



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

KAYQUE BEZERRA DE MENEZES SOUZA

IMPORTÂNCIA DA INÉRCIA NO SISTEMA ELÉTRICO

FORTALEZA

2023

KAYQUE BEZERRA DE MENEZES SOUZA

IMPORTÂNCIA DA INÉRCIA NO SISTEMA ELÉTRICO

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. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

FORTALEZA

2023

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

S238i Souza, Kayque Bezerra de Menezes.

Importância da inércia no sistema elétrico / Kayque Bezerra de Menezes Souza. – 2023.
55 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes.

1. Inércia. 2. Sistema elétrico de potência. 3. Geração renovável. I. Título.

CDD 621.3

KAYQUE BEZERRA DE MENEZES SOUZA

IMPORTÂNCIA DA INÉRCIA NO SISTEMA ELÉTRICO

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: 08/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo
Antunes (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Kassio Derek Nogueira Cavalcante
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. Robério Oliveira Rodrigues
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha mãe e meu pai por acreditarem em mim.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Fernando Luiz Marcelo Antunes, pela disponibilidade e paciência.

Aos membros participantes da banca examinadora MSc. Kassio Derek Nogueira Cavalcante e MSc. Robério Oliveira Rodrigues pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao meu pai João, que não está mais aqui mas está sempre comigo.

À minha mãe Vera por ser meu ponto de apoio.

À minha namorada Jannyne por sempre me auxiliar quando mais precisei.

Aos meus amigos Pedro e Rhuan pelos momentos de risada.

"Se alguém é capaz de me convencer e me evidenciar que o que penso ou faço não é correto, será com contentamento que me corrigirei, afinal, procuro a verdade, a qual jamais causou mal a ninguém"(AURÉLIO, 2019).

RESUMO

A rápida inserção de fontes renováveis no sistema elétrico de potência tem impactado negativamente na inércia dos sistemas elétricos de potência. Em consequência disso, a dinâmica de funcionamento dos sistemas de potência estão se modificando rapidamente. Diferentemente do que ocorria em um passado recente quando a geração convencional de energia elétrica, a qual ocorre através de máquinas síncronas como geradores síncronos, as fontes renováveis puxadas pela geração eólica e fotovoltaicas tem ocupado cada vez mais espaço na matriz energética de todo o mundo. Dessa forma, o presente trabalho busca apresentar o conceito de inércia no sistema elétrico de potência, bem como discutir os efeitos de sua diminuição no comportamento e operação do sistema elétrico de potência na ocorrência de perturbações, demonstrando as possíveis desvantagens relacionadas a inércia ocasionadas pelas fontes renováveis na estabilidade e operação do sistema.

Palavras-chave: inércia. sistema elétrico de potência. geração renovável.

ABSTRACT

The rapid integration of renewable sources into the power electrical system has had a negative impact on the inertia of power electrical systems. As a consequence, the operational dynamics of power systems are changing rapidly. Unlike what occurred in the recent past when conventional electricity generation, which occurs through synchronous machines such as synchronous generators, renewable sources driven predominantly by wind and photovoltaic generation, are increasingly occupying more space in the global energy matrix. This paper aims to present the concept of inertia in the power electrical system and discuss the effects of its reduction on the behavior and operation of the power electrical system during disturbances, demonstrating the potential disadvantages related to inertia caused by renewable sources in the stability and operation of the system.

Keywords: inertia; electric power system; renewable generation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fontes renováveis de energia elétrica.	14
Figura 2 – Crescimento previsto das fontes renováveis 2017-2024.	15
Figura 3 – Funcionamento de uma usina heliotérmica.	16
Figura 4 – Parque solar São Gonçalo.	17
Figura 5 – Usina hidrelétrica de Itaipu.	18
Figura 6 – Matriz energética brasileira.	18
Figura 7 – Aerogeradores no Parque Eólico de Osório, no Rio Grande do Sul.	19
Figura 8 – Usina de ondas no Pecém, Ceará.	20
Figura 9 – Camadas da Terra.	21
Figura 10 – Funcionamento simplificado de uma usina utilizando biomassa.	22
Figura 11 – Estrutura básica convencional de um sistema elétrico.	22
Figura 12 – Faixas de tensão de sistemas elétricos.	23
Figura 13 – As 10 maiores UHE do Brasil.	24
Figura 14 – Classificação dos níveis de tensão em regime permanente.	25
Figura 15 – Sistema de transmissão brasileiro.	26
Figura 16 – Diagrama em corte de uma máquina síncrona.	29
Figura 17 – Vista esquemática dos enrolamentos de um gerador síncrono monofásico.	29
Figura 18 – Vista esquemática de geradores trifásicos: (a) dois polos, (b) quatro polos e (c) ligação em Y dos enrolamentos.	30
Figura 19 – Comparação da variação do ROCOF em diversos países.	33
Figura 20 – Geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis no Brasil e no mundo.	34
Figura 21 – Inércia no período de alta demanda.	36
Figura 22 – Inércia no período de baixa demanda.	36
Figura 23 – Cronologia inicial do evento.	42
Figura 24 – Separação ocorrida no SIN.	43
Figura 25 – Porcentagem de carga interrompida no evento.	44
Figura 26 – Recomposição das cargas interrompidas.	44
Figura 27 – Inércia do SIN em 15 de Agosto de 2023.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estágios de atuação região Sul.	37
Tabela 2 – Estágios de atuação região Sudeste.	38
Tabela 3 – Estágios de atuação região Centro Oeste e Área Acre Rondônia.	38
Tabela 4 – Estágios de atuação região Norte e área Maranhão.	39
Tabela 5 – Estágios de atuação região Nordeste.	39
Tabela 6 – Estágios de atuação área Manaus subsistema Mauá.	40
Tabela 7 – Estágios de atuação área Manaus subsistema Manaus.	40
Tabela 8 – Estágios de atuação área Macapá.	40
Tabela 9 – Estágios de atuação área Tramo Oeste.	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>13</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>13</i>
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Fontes Renováveis de Energia Elétrica	14
<i>2.1.1</i>	<i>Energia Solar</i>	<i>15</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Energia Hídrica</i>	<i>17</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Energia Eólica</i>	<i>19</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Energia Oceânica</i>	<i>19</i>
<i>2.1.5</i>	<i>Energia Geotérmica</i>	<i>20</i>
<i>2.1.6</i>	<i>Biomassa</i>	<i>21</i>
2.2	Sistema Elétrico de Potência	22
<i>2.2.1</i>	<i>Sistema Elétrico Brasileiro</i>	<i>23</i>
<i>2.2.1.1</i>	<i>Geração</i>	<i>23</i>
<i>2.2.1.2</i>	<i>Transmissão</i>	<i>24</i>
<i>2.2.1.3</i>	<i>Distribuição</i>	<i>27</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Geradores Síncronos</i>	<i>28</i>
<i>2.2.2.1</i>	<i>Velocidade Síncrona</i>	<i>30</i>
2.3	Introdução a Inércia no Sistema Elétrico de Potência	30
<i>2.3.1</i>	<i>Equação de Oscilação</i>	<i>31</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Constante de inércia</i>	<i>32</i>
<i>2.3.3</i>	<i>Relação da frequência e a inércia</i>	<i>32</i>
<i>2.3.4</i>	<i>Rate of Change of Frequency - ROCOF</i>	<i>33</i>
2.4	Impacto das Fontes Renováveis na Inércia do Sistema Elétrico	34
2.5	Ocorrência de 15 de Agosto de 2023 no Sistema Interligado Nacional - SIN	36
<i>2.5.1</i>	<i>Esquema Regional de Alívio de Carga por Subfrequência - ERAC</i>	<i>36</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Ajustes do ERAC por região ou área elétrica</i>	<i>37</i>
<i>2.5.2.1</i>	<i>Região Sul</i>	<i>37</i>
<i>2.5.2.2</i>	<i>Região Sudeste</i>	<i>38</i>

2.5.2.3	<i>Região Centro Oeste e Área Acre Rondônia</i>	38
2.5.2.4	<i>Região Norte e área Maranhão</i>	39
2.5.2.5	<i>Região Nordeste</i>	39
2.5.3	<i>Procedimentos Gerais</i>	41
2.5.4	<i>Análise da atuação do ONS no evento</i>	41
2.5.5	<i>Cronologia do Evento</i>	42
2.5.6	<i>Efeito da inércia na perturbação</i>	45
3	METODOLOGIA	46
4	RESULTADOS	47
5	CONCLUSÃO	49
5.1	Trabalhos Futuros	49
	REFERÊNCIAS	50
	ANEXO A – IRRADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL	53
	ANEXO B – MAPA EÓLICO DO BRASIL	54
	ANEXO C – PROJEÇÃO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO EM 2027	55

1 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento exponencial da população mundial, é esperado também um aumento pela necessidade de energia elétrica em todo o mundo. Por sua vez, novos métodos de produção de energia elétrica se tornam necessários para suprir tais necessidades, como as fontes de energias renováveis. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE, fontes renováveis são aquelas consideradas inesgotáveis, pois possuem a capacidade de se renovar a medida que são utilizadas. Dentre os exemplos de fontes renováveis, temos: hídrica (energia gerada a partir das águas), solar (energia gerada a partir do sol) e eólica (energia obtida a partir do vento).

No Brasil, a utilização de energias renováveis chega a aproximadamente 83%, sendo em grande parte devido às usinas hidrelétricas, as quais são responsáveis por cerca de 62% da produção nacional de energia elétrica. Em comparação ao resto dos países que possui cerca de 28% de produção de energia através de fontes renováveis, o Brasil possui uma das matrizes mais limpas do mundo (EPE, 2023a).

Geralmente, grandes sistemas elétricos de produção de energia elétrica se utilizam de máquinas síncronas, como é o caso das hidrelétricas. Dessa maneira, esse tipo de geração alcançou mais de 90% da matriz elétrica mundial em 2019 (IEA, 2019). Além disso, as máquinas síncronas possuem uma característica natural de armazenar energia cinética em seus rotores, que podem ser utilizadas para suavizar perturbações ocorridas na rede, geradas pelo desequilíbrio entre geração e carga no sistema elétrico (KUNDUR *et al.*, 2017).

Muito embora seja inegável as diversas vantagens da implementação de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis como a redução da poluição, esse tipo de geração possui uma desvantagem inerente que é a ausência de fornecimento de inércia ao sistema elétrico, característica que aumenta a taxa de variação de frequência diminuindo a confiabilidade e estabilidade do sistema na ocorrência de perturbações no sistema (ROSA *et al.*, 2020).

Tal característica se torna ainda mais relevante para o Brasil, que possui um Sistema Interligado Nacional - SIN, de modo que possíveis instabilidades possuem a capacidade de se propagar por todo o sistema, como ocorreu no dia 15 de Agosto de 2023, causando impactos como interrupção no fornecimento de água, problemas em linhas de metrô, suspensão de consultas em hospitais, entre outros (G1, 2023).

A redução cada vez mais acelerada dos níveis de inércia devido a crescente inserção das fontes renováveis na matriz energética de todo o mundo tem se tornado uma preocupação, pois afeta diretamente a estabilidade da frequência, sendo considerada um desafio para os

operadores do sistema elétrico em todo o mundo (TIELENS; HERTEM, 2016).

1.1 Objetivos

Nas seções seguintes estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos que guiaram a confecção do presente trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Discutir o tema da inércia no sistema elétrico de potência e as consequências de sua diminuição devido a inserção de fontes renováveis nas matrizes energéticas ao redor do mundo.

1.1.2 Objetivos Específicos

Discutir a possibilidade da influência da inércia nos acontecimentos ocorridos no Sistema Interligado Nacional em Agosto de 2023 bem como a ausência de estudos específicos sobre o tema inercial referente à matriz energética brasileira.

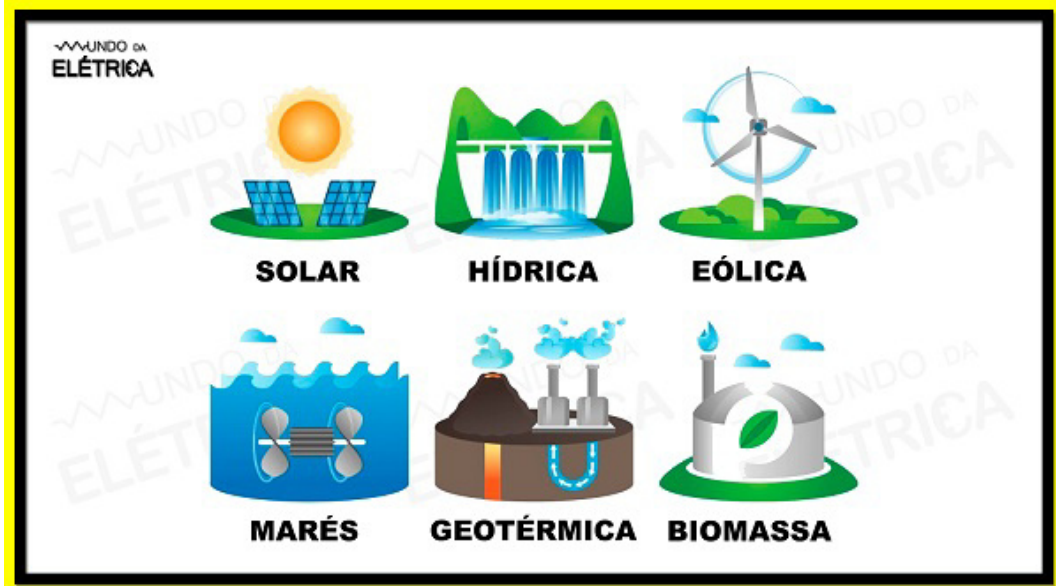
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Fontes Renováveis de Energia Elétrica

As fontes renováveis, incluindo solar, eólica, hidrelétrica, biocombustíveis e outras, possuem um papel de destaque na transição de sistemas de energia com índices reduzidos de emissão de gás carbônico e mais sustentáveis do ponto de vista ambiental. A capacidade de geração desse tipo de fonte, vem crescendo rapidamente nos últimos anos, sendo impulsionada pelas políticas globais voltadas para questões ambientais e a redução de custos, com destaque para a energia solar fotovoltaica e a energia eólica (IEA, 2023).

Como citado anteriormente, as fontes renováveis são consideradas inesgotáveis, pois suas quantidades se renovam continuamente ao serem utilizadas. Além dessa importante característica, essas fontes são consideradas limpas, de modo que a emissão de gases que contribuem para o efeito estufa (GEE) são mínimas comparadas as fontes fósseis, e dessa maneira são vistas com bons olhos pela população e os mercados nacional e global (EPE, 2023b).

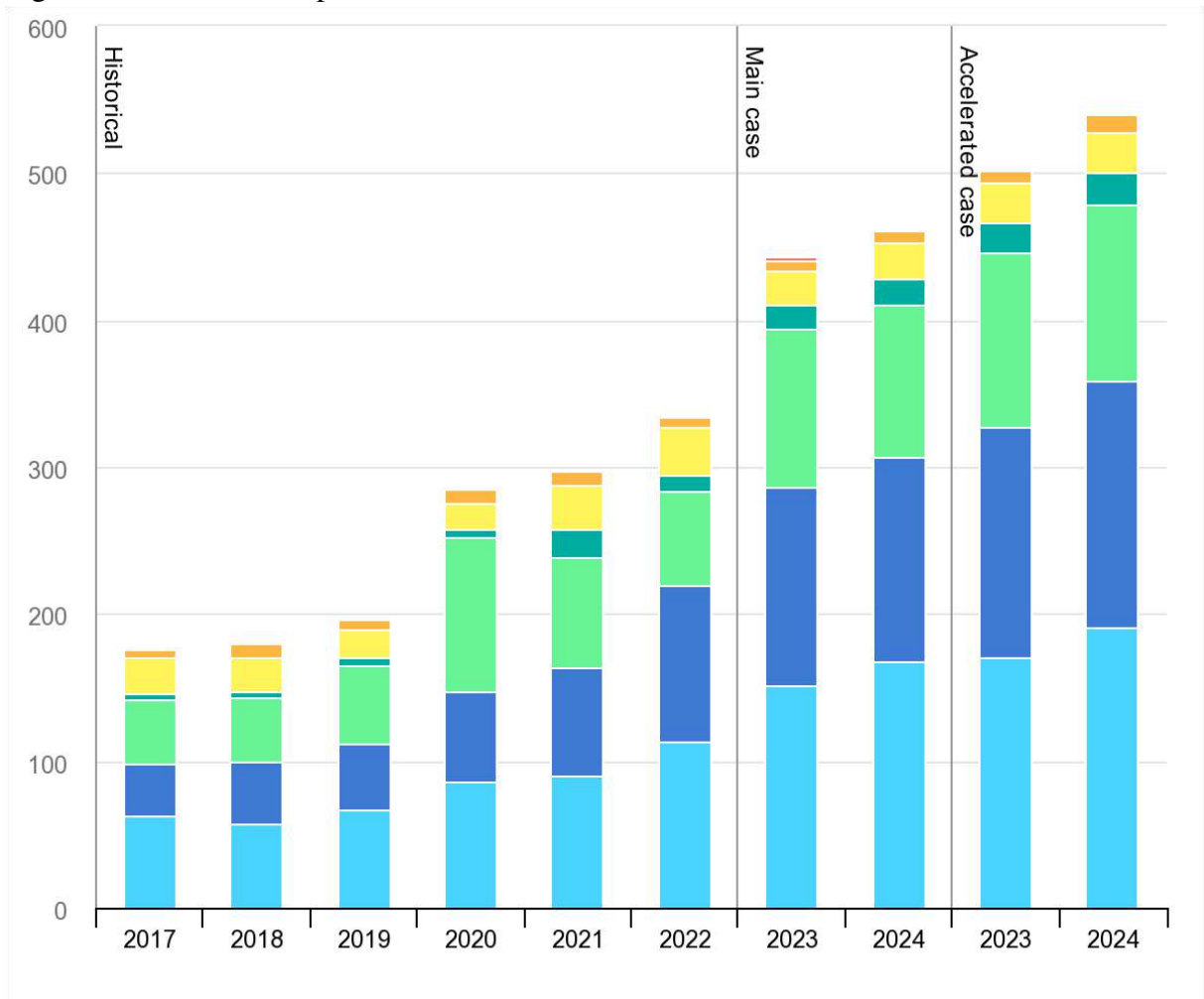
Figura 1 – Fontes renováveis de energia elétrica.



Fonte: (MUNDO DA ELETRICA, 2022).

Além disso, a adição global de capacidade de energias renováveis deve crescer por volta de um terço só no ano de 2023. O crescimento previsto para a capacidade total de eletricidade através de fontes renováveis no mundo está chegando a 4500 gigawatts (GW), sendo portanto equivalente à produção total de energia de Estados Unidos e China combinadas (IEA, 2023). Essa previsão pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 – Crescimento previsto das fontes renováveis 2017-2024.

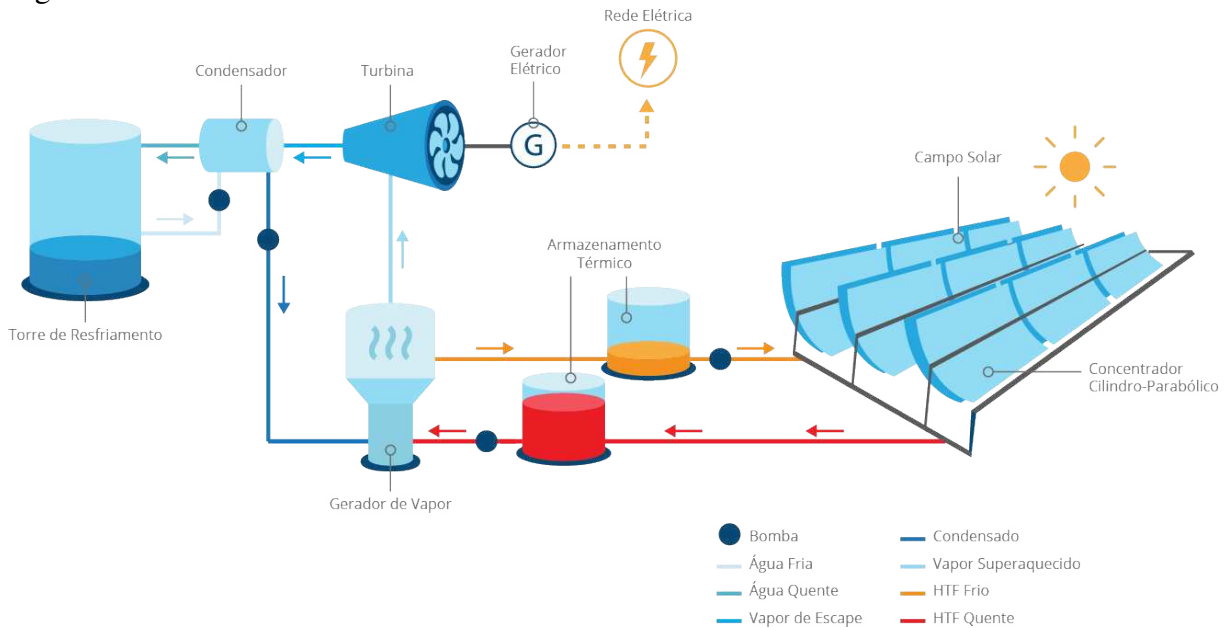


Fonte: (IEA, 2023).

2.1.1 Energia Solar

A energia solar pode ser utilizada na forma de calor ou na forma de luz. Através de painéis coletores térmicos, é possível receber os raios do sol e utilizar o calor para o aquecimento de água. Por sua vez, a água quente pode ser utilizada tanto para consumo doméstico como em chuveiros, piscinas e torneiras como em processos industriais ou geração de energia. Dessa forma, a eletricidade pode ser obtida diretamente através da luz como ocorre nos painéis fotovoltaicos e aproveitando o calor como ocorre nas usinas heliotérmicas (EPE, 2023b). O funcionamento simplificado da usina citada está demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Funcionamento de uma usina heliotérmica.



Fonte: (EUDORA ENERGIA, 2022).

A utilização mais conhecida pela população em geral da energia solar é sem dúvidas a produção de energia através de painéis fotovoltaicos. No caso dos painéis fotovoltaicos, a radiação solar incide no material semicondutor o qual geralmente é silício, gerando eletricidade diretamente. Por haver dependência da radiação solar para produção de energia, não há geração no período noturno. No Brasil, algumas áreas possuem níveis de irradiação solar mais propícios para a produção de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, como é o caso do Nordeste, como pode ser observado no anexo A. Esse tipo de produção de energia necessita de áreas sem obstrução da radiação solar, de modo a aproveitar todo o potencial de produção da placa fotovoltaica. O grande atrativo para a população em geral é a instalação nos telhados das casas, shoppings e estacionamentos. Esse tipo de produção é chamado de Geração Distribuída ou microgeração. Essa tecnologia vem se aprimorando com o passar dos anos e seu custo tende a reduzir (EPE, 2023b). Um exemplo em grande escala da produção de energia através de painéis fotovoltaicos pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Parque solar São Gonçalo.



Fonte: (ENEL, 2019).

2.1.2 Energia Hídrica

A energia hídrica é gerada utilizando a força das águas dos rios. Dessa maneira, são construídas usinas hidrelétricas, de modo que a força das águas transformam energia potencial da água em energia mecânica, que por fim é transformada em energia elétrica. O ponto fraco desse tipo de geração de energia, é que há uma dependência de chuvas para abastecer os rios, de modo que sem água o suficiente não seria possível movimentar as turbinas (EPE, 2023b).

Devido a volatilidade do período chuvoso, algumas técnicas são aplicadas para reduzir o impacto da falta de chuva em determinadas épocas do ano, como a construção de usinas que recebem o nome de reservatórios. Desse modo, a água que é obtida no período chuvoso é armazenada para ser utilizada no período de seca. Além disso, a água armazenada também pode ser utilizada não só para produção de energia, mas para o abastecimento de cidades, irrigação de lavouras, entre outros (EPE, 2023b).

Muito embora seja considerada uma fonte limpa de produção de energia, a utilização de barragens construídas artificialmente prejudicam a fauna e flora das áreas onde estão presentes, pois para sua construção se faz necessário o alagamento de grandes áreas, de modo a modificar a

estrutura física da região de maneira irreversível, além de ser necessário efetuar o deslocamento das pessoas que vivem nas regiões afetadas (EPE, 2023b). Um exemplo de usina hidrelétrica pode ser observado na Figura 5.

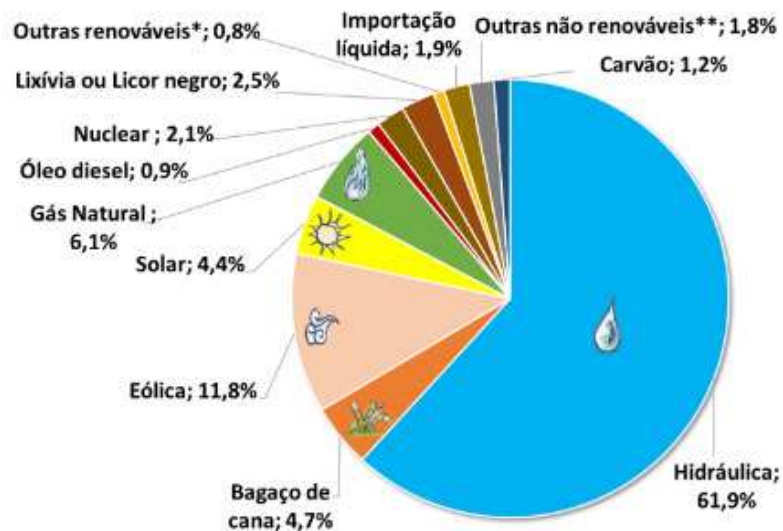
Figura 5 – Usina hidrelétrica de Itaipu.



Fonte: (ANGELO LEITHOLD, 2005).

No Brasil, esse tipo de produção de energia elétrica é o mais utilizado, correspondendo a mais da metade de toda a produção de energia no país no ano de 2022, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Matriz energética brasileira.



Fonte: (EPE, 2023a).

2.1.3 *Energia Eólica*

A energia eólica é utilizada para obtenção de energia elétrica através de aerogeradores, que são construídos com hélices de grande dimensões, como é mostrado na Figura 7, que se movimentam de acordo com a quantidade de vento no local onde foram instaladas (EPE, 2023b).

Figura 7 – Aerogeradores no Parque Eólico de Osório, no Rio Grande do Sul.



Fonte: (SOLAR EOLICA RENOVAVEL, 2021).

Dentre as vantagens desse tipo de produção está presente a ausência de poluição. Entretanto, como desvantagem temos a total dependência de ventos para seu funcionamento. No Brasil existem áreas mais propícias para construção dos chamados parques eólicos (EPE, 2023b), como pode ser observado no mapa eólico brasileiro, Anexo B.

2.1.4 *Energia Oceânica*

Energia oceânica é aquela obtida através das marés, aproveitando o movimento das águas. Ela pode ser obtida tanto através das ondas, como das marés e das correntes marinhas, transformando a energia mecânica do movimento das águas em energia elétrica, como observado na Figura 8. Essa tecnologia ainda precisa ser aprimorada, existindo poucos exemplos de usinas pelo mundo (EPE, 2023b).

Figura 8 – Usina de ondas no Pecém, Ceará.



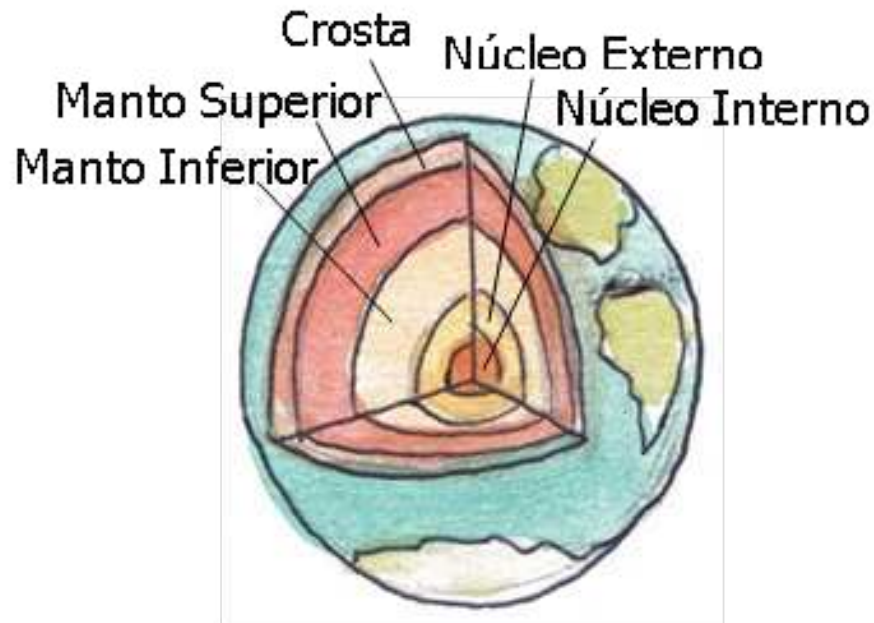
Fonte: (REBOB, 2023).

A grande desvantagem desse tipo de usina seria o elevado custo de implantação. No Brasil, considerando todo seu litoral, é estimado que haveriam ondas suficientes para geração de 87 GW, sendo 20% desse total convertidos em energia elétrica, o que representaria aproximadamente 17% da capacidade total instalada no país (REBOB, 2023).

2.1.5 Energia Geotérmica

A energia geotérmica ou geotermal, é aquela obtida através do calor contido no interior da Terra. Dessa forma, ao redor do núcleo existe uma camada que recebe o nome de manto, que possui em sua formação magma e rocha, estando contida entre o núcleo e a crosta terrestre (EPE, 2023b), como observado na Figura 9.

Figura 9 – Camadas da Terra.



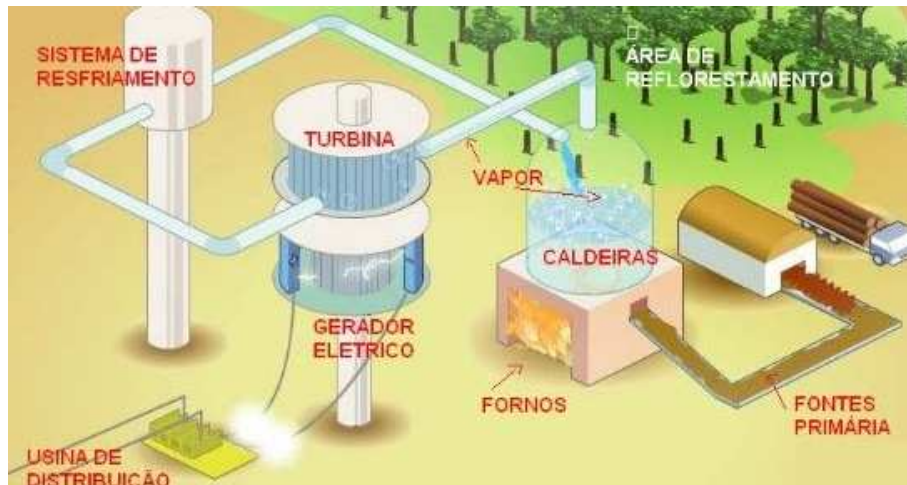
Fonte: (EPE, 2023b).

Para obtenção da energia elétrica, é necessário perfurar o subsolo em regiões que possuem grandes quantidades de vapor e água quente, os quais são conduzidos por dutos para um gerador na superfície, de modo fazer a conversão de energia geotérmica para energia elétrica. Essa fonte de energia é utilizada geralmente onde há uma intensa atividade vulcânica ou encontro de placas tectônicas, como Itália, Islândia e Estados Unidos (EPE, 2023b).

2.1.6 Biomassa

A energia obtida através da decomposição de matéria vegetal e orgânica pode ser utilizada para produção de energia elétrica, visto a produção de gás que esse fenômeno gera. Dessa maneira, a biomassa pode ser diretamente queimada, ou ainda utilizada para aquecimento de água ou produção de vapor, acionando turbinas que por sua vez geram energia elétrica. No Brasil, a biomassa mais utilizada para geração elétrica é a cana-de-açúcar, que são difundidas principalmente no Sudeste e Centro-Oeste do país (EPE, 2023b). O funcionamento simplificado de uma usina que utiliza biomassa está exemplificado na Figura 10.

Figura 10 – Funcionamento simplificado de uma usina utilizando biomassa.



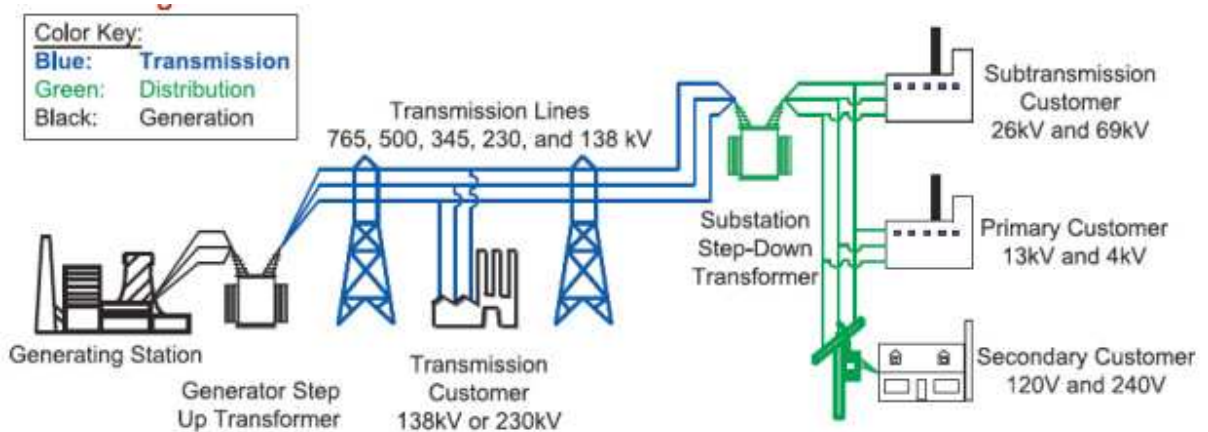
Fonte: (CBIE, 2019).

2.2 Sistema Elétrico de Potência

Um sistema elétrico de potência (SEP) é o conjunto que tem como objetivo a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica de modo a suprir determinados parâmetros de diversas características, como confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança, economicidade e mínimo impacto ambiental (LEAO, 2022), como observado na Figura 11.

Sendo assim, a geração é responsável pela transformação entre os tipos de energia em energia elétrica. Por sua vez, a transmissão é responsável por levar a eletricidade entre a geração até a distribuição. Por fim, temos a distribuição que irá adequar os níveis de tensão para o consumidor final, possuindo três subdivisões: subtransmissão, distribuição primária e secundária (LEAO, 2022).

Figura 11 – Estrutura básica convencional de um sistema elétrico.

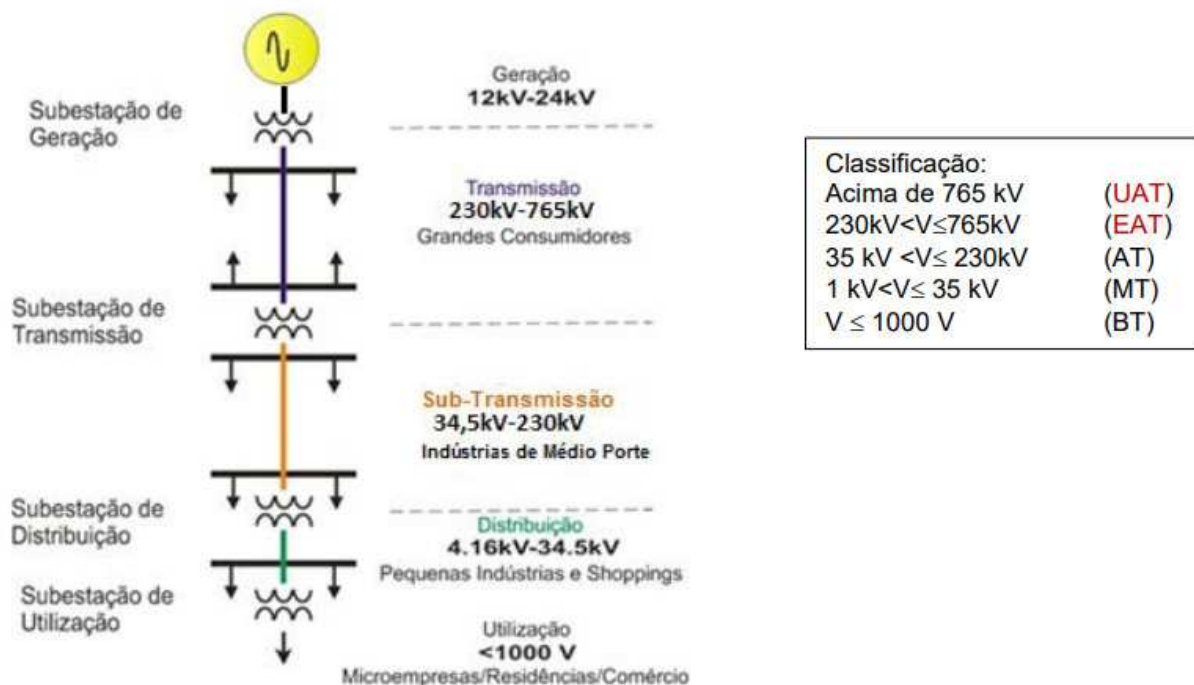


Fonte: (LEAO, 2022).

2.2.1 Sistema Elétrico Brasileiro

O sistema elétrico brasileiro possui dimensão continental, abrangendo quase todo o território nacional. Esse sistema por sua vez, contém uma matriz elétrica diversificada e possibilita a transmissão tanto em corrente contínua como em corrente alternada. Além disso, são praticados diversos níveis de tensão no país como: ± 800 kV, 750 kV, ± 600 kV, 525 kV, 500 kV, 440 kV, 345 kV, 300 kV, 230 kV, 161 kV, 138 kV, 132 kV, 115 kV, 88 kV, 69 kV, 34,5 kV, 23 kV, 13,8 kV, 440 V, 380 V, 220 V, 110 V (LEAO, 2022). As divisões das faixas de tensão podem ser observadas na Figura 12.

Figura 12 – Faixas de tensão de sistemas elétricos.



Fonte: (LEAO, 2022).

2.2.1.1 Geração

Existem diversos meios para obtenção de energia elétrica. Dentre as classificações, existem as conhecidas como fontes convencionais, que são as usinas hidrelétricas de grande porte e as termelétricas que utilizam gás natural, carvão mineral entre outros. Outra classificação possível são as chamadas fontes alternativas, que podem ser resumidas como as citadas no Tópico 2.1, as quais são: usinas fotovoltaicas, eólicas, biomassa, marés, entre outras (LEAO, 2022).

No Brasil, a capacidade instalada de geração é de aproximadamente 230 GW de potência possuindo cerca de 10.800 usinas em operação. A produção de energia elétrica no país se dá em sua maior parte com predominância de grandes usinas hidrelétricas. Essas usinas estão espalhadas por diversas regiões do país, como as bacias dos rios Tocantins, Madeira, Xingu, Parnaíba, São Francisco, Paraguai, Paranaíba, Grande, Paraná, Tietê, Paraíba do Sul, Paranapanema, Iguaçu, Uruguai, Jacuí. (ANEEL, 2020).

Estes reservatórios não possuem ligação física entre si, sendo necessárias linhas de transmissão para realizar a interligação e o transporte da produção de energia elétrica entre as bacias hidrográficas (LEAO, 2022). As 10 maiores usinas hidrelétricas (UHE) são observadas na Figura 13.

Figura 13 – As 10 maiores UHE do Brasil.

No.	Usina	Rio	Potência instalada (MW)	Proprietário ou acionistas
1	Belo Monte	Xingú	11.233	Eletronorte, CHESF, Neoenergia, CEMIG, Vale S.A.
2	Tucuruí	Tocantins	8.535	Eletronorte
3	Itaipu-Brasil	Paraná	7.000	Itaipu Binacional
4	Jirau	Madeira	3.750	Engie Brasil, Eletrosul, CHESF
5	Sto Antônio	Madeira	3.568	Furnas, CEMIG
6	Ilha Solteira	Paraná	3.444	CTG Brasil (China) (Ex-Cesp)
7	Xingó	São Francisco	3.162	CHESF
8	Paulo Afonso IV	São Francisco	2.462	CHESF
9	Itumbiara	Paranaíba	2.082	Furnas
10	Teles Pires	Teles Pires	1.819,8	Neoenergia, Eletrosul, Furnas

Fonte: (LEAO, 2022).

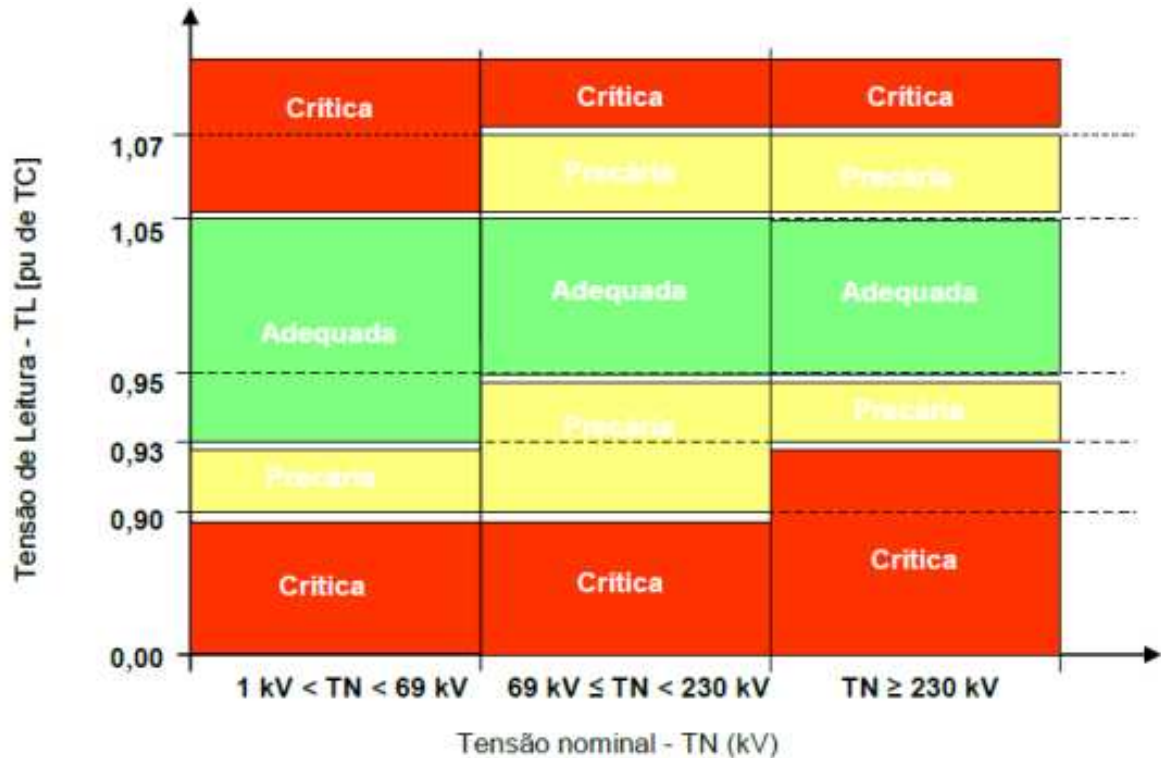
2.2.1.2 Transmissão

A transmissão de energia elétrica no Brasil ocorre através de linhas de transmissão, que tem o objetivo de ligar os pontos de geração aos pontos de consumo (LEAO, 2022). A projeção para 2027 das linhas de transmissão no Brasil pode ser observada no Anexo C.

Durante a transmissão de energia elétrica, faz-se necessário que as tensões sejam superiores às de geração e distribuição, pois não é possível transmitir diretamente a potência produzida nas usinas, devido as elevadas correntes e as quedas de tensão. Por lógica, quanto maior for a distância que se faz necessária transmitir a energia elétrica, mais esses problemas serão agravados. A elevação da tensão possibilita que a potência gerada nas usinas seja transmitida com níveis mais baixos de corrente do que às de geração, de modo que a transmissão se torna viável (LEAO, 2022).

Por sua vez, a tensão que é gerada irá se propagar pelo sistema elétrico de modo que a frequência esteja constante alterando apenas a amplitude da tensão visto as diversas modalidades de atendimento em alta, média ou baixa tensão. Além disso, a tensão de atendimento em regime permanente pode ser classificada como: adequada, precária e crítica (LEAO, 2022). A classificação dos níveis de tensão está demonstrado na Figura 14.

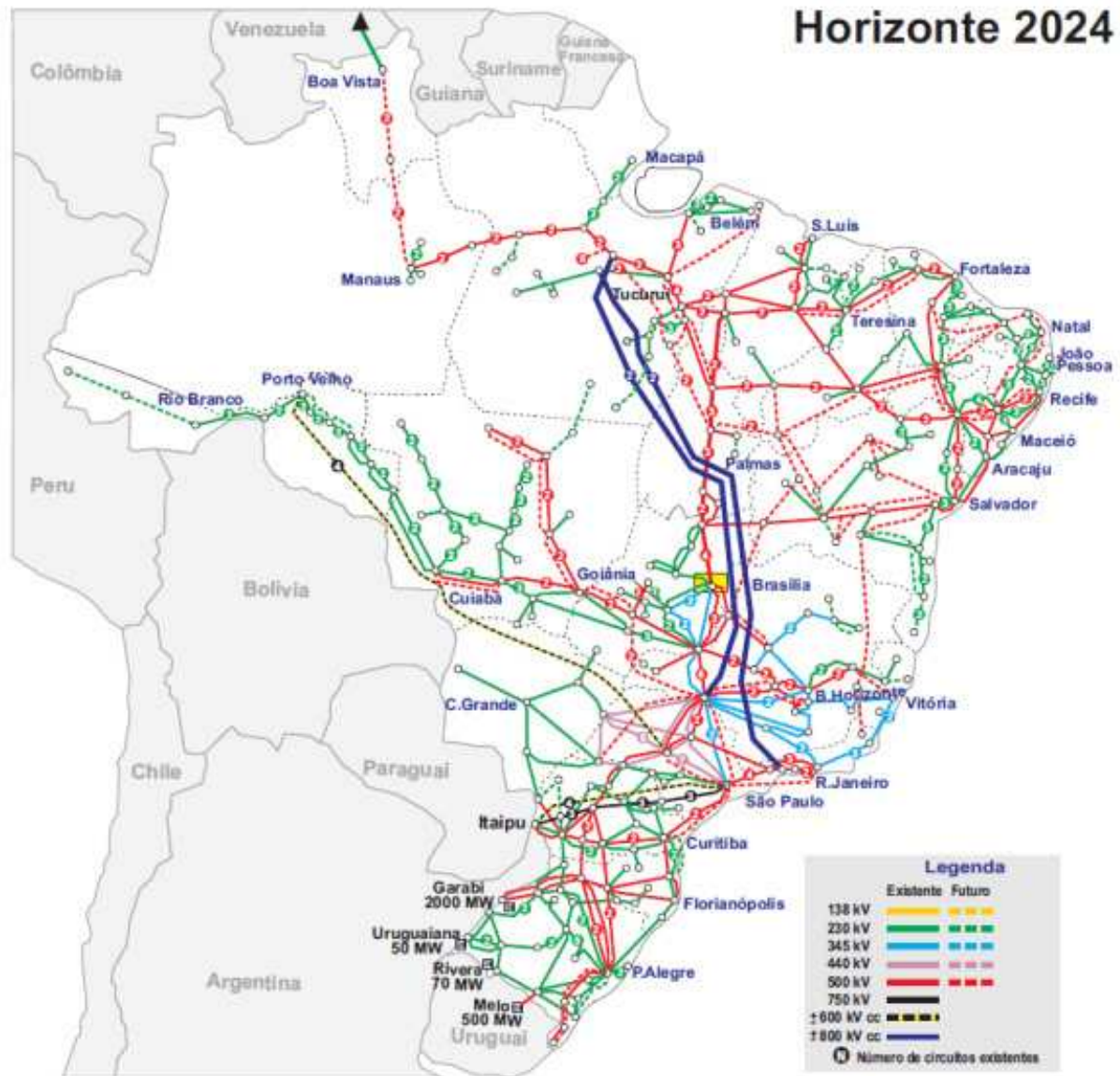
Figura 14 – Classificação dos níveis de tensão em regime permanente.



Fonte: (LEAO, 2022).

As linhas de transmissão do sistema elétrico brasileiro se distribuem por todo o território nacional, com exceção ao estado de Roraima, de modo a ligar as diferentes regiões do país. Geralmente, as linhas possuem extensões elevadas, pois as grandes hidrelétricas normalmente estão distantes dos pontos de consumo de energia elétrica. Por ser um sistema interligado, a segurança se torna ainda mais importante, pois falhas podem se propagar por todo o sistema, causando desabastecimento para um grande número de consumidores (LEAO, 2022). O sistema de transmissão brasileiro previsto até o ano de 2024 está explicitado na Figura 15.

Figura 15 – Sistema de transmissão brasileiro.



Fonte: ONS, 2022.

Além do exposto, é importante mencionar que nem sempre o Brasil possuiu um sistema interligado, visto que até 1999 o fornecimento de energia elétrica se dava através de sistemas elétricos desconectados, impossibilitando as operações coordenadas entre as principais usinas geradoras (LEAO, 2022).

Por este motivo, e com a finalidade de aumentar a confiabilidade, otimizar o uso dos recursos energéticos e homogeneizar mercados surgiu o Sistema Interligado Nacional - SIN, que se tornou responsável pelo fornecimento de aproximadamente 98% da energia elétrica no país. A operação do SIN é feita pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS que é responsável por sua coordenação e controle. Além disso, o SIN possui 4 subsistemas, são eles: Nordeste,

Sudeste, Sul e Norte/Centro-Oeste (LEAO, 2022).

Como todo sistema, o SIN possui vantagens e desvantagens, as quais são possíveis citar:

1. Vantagens

- Estabilidade: O sistema possui a capacidade de absorver grandes impactos elétricos sem perda de sincronismo devido a sua robustez.
- Confiabilidade: É possível continuar o fornecimento de energia elétrica mesmo com a perda de grandes usinas de geração visto haver diversas rotas para o fluxo de energia.
- Disponibilidade: A integração da operação acresce a disponibilidade de energia elétrica ao contrário do que ocorreria se houvesse a operação de usinas isoladamente.
- Economicidade: É possível intercambiar a energia de acordo com a demanda e a oferta do sistema a depender da fonte geradora.

2. Desvantagens

- Propagação de falhas: Como o sistema é interligado, falhas em um ponto podem se propagar para todo o sistema.
- Complexidade: Quanto maior for o sistema, mais complexa a operação e a proteção se tornarão.

2.2.1.3 Distribuição

O sistema de distribuição é o último elo na cadeia de fornecimento de energia elétrica. Este sistema é o responsável a entregar a energia elétrica ao consumidor final. No Brasil, o sistema de distribuição de energia elétrica é operado por 53 empresas concessionárias e 52 permissionárias, espalhadas por todas as regiões do país. Por sua vez, o poder concedente desses empreendimentos é o Ministério de Minas e Energia (LEAO, 2022).

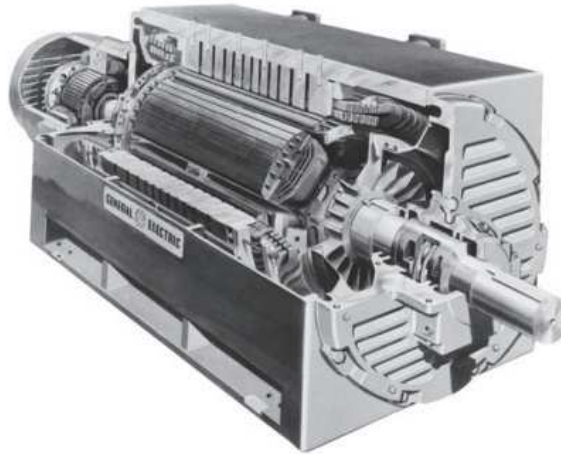
Além disso, para um correto funcionamento do sistema, é necessário a regulamentação de procedimentos e regras, o que ocorrem através da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, que elaborou um documento com o título de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica - PRODIST, que realiza a função de normatizar e padronizar a operação técnica e todos os requisitos necessários para o bom funcionamento do sistema de distribuição elétrica (LEAO, 2022). Por sua vez, o PRODIST é dividido em onze módulos (ANEEL, 2023), a saber:

1. Glossário de Termos Técnicos do Prodist;
2. Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição;
3. Conexão ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica;
4. Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição;
5. Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura;
6. Informações Requeridas e Obrigações;
7. Cálculo de Perdas na Distribuição;
8. Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica;
9. Ressarcimento de Danos Elétricos;
10. Sistema de Informação Geográfica Regulatório;
11. Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares.

2.2.2 Geradores Síncronos

Os geradores são máquinas destinadas a gerar energia elétrica a partir do movimento rotativo, que são acionados por máquinas primárias, como é o exemplo das turbinas hidráulicas e eólicas, produzindo através de indução eletromagnética um nível de tensão senoidal, um determinado nível de frequência fixo e uma amplitude de acordo com a classe de tensão do gerador (LEAO, 2022). O diagrama em corte de uma máquina síncrona pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Diagrama em corte de uma máquina síncrona.

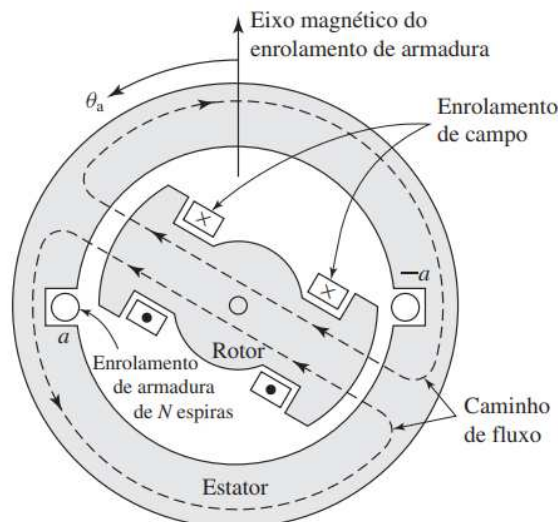


Fonte: (UMANS, 2014).

O gerador síncrono trifásico de rotor blindado é a máquina mais utilizada para geração em sistemas de potência pois possui uma eficiência na casa dos 90% e por possuir excelente controlabilidade. O gerador síncrono é capaz de gerar potência ativa e reativa independentemente, além de desempenhar papel no controle da velocidade (frequência), tensão e correção de fator de potência. A máquina rotativa possui duas grandes partes, são elas: rotor e estator.

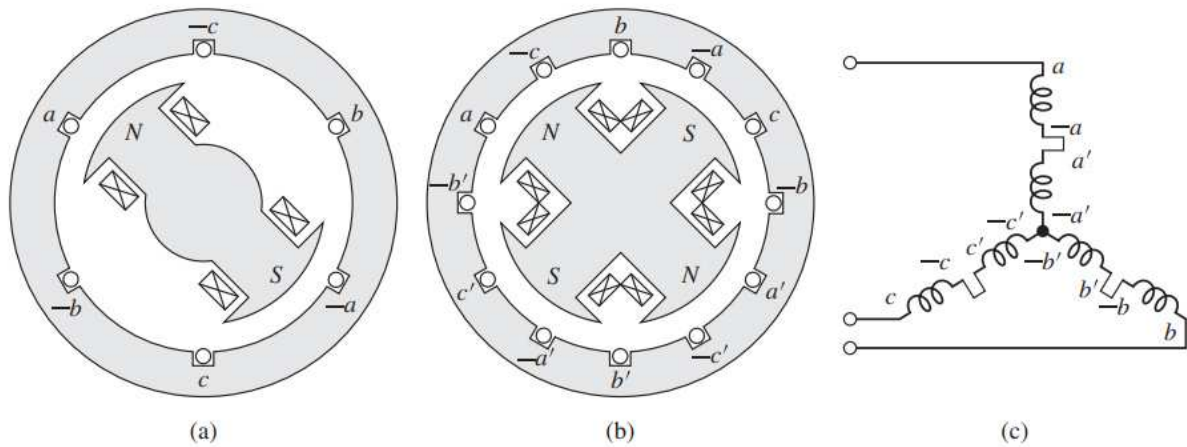
Dessa maneira, em uma máquina síncrona, o enrolamento de campo que faz o trabalho de fornecer a excitação a máquina está situada no rotor e os enrolamentos de armadura, que extraem a potência da máquina estão situados no estator (LEAO, 2022). O diagrama de corte de uma máquina síncrona está exposto na Figura 16 e a exemplificação dos enrolamentos de um gerador síncrono e seu esquemático nas Figuras 17 e 18 (UMANS, 2014).

Figura 17 – Vista esquemática dos enrolamentos de um gerador síncrono monofásico.



Fonte: (UMANS, 2014).

Figura 18 – Vista esquemática de geradores trifásicos: (a) dois polos, (b) quatro polos e (c) ligação em Y dos enrolamentos.



Fonte: (UMANS, 2014).

2.2.2.1 Velocidade Síncrona

O gerador síncrono recebe este nome por possuir sincronia entre os campos do rotor e do estator, possuindo ambos a mesma velocidade. Além disso, a velocidade síncrona é proporcional à frequência f e inversamente proporcional ao número de polos da máquina N_p (LEAO, 2022), sendo expressa de acordo com a equação 2.1. Se necessário é possível converter a velocidade síncrona para radianos, como demonstrado na equação 2.2.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{N_p} \left[\frac{\text{rot}}{\text{min}} \right] \quad (2.1)$$

$$\omega_s = n_s \cdot \frac{2\pi}{60} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (2.2)$$

2.3 Introdução a Inércia no Sistema Elétrico de Potência

A inércia pode ser resumida como a tendência de um objeto a manter seu estado atual de movimento ou de repouso, exceto se houver a introdução de uma força externa que atue sobre este corpo. A inércia foi definida por Isaac Newton em seu livro "Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica", publicado em 1687. Dessa maneira, Newton descreveu:

"Todo corpo permanece em seu estado de repouso, ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que seja compelido a mudar esse estado por forças aplicadas sobre ele."

Sendo, portanto, essa a definição clássica de inércia (NEWTON, 1979). Para sistemas elétricos de potência, esse conceito se aplica prioritariamente nas máquinas rotativas, como geradores síncronos, que estão conectados ao sistema de potência e oferecem resistência a mudança de velocidade rotacional, o que é conhecido como momento de inércia rotacional (ULBIG *et al.*, 2014).

Dessa forma, a inércia de um gerador síncrono pode ser representada de acordo com a equação 2.3, temos:

$$J = \int r^2 dm \quad (2.3)$$

Onde J é a inércia do gerador em kg.m^2 , m representa a massa do rotor em kg e r é o raio do rotor em metros. Dessa forma, temos que a energia cinética armazenada pelo rotor é dada de acordo com a equação 2.4, logo temos:

$$E_C = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (2.4)$$

Onde ω_m é a velocidade de rotação do rotor em radianos por segundo.

2.3.1 Equação de Oscilação

Desbalanceamentos da relação entre geração e demanda são causados por desligamentos de grandes unidades geradoras. Devido a esse desbalanceamento, a energia cinética armazenada no rotor irá variar. A taxa de variação da energia cinética total e a variação entre a geração e a carga é descrita na Equação 2.5 e é conhecida como equação de oscilação ou swing (SAXENA *et al.*, 2020).

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \omega_m^2 \right) = \Delta P_g - \Delta P_L \quad (2.5)$$

Onde o termo ΔP_g representa a variação com relação a geração em MW e o termo ΔP_L representa a variação de carga no sistema em MW. Dessa forma, a partir da equação de oscilação

é possível observar que na ausência de diferenças entre a potência mecânica gerada e a potência elétrica consumida, a energia cinética total do sistema se mantém inalterada e o sistema estável.

2.3.2 Constante de inércia

Outra característica fundamental na análise da inércia de um sistema, é a chamada constante de Inércia H , representada pela equação 2.6 (SHAZON *et al.*, 2022).

$$H = \frac{E_C}{S} = \frac{\frac{1}{2}J\omega_m^2}{S} \quad (2.6)$$

Em grandes sistemas de potência, a constante de inércia total é dada de acordo com a Equação 2.7.

$$H_{total} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i \times H_i)}{\sum_{i=1}^n S_i} = \frac{E_{C_{total}}}{S_{total}} \quad (2.7)$$

Onde S_i representa a potência de um gerador i em MVA, H_i é a constante de inércia de um gerador i em segundos, S_{total} é o total de potência nominal de todos os geradores conectados ao sistema e $E_{C_{total}}$ representa a energia cinética armazenada do sistema. Dessa forma, a constante de inércia H representa o tempo que a potência nominal pode ser gerada apenas com a energia cinética que o rotor armazenou (HU *et al.*, 2023). Além disso, H possui valores entre 2 e 10 segundos (KUNDUR *et al.*, 2017).

2.3.3 Relação da frequência e a inércia

A relação entre a interação da parte mecânica de uma máquina síncrona com o sistema elétrico é dada de acordo com a equação 2.8 (ROSA *et al.*, 2020).

$$2H \frac{df}{dt} = P_m - P_e \quad (2.8)$$

Onde H representa a inércia da unidade geradora em segundos, f é a frequência da máquina em pu, P_m representa a potência mecânica da máquina em pu e P_e representa a potência elétrica solicitada pela carga em pu. Analisando a equação 2.8, é possível observar que na ocorrência de um desequilíbrio entre a geração e a carga em um sistema elétrico, quanto maior for a inércia, de maneira mais lenta ocorrerá a variação de frequência. Dessa forma, tal característica das

máquinas síncronas fornece tempo para aplicação de controles de modo a regular o valor da potência mecânica e reestabelecer o equilíbrio entre a carga e a geração do sistema elétrico.

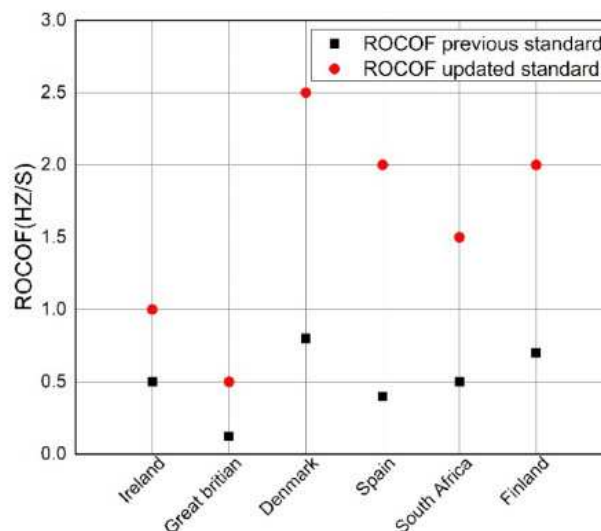
2.3.4 Rate of Change of Frequency - ROCOF

Rate of Change of Frequency, ou simplesmente ROCOF, é um indicador que demonstra o quão rápido a frequência varia após um desbalanceamento entre a geração e a carga, e é expresso em Hertz por segundo. Além disso, um dos significados que é possível obter do ROCOF é a detecção de unidades de geração no sistema. O ROCOF após a perda de uma unidade de geração é dado pela equação 2.9 (RATNAM *et al.*, 2020).

$$ROCOF = \frac{\Delta Pf}{2SH} \quad (2.9)$$

Com relação a um sistema com alta penetração de energias renováveis, as unidades geradoras perceberão uma taxa de mudança de frequência (ROCOF) severa na ocorrência de uma perda significativa de geração. Dessa maneira, alguns códigos de rede introduziram requisitos mais precisos para definir a tolerância ao ROCOF. Entretanto, com o crescimento das fontes renováveis, alguns países relaxaram o valor do ROCOF para atingir a meta da penetração de energias renováveis, como foi o caso da Irlanda, que em 2020 aumentou o ROCOF de 0,5 Hz/s para 1,0 Hz/s para novas unidades geradoras (RATNAM *et al.*, 2020). A comparação dos valores anteriores e posteriores do ROCOF pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Comparação da variação do ROCOF em diversos países.

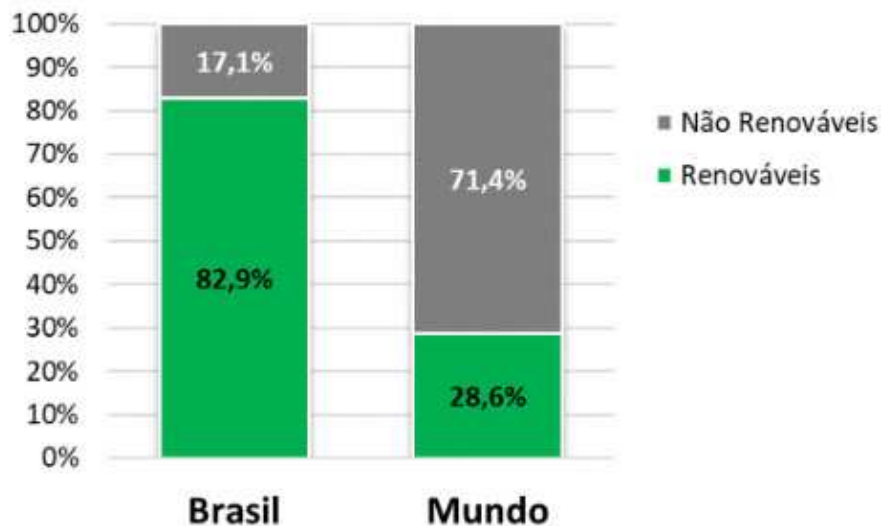


Fonte: (RATNAM *et al.*, 2020).

2.4 Impacto das Fontes Renováveis na Inércia do Sistema Elétrico

É de fácil observação o crescimento exponencial da preocupação com relação ao meio ambiente e o desafio de manter o fornecimento de energia elétrica cada vez maior sem afetar negativamente os recursos naturais disponíveis. Dessa forma, a geração de energia elétrica através de fontes renováveis se tornou uma alternativa para contribuir com essa demanda crescente. Segundo a EPE, em 2020, mais de 80% da geração de energia elétrica no Brasil era obtida através de fontes renováveis, e no mundo, aproximadamente 30% como pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis no Brasil e no mundo.



Fonte: (EPE, 2020).

Embora esse tipo de geração traga diversas vantagens ecológicas e econômicas, a ausência de fornecimento de inércia para o sistema pode ser um problema grave para a estabilidade do sistema elétrico, como visto nos tópicos anteriores. O aumento cada vez maior da penetração de fontes de geração renováveis, como a eólica por exemplo, podem impactar a confiabilidade de um sistema elétrico de potência. É possível observar que a conexão de aerogeradores aos SEP's, devido as próprias características intermitentes dos ventos e da baixa inércia inerente a utilização de conversores de potência gera um impacto negativo com relação a frequência (NGUYEN; MITRA, 2015).

Por sua vez, embora as fontes de energias renováveis na ausência da aplicação de controle especial não contribuam para a inércia do sistema, a energia cinética armazenada nas turbinas eólicas ainda podem ser utilizadas para estabilização da frequência. Por outro lado,

os painéis fotovoltaicos não possuem a capacidade de armazenar energia cinética. Em um aerogerador, as pás contribuem para o armazenamento de energia. As pás fornecem energia cinética, onde a constante de inércia H observadas variam entre 2 e 5 segundos, valor próximo dos modelos de geração convencional de energia elétrica. Entretanto, ao se realizar a comparação entre a energia cinética e sua utilização no controle de frequência com relação a plantas de geração convencionais, é possível observar algumas diferenças significativas (TIELENS; HERTEM, 2012), entre elas, é possível citar:

- Devido a variação dos ventos, a energia cinética armazenada varia com o tempo. Logo, quanto a velocidade dos ventos aumenta, a velocidade do rotor do aerogerador também irá aumentar, e quando houver a diminuição dos ventos, a velocidade do rotor irá diminuir. Isso difere significativamente dos modelos convencionais de geração de energia elétrica, visto que, em uma hidrelétrica, por exemplo, a energia cinética armazenada é virtualmente constante, devido a velocidade do gerador está acoplada a frequência do sistema (TIELENS; HERTEM, 2012).
- Com relação ao acoplamento entre a velocidade do rotor e da frequência, é possível observar outra consequência. Quando há uma queda de frequência, a energia cinética liberada será proporcional ao ROCOF. Por outro lado, a energia liberada em uma turbina eólica ou em uma planta fotovoltaica pode ser controlada independentemente do ROCOF (TIELENS; HERTEM, 2012).

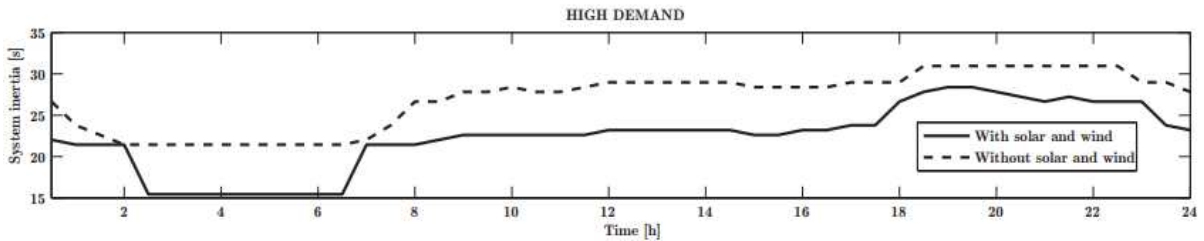
Para demonstrar o real impacto na inércia da inserção de fontes de energias renováveis no sistema elétrico, um experimento foi demonstrado por Pieter Tielens e Dirk Van Hertem, no artigo denominado "*Grid Inertia and Frequency Control in Power Systems with High Penetration of Renewables*". Neste, foram utilizados alguns parâmetros, sendo eles:

- 11 plantas de geração convencional de energia elétrica com capacidade total de 762 MW;
- Uma planta de geração eólica com capacidade total de 100 MW;
- Uma planta de geração solar com capacidade total de 30 MW.

Além disso, foram analisados dois diferentes cenários de 24 horas. No primeiro, uma alta demanda com um pico de 645 MW e uma baixa demanda de pico 430 MW. Os resultados podem ser observados nas Figuras 21 e 22. É possível observar que durante o dia houve grandes variações na inércia do sistema. Durante a noite, quando a demanda está baixa, poucas plantas operam e a inércia se reduz. Realizando a comparação entre os casos com e sem a inserção de fontes renováveis, houve uma redução significativa na inércia, mais especificamente no período

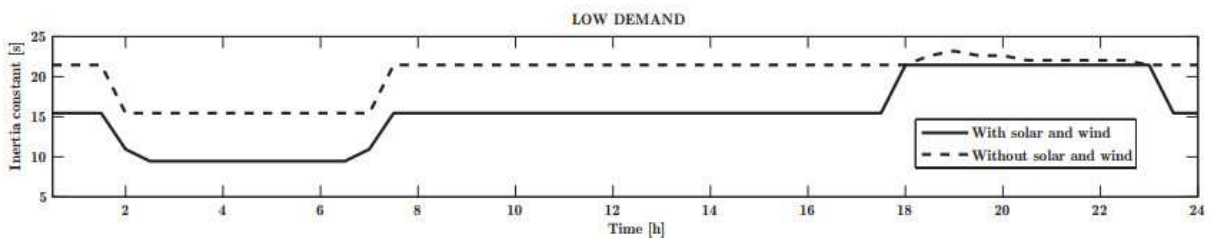
noturno onde a inserção de fontes renováveis levou a baixos níveis de inércia. Devido a isso, na ocorrência de desbalanceamentos entre a geração e a demanda, a variação de frequência será muito maior. Como as plantas fotovoltaicas possuem sua geração concentrada no período de maior demanda (alta inércia), o efeito de tais plantas será menor que as plantas eólicas para a inércia do sistema, que ocorrerá tanto no período de maior e de menor demanda.

Figura 21 – Inércia no período de alta demanda.



Fonte: (TIELENS; HERTEM, 2012).

Figura 22 – Inércia no período de baixa demanda.



Fonte: (TIELENS; HERTEM, 2012).

2.5 Ocorrência de 15 de Agosto de 2023 no Sistema Interligado Nacional - SIN

Esta seção busca descrever a ocorrência no SIN do dia 15 de Agosto de 2023 e verificar se houve alguma influência do nível de inércia com a falha observada.

2.5.1 Esquema Regional de Alívio de Carga por Subfrequência - ERAC

Este subtópico foi baseado no Manual de Procedimentos da Operação, Módulo 5, submódulo 5.12 de 2022, o qual descreve alguns critérios utilizados para implementação do Esquema Regional de Alívio de Carga por Subfrequência - ERAC no Sistema Interligado Nacional - SIN, que devem ser seguidos pelo Operador Nacional do Sistema - ONS e os agentes que realizam o gerenciamento de cargas, com o objetivo de controlar a frequência no SIN (ONS, 2023a).

Antes de analisar a ocorrência do mês de Agosto de 2023 no SIN, é importante conhecer um importante sistema que atuou para minimizar a falha ocorrida. Dessa maneira, o ERAC é um sistema que tem como finalidade o desligamento automático de grandes blocos de energia, de modo que sua atuação possa prevenir a ocorrência de valores de subfrequência abaixo dos valores pré-definidos .

Dessa forma, a atuação do ERAC se dá por meio de cortes de carga através da utilização de relés de taxa de variação de frequência no tempo ($\frac{\Delta F}{\Delta T}$) considerando uma janela de frequência, e ou através de relés de frequência absoluta, que atuam de modo a efetuar o desligamento automático das cargas que haviam sido previamente estabelecidas, sempre que os valores de taxa de frequência, frequência absoluta e temporização forem atingidos.

2.5.2 Ajustes do ERAC por região ou área elétrica

Conforme dito anteriormente, o ERAC atua através do desligamento de blocos de energia, sendo que cada região possui níveis diferentes para sua atuação, possuindo subdivisões, onde cada estágio será acionado ao se chegar em um determinado nível de frequência, efetuando determinado percentual de corte de carga. Os cortes podem variar de 7 a 15% da carga total.

Além disso, o Manual de Procedimentos da Operação da ONS, define como tempo máximo admissível para o sensor efetuar a identificação de uma variação de frequência é cerca de 3 ciclos ou conforme orientação do catálogo do fabricante. Com relação a abertura do disjuntor, o tempo máximo é definido em 100 ms, podendo haver variações de acordo com o nível de tensão do equipamento. Dessa forma, o tempo máximo total admitido para atuação do ERAC é de 150 ms.

2.5.2.1 Região Sul

Os estágios de atuação da Região Sul podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Estágios de atuação região Sul.

Estágio	Frequência (Hz)	Corte de Carga (%)
1	58,50	7,5
2	58,20	7,5
3	57,90	10,0
4	57,60	15,0
5	57,30	15,0

Fonte: (ONS, 2023a).

2.5.2.2 Região Sudeste

Os estágios de atuação da Região Sudeste podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Estágios de atuação região Sudeste.

Estágio	Frequência (Hz)	Corte de Carga (%)
1	58,50	7,0
2	58,20	7,0
3	57,90	7,0
4	57,70	7,0
5	57,50	7,0

Fonte: (ONS, 2023a).

2.5.2.3 Região Centro Oeste e Área Acre Rondônia

Os estágios de atuação da Região Centro Oeste e Área Acre Rondônia podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 – Estágios de atuação região Centro Oeste e Área Acre Rondônia.

Estágio	Frequência (Hz)	Corte de Carga (%)	
		Acre/Rondônia	Goiás / Brasília / Mato Grosso / Mato Grosso do Sul
1	58,50	15,0	7,0
2	58,20	10,0	7,0
3	57,90	10,0	7,0
4	57,70	10,0	7,0
5	57,50	10,0	7,0

Fonte: (ONS, 2023a).

2.5.2.4 Região Norte e área Maranhão

Os estágios de atuação da Região Norte e área Maranhão podem ser vistos na Tabela

4.

Tabela 4 – Estágios de atuação região Norte e área Maranhão.

Estágio	Albrás			Equatorial MA / Energisa - TO / Equatorial PA e demais Consumidores Livres		
	Taxa de Variação de Frequência (Hz/s)	Frequência (Hz)	Corte de Carga (%)	Taxa de Variação de Frequência (Hz/s)	Frequência (Hz)	Corte de Carga (%)
1	1,50	57,70	Primeira Sala de Cubas	1,50	57,70	6,0
2	2,50	57,50	Segunda Sala de Cubas	2,50	57,50	7,0
3	3,50	57,30	Terceira Sala de Cubas	3,50	57,30	11,0

Fonte: (ONS, 2023a).

2.5.2.5 Região Nordeste

Os estágios de atuação da Região Nordeste podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 – Estágios de atuação região Nordeste.

Estágio	Taxa de Variação de Frequência (Hz/s)	Frequência (Hz)	Retaguarda		
			Frequência (Hz)	Temporização (s)	Corte de Carga (%)
1	0,70	57,90	58,50	10	6,0
2	1,10	57,80	58,50	11	7,0
3	1,50	57,70	58,50	12	11,0
4	1,80	57,60	-	-	16,0
5	-	57,40	-	-	15,0

Fonte: (ONS, 2023a).

Os estágios de atuação do subsistema área Manaus subsistema Mauá podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 – Estágios de atuação área Manaus subsistema Mauá.

Estágio	Taxa de Variação de Frequência (Hz/s)	Frequência de Retaguarda (Hz)	Corte de Carga (%)
1	0,20	58,40	8,0
2	0,80	58,40	12,0
3	1,50	58,00	15,0
4	2,0	57,70	15,0
5	-	57,20	15,0

Fonte: (ONS, 2023a).

Os estágios de atuação do subsistema área Manaus subsistema Manaus podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7 – Estágios de atuação área Manaus subsistema Manaus.

Estágio	Taxa de Variação de Frequência (Hz/s)	Frequência de Retaguarda (Hz)	Corte de Carga (%)
1	2,0	57,80	10,0
2	3,50	57,60	10,0
3	5,00	57,40	10,0
4	6,50	57,20	10,0
5	-	57,00	10,0

Fonte: (ONS, 2023a).

Os estágios de atuação área Macapá podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Estágios de atuação área Macapá.

Estágio	Taxa de Variação de Frequência (Hz/s)	Frequência de Retaguarda (Hz)	Corte de Carga (%)
1	0,50	58,30	11,0
2	1,00	58,10	11,0
3	2,70	57,60	11,0
4	4,00	57,40	11,0
5	-	57,20	11,0
SEP - 1	-	56,90	6,0
SEP - 2	-	56,60	6,0

Fonte: (ONS, 2023a).

Os estágios de atuação área Tramo Oeste podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 9 – Estágios de atuação área Tramo Oeste.

Estágio	Taxa de Variação de Frequência (Hz/s)	Frequência de Retaguarda (Hz)	Corte de Carga (%)
1	1,40	58,50	8,0
2	3,00	57,90	9,0
3	4,00	57,40	9,0
4	6,00	56,90	11,0
5	7,50	56,40	8,0

Fonte: (ONS, 2023a).

2.5.3 Procedimentos Gerais

O ERAC é um sistema que deve está sempre ativo, de modo a atuar quando necessário.

Quando há a atuação do ERAC, é necessário a realização de alguns passos, são eles:

1. Identificar as causas da atuação e verificar a configuração restante do sistema.
2. Confirmar com os agentes do sistema a atuação e registrar a quantidade de carga cortada e o horário da ocorrência.
3. Retornar as configurações padrão de operação do sistema de unidades geradoras ou linhas de transmissão e religar as cargas.

Além disso, em caso de manutenção ou necessidade operativa, é possível bloquear até 10% da carga em cada estágio do ERAC. Para bloqueios maiores que 10% de um estágio ou em mais de 10% da carga por distribuidora é necessário efetuar uma solicitação a ONS através do Sistema de Gestão de Intervenções (SGI).

2.5.4 Análise da atuação do ONS no evento

Um dia após o apagão, o Operador Nacional do Sistema - ONS, reduziu a exportação de energia do Nordeste para outras regiões do país. Dessa maneira, o Nordeste que possui em sua geração mais de 70% de sua geração realizada através de usinas fotovoltaicas e eólicas teve sua produção de energia elétrica limitada. De imediato, a motivação para tal atuação foi a existência de um pico de geração solar e eólica, que por este motivo acabou injetando na rede uma quantidade de energia maior que o sistema era capaz de receber naquele momento, causando sobrecarga no sistema interligado nacional. Portanto, o limite de exportação que o Nordeste fornecia para as outras regiões foi reduzido de 13000 MW para 8000 MW. Essa exportação

se dá principalmente pois há um excedente de geração nessa região, de modo que o restante é fornecido para a região Sudeste.

2.5.5 Cronologia do Evento

No mês de Outubro de 2023, cerca de 2 meses após o apagão, o ONS forneceu um documento intitulado Relatório de Análise de Perturbação - RAP, documento este que tinha a finalidade de apresentar os resultados da análise da perturbação do dia 15 de Agosto, ocorrida as 08:30 da manhã, ocorrendo inicialmente na LT 500 kV Quixadá - Fortaleza II (ONS, 2023c). A cronologia inicial do evento pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 – Cronologia inicial do evento.



Fonte: (ONS, 2023c).

Após a atuação do sistema de proteção, foi observada uma redução da tensão na região, nos sistemas de 230 kV e de 500 kV, de modo que houve a separação dos Subsistemas Norte, Nordeste e Acre/Rondônia do restante do sistema interligado. A separação ocorrida no SIN está demonstrada na Figura 24.

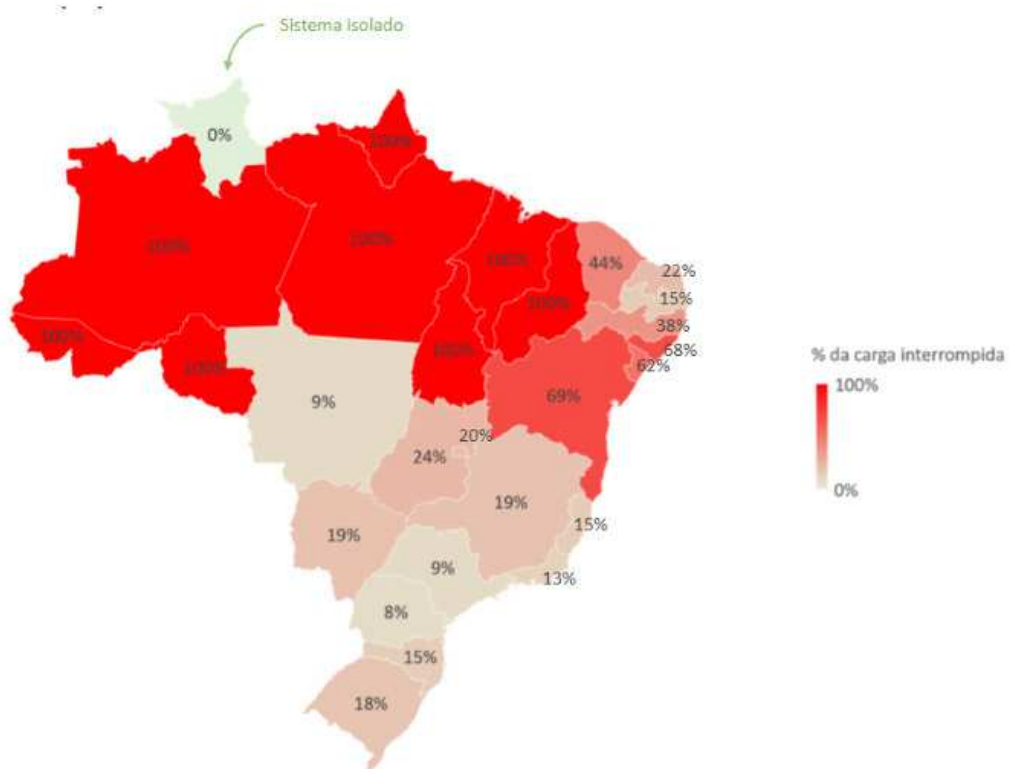
Figura 24 – Separação ocorrida no SIN.



Fonte: (ONS, 2023c).

Dessa maneira, em seu documento, o ONS chegou a conclusão que o que ocasionou a redução brusca de tensão após a perda de uma linha de transmissão foi o desempenho dos parques fotovoltaicos e eólicos, pois esse foi muito acima do esperado pelo operador. Dessa maneira, houve atuação do ERAC, e por conta disso, a interrupção de aproximadamente 23000 MW de carga no SIN, onde aproximadamente 12600 MW das regiões Norte/Nordeste e 10600 MW das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Visto que o Estado de Roraima se encontra isolado do SIN, este não foi afetado pela perturbação. O percentual de cargas interrompidas no SIN está demonstrado na Figura 25.

Figura 25 – Porcentagem de carga interrompida no evento.



Fonte: (ONS, 2023c).

Dessa maneira, após 13 minutos da ocorrência, foi iniciado o reestabelecimento de energia na região Sul, concluído por volta das 9:05 da manhã. Na região Sudeste o reestabelecimento iniciou as 8:52 e foi concluído às 9:33 da manhã. Às 14:49 da tarde, o ONS autorizou o reestabelecimento de todas as cargas no sistema interligado. A recomposição das cargas está demonstrada na Figura 26.

Figura 26 – Recomposição das cargas interrompidas.

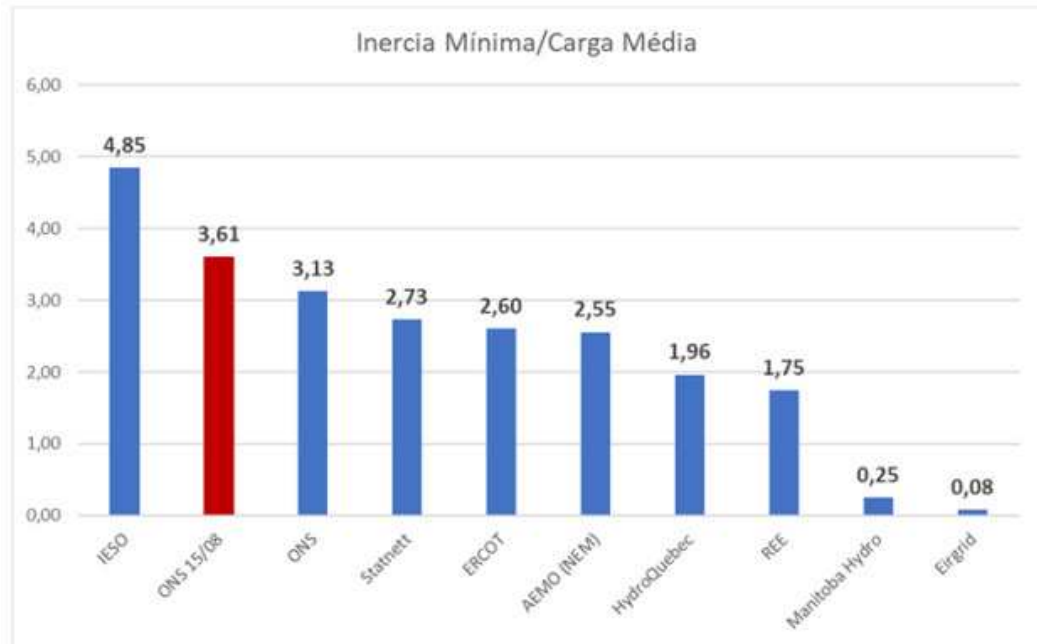


Fonte: (ONS, 2023c).

2.5.6 Efeito da inércia na perturbação

Segundo o ONS, no dia da ocorrência o Sistema Interligado Nacional possuía valores operacionais de inércia adequados, possuindo inclusive valores maiores que outros sistemas elétricos internacionais, como pode ser visto no gráfico da Figura 27.

Figura 27 – Inércia do SIN em 15 de Agosto de 2023.



Fonte: (ONS, 2023c).

Por este motivo, a hipótese de que o evento foi causado pela falta de inércia no sistema foi descartada, visto os níveis elevados de inércia no momento do apagão. Além disso, concluiu-se que a perturbação foi causada pelo colapso de tensão e a resposta inercial contribuiria para os fenômenos relacionados a frequência, não sendo, portanto, evitável ao se inserir uma quantidade maior de inércia no sistema.

3 METODOLOGIA

Para este trabalho foi realizado uma pesquisa bibliográfica. Pesquisa bibliográfica se refere a análise de registros disponíveis, decorrentes de pesquisas anteriores em documentos impressos, como artigos, teses e livros. Dessa forma, são utilizados dados já trabalhados por outros pesquisadores e devidamente registrados. Portanto, o autor trabalha utilizando contribuições de outros autores que realizaram estudos analíticos de determinado tema (SEVERINO, 2017).

Para realizar a busca de trabalhos como fontes, foram utilizados como buscadores o Google Acadêmico e o portal da Capes. Os descritores utilizados foram: inertia, electric power systems, renewable generation e suas derivações. Além disso, foram também utilizados livros para auxílio do entendimento de alguns artigos mais aprofundados, como também relatórios de órgãos governamentais para obtenção de dados atualizados.

A pesquisa se baseou em obter respostas para as seguintes perguntas: qual a importância da inércia no sistema elétrico de potência? Qual a influência da geração de energia através de fontes renováveis para a inércia do sistema elétrico de potência?

Após isso, foram selecionados 8 artigos entre os anos de 2012 a 2023, para desempenhar o papel de base da pesquisa. O critério para seleção dos artigos foi a proximidade com o tema da inércia e suas consequências no sistema elétrico de potência em específico, de modo a não considerar artigos com o foco em discutir possíveis soluções de mitigação a esses efeitos como inércia virtual, visto que ampliaria o escopo da pesquisa e não era este o objetivo do presente trabalho.

Por fim, após a discussão do tema principal, foi inserido um tópico referente ao acontecimento no Sistema Interligado Nacional de Agosto de 2023, devido as dúvidas geradas a respeito da influência ou não da inércia no evento.

4 RESULTADOS

O termo inércia caracteriza a capacidade de um corpo de permanecer em seu estado original de repouso ou movimento caso não haja uma força externa aplicada sobre ele (NEWTON, 1979). Essa característica pode ser observada nos sistemas elétricos através da geração de energia a partir de máquinas síncronas, como geradores síncronos, os quais, possuem a capacidade de resistir a mudança de velocidade de rotação, característica essa que recebe o nome de momento de inércia rotacional (ULBIG *et al.*, 2014).

Dessa maneira, o gerador síncrono é a máquina mais utilizada para geração em sistemas de potência devido a sua alta eficiência (LEAO, 2022). Os geradores síncronos possuem a característica de armazenar energia cinética, em seu rotor, característica esta que possui relação íntima entre a variação de potência gerada e potência solicitada em um sistema de potência de modo que essa relação é descrita pela equação de oscilação ou swing (SAXENA *et al.*, 2020).

Ademais, a relação entre a energia cinética e a potência nominal de um sistema recebe o nome de constante de inércia, constante essa que representaria o tempo que a potência nominal poderia ser fornecida apenas com a energia cinética armazenada no rotor (HU *et al.*, 2023). Dentre os valores observados, geralmente a constante de inércia se encontra entre valores de 2 a 10 segundos (KUNDUR *et al.*, 2017).

A constante de inércia possui um papel fundamental com relação a estabilidade de frequência do sistema, de modo que uma maior constante de inércia possibilitaria que a variação de frequência no sistema elétrico de potência ocorresse mais lentamente, de modo a fornecer tempo ao operador do sistema para que realizasse manobras corretivas para o reestabelecimento entre geração e carga (ROSA *et al.*, 2020).

Devido ao crescimento acelerado da geração de energia elétrica através de fontes renováveis nos últimos anos e sem perspectiva de desaceleração (IEA, 2023), a inércia equivalente dos sistemas elétricos de potência está cada vez mais reduzida, de modo a gerar preocupação nos operadores do sistema (TIELENS; HERTEM, 2016).

Esse fenômeno ocorre porque diferentemente da geração convencional através de geradores síncronos que possuem acoplamento entre a parte mecânica e a parte elétrica, os conversores eletrônicos utilizados na geração fotovoltaica e eólica, realiza o desacoplamento entre a parte elétrica e o sistema elétrico de potência, não fornecendo dessa maneira, inércia ao sistema e aumentando a dificuldade de se manter a estabilidade do sistema elétrico de potência (TAN *et al.*, 2022).

Tielens e Hertem (2012) demonstraram tal característica, onde são analisados dois cenários, ambos de 24 horas. No primeiro cenário, considerando apenas geração convencional e no segundo cenário, a inserção de geração fotovoltaica e eólica. Como esperado teoricamente, a inércia equivalente do sistema reduziu após a inserção das renováveis, tanto para o horário de alta como de baixa demanda, tornando o sistema mais instável e com maiores taxas de variação de frequência.

Dessa forma, muito embora o Brasil possua mais da metade de sua geração através de energia hídrica (EPE, 2023a), a região Nordeste, por exemplo, possui mais de 70% de sua geração de fontes fotovoltaicas e eólicas (ONS, 2023c), o que pode ocasionar problemas devido a baixa inércia e ocorrer uma propagação de falhas por todo o sistema, visto que, o Brasil possui seu sistema de energia interligado responsável por 98% da energia elétrica do país (LEAO, 2022).

Um dia após o evento ocorrido em Agosto, o ONS reduziu a exportação de energia elétrica da região Nordeste pra região Sudeste de 13000 MW para 8000 MW (ONS, 2023c), mesmo sem o conhecimento real da causa do problema observado. Uma possível razão que se pode apontar para essa reação imediata do ONS, é a própria característica da geração de energia elétrica através de fontes intermitentes de geração pois essas não possuem a capacidade de oferecer inércia ao sistema, reduzindo portanto a confiabilidade do mesmo. Dessa maneira, fica implícito que o operador do sistema, sem possuir a resposta definitiva do que causou o apagão naquele momento, resolveu aumentar a participação de fontes não-intermitentes de geração de energia elétrica, como por exemplo, as hidrelétricas, pois essa atuam através de geradores síncronos que podem fornecer inércia aumentando o tempo de resposta do operador aumentando assim a confiabilidade do sistema.

Tal propagação de falhas ocorreu no dia 15 de Agosto de 2023, quando às 08:30 da manhã, ocorreu um evento de desligamento na linha de transmissão LT 500 kV Quixadá - Fortaleza II, de modo que tal evento ocasionou a atuação do ERAC, ocasionando a atuação das diversas proteções ao longo de todo o sistema interligado (ONS, 2023c). Dois meses após o ocorrido, o operador nacional do sistema emitiu um relatório relatando que a falha inicial foi ocasionada pelo desempenho dos parques fotovoltaicos e eólicos, sendo acima do esperado pelo operador (ONS, 2023c). Por fim, o ONS concluiu que a inércia não foi causa do evento, visto que na data do acontecimento, o sistema trabalhava com inércia acima do que costumava atuar, atribuindo a falha a problemas causados pelo colapso de tensão, muito embora a resposta definitiva para o ocorrido ainda não esteja determinada.

5 CONCLUSÃO

Ao término do presente trabalho verificou-se a urgência da discussão do tema da inércia no sistema elétrico. Com o crescimento acelerado das fontes alternativas, nota-se que o desconhecimento com relação a tal característica do sistema passa despercebido, de modo que pouco se comenta sobre os efeitos negativos de tal crescimento, e, muito menos, da diminuição da inércia ou seus efeitos no sistema de potência.

Com relação ao Brasil, a situação se torna ainda mais preocupante, visto que o país possui uma vasta parcela de sua matriz energética oriunda de fontes renováveis. Quando se adentra na pesquisa acadêmica do tema, pouco se encontra em língua portuguesa a respeito do tema, demonstrando um total atraso para a proposição de ações por parte dos interessados.

As ações de outros países com relação ao alargamento dos níveis aceitáveis da variação de frequência nos seus sistemas elétricos de potência, como exemplo da Dinamarca, Espanha e Finlândia, demonstram os efeitos de tal mudança acelerada na matriz energética dos países.

Fato é que a inércia no sistema elétrico é um tema muito abrangente e não pode ser resumido e analisado em separado, de modo que pra sua correta análise é necessário observar diversas fatores desde técnicos, sociais e econômicos. O marketing das fontes renováveis de energia elétrica acaba por ofuscar as consequência que tal aumento causa no sistema, muitas dessas consequências sendo desconhecidas até por acadêmicos da área de Engenharia Elétrica.

Diante das análises pontuais do presente trabalho, conclui-se que em breve o debate sobre a diminuição da inércia no sistema elétrico brasileiro será inevitável, visto que tal diminuição levará o sistema para níveis críticos de operação, de modo que os reflexos poderão atingir mais significativamente a população.

5.1 Trabalhos Futuros

Visto que o movimento renovável é inevitável, em breve será necessário um aprofundamento em técnicas de mitigação da baixa inércia no sistema elétrico de potência, como, por exemplo, a inércia virtual, que já é utilizada em alguns cenários. Além disso, será necessário, em breve, estudos sobre maneiras de garantir uma operação estável do sistema elétrico de potência, de modo a garantir a estabilidade dos níveis de frequência em um cenário de níveis cada vez mais baixos de inércia.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **PRODIST**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>.
- ANGELO LEITHOLD. **Itaipu, Usina de Itaipú Figura Aérea 2 Maior Hidrelétrica do mundo Foz do Iguaçu Paraná Brasil**. 2005. Disponível em: <https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:ItaipuAerea2AAL.jpg>.
- AURÉLIO, M. **Meditações**. [S. l.]: Edipro, 2019.
- CBIE. **Como a Biomassa se transforma em Energia Elétrica?** 2019. Disponível em: <https://cbie.com.br/como-a-biomassa-se-transforma-em-energia-eletrica/>.
- ENEL. **Parque Solar São Gonçalo**. 2019. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/nossos-projetos/highlights/parque-solar-sao-goncalo>.
- EPE. **Balanco Energético Nacional 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>.
- EPE. **Balanco Energético Nacional 2023**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>.
- EPE. **Fontes de Energia**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia>.
- EUDORA ENERGIA. **Energia Heliotérmica**. 2022. Disponível em: <https://eudoraenergia.com.br/solucoes-energia-heliotermica-csp>.
- G1. **Apagão nacional: o que se sabe até agora**. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2023/08/16/apagao-nacional-o-que-se-sabe-ate-agora.ghtml>.
- HU, P.; LI, Y.; YU, Y.; BLAABJERG, F. Inertia estimation of renewable-energy-dominated power system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 183, p. 113481, 2023.
- IEA. **Renewables**. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/renewables>.
- KUNDUR, P. S.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. Power system dynamics and stability. **Power system stability and control**, McGraw-Hill, v. 3, p. 700–701, 2017.
- LEAO, R. **Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica - Notas de Aula**. [S. l.]: UFC, 2022.
- MUNDO DA ELETRICA. **Fontes Renováveis**. 2022. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/fontes-de-energia-renovaveis-quais-sao-como-funcionam/>.
- NEWTON, I. **Philosophiae naturalis principia mathematica**. [S. l.]: Jussu Societatis Regiae ac Typis Josephi Streater. Prostat Venales apud Sam . . . , 1979.
- NGUYEN, N.; MITRA, J. An analysis of the effects and dependency of wind power penetration on system frequency regulation. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, IEEE, v. 7, n. 1, p. 354–363, 2015.

ONS. **Manual de Procedimento Operacional**. 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/%2FMPO%2FDocumento%20Normativo%2F3.%20Instru%C3%A7%C3%B5es%20de%20Opera%C3%A7%C3%A3o%20-%20SM%205.12%2F3.7.%20Opera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Instala%C3%A7%C3%B5es%2F3.7.3.%20Nordeste%2F3.7.3.2.%20%C3%81rea%20230%20kV%20Leste%2FIO-OI.NE.GLH_Rev.08.pdf.

ONS. **Projeção para Linhas de Transmissão em 2027**. 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>.

ONS. **Relatório de Análise de Perturbação (RAP)**. 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20231018_Ocorrencia_de_15_de_agosto_ONS_finaliza_Relatorio_de_Analise_de_Perturbacao_RAP.aspx.

RATNAM, K. S.; PALANISAMY, K.; YANG, G. Future low-inertia power systems: Requirements, issues, and solutions-a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 124, p. 109773, 2020.

REBOB. **Energia das ondas no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.rebob.org.br/post/2020/07/24/energia-das-ondas-no-brasil>.

ROSA, B. P.; ASSIS, T. M.; MOURINHO, F. A. Determinação da inércia mínima em sistemas com alta penetração de geração eólica. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 1, n. 1, 2020.

SAXENA, P.; SINGH, N.; PANDEY, A. K. Enhancing the dynamic performance of microgrid using derivative controlled solar and energy storage based virtual inertia system. **Journal of Energy Storage**, Elsevier BV, v. 31, p. 101613, out. 2020. ISSN 2352-152X. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2020.101613>.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. [S. l.]: Cortez editora, 2017.

SHAZON, M. N. H.; JAWAD, A. *et al.* Frequency control challenges and potential countermeasures in future low-inertia power systems: A review. **Energy Reports**, Elsevier, v. 8, p. 6191–6219, 2022.

SOLAR EOLICA RENOVAVEL. <https://solareolicarenovavel.com/parques-eolicos/>. 2021. Disponível em: <https://solareolicarenovavel.com/parques-eolicos/>.

TAN, B.; ZHAO, J.; NETTO, M.; KRISHNAN, V.; TERZIJA, V.; ZHANG, Y. Power system inertia estimation: Review of methods and the impacts of converter-interfaced generations. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 134, p. 107362, 2022.

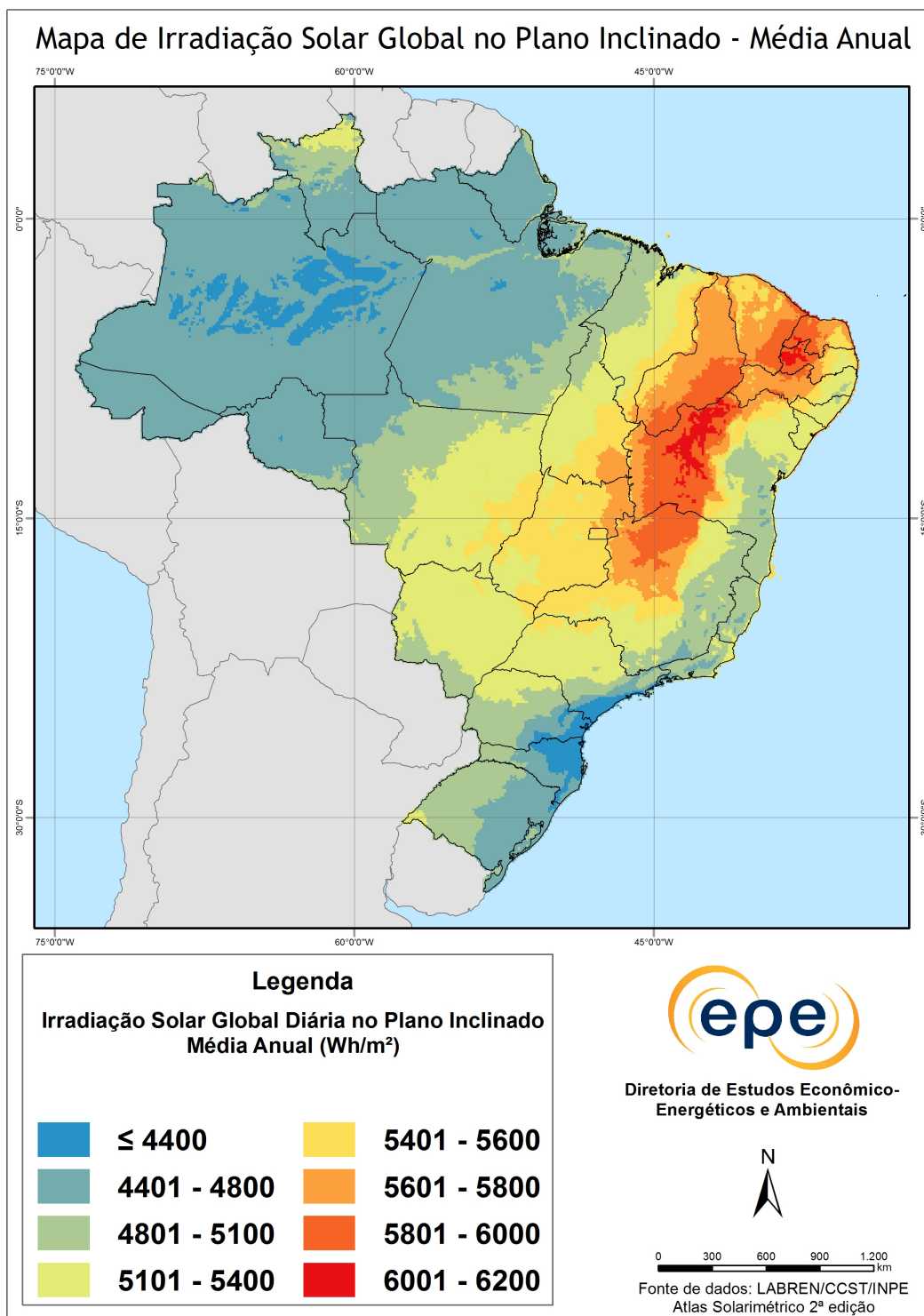
TIELENS, P.; HERTEM, D. V. Grid inertia and frequency control in power systems with high penetration of renewables. In: **Young Researchers Symposium in Electrical Power Engineering, Date: 2012/04/16-2012/04/17, Location: Delft, The Netherlands**. [S. l.: s. n.], 2012.

TIELENS, P.; HERTEM, D. V. The relevance of inertia in power systems. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 55, p. 999–1009, 2016.

ULBIG, A.; BORSCHKE, T. S.; ANDERSSON, G. Impact of low rotational inertia on power system stability and operation. **IFAC Proceedings Volumes**, Elsevier, v. 47, n. 3, p. 7290–7297, 2014.

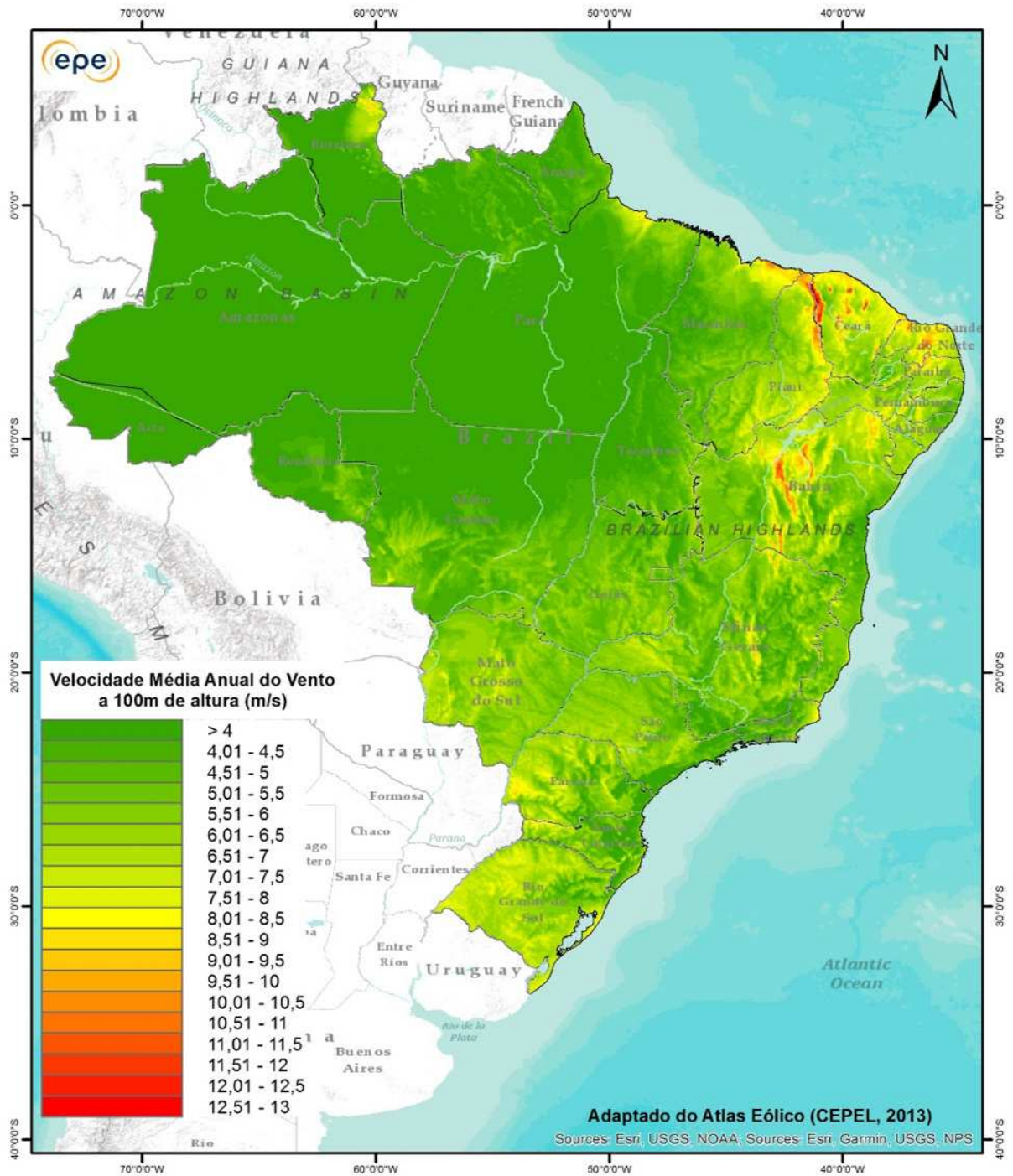
UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7**. [S. l.]: AMGH Editora, 2014.

ANEXO A – IRRADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL



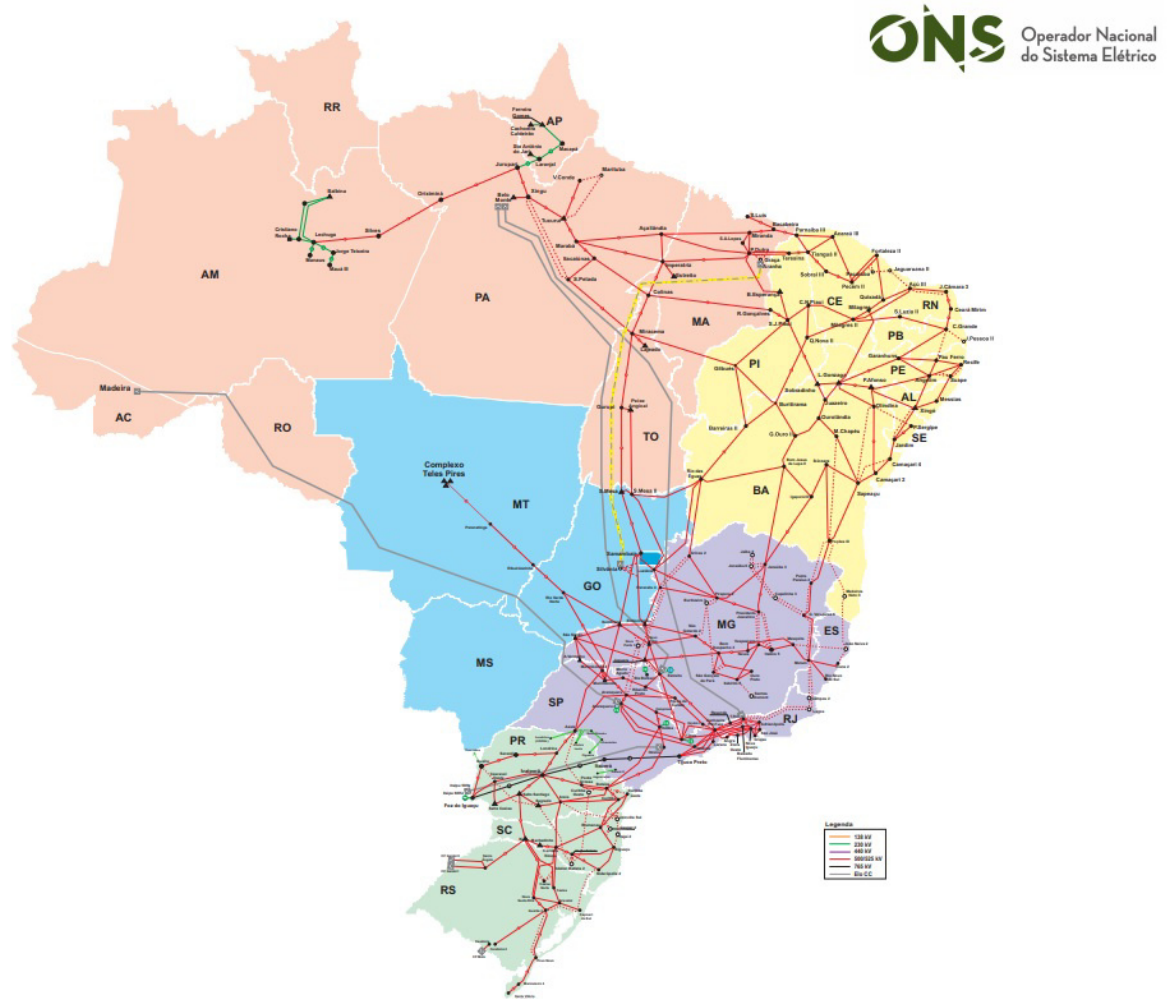
Fonte: EPE, 2023.

ANEXO B – MAPA EÓLICO DO BRASIL



Fonte: CEPEL, 2013.

ANEXO C – PROJEÇÃO PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO EM 2027



Fonte: (ONS, 2023b).