



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LINDEMBERG SAMUEL DE BRITO MATIAS

EVOLUÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA E OS IMPACTOS
EM DECORRÊNCIA DA INTEGRAÇÃO DAS FONTES EÓLICA E
SOLAR EM LARGA ESCALA

FORTALEZA - CE

2021

LINDEMBERG SAMUEL DE BRITO MATIAS

EVOLUÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA E OS IMPACTOS EM
DECORRÊNCIA DA INTEGRAÇÃO DAS FONTES EÓLICA E SOLAR EM LARGA
ESCALA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara

FORTALEZA - CE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M38e Matias, Lindemberg Samuel de Brito.
Evolução da matriz elétrica brasileira e os impactos em decorrência da integração das fontes eólica e solar em larga escala / Lindemberg Samuel de Brito Matias. – 2021.
66 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Raphael Amaral da Câmara.
1. Energia renovável. 2. Energia eólica. 3. Energia solar. 4. Geração distribuída. 5. Inércia do sistema elétrico. I. Título.

CDD 621.3

LINDEMBERG SAMUEL DE BRITO MATIAS

EVOLUÇÃO DA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA E OS IMPACTOS EM
DECORRÊNCIA DA INTEGRAÇÃO DAS FONTES EÓLICA E SOLAR EM LARGA
ESCALA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raphael Amaral da
Câmara (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. MSc. Lucas Silveira Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Breno Bezerra Freitas
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, por todo suporte.

As minhas irmãs, pelo companheirismo.

A toda minha família.

A todos aqueles que contribuíram na minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Queria agradecer aos meus pais, Lindembergues e Valdisa, por sempre terem me apoiado e investido na minha educação.

Às minhas irmãs, Sara e Samira, por todo suporte e conselhos que sempre me deram.

A toda a minha família por estarem sempre na torcida durante a minha jornada.

Aos meus amigos do Provento que fazem parte da minha vida e me acompanham desde minha tenra idade.

Aos meus amigos da UFC por me acompanharem nessa caminhada e pelas conversas jogadas fora no quadrado.

Aos meus amigos da Centrale que me acolheram quando eu estava completamente fora da minha zona de conforto distante da minha família.

A Universidade Federal do Ceará por ter me proporcionado inúmeras oportunidades de aperfeiçoamento na minha vida profissional e acadêmica.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Raphael Amaral pela ajuda com esse trabalho de conclusão de curso. Aos membros da banca pela disponibilidade e atenção.

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma com a minha graduação.

O temor do Senhor é o princípio do conhecimento; os loucos desprezam a sabedoria e a instrução.

(Provérbios 1:7)

RESUMO

As questões ambientais envolvendo o aquecimento global têm ganhado bastante relevância nas esferas sociais e governamentais em todo o mundo. A necessidade de diminuir a emissão de gases de efeito estufa, como o gás carbônico, é um dos tópicos mais abordados pelos ambientalistas, visto que esses gases contribuem para a agravação do aquecimento global. As matrizes energéticas e elétricas dos países ainda possuem boa parte do seu consumo baseado em fontes que usam combustíveis fósseis para a produção de energia, os quais emitem quantidades de gás carbônico na atmosfera. Nesse sentido, as fontes de energia renováveis, como a energia eólica e solar, se apresentam como soluções para diminuir a emissão de gases de efeito estufa na produção de energia elétrica e têm ganhado bastante relevância nas matrizes elétricas dos países. Apesar de possuir uma matriz com fontes renováveis, o Brasil continua a adotar uma postura em favor da descarbonização da sua matriz elétrica e, por esse motivo, vem aumentando a participação de fontes eólicas e solares. O objetivo deste trabalho é analisar a evolução da matriz elétrica brasileira por meio dos dados históricos de operação e as perspectivas futuras dessa matriz elétrica com base no plano de operação do sistema elétrico brasileiro. Além disso, este estudo busca ressaltar os impactos e os desafios estruturais que essas mudanças impõem no atual sistema elétrico, que foi construído a partir do princípio de geração centralizada. Por fim, a análise qualitativa desses impactos mostra que os agentes do sistema elétrico de potência brasileiro, como o ONS, precisam realizar uma mudança estrutural para levar em conta as novas complexidades que a geração distribuída impõe na rede. O modo de operar o sistema precisa ser adaptado para esse novo cenário com uma menor previsibilidade de produção e menor inércia contra eventuais desequilíbrios no sistema.

Palavras-chave: Energia renovável; Energia eólica; Energia solar; Geração distribuída; Inércia do sistema elétrico

ABSTRACT

Environmental issues involving global warming have gained relevance in social and governmental discussions around the world. The need to reduce the emission of greenhouse gases, such as carbon dioxide, is one of the topics most addressed by environmentalists since these gases contribute to the worsening of global warming. The primary energy and electricity production mixes of the countries still have a large part of their consumption based on sources that use fossil fuels for energy production, which emit carbon dioxide into the atmosphere. In this context, renewable energy sources, such as wind and solar energy, present themselves as solutions to reduce the emission of greenhouse gases in the production of electricity and have gained relevance in the countries' electricity generation mix. Despite having a matrix with renewable sources, Brazil continues to adopt a posture in favor of decarbonization of its electricity generation mix and, for this reason, has been increasing the participation of wind and solar sources. The objective of this work is to analyze the evolution of the Brazilian electric generation mix through historical data of operation and the future perspectives of the electric generation mix based on the operation plan of the Brazilian operator. In addition, this study seeks to highlight the impacts and structural challenges that these changes impose on the current electrical system that was built on the principle of centralized generation. Finally, the qualitative analysis of these impacts shows that the agents of the Brazilian electric power system, such as the ONS, need to make a structural change to take into account the new complexities that distributed generation imposes on the grid. The way the system operates needs to be adapted to this new scenario with less predictability of production and less inertia against eventual imbalances in the system.

Keywords: Renewable energy; Wind energy; Solar energy; Distributed generation; Inertia of the electrical system

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia típica de um SEP.	22
Figura 2 – Forma de onda de uma corrente alternada.	23
Figura 3 – Esquema simplificado de uma central hidrelétrica.	25
Figura 4 – Esquema simplificado da geração FV.	26
Figura 5 – Esquema simplificado da geração heliotérmica.	27
Figura 6 – Esquema simplificado da geração eólica.	28
Figura 7 – Esquema simplificado da geração maremotriz.	29
Figura 8 – Esquema simplificado de geração biomassa.	30
Figura 9 – Emissão de CO ₂ por kWh gerado por país.	34
Figura 10 – Intercâmbio de energia elétrica entre as regiões do SIN em 2020 (MW médio).	39
Figura 11 – Potencial de energia FV (kWh/KWp)	41
Figura 12 – Velocidade média dos ventos no Brasil (m/s) a uma altura de 100m.	42
Figura 13 – Capacidade instalada no SIN em 2021 e 2025 (GW).	44
Figura 14 – Esquema simplificado de uma geração centralizada.	52
Figura 15 – Esquema simplificado de uma geração distribuída.	53
Figura 16 – Fluxo de potência da geração centralizada e distribuída.	53
Figura 17 – Redes Elétricas Inteligentes ou <i>Smart Grids</i>	55
Figura 18 – Curto circuito longe do alimentador.	61
Figura 19 – Fonte renovável conectada no sistema de distribuição perto do local de defeito.	62
Figura 20 – Ativação da proteção de uma ramo sem defeito.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Geração por região e fonte (GWh).	39
Tabela 2 – Valores de inércia da rede por subsistema.	58

LISTA DE GRÁFICOS

1	Evolução da Geração de Energia Elétrica (TWh) e o PIB (R\$ trilhão) no Brasil (2012-2020).	16
2	Emissões globais de CO ₂ de combustíveis fósseis e mudanças do solo (kt). . .	17
3	Geração de energia elétrica mundial por fonte (%).	18
4	Geração de energia elétrica por fonte no Brasil em 2020 (%).	33
5	Geração de energia elétrica por fonte (exc. hidráulica) no Brasil (2012-2020) (%).	35
6	Composição da matriz elétrica mundial em 2010 (%).	36
7	Composição da matriz elétrica mundial em 2018 (%).	36
8	Consumo de energia elétrica por região em 2020 (GWh).	37
9	Geração de energia elétrica por região em 2020 (GWh).	38
10	Geração por região e fonte (%) com ênfase na produção eólica e solar. . . .	40
11	Evolução da capacidade instalada de geração eólica e solar no Brasil (MW). .	43
12	Capacidade instalada de energia eólica e solar no SIN em 2025 (GW) sem considerar as usinas com o CUST assinado.	45
13	Capacidade instalada de energia eólica e solar no SIN em 2025 (GW) considerando as usinas com o CUST assinado	45
14	Geração de energia (GWh) - variabilidade ao longo do dia.	48
15	Geração de energia eólica (GWh) - variabilidade ao longo das estações. . .	49
16	Efeito da curva de pato (" <i>duck curve</i> ").	50
17	Variação da frequência após perturbação na rede (imagem meramente ilustrativa).	56
18	Variação da frequência de uma rede frente a um desequilíbrio.	57
19	Variação da frequência após perturbação na rede (imagem meramente ilustrativa).	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>CO₂</i>	Gás carbônico
<i>TCC</i>	Trabalho de Final de Curso
<i>SEP</i>	Sistema elétrico de potência
<i>ONS</i>	Operador Nacional do Sistema Elétrico
<i>SIN</i>	Sistema Interligado Nacional
<i>I_{cc}</i>	Corrente de curto-circuito
<i>FV</i>	Fotovoltaico(a) (singular e plural)

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

<i>TWh</i>	Terawatt-Hora
<i>MW</i>	Megawatts
<i>GWh</i>	Gigawatt-Hora
<i>kWh</i>	Kilowatt-Hora
<i>GW</i>	Gigawatt
<i>kVA</i>	Kilovoltampere
<i>m</i>	Metro
<i>m²</i>	Metro quadrado
%	Porcentagem
<i>V</i>	Volts
<i>kt</i>	Kilotonelada
<i>A</i>	Ampères

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo principal do estudo	19
1.2	Estrutura	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Transição energética	21
2.2	Sistema elétrico de potência (SEP)	21
2.2.1	<i>Geração Elétrica</i>	22
2.2.2	<i>Transmissão Elétrica</i>	22
2.2.3	<i>Distribuição Elétrica</i>	23
2.3	Frequência elétrica	23
2.4	Matriz energética e elétrica	24
2.5	Fontes não-renováveis	24
2.6	Fonte renováveis	24
2.6.1	<i>Energia hidráulica</i>	24
2.6.2	<i>Energia solar</i>	25
2.6.3	<i>Energia eólica</i>	27
2.6.4	<i>Energia maremotriz</i>	28
2.6.5	<i>Energia de biomassa</i>	29
2.7	Proteção de sistema elétricos	30
2.8	Potência e corrente de curto-circuito	30
2.9	Flexibilidade do sistema elétrico	31
3	MATRIZ ELÉTRICA	32
3.1	Composição da matriz elétrica brasileira	32
3.2	Composição da matriz elétrica mundial	33
3.3	Evolução da geração da matriz elétrica brasileira	34
3.3.1	<i>Evolução da composição brasileira</i>	34
3.3.2	<i>Evolução da composição global</i>	35
3.4	Matriz elétrica brasileira por região	36
3.4.1	<i>Consumo de energia elétrica</i>	37
3.4.2	<i>Geração de energia elétrica</i>	37

3.4.3	<i>Intercâmbio de energia elétrica</i>	38
3.4.4	<i>Geração por fonte de energia elétrica</i>	39
3.4.5	<i>Potencial solar e eólico</i>	40
3.5	Evolução da capacidade instalada no Brasil	42
3.6	Considerações finais	46
4	IMPACTOS EM DECORRÊNCIA DA INTEGRAÇÃO DAS FONTES EÓLICA E SOLAR EM LARGA ESCALA	47
4.1	Variabilidade	47
4.1.1	<i>Impacto da variabilidade no sistema elétrico</i>	49
4.1.2	<i>Load following power plants</i>	51
4.1.3	<i>Resposta da demanda</i>	51
4.2	Decentralização da geração	52
4.2.1	<i>Redes Elétricas Inteligentes</i>	54
4.3	Frequência e inércia da rede	55
4.3.1	<i>Caso de estudo: energia eólica</i>	57
4.3.2	<i>Caso de estudo: Reino Unido</i>	58
4.4	Proteção do sistema elétrico	60
4.4.1	<i>Caso 1: falha de detecção de defeitos devido a uma baixa corrente de curto-circuito (I_{cc})</i>	60
4.4.2	<i>Caso 2: falha de detecção de defeitos devido à conexão de fontes na rede de distribuição</i>	61
4.4.3	<i>Caso 3: ativação indesejável de proteções devido à conexão de fontes na rede de distribuição</i>	62
5	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

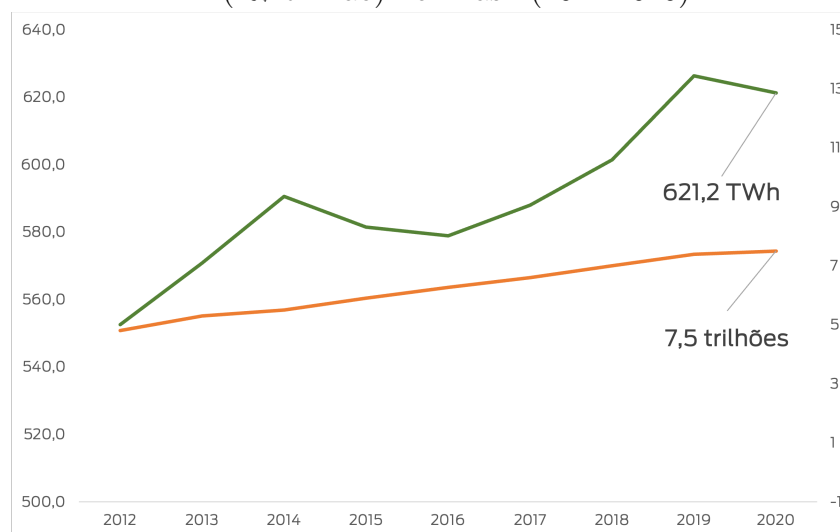
A história da eletricidade começou quando Tales de Mileto na Grécia Antiga esfregou um âmbar com pele e lã de animais e observou a atração entre os objetos devido à eletrização por atrito (SCHMITZ, 2016). Essa pequena observação originou o estudo de uma nova vertente na ciência que seria denominada de eletricidade.

Desde então, diversos novos fenômenos foram descobertos nessa nova vertente da ciência, e vários avanços no ramo da eletricidade permitiram que ela ganhasse um papel muito importante na sociedade.

Hoje, a energia elétrica é uma das bases da sociedade moderna. Sem a sua existência, muitas necessidades básicas que o ser humano julga indispensável - como ligar uma lâmpada e usar um celular - não seriam possíveis. O transporte de eletricidade nacional e internacional e a conversão em outros tipos de energia como a energia mecânica são dois exemplos claros das vantagens possibilitadas pelo desenvolvimento dos estudos na área de eletricidade.

Como pode-se ver pelo Gráfico 1, a evolução da geração de energia elétrica tem aumentado ao passar dos anos e possui uma relação direta com o Produto Interno Bruto (PIB) do país.

Gráfico 1 – Evolução da Geração de Energia Elétrica (TWh) e o PIB (R\$ trilhão) no Brasil (2012-2020).

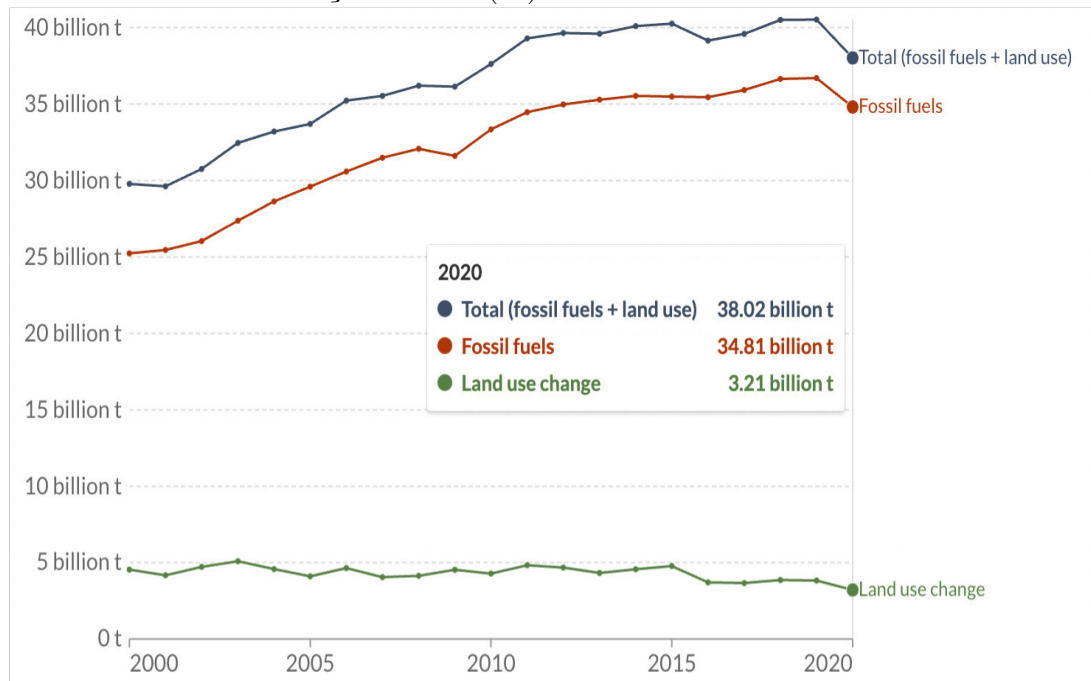


Fonte: (EPE, 2021) e IBGE adaptado pelo autor.

Outro elemento que cresceu ao longo das últimas décadas foi a emissão de gás carbônico (CO₂) no mundo, como mostra o Gráfico 2. No ano de 2020, 38,02 bilhões de

toneladas de CO₂ foram emitidos na atmosfera.

Gráfico 2 – Emissões globais de CO₂ de combustíveis fósseis e mudanças do solo (kt).



Fonte: (Our World in Data, 2020) adaptado pelo autor.

Dois questionamentos surgem com esse último gráfico: por qual motivo essa emissão de CO₂ é importante? E qual é a relação com a geração de energia elétrica?

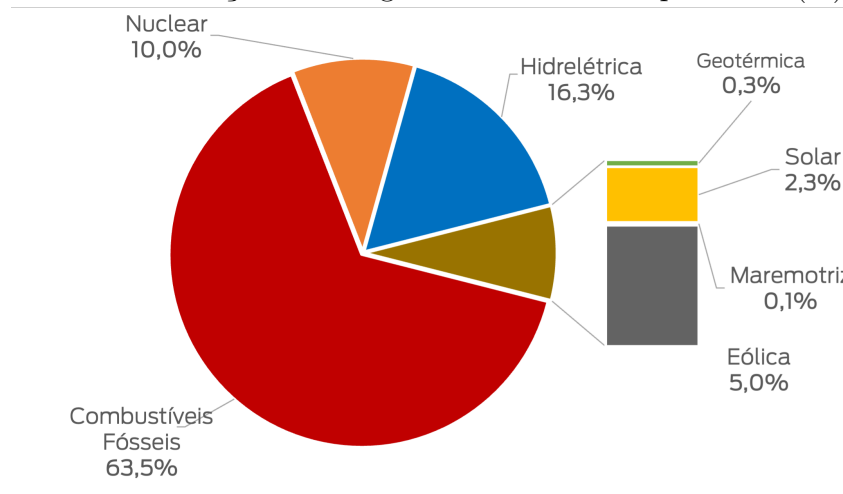
A primeira pergunta está relacionada com o aquecimento global. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC, na sigla em inglês -, o aquecimento global se refere ao aumento gradual, observado ou projetado, da temperatura superficial global, enquanto consequência do acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera (IPCC, 2014).

O CO₂ contribui para o aquecimento global, pois é um dos principais gases de efeito estufa. Nos últimos 200 anos, mas especialmente nos últimos 50 anos, a queima de combustíveis fósseis, como carvão, óleo e gás natural, e a alteração no uso e ocupação dos solos, emitiram largas quantidades de gases como o CO₂ – e o metano (CH₄) (HOUGHTON, 2009).

Respondendo o segundo questionamento, como ilustrado no Gráfico 3, a base da produção de energia elétrica mundial ainda é dependente fortemente de combustíveis fósseis (derivados de petróleo e gás natural) que representaram 63,5% da produção global de energia elétrica em 2018. Um dado mais alarmante é que 90% da produção de CO₂

provém do setor energético, especialmente das usinas elétricas a carvão (ENEL, 2020).

Gráfico 3 – Geração de energia elétrica mundial por fonte (%).



Fonte: (EPE, 2021) adaptado pelo autor.

Por esses motivos, a questão energética tomou posição central na agenda ambiental global, principalmente por causa do aquecimento global (REIS, 2011). A necessidade de migrar para uma matriz energética mundial com menos dependência de combustíveis fósseis, visando diminuir a emissão de CO₂, gerou uma busca pelo uso de fontes primária de energia renováveis e menos poluentes, como a energia solar, hidráulica e eólica. Os governos têm buscado um desenvolvimento mais sustentável de suas economias, e a matriz energética tem um papel crucial nessa agenda ambientalista.

As energias renováveis, além de não emitirem CO₂ durante a produção de energia elétrica, não dependem de fontes primárias que demorem a se renovar caso estas últimas estejam escassas, como é o caso dos combustíveis fósseis que demoram milhões de anos para se formarem. Porém, as fontes renováveis possuem impactos ambientais não ligados à emissão de CO₂.

Como já foi dito anteriormente, essas fontes renováveis não emitem CO₂ durante a produção de energia elétrica. No entanto, durante o seu processo de instalação e concepção, existem outros impactos ambientais (e até mesmo sociais) que não podem ser desconsiderados, como o impacto na fauna e flora em torno de uma central hidrelétrica. Essa discussão foge o escopo deste trabalho, porém é importante ressaltar que as fontes ditas renováveis podem impactar o meio ambiente de outras formas.

Dado todo o contexto ambiental em que o mundo se encontra, as energias renováveis se apresentam como uma solução para diminuir o impacto negativo da geração

de energia elétrica por meio de uma transição energética da matriz elétrica, isto é, redução da porção de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis, como a energia solar, eólica, biomassa e geotérmica.

Diante desse panorama global e a urgência de uma mudança na matriz elétrica, este Trabalho de Final de Curso (TCC) tem por objetivo de estudar a evolução da matriz elétrica brasileira ao longo dos anos e analisar os desafios futuros causados pela transição da matriz elétrica com uma maior presença de fontes de energia eólica e solar.

1.1 Objetivo principal do estudo

Este TCC tem por objetivo principal analisar a evolução da matriz elétrica brasileira, observando principalmente a evolução de fontes eólicas e solares, e estudar os impactos e desafios gerados por essa mudança.

Os objetivos específicos deste TCC são:

- Estudar a evolução da matriz energética brasileira;
- Comparar a matriz energética brasileira (e sua evolução) com o panorama mundial;
- Abordar a evolução das fontes de energia eólica e solar;
- Analisar o impacto do aumento de fontes de energia eólica e solar no sistema elétrico brasileiro.

1.2 Estrutura

A estrutura a ser utilizada neste trabalho apresentará a seguinte forma:

- O Capítulo 1 é uma apresentação geral do estudo buscando trazer a familiarização com o tema, os objetivos deste trabalho e a estrutura deste estudo;
- O Capítulo 2 revisa alguns termos e definições que serão usados neste estudo, trazendo ao leitor familiarização com as terminologias do sistema elétrico, da geração de energia, das energias renováveis, da matriz elétrica etc;
- O Capítulo 3 apresenta uma estudo quantitativo e qualitativo da evolução da matriz elétrica brasileira;

- O Capítulo 4 aborda os impactos no sistema elétrico ocasionados pelo aumento da porção de energia eólica e solar na matriz elétrica brasileira;
- O Capítulo 5 apresenta as conclusões que podem ser extraídas das análises apresentadas nos capítulos anteriores e também sugestões de trabalhos que podem ser explorados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será estabelecido a fundamentação teórica necessária para desenvolver este TCC. Conceitos e definições que serão usados durante este trabalho são definidos conforme a literatura, buscando familiarizar o leitor com o tema. A fundamentação ocorre em torno dos conceitos ligados ao tema deste TCC, como funcionamento da geração de energia elétrica de fontes renováveis e não renováveis, matriz elétrica, sistema elétrico de potência etc.

2.1 Transição energética

A transição energética é a passagem de uma matriz energética focada nos combustíveis fósseis para uma com baixa ou zero emissões de CO₂, baseada em fontes renováveis (ENEL, 2020). Ela tem por objetivo diminuir o impacto da produção de energia elétrica no meio ambiente, isto é, ela combate o processo de aquecimento global.

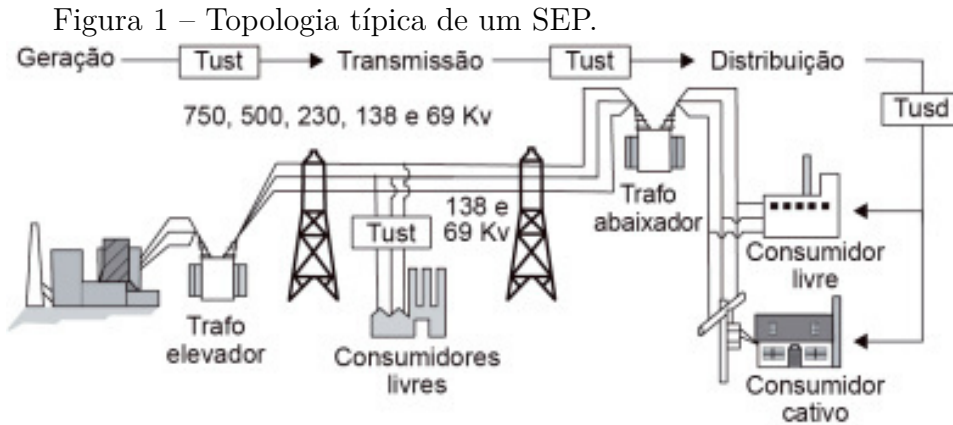
A transição energética é usada como principal instrumento para obedecer as metas definidas na 21^a Conferência do Clima (COP21) de Paris, um acordo internacional que estabelece como meta limitar, até o final deste século, o aquecimento global em 2 graus Celsius em relação aos níveis pré-industriais (antes da revolução industrial), e de preferência limitá-lo a 1,5 graus Celsius.

2.2 Sistema elétrico de potência (SEP)

Os SEPs são sistemas constituídos por centrais de produção de energia elétrica, subestações de transformação e de interligação, linhas de transmissão e de distribuição, e cargas, que, ligadas eletricamente entre si, são responsáveis por gerar, transmitir e distribuir energia elétrica atendendo a determinados padrões (VASCONCELOS, 2017).

Os requisitos básicos desse sistema são: continuidade do serviço (energia sempre disponível), conformidade (obedece a padrões), flexibilidade (capacidade de se adaptar a novas topologias), segurança (sem risco aos consumidores) e manutenção (restauração do sistema o mais rápido possível em caso de falhas).

A Figura 1 ilustra uma topologia típica desse tipo de sistema.



Fonte: (VASCONCELOS, 2017).

2.2.1 Geração Elétrica

A geração elétrica é o sistema responsável por produzir energia elétrica, formado por centrais elétricas que convertem alguma forma de energia em energia elétrica (VASCONCELOS, 2017). Por exemplo, as usinas hidrelétricas convertem a energia cinética das quedas d'água em energia elétrica. Tipicamente, os sistemas de geração produzem energia em tensões entre 6,9 kV até 30kV, as quais são posteriormente elevadas por um transformador elevador antes de a energia produzida entrar no processo de transmissão. Existem dois tipos de planejamento de geração: **centralizado** e **distribuído**.

No primeiro caso, as centrais geradoras estão localizadas distantes do centro de consumo, pois estão em geral associadas a fontes primárias cujo aproveitamento é mais adequado ao local de ocorrência, tais como grandes hidrelétricas, usinas na boca de mina de carvão e usinas de gás natural (REIS, 2011). No caso do Brasil, esse é o tipo mais comum, pois a matriz elétrica do país está concentrada em grandes hidrelétricas.

No segundo caso, centrais de pequeno ou médio porte, desenvolvidas para atendimento a consumo local/regional, se localizam próximas às cargas (REIS, 2011). Sistemas eólicos e sistemas fotovoltaicos (FV) de pequeno porte são exemplo desse tipo de geração.

2.2.2 Transmissão Elétrica

A transmissão é responsável pelo transporte de energia elétrica dos centros de geração aos de consumo. Esse sistema é formado por torres (estruturas metálicas que erguem os cabos a uma distância segura do solo), isoladores (geralmente feitos de cerâmica,

vidros ou polímeros para garantir a rigidez elétrica contra a fuga de corrente para as torres e suportar o peso dos cabos), subestações (projetadas para elevar ou abaixar os níveis de tensão) e cabos (VASCONCELOS, 2017). Os níveis de tensão estão, tipicamente, entre 230 kV e 765 kV.

2.2.3 Distribuição Elétrica

A distribuição elétrica é responsável pelo recebimento da energia dos sistemas de transmissão e pela distribuição para os consumidores finais. Esse sistema tem em sua composição postes, isoladores, subestações, cabos e diversos outros elementos (VASCONCELOS, 2017).

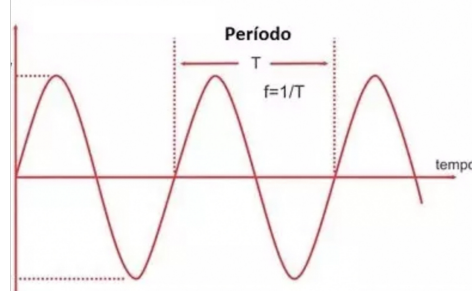
A tensão primária dos transformadores tipicamente é de 13,8 kV no Brasil, enquanto a secundária depende do local (127/220 V ou 220/380 V). No caso do estado do Ceará, a tensão secundária é 220/380 V.

2.3 Frequência elétrica

A frequência elétrica é uma grandeza dada em Hertz (Hz), em homenagem ao físico alemão Heinrich Rudolf Hertz. Ela corresponde ao número de oscilações, ondas ou ciclos por segundo que ocorre na corrente elétrica alternada (ELÉTRICA, 2018).

A Figura 2 ilustra o comportamento de uma corrente alternada sinusoidal.

Figura 2 – Forma de onda de uma corrente alternada.



Fonte: (ELÉTRICA, 2018) adaptado pelo autor.

A frequência se calcula pela seguinte fórmula $f = 1/T$, em que f é frequência da corrente e T é o período da onda. No Brasil, a frequência do sistema elétrico é de 60 Hz.

2.4 Matriz energética e elétrica

A matriz energética representa o conjunto de fontes de energia disponíveis para movimentar os carros, preparar a comida no fogão e gerar eletricidade (EPE, 2019). Logo, ela representa o uso energético total de um país.

A matriz elétrica é formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica em um país, estado ou no mundo (EPE, 2019). Ela é composta por combustíveis fósseis (carvão mineral, gás natural, ...), energia hidrelétrica, energia nuclear, energia eólica etc.

2.5 Fontes não-renováveis

Fontes não-renováveis são consideradas fontes passíveis de se esgotar por serem utilizadas com velocidade bem maior do que os milhões de anos necessários para sua formação (REIS, 2011). Nessa categoria estão as fontes que utilizam combustíveis fósseis, combustíveis radioativos e o gás natural.

2.6 Fonte renováveis

Fontes renováveis são aquelas cuja reposição pela natureza é bem mais rápida do que a sua utilização energética (como as águas dos rios, marés, sol e vento) ou cujo manejo pelo homem pode ser efetuado de forma compatível com as necessidades de sua utilização energética (como a biomassa) (REIS, 2011). Nessa categoria se enquadra a energia gerada por usinas hidrelétricas, eólicas, solar e centrais de biomassa.

Além disso, as energias renováveis são fontes de energia alternativas com baixo custo ambiental (baixa emissão de CO₂), as quais diminuem os impactos ambientais e sociais causados pelas fontes de energia tradicionais e buscam preservar os recursos naturais.

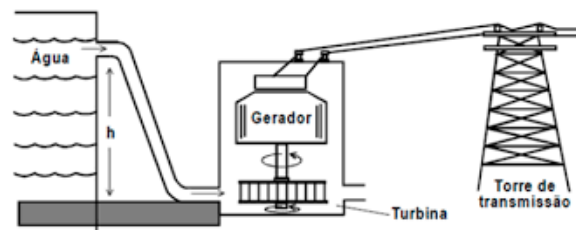
2.6.1 *Energia hidráulica*

A energia hidráulica é obtida pelo aproveitamento do potencial gravitacional da água corrente e de quedas d'água. Quando é usada para gerar eletricidade passa a ser chamada de energia hidrelétrica (ESFERA, 2021b).

O seu funcionamento ocorre da seguinte maneira: a água aciona uma turbina hidráulica que movimenta o rotor de um gerador elétrico para a produção de energia elétrica (REIS, 2011). A turbina hidráulica efetua a transformação da energia hidráulica em mecânica, com isso o gerador elétrico tem seu rotor acionado por acoplamento mecânico com a turbina e transforma energia mecânica em elétrica por meio das interações eletromagnéticas ocorridas em seu interior.

Para esse tipo de geração, utiliza-se geralmente geradores síncronos, pois o sistema de potência possui frequência fixa (no caso do Brasil essa frequência é 60 Hz) (REIS, 2011). A Figura 3 ilustra um esquema simplificado do funcionamento de uma central hidrelétrica.

Figura 3 – Esquema simplificado de uma central hidrelétrica.



Fonte: (BRASILEIRO, 2015).

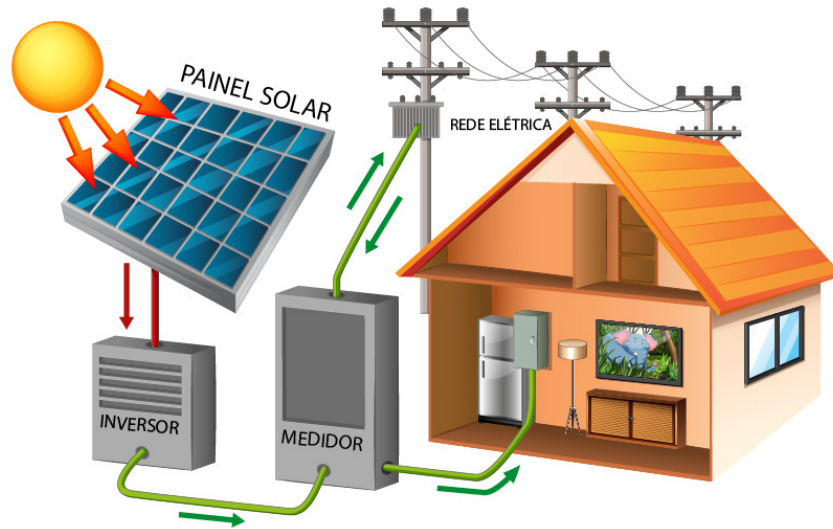
2.6.2 *Energia solar*

A energia solar é uma energia alternativa renovável e sustentável que funciona utilizando a luz solar como fonte de energia e pode ser aproveitada e utilizada por diferentes tecnologias, como aquecimento solar, energia solar FV e energia heliotérmica (SOLARGIS, 2020). O conceito básico desse tipo de energia é o aproveitamento da radiação solar incidente na Terra, a qual é usada para gerar energia elétrica.

No caso dos sistemas FV, o processo de energia ocorre a partir do efeito fotoelétrico, o qual consiste na movimentação dos elétrons (eletricidade) entre bandas de energia dentro de um material semicondutor quando existe a incidência de fótons. No caso de placas FV, elas são construídas a partir de semicondutores que geram eletricidade quando a luz solar incide sobre elas. A energia solar é gerada pelos módulos FV e levada ao inversor solar, equipamento responsável por transformar a corrente elétrica contínua em alternada e, então, ser distribuída para o local de consumo e utilizada pelos equipamentos (SOLAR, 2019). A Figura 4 ilustra de uma maneira simplificada o processo de produção

de energia elétrica.

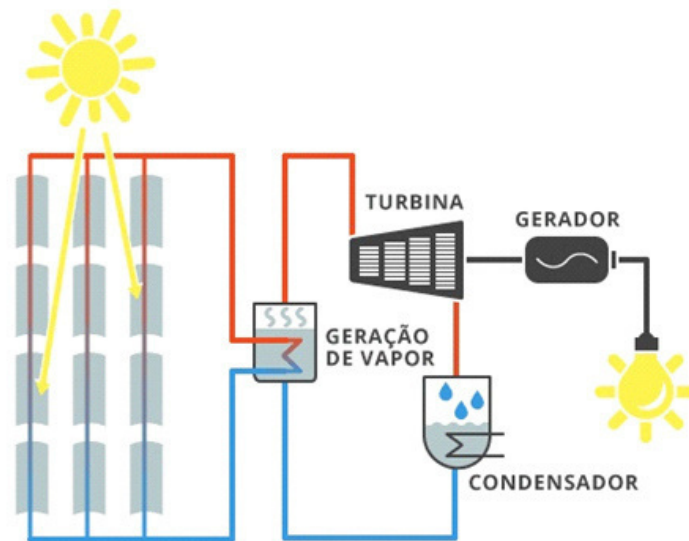
Figura 4 – Esquema simplificado da geração FV.



Fonte: (SOLAR, 2019).

No caso da geração heliotérmica, converte-se a energia solar em energia térmica e esta, por sua vez, em energia elétrica. O processo de conversão passa por quatro sistemas básicos: coletor, receptor, transporte-armazenamento e conversão elétrica. O coletor capta e concentra a radiação solar incidente na superfície do coletor e transporta essa energia até o sistema em que a radiação é convertida em energia térmica. O receptor absorve e converte a radiação solar, transferindo o calor a um fluido de trabalho. Esse fluido é transferido para o sistema em que a energia térmica converte-se em energia mecânica por meio de ciclos básicos de termodinâmicas. Por fim, a conversão de energia mecânica em energia elétrica é feita por meio dos mesmos processos convencionais utilizados na geração termelétrica (REIS, 2011). A Figura 5 ilustra esse tipo de geração.

Figura 5 – Esquema simplificado da geração heliotérmica.

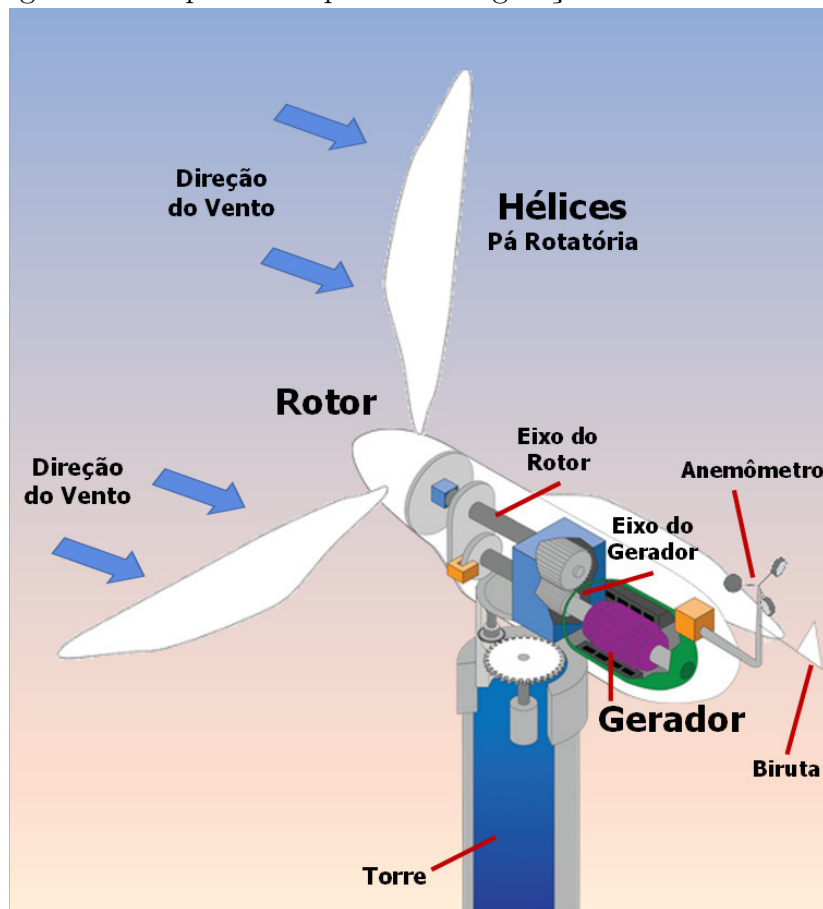


Fonte: (SOLAR, 2016).

2.6.3 Energia eólica

A energia eólica consiste na energia cinética contida nos movimentos das massas de ar na atmosfera (ventos), produzidos essencialmente através do aquecimento diferenciado das camadas de ar pelo Sol e através do movimento da Terra sobre seu próprio eixo (REIS, 2011). Essa energia cinética é, então, transformada em energia elétrica. O processo de extração é realizado principalmente graças a uma turbina eólica (que transforma a energia cinética em energia mecânica) e a um gerador (que transforma a energia mecânica em elétrica) (IBERDROLA, 2019). A Figura 6 ilustra o funcionamento desse tipo de geração.

Figura 6 – Esquema simplificado da geração eólica.



Fonte: (CBIE, 2020).

Existem dois tipos de geração eólica: *on-shore* (produção terrestre geralmente na região costeira) e *off-shore* (produção dentro do mar). A vantagem do último tipo de geração é a maior constância de ventos mais fortes dentro do mar, porém o custo de instalação e manutenção é mais oneroso que as eólicas terrestres.

2.6.4 *Energia maremotriz*

Esse tipo de energia se aproveita da atração gravitacional que a lua exerce sobre a Terra, gerando as marés, as quais são responsáveis por encher e esvaziar baías e estuários. Essa alteração de nível de água gera uma energia cinética que pode ser convertida em energia elétrica. Um esquema de aproveitamento das marés contém uma barragem, construída num estuário e equipada com uma série de comportas, que permite a entrada d'água para a baía (REIS, 2011).

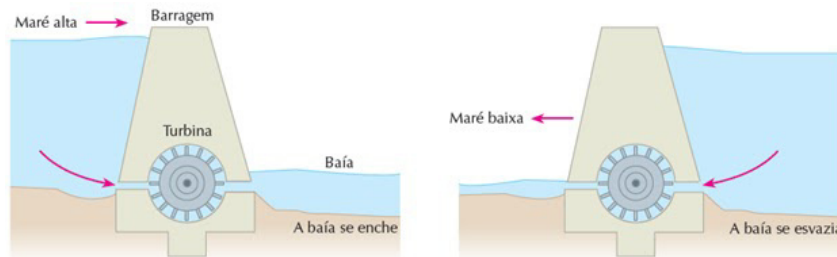
A eletricidade é gerada por turbinas axiais (turbina bulbo convencional ou turbina Straflo). Existem dois métodos convencionais de gerar energia elétrica: geração na

maré alta e *flood generation*.

O primeiro é o mais comum e consiste em, durante a maré alta, armazenar a água na baía através de comportas até a maré recuar suficientemente e criar um nível satisfatório em que a água é liberada através das turbinas para geração de eletricidade. O segundo método gera eletricidade no ciclo inverso ao anterior, quando a maré flui para dentro da baía (REIS, 2011). Existe a possibilidade de gerar energia elétrica na maré alta e baixa (um mistura dos dois métodos apresentados anteriormente), porém ele requiere uma complexidade maior da turbina e construção da baía.

A Figura 7 ilustra de uma forma simplificada o funcionamento da geração maremotriz nos dois sentidos.

Figura 7 – Esquema simplificado da geração maremotriz.



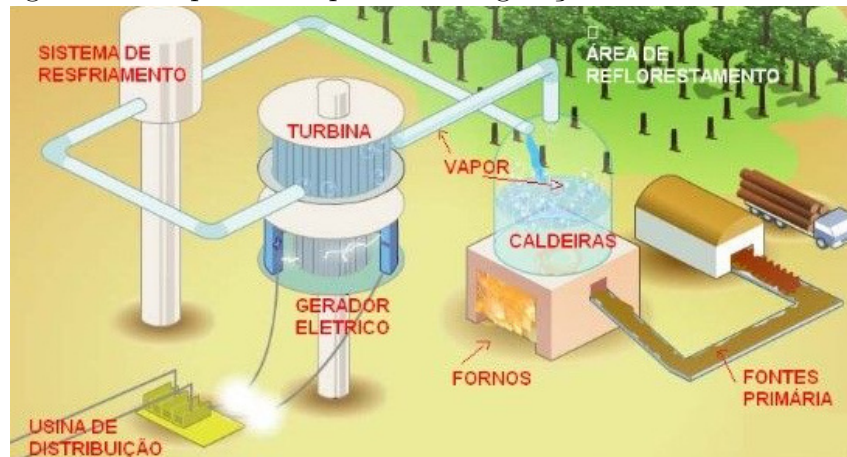
Fonte: (FISICA, 2012).

2.6.5 Energia de biomassa

A energia de biomassa é resultado da queima de matérias-primas orgânicas. Essa definição, no entanto, não engloba combustíveis fósseis, apesar de estes serem derivados do ramo vegetal e mineral, como nos casos do carvão, do petróleo e do gás natural. Essa distinção é feita porque o termo biomassa se refere apenas aos derivados mais recentes de organismos vivos (ESFERA, 2021a).

O processo de geração de energia elétrica acontece de forma semelhante a uma central termelétrica, em que o vapor da queima dos materiais orgânicos é usado para girar a turbina de um gerador que transforma energia cinética em energia elétrica. A Figura 8 ilustra esse processo simplifiadamente.

Figura 8 – Esquema simplificado de geração biomassa.



Fonte: (CBIE, 2019).

2.7 Proteção de sistema elétricos

A principal função de um sistema de proteção é assegurar a desconexão de todo o sistema elétrico ou parte dele submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites previstos. Em segundo lugar, o sistema de proteção tem a função de fornecer as informações necessária aos responsáveis por sua operação, de modo a facilitar a identificação dos defeitos e a sua conseqüente recuperação (MAMEDE, 2017).

Para que o sistema de proteção atinja a finalidade a que se propõe, ele deve responder aos seguintes requisitos básicos (MAMEDE, 2010):

1. **Seletividade:** é a capacidade que possui o sistema de proteção de selecionar a parte danificada da rede e retirá-la de serviço sem afetar os circuitos sãos;
2. **Exatidão e segurança:** garante ao sistema uma alta confiabilidade operativa;
3. **Sensibilidade:** representa a faixa de operação e não operação do dispositivo de proteção.

2.8 Potência e corrente de curto-circuito

O sistema de proteção é regulado baseado na corrente de curto-circuito (I_{cc}) que aparece na rede. Essa corrente é definida a partir da potência de curto-circuito, a qual é uma grandeza fictícia usada para estimar a sensibilidade da rede. A potência de

curto-circuito (S_{cc}) é dada pela Equação (2.1):

$$S_{cc} = \sqrt{3} * U_N * I_{cc} \quad (2.1)$$

Em que U_N representa a tensão na rede. Quanto maior essa potência, a rede será menos sensível a perturbação, pois o sistema de proteção pode identificar com maior facilidade o caso de defeito (EDF, 2018).

2.9 Flexibilidade do sistema elétrico

A flexibilidade é a capacidade de um sistema elétrico de potência de gerenciar de maneira confiável e econômica a variabilidade e a incerteza da demanda e do suprimento em todas as escalas relevantes de tempo, desde garantir estabilidade instantânea do sistema de potência até dar suporte à segurança do suprimento a longo prazo (IEA, 2019).

Por exemplo, no Brasil, as usinas hidrelétricas e termelétricas são responsáveis por flexibilizar o sistema elétrico, pois elas são fontes não intermitentes possibilitando o planejamento dos seus despachos.

3 MATRIZ ELÉTRICA

A sociedade evoluiu e continua se reinventando ao passar dos anos, e o sistema elétrico acompanha essa evolução se adaptando aos novos panoramas e realidades. Além da evolução da produção de energia elétrica, essa geração também se adapta às condições ambientais, como é o caso da transição energética que busca descarbonizar a matriz energética mundial.

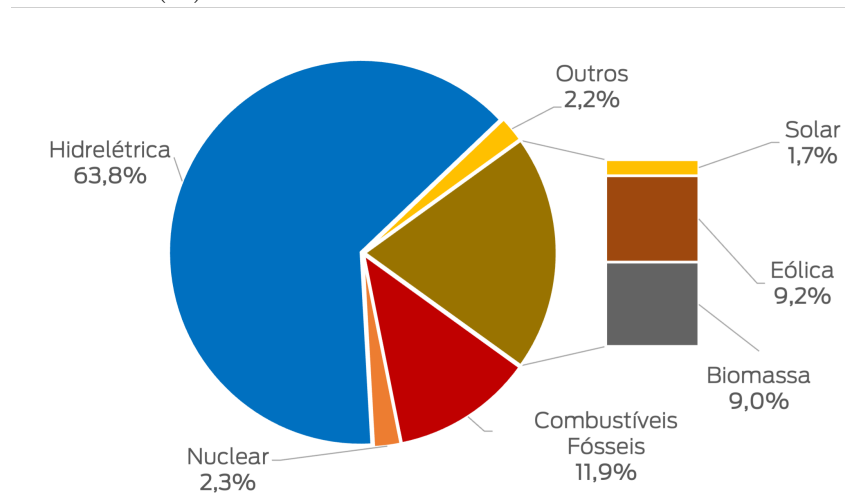
Para entender melhor o papel que o Brasil está exercendo nesse movimento global, é necessário entender primeiramente a sua composição (atual e histórica) e realizar comparativos com outros países a fim de situar o Brasil no contexto mundial na transição energética que vem ocorrendo ao longo dos anos. Portanto, esse capítulo apresenta esse estudo da matriz elétrica, dando ênfase à porção de energia eólica e solar, as quais são conectadas à rede via conversores de potência (esse assunto será abordado com mais detalhes no Capítulo 4).

3.1 Composição da matriz elétrica brasileira

O Gráfico 4 mostra a composição da geração de energia elétrica por fonte no Brasil em 2020.

Como pode-se constatar, a energia hidráulica é a fonte mais importante da matriz brasileira representando 64% da geração no ano de 2020. A importância da energia hidráulica se deve, em boa parte, às condições naturais e climáticas, como regimes de chuvas regulados e rio caudalosos em zona de planaltos que proporcionam um ambiente ideal para um melhor aproveitamento das turbinas das hidrelétricas.

Gráfico 4 – Geração de energia elétrica por fonte no Brasil em 2020 (%).



Fonte: (EPE, 2021) adaptado pelo autor.

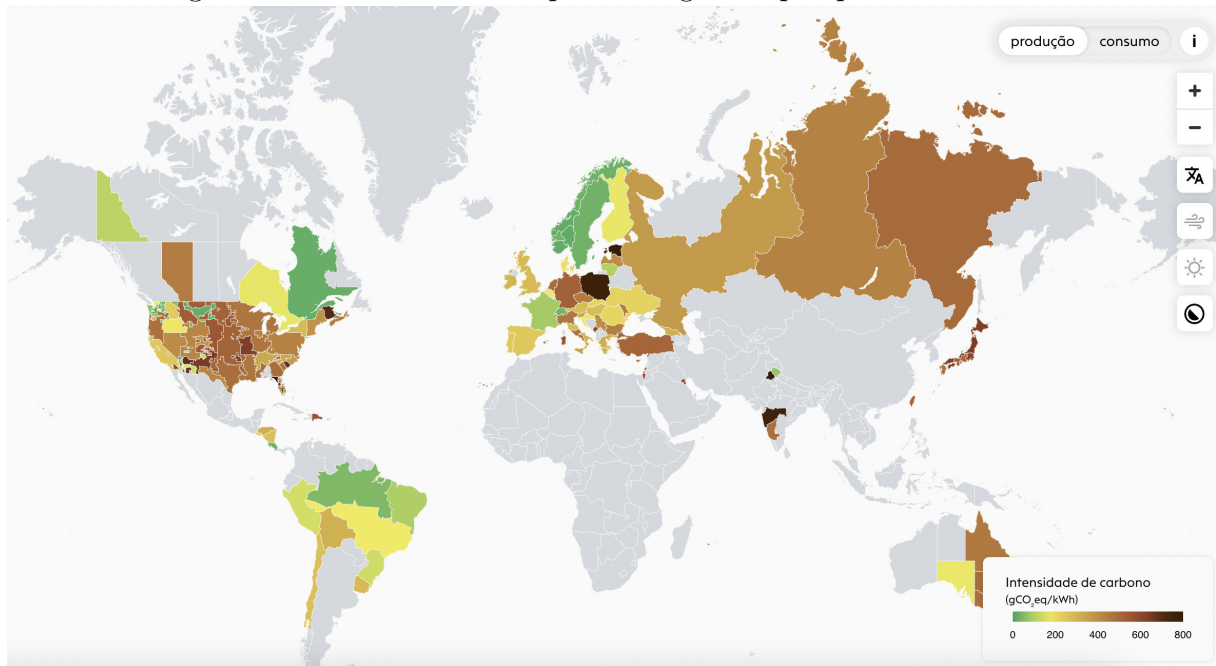
Uma grande vantagem desse tipo de produção é o fato de ela ser uma fonte renovável, o que ajuda a descarbonização da matriz elétrica brasileira. Além dessa fonte, existem outras fontes renováveis com bastante relevância na matriz brasileira, como é o caso da eólica (9%), biomassa (9%) e solar (2%). No total, em torno de 84% da geração de energia no Brasil provém de fontes renováveis. Um número bastante elevado e completamente diferente do panorama mundial.

3.2 Composição da matriz elétrica mundial

O Gráfico 3 mostra que, em 2018, a produção de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis representava 63,5% da matriz mundial contra 12% no Brasil. Constatase, portanto, que a matriz elétrica brasileira está a frente dos outros países ao redor do mundo, os quais ainda se baseiam em combustíveis fósseis para gerar a maior parte da energia elétrica necessária para suprir a demanda do país.

Para efeitos de comparação, o mapa presente na Figura 9 ilustra a distribuição de emissão de CO₂ por país. Além do Brasil, países como Noruega e Suécia possuem uma matriz elétrica pouco poluente, enquanto que Estados Unidos, Rússia e Polônia possuem uma composição que emite grandes quantidades de CO₂ por kWh gerado.

Figura 9 – Emissão de CO₂ por kWh gerado por país.



Fonte: (Electricity Map, 2022).

Apesar de, historicamente, a matriz brasileira estar concentrada em uma energia limpa e renovável (hidráulica), existem esforços para melhorar ainda mais esse mix energético do país devido à alta incidência solar e de ventos em algumas regiões do país. Na próxima seção, essa evolução da matriz é abordada com mais detalhes.

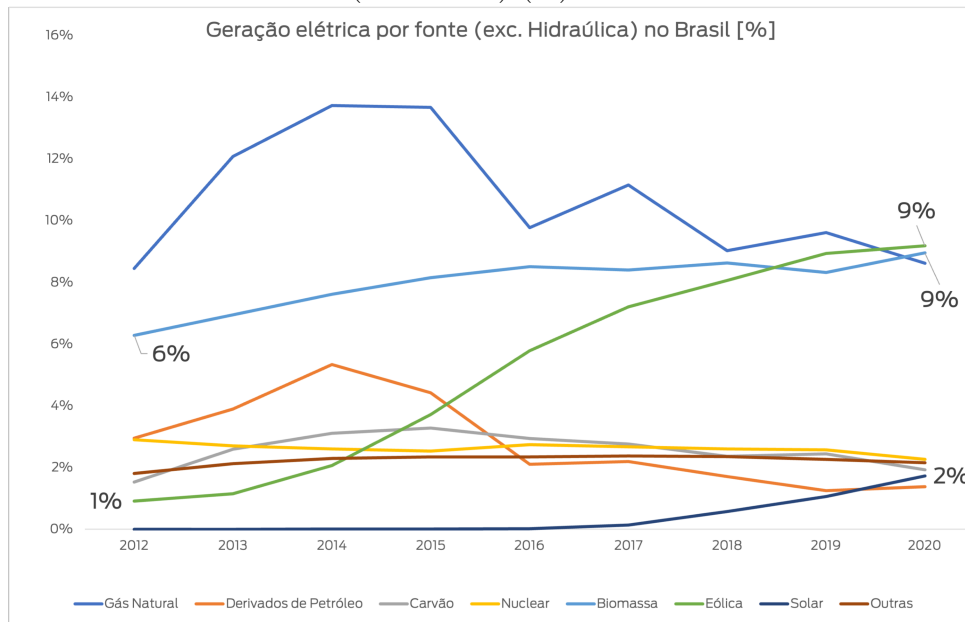
3.3 Evolução da geração da matriz elétrica brasileira

Apesar de possuir as centrais hidrelétricas como a base da produção de energia elétrica do país, a porcentagem de fontes renováveis, como a eólica e a solar, tem aumentado na composição da matriz. Essa mudança se deve aos esforços do governo e das empresas de diversificarem a matriz, de colocar em prática a agenda ambiental visando conter a emissão de gases de efeito estufa e diminuir a dependência das fontes não-renováveis e também da energia hidráulica (durante períodos de crise hídrica, o sistema elétrico se torna bastante frágil e corre riscos de eventuais colapsos).

3.3.1 Evolução da composição brasileira

O Gráfico 5 - a qual não possui a porcentagem da energia hidráulica por questões de visibilidade - ilustra essa evolução da matriz ao longo do tempo.

Gráfico 5 – Geração de energia elétrica por fonte (exc. hidráulica) no Brasil (2012-2020) (%).



Fonte: (EPE, 2021) adaptado pelo autor.

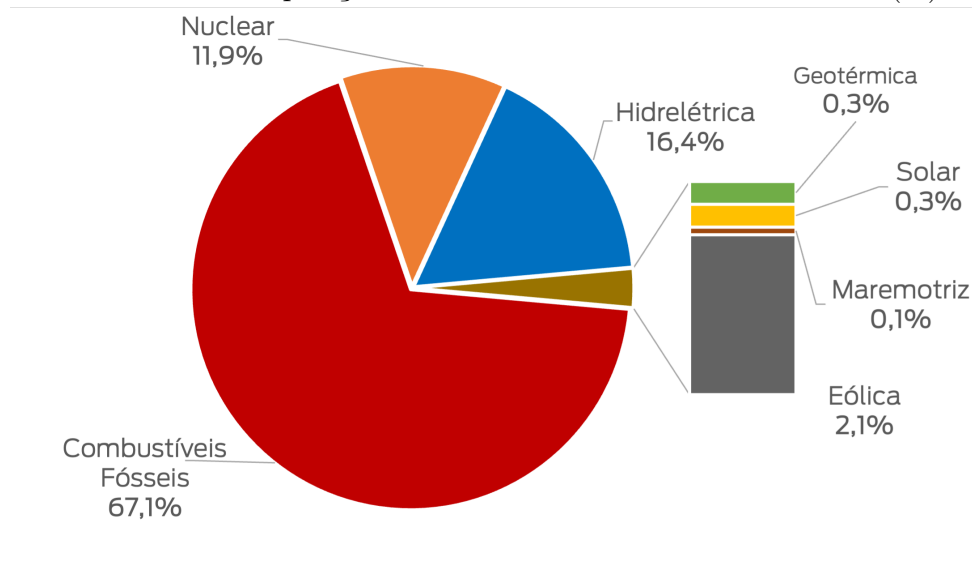
Nota-se que a energia eólica foi a fonte que mais se destacou saindo de uma representação de 1% em 2012 para alcançar 9% da energia total produzida no país em 2020. Biomassa e solar também cresceram sua relevância na produção do país, no caso da última a sua contribuição era próxima de zero em 2012 e alcançou o patamar de 2% em 2020. Em contrapartida, fontes de derivados de petróleo reduziram a sua presença na matriz, uma redução de 2 pontos percentuais ao longo de 8 anos.

3.3.2 Evolução da composição global

Comparando com a evolução global (Gráficos 6 e 7), vemos que existe um movimento parecido globalmente do aumento da penetração de energias renováveis, como eólica e solar. Na matriz mundial, a porção de produção eólica e solar saiu de 2,1% e 0,3% em 2010 para 5,0% e 2,3%, respectivamente, um aumento bastante significativo que demonstra os esforços globais para conter o aquecimento global e respeitar o acordo (COP21 de Paris) assinado em 2015, o qual visa diminuir os efeitos do aquecimento global.

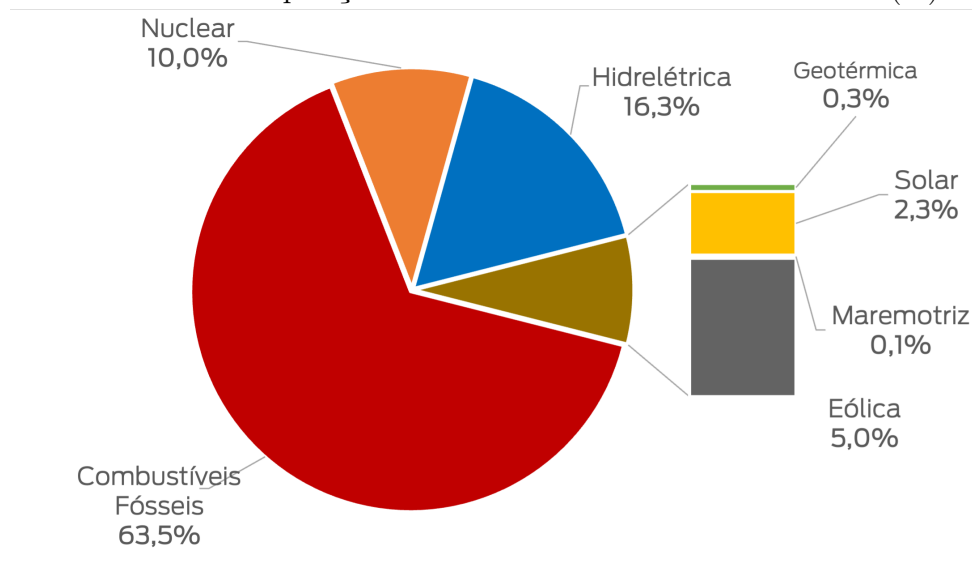
Não obstante, apesar desses esforços, a matriz elétrica mundial depende demasiadamente das fontes que usam combustíveis fósseis. Em 2018, essa porção ainda representou 63,5% da geração de energia elétrica mundial.

Gráfico 6 – Composição da matriz elétrica mundial em 2010 (%).



Fonte: (EPE, 2021) adaptado pelo autor.

Gráfico 7 – Composição da matriz elétrica mundial em 2018 (%).



Fonte: (EPE, 2021) adaptado pelo autor.

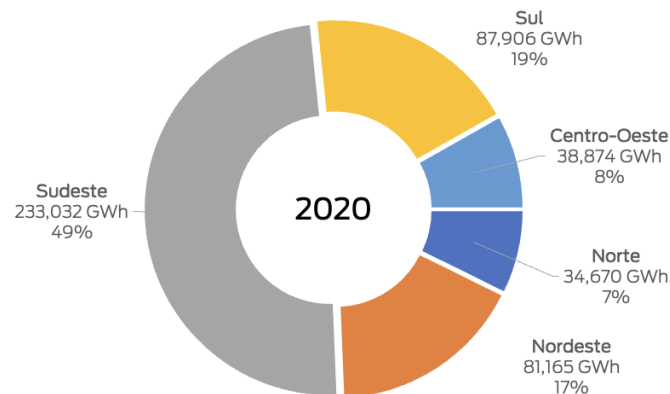
3.4 Matriz elétrica brasileira por região

Além das diferenças observadas entre a geração de energia elétrica brasileira e outros países, existem diferenças entre as matrizes elétricas das regiões do território brasileiro.

3.4.1 Consumo de energia elétrica

Historicamente, a região Sudeste, a qual é o centro econômico do país e possui uma maior densidade populacional, concentra o maior consumo do país. Em 2020, esse valor foi de aproximadamente 233 GWh representando quase a metade do consumo do país, como mostra o Gráfico 8.

Gráfico 8 – Consumo de energia elétrica por região em 2020 (GWh).

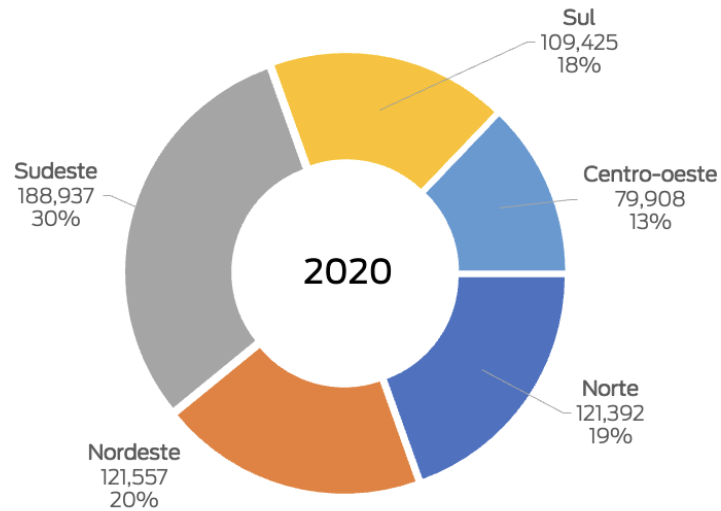


Fonte: (EPE, 2021) adaptado pelo autor.

3.4.2 Geração de energia elétrica

No entanto, o nível de geração de energia elétrica possui uma composição diferente, como mostra o Gráfico 9. A região Sudeste representou apenas 30% da produção total em 2020 e, em números absolutos, a matriz regional não consegue atender a demanda local. Por esse motivo, o sistema elétrico nacional realiza intercâmbio de energia entre as regiões para suprir a demanda e equilibrar o sistema.

Gráfico 9 – Geração de energia elétrica por região em 2020 (GWh).

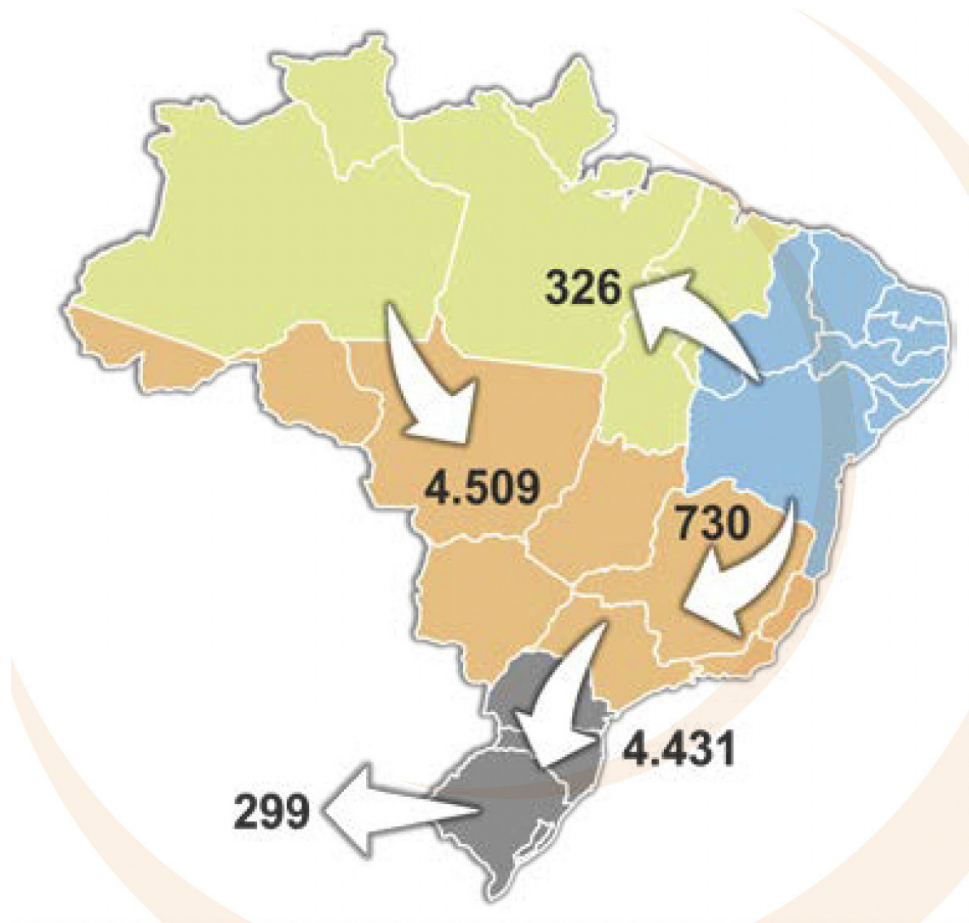


Fonte: (EPE, 2021) adaptado pelo autor.

3.4.3 Intercâmbio de energia elétrica

A Figura 10 ilustra o intercâmbio de energia elétrica entre as regiões em agosto de 2020. Nota-se que o fluxo de energia elétrica flui da região norte e nordeste (regiões de menor consumo) em direção a região sul e sudeste (regiões de maior consumo). Inclusive, existe um fluxo de intercâmbio de energia com outros países da América Latina.

Figura 10 – Intercâmbio de energia elétrica entre as regiões do SIN em 2020 (MW médio).



Fonte: (EPE, 2021) e Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

3.4.4 Geração por fonte de energia elétrica

Além da diferença de consumo e geração entre as regiões, existem também uma diferença na composição da matriz elétrica. Como pode-se observar pela Tabela 1 e pelo Gráfico 10, a hidrelétrica é a base de produção de todas as regiões, chegando ao patamar de quase 80% nas regiões Norte e Sudeste/Centro-oeste. Vale ressaltar que esta última região é também a única a possuir geração por fontes nucleares (Angra I e II).

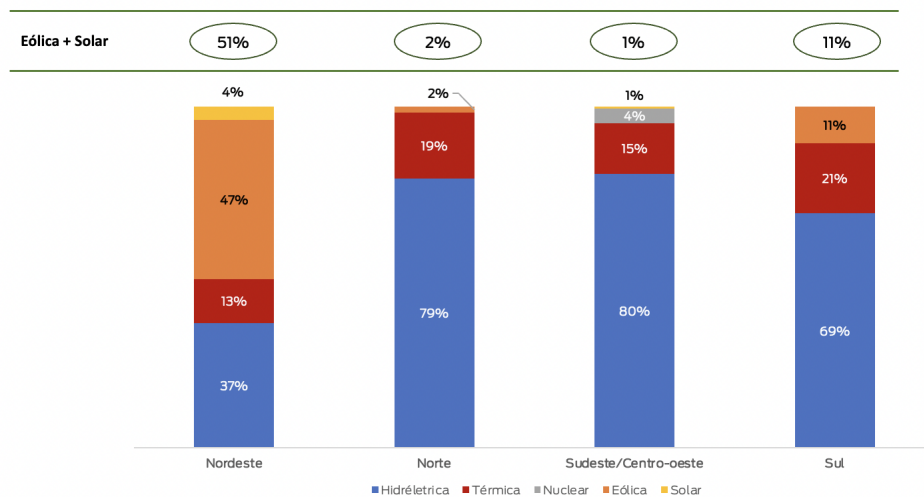
Tabela 1 – Geração por região e fonte (GWh).

Geração de energia por região e fonte (GWh)					
	Hidrelétrica	Térmica	Nuclear	Eólica	Solar
Nordeste	38,219	13,465	-	48,900	4,008
Norte	67,915	16,490	-	1,546	10
Sudeste/Centro-oeste	267,532	49,381	14,053	54	1,936
Sul	41,836	12,569	-	6,494	7

Fonte: ONS adaptado pelo autor.

Observando a composição da matriz por região com uma ênfase nas novas tecnologias que usam fontes renováveis, como é o caso da eólica e solar, nota-se que o perfil varia drasticamente entre as regiões. A região Nordeste é a maior região produtora de energia elétrica a partir dessas novas tecnologias. A energia eólica e solar representaram juntas 51% da geração de energia elétrica em 2020 na região, enquanto que a região Norte e Sul/Centro-oeste possuem uma pequena representação desses tipos de energia (2% e 1%, respectivamente). A região Sul também possui uma representação significativa de 11% em energia eólica e solar.

Gráfico 10 – Geração por região e fonte (%) com ênfase na produção eólica e solar.

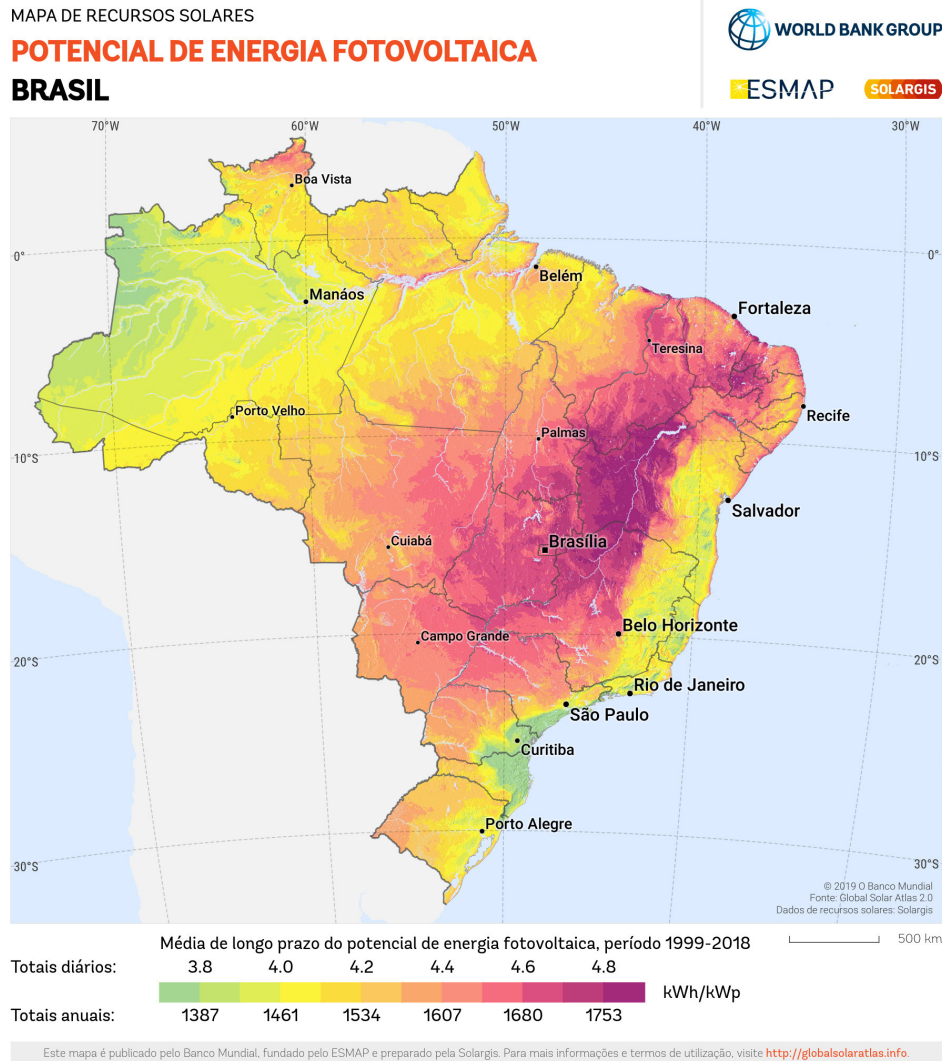


Fonte: ONS adaptado pelo autor.

3.4.5 Potencial solar e eólico

A grande concentração de ventos na região litorânea e a alta incidência solar devido à proximidade com a linha do Equador na região Nordeste são fatores que influenciam essa composição concentrada nessas fontes renováveis, como mostra o Gráfico 10. De fato, essa região possui um potencial energético importante para esses dois tipos de energia, como ilustra as Figuras 11 e 12.

Figura 11 – Potencial de energia FV (kWh/KWp)

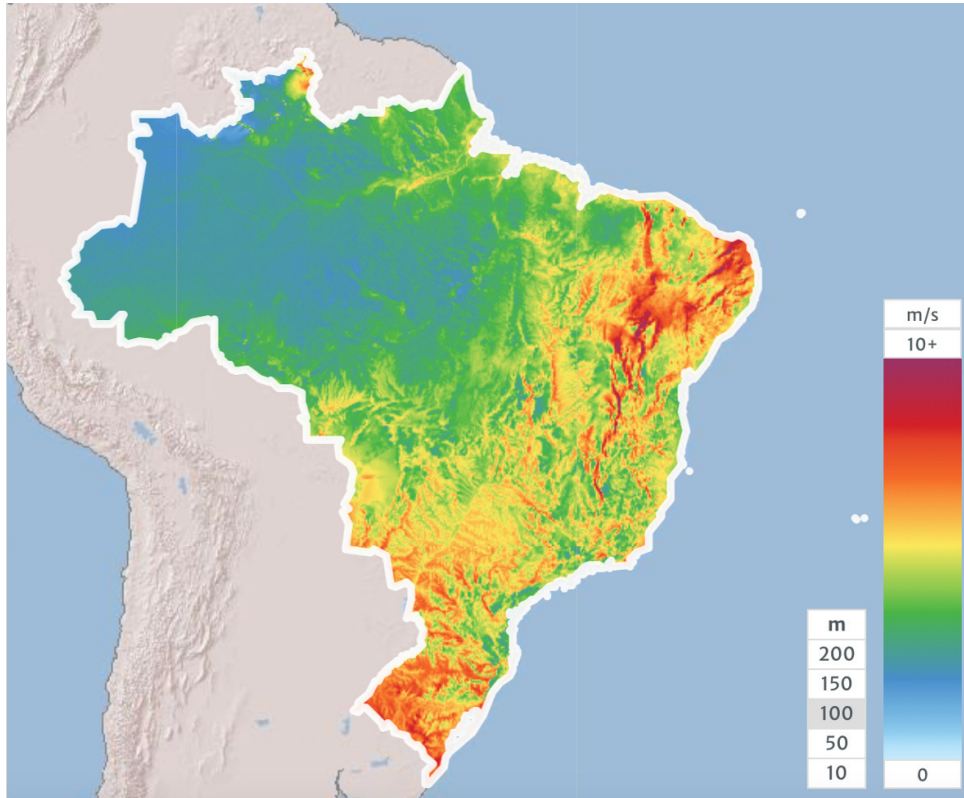


Fonte: (Portal Solar, 2016) adaptado pelo autor.

O mapa de radiação solar no Brasil (Figura 11) demonstra o potencial da energia solar no Cinturão Solar, o qual engloba boa parte do Nordeste. A tendência é que esse tipo de energia se torne mais comum e usada na região conforme os projetos de instalação de painéis FV vão se expandindo.

O mapa da velocidade média dos ventos também reforça potencial eólico a uma altura de 100m (torres eólicas possuem altura em torno de 110m) dentro da região Nordeste (zonas em vermelhos) sem levar em consideração o grande potencial na parte litorânea. Além disso, a região Sul possui regiões de alta incidência de ventos, motivo por qual em torno de 11% da sua geração em 2020 foi provinda de energia eólica.

Figura 12 – Velocidade média dos ventos no Brasil (m/s) a uma altura de 100m.

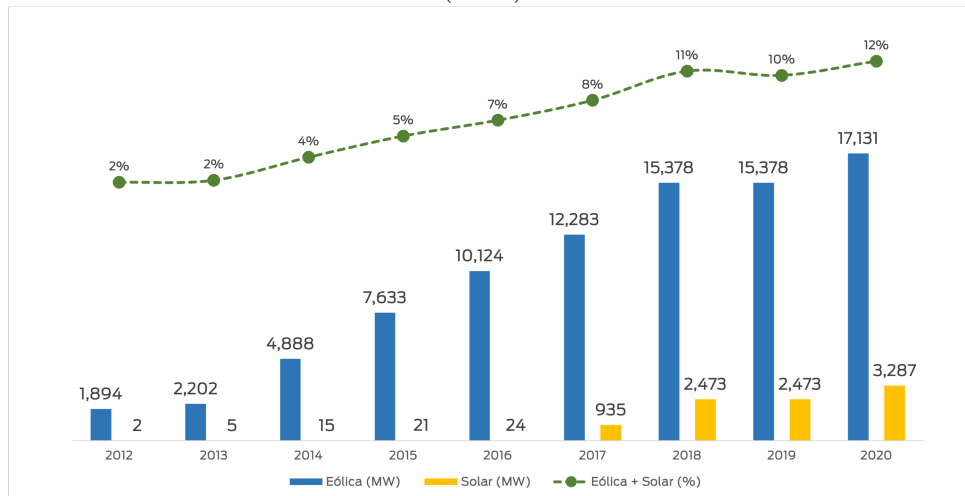


Fonte: (Global Wind Atlas, 2022) adaptado pelo autor.

3.5 Evolução da capacidade instalada no Brasil

Como já foi frisado anteriormente, a geração de energia eólica e solar aumentou nas últimas décadas no Brasil. Esse aumento se deve, em parte, aos esforços dos agentes governamentais e dos operadores da rede que buscaram aumentar a capacidade instalada desse tipo de geração no país, como mostra o Gráfico 11 abaixo.

Gráfico 11 – Evolução da capacidade instalada de geração eólica e solar no Brasil (MW).



Fonte: (EPE, 2021) adaptado pelo autor.

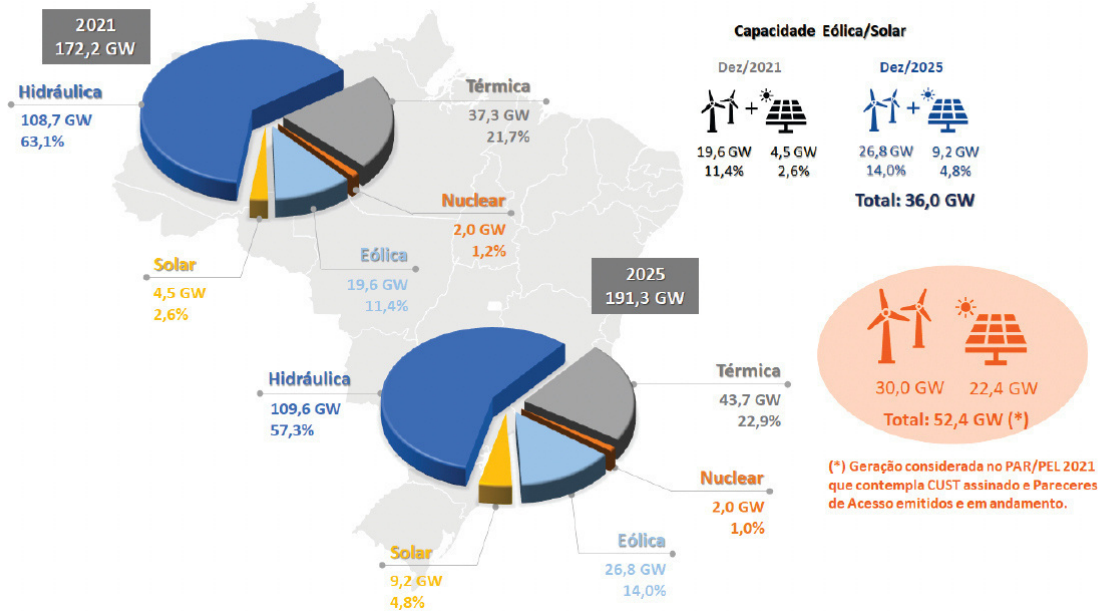
A capacidade instalada de energia eólica e solar em 2020 no Brasil já representava 12% da capacidade total da matriz elétrica brasileira. No entanto, esses esforços de descarbonização da matriz continuam, e a transição para uma matriz com cada vez mais energia eólica e solar faz parte dos planos da ONS. De acordo com o Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN (Sistema Interligado Nacional), o qual tem como objetivo avaliar o desempenho do SIN no horizonte de 5 anos, a energia eólica e solar terão uma representação maior na matriz elétrica brasileira. Segundo as principais conclusões do plano, tem-se:

Nos últimos anos a penetração de geração eólica e solar tem se destacado, chegando a fatia de 11,4% da matriz elétrica. Para os próximos anos, constata-se que a energia FV apresente um crescimento percentual muito expressivo, mais que dobrando a capacidade instalada no horizonte 2021-2025, embora ainda represente uma pequena parcela da matriz. Para o final de 2025, estima-se que a capacidade instalada do SIN totalizará 191,3 GW, sendo que desse montante 36,0 GW serão de usinas eólicas e FV. Com a consideração das usinas com o Contrato de Uso do Sistema de Transmissão (CUST) assinado e pareceres de acesso válidos ou em andamento no ONS esse montante chega a valores de 52,4 GW, sendo que a maior parcela da diferença, cerca de 13,2 GW, são de usinas FV. (ONS, 2021, p.5)

Essa conclusão do relatório demonstra a continuidade do crescimento da energia

eólica e solar na matriz elétrica brasileira, as quais serão cada vez mais relevantes para o país. A Figura 13 ilustra visualmente os números abordados na citação anterior.

Figura 13 – Capacidade instalada no SIN em 2021 e 2025 (GW).



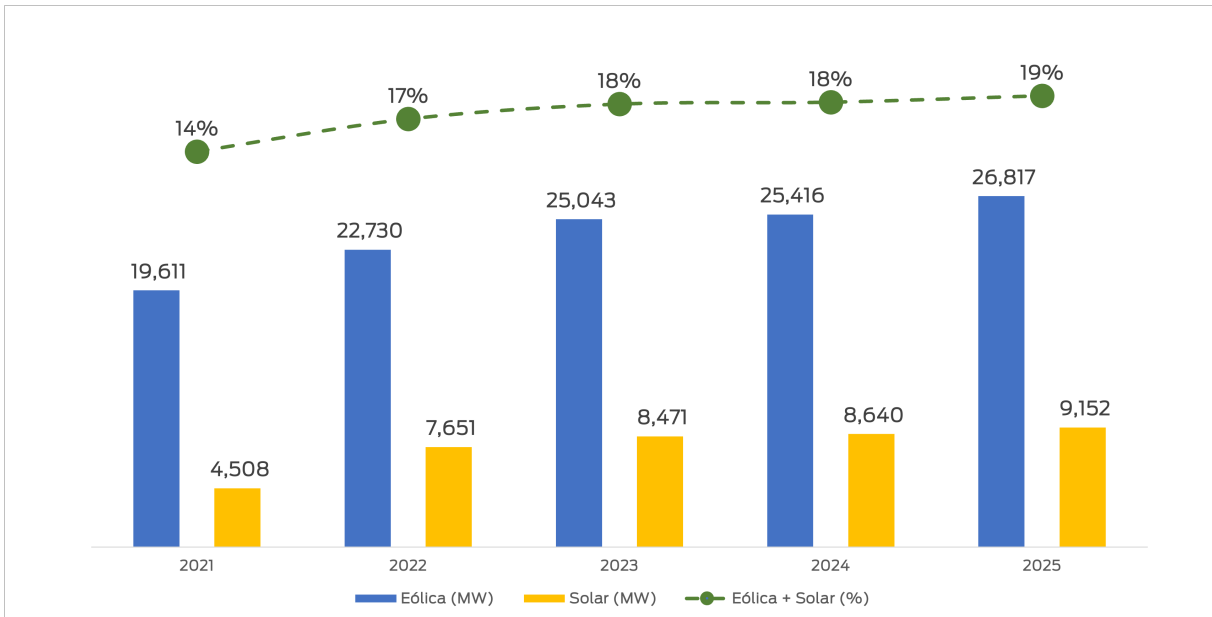
Fonte: (ONS, 2021) adaptado pelo autor.

De acordo com os planos da ONS, é desejável expandir a capacidade instalada em 2025 principalmente a partir da construção de novos parques eólicos e FV no país. Estima-se uma capacidade instalada de 18,8% de fontes eólicas e solar no horizonte de 2025 (contra 14% em 2021).

Além dessas duas fontes, as usinas termelétricas ganharão mais relevância na matriz (22,9% em 2025 contra 21,7% em 2021). Essa mudança tem por objetivo assegurar a estabilidade do sistema elétrico perante às bruscas variações de potência e garantir ao sistema inércia sincronizada e reserva de potência adequada. Esses objetivos serão explicados com mais detalhes no Capítulo 4.

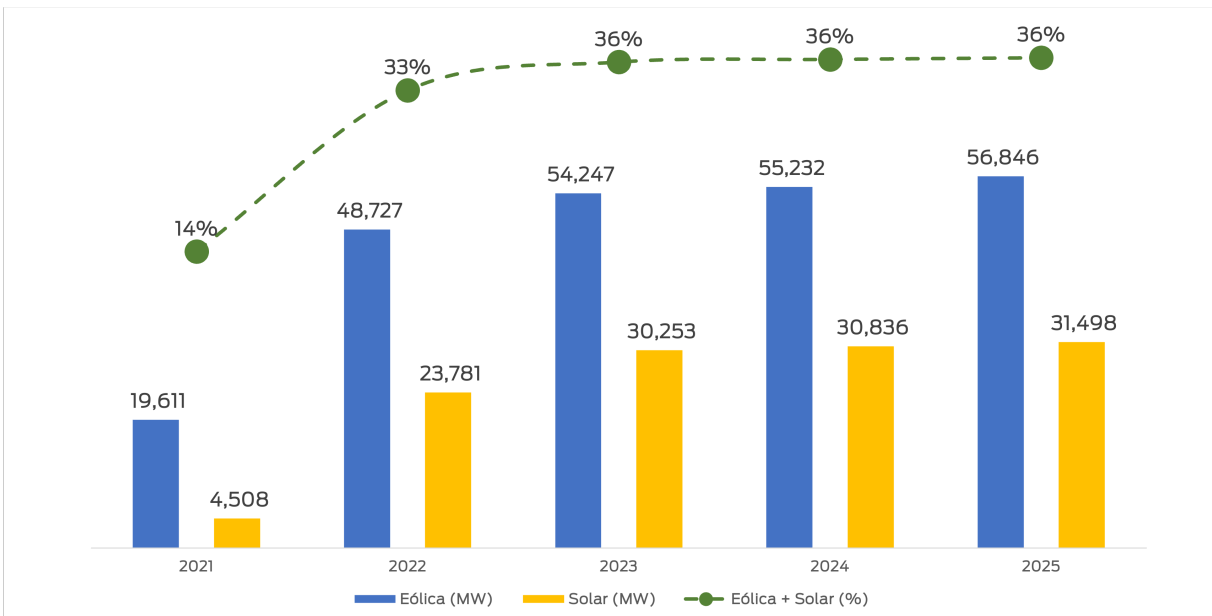
A penetração de energia eólica e solar pode ser maior do que a prevista na Figura 13, caso sejam considerados as usinas com Contrato de Uso do Sistema de Transmissão (CUST) e Pareceres de acesso emitido ou em andamento. Nesse caso, o montante geral dessa produção pode chegar 52,4 GW em 2025. Os Gráficos 12 e 13 ilustram os dois casos possíveis.

Gráfico 12 – Capacidade instalada de energia eólica e solar no SIN em 2025 (GW) sem considerar as usinas com o CUST assinado.



Fonte: (ONS, 2021) adaptado pelo autor.

Gráfico 13 – Capacidade instalada de energia eólica e solar no SIN em 2025 (GW) considerando as usinas com o CUST assinado



Fonte: (ONS, 2021) adaptado pelo autor.

Como se pode constatar, ao se considerar as usinas que tenham assinado o

CUST e Pareces de Acessos emitidos e em andamento, a capacidade total de energia eólica e solar quase duplicaria, e essas fontes, as quais são conectadas ao SEP via conversores eletrônicos, representariam 36% da matriz elétrica do país.

3.6 Considerações finais

Nos dois cenários, essas duas fontes renováveis representarão uma parcela significativa da matriz, e faz-se necessário entender as mudanças e impactos que o crescimento dessas tecnologias podem ocasionar no sistema elétrico. Esse assunto será o tema central Capítulo 4.

4 IMPACTOS EM DECORRÊNCIA DA INTEGRAÇÃO DAS FONTES EÓLICA E SOLAR EM LARGA ESCALA

O aumento da produção de energia elétrica provinda de fontes renováveis, como a eólica e a solar, vem mudando o perfil da matriz elétrica brasileira, como foi abordado no Capítulo 3. A previsão é de que, no mínimo, em torno de 19% da capacidade instalada no país seja oriunda das forças do vento ou da radiação solar. Essa adoção crescente dessas duas fontes intermitentes, as quais são conectadas ao sistema elétrico de potência via conversores eletrônicos de potência, geram diversos impactos nos planos de operação do SEP.

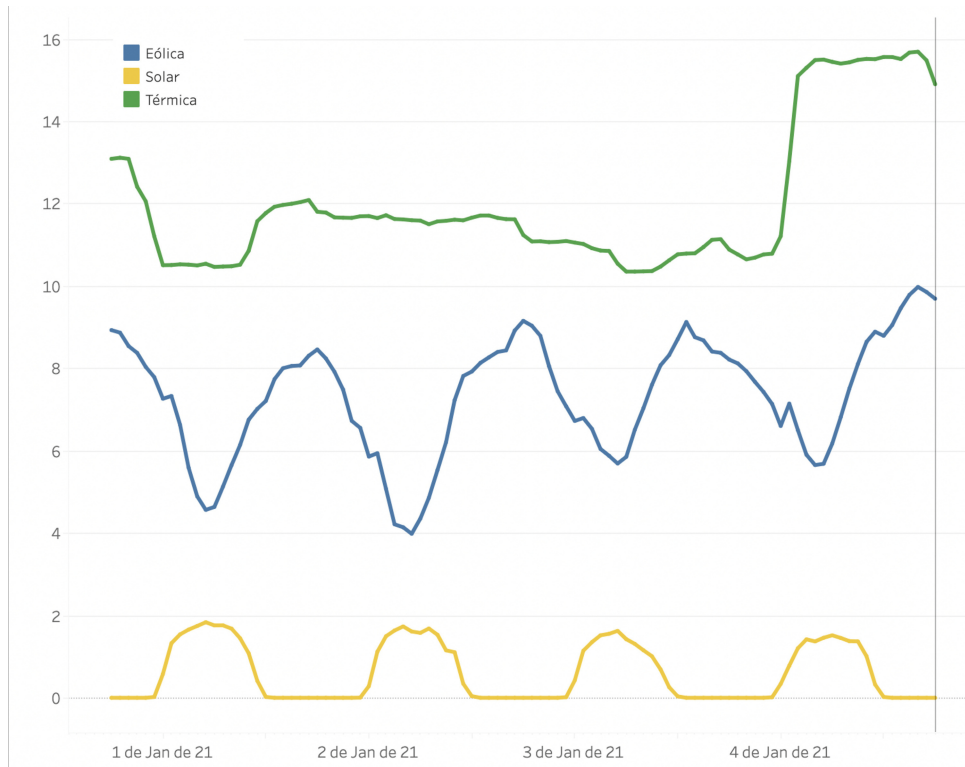
Além dos impactos mais evidentes como a intermitência das fontes eólicas e solares, por exemplo, existem outros desafios estruturais e tecnológicos que influenciam nessa nova configuração do sistema elétrico. O acréscimo dessas fontes também impactam, por exemplo, na reação do SEP diante de variações da frequência do sistema e no planejamento do sistema de proteção. Esse capítulo tem por finalidade detalhar os principais impactos no sistema elétrico brasileiro em cenários de maior adoção de energia eólica e solar na matriz elétrica.

4.1 Variabilidade

As energias renováveis intermitentes, como a eólica e a solar, estão sujeitas a variações na sua capacidade de produção em função de variáveis meteorológicas que não estão no controle do operador do sistema elétrico.

No caso das usinas termelétricas, por exemplo, caso o ONS deseje aumentar a produção em um dado momento, o operador pode injetar potência na rede aumentando a queima de combustíveis. Nesse caso, o controle do operador é mais assertivo. Já no caso das energias eólica e solar, elas dependem das condições climáticas e meteorológicas para gerar energia para o sistema elétrico. Os Gráficos 14 e 15 ilustram a variabilidade da produção dessas fontes.

Gráfico 14 – Geração de energia (GWh) - variabilidade ao longo do dia.



Fonte: (ONS, 2022) adaptado pelo autor.

Pelo Gráfico 14, pode-se notar que geração FV possui um ciclo bem definido. Ela produz durante o dia, enquanto o sol está presente, e, durante a noite, a produção cai para zero. Esse comportamento é mais previsível que a produção eólica, pois o operador pode acionar outras fontes no final da tarde para substituir a produção solar. As variáveis que influem nesse tipo de produção são a posição do sol, estação do ano e ocorrência ou não de nuvens (TOLMASQUIM, 2017).

A geração eólica também varia ao longo do dia, porém ela não chega a ser zero, como é o caso da FV durante a noite (ver Gráfico 14). No entanto, essa variação pode ser mitigada pela geração em varias usinas em diferentes regiões do país (TOLMASQUIM, 2017). A estação do ano também influencia fortemente a geração eólica, como se pode constatar pelo Gráfico 15. O final do verão e o começo do outono (mês de março) marcam um declive na produção eólica, a qual alcança seu máximo novamente no final do inverno no hemisfério sul (meses de agosto e setembro).

Gráfico 15 – Geração de energia eólica (GWh) - variabilidade ao longo das estações.



Fonte: (ONS, 2022) adaptado pelo autor.

Vale ressaltar que a energia eólica e solar possuem uma certa complementaridade, como se pode constatar pelo Gráfico 14. Portanto, uma mistura desses dois tipos de fontes reduz a variabilidade intra-diário da geração de energia elétrica.

4.1.1 Impacto da variabilidade no sistema elétrico

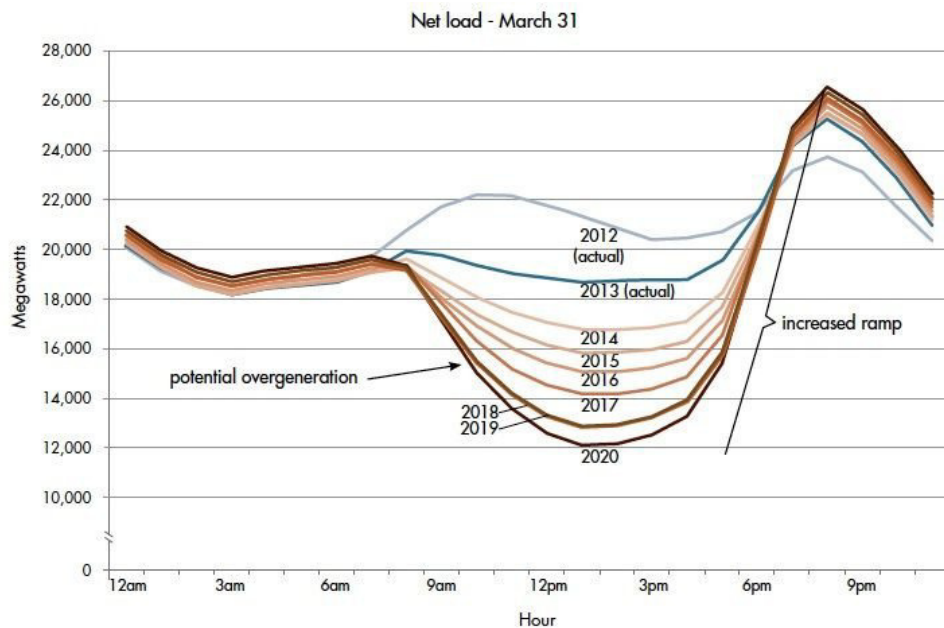
A noção de variabilidade de geração de energia elétrica não é um conceito novo para o operador do sistema. Este, por sua vez, busca igualar a oferta e a demanda de energia elétrica ao longo do dia, buscando manter o equilíbrio do sistema (oferta = demanda). Caso várias turbinas de uma usina hidrelétrica falhem, o operador do sistema pode acionar uma usina termelétrica para compensar essa perda de geração e equilibrar o sistema.

O SIN no Brasil é bastante complexo, e o ONS possui uma previsão bastante exata da demanda ao longos dos dias, meses e anos que estão por vir. O problema que pode ocorrer são falhas ou flutuações inesperadas na rede que forçam o operador a aumentar ou diminuir a produção de energia elétrica. A dificuldade com a eólica e solar é que essas

fonte são menos previsíveis que uma usina termelétrica, por exemplo.

Um efeito observado pelo operador da Califórnia em 2013 foi a curva de pato ("*duck curve*"). Com o aumento da penetração de produção de energia FV, existe uma maior necessidade de geradores de eletricidade aumentarem rapidamente a produção de energia quando o sol se põe e a contribuição do PV cai (ENERGY, 2017). O Gráfico 16 ilustra esse fenômeno.

Gráfico 16 – Efeito da curva de pato ("*duck curve*").



Fonte: (ENERGY, 2017).

Deste modo, o operador precisa se adequar a essa realidade e prever soluções alternativas caso a geração eólica e solar não atendam a demanda necessária. Uma das saídas adotadas é a existência de usinas termelétricas que são ativadas em períodos de baixa oferta, as quais são ligadas nesses períodos para suprir a demanda existente no sistema elétrico.

Na Figura 13 do capítulo anterior, constata-se que as fontes térmicas acompanham o crescimento da solar e eólica, pois ela se apresenta como uma solução de emergência previsível e confiável em caso de falhas no sistema. Nesse contexto, o conceito de flexibilidade é bastante importante. Para garantir a flexibilidade do sistema com um acréscimo importante de energia solar e eólica, é necessário aumentar os métodos de flexibilidade, ou até mesmo criar novos meios de flexibilização, para garantir o funcionamento correto do sistema em um contexto de grande uso de energia renováveis intermitentes. A

utilização de fontes não intermitentes, como a hidráulica e térmica, são exemplos de meios de flexibilização.

4.1.2 *Load following power plants*

Historicamente, existem fontes de energia que servem como reserva de emergência no caso dos picos de demanda ao longo do dia. Essas plantas, conhecidas como "*peaking power plants*" em inglês, operam estritamente nesses momentos de maior demanda e são desligadas quando a demanda se estabilizada na rede. Nesse tipo de operação, essas plantas são ligadas em potência máxima para suprir a demanda e operar com um maior rendimento (GE, 2017).

No entanto, com o aumento da penetração das fontes eólicas e solares, o acionamento de fonte de reserva é mais recorrente devido à intermitência de produção dessas fontes. Devido ao modo de funcionamento diferente, essas plantas são chamadas, em inglês, de "*load following power plants*". Uma diferença que ocorre com esse novo modo de operação é que, em vez de operar apenas em períodos de alto pico de demandas, essas fontes reservas atuam com baixa carga por mais tempo buscando contrabalancear o efeito de variabilidade das fontes renováveis na rede. Com isso, essas fontes atuam com baixa carga para aumentar a estabilidade do sistema elétrico e garantir o equilíbrio de oferta de demanda.

Além desse maior tempo demandado de atuação, essas plantas têm características diferentes para se adequar a essa nova realidade da matriz elétrica. Elas devem, por exemplo, possuir tempos de resposta mais alto para lidar com cargas transientes na rede e mais flexibilidade no momento de atuação permitindo um ajuste de geração mais eficiente (GE, 2017). Por fim, visto que essas plantas atuam com cargas abaixo da potência máxima, o custo dessas instalações é maior do que se elas operassem apenas nos momentos de pico de carga, o que impacta no custo da energia elétrica produzida.

4.1.3 *Resposta da demanda*

Um outro mecanismo de flexibilização sistema elétrico é a resposta da demanda. Esse mecanismo consiste em permitir aos consumidores gerenciar o uso da energia em resposta às variações de preço desse recurso e em atendimento aos comandos do ONS, com compensações financeiras para o consumidor (ANEEL, 2021). Em vez da geração seguir a

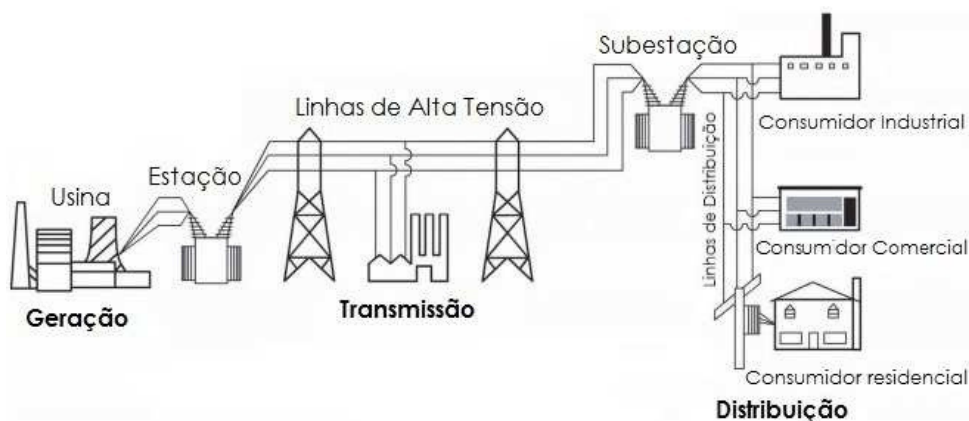
variação da demanda, a última segue a disponibilidade de produção.

A existência dos horários de ponta e fora de ponta no Brasil é um exemplo de mecanismo de resposta da demanda, pois os consumidores pagam menos ao consumir em horários de menor demanda. Podem também existir contratos diretos com agentes do sistema elétricos, como grandes indústrias, as quais podem receber incentivos financeiro para desligar suas operações durante um certo período.

4.2 Decentralização da geração

O sistema elétrico brasileiro foi construído baseado no princípio da geração centralizada. A geração é realizada geralmente em locais distantes dos centros populacionais, e a energia elétrica é transportada por meio da malha do sistema até o consumidor final nos centros de distribuição. A Figura 14 ilustra o esquema clássico da geração centralizada, em que as partes envolvidas possuem papéis bem definidos na rede. A produção da energia elétrica ocorre em usinas hidrelétricas ou termelétricas longes dos grandes centros populacionais e é transmitida pelo sistema de transporte até as distribuidoras de energia elétrica.

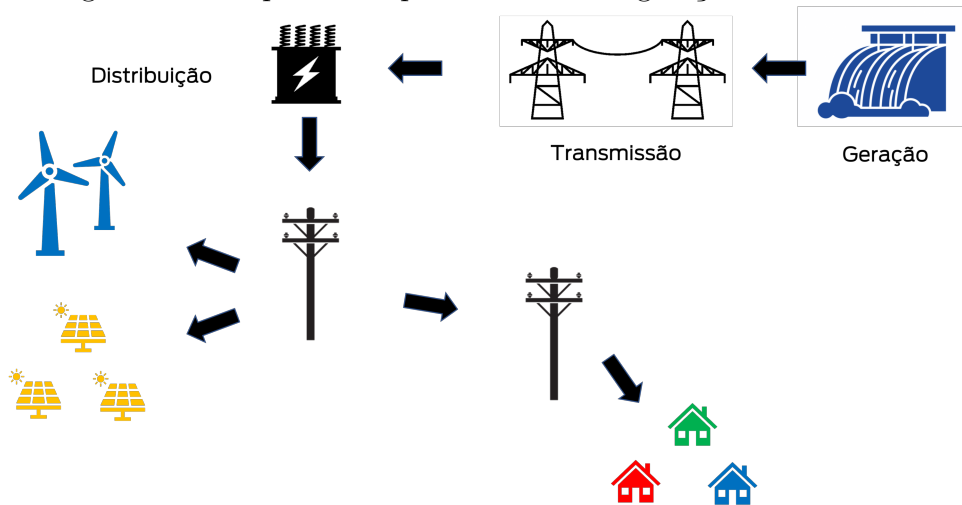
Figura 14 – Esquema simplificado de uma geração centralizada.



Fonte: (BLUME, 2007).

Com o aumento da relevância da energia eólica e solar, as quais normalmente são conectadas na distribuição elétrica, o sistema elétrico desenvolve novas características e comportamentos que precisam ser levados em conta para o panorama futuro com uma maior penetração de energia renováveis na matriz, pois o sistema original foi construído baseando na premissa de uma geração centralizada. A Figura 15 ilustra a geração distribuída.

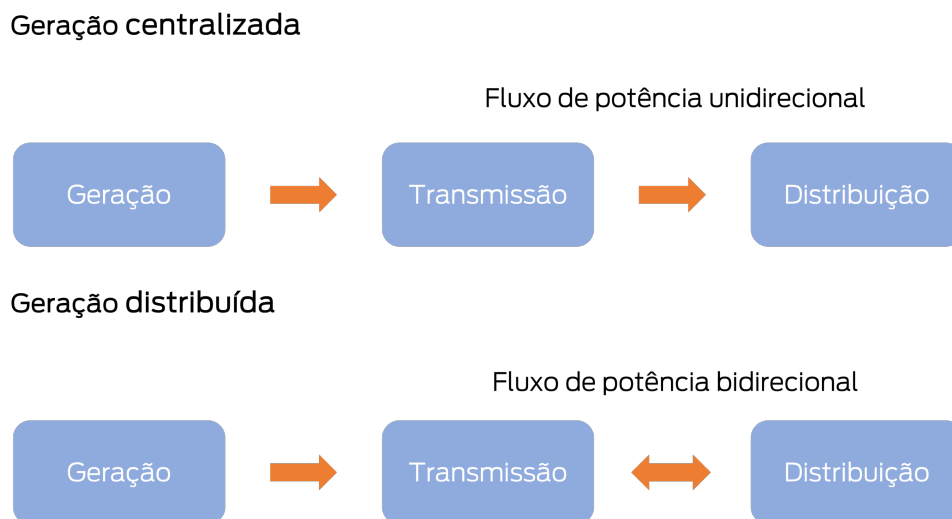
Figura 15 – Esquema simplificado de uma geração distribuída.



Fonte: Próprio autor.

A energia eólica e solar estão presentes na rede de distribuição de energia gerando um fluxo de potência que no sistema centralizado não existe, isto é, a existência de um fluxo provindo da distribuição em direção à transmissão (ver Figura 16). Esse fluxo invertido de potência necessita de coordenação entre os operadores de distribuição e de transmissão para evitar problemas na rede, como a regulação das proteções que precisa ser adaptada.

Figura 16 – Fluxo de potência da geração centralizada e distribuída.



Fonte: Próprio autor.

Além da bidirecionalidade do fluxo de potência, existem outros fatores que afetam o sistema elétrico, como o planejamento dos investimentos em infraestrutura e controle das plantas (EDF, 2018). O operador do sistema precisa realizar levantamentos

no território nacional para definir em que locais instalar novos parques eólicos e solares. Esse plano possui diversas características que devem ser levadas em consideração que são diferentes da geração centralizada. Cada planta possui sua própria curva de geração em função da meteorologia local, o que significa que o operador precisa saber tratar dados de diferentes regiões e construir modelos diferentes de previsão de produção que se adaptem a realidade de cada instalação. Por fim, a logística de manutenção se torna mais complexa, visto que existem mais plantas a serem observadas em diferentes locais.

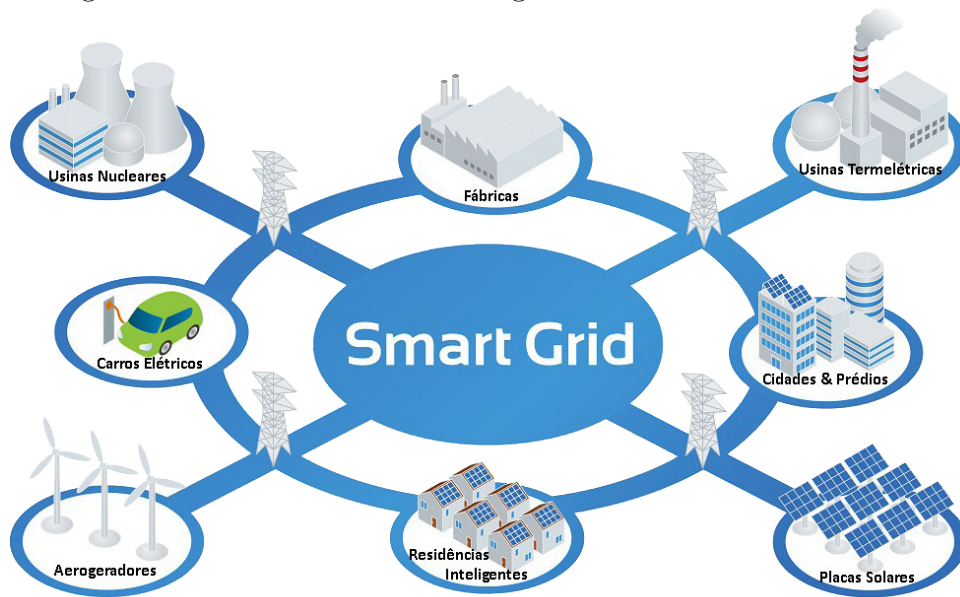
4.2.1 *Redes Elétricas Inteligentes*

Nesse contexto de aumento da complexidade da rede de distribuição devido à introdução das energias renováveis no sistema elétrico, surgiu o conceito de Redes Elétricas Inteligentes (ou *Smart Grids*, do inglês).

As *Smart grids* são redes elétricas que podem integrar de forma inteligente e dinâmica as ações de todos os usuários conectados a elas — os que geram energia, os que a consomem ou os que fazem ambas as coisas — a fim de fornecer eletricidade de forma eficiente, sustentável, econômica e segura (IBERDROLA, 2020).

Essas redes inteligentes têm por objetivo gerenciar o fluxo bidirecional da sua rede, aumentar a flexibilidade e eficiência do sistema e automatizar de forma inteligente a rede elétrica. Além disso, o consumidor ganha mais transparência no seu consumo e produção, caso ele possua geração, proporcionando maior capacidade de decisão em relação à escolha de tarifas e ao consumo.

Figura 17 – Redes Elétricas Inteligentes ou *Smart Grids*.



Fonte: (UFRJ, 2016).

4.3 Frequência e inércia da rede

A frequência da rede é uma variável fundamental a ser controlada no sistema elétrico, pois ela é um indicador do equilíbrio entre oferta e demanda do sistema. Caso haja um desequilíbrio, a frequência da rede pode aumentar (*produção > demanda*) ou diminuir (*demanda > produção*). No caso do Brasil, a frequência da rede é 60Hz.

As fontes de produção de energia mais comumente utilizadas, como a energia hidráulica e termelétrica no Brasil, convertem energia cinética em energia elétrica por meio de alternadores, os quais são majoritariamente máquinas síncronas trifásicas. Nesse tipo de máquina, a rotação mecânica do rotor é diretamente ligada às grandezas elétricas do estator (EDF, 2018). Essa característica permite que as máquinas síncronas das fontes do sistema elétrico aportem uma certa inércia para a mudança de frequência da rede. No caso de um desequilíbrio entre oferta e demanda, a inércia do sistema evita mudanças bruscas na frequência da rede.

A relação entre a parte mecânica e elétrica de uma máquina síncrona pode ser explicada fisicamente pela Equação (4.1):

$$2 * H * \frac{df}{dt} = P_m - P_e \quad (4.1)$$

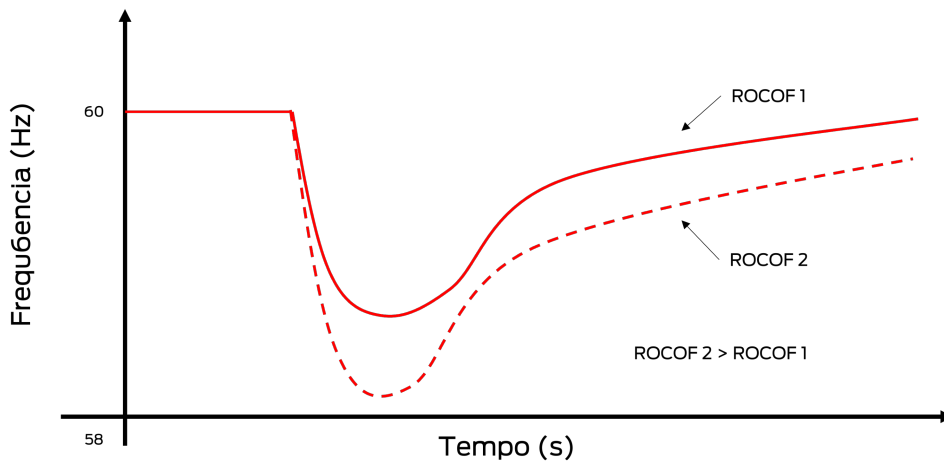
em que H é a inércia da máquina, f a frequência da máquina, P_m a potência

mecânica na entrada e P_e a potência elétrica imposta pela carga (ROSA, 2019).

Pela Equação (4.1), constata-se que a inércia da máquina é inversamente proporcional à variação da frequência. Devido à relação entre a energia cinética e à energia elétrica desses alternadores presentes em grande escala na rede, o sistema elétrico possui uma taxa de variação de frequência (ROCOF do inglês *Rate of Change of Frequency*) reduzida.

Manter essa taxa de variação de frequência sob controle é de extrema importância para o operador da rede, pois existem equipamentos que podem ser danificados e proteções podem ser ativadas por causa dessa variação brusca na frequência. O Gráfico 17 ilustra dois casos para uma mesma perturbação em uma rede para diferentes taxas de *ROCOF*.

Gráfico 17 – Variação da frequência após perturbação na rede (imagem meramente ilustrativa).



Fonte: Próprio autor.

Para a taxa de variação de maior inércia (ROCOF 1), a frequência varia menos em amplitude e volta ao equilíbrio mais rapidamente que o caso de menor inércia (ROCOF 2). Essa imagem demonstra importância que as máquinas síncronas possuem hoje para o sistema elétrico de potência e a sua inércia frente a desequilíbrios de oferta e demanda.

Como foi discutido no Capítulo 3, as energias eólica e solar estão aumentando a sua participação na matriz elétrica brasileira, correspondendo a 11% da matriz brasileira (no Nordeste, o índice de capacidade instalada é superior a 50%). Essas fontes renováveis são conectadas à rede por meio de conversores de potência, os quais não acrescentam inércia ao sistema, pois eles transformam corrente contínua em corrente alternada por

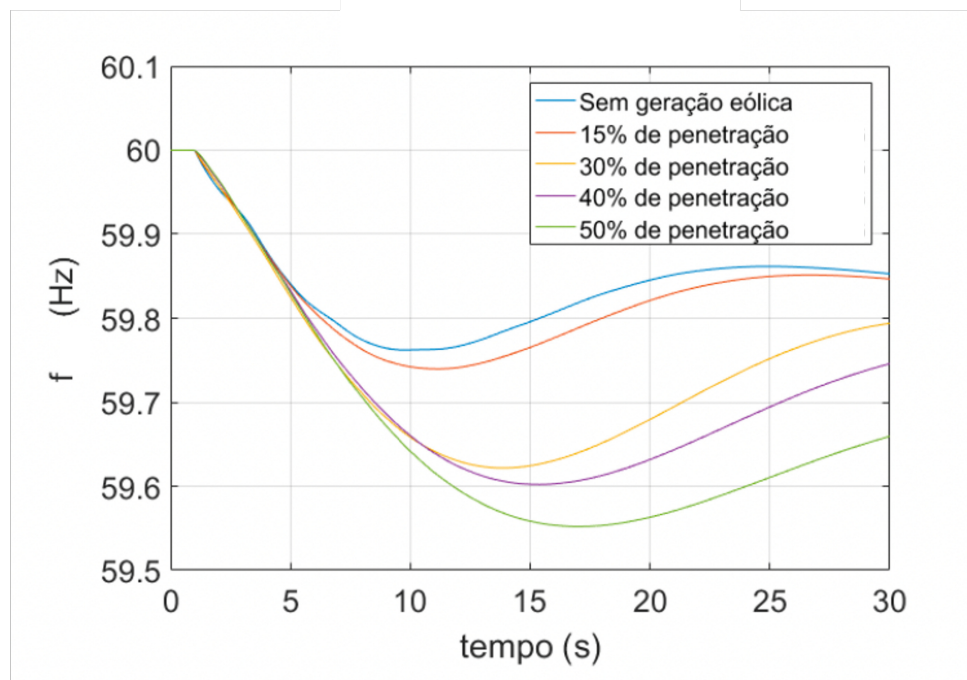
meio de chaveamentos. No caso da energia eólica, ela possui um rotor que captura a energia cinética do movimento dos ventos, todavia as torres eólicas são conectadas via conversores de potência com a rede isolando a energia cinética da frequência da rede. Essa configuração tem por objetivo aumentar o rendimento das torres eólicas em detrimento do seu aporte inercial (EDF, 2018).

Por esse motivo, a tendência é que a inércia do sistema brasileiro diminua ao longo dos anos, visto que a penetração da energia eólica e solar aumentarão.

4.3.1 Caso de estudo: energia eólica

Um estudo focado no impacto da da energia eólica na estabilidade do sistema elétrico brasileiro (ROSA, 2019) demonstra o efeito da penetração em larga escala desse tipo de fonte na matriz de geração. O Gráfico 18 ilustra a mudança no perfil de resposta do sistema frente a uma perturbação.

Gráfico 18 – Variação da frequência de uma rede frente a um desequilíbrio.



Fonte: (ROSA, 2019) adaptado pelo autor.

Constata-se um aumento na amplitude da resposta e no tempo de estabilização conforme a penetração de energia eólica ganha escala. Apesar de um estudo teórico, esse comportamento é também observado nos grandes sistemas elétricos, como o SIN. Num

estudo dos Casos de Referência do Estudo Mensal de Dezembro de 2019 da plataforma do ONS, constatou-se que o Nordeste é a região com menor inércia do SIN (ROSA, 2019). Como foi observado no Gráfico 10, a região possui a maior penetração de energia solar e eólica. A Tabela 2 mostra os valores de inércia para as diferentes regiões do SIN.

Tabela 2 – Valores de inércia da rede por subsistema.

Sistema/ Subsistema	Carga Mínima				Carga Pesada			
	Geração (MW)	Carga (MW)	MW.s	$H_S(s)$	Geração (MW)	Carga (MW)	MW.s	$H_S(s)$
SIN	48922	48524	252387	5,255	85661	84059	378304	4,523
SE/CO	24626	25980	126436	5,773	44893	47650	196146	4,860
NE	7152	8405	24484	2,913	9594	12643	33719	2,667
S	6887	8363	39085	4,679	17898	15820	65433	4,142
N	9536	5776	38552	8,182	13034	7947	47262	7,332

Fonte: (ROSA, 2019) adaptado pelo autor.

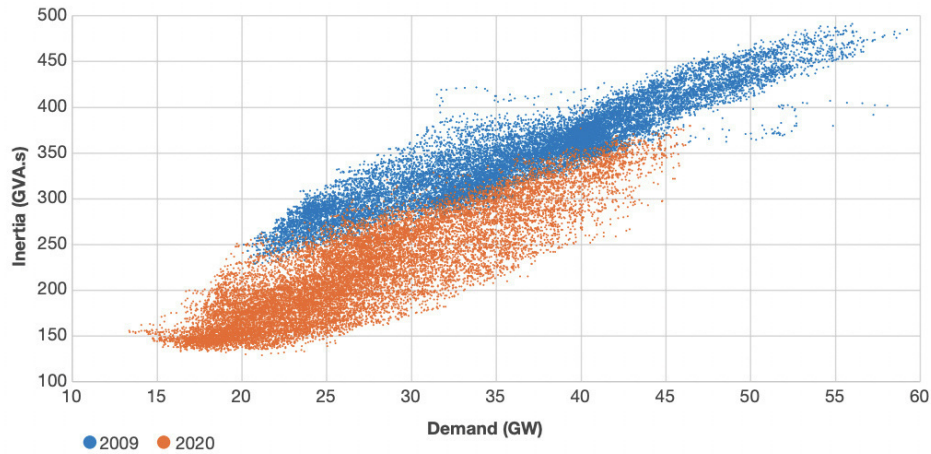
4.3.2 Caso de estudo: Reino Unido

Os dados da inércia do sistema elétrico brasileiro não estão disponíveis para o público, porém é possível comparar com outros sistemas elétricos que vêm sofrendo mudanças parecidas ao longo dos anos.

No Reino Unido, a matriz elétrica saiu do patamar de 5,3% de produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis em 2009 para 41% em 2020 (BP, 2022), uma evolução parecida que está sendo observada na matriz brasileira com um maior predominância de energia renováveis. Nesse contexto, a *National Grid*, a operadora do sistema transmissão do território inglês, observou no seu relatório de estratégia de operabilidade (do inglês *Operability Strategy Report*) que a inércia anual média do sistema elétrico caiu em torno de 40% entre 2009 e 2020, como ilustra o Gráfico 19.

Gráfico 19 – Variação da frequência após perturbação na rede (imagem meramente ilustrativa).

Inertia vs Demand



Inertia vs Demand

Annual Distribution of System Inertia

Fonte: (NATIONAL GRID, 2022).

Em grande parte, essa queda da inércia do sistema se deve ao aumento da porção de energias renováveis na rede. Como o próprio relatório da operadora indica (NATIONAL GRID, 2022), o aumento da produção de energia dependente da meteorologia e da geração intermitente são alguns dos desafios do sistema elétrico britânico para manter a frequência estável perante a desequilíbrios na rede.

No caso do sistema elétrico brasileiro, um comportamento parecido está sendo observado, como foi mencionado anteriormente, e a tendência é que a inércia continue diminuindo. Portanto, o operador do sistema deverá por em prática métodos para compensar essa redução da inércia natural do sistema elétrico de potência brasileiro. Algumas soluções são:

1. Aumento da liberação da reserva primária de energia para aumentar a velocidade de restauração do equilíbrio;
2. Uso da energia cinética das pás dos aerogeradores;
3. Criação de um sistema de remuneração para incentivar aportes inerciais na rede (similar ao *DS3 Programme*);
4. Inserção de compensadores síncronos na rede.

4.4 Proteção do sistema elétrico

O sistema elétrico de potência brasileiro possui um conjunto de elementos de proteção (relés, fusíveis, disjuntores, ...) que buscam realizar a proteção da rede contra defeitos e perturbações que possam vir a ocorrer no sistema. Esses dispositivos possuem certas características para garantir a segurança de todos os componentes e agentes da rede, como seletividade e sensibilidade, isto é, o sistema de proteção precisa identificar e isolar os defeitos da rede adequadamente enquanto eles persistirem.

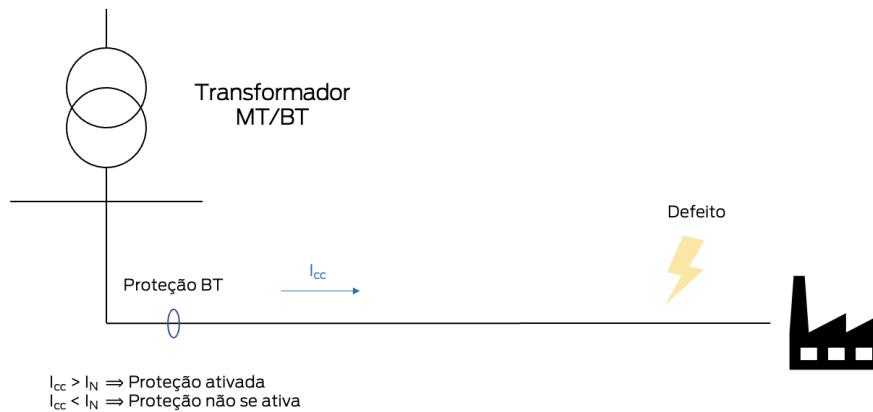
Em um sistema composto majoritariamente por fontes com máquinas síncronas, a corrente de curto-circuito é alta, pois essas máquinas chegam a injetar corrente de até 6x sua corrente nominal. Enquanto que os conversores de potência, por construção, injetam corrente de curto que estão entre 1,1 e 1,5 a corrente nominal do conversor (EDF, 2018).

Além da mudança da potência de curto circuito, a conexão das fontes renováveis na rede influenciam na coordenação, seletividade e sensibilidade do sistema de proteção. Alguns casos que podem apresentar problemas são citados a seguir.

4.4.1 Caso 1: falha de detecção de defeitos devido a uma baixa corrente de curto-circuito (I_{cc})

Como foi mencionado anteriormente, a corrente de curto-circuito (I_{cc}) de conversores de potência não supera 2 vezes a corrente nominal dos dispositivos, enquanto que as máquinas síncronas podem chegar a 6 vezes a corrente nominal. Com um aumento crescente das fontes eólicas e solar, a tendência é que a potência de curto-circuito diminua e, conseqüentemente, a corrente de curto-circuito diminua. A Figura 18 ilustra um problema que pode ocorrer devido a essa diminuição.

Figura 18 – Curto circuito longe do alimentador.



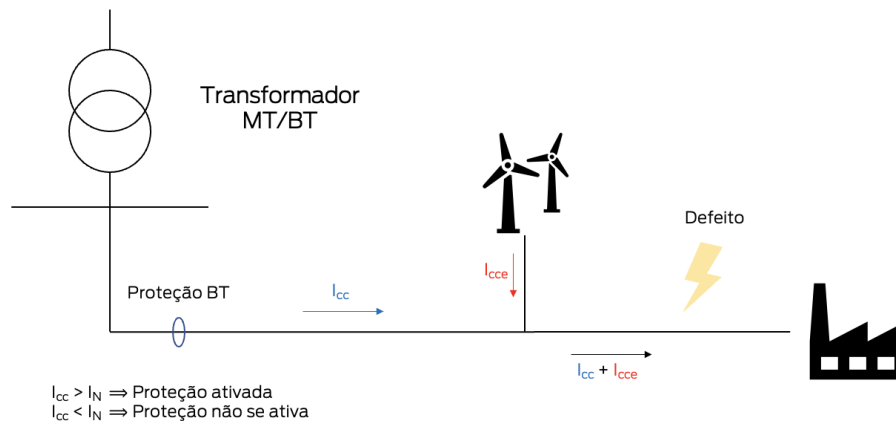
Fonte: Próprio autor.

Esse caso é mais preocupante principalmente quando a instalação se situa muito longe do alimentador, tendo por natureza uma corrente de curto ainda menor. Caso a proteção não seja ajustada, ela pode não detectar o defeito em pontos distantes do alimentador, pois a I_{cc} pode ser menor que o valor de corrente ajustado na proteção de baixa tensão (I_N).

4.4.2 Caso 2: falha de detecção de defeitos devido à conexão de fontes na rede de distribuição

Na geração centralizada, não existem geradores de energia elétrica situados na rede de distribuição. Por esse motivo, o sistema de proteção é projetado apenas levando em consideração a corrente de curto-circuito do alimentador da instalação. No entanto, na geração distribuída, existem fontes renováveis, como eólica e solar, perto das unidades consumidoras que são conectadas diretamente ao sistema de distribuição. Historicamente, o sistema de proteção não foi desenvolvido para levar em consideração uma corrente de curto-circuito provinda da rede de distribuição, pois a proteção protege contra a I_{cc} provinda da rede de transmissão. A Figura 19 ilustra um caso que pode vir ocorrer numa rede distribuída.

Figura 19 – Fonte renovável conectada no sistema de distribuição perto do local de defeito.



Fonte: Próprio autor.

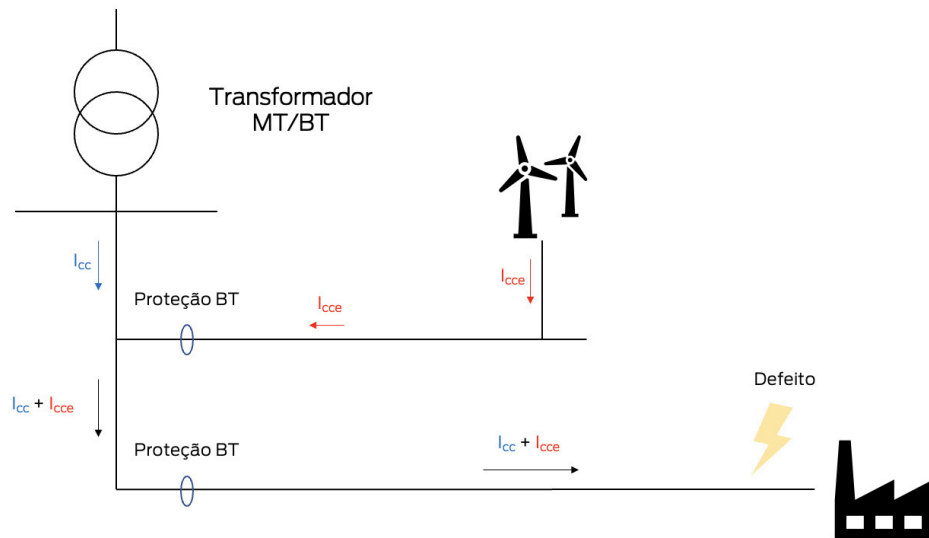
Nesse caso, a corrente no ponto de defeito é alimentada pela corrente da rede (I_{cc}) e a corrente da usina eólica (I_{ccc})¹. A proteção ainda pode atuar se o valor de I_{cc} é superior a I_N . O alimentador e a fonte eólica alimentam a falta, de forma que, dependendo da impedância entre a fonte e a falta, de acordo com princípios da teoria de circuitos, quanto mais próxima a fonte eólica estiver da falta, menor a contribuição do alimentador para o defeito, uma vez que este caminho terá maior impedância (CHAVES, 2019). Portanto, o valor de I_{cc} diminui e pode se tornar inferior a I_N , sendo, nesse caso, imperceptível para a proteção.

4.4.3 Caso 3: ativação indesejável de proteções devido à conexão de fontes na rede de distribuição

Nos dois casos anteriores, o problema que pode ocorrer é a não ativação da proteção quando ocorre uma falta na rede (problema de sensibilidade). Nesse terceiro caso, o problema que pode ocorrer é ativação de proteções que não estejam ligadas ao defeito, ferindo o critério de seletividade do sistema de proteção. A Figura 20 ilustra esse caso.

¹ A fonte eólica foi usada como exemplo, porém a mesma analogia vale para as fontes FV.

Figura 20 – Ativação da proteção de uma ramo sem defeito.



Fonte: Próprio autor.

Um defeito num ramo adjacente a um ramo com fontes distribuídas presentes (no caso da figura, uma fonte eólica) pode gerar a ativação da proteção do ramo que não possui defeito, pois existe uma corrente de curto-circuito da fonte eólica (I_{ccc}) que alimenta a falta no ramo vizinho atravessando a proteção de baixa tensão do ramo sem defeito. No caso de uma geração distribuída em um rede radial, que é o caso mais frequente na matriz brasileira, as proteções podem não estar adequadas para detectar essa corrente no sentido inverso da falta usual. Caso o relé de proteção não possua a função de proteção contra corrente direcional (ANSI 67), a proteção pode vir a se ativar e a desconectar um ramo sem defeitos, o que não é desejado pelo operador do sistema.

5 CONCLUSÃO

A matriz elétrica brasileira vem sofrendo mudanças na sua composição ao longo dos anos, buscando aumentar a porção de energia gerada por fontes renováveis. O panorama futuro prevê uma adoção em massa de fontes com baixa emissão de CO₂ para frear o aquecimento global e descarbonizar a matriz brasileira, a qual já é bastante "limpa" quando comparada a outros países. Além da energia hidráulica, a qual é predominante no país, a energia solar e eólica têm ganhado bastante relevância com a criação de parques eólicos e FV em todo o país, principalmente na região Nordeste.

Essa mudança na composição da matriz vem gerando novos desafios para o ONS e todos os agentes envolvidos na operação da rede, visto que essas novas fontes que estão ganhando relevância (eólica e solar) são intermitentes e dependem de fatores meteorológicos para poderem gerar energia elétrica, os quais não podem ser previstos com alto grau de confiabilidade pelo operador do sistema elétrico. Além disso, essas fontes utilizam conversores de potência para injetar suas produções no SEP, que acabam diminuindo a inércia do sistema contra perturbações no equilíbrio do sistema.

Os impactos gerados em decorrência de uma maior presença das fontes eólica e solar na matriz estão mudando as características do sistema e a maneira que ele deve ser operado. A geração distribuída possui um grau de complexidade maior que a geração centralizada que o ONS está acostumado a lidar. Portanto, para se adaptar a essa nova realidade, um esforço conjunto dos agentes do sistema elétrico se faz necessário para alterar a estrutura existente e adaptá-la a nova realidade da matriz elétrica brasileira.

Buscando um aprofundamento ou continuação do tema apresentando neste TCC, as soluções usadas para contornar os problemas citados neste trabalho podem ser exploradas para definir as novas estratégias que o operador pode usar para evitar problemas na rede. Além disso, os problemas podem ser aprofundados apresentando diversos casos de estudo para exemplificar as problemáticas com mais ênfase.

REFERÊNCIAS

ANEEL: *Prorrogada a vigência do Programa Piloto de Resposta da Demanda*. 2021. – URL <[BLUME: *VISÃO GERAL DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*. 2007. – URL <\[https://www.researchgate.net/figure/figura-3-visao-geral-de-um-sistema-de-geracao-transmissao-e-distribuicao-de-energia_fig1_262373193\]\(https://www.researchgate.net/figure/figura-3-visao-geral-de-um-sistema-de-geracao-transmissao-e-distribuicao-de-energia_fig1_262373193\)>](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/prorrogada-a-vigencia-do-programa-piloto-de-resposta-da-demanda/656877?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fsala-de-imprensa-exibicao-2%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D3#:~:text=A%20Resposta%20da%20Demanda%20%20%20C3%A9,compensa%20%20%20B5es%20financeiras%20para%20o%20consumidor.>></p>
</div>
<div data-bbox=)

BP: *Country insight – UK*. 2022. – URL <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/country-and-regional-insights/united-kingdom.html>>

BRASILEIRO, Instituto U.: *Dica de Física – Como funciona uma usina hidrelétrica? Caiu no Enem*. 2015. – URL <<http://blog.institutouniversal.com.br/2015/08/25/dica-de-fisica-como-funciona-uma-usina-hidreletrica-caiu-no-enem/>>

CBIE: *COMO A BIOMASSA SE TRANSFORMA EM ENERGIA ELÉTRICA?* 2019. – URL <<https://cbie.com.br/artigos/como-a-biomassa-se-transforma-em-energia-eletrica/>>

CBIE: *COMO FUNCIONA A GERAÇÃO EÓLICA?* 2020. – URL <<https://cbie.com.br/artigos/como-funciona-a-geracao-eolica/>>

CHAVES, Beatriz Ferreira R.: *Estudos dos impactos da inserção de fontes renováveis de geração distribuída na seletividade e coordenação da proteção de sistemas elétricos*. 2019. – URL <<http://hdl.handle.net/1843/33959>>

EDF: *Les systèmes électriques de demain*. Bd. 1. 1^o. Lavoisier, 2018. – ISBN 978-2-7430-2394-2

ELECTRICITY MAP: *Electricity Map*. 2022. – URL <<https://app.electricitymap.org/map?solar=false>>

ELÉTRICA, Mundo D.: *O que é frequência e como calcular?* 2018. – URL <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-frequencia-e-como-calcular/>>

ENEL: *A transição energética.* 2020. – URL <<https://www.enelgreenpower.com/pt/learning-hub/transicao-energetica>>

ENERGY: *Confronting the Duck Curve: How to Address Over-Generation of Solar Energy.* 2017. – URL <<https://www.energy.gov/eere/articles/confronting-duck-curve-how-address-over-generation-solar-energy>>

EPE: *Matriz Energética e Elétrica.* 2019. – URL <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>

EPE: *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 ano base 2020.* 2021. – URL <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>

ESFERA, BLog: *Entenda o que é energia de biomassa e seu papel na matriz energética brasileira.* 2021. – URL <<https://esferaenergia.com.br/blog/energia-biomassa/>>

ESFERA, Blog: *O que é energia hidráulica e como funciona a principal fonte energética do Brasil?* 2021. – URL <<https://esferaenergia.com.br/blog/o-que-e-energia-hidraulica/>>

FISICA, MisterM: *QUESTÕES ESTILO ENEM 2.* 2012. – URL <<http://mistermdafisica.blogspot.com/2012/10/questoes-estilo-enem-2.html>>

GE: *The Load Following Power Plant: The New Peaker.* 2017. – URL <<https://www.ge.com/power/transform/article.transform.articles.2017.jun.load-following-power-plant>>

GLOBAL WIND ATLAS: *Global Wind Atlas.* 2022. – URL <<https://globalwindatlas.info/area/Brazil>>

HOUGHTON, John: *Global Warming.* Bd. 1. 4^o. Cambridge, 2009. – ISBN 978-05-115-3059-3

IBERDROLA: *O que é a energia eólica, como ela se transforma em eletricidade e quais são suas vantagens?* 2019. – URL <<https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/energia-eolica>>

IBERDROLA: *O que são as 'smart grids' ou redes elétricas inteligentes?* 2020. – URL <<https://www.iberdrola.com/quem-somos/energetica-do-futuro/smart-grids>>

IEA: *Status of Power System Transformation 2019.* 2019. – URL <<https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2019>>

IPCC: *AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.* 2014. – URL <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>>

MAMEDE, João: *Instalações Elétricas Industriais.* Bd. 1. 7^o. LTC, 2010. – ISBN 978-85-216-1742-6

MAMEDE, João: *Instalações Elétricas Industriais.* Bd. 1. 4^o. LTC, 2017. – ISBN 978-85-216-1884-3

NATIONAL GRID: *System Operability Framework (SOF)*. 2022. – URL <<https://www.nationalgrideso.com/document/227081/download>>

ONS: *PLANO DE AMPLIAÇÕES E REFORÇOS (PAR)*. 2021. – URL <<http://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/suprimento-eletrico>>

ONS: *Histórico da operação*. 2022. – URL <<http://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao>>

OUR WORLD IN DATA: *Global CO2 emissions from fossil fuels and land use change*. 2020. – URL <<https://ourworldindata.org/co2-emissions>>

PORTAL SOLAR: *Como Captar Energia Solar*. 2016. – URL <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/como-captar-energia-solar.html>>

REIS, Lineu Belico D.: *Geração de Energia Elétrica*. Bd. 2. 1º. Manole, 2011. – ISBN 978-85-204-4308-8

ROSA, Bruno: IMPACTO DA GERAÇÃO EÓLICA NA INÉRCIA E ESTABILIDADE DE FREQUÊNCIA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA. In: *Universidade Federal do Rio de Janeiro* 1 (2019), 9, Nr. 1, S. 1–80

SCHMITZ, Kenneth S.: *Physical Chemistry - Multidisciplinary Applications in Society*. Bd. 1. 1º. Elsevier, 2016. – ISBN 978-0-12-800513-2

SOLAR, Portal: *Energia heliotérmica (termo solar)*. 2016. – URL <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-heliotermica-entenda-como-funciona.html>>

SOLAR, Portal: *Energia Fotovoltaica*. 2019. – URL <<https://www.portalsolar.com.br/energia-fotovoltaica.html>>

SOLARGIS: *Solar resource maps of Brazil*. 2020. – URL <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/brazil>>

TOLMASQUIM, Maurício: INTEGRAÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS INTERMITENTES NA AMÉRICA LATINA. In: *CAF, Vicepresidencia de Infraestructura* 1 (2017), 1, Nr. 1, S. 8–11

UFRJ: *Smart Grids: Redes Inteligentes*. 2016. – URL <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2016-1/16_1/smartgrid/>

VASCONCELOS, Filipe Matos D.: *Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica*. Bd. 1. 1º. Londrina, 2017. – ISBN 978-85-522-0179-3