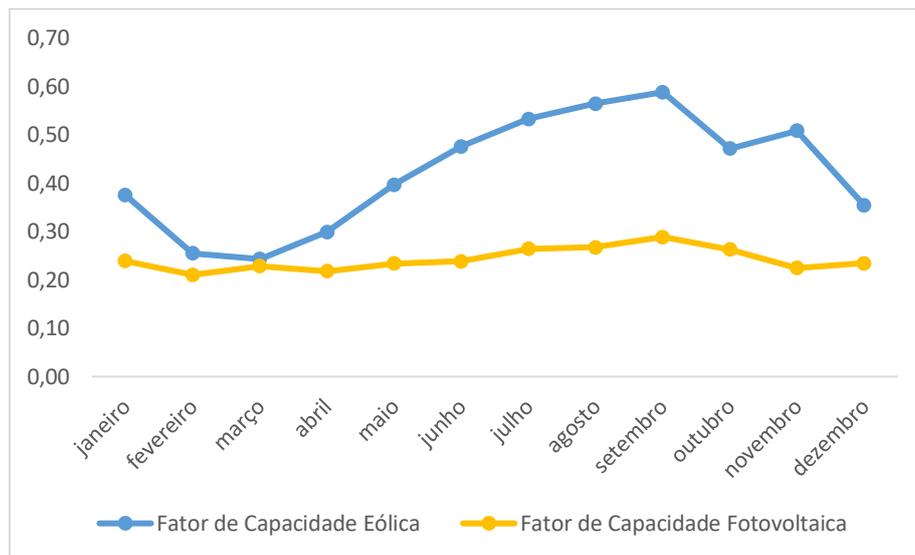


Figura 15: Fator de capacidade mensal no ano de 2018

Fonte: ONS, 2019

Já para as hidroelétricas a fio-de-água foi utilizado o valor de 0,55 (EPE, 2018c). Como os Fatores de Capacidade apontados foram diferentes dos calculados pelo EnergyPLAN adotou-se um fator de correção conforme pode ser observado na Figura 16.

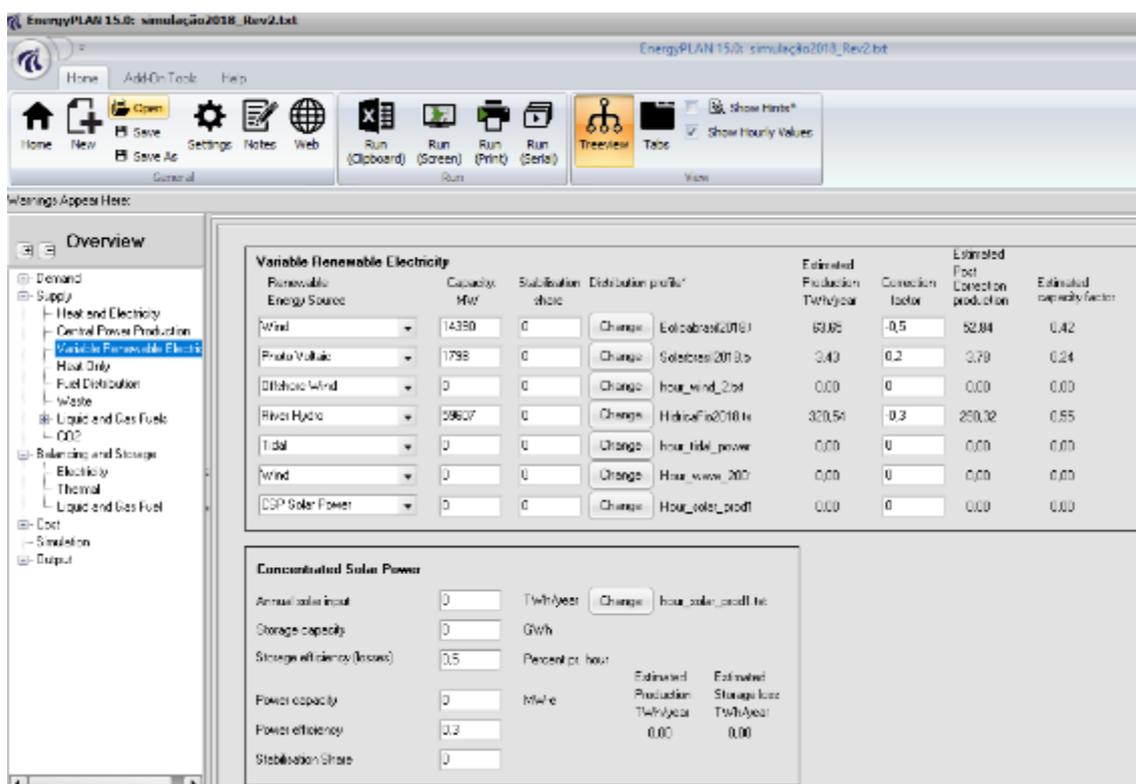


Figura 16: Tela do EnergyPLAN e fatores aplicados para correção do Fator de Capacidade

Fonte: EnergyPLAN, 2020

Para as centrais termoelétricas, nucleares e hidroelétricas com reservatório é necessário introduzir o valor de eficiência. Para as centrais nucleares e hidrelétricas com reservatório optou-se por manter os valores *default* apresentados pelo EnergyPLAN de 33% e 60%, respectivamente. Para as termoelétricas, como o sistema não apresenta a possibilidade de inserir cada tipo de central separadamente foi feita uma média ponderada com os dados de capacidade instalada das centrais por fonte de combustível e suas respectivas eficiências. Esses dados podem ser observados na Tabela 5. Como valor médio foi encontrado para a capacidade instalada total de 40.523 MW uma eficiência de 44%.

Tabela 5: Detalhamento das termelétricas por capacidade instalada e eficiência

Tipo Combustível	MW	Eficiência
Óleo Diesel	9.361	47%
Carvão	3.727	34%
Ciclo Combinado - Gás	7.590	56%
Ciclo Aberto - Gás	4.631	38%
Biomassa	14.559	40%
Eficiência Média das Termelétricas		44%

Fonte:EPE, 2018c

Quanto à divisão entre hidroelétrica a fio-de-água e a de reservatório foi primeiramente utilizado o dado de 2016 de 44.586 MW de capacidade instalada para hidroelétricas de reservatório e 52.340 MW para as de fio-de-água (Dranka et al, 2018). Esses valores foram comparados com a capacidade instalada de hidroelétricas em 2018 de 104.139 MW. A diferença, 7.213 MW, foi somada ao total das centrais hidroelétricas a fio-de-água totalizando assim 59.553 MW de capacidade instalada para as de fio-de-água e 44.586 MW para as de reservatório. Essa consideração foi feita levando em consideração que não houve construção de hidroelétricas com reservatório nos últimos anos devido a restrições ambientais.

Já em relação à capacidade instalada referente a Geração Distribuída, a mesma foi considerada nas simulações do ano de 2018 por representar menos de 1% da capacidade instalada no referido ano.

Quanto aos dados de geração horária, outro input importante do EnergyPLAN, também foram retirados do Histórico Operacional disponibilizado pelo ONS (ONS, 2020). Os dados referentes a hidroelétricas foram adaptados já que os dados ou são disponibilizados central a central ou são disponibilizados consolidados. Os dados consolidados representam a soma da geração horária tanto das centrais a fio-de-água como das centrais com reservatório. Portanto, foram recolhidos os dados de geração horária referente ao ano de 2018 central a central, para as hidroelétricas com reservatório e posteriormente os dados foram somados formando assim as informações de geração horária para as centrais com reservatório. Para as centrais a fio-d-água foram recolhidos os dados da geração horária consolidada para o ano de 2018 e foram subtraídos os dados obtidos anteriormente das centrais com reservatório. Com isso foi gerado a distribuição horária dos dois tipos de central.

Por fim, na Figura 17 apresenta-se o resumo da metodologia utilizada, bem como as fontes de informação. Além disso, esse esquemático procura mostrar a integração entre o modelo de referência criado para o ano de 2018 e os cenários simulados para os anos de 2020, 2030 e 2040.

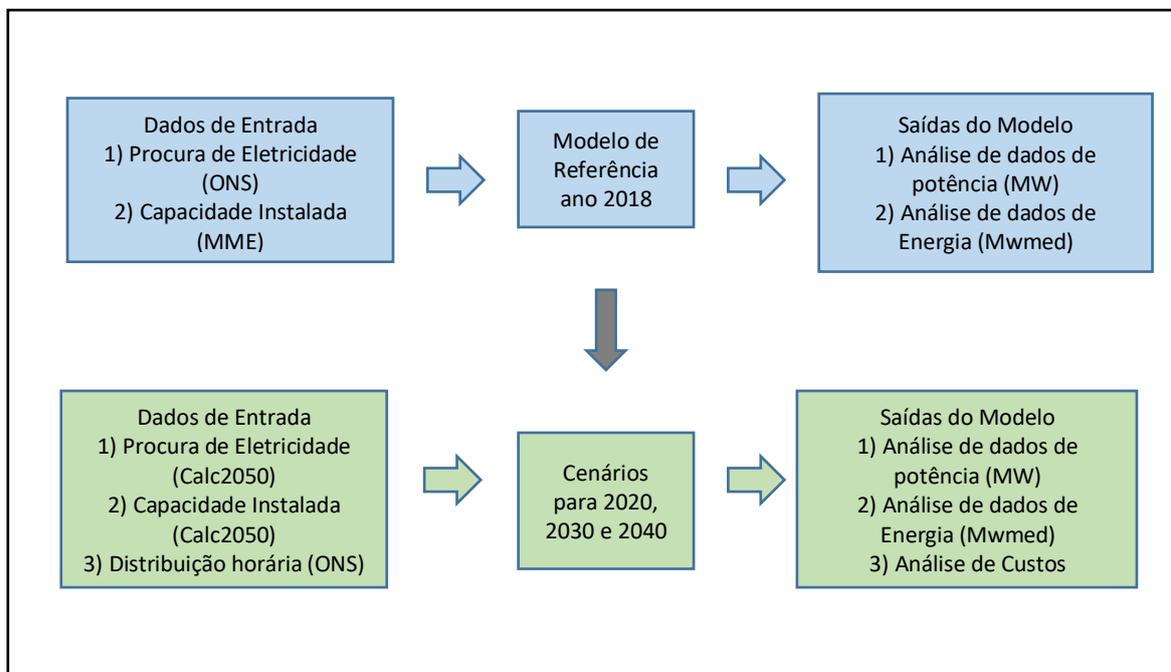


Figura 17: Metodologia da pesquisa

Fonte: Elaboração própria adaptado de Dranka, 2018.

4.3 Resultados

Após preenchimento no EnergyPLAN dos dados explicados na sessão anterior foi então realizada a simulação. Os dados gerados foram exportados e comparados com os resultados de operação referentes ao ano de 2018. Quanto ao quadro geral de geração de energia, a maior parte da geração foi de origem hidroelétrica, representando 76% da geração total, conforme pode ser observado na Figura 18. Quanto ao percentual de geração a partir de fontes renováveis, este corresponde a 85% do total gerado em 2018. Já a geração de energia a partir de fontes renováveis excluindo as hidroelétricas, ou seja, solar e eólica, esta foi de 8%.

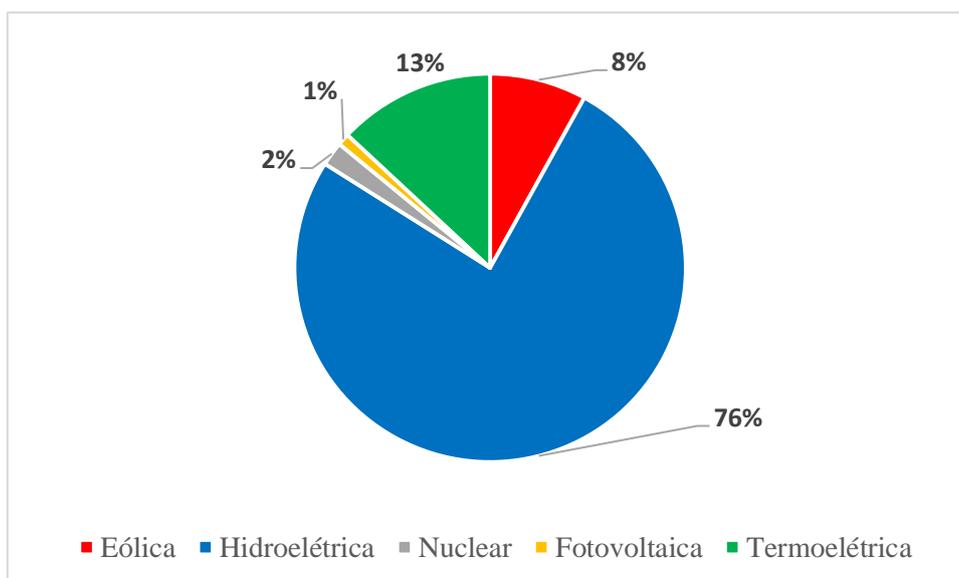


Figura 18: Geração de energia elétrica por fonte em 2018

Com objetivo de avaliar a adequação do modelo foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos no EnergyPLAN e os resultados reais de operação fornecidos pelo ONS. O resultado mensal consolidado para todas as fontes pode ser visto na Figura 19. Mensalmente foi obtido como resultado diferenças pequenas, conforme se pode observar na Tabela 6 sendo o erro máximo o referente ao mês de dezembro, que foi de aproximadamente 6%.

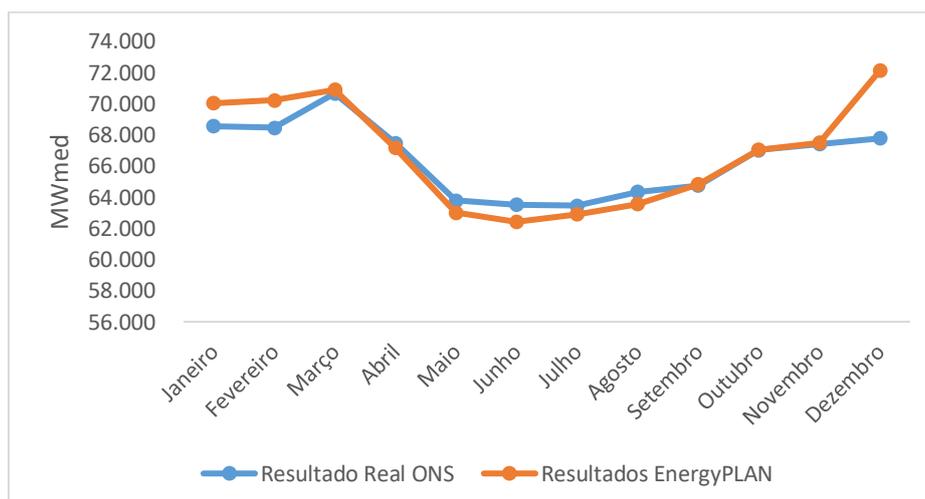


Figura 19: Comparação mensal total entre as simulações do EnergyPLAN e os dados da ONS

Tabela 6: Tabela comparativa entre os resultados das simulações no EnergyPLAN e os dados da ONS.

Mês	Eólica ONS	Eólica EP	%	Hidroelétrica ONS	Hidroelétrica EP	%	Nuclear ONS	Nuclear EP	%	Solar ONS	Solar EP	%	Térmica ONS	Térmica EP	%
Janeiro	4665	4794	-3%	52916	53254	-1%	1882	1847	2%	236	322	36%	8861	9622	-9%
Fevereiro	3185	3113	2%	55293	56436	-2%	1227	1185	3%	235	320	36%	8527	8842	-4%
Março	3095	3055	1%	57003	55856	2%	1150	1172	2%	267	360	35%	9147	10442	14%
Abril	3724	3822	-3%	52193	51266	2%	1978	1942	2%	275	365	33%	9306	9663	-4%
Mai	4988	5343	-7%	46011	45646	1%	2009	1973	2%	310	407	31%	10470	9553	9%
Junho	6044	6578	-9%	41330	40785	1%	2009	1972	2%	320	419	31%	13816	12588	9%
Julho	6806	7686	13%	39193	37584	4%	2007	1970	2%	353	460	30%	15105	15211	-1%
Agosto	7245	8374	16%	39411	35341	10%	2022	1985	2%	361	469	30%	15296	17399	14%
Setembro	7698	8864	15%	38805	35604	8%	2012	1975	2%	411	518	26%	15829	17880	13%
Outubro	6434	7031	-9%	45941	42369	8%	1891	1837	3%	390	485	24%	12380	15315	24%
Novembro	7217	7949	10%	50685	48355	5%	1366	1342	2%	379	471	24%	7770	9057	17%
Dezembro	5115	5490	-7%	54214	55725	-3%	1871	1857	1%	451	557	23%	6141	6491	-6%

Quanto as comparações por fonte e por mês a análise pode ser observada na Tabela 7 e no Figura 20. Os desvios são um pouco maiores e foram entre -10% a até 36%.

Tabela 7: Comparação entre as fontes geradoras por mês para 2018

Mês	Resultado Real ONS	Resultados EnergyPLAN	Diferença
Janeiro	68.560	70.039	2%
Fevereiro	68.467	70.221	3%
Março	70.662	70.897	0%
Abril	67.476	67.175	0%
Mai	63.788	63.018	-1%
Junho	63.519	62.417	-2%
Julho	63.464	62.910	-1%
Agosto	64.334	63.569	-1%
Setembro	64.755	64.842	0%
Outubro	67.035	67.038	0%
Novembro	67.417	67.500	0%
Dezembro	67.792	72.134	6%
Total	797.270	801.760	1%

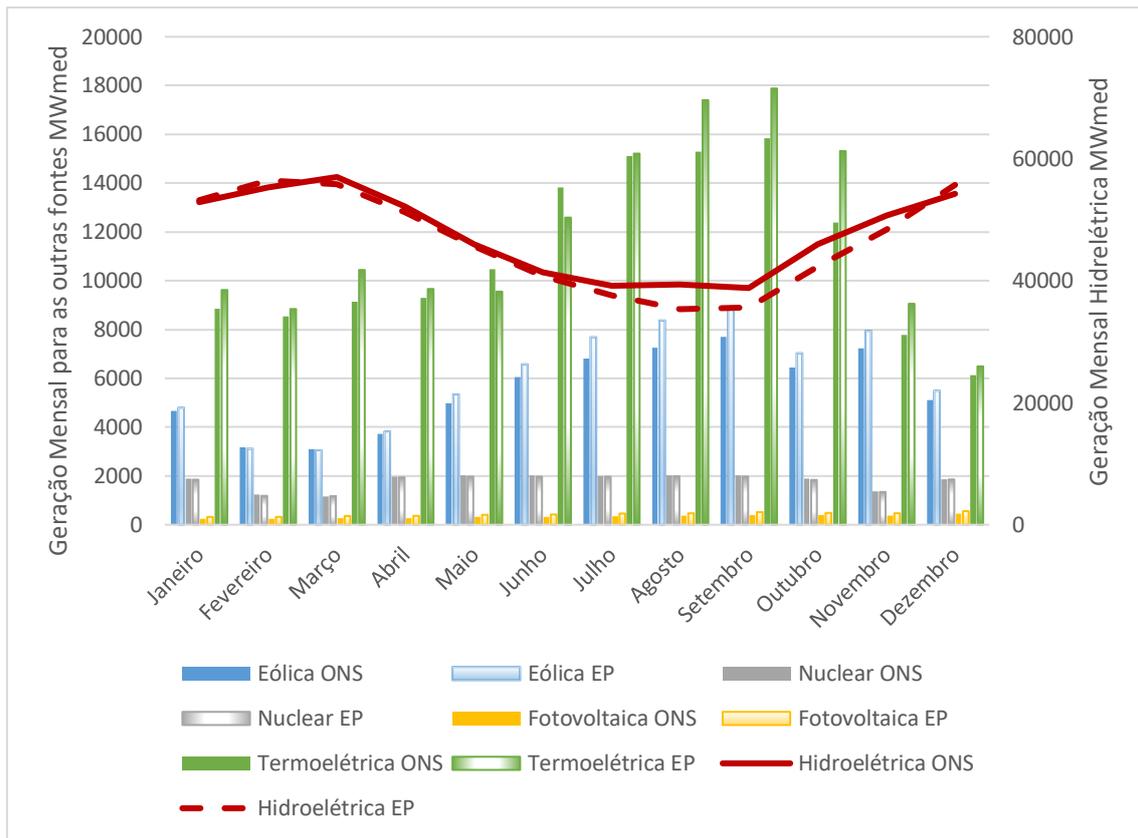


Figura 20: Resultado gráfico com a comparação entre as fontes geradoras por mês para 2018

A geração hidroelétrica e a nuclear foram as que apresentaram menores desvios. Enquanto que a nuclear não apresentou desvios maiores do que 3%, a hidroelétrica apenas apresentou um desvio mais acentuado no mês de agosto (10%). Quanto à solar e à eólica foram registados desvios mais acentuados, principalmente na fonte solar. O ajuste para o fator de capacidade de 24%, conforme dados da ONS causou essa maior diferença entre os dados reais e os simulados. Já os dados referentes à geração termoelétrica, também representaram um desvio acentuado já que é um despacho complementar as demais fontes, portanto responde as outras variações.

Embora as simulações apresentem algumas diferenças significativas quando comparados mensalmente observa-se que anualmente as diferenças são muito pequenas. Conforme observado por Dranka et al, 2018 as diferenças mensais, no caso brasileiro, podem ser devidas às incertezas e também pelas estratégias de despacho adotadas pelo operador nacional do sistema (ONS) que pode não ser totalmente capturado pelo EnergyPLAN. Além disso, ressalta-se a dimensão continental do Brasil e a complexidade do seu sistema elétrico, que pode não ser completamente interpretada pelo modelo do EnergyPLAN.

Portanto, as diferenças apontadas são consideradas aceitáveis ainda mais quando é considerado a natureza do estudo que são as simulações a longo prazo. Portanto, considerou-se o modelo apto para realizar as demais simulações para os anos de 2020, 2030 e 2050.

5. Simulação do Sistema Elétrico Brasileiro ano 2050

Neste capítulo será apresentada a simulação do Sistema Elétrico Brasileiro para o ano de 2050 com os dados obtidos na ferramenta Calculadora 2050 após as simulações com a ferramenta EnergyPLAN. Para garantir que o modelo escolhido simula o sistema de energia corretamente, é necessário simular um ano de referência e comparar os resultados com os dados reais desse ano. Se os valores de saída de EnergyPLAN estiverem de acordo com os dados históricos, a validade do modelo é verificada. O modelo de referência será o ponto de partida para a avaliação das alterações nos próximos anos.

5.1 Criação do modelo para o horizonte de 2050:

Para o ano de 2050 foram utilizados os dados obtidos através da Calculadora 2050. Essa é uma ferramenta que permite a construção de diferentes cenários energéticos para o horizonte até 2050. Para cada cenário, a calculadora apresenta seu impacto em termos de emissões de gases de efeito estufa (GEE), composição da matriz energética, dependência externa de energia, representados em gráficos e tabelas gerados automaticamente. Através do balanço entre oferta e procura de energia e de medidas de expansão da oferta e de medidas de gestão da procura, a Calculadora 2050 permite identificar uma série de cenários possíveis para o futuro (EPE, 2019c).

A ferramenta foi desenvolvida inicialmente pelo governo do Reino Unido, e já foi adaptada para países como China, Índia, Colômbia, México, África do Sul, Japão, Coreia do Sul, Bélgica, entre outros. A Calculadora brasileira foi desenvolvida pela EPE, com o suporte do Departamento de Energia e Mudanças Climáticas do Reino Unido (atual BEIS) e da Embaixada Britânica no Brasil. Os cenários de oferta e procura foram elaborados pela COPPE/UFRJ conjuntamente com a EPE (EPE, 2019c).

A calculadora 2050 foi utilizada tanto para projeções de procura até 2050 quanto de capacidade instalada para as centrais geradoras de energia. Usualmente a mesma permite construções de cenários através da escolha de opções de penetração de energia renovável. As classificações variam entre pouco esforço, médio esforço ou grande esforço para o aumento de cada tecnologia até o horizonte de 2050.

É importante ressaltar que a calculadora não é um instrumento de política energética do Brasil. O documento que define as políticas energéticas brasileiras é o Plano Nacional de Energia (PNE). O PNE é o estudo fundamental para o planejamento de longo prazo do setor energético do país, avaliando tendências na produção e no uso da energia e balizando as estratégias alternativas para expansão da oferta de energia nas próximas décadas (EPE, 2018b).

Os estudos de planejamento de longo prazo são a base para a formulação de políticas públicas que têm impacto na estratégia nacional para a expansão da oferta de energia com vistas ao atendimento da procura, observados: os objetivos básicos de segurança energética, universalização do acesso da população aos serviços energéticos, geração de emprego e rendimentos, redução das desigualdades regionais, fortalecimento do planejamento, desenvolvimento tecnológico nacional, diversificação da matriz energética (MME, 2020).

A última edição do PNE foi lançada em 2007 (PNE 2030). Desde a publicação, ocorreram alterações significativas tanto em âmbito doméstico quanto internacional, trazendo a necessidade de reavaliação da evolução do setor de energia nacional em um horizonte de longo prazo (MME, 2020). O PNE 2050 está em estágio de finalização, mas apenas com expectativa de lançamento no primeiro trimestre do ano de 2020. Portanto, na ausência do PNE 2050 foi escolhido utilizar os dados da Calculadora 2050 para realizar os estudos nessa dissertação.

5.2 Procura de Energia Elétrica:

A procura elétrica é um dos dados necessários para realizar as simulações no EnergyPLAN. Foi escolhido um cenário de procura com pouca evolução tecnológica do cenário atual visto que não há até o momento sinalizações claras de ganho em eficiência energética ou medidas de gestão da procura para o Brasil nos próximos anos. Portanto, no cenário escolhido foi considerado que não haverá ganho em eficiência energética para o setor residencial, agropecuário e para o setor comercial. Para o setor industrial espera-se um ganho de eficiência entre 4 e 5%. A Tabela 8 apresenta o resultado da Calculadora com a procura até 2050 com o cenário escolhido. Os valores totais são os que foram utilizados no EnergyPLAN na aba de procura.

Tabela 8: Procura Setorial e Total até o ano de 2050 em TWh/ano.

Setor	2013	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Transporte de passageiros	2	2	2	3	3	4	5	5	6
Residencial	124	126	170	207	251	291	338	374	415
Comercial/ público	126	137	167	220	282	349	430	518	625
Indústria	210	202	240	295	350	406	467	512	564
Agropecuária	24	27	33	41	47	55	64	72	80
Setor energético	29	36	44	51	58	64	67	68	70
Total	515	530	658	816	993	1.169	1.369	1.550	1.760

Na Figura 21 é apresentada a evolução da procura. A taxa de crescimento observa ao longo desse período foi de 6,3 %/ano. O valor referente a 2018 trata-se de um valor realizado enquanto que para os demais anos trata-se de um valor obtido através das simulações da Calculadora 2050.

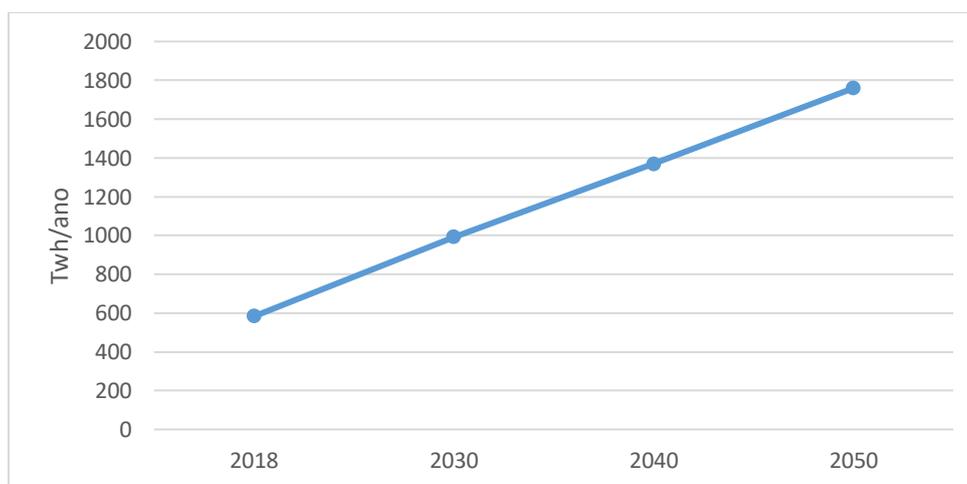


Figura 21: Evolução da procura de energia elétrica

5.3 Oferta de Energia Elétrica:

Para a oferta, a Calculadora possui alguns níveis de classificação para a inserção das diferentes fontes na matriz elétrica brasileira em 2050. Esses níveis podem variar de:

- 1 - Não há adição de oferta de uma determinada fonte até 2050;
- 2 - Pequeno esforço para adição de oferta de uma determinada fonte até 2050;
- 3 - Significativo esforço para adição de oferta de uma determinada fonte até 2050.

Para essa dissertação foi utilizado o cenário 3, ou seja, de significativo esforço para adição de oferta de uma determinada fonte até 2050, para as fontes eólica, fotovoltaica, aproveitamento de biomassa e de biogás e aproveitamento de bagaço de origem sucroenergética. A seguir serão detalhadas as premissas adotadas para cada um dos tipos de fontes de geração elétrica.

A geração eólica onshore tornou-se uma fonte muito competitiva e a sua consolidação está cada vez maior. Logo, é esperado que a tecnologia eólica *onshore* seja adotada de forma significativa até 2050. O nível 3 para eólica *onshore* considera a premissa em que se diz que fontes intermitentes podem participar em até 20% da geração de eletricidade no país sem necessidade de grandes investimentos de adaptação de infraestrutura.

A geração elétrica solar tem crescido substancialmente nos últimos anos, especialmente a fotovoltaica. No Brasil, a fonte ainda apresenta um pequeno papel na matriz energética. Porém, no curto prazo e médio prazo, há ainda a expectativa de novos leilões por produto, o que deve impulsionar ainda mais sua capacidade, assim como o constante crescimento de microgeradores. O Nível 3 considera um crescimento substancial dessa fonte no Brasil com a entrada em operação de 2.500 MW a cada 5 anos com início em 2020, com aumento para 10 GW a partir de 2035. Considera também grandes incentivos para Geração Distribuída, com alcance em classes de baixo rendimento, chegando a 55 GW no setor residencial e 18 GW no de comércio e indústria. A capacidade total instalada até 2050 seria de 124 GW, sendo 51 GW em geração centralizada e 73 GW em geração distribuída.

O bagaço da cana-de-açúcar destaca-se entre os combustíveis da classe biomassa com 81% da capacidade térmica a biomassa em operação atualmente no país. O aproveitamento da biomassa de cana-de-açúcar ocorre predominantemente no

autoconsumo do setor sucroalcooleiro. O que sobra de bagaço que não é utilizado na própria central é chamado de excedente. Essa quantidade de bagaço excedente é disponibilizada de acordo com a eficiência energética da central. Excedentes de bagaço entre 30 e 50% do total do bagaço obtido no processamento da cana podem ser atingidos através da otimização do sistema de produção de vapor e energia elétrica da central. Excedentes superiores poderão ser obtidos com o aproveitamento da palha, sendo estimados que poderão atingir valores de até 75% do bagaço gerado (NovaCana, 2014).

Para o Nível 3 da Calculadora 2050 admite um aproveitamento do excedente de bagaço para fins energéticos de 70% em 2050. Para as restantes opções de biomassa e para o Biogás o Nível 3 prevê um aproveitamento de 50% de biomassa e 20% de biogás para a geração de energia elétrica.

Já as fontes hídricas, nuclear e termoeletricas foram classificadas como Nível 1, ou seja, sem adição de oferta até 2050. Para a energia hidroelétrica é considerado que apenas a capacidade instalada das centrais em construção será adicionada à matriz elétrica brasileira totalizando 19 GW adicionais, atingindo 105 GW até 2050.

Quanto a energia nuclear não se considera a expansão do parque nuclear brasileiro para além da central de Angra 3. Essa central, embora esteja com a obra atualmente parada, conta com uma capacidade líquida prevista de 1,36 GW. A central de Angra 1, com um tempo útil de operação de 60 anos, será descomissionada em 2045, não estando mais em operação em 2050. A potência nuclear total instalada no país em 2050 será, então, equivalente à operação das centrais Angra 2 e 3, totalizando 2.785 MW.

Quanto às centrais termoeletricas, o nível 1 considera que não serão instaladas novas centrais a derivados de petróleo, e que a partir de 2025 todas as centrais existentes seriam descomissionadas. Portanto, a potência em 2050 é nula. Para as centrais a carvão, o nível 1 considera as atuais centrais em operação com carvão, e que a capacidade instalada se manteria constante com 3,2 GW. Para as centrais a gás natural o nível 1 assume apenas a geração elétrica advinda das térmicas a gás que já se encontram atualmente em operação ou em construção. Neste caso, a capacidade instalada se limita a 13 GW até 2050.

Vale ressaltar que embora as termoeletricas a gás natural tenham sido classificadas para não haver adição de oferta, quando há deficit de oferta a metodologia da calculadora direciona toda a diferença entre oferta e a procura para geração Termoeletrica a Gás

Natural. Na Figura 22 pode ser observado o resultado gráfico da calculadora 2050 para oferta de energia elétrica.

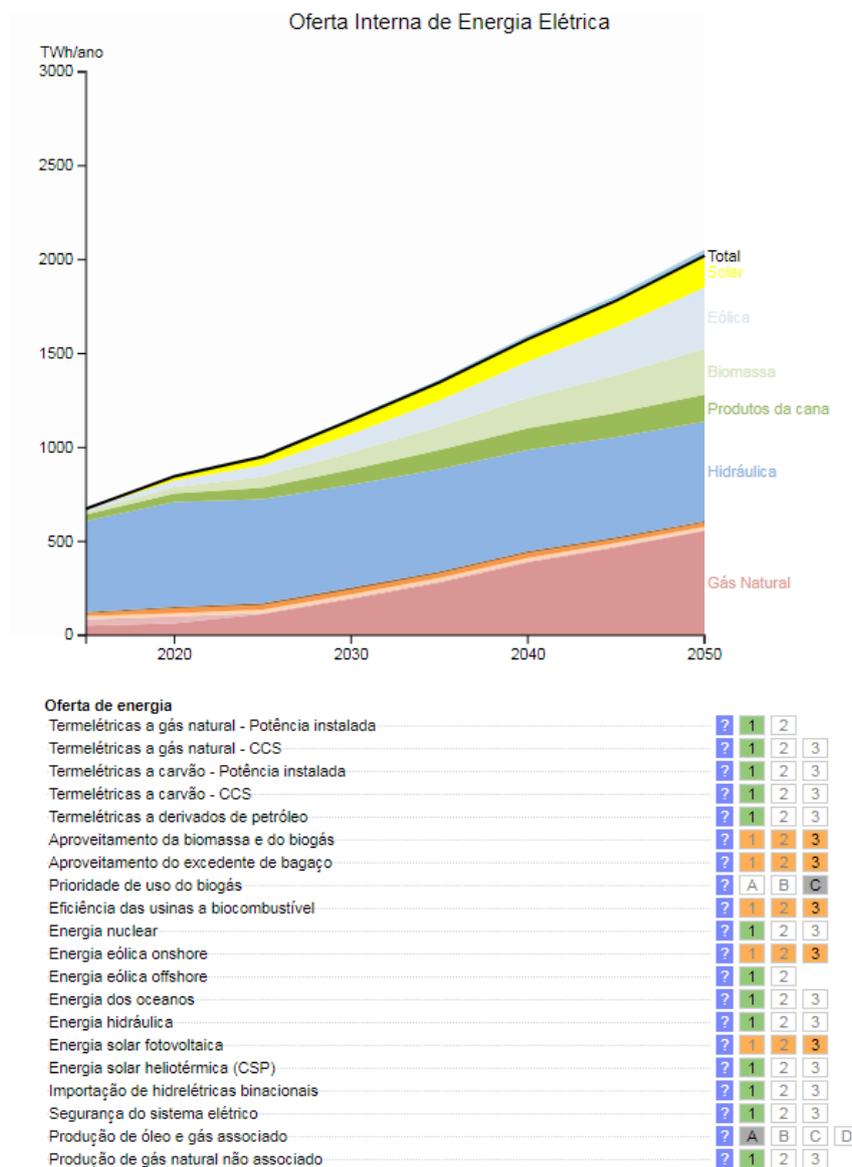


Figura 22: Resultado da Calculadora 2050

Além da interface gráfica é possível ter acesso a um banco de dados em formato de uma folha excel com mais detalhes. Nessa folha são apresentadas as capacidades instaladas para cada fonte de energia elétrica de acordo com os parâmetros escolhidos conforme pode ser visto na Tabela 9. Os dados a serem inseridos no EnergyPLAN foram retirados desta tabela e reorganizados conforme mostra a Tabela 10. A linha de Fechamento da Oferta Elétrica corresponde ao total de capacidade instalada adicional necessária para

suportar o cenário escolhido. Ou seja, a capacidade adicional para suportar o crescimento da procura no ano. O modelo da Calculadora 2050 direciona essa capacidade para termoelétricas a gás natural. Já a linha segurança do sistema elétrico sinaliza um teste de sensibilidade do modelo indicando a capacidade adicional instalada que deveria ser necessário em um caso de stress máximo. Por ser tratar de um teste de sensibilidade essa capacidade não foi incluída no modelo.

Tabela 9: Resultado da calculadora 2050 para os parâmetros escolhidos e exibidos na figura 2

Setor	2013	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Termoelétricas a gás natural	10,7	13	13	13	13	13	13	13	13
Termoelétricas a carvão	3,2	3	3	3	3	3	3	3	3
Termoelétricas a derivados de petróleo	7,6	10	11	0	0	0	0	0	0
Fechamento da oferta elétrica	0,0	0	0	12	27	42	58	66	74
Termoelétricas a biomassa	0,1	1	2	5	10	14	18	24	30
Termoelétricas a biogás	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0
Termoelétricas a bagaço	5,1	11	16	21	23	29	32	35	38
Energia nuclear	2,0	2	3	3	3	3	3	3	3
Energia eólica onshore	2,2	5	12	21	31	44	59	75	93
Energia eólica offshore	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oceanos	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hidrelétricas e PCH	86,0	90	105	105	105	105	105	105	105
Solar fotovoltaica	0,0	0	17	33	57	72	89	105	124
Solar heliotérmica (CSP)	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0
Segurança do sistema elétrico	12,2	0	0	15	20	23	31	43	57
Total	129	135	183	232	294	349	412	471	540

A calculadora apresenta resultados desde o ano 2013 até o ano 2050. Para a presente dissertação foi escolhido realizar as simulações referentes aos anos 2030, 2040 e 2050 para assim se observar a evolução da matriz elétrica ao longo dos anos e suas possíveis implicações.

Tabela 10: Resumo da capacidade instalada (dados alimentados no EnergyPlan)

Fonte	Capacidade Instalada (MW)				Percentual			
	2018	2030	2040	2050	2018	2030	2040	2050
Hidroelétrica	104.139	105.000	105.000	105.000	64%	39%	28%	22%
Termoelétrica	40.523	76.700	124.900	158.500	25%	28%	33%	33%
Nuclear	1.990	2.785	2.785	2.785	1%	1%	1%	1%
Eólica	14.391	31.000	59.000	93.000	9%	11%	16%	19%
Fotovoltaica Centralizada	1.798	10.930	30.930	50.930	1%	4%	8%	11%
Fotovoltaica Distribuída	0	46.100	57.900	72.900	0%	17%	15%	15%
Total	162.841	272.515	380.515	483.115	100%	100%	100%	100%

A Figura 23 apresenta a evolução da capacidade instalada das diferentes fontes de energia elétrica entre 2018 e 2050. O gráfico reflete as premissas utilizadas com um decréscimo na participação percentual da capacidade instalada de hidroelétricas e um acréscimo das fontes eólica, fotovoltaica e termoelétricas a gás natural.

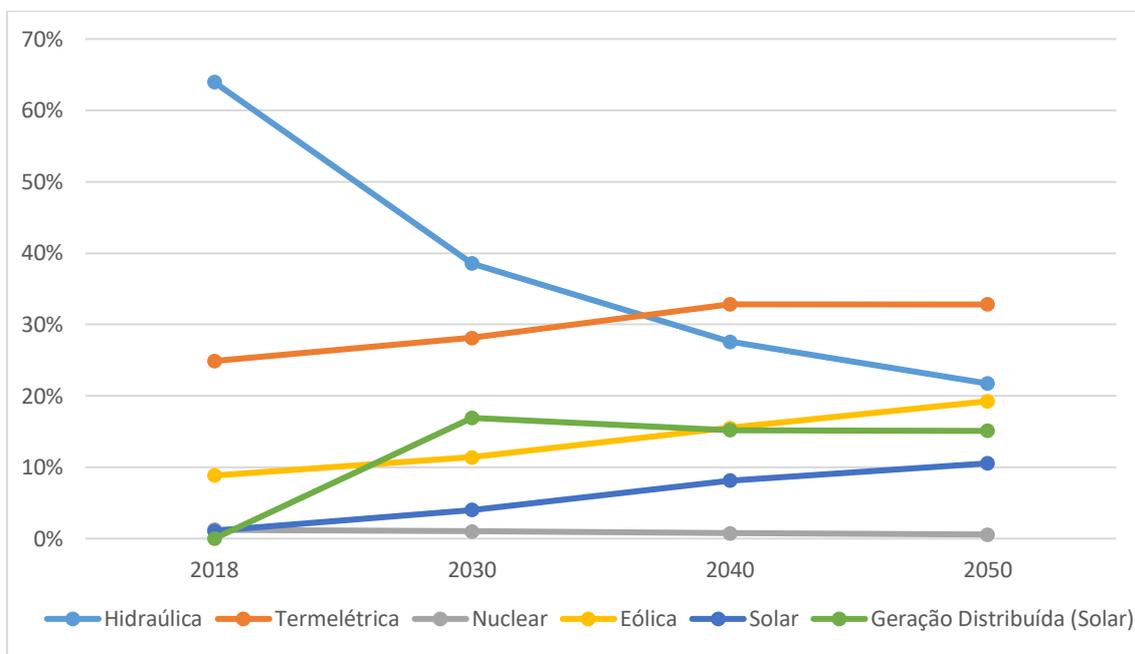


Figura 23: Evolução da capacidade instalada até 2050

É importante referir que nas simulações referentes a cenários futuros foram incluídas a geração fotovoltaica centralizada e distribuída separadamente. Destaca-se que, embora, nem toda a geração distribuída seja fotovoltaica essa fonte foi a utilizada por representar a maior participação no total de Geração Distribuída no Brasil. Para os cenários futuros foram mantidas as distribuições horárias por fonte do ano de 2018, já que esse foi o ano de calibração adotado. Além disso, os valores de eficiência e fatores de capacidade também foram mantidos.

5.4 Análise dos Resultados:

As Figuras 24, 25 e 26 representam graficamente os dados de geração horária para uma semana típica de verão no Brasil para os anos de 2030, 2040 e 2050. Ao longo das décadas pode se perceber uma redução na participação de geração de hidroelétricas e um aumento significativo da geração de energia eólica. Esse perfil pode ser positivo visto as hidroelétricas e as eólicas trabalham em regime de complementariedade, como pode ser observado na Figura 27, já que as hídricas possuem o seu pico de produção nos meses de verão e as eólicas nos meses de inverno. Essa complementariedade pode ser a chave para a penetração de larga escala de geração eólica nos cenários futuros de energia no Brasil.

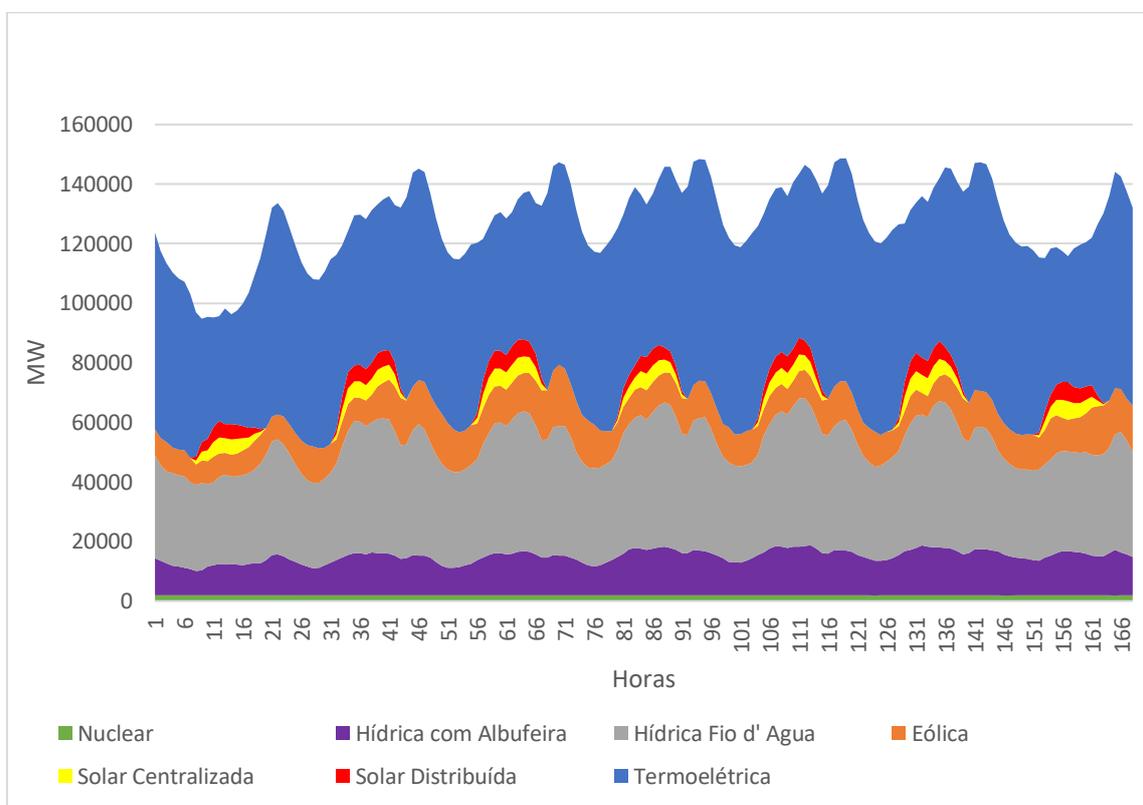


Figura 24: Geração de energia elétrica para o ano de 2030

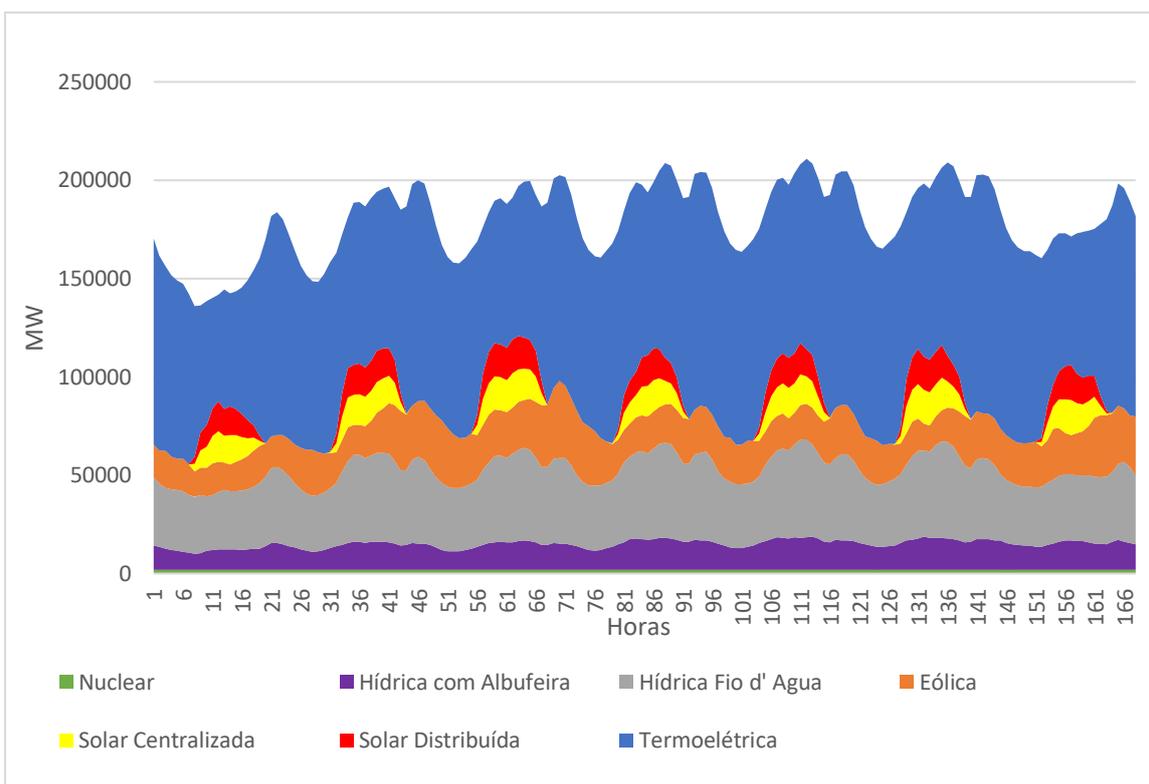


Figura 25: Geração de energia elétrica para o ano de 2040

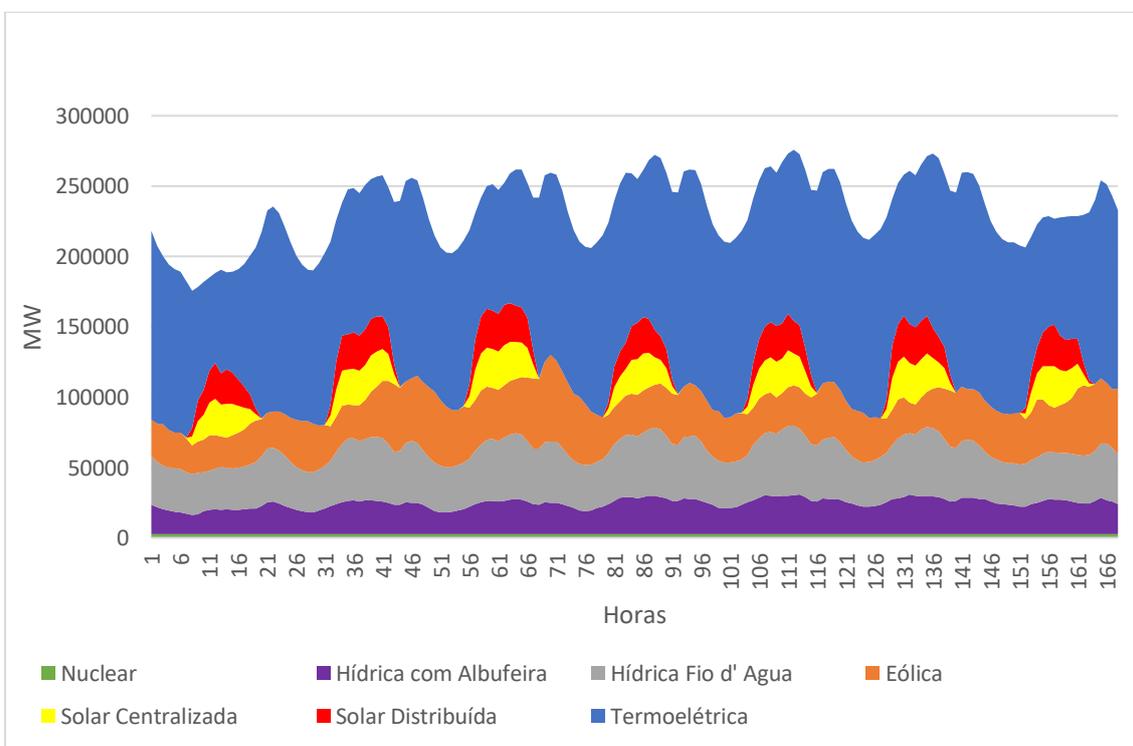


Figura 26: Geração de energia elétrica para o ano de 2050

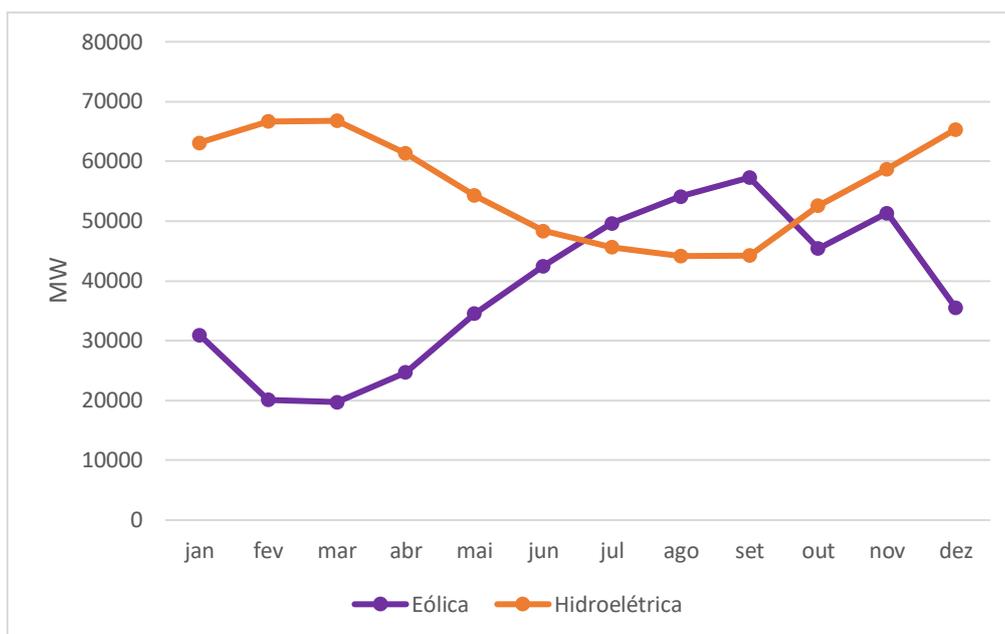


Figura 27: Complementariedade entre a geração Eólica e Hidroelétrica no ano de 2050

Já para a geração de energia fotovoltaica, percebe-se um aumento significativo ao longo das décadas principalmente entre os horários de 09hs da manhã até as 18hs da noite. Já para a geração de energia por termoelétricas, pode-se observar na Figura 28 que cerca de 45% da geração será assegurada pelas termoelétricas.

Nas simulações do EnergyPLAN todas as termoelétricas foram agrupadas e inseridas no sistema. As principais matérias-primas nos anos analisadas serão biomassa e gás natural. Porém, as termoelétricas são nas simulações apresentadas a principal tecnologia usada como complementar para as renováveis, principalmente para as fotovoltaicas. A fonte fotovoltaica gera picos de produção, aonde as termoelétricas precisariam ser desligadas, e picos de falta de geração, quando não há sol e, portanto, não haveria mais geração de eletricidade pelas fotovoltaicas. Nesse momento as termoelétricas precisariam ser acionadas novamente. Para esse fim de acionamento rápido apenas poderiam ser utilizadas termoelétricas a gás natural a ciclo simples. As simulações realizadas mostram necessidade de acionamento rápido ou de desligamento rápido da ordem de 50 GW. Apenas fontes de energia muito flexíveis poderiam ser adotadas para esse fim e no caso dos cenários estudados o gás natural foi a fonte adotada. As hídricas não foram consideradas como uma solução para acionamentos de pico por serem maioritariamente a fio-de-água no horizonte de 2050.

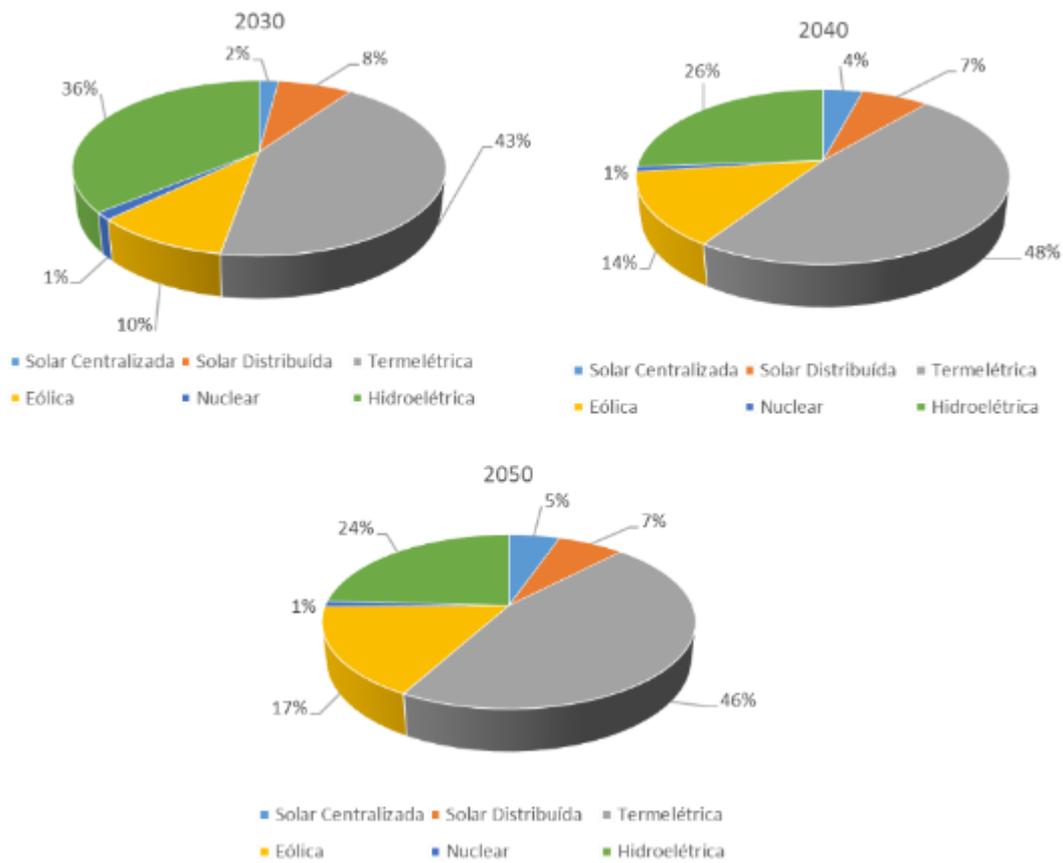


Figura 28: Geração de Energia Total nos anos de 2030, 2040 e 2050

5.5 Análise de Emissão de CO₂ :

Foi realizada uma análise ambiental com os três anos analisados. A análise realizada são com os dados de emissão de CO₂ fornecidos pelo EnergyPLAN e pode ser observado na Figura 29. Foram consideradas todas as emissões relacionadas ao processo de geração de energia elétrica.

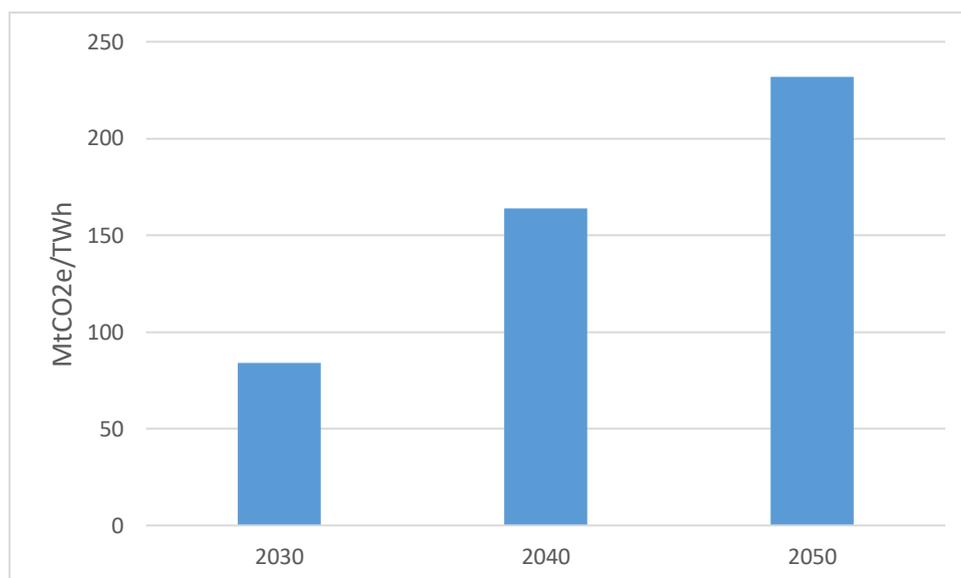


Figura 29: Evolução da emissão de CO₂ até 2050

Há um acréscimo nas emissões ao longo das décadas estudadas. Vale ressaltar que como o Brasil é um país em desenvolvimento espera-se aumento da intensidade energética e aumento das emissões de CO₂. Esse acréscimo é devido ao crescimento acentuado de termelétricas a gás natural tanto para suportar o aumento da procura de energia elétrica até 2050 quanto para complementar a geração através de energia renovável.

5.6 Discussão a respeito do planejamento a longo prazo no Brasil :

O planejamento energético a longo prazo é uma ferramenta essencial para a definição de políticas energéticas para um país. No Brasil, encontra-se em fase de finalização de estudos do Plano Nacional de Energia (PNE) 2050. Nesse documento será apresentada as diretrizes energéticas para o país a longo prazo.

Contudo, destaca-se um potencial imenso de recursos energéticos no Brasil. Diversos cenários podem ser propostos e avaliados. EPE, 2018b publicou um estudo onde estima a potencialidade dos recursos energéticos brasileiros. O resumo de potenciais pode ser observado na Tabela 11. Contudo, vale ressaltar que esse estudo é referente a todo potencial energético, sem dividir entre os possíveis usos.

Tabela 11: Potencial energético brasileiro (Mtep)

	Fonte	2015-2050
Não Renováveis	Petróleo ⁽¹⁾	9.047
	Gás Natural ⁽²⁾	2.926
	Carvão Mineral ⁽³⁾	7.157
	Urânio ⁽⁴⁾	2.411
	Subtotal	21.542
Renováveis	Biomassa	531
	Hidráulica	74
	Eólica <i>onshore</i>	30
	Eólica <i>offshore</i>	1.356
	PV <i>onshore</i> ⁽⁵⁾	43
	Heliotérmica	57
	PV <i>offshore</i> ⁽⁶⁾	5.247
	Oceânica	34
Subtotal	7.371	
TOTAL	28.913	

Notas:

- (1) Inclui os recursos convencionais descobertos, contingentes e não descobertos.
- (2) Inclui os recursos convencionais descobertos e não descobertos e os recursos não convencionais.
- (3) Considera as reservas totais, uma recuperação média de 77% e poder calorífico de 3.900 kcal/kg.
- (4) Considera as reservas totais e perdas de mineração e de beneficiamento.
- (5) Considera as áreas com faixa de irradiação de 6,0-6,2 kWh/m².dia.
- (6) Considera as áreas com faixa de irradiação de 6,5-6,8 kWh/m².dia.

Fonte: EPE, 2018b

Ou seja, o potencial energético brasileiro até 2050 é de 28.913 Mtep (milhões de toneladas equivalente de petróleo) ou seja 336.258,19 TWh. Esse valor supera muito a procura prevista em 2050. Porém, vale ressaltar que o aproveitamento do recurso depende da viabilidade técnica e econômica que precisam levar em consideração muitos aspectos tecnológicos, legais, regulatórios, ambientais, sociais e governamentais.

Classificando os recursos em de fácil ou difícil implantação e em renováveis ou não-renováveis tem-se a Figura 30. Cerca de 50% dos recursos não renováveis e 5% dos recursos renováveis seriam de fácil aproveitamento (EPE, 2018b).

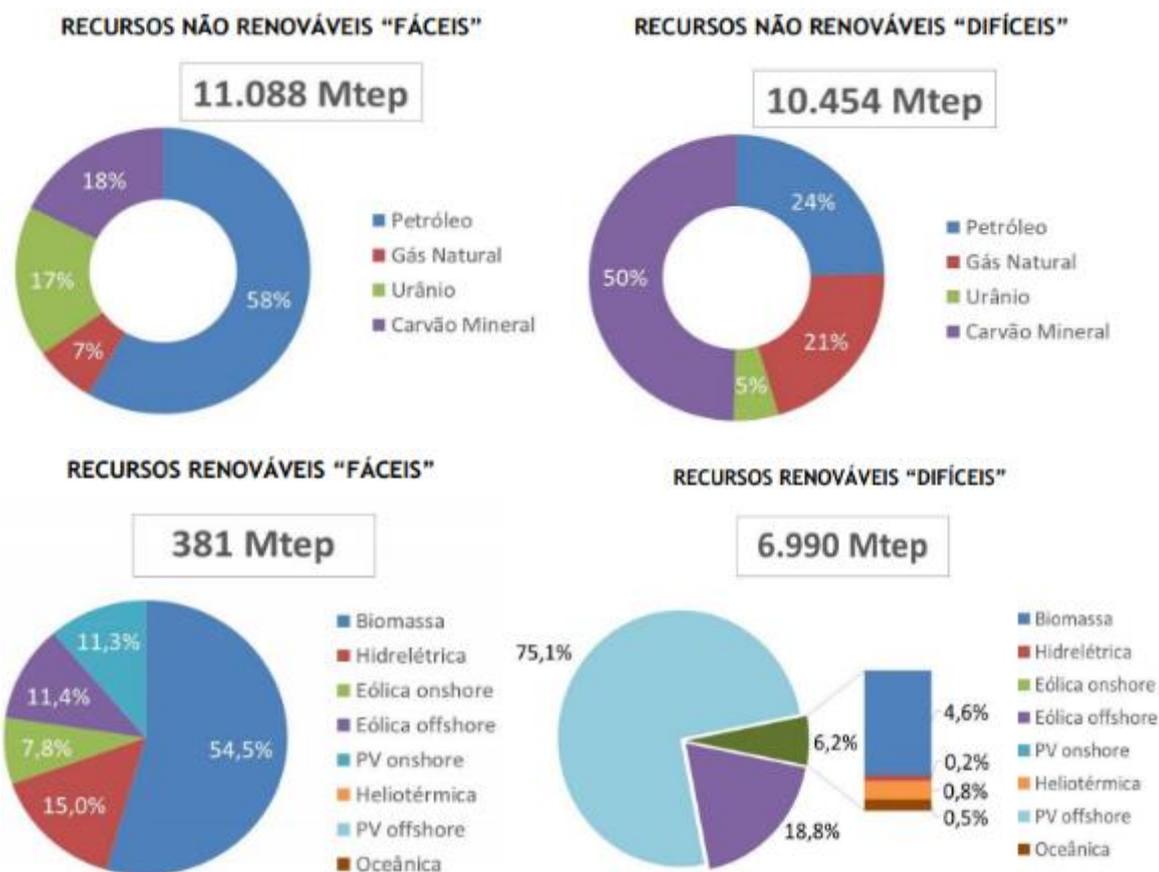


Figura 30: Classificação dos recursos renováveis e não-renováveis

Fonte: EPE,2018b

Mesmo esses percentuais já seriam suficientes para propor os mais diferentes cenários de acordo com a política energética desejada para o suprimento de energia elétrica até 2050. Os dados simulados na presente dissertação é apenas um cenário dentre tantos que podem ser adotados no Brasil visto sua grande riqueza e diversidade energética. Nenhuma das fontes consideradas na simulação esgota o potencial disponível. As capacidades instaladas na simulação 2050 representam por exemplo 4,3% dos recursos renováveis de eólica, 1,75 dos recursos energéticos fotovoltaicos.

Porém, enquanto não há a publicação do documento pelo Ministério de Minas e Energia (MME), para o presente trabalho foi escolhido utilizar a ferramenta Calculadora 2050. Embora algumas premissas utilizadas na ferramenta já tenham sido superadas ao longo dos anos, como por exemplo a adoção de fator de capacidade para centrais solares de 17%, sendo que no ano de 2018 já foi alcançados valores na ordem de 22% destaca-se

que de uma forma ampla a calculadora mostra uma tendência de possibilidade de adoção de uma matriz elétrica com maior penetração de fontes renovável, excluindo a geração hidroelétrica.

5.7 A transição energética e o caso brasileiro:

Embora mundialmente haja a discussão a respeito da transição energética e a adoção de matrizes elétricas mais limpas, o Brasil possui umas das matrizes com maior inserção de geração de energia a partir de energia renovável quando considerada a geração por centrais hidroelétricas. Porém, como é esperado não haver crescimento significativo de hidroelétricas a longo prazo será necessária uma transição energética no Brasil entre as diferentes fontes de energia renováveis.

Ao analisar um horizonte a longo prazo, é importante realçar que a maior fonte geradora atual não contará com um aumento que acompanhe o crescimento da procura. Por isso, para manter os altos níveis de geração a partir de energia renovável outras estratégias deverão ser adotadas. Isso porque o aumento provavelmente virá das fontes de energia renovável não despacháveis.

Nos últimos anos, tem se percebido um aumento da capacidade de geração das fontes de energias renováveis, como a eólica e solar. Essas fontes tem por características a variabilidade e o facto de não serem despacháveis. Portanto, é necessário adotar algumas medidas para garantir o suprimento de energia, mesmo com a variabilidade inerente das fontes renováveis. Embora as simulações realizar no capítulo 5, que foram baseadas nos resultados da Calculadora 2050, apenas considerem as termoelétricas a gás natural como opção complementar ao crescimento de geração a partir de renováveis, algumas ações podem ser adotadas dentre elas se destaca o uso de baterias, hidroelétricas de albufeira e complementaridade entre fontes geradoras

Com o aumento do percentual de energia renovável não despacháveis no sistema há a necessidade de assegurar a fiabilidade, pelo que é necessário adotar algumas estratégias garantir o crescimento da geração de energia através das fontes renováveis. Uma fonte que por muito tempo foi utilizada para garantir a fiabilidade do sistema elétrico brasileiro foi as hidroelétricas de Albufeira. As hidroelétricas de albufeira ocuparam o seu papel de relevância no passado e no presente da matriz elétrica brasileira, porém, para as próximas

décadas não é esperado um crescimento significativo dessa tecnologia. Tal deve-se à complexidade socioambiental que permeia a implantação de um projeto hidroelétrico. Cerca de 80% do potencial hidroelétrico brasileiro encontra-se em terras quilombolas, indígenas ou em unidades de conservação, portanto, áreas de grande dificuldade de licenciamento ambiental (EPE, 2018a).

Quanto às baterias essa é uma estratégia atraente para os geradores de energia, pois leva a uma maior utilização geral dos ativos do sistema de energia. Tal traduz-se em menor risco de excesso de capacidade e maior receita média. Os custos continuam a cair, as instalações triplicaram em menos de três anos ao redor do mundo, em grande parte impulsionadas por baterias de íons de lítio (IEA, 2019). Prevê-se ainda uma queda adicional nos custos dos sistemas de armazenamento de baterias: os custos dos sistemas de bateria de quatro horas deverão cair para US \$ 220 por kWh até 2040. Espera-se que a maioria das adições de bateria seja combinada com energia solar fotovoltaica e eólica à medida que aumentam sua capacidade de despacho (IEA, 2019).

No Brasil as baterias ainda não foram incluídas no planejamento a longo prazo, contudo, espera-se que os sistemas de armazenamento sejam disseminados no setor elétrico em um futuro próximo. Além disso, os esforços para promover a modernização do setor elétrico brasileiro devem ser direcionados para permitir o uso das novas tecnologias, incluindo nestas o armazenamento em baterias, criando um ambiente de competição isonômica entre as fontes disponíveis para atendimento às necessidades do sistema elétrico brasileiro (EPE, 2019d).

Outra estratégia que pode ser adotada é a complementaridade entre fontes geradoras e regiões no Brasil. Luz et al, 2019 reforçou que a otimização da complementaridade entre as fontes e as regiões pode reduzir os requisitos do reservatório, a dependência hídrica e permite a integração da energia fotovoltaica. Os cenários apresentados no estudo são uma ferramenta importante para os tomadores de decisão e permitem avaliar os benefícios de complementaridade do sistema.

Quanto à discussão da utilização do gás natural como fonte de complementaridade pode-se observar que o instrumento de planejamento energético para os próximos 10 anos, PDE)2029, indica um crescimento acentuado tanto de energia eólica quanto de termoelétricas a gás natural como pode ser visto na Figura 29. Indicando assim, que nesse

primeiro momento, as termelétricas terão um papel importante na matriz elétrica brasileira.

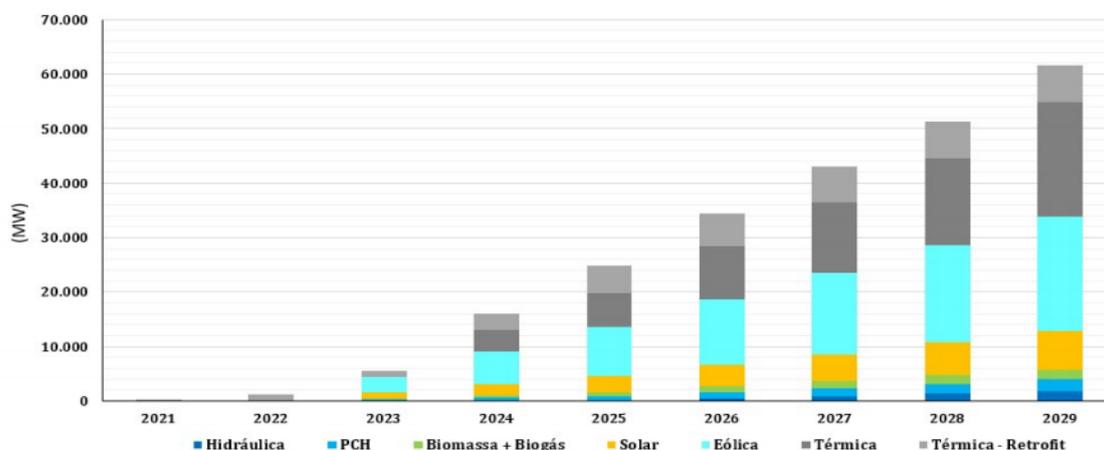


Figura 31: Expansão Indicativa de Referência

Fonte: EPE, 2020

Os resultados da Calculadora 2050 também indicam uma maior expansão termoelétrica para garantir a fiabilidade do sistema com o aumento das fontes renováveis, contudo, todas as outras possibilidades poderiam ser consideradas no planejamento brasileiro a longo prazo.

6. Conclusão e Trabalhos futuros:

Esse capítulo tem por objetivo apresentar as conclusões dos estudos desenvolvidos na presente dissertação, assim como sugestões de trabalhos futuros.

6.1 Conclusão

A transição energética para matrizes energéticas de baixo carbono tem sido uma preocupação mundial, pelo que cada país tem trabalhado o tema de acordo com suas particularidades. No Brasil, no setor de geração elétrica, a transição elétrica mais esperada não será de fontes não renováveis para fontes renováveis, mas será entre centrais geradoras de energia renováveis, ou seja, a transição ocorrerá de hidroelétricas para centrais eólicas e fotovoltaicas.

Neste trabalho, foi estudada a maior inserção de energia renovável na matriz elétrica brasileira no horizonte de 2050. Para esse estudo foi desenvolvido um modelo com a ajuda da ferramenta de simulação EnergyPLAN. Foi modelado um ano de referência para garantir que o modelo possa simular o sistema de energia com precisão. Com um ano de referência, foi possível comparar os dados históricos com a saída da simulação. Além disso, a modelagem de um ano de referência permitiu a aprendizagem da ferramenta EnergyPLAN e também do sistema de energia em estudo. Posteriormente, foram estudados os sistemas de energia para os anos de 2030, 2040 e 2050.

Os dados simulados para 2050, que foram extraídos da Calculadora 2050, mostraram que não haverá uma evolução significativa da capacidade instalada de hidroelétricas, portanto, percentualmente a sua participação decrescerá drasticamente na matriz elétrica brasileira passando dos atuais 65% da capacidade instalada para cerca de 22%. A maior parte da capacidade hidroelétrica brasileira já foi desenvolvida e o potencial remanescente encontra-se em áreas sensíveis tanto socialmente quanto ambientalmente, dificultando muito seu desenvolvimento.

Ao mesmo tempo é percebido um aumento da capacidade instalada tanto de centrais fotovoltaicas centralizadas e distribuída quanto de eólicas. O percentual de capacidade

instalada das centrais eólicas passaria de 9% para 19%, enquanto que a participação das centrais fotovoltaicas teria uma evolução de cerca de 1% para 25% de participação na matriz elétrica brasileira em 2050.

Já as simulações feitas no EnergyPLAN indicaram que o com todas as alterações que ocorreram na matriz elétrica haverá também uma significativa alteração na geração de energia até 2050. As intermitências associadas a geração de energia por fonte renováveis, com as informações consideradas na simulação, foram compensadas pela geração termoelétrica por ser uma fonte com maior flexibilidade.

Embora as termoelétricas principalmente a gás natural tenham sido a fonte de flexibilidade adotada, outras alternativas poderiam ser consideradas como a complementaridade entre fontes e regiões e utilização de baterias.

Vale a pena ressaltar que os resultados apresentados neste trabalho devem ser considerados com alguma cautela já que se trata da saída de um modelo que pode não representar totalmente a realidade. No modelo EnergyPLAN, a capacidade de geração de cada tecnologia é agregada em uma soma de centrais individuais. É como se apenas uma central de cada tecnologia fosse usada para simular toda a capacidade de geração de um país. Isso torna a ferramenta incapaz de explicar a localização geográfica da geração e cargas e possíveis congestionamentos no sistema de transmissão.

Outra observação importante é que o cenário escolhido configura apenas uma das várias opções possíveis. O Brasil destaca-se por ter riqueza de recursos naturais e boas condições para geração de energia renovável. Além disso, embora as simulações tenham sido feitas com os dados obtidos através da Calculadora 2050 o instrumento governamental responsável por elaborar o planejamento é o PNE, que se espera seja lançado em 2020. O PNE trará luz ao que será de facto o planejamento energético para o setor de energia brasileiro até 2050.

6.2 Trabalhos Futuros:

Os temas relacionados ao planejamento energético de um país são vastos e com amplas possibilidades de estudos. Como a presente dissertação apenas se considerou a utilização de termoelétricas como provedor de flexibilidade para o sistema, pelo que uma sugestão

para trabalhos futuros é a realização de outros testes considerando baterias ou complementaridade entre as fontes renováveis. Para esses cenários seria possível alterar a capacidade instalada das demais fontes e criar novos cenários até com maior percentual de inserção de renováveis.

Outra possibilidade seria realizar o estudo com outras ferramentas diferentes do EnergyPLAN aonde a modelagem pudesse ser feita de forma regional e com input diferenciado para cada tipo de termoelétrica. Além disso, um outro teste que pode ser feito é a simulação do cenário para o Brasil em 2050 quando houver a publicação do PNE 250, trazendo assim uma discussão sobre as diretrizes brasileiras do planejamento a longo prazo.

Referências Bibliográficas:

- Ackermann, T., Andersson, G., & Soder, L. (2001). Distributed Generation : A Definition Distributed generation : a definition, 7796(August 2016), 195–204. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(01\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(01)00101-8)
- Gray, A., (2017). The world's 10 biggest economies in 2017 | World Economic Forum. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2017/03/worlds-biggest-economies-in-2017/>
- Agência Brasil (2019) Governo procura parceiro privado para a conclusão de Angra 3. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2019-01/governo-procura-parceiro-privado-para-conclusao-de-angra-3>
- Ambienteenergia. (2019). Porque o Nordeste que gera 86% da energia eólica, não tem conta de luz mais barata. Disponível em: <https://www.ambienteenergia.com.br/index.php/2019/07/por-que-o-nordeste-que-gera-86-da-energia-eolica-nao-tem-conta-de-luz-mais-barata/36511>
- ANEEL. (2018). Geração Distribuída - Informações Técnicas - ANEEL Disponível em http://www.aneel.gov.br/informacoes-tecnicas/-/asset_publisher/CegkWaVJWF5E/content/geracao-distribuida-introducao-1/656827?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Finformacoes-tecnicas%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_CegkWaVJWF5E%26p_p_lifecycle
- ANEEL. (2019a). Micro e Minigeração Distribuída (REN 482/2012) - Geração - ANEEL. Disponível em http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Foutorgas%2Fgeracao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_mJhnKli7qc
- ANEEL. (2019b). Entenda melhor o que a ANEEL está propondo para o futuro da GD. Disponível em <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/19367596/06.png/36014b61-bd70-4a5a-efcf-a51e767d33f3?t=1571157567814>
- ANEEL. (2020). Resultados dos Leilões de Geração no Ambiente Regulado Disponível em <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiYmMzN2Y0NGMtYjEyNy00OTNlWl1YzctZjI0ZTUwMDg5ODE3IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>
- Bhatia, S.C.. (2014). Advanced renewable energy systems. 1-743. CRC Press. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9781782422693/advanced-renewable-energy-systems>

- Beenergy. (2019). Diferenças entre o mercado cativo e o mercado livre de energia. Disponível em: <https://beenergy.com.br/mercado-livre-mercado-cativo-energia/>
- Castro, G., Morais, R., Castro, G., Ferreira, D. V., Tommasso, F., & Morais, R. (2018). *TDSE 79: Impactos Sistêmicos da Micro e Minigeração Distribuída. GESEL-Grupo de Estudos do Setor Elétrico* (Vol. 79).
- CCEE. (2019) Início. Onde Atuamos. Com quem se relaciona Disponível em: https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/com-quem-se-relaciona?_afLoop=292513371977893&_adf.ctrl-state=15taxcl0rp_14#!%40%40%3F_afLoop%3D292513371977893%26_adf.ctrl-state%3D15taxcl0rp_18
- Dranka, G. G., & Ferreira, P. (2018). Planning for a renewable future in the Brazilian power system. *Energy*, 164, 496–511. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.164>
- Denholm, P., O’Connell, M., Brinkman, G., & Jorgenson, J. (2015). Overgeneration from Solar Energy in California. A Field Guide to the Duck Chart, (November). <https://doi.org/10.2172/1226167>
- EnergyPLAN. (2019). Existing Country Models. Disponível em: https://www.energyplan.eu/useful_resources/existingcountrymodels/
- EnergyPLAN. (2020). Advanced energy system analysis computer model. Disponível para download em: <https://www.energyplan.eu/download/>
- EPE-Empresa de Pesquisa Energética. (2018a). Considerações sobre a Expansão Hidrelétrica nos Estudos de Planejamento Energético de Longo Prazo. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Considera%C3%A7%C3%B5es%20sobre%20a%20Expans%C3%A3o%20Hidrel%C3%A9trica%20nos%20Estudos%20de%20Planejamento%20Energ%C3%A9tico%20de%20Longo%20Prazo.pdf>
- EPE-Empresa de Pesquisa Energética. (2018b).Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050. Nota Técnica PR 04/18. Série Recursos Energéticos Rio de Janeiro. Disponível em http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR_RecursosEnergeticos%202050.pdf
- EPE-Empresa de Pesquisa Energética. (2018c). Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica. Nota Técnica PR 07/18. Série Estudos de Longo prazo Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-456/NT%20PR%20007-2018%20Premissas%20e%20Custos%20Oferta%20de%20Energia%20EI%C3%A9trica.pdf>

- EPE-Empresa de Pesquisa Energética. (2019a). Balanço energético nacional 2019: Ano base 2018. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>
- EPE-Empresa de Pesquisa Energética. (2019b). Projetos Fotovoltaicos nos leilões de energia. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-457/NT%20EPE-DEE-003-2020-r0.pdf>
- EPE-Empresa de Pesquisa Energética. (2019c). Calculadora 2050. Disponível em: <http://calculadora2050brasil.epe.gov.br/calculadora.html>
- EPE-Empresa de Pesquisa Energética. (2019d). Sistemas de Armazenamento em Baterias. Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098_2019_Baterias%20no%20planejamento.pdf
- EPE- Empresa de Pesquisa Energética (2020). Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202029.pdf>
- EPA. (2018). Distributed Generation of Electricity and its Environmental Impacts. *EPA - United States Environmental Protection Agency*. Disponível em: <https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts>
- FGV. (2016) Energia Nuclear. Caderno FGV Energia. Ano 3. Nº 6 ISSN 2358-5277 Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/pdf_fgv-energia_web.pdf
- Henrik Lund, H., Thellufsen, J. (2019) EnergyPLAN - Advanced Energy Systems Analysis Computer Model Documentation ,Version 15. <https://www.energyplan.eu/training/documentation/>
- IEA. (2019). Tracking Energy Integration More effort needed. Traking report. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-energy-integration/energy-storage>
- IEMA. (2016). Prioridades para a integração das fontes renováveis variáveis no sistema elétrico, 1–5 Disponível em http://www.energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2016/12/NT_integracao_final.pdf
- IRENA. (2019). How to transform energy system and reduce carbon emissions. Disponível em: <https://irena.org/DigitalArticles/2019/Apr/How-To-Transform-Energy-System-And-Reduce-Carbon-Emissions>
- IMF. (2018). Latin America and Caribbean: Seizing the Momentum. Disponível em: <http://www.imf.org/en/News/Articles/2018/05/10/NA051118-Latin-America-and-Caribbean-Seizing-the-Momentum>

- Juárez, A. A., Araújo, A. M., Rohatgi, J. S., & De Oliveira Filho, O. D. Q. (2014). Development of the wind power in Brazil: Political, social and technical issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 828–834. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.086>
- Lee, J., & Yang, J. (2019). Global energy transitions and political systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115(March), 109370. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109370>
- Luz, T., & Moura, P. (2019). 100% Renewable energy planning with complementarity and flexibility based on a multi-objective assessment. *Applied Energy*, 255(May), 113819. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113819>
- Marcovitch, J. (2016). Os Compromissos de Paris e os ODS 2030: Energia, Florestas e Redução de GEE. *São Paulo: FEA/USP*. Disponível em <https://www.usp.br/mudarfuturo/cms/%0A2>
- MHR. (2018). Números da Energia Solar em 2017 - Micro / Mini Geração Distribuída. Disponível em <http://www.mhrtecnologia.com.br/numeros-da-energia-solar-em-2017-micro-mini-geracao-distribuida>
- MMA.Ministério do Meio Ambiente (2020). Acordo de Paris. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris?tmpl=component&print=1>
- MME-Ministério de Minas e Energia. (2019). Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/energia-eletrica/publicacoes/boletim-de-monitoramento-do-sistema-eletrico>
- MME-Ministério de Minas e Energia. (2020). Portaria estabelece periodicidade para o Plano Nacional de Energia (PNE). Disponível em: http://www.mme.gov.br/todas-as-noticias/-/asset_publisher/pdAS9IcdBICN/content/portaria-estabelece-periodicidade-para-o-plano-nacional-de-energia-pne-
- Montoya-Bueno, S., Muñoz-Hernández, J. I., & Contreras, J. (2016). Uncertainty management of renewable distributed generation. *Journal of Cleaner Production*, 138, 103–118. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.02.135>
- ONS (2019) Operador Nacional do Sistema – Histórico de Operação Disponível em <http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao>
- Papaefthymiou, G., Grave, K., & Dragoon, K. (2014). Flexibility options in electricity systems. *Ecofys, European Copper Institute*, (March), 51. <https://doi.org/Project number: POWDE14426>
- Pupo-Roncallo, O., Campillo, J., Ingham, D., Hughes, K., & Pourkashanian, M. (2019). Large scale integration of renewable energy sources (RES) in the future Colombian energy system. *Energy*, 186, 115805. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.135>

Ramos, R. (2018). Modelling Renewable Energy Integration : Energy Storage in the 2030 Portuguese Power System. (June).

Resch, M., Bühler, J., Klausen, M., & Sumper, A. (2017). Impact of operation strategies of large scale battery systems on distribution grid planning in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1042–1063.

<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.02.075>

Shah, R., Mithulananthan, N., Bansal, R. C., & Ramachandaramurthy, V. K. (2015). A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1423–1436.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.027>

Shimako, M., (2018) O potencial hidrelétrico brasileiro e a maior usina geradora de energia do Mundo Disponível em\; <http://www.usp.br/portabiossistemas/?p=7865>

Viral, R., & Khatod, D. K. (2012). Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5146–5165. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.020>

Wirth, H. (2015). Recent facts about photovoltaics in Germany. *Fraunhofer ISE*, 1(June), 92. <https://doi.org/Fraunhofer ISE>