



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUCILA MARIA CABRAL ARAÚJO

**ESTUDOS RELACIONADOS A ESTABILIDADE DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA
TENDO EM VISTA OS FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS E DINÂMICA
ELETROMECAÂNICA PARA PEQUENOS DISTÚRBIOS**

JOÃO PESSOA – PARAÍBA

2023

LUCILA MARIA CABRAL ARAÚJO

ESTUDOS RELACIONADOS A ESTABILIDADE DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA TENDO
EM VISTA OS FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS E DINÂMICA ELETROMECHANICA
PARA PEQUENOS DISTÚRBIOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro de Medeiros Maciel

JOÃO PESSOA – PARAÍBA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *campus* João Pessoa

S663e Araújo, Lucila Maria Cabral.
 Estudos relacionados a estabilidade dos sistemas de potência tendo em vista os fenômenos eletromagnéticos e dinâmica eletromecânica para pequenos distúrbios / Lucila Maria Cabral Araújo. – 2023.
 42 f. : il.

 TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB / Coordenação de Engenharia Elétrica.
 Orientador: Prof. Dr. Álvaro de Medeiros Maciel.

 1. Sistema de potência. 2. Fenômenos eletromagnéticos, 3. Dinâmica eletromecânica. 4. Transmissão de energia. I. Título.

CDU 621.3.016.2


LUCILA MARIA CABRAL ARAÚJO

ESTUDOS RELACIONADOS A ESTABILIDADE DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA TENDO
EM VISTA OS FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS E DINÂMICA ELETROMECHANICA
PARA PEQUENOS DISTÚRBIOS


Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Paraíba, como requisito parcial à
obtenção do grau de bacharel em Engenharia
Elétrica.

Aprovada em: 22 de dezembro de 2023.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 ALVARO DE MEDEIROS MACIEL
Data: 26/12/2023 11:26:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Álvaro de Medeiros Maciel (Orientador)
Unidade Acadêmica 3 - UA3
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

Documento assinado digitalmente
 FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA
Data: 26/12/2023 16:49:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Franklin Martins Pereira Pamplona
Unidade Acadêmica 3 - UA3
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

Documento assinado digitalmente
 GILVAN VIEIRA DE ANDRADE JUNIOR
Data: 26/12/2023 22:24:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gilvan Vieira de Andrade Junior
Unidade Acadêmica 3 - UA3
Instituto Federal da Paraíba - IFPB

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar força, perseverança e oportunidades para crescer e aprender.

À minha amada mãe, Aglaé, que, mesmo enfrentando suas próprias limitações como cadeirante, nunca deixou de me apoiar, fazer tudo por mim e ser um exemplo de determinação e amor.

Ao meu pai, Josué (in memoriam), que me inspirou e incentivou desde o início. Tudo o que sou hoje é resultado do seu amor e confiança em mim.

Ao meu noivo, Daniel, cujo apoio inabalável e dedicação foram fundamentais para superar os desafios desta etapa.

Às minhas irmãs Daniela e Ana Coeli por terem segurado a barra e me ajudado com os trabalhos de casa e com nossa mãe quando precisei estudar.

Ao Professor Álvaro, meu orientador, pela paciência, dedicação e por aceitar me guiar nesse processo.

Ao IFPB, pela oportunidade de adquirir conhecimento e crescer academicamente.

À minha amiga Dara, que nunca soltou minha mão e sempre me incentivou a não desistir nos momentos mais difíceis desde minha infância. E as minhas queridas amigas Myrella e Ellen que tornaram meus dias mais leves com seu apoio e amizade e também pelos puxões de orelha.

À minha amiga de curso, Tay, que foi indispensável em toda a trajetória, compartilhamos inúmeras noites de sono perdidas e enfrentamos juntas muitas lágrimas e também muitos sorrisos.

Sei que esta conquista não teria sido possível sem cada um de vocês. Muito obrigado por fazerem parte da minha jornada e por me ajudarem a alcançar este objetivo. Estou profundamente grato e honrado por tê-los em minha vida.

RESUMO

Este trabalho aborda a relação entre os fenômenos eletromagnéticos e eletromecânicos, destacando a influência crucial desses fenômenos na estabilidade dos sistemas de potência. Inicialmente, são explorados conceitos de estabilidade em sistemas dinâmicos, o controle desses sistemas e a classificação da dinâmica temporal de um sistema de potência. Ao discutir as potências ativa e reativa no contexto dos sistemas de potência, são apresentadas definições e seus impactos agregados nos sistemas elétricos. Em seguida, são abordados estudos específicos relacionados à estabilidade dos sistemas de potência, detalhando os fenômenos eletromagnéticos e a dinâmica eletromecânica para pequenos distúrbios. O trabalho analisa a correlação do ângulo de carga δ com o fluxo de potência em máquinas síncronas de pólos lisos e salientes. Além disso, são discutidos os impactos da inserção da geração distribuída, como energia eólica e fotovoltaica, na matriz elétrica brasileira. Por fim, são identificados e discutidos problemas iminentes na estabilidade do sistema de transmissão brasileiro, apontando para a necessidade de soluções preventivas diante das mudanças tecnológicas e do cenário energético em evolução.

Palavras chave: Estabilidade de Sistemas de Potência, Fenômenos Eletromagnéticos, Dinâmica Eletromecânica, Geração Distribuída, Transmissão de Energia.

ABSTRACT

This work explores the relationship between electromagnetic and electromechanical phenomena, emphasizing their crucial influence on power system stability. Initially, it explores stability concepts in dynamic systems, their control, and the temporal dynamics classification of a power system. In discussing active and reactive powers within power systems, definitions are presented along with their aggregate impacts. Subsequently, specific studies related to power system stability are addressed, detailing electromagnetic phenomena and electromechanical dynamics for small disturbances. The paper analyzes the correlation of the load angle δ with power flow in both smooth and salient pole synchronous machines. Additionally, it discusses the impacts of integrating distributed generation, such as wind and photovoltaic energy, into the Brazilian electrical matrix. Finally, imminent issues affecting the stability of the Brazilian transmission system are identified and discussed, emphasizing the need for preventive solutions amidst technological advancements and the evolving energy landscape.

Keywords: Power System Stability, Electromagnetic Phenomena, Electromechanical Dynamics, Distributed Generation, Energy Transmission.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distorções nos sinais elétricos	14
Figura 2 – Classificação dos sistemas elétricos de potência	15
Figura 3 – Controle	16
Figura 4 – Intervalo de tempo dos fenômenos dinâmicos básicos do sistema elétrico	18
Figura 5 – Composição dos Elementos de Inércia em um Sistema	24
Figura 6 – Impedância que interconecta duas tensões e seu diagrama fasorial . . .	26
Figura 7 – Diagrama de Fluxos e campos na máquina de pólos salientes	28
Figura 8 – Diagrama fasorial de um gerador síncrono de polos salientes	28
Figura 9 – Diagrama fasorial de um gerador síncrono mostrando as relações entre as tensões e correntes.	29
Figura 10 – Diagrama fasorial da equação	31
Figura 11 – Gráfico de conjugado versus ângulo de conjugado para um gerador síncrono de polos salientes	31
Figura 12 – Usina hidroelétrica de Itaipu.	32
Figura 13 – Turbina da máquina geradora de Itaipu	33
Figura 14 – Hidroelétrica de Três Marias em período de seca	33
Figura 15 – Parque eólico	35
Figura 16 – Complexo fotovoltaico	36

LISTA DE SÍMBOLOS

P :	Potência ativa.
Q :	Potência reativa.
S :	Potência aparente.
V :	Tensão.
I :	Corrente.
FP :	Fator de potência.
P_m :	Potência mecânica fornecida ao motor.
P_e :	Potência elétrica fornecida ao motor.
J :	Momento de inércia.
D :	Coefficiente de atrito no sistema.
δ_m :	Ângulo do rotor.
ω_m :	Velocidade angular do motor.
τ_m :	Torque motor ou torque eletromagnético aplicado ao sistema.
τ_{em} :	Torque eletromagnético de carga ou torque resistivo.
R :	Resistência.
X :	Reatância.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	ESTABILIDADE E CONTROLE DE UM SISTEMA DINÂMICO	13
2.1.1	Estabilidade em sistemas dinâmicos	13
2.1.2	Controle de sistemas dinâmicos	16
2.2	CLASSIFICAÇÃO DA DINÂMICA TEMPORAL DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA	18
2.3	AS POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA NO CONTEXTO DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA	19
2.3.1	Definições de Potência	19
3	ESTUDOS RELACIONADOS A ESTABILIDADE DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA	22
3.1	FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS E DINÂMICA ELETROMECHANICA PARA PEQUENOS DISTÚRBIOS	22
3.1.1	Equacionamento da Oscilação Mecânica	22
3.1.2	O ângulo de carga δ e sua correlação com o fluxo de potência para máquina síncrona de polos lisos	26
3.1.3	O ângulo de carga δ e sua correlação com o fluxo de potência para máquina síncrona de polos salientes	27
3.2	UMA MATRIZ ENERGÉTICA BASEADA EM MÁQUINAS DE POLOS SALIENTES	32
3.3	INSERÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA	34
3.3.1	Energia eólica	34
3.3.2	Energia fotovoltaica	36
3.4	PROBLEMAS IMINENTES NA ESTABILIDADE DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO	37
3.5	POTENCIALIDADE DE PROPAGAÇÃO DE PEQUENOS DISTURBIOS	39

4	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o cenário global de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica passa por uma evolução significativa com a implementação das chamadas *smartgrids*, que são redes elétricas inteligentes e mais eficientes.

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

A nível nacional, temos o Sistema Interligado Nacional (SIN), que possibilita a conexão entre os sistemas elétricos através da rede de transmissão. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o SIN integra os recursos de geração e transmissão, permitindo o fornecimento de energia ao mercado com segurança e eficiência ((ONS), 2023).

Contudo, na camada subsequente, que corresponde à distribuição de energia elétrica, cuja responsabilidade recai sobre as concessionárias, há problemas de concepção que não anteciparam o expressivo aumento das gerações distribuídas nos últimos anos. O IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) define Geração Distribuída como “As instalações geradoras de energia elétrica menores que as centrais geradoras e que permitem a interconexão em qualquer ponto do sistema elétrico e próximo ao consumidor.”. Esse cenário de crescimento da interconexão em qualquer ponto do sistema tem acarretado impactos negativos significativos e ainda desconhecidos nas redes de energia elétrica (DUGAN; MCDERMOTT, 2002).

A crescente demanda por uma matriz energética mais diversificada está fazendo com que o sistema elétrico brasileiro, feito tradicionalmente para operar com a geração centralizada, as quais têm como característica estarem localizadas distantes dos centros consumidores, siga para um caminho onde não há mais um modelo para o sistema, provocando uma operação às escuras.

Uma consequência decorrente do aumento das gerações distribuídas pode ter contribuído para o evento de falta de energia elétrica a nível nacional no dia 15 de agosto de 2023. Conforme informações da imprensa brasileira e fontes da mídia, as causas desse evento ainda não foram esclarecidas e estão associadas a uma possível falha no sistema de transmissão. Em consonância com o pronunciamento do ministro de Minas e Energia, Alexandre Silveira, o apagão ocorreu após uma sobrecarga no Ceará. O diretor-geral do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Luiz Carlos Ciochi, declarou que evidências indicam uma "variação

de frequência na rede elétrica do estado, mas que ainda não foi possível esclarecer a causa da queda de energia.

Muitos apagões importantes causados pela instabilidade do sistema de energia ilustraram a importância da estabilidade do sistema elétrico (FARMER; ALLEN, 2006). Neste apagão do dia 15 de agosto, a variação na frequência do sistema evidencia claramente que é necessária uma preocupação com o crescimento contínuo das interconexões da rede e a necessidade de revisar a definição e classificação da estabilidade do sistema de energia.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar a estabilidade do sistema elétrico tendo em vista os fenômenos eletromagnéticos e dinâmica eletromecânica para pequenos distúrbios, vinculado com a qualidade de energia elétrica entregue aos consumidores.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar a relação entre a inércia do sistema e a dinâmica eletromecânica para avaliar seu papel na estabilidade do sistema de potência.
- Avaliar os impactos da geração distribuída na matriz elétrica brasileira.
- Identificar problemas iminentes na estabilidade do sistema de transmissão brasileiro.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ESTABILIDADE E CONTROLE DE UM SISTEMA DINÂMICO

Na engenharia, um sistema é definido como um conjunto de componentes físicos que colaboram para alcançar um objetivo compartilhado. Um elemento crucial na análise de sistemas é o seu modelo matemático, o qual é construído utilizando a estrutura do sistema e as leis físicas que regem seus componentes (MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2008).

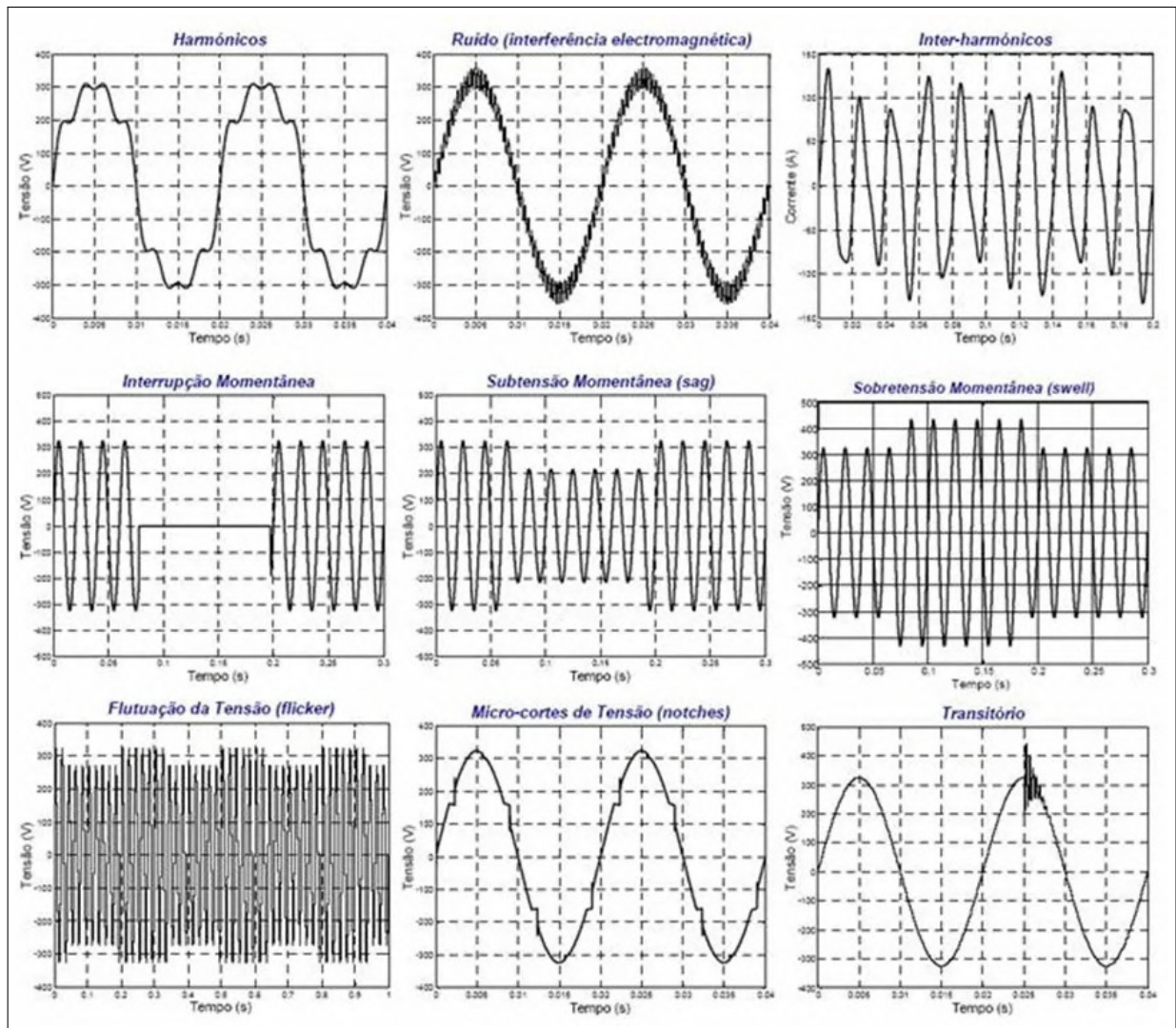
Existem sistemas específicos, como os conhecidos sistemas dinâmicos, amplamente empregados em diversas áreas para representar sistemas que evoluem ao longo do tempo. Esses sistemas podem ser matematicamente modelados e estudados para compreender como suas propriedades se transformam à medida que variáveis e condições iniciais são alteradas (RAISZ *et al.*, 2018). Essa abordagem é aplicada também a sistemas elétricos, envolvendo a análise de sinais e modelos de controle que se modificam ao longo do tempo.

Os sistemas elétricos de energia possuem estabilidade não linear e são semelhantes a estabilidade de qualquer sistema dinâmico genérico, tendo seu comportamento regido por modelos matemáticos fundamentais (MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2008).

2.1.1 Estabilidade em sistemas dinâmicos

Os sistemas não lineares podem ter mais de um ponto de equilíbrio como demonstram as equações não lineares representativas desse sistema, pois em geral, possuem mais de uma solução. A maior parte das cargas que compõem tal sistema também são não lineares e portanto, não obedecem à relação linear entre tensão e corrente; o que ocasiona distorções nas formas de onda das mesmas. Estas cargas são as grandes causadoras dos distúrbios relacionados a qualidade da energia elétrica, incluindo flutuações de tensão, distorções harmônicas, problemas de dimensionamento adequado nas componentes da rede elétrica, entre outros, como podem ser visualizados na Figura 1. Ou seja, um sistema elétrico de potência está sujeito a diversos níveis de distorção na qualidade de energia elétrica (DZHURAEV *et al.*, 2022).

Figura 1 – Distorções nos sinais elétricos

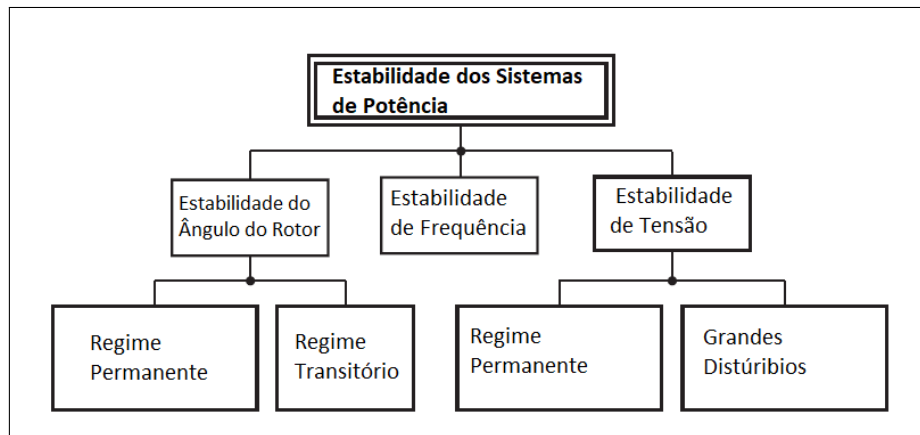


Fonte: **Martinho,2018.**

O conceito da qualidade de energia elétrica é um conceito bastante amplo, e está relacionada com qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica em um sistema elétrico de potência (DUGAN; MCGRANAGHAN; BEATY, 1996). Perturbações que afetam sistemas dinâmicos são modeladas por mudanças em seus coeficientes (parâmetros) ou por condições iniciais não nulas das equações diferenciais. As fontes renováveis, como a energia solar e a energia eólica, são fontes de energia não lineares. Isso ocorre porque os inversores eletrônicos utilizados para converter a energia gerada por essas fontes em corrente alternada são dispositivos não lineares.

Os estudos de estabilidade podem ser tratados a partir de três classes: estabilidade angular do rotor, estabilidade de frequência e estabilidade de tensão. Na Figura 2 apresenta-se a ramificação das três classificações.

Figura 2 – Classificação dos sistemas elétricos de potência



Fonte: IEEE/CIGRE

A seguir, apresenta-se uma breve descrição de cada classe mencionada na Figura 2 baseado nas definições de (KUNDUR, 1994), (MENDES, 2006) e (MARUJO, 2017).

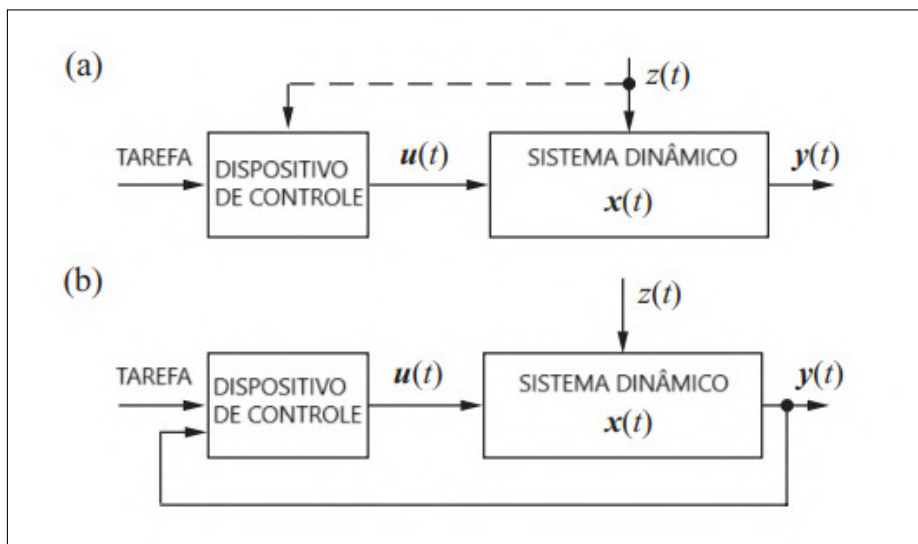
- **Estabilidade do Ângulo do Rotor:** Ela se refere à capacidade do sistema de energia de manter ou reestabelecer o equilíbrio entre o torque eletromagnético e o mecânico das máquinas síncronas, como geradores, motores e transformadores, em face de perturbações ou distúrbios. A estabilidade do ângulo do rotor é essencial para evitar a perda de sincronismo, distúrbios severos e, em última instância, blecautes.
- **Estabilidade da Frequência:** Se refere à capacidade do sistema de manter uma frequência constante após um distúrbio significativo que causa um desequilíbrio entre a carga e a geração, minimizando a perda não intencional de carga. A frequência do sistema não deve sofrer alterações e mesmo pequenas variações podem resultar no desligamento de unidades geradoras e/ou cargas.
- **Estabilidade da Tensão:** A estabilidade de tensão é essencial para a operação confiável do sistema, pois tensões inadequadas podem afetar o funcionamento dos equipamentos e dispositivos elétricos. O principal fator relacionado à instabilidade é a incapacidade do sistema em atender à demanda por potência reativa, o que resulta na queda da tensão nos pontos de conexão. Já a instabilidade causada pela elevação de tensão, embora menos comum, geralmente ocorre quando há um excesso de potência reativa no sistema elétrico. A dinâmica entre potência ativa e reativa é fundamental para a estabilidade do sistema elétrico. Para manter a estabilidade de tensão, os sistemas elétricos de potência empregam dispositivos de controle de tensão, como reguladores de tensão, capacitores, reatores e sistemas de controle de potência reativa.

2.1.2 Controle de sistemas dinâmicos

Para que se possa haver um controle no sistema, é necessária uma ação intencional que influencie um sistema dinâmico com o propósito de atingir um comportamento específico. Um sistema de controle no sistema elétrico pode ser projetado para mantê-lo em um estado de equilíbrio desejado, garantindo que ele não saia desse estado em resposta a perturbações externas ou variações nas condições de operação (BEVRANI, 2009).

Na Figura 3 temos a Ilustração da definição de: (a) controle em malha aberta; (b) controle em malha fechada. Onde, $u(t)$ - um sinal de controle que afeta o sistema para alcançar um comportamento desejado, $y(t)$ - um sinal de saída que serve para avaliar se o controle alcançou o objetivo desejado, $x(t)$ - variáveis de estado do sistema e $z(t)$ - perturbações.

Figura 3 – Controle



Fonte: Power Systems Dynamics

O controle de sistemas dinâmicos de potência elétrica em redes de transmissão é uma parte fundamental da operação confiável e eficiente desses sistemas. Aqui está uma descrição de algumas técnicas comuns de controle utilizadas em sistemas de potência elétrica de redes de transmissão, a partir da óptica de O'Hearn, (2006):

- **Controle de Tensão e Frequência:** O controle da tensão e frequência é uma das funções mais críticas em sistemas de transmissão de energia. É realizado por dispositivos automáticos chamados reguladores de tensão e geradores sincronizados. Eles monitoram a tensão e a frequência em tempo real e fazem ajustes para manter a operação dentro dos limites aceitáveis.

- **Controle de Fluxo de Potência:** O controle do fluxo de potência envolve o uso de dispositivos como transformadores de tap variável, reatores variáveis e dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission Systems) para direcionar a potência ativa e reativa ao longo das linhas de transmissão. Isso ajuda a evitar sobrecargas e melhorar a eficiência do sistema.
- **Controle de Ângulo de Fase:** O ângulo de fase entre geradores em sistemas de transmissão é crucial para garantir a estabilidade do sistema. Os controladores de ângulo de fase monitoram e ajustam o ângulo de fase entre geradores para evitar instabilidades e perturbações.
- **Controle de Rejeição de Distúrbios:** Para garantir a estabilidade do sistema, os sistemas de transmissão incorporam dispositivos de rejeição de distúrbios, como bancos de capacitores, supressores de surtos e disjuntores de alta velocidade. Esses dispositivos ajudam a minimizar o impacto de distúrbios no sistema.
- **Controle de Reserva de Potência:** Os operadores de sistemas de transmissão mantêm uma reserva de potência disponível para atender às demandas de carga imprevistas. Essa reserva de potência é liberada quando ocorrem variações na carga ou falhas em geradores.
- **Controle de Falhas e Proteção:** Sistemas de transmissão incluem relés de proteção e dispositivos de corte, como disjuntores, para isolar seções defeituosas da rede em caso de falhas, evitando assim a propagação de distúrbios.
- **Controle de Integração de Energia Renovável:** Com o aumento da integração de fontes de energia renovável, como a energia eólica e solar, os sistemas de transmissão também devem controlar a variabilidade dessas fontes para manter a estabilidade do sistema.
- **Controle de Qualidade de Energia:** O controle de qualidade de energia envolve a regulação da tensão, frequência e fator de potência para garantir que a energia entregue aos consumidores atenda aos padrões de qualidade estabelecidos.

Essas são apenas algumas das técnicas de controle utilizadas em sistemas de potência elétrica de redes de transmissão, em específico. O controle é uma parte essencial para manter a estabilidade, confiabilidade e eficiência da rede elétrica à medida que enfrentamos desafios crescentes, como a integração de fontes de energia renovável e o aumento da demanda por eletricidade (O'HEARN, 2006).

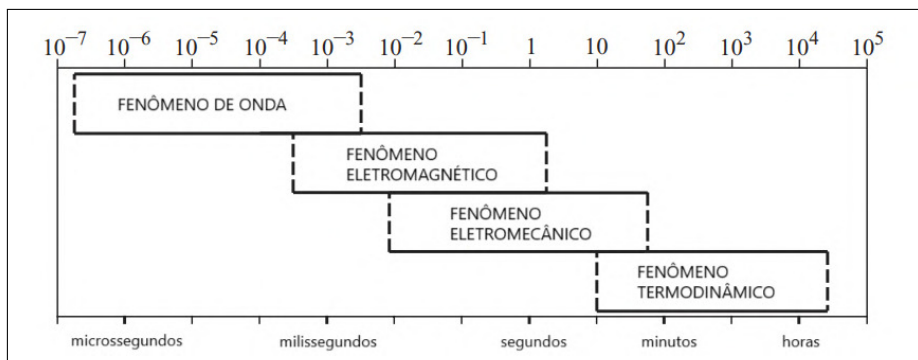
2.2 CLASSIFICAÇÃO DA DINÂMICA TEMPORAL DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA

Um sistema de energia elétrica é uma rede complexa que gera, transmite e distribui eletricidade por vastas áreas. As interações dinâmicas nesse sistema podem ser classificadas com base na causa, consequência, escala de tempo, caráter físico e local onde ocorrem. As principais preocupações são as respostas a mudanças na demanda de energia e perturbações. Mudanças na demanda causam dinâmicas em diferentes escalas de tempo, desde mudanças rápidas devido à transferência de energia entre geradores e cargas até dinâmicas lentas relacionadas à adaptação da geração às variações diárias da demanda.

Com base em seu caráter físico, as diferentes dinâmicas do sistema de energia elétrica podem ser divididas em quatro grupos definidos como: fenômeno de ondas, fenômenos eletromagnéticos, fenômenos eletromecânicos e fenômenos termodinâmicos, cada uma com diferentes escalas de tempo. A classificação está relacionada à localização no sistema, desde circuitos elétricos de transmissão até geradores. Isso ajuda a compreender e gerenciar a complexidade das interações no sistema de energia elétrica (MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2008).

A Figura 4 retrata em função do tempo a ordem de duração dos fenômenos de dinâmica temporal classificados anteriormente. A estabilidade do sistema de energia está principalmente relacionada a fenômenos eletromecânicos, e também é afetada por fenômenos eletromagnéticos rápidos e fenômenos termodinâmicos lentos.

Figura 4 – Intervalo de tempo dos fenômenos dinâmicos básicos do sistema elétrico



Fonte: Power Systems Dynamics

2.3 AS POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA NO CONTEXTO DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA

Antes de tratar efetivamente dos aspectos mais técnicos relacionados aos sistemas de potência, é essencial lembrar alguns conceitos fundamentais para o completo entendimento do trabalho em questão.

2.3.1 Definições de Potência

Esta breve revisão baseia-se no trabalho de Machowsky, Bialek e Bumby (2008), de forma focada na revisão proposta.

As potências ativa (P) e reativa (Q) são conceitos fundamentais no contexto de sistemas de potência e desempenham um papel crucial na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Essas grandezas representam a capacidade de um sistema de gerar, transmitir e consumir energia elétrica de maneira eficiente. A potência ativa (P) e a potência reativa (Q) são medidas em watts (W) e volt-ampères reativos (var), conforme o Sistema Internacional de Unidades.

A potência ativa (P) é a parte da potência elétrica que é efetivamente convertida em trabalho útil, como iluminação, aquecimento e movimento de motores elétricos. Ela é responsável por realizar o trabalho real no sistema e é representada pela equação:

$$P = VI \cdot \cos(\theta) \quad (2.1)$$

onde:

P é a potência ativa em watts (W),

V é a tensão em volts (V),

I é a corrente em amperes (A),

θ é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente.

A potência ativa é um componente essencial em sistemas de potência, pois é o que alimenta as cargas e realiza o trabalho necessário para manter as operações elétricas em funcionamento. Uma boa eficiência na conversão de energia ativa é fundamental para sistemas de distribuição de energia elétrica.

Por outro lado, a potência reativa (Q) é uma quantidade de energia que oscila continuamente entre a fonte de alimentação e a carga sem realizar trabalho útil. Essa potência é necessária para manter a tensão estável e superar as perdas no sistema. A potência reativa é representada pela equação:

$$Q = VI \cdot \sin(\theta) \quad (2.2)$$

onde:

Q é a potência reativa em volt-ampères reativos (VAR),

V é a tensão em volts (V),

I é a corrente em amperes (A),

θ é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente.

O termo $\sin(\theta)$ na equação da potência reativa indica que a potência reativa é proporcional ao seno do ângulo de defasagem entre tensão e corrente. Quando a tensão e a corrente estão em fase (ângulo de defasagem igual a zero), não há potência reativa; no entanto, quando há um deslocamento entre tensão e corrente (ângulo de defasagem diferente de zero), ocorre potência reativa.

A potência reativa é importante para manter a estabilidade do sistema elétrico, uma vez que ajuda a regular a tensão e a corrente nas linhas de transmissão e a minimizar as perdas. No entanto, o excesso de potência reativa pode sobrecarregar as linhas de transmissão e componentes do sistema.

Para avaliar o equilíbrio entre potência ativa e reativa em um sistema de potência, é comum utilizar o fator de potência (FP), que é definido como a razão entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S), onde S é a magnitude da potência complexa ($S = VI^*$):

$$FP = \frac{P}{|S|} \quad (2.3)$$

Ter um fator de potência próximo de 1 (ou 100%) é ideal, pois indica que a maior parte da potência está sendo convertida em trabalho útil. No entanto, em sistemas de potência reais, é comum encontrar fatores de potência abaixo de 1 devido à presença de cargas indutivas, como motores e transformadores.

Para melhorar o fator de potência e reduzir as perdas associadas à potência reativa, os compensadores de potência reativa, como os bancos de capacitores, são frequentemente utilizados em sistemas de distribuição. Esses dispositivos geram potência reativa capacitiva para equilibrar a potência reativa indutiva de cargas, melhorando assim a eficiência geral do sistema. Além disso, também podem ser utilizados motores síncronos operando em modos sobreexcitados ou subexcitados.

Em resumo, as potências ativa e reativa são componentes vitais em sistemas de potência, desempenhando papéis distintos na realização de trabalho e na manutenção da estabilidade do sistema elétrico. O equilíbrio entre essas potências é essencial para garantir o funcionamento eficiente do sistema e minimizar as perdas.

3 ESTUDOS RELACIONADOS A ESTABILIDADE DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

A estabilidade dos sistemas de potência é um tema fundamental no âmbito da engenharia elétrica. Neste capítulo, serão abordados os fenômenos eletromagnéticos e a dinâmica eletromecânica para pequenos distúrbios, bem como a formulação das oscilações mecânicas e a correlação do ângulo de carga δ com o fluxo de potência para as máquinas síncronas. Especificamente, focaremos no entendimento desses componentes, fundamentais para a compreensão da conexão entre fenômenos eletromagnéticos, dinâmica eletromecânica e a estabilidade global dos sistemas elétricos.

3.1 FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS E DINÂMICA ELETROMECAÂNICA PARA PEQUENOS DISTÚRBIOS

No sistema elétrico de potência, máquinas elétricas, como geradores e motores, desempenham um papel fundamental na conversão de energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Na seção 2.2 há uma análise de como os diferentes tipos de dinâmicas dos sistemas de energia podem ser categorizados de acordo com sua escala de tempo. Dessa forma, também podemos identificar as dinâmicas mais rápidas como sendo aquelas associadas às interações eletromagnéticas que ocorrem dentro do gerador imediatamente após o aparecimento de um distúrbio no sistema. Essas dinâmicas levam à geração de altas correntes e torques dentro do gerador e normalmente têm uma escala de tempo de vários milissegundos. Durante esse período, a inércia da turbina e do gerador é suficiente para impedir qualquer mudança significativa na velocidade do rotor, de modo que a velocidade do rotor pode ser considerada constante (MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2008). Considerando este ponto propõe-se uma análise mais aprofundada das características inerciais e de movimento para uma melhor visualização dos efeitos elétricos para a estabilidade dos sistemas de potência.

3.1.1 Equacionamento da Oscilação Mecânica

A inércia é uma propriedade física que mede a resistência de um corpo a mudanças em sua velocidade angular. Em sistemas elétricos de potência, a inércia é uma propriedade importante das máquinas rotativas, como turbinas, geradores e motores. A estabilidade de um sistema elétrico de potência é a capacidade de manter a frequência e a tensão dentro de limites aceitáveis, mesmo em caso de perturbações. A inércia desempenha um papel importante na

estabilidade do sistema, pois ajuda a mitigar as perturbações. Quando ocorre uma perturbação no sistema, como a perda de uma fonte de energia, a inércia das máquinas rotativas ajuda a manter a frequência e a tensão do sistema. Isso ocorre porque a inércia das máquinas rotativas tende a manter a velocidade angular das máquinas constante. Quanto maior a inércia das máquinas rotativas, maior será a capacidade do sistema de resistir às perturbações. Portanto, a inércia é uma medida importante da estabilidade de um sistema elétrico de potência. A equação de movimento rotacional em sistemas elétricos de potência pode ser expressa da seguinte forma:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m = \tau_m - \tau_{em} \quad (3.1)$$

Onde:

- J é o momento de inércia das máquinas rotativas
- ω é a velocidade angular das máquinas rotativas
- B é o coeficiente de atrito viscoso
- T_m é o torque mecânico
- T_e é o torque eletromecânico

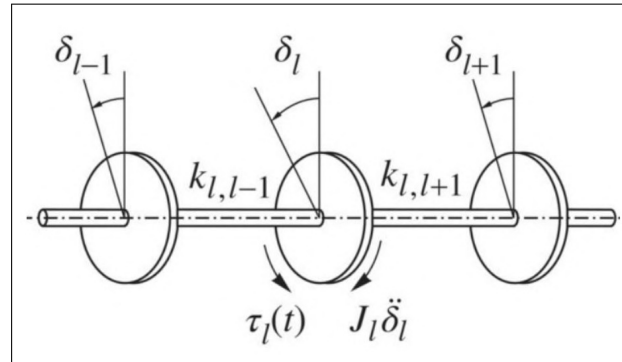
A equação de movimento é interpretada da seguinte forma:

1. O momento de inércia das máquinas rotativas tende a manter a velocidade angular das máquinas constante. O atrito viscoso tende a reduzir a velocidade angular das máquinas. O torque mecânico tende a aumentar a velocidade angular das máquinas. O torque eletromecânico tende a reduzir a velocidade angular das máquinas. O equilíbrio entre essas forças determina a velocidade angular das máquinas rotativas.
2. Outro aspecto relevante na análise é que o efeito do déficit de inércia é uma medida da diferença entre a inércia de um sistema elétrico de potência e a inércia necessária para garantir a estabilidade do sistema. O déficit de inércia pode ser causado pela substituição de geradores síncronos por geradores de energia renovável, que geralmente têm menor inércia. O déficit de inércia pode levar a uma redução da estabilidade do sistema elétrico de potência. Isso ocorre porque o sistema será mais suscetível a perturbações, como a perda de uma fonte de energia.
3. A inércia é uma propriedade importante das máquinas rotativas em sistemas elétricos de potência. A inércia ajuda a mitigar as perturbações e a manter a estabilidade do sistema. O déficit de inércia pode levar a uma redução da estabilidade do sistema elétrico de potência. Portanto, é importante monitorar a inércia do sistema e tomar medidas para garantir que

ela seja suficiente para garantir a estabilidade do sistema.

Considerando os pontos expostos, a Figura 5 contextualiza de forma mais prática os conceitos abordados.

Figura 5 – Composição dos Elementos de Inércia em um Sistema



Fonte: (MACHOWSKI; BIALEK; BUMBY, 2008)

Na equação (3.2), o ω_{sm} representa a velocidade mecânica síncrona das máquinas síncronas. Evidenciando que essas máquinas são elementos fundamentais na geração inercial e produzem uma tensão intimamente ligada ao movimento de rotação do seu rotor.

$$\tau_m = \tau_{em} + D_a \omega_{sm} \quad (3.2)$$

Da equação (3.2), isolando o torque eletromecânico obtemos a equação (3.3), onde podemos ver claramente que o torque eletromecânico é inferior ao torque mecânico.

$$\tau_m - D_a \omega_{sm} = \tau_{em} \quad (3.3)$$

O comportamento mecânico de um gerador síncrono é determinado pela sua velocidade de rotação e pelo torque aplicado ao seu eixo. A velocidade de rotação do gerador é geralmente controlada pela velocidade da turbina a qual ele está acoplado. O torque aplicado ao eixo do gerador é gerado pela corrente elétrica que flui em seus enrolamentos. De forma complementar, o comportamento elétrico de um gerador síncrono, por sua vez, é determinado pela tensão induzida em seus enrolamentos e pela corrente elétrica que flui nesses enrolamentos. A tensão induzida nos enrolamentos do gerador é proporcional à velocidade de rotação do gerador e ao fluxo magnético que atravessa esses enrolamentos. A corrente elétrica que flui nos enrolamentos do gerador é proporcional à tensão induzida nesses enrolamentos e à resistência

elétrica dos enrolamentos. A equação que relaciona o comportamento mecânico e elétrico de geradores síncronos é a equação (3.4):

$$\omega_m = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (3.4)$$

Na equação (3.4), sob o olhar de máquinas elétricas, o ângulo rotacional físico do do rotor tem como referência algum eixo magnético de algumas das bobinas do estator, relação conhecida como ângulo δ . Em máquinas síncronas, essa varável é diretamente vinculada com o angulo de carga, tão vinculado que chega a ponto de uma quase igualdade. Logo, o δ_m , trás as pequenas variações angulares diretamente vinculadas ao comportamento elétrico.

O comportamento mecânico, face a pequenas variações de carga, tem suas relações contextualizadas na equação (3.4), a velocidade angular mecanica é igual a velocidade angular sincrona mecanica mais quaisquer variação de angulo de carga que possam existir quando isso acontece. Ao substituírmos a equação (3.4) na equação (3.1), obtemos a equação (3.5), a qual indica o desenvolvimento da dinamica mecânica da maquina, fazendo o prelúdio da relação em função do ângulo de carga.

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} + D \frac{d\delta_m}{dt} = \tau'_m - \tau_{em} \quad (3.5)$$

A partir da equação (3.5), podemos observar que o angulo de carga começa a afetar mecanimante o sistema. Esta equação descreve um sistema que opera com base no torque, dessa forma, podemos multiplica-la pela velocidade angular mecânica, resultando na potência ativa do sistema. Então chegamos a equação (3.6)

$$J \omega_{sm} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} + D \omega_{sm} \frac{d\delta_m}{dt} = P_m - P_{em} \quad (3.6)$$

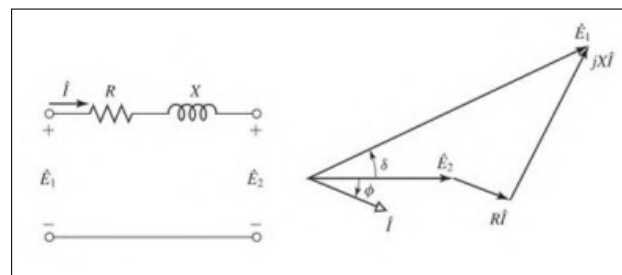
- $J \omega_{sm} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2}$ representa a componente inercial do sistema, envolvendo o momento de inércia (J) multiplicado pela velocidade angular (ω_{sm}) e a segunda derivada temporal do deslocamento angular ($\frac{d^2 \delta_m}{dt^2}$).
- $D \omega_{sm} \frac{d\delta_m}{dt}$ é a componente de amortecimento, onde D é o coeficiente de amortecimento, ω_{sm} é a velocidade angular e $\frac{d\delta_m}{dt}$ é a primeira derivada temporal do deslocamento angular.
- P_m é a potência mecânica fornecida ao sistema.
- P_{em} é a potência eletromecânica retirada do sistema.

Essa equação é uma representação da dinâmica rotacional do sistema eletromecânico, considerando as forças inerciais, de amortecimento, da potência mecânica fornecida ao sistema e da potência eletromecânica retirada do sistema. Com isso, chegamos a conclusão que o princípio de conversão eletromecânica de energia foi atingido na equação 3.6, onde existe um equivalente mecânico associado a um ângulo de carga, o que resulta na geração de uma potência eletromecânica dentro do sistema.

3.1.2 O ângulo de carga δ e sua correlação com o fluxo de potência para máquina síncrona de polos lisos

Nesta seção, abordaremos a correlação entre o ângulo de carga δ e fluxo de potência para máquina síncrona de rotor cilíndrico, considerando um sistema externo representado por uma impedância em série com uma fonte de tensão, como ilustrado na Figura 6. Tanto o sistema externo quanto a máquina são modelados como impedâncias em série com fontes de tensão.

Figura 6 – Impedância que interconecta duas tensões e seu diagrama fasorial



Fonte: (FITZGERALD; JR; UMANS, 2014)

A análise dos limites de potência se torna um caso especial do problema mais amplo de restringir o fluxo de potência em uma impedância em série. Esta impedância é formada pela impedância síncrona da máquina síncrona e pela impedância equivalente do sistema externo, que pode incluir linhas de transmissão, bancos de transformadores e outras máquinas síncronas adicionais.

Consideramos este circuito simples com duas tensões CA (E_1) e (E_2) conectadas por uma impedância ($Z = R + jX$), onde a corrente é representada por \hat{I} . O diagrama fasorial da Figura 6 mostra a tensão E_2 como referência, considerando ângulos positivos no sentido anti-horário. Na figura, observamos que o ângulo de fase δ é positivo, enquanto o ângulo de fase ϕ da corrente é negativo e o fasor da corrente é dado por:

$$I = \frac{E_1 e^{j\delta} - E_2}{R + jX} \quad (3.7)$$

Da representação de Euler para $e^{j\delta}$, obtemos:

$$I = \frac{E_1(\cos\delta + j\text{sen}\delta) - E_2}{R + jX} \quad (3.8)$$

Ao considerar a potência complexa derivada dos terminais E_2 , notamos que, em um sistema monofásico, essa potência complexa é resultante do produto da tensão pelo conjugado da parte complexa da equação. Dessa forma, a parte real dessa potência complexa representa a potência ativa, enquanto a parte imaginária pode denotar a potência reativa.

Se aplicarmos o conceito de potência complexa para a fonte E_2 , temos:

$$S_2 = E_2 I^* = P + jQ \quad (3.9)$$

Como o objetivo é verificar o fluxo da potência útil, extraímos a parte real da equação (3.9), de modo a obter a equação (3.10).

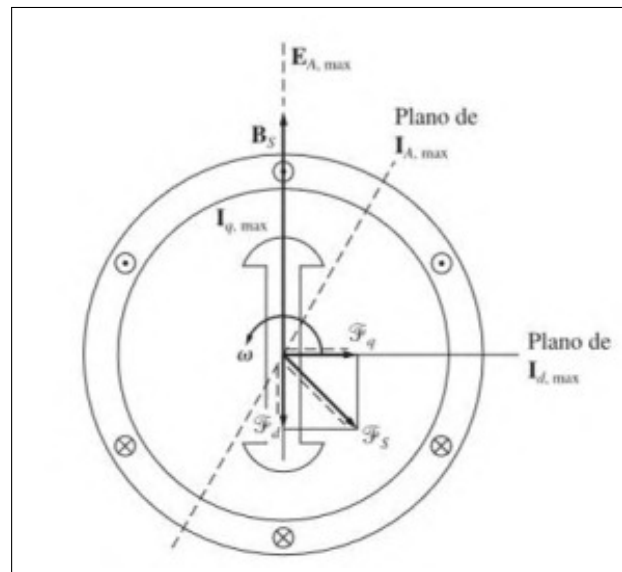
$$P_2 = \frac{E_1 E_2}{X} \text{sen}\delta \quad (3.10)$$

Vale ressaltar que em (3.10) desconsideramos a resistência devido ao fato de a mesma ser pequena se comparada a reatância.

3.1.3 O ângulo de carga δ e sua correlação com o fluxo de potência para máquina síncrona de polos salientes

Nos motores de polos salientes, a aproximação da constância da reatância síncrona ao longo do entreferro não é possível como nos motores de pólos lisos. Isso se deve ao fato de que a relutância ao longo do eixo direto, alinhado com o fluxo principal do campo magnético, difere da relutância ao longo do eixo em quadratura, que está deslocado 90 graus em relação ao eixo principal, como pode ser visto na Figura 7. A variação da relutância entre os eixos impede a simplificação da reatância síncrona como sendo constante em todas as direções, exigindo uma análise mais detalhada e precisa para caracterizar o comportamento magnético dessas máquinas.

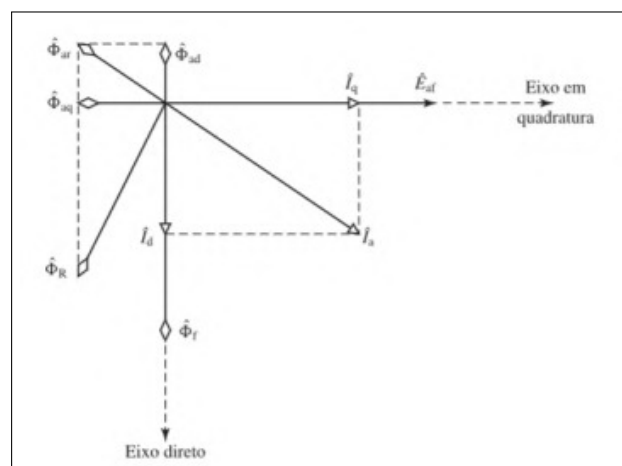
Figura 7 – Diagrama de Fluxos e campos na máquina de pólos salientes



Fonte: (FITZGERALD; JR; UMANS, 2014)

Em máquinas síncronas de polos salientes, o fluxo magnético de trabalho é gerado pelos enrolamentos do rotor. Esses enrolamentos são projetados para gerar um fluxo magnético de maior intensidade no eixo perpendicular às faces polares, chamado de eixo direto. O eixo em quadratura, que corresponde à região entre os polos, apresenta uma relutância maior e, portanto, um fluxo magnético de menor intensidade. Convém explicar que essa convenção de eixo se dá pelo fato de o fluxo magnético principal ser produzido pelo enrolamento rotórico com intensidade máxima na face polar, ver Figura 8 para mais detalhes.

Figura 8 – Diagrama fasorial de um gerador síncrono de polos salientes



Fonte: (FITZGERALD; JR; UMANS, 2014)

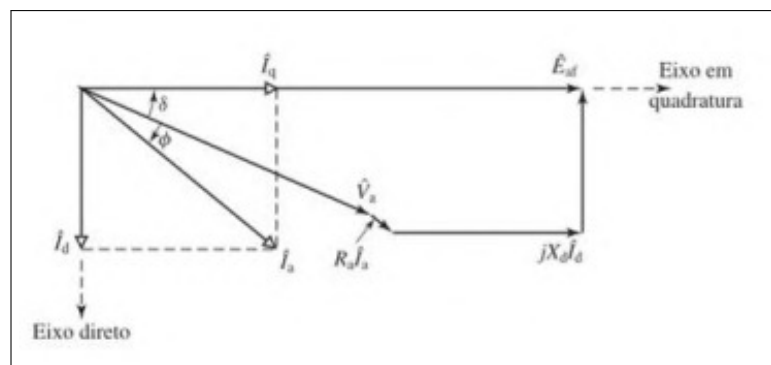
A reatância síncrona é uma medida da oposição que um circuito apresenta à passagem da corrente alternada. Ela é diretamente proporcional ao número de espiras do circuito e

inversamente proporcional à relutância do circuito. Como a reatância síncrona de eixo direto é maior que a reatância síncrona de eixo de quadratura, o ângulo de carga é sempre positivo.

Como mostrado no diagrama fasorial do gerador da Figura 9, a tensão gerada \widehat{E}_{af} é igual à soma fasorial da tensão de terminal \widehat{V}_t mais a queda de tensão na resistência de armadura $I_a R_a$ e as quedas de reatância síncrona $j\widehat{I}_d X_d + j\widehat{I}_q X_q$. Com isso, é possível chegar a equação 3.11

$$\widehat{E}_{af} = \widehat{V}_a + R_a \widehat{I}_a + jX_d \widehat{I}_d + jX_q \widehat{I}_q \quad (3.11)$$

Figura 9 – Diagrama fasorial de um gerador síncrono mostrando as relações entre as tensões e correntes.



Fonte: (FITZGERALD; JR; UMANS, 2014)

O ângulo de carga tem uma influência direta no fluxo de potência. À medida que o ângulo de carga aumenta, o fluxo de potência diminui. Isso ocorre porque o campo magnético do estator se afasta do fluxo de potência. Uma diminuição no fluxo de potência pode levar a uma redução na tensão do estator e, conseqüentemente, na potência elétrica gerada. Do diagrama fasorial da Figura 9, \widehat{V}_a e \widehat{I}_a podem ser escritos em termos dos valores de suas componentes dos eixos e do ângulo de potência δ como:

$$\widehat{V}_a = \widehat{V}_d + \widehat{V}_q = -jV_d e^{j\delta} + V_q e^{j\delta} \quad (3.12)$$

$$\widehat{I}_a = \widehat{I}_d + \widehat{I}_q = -jI_d e^{j\delta} + I_q e^{j\delta} \quad (3.13)$$

Dessa forma, temos que:

$$P = \text{Re}[-jV_d e^{j\delta} + V_d e^{j\delta}](jI_d e^{-j\delta} + I_d e^{-j\delta}) = V_0 I_0 + V_0 I_0 \quad (3.14)$$

Também do diagrama fasorial da Figura 9, temos que:

$$V_d = V_a \text{sen } \delta \quad (3.15)$$

$$V_a = V_a \text{cos } \delta \quad (3.16)$$

$$I_d = \frac{E_{af} - V_q}{X_d} \quad (3.17)$$

$$I_q = \frac{V_d}{X_q} \quad (3.18)$$

Considerando as equações de torque e potência de saída de um gerador síncrono de rotor cilíndrico, como função do ângulo de conjugado, a equação 3.19 dada em Fitzgerald et al. (2014) no livro 'Máquinas Elétricas' pode ser considerada:

$$P = 3 V_\phi I_d \text{cos}(90^\circ - \delta) + 3 V_\phi I_q \text{cos } \delta \quad (3.19)$$

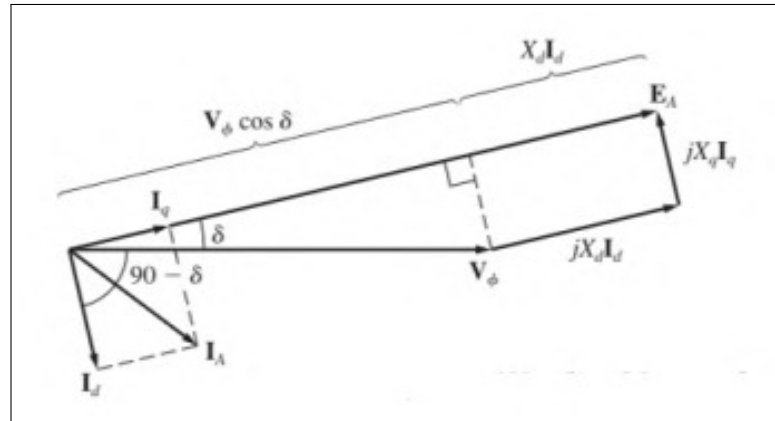
Nessa equação, assumiu-se que a resistência de armadura era desprezível. Seguindo esta mesma suposição, para descobrir a potência de saída de um gerador de polos salientes em função do ângulo conjugado é a soma da potência devido á corrente de eixo direto mais a potência devido á corrente de eixo em quadratura, como pode ser visto fasorialmente na Figura 10.

$$P = \frac{3E_{af}V_a}{X_d} \text{sen } \delta + \frac{3V_a^2(X_d - X_q)}{2X_d X_q} \text{sen } 2\delta \quad (3.20)$$

$$P = 3 V_\phi I_d \text{cos}(90^\circ - \delta) + 3 V_\phi I_q \text{cos } \delta \quad (3.21)$$

O conjugado induzido de um gerador de polos salientes em função do ângulo de conjugado δ pode ser visto na Figura 11, onde a expressão do conjugado é dada por:

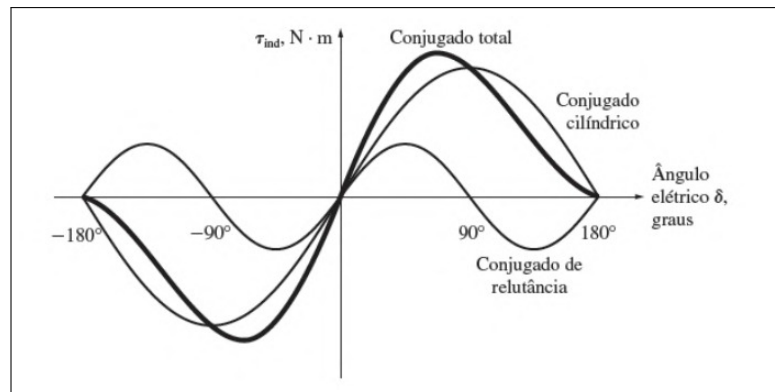
Figura 10 – Diagrama fasorial da equação



Fonte: (FITZGERALD; JR; UMANS, 2014)

$$\tau_e = \frac{P}{\omega_m} = \frac{\frac{3E_{af}V_a}{X_d} \sin \delta + \frac{3V_a^2(X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin 2\delta}{\omega_m} \quad (3.22)$$

Figura 11 – Gráfico de conjugado versus ângulo de conjugado para um gerador síncrono de polos salientes



Fonte: (FITZGERALD; JR; UMANS, 2014)

A potência mecânica é o produto do torque pela velocidade mecânica. Observa-se que o torque mecânico é influenciado por um ângulo de carga, e este ângulo também afeta a tensão gerada. Conseqüentemente, essa influência no desempenho elétrico da máquina estabelece uma relação direta entre os aspectos mecânicos e elétricos.

3.2 UMA MATRIZ ENERGÉTICA BASEADA EM MÁQUINAS DE POLOS SALIENTES

A matriz elétrica brasileira é reconhecida por sua extensa dependência de fontes hidrelétricas, e os geradores síncronos de polos salientes desempenham um papel crucial nesse cenário. Esses geradores são amplamente utilizados em hidrelétricas brasileiras devido às suas características específicas que se alinham perfeitamente com as condições operacionais dessas instalações. As hidroelétricas no Brasil são uma fonte significativa de geração de energia, aproveitando a vasta rede fluvial do país. (AVILA; FARIA, 2020)

Figura 12 – Usina hidroelétrica de Itaipu.



Fonte: Itaipu Binacional

A escolha pelos geradores síncronos de polos salientes nesses locais é resultado de uma combinação de fatores técnicos e econômicos. Em primeiro lugar, a natureza constante e previsível do fluxo de água em rios permite que esses geradores operem de maneira eficiente a uma velocidade constante, otimizando a produção de energia. A rotação constante é ideal para os geradores síncronos de polos salientes, que funcionam de maneira mais eficaz quando a velocidade de rotação é mantida estável. A robustez desses geradores é fundamental para lidar com as condições desafiadoras encontradas em ambientes hidrelétricos. As variações de carga frequentes, causadas por mudanças na demanda de energia, podem criar transientes e picos de carga. Os geradores síncronos de polos salientes são projetados para lidar com essas flutuações, garantindo uma operação estável e confiável. Sua capacidade de suportar transientes torna-os particularmente adequados para lidar com as complexidades da matriz elétrica brasileira, que enfrenta desafios variados devido à diversidade geográfica e climática do país. Além disso, a eficiência desses geradores contribui para a viabilidade econômica das hidrelétricas brasileiras.

Figura 13 – Turbina da máquina geradora de Itaipu



Fonte: Itaipu Binacional

A energia hidrelétrica é considerada uma fonte relativamente econômica de geração de eletricidade, e os geradores síncronos de polos salientes desempenham um papel crucial nessa equação. Sua eficiência energética, combinada com a capacidade de operar em condições adversas, torna-os uma escolha sensata para as empresas de energia que buscam otimizar os custos de produção. No entanto, apesar dos benefícios desses geradores, a dependência excessiva de hidrelétricas também apresenta desafios, como a seca, conforme pode se visto na Figura 14.

Figura 14 – Hidroelétrica de Três Marias em período de seca



Fonte: Jornal Estado de Minas

A variabilidade climática, e as mudanças nos padrões de chuva podem afetar a disponibilidade de água, impactando diretamente a capacidade de geração de energia. Além disso o impacto ambiental das áreas alagadas para construção das hidroelétricas é quase sempre brutal, e muda a dinâmica ambiental de toda uma região. Esse é um aspecto crítico que requer

uma abordagem equilibrada na matriz elétrica, incluindo a diversificação das fontes de energia para garantir a segurança e a estabilidade do fornecimento de eletricidade. Tendo em vista os pontos elencados, e a crescente busca por novas formas de energia de menor impacto ambiental, a geração distribuída eólica e fotovoltaica tem ganhando bastante forma no cenário nacional.

3.3 INSERÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

A crescente inserção da geração distribuída na matriz elétrica brasileira representa uma mudança significativa no paradigma tradicional de geração de energia. A geração distribuída refere-se à produção descentralizada de eletricidade, muitas vezes integrada a uma rede local, e está ganhando destaque no Brasil devido a uma combinação de fatores econômicos, tecnológicos e ambientais.

Uma das principais razões para o aumento da geração distribuída no Brasil é a redução dos custos associados às tecnologias solares e eólicas. Com avanços tecnológicos e ganhos de escala na produção de equipamentos, os custos de instalação de sistemas de energia solar e eólica diminuíram consideravelmente. Isso tornou essas fontes de energia mais acessíveis para consumidores residenciais, comerciais e industriais, incentivando a adoção de sistemas de geração distribuída em larga escala.

O marco regulatório brasileiro também desempenhou um papel crucial na expansão da geração distribuída. A Resolução Normativa 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu as regras para a micro e minigeração distribuída no país. Essa resolução permitiu que consumidores produzissem sua própria energia e, caso houvesse excedente, pudessem injetá-la na rede elétrica utilizando inversores eletrônicos de potência, recebendo créditos para serem utilizados em momentos de menor geração local. No entanto, desafios persistem, incluindo a necessidade de desenvolver infraestrutura de transmissão eficiente para integrar completamente as unidades de geração distribuída à rede nacional. Além disso, questões ambientais e sociais associadas à implementação demandam uma abordagem equilibrada para garantir benefícios econômicos sem comprometer ecossistemas locais ou comunidades.

3.3.1 Energia eólica

A energia eólica no Brasil emergiu como uma fonte importante e crescente de geração de eletricidade, desempenhando um papel significativo na diversificação da matriz energética do país. O Brasil, com vastas extensões de terras e uma extensa linha costeira, apresenta condições

geográficas favoráveis para a expansão da energia eólica. Os parques eólicos brasileiros são predominantemente localizados em regiões litorâneas e em áreas de relevo propício, como as serras nordestinas. Essas regiões são caracterizadas por ventos consistentes e fortes, fatores essenciais para o bom desempenho das turbinas eólicas. O Nordeste, em particular, tornou-se um polo importante para a geração eólica no Brasil, contribuindo significativamente para a capacidade instalada do país. A trajetória positiva da energia eólica no Brasil é atribuída a políticas governamentais favoráveis e leilões específicos para a contratação de projetos eólicos. Além disso, a entrada de investimentos privados e o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes contribuíram para a redução dos custos de produção, tornando a energia eólica uma opção economicamente viável.

Figura 15 – Parque eólico



Fonte: ANEEL

Nas usinas eólicas, as máquinas síncronas são geralmente usados para gerar energia elétrica a partir da velocidade do vento. A velocidade do vento varia constantemente, portanto, as máquinas das usinas eólicas precisam ser capazes de operar em uma ampla faixa de velocidades moderadamente baixas. Os geradores síncronos de polos salientes, utilizados neste tipo de geração, são mais eficientes em baixas velocidades, o que é importante para as usinas eólicas, pois a velocidade do vento é geralmente mais baixa em condições calmas, e em condições de velocidades mais rápidas, o eixo normalmente é travado por segurança. Em operação normal, a energia mecânica da rotação chega ao gerador, no qual dois ímãs criam o processo de indução eletromagnética para produzir eletricidade em corrente elétrica alternada. Existem também geradores que produzem eletricidade em corrente contínua. Nesse caso, a turbina eólica deve conter um inversor para adaptá-la em corrente alternada, tipo utilizado na rede elétrica e pelos aparelhos eletrônicos.

3.3.2 Energia fotovoltaica

A radiação solar no Brasil é abundante ao longo do ano, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, onde a incidência é mais intensa. Essa característica geográfica favorece a implantação de projetos de geração de energia solar em larga escala, tanto em áreas urbanas quanto em locais remotos. A crescente eficiência dos painéis solares e a redução dos custos de instalação têm tornado a energia solar mais acessível e competitiva, impulsionando sua adoção por empresas e consumidores residenciais. Além dos benefícios ambientais, a energia solar também contribui para a segurança energética do país, reduzindo a dependência de fontes fósseis e minimizando os impactos das variações nos preços do petróleo no mercado internacional.

O governo brasileiro tem desempenhado um papel crucial no fomento à energia solar, implementando políticas e incentivos que visam estimular o investimento nesse setor. Programas de financiamento, leilões de energia e a criação de linhas de crédito específicas têm contribuído para o crescimento do mercado solar no Brasil. A regulamentação favorável e a simplificação dos processos de licenciamento também têm facilitado a expansão de parques solares e instalações de geração distribuída.

Figura 16 – Complexo fotovoltaico



Fonte: ANEEL

O sistema de energia solar, para fins de simplificação, é composto por dois componentes principais:

- Painéis solares: os painéis solares convertem a luz do sol em energia elétrica.
- Inversor: o inversor converte a energia elétrica gerada pelos painéis solares em corrente alternada (CA), que é a forma de eletricidade utilizada na rede elétrica.

O inversor é um componente essencial do sistema de energia solar, pois é responsável

por converter a energia elétrica gerada pelos painéis solares em corrente alternada (CA). Porém a inserção de inversores eletrônicos em quantidade que a geração distribuída fotovoltaica está trazendo pode impactar a estabilidade do sistema de potência de várias maneiras.

3.4 PROBLEMAS IMINENTES NA ESTABILIDADE DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO BRASILEIRO

A interferência na rede elétrica com a massiva integração de inversores eletrônicos pode causar problemas de qualidade da energia graves, como flutuações de tensão e a tão temida variação de frequência. Isso pode prejudicar o desempenho de equipamentos elétricos, causar desconforto aos consumidores e principalmente trazer maior ocorrência de apagões. Outro ponto que merece atenção é a grande variabilidade da geração solar e eólica, que podem também aumentar o risco de falhas de perda de sincronismo, pois os inversores eletrônicos podem interromper e/ou repassar a variabilidade de geração de energia de forma instantânea para as linhas de transmissão, dada a ausência dos efeitos inerciais considerados nos geradores das hidroelétricas. Este é um ponto de grande discussão, pois o SIN - Sistema Interligado Nacional não foi projetado para lidar com estas características que as gerações de energia baseadas em inversores eletrônicos trazem, de modo que o crescimento exponencial destas está em um ritmo muito mais acelerado do que as modificações de segurança recomendadas são executadas no sistema de transmissão e distribuição brasileiro.

Um claro exemplo desta problemática, se deu no dia 15 de Agosto de 2023, que segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e o Ministério de Minas e Energia (MME), uma falha aconteceu no Sistema Interligado Nacional às 08h31 da manhã causando um apagão, afetando toda a estrutura elétrica do Brasil. A causa do incidente, após aferição, foi liberada em formato de relatório pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico intitulado como "ANÁLISE DA PERTURBAÇÃO DO DIA 15/08/2023 ÀS 08H30MIN", de forma bastante descritiva em todas as suas 572 páginas. Para enfoque na questão abordada por este trabalho, evidenciam-se os 5 aspectos iniciais das conclusões do relatório discriminados abaixo:

1. A perturbação teve início com a abertura da LT 500 kV Quixadá - Fortaleza II, que foi provocada pela atuação acidental da proteção de fechamento sob falta (Switch Onto Fault - SOTF) durante operação normal da linha. Também foi observada a atuação incorreta do seu esquema de religamento automático.
2. A abertura da LT 500 kV Quixadá - Fortaleza II provocou uma redistribuição do fluxo de

potência no Subsistema Nordeste, tendo como consequência um afundamento de tensão no tronco de 230 kV da região do Ceará e em algumas subestações de 500 kV, principalmente em Boa Esperança, Buritirama, Queimada Nova 2, Açú III e Campo Grande III.

3. Esta condição operativa resultou na abertura da LT 500 kV Presidente Dutra – Boa Esperança pela atuação da proteção de perda de sincronismo (PPS), que comanda também a abertura da LT 500 kV Presidente Dutra – Teresina II C1 e C2 e da LT 500 kV Presidente Dutra – Imperatriz C2.
4. O afundamento de tensão e o aumento do fluxo de potência reativa nas linhas de transmissão do tronco de 230 kV, entre as subestações de Aquiraz e Milagres, provocou atuações de proteções de distância, desligando linhas de transmissão nesse tronco.
5. Em paralelo aos acontecimentos da referida região de 230 kV, frente à nova configuração operativa resultante dos desligamentos de linhas no 500 kV, foi aumentado o carregamento de algumas linhas e, em seguida, foi dado início a um fenômeno de oscilação de potência, culminando com a perda de sincronismo entre áreas do sistema e instabilidades locais.

O relatório aponta especificamente o que desencadeou o evento de 15 de agosto foi a "performance em campo dos equipamentos de controle de tensão de diversos parques eólicos e fotovoltaicos, no perímetro da Linha de Transmissão Quixadá-Fortaleza II, no Ceará". O documento também trás um relato mais técnico resumido conforme abaixo:

“Esses dispositivos das usinas deveriam compensar automaticamente a queda de tensão decorrente da abertura da linha de transmissão, porém o desempenho no momento da ocorrência ficou além do previsto nos modelos matemáticos fornecidos pelos agentes e usados em simulações pelo ONS”, informou o Operador.

O documento publicado pelo ONS traz as providências a serem tomadas pelos 122 agentes, incluindo os geradores eólicos e fotovoltaicos. Ao todo, foram centenas de apontamentos de melhorias e atualizações de estrutura de rede que os agentes e o Operador terão de implementar até outubro de 2024. Ainda de acordo com o Operador, as providências vão desde ajustes em proteções, passando por soluções para problemas na comunicação com os agentes no momento da recomposição, até a validação dos modelos matemáticos de todos os geradores eólicos e fotovoltaicos, entre outras. No relatório também estão elencadas providências que já foram tomadas como a adaptação da base de dados oficial, pelo Operador, para representar a performance dos referidos parques eólicos e fotovoltaicos tal como observada em campo durante a perturbação, de modo a utilizá-la nos estudos de caráter operativo. Além disso, o ONS elaborou

e disponibilizou aos agentes proprietários de usinas eólicas e fotovoltaicas, relatório contendo os requisitos técnicos de Registradores Digitais de Perturbações e para a instalação de Unidades de Medição de Fasores, assim como o guia para validação dos modelos matemáticos.

3.5 POTENCIALIDADE DE PROPAGAÇÃO DE PEQUENOS DISTURBIOS

Relacionando o estudo sobre a estabilidade dos sistemas de potência diante de pequenos distúrbios eletromagnéticos e dinâmica eletromecânica, percebemos que a tensão da armadura de uma máquina síncrona está intrinsecamente ligada ao ângulo de carga, o qual é um aspecto de natureza mecânica. Nas máquinas consideravelmente massivas, qualquer variação na carga resultará em respostas mais lentas se comparadas a alterações em grandezas elétricas.

Essa característica, derivada da inércia das máquinas, implica que mesmo modificações elétricas na rede não induzirão mudanças rápidas no sistema mecânico. Esse atraso mecânico desempenha um papel crucial na garantia da estabilidade do sistema. Esta é uma característica intrínseca das máquinas síncronas, que, devido ao seu grande volume e massa, influenciam o desempenho elétrico. Consequentemente, o desempenho elétrico, embora tenha uma resposta mais rápida, não interfere no movimento mecânico, evidenciando a equação 3.2, que indica a superioridade do torque mecânico sobre o torque eletromecânico, especialmente devido aos atritos no sistema.

Dessa forma, observa-se que usinas hidrelétricas, que são ainda são a maioria no sistema elétrico brasileiro, apesar de seu alto custo inicial, oferecem baixa necessidade de manutenção e alta confiabilidade, reforçando a noção de que a inércia desempenha um papel crucial na segurança do sistema. Já na geração distribuída, embora o ângulo de carga permaneça presente, a ausência de dependência mecânica permite variações tão rápidas quanto as alterações na carga. Esse cenário resulta em uma resposta mais sensível do sistema, destacando a diferença no comportamento dinâmico quando comparado às máquinas síncronas.

Considerando que no cenário brasileiro atual a geração distribuída fotovoltaica residencial tem tido um aumento expressivo nas zonas habitacionais em geral, os efeitos sentidos no dia 15 de agosto em escala nacional tendem a ocorrer de forma mais rotineira e regional dentro das cidades caso não haja também uma adequação expressiva dos planos de atualização de rede elétrica em média e baixa tensão.

Para mitigar esses problemas, é necessário desenvolver medidas de mitigação mais abrangentes e assertivas, como:

- Investimento em projetos de estudo, simulação, previsão e validação de modelos de redes elétricas com inserção de quantidades expressivas de carga advinda de gerações distribuídas eólicas, solar e também de hidrogênio verde.
- Filtros de interferência: os filtros de interferência são dispositivos que podem ser usados para reduzir a interferência na rede elétrica causada pelos inversores eletrônicos.
- Controle da frequência e da tensão: os inversores eletrônicos podem ser equipados com sistemas de controle que permitem manter a frequência e a tensão da rede elétrica dentro de limites aceitáveis.
- Redes inteligentes (*Smarts Grids*): as redes inteligentes são redes elétricas que utilizam tecnologias digitais para melhorar a eficiência e a confiabilidade do sistema. As redes inteligentes podem ajudar a mitigar os desafios causados pela inserção de inversores eletrônicos na GD, pois permitem o controle e a coordenação de recursos distribuídos, como geração distribuída e armazenamento de energia.

4 CONCLUSÃO


A partir de uma análise aprofundada nos tópicos de interesse das máquinas elétricas em suas configurações de geradores, neste trabalho inicialmente foi proposta a ideia de que os fenômenos eletromagnéticos estão intrinsecamente ligados aos eletromecânicos, fundamentada através da interdependência entre ambos na estabilidade dos sistemas de potência. Contextualizando essa relação, considera-se que atingiu-se o objetivo de mostrar como a inércia das máquinas síncronas desempenha um papel fundamental nesse contexto.

Não se pode frear a tecnologia, mas sim adaptar o antigo ao novo. Portanto, a inserção de inversores eletrônicos na Geração Distribuída (GD) é uma tendência crescente, e para garantir a estabilidade do sistema de potência, torna-se necessário desenvolver medidas preventivas capazes de superar os desafios provenientes dessa tecnologia.

Para trabalhos futuros, propõe-se uma abordagem complementar em software, visando a implementação prática dos conceitos discutidos. Um estudo de caso mais aprofundado em sistemas específicos poderia oferecer uma compreensão mais detalhada dos fenômenos eletromagnéticos e eletromecânicos em situações práticas. Além disso, uma análise generalizada abrangendo outros países permitiria uma comparação e compreensão das diferenças e semelhanças nos sistemas de potência ao redor do mundo, contribuindo para uma visão mais completa e abrangente nessa área de estudo.

REFERÊNCIAS

- AVILA, B. R. A. de; FARIA, I. P. de. Modernização das usinas hidrelétricas e seus impactos na estabilidade angular transitória do sistema. **Anais do Congresso Brasileiro de Automática 2020**, 2020. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:230532806>>.
- BEVRANI, H. Robust power system frequency control. In: . [s.n.], 2009. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:106611541>>.
- DUGAN, R.; MCDERMOTT, T. Distributed generation. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 8, n. 2, p. 19–25, 2002.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical Power System Quality**. New York: McGraw-Hill, 1996.
- DZHURAEV, S. D.; RAHIMOV, R. A.; SULTONOV, S. M.; NAZIROV, K. B.; GANIEV, Z. S.; KARIMOV, R. C. Study and analysis of power quality in the electrical networks of the outdoor lighting of the dushanbe city. In: **2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1166–1169.
- FARMER, R.; ALLEN, E. Power system dynamic performance advancement from history of north american blackouts. In: **2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 293–300.
- FITZGERALD, A. E.; JR, C. K. K.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014. Recurso Eletrônico.
- IBERDROLA. **Smart Grids**. 2020. <<https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/smart-grids>>. Acessado em 17 de abril de 2023.
- KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, 1994.
- MACHOWSKI, J.; BIALEK, J. W.; BUMBY, J. R. **Power System Dynamics: Stability and Control**. 2nd. ed. United Kingdom: John Wiley Sons, Ltd., 2008.
- MARUJO, D. **Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência com a Presença de Redes de Distribuição Ativas**. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2017.
- MENDES, P. P. C. **Apostila de Estabilidade de Sistemas Elétricos**. [S.l.]: UNIFEI, 2006.
- O’HEARN, T. L. Pdhonline course e194 (15 pdh) power system analysis. In: . [s.n.], 2006. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:60716244>>.
- (ONS), O. N. do S. E. **O que é o SIN**. 2023. <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acessado em 17 de abril de 2023.
- RAISZ, D.; MUSA, A.; PONCI, F.; MONTI, A. Linear and uniform system dynamics of future converter-based power systems. In: **2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, Joao Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Entrega de TCC

Assunto:	Entrega de TCC
Assinado por:	Lucila Cabral
Tipo do Documento:	Relatório
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Lucila Maria Cabral Araújo, ALUNO (20182610035) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 29/12/2023 07:59:51.

Este documento foi armazenado no SUAP em 29/12/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1042103

Código de Autenticação: 5cd6703927

