



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA  
CAMPUS JOÃO PESSOA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Ricardo Falcão Carneiro da Cunha

**ANÁLISE DE GERADOR SÍNCRONO APLICADO COM ENFOQUE EM USINAS  
NUCLEARES COM FOCO EM ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA**

João Pessoa

2023

RICARDO FALCÃO  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

*Trabalho de conclusão de curso submetido à  
Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em  
Engenharia Elétrica do Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba como  
parte dos requisitos necessários para a obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Orientador: Álvaro de Medeiros Maciel, Dr.

João Pessoa – PB

2023

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

C972a	Cunha, Ricardo Falcão Carneiro da.  Análise de gerador síncrono aplicado com enfoque em usinas nucleares com foco em estabilidade de sistemas de potência / Ricardo Falcão Carneiro da Cunha. - 2023. 41 f. : il. TCC (Graduação - Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade Acadêmica de Processos Industriais, 2023. Orientação : Prof <sup>o</sup> D.r Álvaro de Medeiros Maciel.  1.Sistema elétrico de potência. 2. Máquina síncrona. 3. Estabilidade de sistema de potência. 4. Modelagem de gerador síncrono. I. Título.  CDU 621.3.016.2(043)
-------	---

Lucrecia Camilo de Lima  
Bibliotecária - CRB 15/132

## TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

*Trabalho de conclusão de curso submetido à  
Coordenação do Curso Superior de Bacharelado em  
Engenharia Elétrica do Instituto Federal de  
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba como  
parte dos requisitos necessários para a obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Trabalho Aprovado em 23 / 02 / 2023 pela banca examinadora:



Documento assinado digitalmente  
FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA  
Data: 14/03/2023 15:25:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Franklin Martins Pereira Pamplona

Examinador(a), IFPB

---

Jose Artur Alves Dias  
Examinador(a), IFPB

---

Álvaro de Medeiros Maciel, Dr.  
Orientador, IFPB

João Pessoa – PB

2023

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela fé e perseverança para vencer os obstáculos. Aos meus pais, pela orientação, dedicação e incentivo neste período do curso. Aos professores e colegas que colaboraram.

Enfim, sou grato a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais grupos de máquinas síncronas .....	12
Figura 2 - Diagrama de uma máquina síncrona trifásica.....	13
Figura 3 - Circuito equivalente de máquina síncrona com.....	14
sentido de referência do tipo gerador	
Figura 4- Diagrama fasorial de um gerador síncrono.....	14
mostrando as relações entre as tensões e as correntes	
Figura 5 - “Máquina de dois pólos simplificada.....	19
Figura 6 - Máquina “E” ligada ao barramento infinito “V” .....	23
Figura 7 - máquina assíncrona controlada por PWM .....	26
Figura 8 - Diagrama de carga não-linear programável.....	27
Figura 9 - Curva de Geração hidráulica.....	28
Figura 10 - Curva de Geração eólica.....	29
Figura 11 - Curva de Geração solar.....	30
Figura 12 - Curva de Geração térmica.....	31
Figura 13 - Diagrama de uma usina nuclear.....	32
Figura 14 - Curva de Geração nuclear.....	33
Figura 15 - Gráfico de contribuição das fontes de energia.....	34
Figura 16 - Esquema de usina hidroelétrica no simulink.....	35
Figura 17 - Análise da tensão com a queda de potência.....	36
Figura 18 - diagrama da usina nuclear.....	37
Figura 19 - tensão gerada pelo esquema da usina nuclear.....	38

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_e$  : Potência elétrica de saída  
 $V_t$  : Tensão terminal do gerador  
 $V_{td}$  : Componente Tensão terminal do gerador, eixo d  
 $V_{tq}$  : Componente Tensão terminal do gerador, eixo q  
 $I_d$  : Corrente de armadura, eixo d  
 $I_q$  : Corrente de armadura, eixo q  
 $E'_d$  : Tensão trassnsiente , eixo d  
 $E'_q$  : Tensão trassnsiente , eixo q  
 $T'_{d0}$  : Constante de tempo de circuito aberto , eixo d  
 $T'_{q0}$  : Constante de tempo de circuito aberto , eixo q  
 $E_{fd}$  : Tensão de campo , eixo d  
 $K_E$  : Ganho de excitação  
 $T_E$  : Constante de tempo de excitação  
 $V_S$  : Tensão do transformador em regime permanente  
 $K_F$  : Constante estabilização do circuito  
 $T_{FE}$  : Constante de tempo de estabilização do circuito  
 $\omega$  : velocidade angular  
 $\delta$  : posição angular do rotor  
 $P$  : potência real  
 $Q$  : potência reativa  
 $V$  : Tensão no barramento infinito  
 $\Delta$  : diferença de valor

## RESUMO

O trabalho começa com uma introdução aos sistemas de energia e a importância das máquinas síncronas como base para a geração de potência. Na segunda parte, a teoria por trás do assunto é apresentada e discutida, incluindo a avaliação das fontes de energia e sua estabilidade. Na terceira parte, é realizada uma simulação de um sistema interligado de energia, o que permitirá uma compreensão mais completa do funcionamento destes sistemas. Por fim, a conclusão destaca o papel da análise de estabilidade em sistemas de potência para os mercados de energia elétrica modernos, com foco na sua importância para garantir a segurança e a eficiência dos sistemas.

**Palavras-chave:** Sistemas elétrico de potência, Máquina síncrona, Estabilidade de sistemas de potência, modelagem de gerador síncrono.

## ABSTRACT

The work begins with an introduction to power systems and the importance of synchronous machines as the basis for power generation. In the second part, the theory behind the subject is presented and discussed, including the evaluation of energy sources and their stability. In the third part, a simulation of an interconnected power system is performed, which will allow for a more comprehensive understanding of how these systems operate. Finally, the conclusion highlights the role of stability analysis in power systems for modern electricity markets, with a focus on its importance in ensuring the safety and efficiency of the systems.

**Keywords:** Power Systems, Synchronous Machine, Power System Stability, Synchronous Generator Modeling.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1 REPRESENTAÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS.....	12
2.1.1 A MÁQUINA SÍNCRONA.....	12
2.1.2 A PARTE ELÉTRICA.....	15
2.1.3 A PARTE MECÂNICA.....	15
2.1.4 A TURBINA E SISTEMA GOVERNADOR.....	16
2.1.5 MODELAGEM DA EXCITAÇÃO.....	17
2.2 EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA.....	18
2.3 MODELO DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	19
2.4 ELEMENTOS DE COMPENSAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS.....	20
2.4.1 ELEMENTOS FACTS.....	20
2.5 ELEMENTOS DE CARGA.....	22
2.5.1 CONTROLE VARIÁVEL DE VELOCIDADE P/ MÁQUINAS AC.....	22
2.6 CARGAS NÃO LINEARES.....	22
2.7 ELEMENTOS AUXILIARES.....	23
2.7.1 PSS - POWER SYSTEM STABILIZER.....	23
2.7.2 TRANSFORMADORES.....	24
2.8 TIPOS DE GERAÇÃO NO BRASIL.....	29
2.8.1 HIDRÁULICA.....	29
2.8.2 EÓLIA.....	30
2.8.3 SOLAR.....	31
2.8.4 TÉRMICA.....	32
2.8.5 NUCLEAR.....	33
3. SIMULAÇÃO HIDRÁULICA vs NUCLEAR.....	35
4. CONCLUSÃO.....	39
5. REFERÊNCIAS.....	40

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico convencional é formado por elementos geradores, tais que as tensões de saída são elevadas para patamares ultra altos de tensão (Extra-High Voltage - EHV) e assim serem transmitidos de uma área produtora para outra que consome, através de linhas de transmissão, as quais possuem elementos capacitivos e indutivos junto ao sistema elétrico de potência, o que leva a distúrbios consideráveis na distribuição energética e portanto na simulação.

Na unidade consumidora as tensões são abaixadas para alta tensão, onde os consumidores de maior porte estão conectados (hospitais, indústrias, shoppings, etc), e média tensão que finalmente distribui energia para as cargas menores (residenciais, comerciais etc) por um último ramal de baixa tensão.

As adversidades de um sistema de potência vão além dos problemas envolvendo: geração, transmissão e consumo, pois durante a geração as máquinas podem sair de sincronia e causar prejuízos financeiros e transtornos aos consumidores. As linhas de transmissão causam efeitos de perdas (ativas e reativas) que diminuem os níveis de tensão e modificam os ângulos das cargas levando a problemas de sincronia e estabilidade em linhas longas. O consumo crescente de cargas não lineares requer potências do sistema de modo imprevisível.

A segurança da operação precisa de dispositivos de controle muito precisos, contudo a última linha de defesa dos sistemas de potência são os elementos de proteção, existe uma relação tênue entre controle e proteção, visto que ambas devem agir contra a perda de uma condição ideal de operação, pode-se dizer que sistemas de proteção são atuadores locais que não têm relação com elementos de controle em determinado trecho do sistema, no entanto a vulnerabilidade de atuação entre controles ou proteção é um problema de extrema complexidade.

Neste trabalho será abordado o conceito de um modelo de sistema gerador (máquina síncrona) conectado a um barramento por meio de uma rede de transmissão de características conhecidas, este modelo será simulado no simulink[1], uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas que servirá para analisar a estabilidade dada a geração do tipo nuclear. Assim, será possível obter um estudo, com base em 3 critérios principais da qualidade de energia, citados em [2]:

- Frequência constante;
- Amplitude constante;
- Nível de confiabilidade.

Atender estes requisitos de operação do sistema de distribuição, visando a confiabilidade do fornecimento aos consumidores e buscando manter a

integridade da rede, requer que certas ações sejam tomadas dentro do sistema de energia, conforme descrito em [3]:

- Estabelecer o equilíbrio energético entre geração e demanda;
- Administrar reativos para regular o perfil de tensão;
- Buscar a melhor relação entre geração, custo e efeito ambiental;
- Assegurar a estabilidade do sistema diante de possíveis eventualidades.

Os critérios expostos adicionam um cuidado extra ao problema de estabilidade, sendo também dever do engenheiro estabelecer soluções que vão além das soluções exclusivamente técnicas, pois é desejável o equilíbrio técnico financeiro de suas análises.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. REPRESENTAÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

Para o estudo de estabilidade, primeiro devemos produzir modelos matemáticos do sistema determinando alguns parâmetros:

- A rede;
- As cargas;
- Os parâmetros das máquinas síncronas;
- sistemas de excitação;
- A turbina mecânica e o sistema de controle de velocidade;
- Controles auxiliares da rede envolvidos na transmissão da energia.

Algumas características devem ser observados para uma aproximação matemática satisfatória:

- tensões de excitação constante;
- ângulos elétricos e mecânicos em sincronia e em velocidade constante.

Assim, podemos observar um equilíbrio em todas as fases e com sequência positiva.

Aspectos como tensão nas máquinas síncronas e abertura máxima para entrada de fluídos nas turbinas geradoras são critérios da qualidade do serviço prestado, tal qualidade está diretamente ligada à estabilidade total do sistema.

A estabilidade tem relação com a capacidade dos geradores de responderem às demandas de energia dos consumidores e às perdas associadas aos componentes elétricos [4] , assim o gerador é o ponto de partida de estudo.

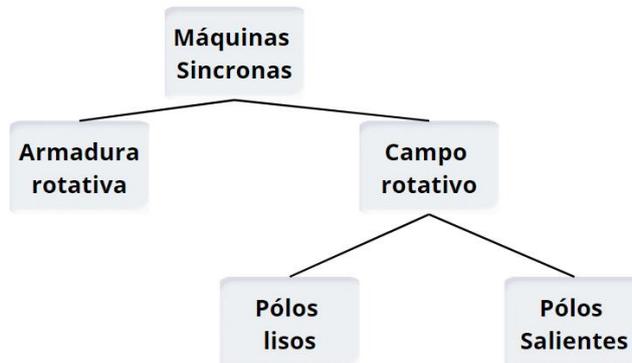
### 2.1.1. A máquina síncrona

As máquinas síncronas geralmente têm o papel de geradores elétricos conectados a alguma fonte de energia mecânica, desde turbinas, movidas pelo vento, até fontes hidráulicas com alto potencial energético e baixas velocidades de operação.

Os principais grupos de máquinas síncronas (Figura 1), são divididos nas de armadura rotativa e as de campo rotativo. As de armadura rotativa raramente são usadas, devido a dificuldade em transmitir altas potências nos anéis coletores, já as de campo rotativo são tidas como gerador elétrico padrão, por causa de sua boa capacidade de geração.

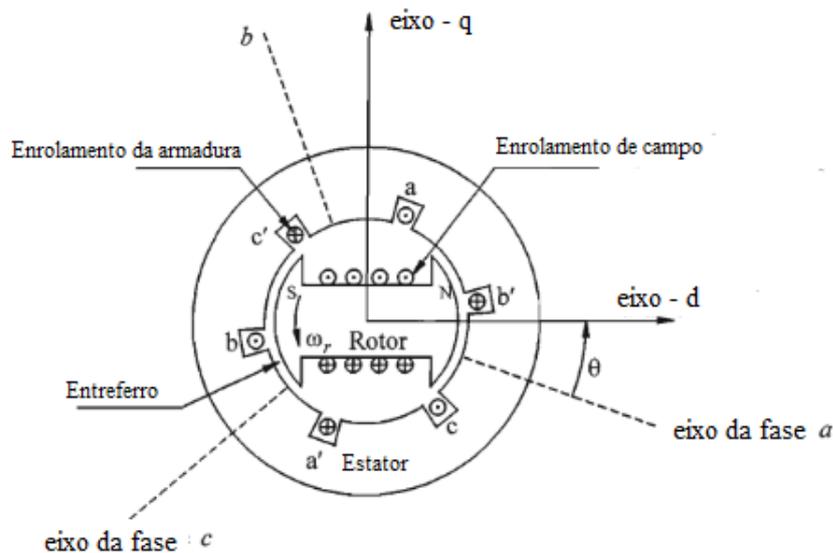
As máquinas de campo rotativo (figura 2) são classificadas pelo tipo de rotor, que podem ser de pólos lisos ou pólos salientes, as de pólos lisos trabalham em altas velocidades e têm poucos pólos no rotor, já o segundo tipo tem muitos pólos e trabalha em velocidades inferiores. Normalmente as máquinas de pólos salientes têm junto ao rotor uma estrutura chamada de enrolamento de amortecimento, ou de partida que serve para equilibrar as correntes de Foucault no rotor, o que ajuda a minimizar as perdas e geração de calor, assim aumentando a eficiência da máquina e tornando-a mais estável.

Figura 1 - Principais grupos de máquinas síncronas



Fonte: autoral

Figura 2 - Diagrama de uma máquina síncrona trifásica



Fonte: KUNDUR,P. Power System Stability and Control

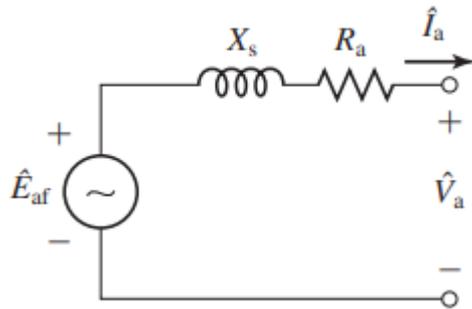
No momento em que o gerador síncrono tem seu rotor energizado por uma corrente e sua rotação é mantida constante, uma tensão é criada na armadura. Assim, ao ligar uma carga nos terminais, uma corrente começa a fluir nos enrolamentos da armadura, tal modelo pode ter sua representação de circuito e diagrama como as figuras 3 e 4.

A frequência do campo eletromagnético está ligada a velocidade do rotor, mas a frequência do campo magnético girante da armadura depende da corrente gerada, então ocorre uma sincronização das frequências, ou seja, o aumento na velocidade do rotor leva ao aumento na frequência do campo eletromagnético e da corrente.

Na análise de um sistema em regime permanente de operação pode-se observar os efeitos da reação de armadura e das perdas nos enrolamentos que precisam ser consideradas e levam a uma queda de tensão na reatância síncrona equivalente, durante a excitação do campo criado pelo rotor com corrente contínua, a impedância total equivalente pode ser dada pela equação (1), sendo  $R_a$  as perdas de resistência da armadura e  $X_S$  a reatância síncrona.

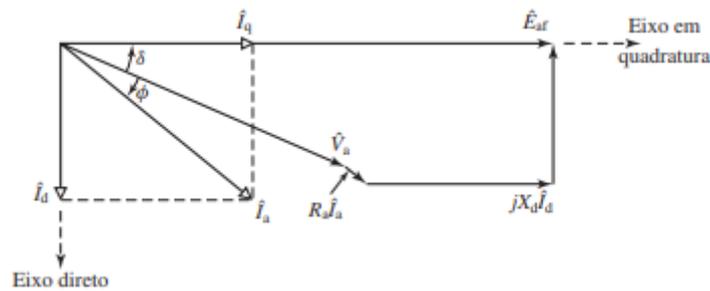
$$Z_S = (R_a + jX_S) \tag{1}$$

Figura 3 - Circuitos equivalentes de máquina síncrona com sentido de referência do tipo gerador



Fonte: FITZGERALD E KINGSLEY. Máquinas elétricas. AMGH, 2014.

Figura 4 - Diagrama fasorial de um gerador síncrono mostrando as relações entre as tensões e as correntes



Fonte: FITZGERALD E KINGSLEY. Máquinas elétricas. AMGH, 2014.

“Dado diagrama fasorial do gerador da Figura 4, a tensão gerada  $\hat{E}_{af}$  é igual à soma fasorial da tensão de terminal  $\hat{V}_a$  mais a queda de tensão na resistência de armadura  $\hat{I}_a R_a$  e as quedas de reatância síncrona  $j \hat{I}_d X_d + j \hat{I}_q X_q$  .” [6]

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + R_a \hat{I}_a + j X_d \hat{I}_d + j X_q \hat{I}_q \quad (2)$$

Podemos considerar a máquina síncrona em três partes: A parte elétrica, a parte mecânica e a turbina mais o governador de potência. Cada parte tem sua relevância e uma diferente influência na análise de sistemas de potência.

### 2.1.2. A parte elétrica

O modelo elétrico da figura 2, pode ser simulado com base em duas tensões em quadratura com equações descritas em [7], onde a equação (3) mostra a relação do campo em eixo direto do gerador síncrono no que diz respeito a seus termos de reatância em quadratura. E na equação (4) define a relação do campo em eixo de quadratura com os termos gerais de eixo direto e da tensão a qual o gerador é submetido. Saber sobre o equacionamento aplicável a simulação é essencial na análise da reação rápida do gerador síncrono, embora a inércia da máquina seja a resposta inicial às instabilidades do sistema, pois são os elementos elétricos que geram acréscimo de potência na máquina para corresponder a demanda.

A abertura angular se relaciona diretamente nos campos elétricos em eixo de quadratura e direto, então, a variação da tensão de eixo em quadratura (estator) é devido a ação do sistema de excitação no eixo direto (rotor), acelerando ou diminuindo os campos magnéticos a depender da magnitude dos campos elétricos.

$$E_d' = \frac{X_d' - X_q}{1 + sT_{q0}} I_q \quad (3)$$

$$E_q' = \frac{X_d' - X_d}{1 + sT_{d0}} I_d + \frac{E_{fd}}{1 + sT_{d0}} \quad (4)$$

### 2.1.3. A parte mecânica

Entender a relação entre ângulo mecânico e as potências transferidas é essencial na análise de estabilidade das máquinas síncronas, estas relações são descritas em [7]. A velocidade angular na Equação (5) tem relação com o amortecimento “D” e momento “M” a que a máquina é submetida, assim gerando uma diferença de potência entre a mecânica e a elétrica.

A equação (6) mostra o ângulo de abertura da máquina síncrona em sua velocidade nominal de operação e ao escorregamento [8] característico da máquina.

As relações mecânicas de um gerador síncrono são intrínsecas à máquina, então a velocidade e ângulo de abertura variam de acordo com as características do sistema e cada máquina reage a depender de suas características de momento mecânico e amortecimento às mesmas condições de distúrbios. Assim, o controle mecânico está indiretamente ligado aos efeitos de torque controlados pelo sistema governador da turbina.

$$\Delta\omega = \frac{1}{D + sM} (P_m - P_e) \quad (5)$$

$$\delta = \omega_0 \frac{\Delta\omega}{s} \quad (6)$$

#### 2.1.4. A turbina e sistema governador

Vários elementos de controle trabalham em paralelo ao gerador síncrono, controlam desde o volume de fluído (quantidade disponível de potência mecânica) até a tensão DC nos enrolamentos de campo do gerador, de acordo com [7], como descrito na equação (7), a potência relativa à ação do governador é dada por uma constante proporcional à velocidade e a relação de tempo do estator:

$$\Delta P_r = \frac{K_G}{1 + sT_{SR}} \Delta \omega \quad (7)$$

A potência de eixo direto da turbina tem relação com a potência que o governador passa à turbina e a uma constante de tempo característica do motor acoplado, descrita em (8).

$$\Delta P_h = \frac{1}{1 + sT_{SM}} \Delta P_r \quad (8)$$

A potência elétrica é relativa a potência do eixo direto da turbina e uma constante de tempo do sistema hidráulico, descrita em (9).

$$\Delta P_c = \frac{1}{1 + sT_{CH}} \Delta P_h \quad (9)$$

A potência mecânica é proporcional a potência elétrica tanto no motor quanto no gerador, o conjunto destas equações representando o efeito mecânico norteiam a reação linear do conjunto turbina rotor, descrita em (10).

$$\Delta P_m = \frac{sK_{RH} T_{RH}}{1 + sT_{RH}} \Delta P_c \quad (10)$$

Dada a continuidade de um distúrbio ou aumento de carga, o sistema governador é a última barreira de ajuste do gerador síncrono, por ter uma resposta lenta e pela capacidade de restabelecer grandes quantidades de potência, o sistema governador age sobre condições específicas, da quantidade de fluído que passa pela turbina, o torque que se permite dar ao eixo da turbina ligado ao rotor até a potência elétrica e mecânica que são divididas entre os elementos.

### 2.1.5. Modelagem da excitação

Os campos de excitação seguem uma modelagem descrita por [7]:

$$E_{fd} = E_d' - R_a I_d - x_d' I_q \quad (11)$$

A tensão de campo, associada à geração do campo magnético de excitação é gerada pela tensão de eixo direto menos as perdas diretas e reatância direta. Assim como a tensão em quadratura é a relação da tensão deslocada em quadratura e das perdas e reatância de quadratura.

$$V_{tq} = E_q' - R_a I_q - x_d' I_d \quad (12)$$

$$P_e = E_d' I_d + E_q' I_q \quad (13)$$

A potência, então, é estabelecida pelas relações de correntes e tensões para mover o sistema direto (rotor) e quadratura (estator).

## 2.2. EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA

Um fator importante para uma máquina girante é o torque mecânico exercido no rotor, matematicamente definido:

$$T_1 = \alpha I \quad (14)$$

Lei mecânica, onde “ $\alpha$ ” é a aceleração angular mecânica do eixo e “ $I$ ” o momento de inércia do eixo.

Nas máquinas síncronas é observado uma relação entre graus mecânicos no rotor e graus elétricos correspondentes:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (15)$$

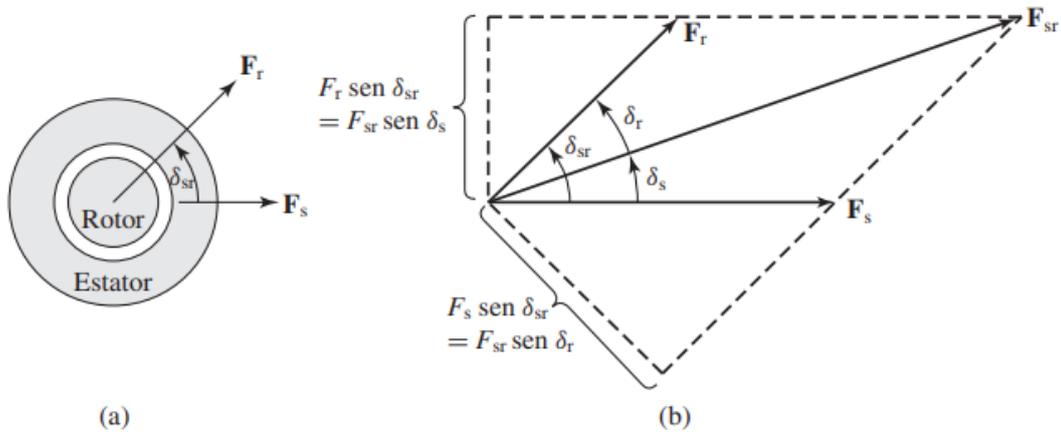
Onde graus elétricos se relacionam com os graus mecânicos vezes o número de pólos sobre 2. Como a frequência da rotação é dada por

$$f = \frac{P \text{ rpm}}{2 \cdot 60} \quad (16)$$

$$\theta_e = \frac{60f}{\text{rpm}} \theta_m \quad (17)$$

Esses ângulos são medidos com relação uma referência estacionária, usualmente o plano do solo. É interessante definir um plano rotativo de potência conhecida, pois a partir dele é direto reconhecer incrementos nos ângulos de abertura, como visto em (5).

Figura 5 - “Máquina de dois pólos simplificada: (a) modelo elementar e (b) diagrama vetorial das ondas de FMM.



Fonte: FITZGERALD E KINGSLEY. Máquinas elétricas. AMGH, 2014. pg.236

O conjugado é produzido pela tendência ao alinhamento mútuo dos campos magnéticos do rotor e do estator. Observe que essas figuras são desenhadas com  $\delta_{sr}$  positivo, isto é, com a onda de FMM  $F_r$  do rotor à frente da  $F_s$  do estator.”

Assim cada vetor tem uma velocidade rotativa e aceleração angular, de maneira que:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_0 \quad (18)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta_e}{dt^2} \quad (19)$$

Como:

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \alpha \quad (20)$$

E dada a equação 17, então:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2 \frac{60f}{rpm} \theta_m}{dt^2} \quad (21)$$

temos que reorganizando 21 e fazendo a substituição de 20:

$$\alpha = \frac{rpm}{60f} \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (22)$$

Assim, substituindo 22 em 14:

$$T_1 = \frac{rpm}{60f} I \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (23)$$

Considerando que o interesse é encontrar um valor de torque em p.u. (por unidade)

$$T(pu) = \frac{P_{base}}{\omega} \quad (24)$$

$$\omega = 2\pi \frac{rpm}{60} \quad (25)$$

O torque por unidade é a potência na base escolhida sobre a velocidade nominal para esta potência.

$$T_1(pu) = \frac{T_1}{T_{base}} \quad (26)$$

$$T_1(pu) = \frac{\frac{rpm}{60f} I \frac{d^2\delta}{dt^2}}{\frac{P_{base}}{2\pi \frac{rpm}{60}}} \quad (27)$$

$$T_1(pu) = \frac{2\pi I (rpm)^2 d^2\delta}{f P_{base} 3600 dt^2} \quad (28)$$

Das características das máquinas rotativas também é necessário se definir um termo “H” conhecido como constante de inércia:

$$H = \frac{\frac{1}{2}I\left(\frac{2\pi rpm}{60}\right)^2}{P_{base}} \quad (29)$$

Substituindo (29) em (28), temos o torque líquido na ponta da máquina dado por:

$$T_1(pu) = \frac{H d^2\delta}{\pi f dt^2} \quad (30)$$

No entanto o torque líquido na ponta da máquina é resultado da transformação do torque mecânico em “torque” elétrico, de modo que:

$$T_1 = T_m - T_e \quad (31)$$

Em p.u. o torque e a potência têm a mesma proporcionalidade, então é possível analisar a variação do ângulo de abertura para diferentes condições:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (P_m(pu) - P_e(pu)) \quad (32)$$

Observando a Figura 4 podemos determinar a potência elétrica do sistema:

$$P_e = VI \sin(\delta) \quad (33)$$

Sabendo a tensão terminal e a impedância do sistema, dada uma resistência insignificante, que é a característica mais comum:

$$P_e = E \frac{V_t}{X} \sin(\delta) = P_m \sin(\delta) \quad (34)$$

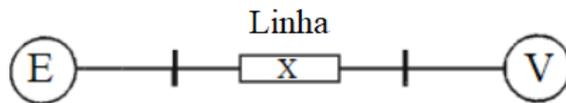
Difícilmente um gerador síncrono irá trabalhar isolado, um conjunto de geradores trabalham em paralelo para fornecer energia, assim eles devem funcionar em sincronismo, isto acontece por meio de uma conexão de cada gerador a um barramento infinito.

Um defeito gera duas reações diferentes em uma máquina síncrona, a primeira é relativa ao efeito do fluxo direto da máquina e outro as correntes de excitação, qualquer problema prontamente modifica os termos de correntes, ao passo que a reação de fluxo magnético leva cerca de um segundo para ser sentido na reação da máquina, deste modo um modelo que leve em consideração uma máquina de fluxo principal constante é uma boa opção na maioria das análises.

### 2.3. MODELO DA MÁQUINA SÍNCRONA

Montar o modelo de uma máquina síncrona está relacionado a ação dos fluxos magnéticos internos e suas respostas no ângulo e módulo de tensão terminal, desprezando as mudanças geradas pelo fluxo direto, um bom modelo pode ser apresentado.

Figura 6 - Máquina “E” ligada ao barramento infinito “V”



Fonte: FITZGERALD E KINGSLEY. Máquinas elétricas. AMGH, 2014

No modelo simplificado da Figura 6 pode-se analisar os efeitos de uma máquina de fluxo magnético contínuo ligado a um barramento infinito por uma reatância constante.

$$E = E \angle \delta \quad (35)$$

$$X = X \angle \gamma \quad (36)$$

$$V - E = X I \quad (37)$$

$$I \angle \theta = \frac{V \angle 0 - E \angle \delta}{X \angle \gamma} \quad (38)$$

$$I \angle \theta = \frac{X}{V} \angle (-\gamma) - \frac{E}{X} \angle (\delta - \gamma) \quad (39)$$

$$P = E I' \quad (40)$$

$$P = \frac{EV}{X} \angle (\delta + \gamma) - \frac{E^2}{X} \angle (\gamma) \quad (41)$$

## 2.4. ELEMENTOS DE COMPENSAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Muitos elementos são usados no controle da distribuição de energia: capacitores fixos ou ajustáveis e reatores são colocados em pontos estratégicos do sistema para melhorar as condições de operação. Para otimizar o desempenho nas barras de tensão mais elevadas, diversos dispositivos foram criados: transformadores reguladores, transformadores de TAP variável entre outros equipamentos que proporcionam um equilíbrio dos reativos, um dos mais modernos são chamados FACTS (Flexible AC Transmission System ).

### 2.4.1. Elementos FACTS

“Os dispositivos flexíveis de transmissão em corrente alternada, do inglês FACTS (Flexible Alternating Current Transmission) são dispositivos que fazem uso da eletrônica de potência para fornecer flexibilidade ao sistema elétrico. O desenvolvimento da tecnologia de semicondutores permite o uso cada vez maior de tais equipamentos para soluções de problemas na transmissão relacionados a segurança, estabilidade e eficiência.” [9]

Supondo uma linha de transmissão sem perdas, o valor absoluto da tensão da fonte deve ser igual a tensão terminal da linha, deste modo um atraso de ângulo deve aparecer dada a reatância da linha e depois podendo determinar as correntes e as potências. A busca pela incorporação dos elementos FACTS é para modificar o termo de reatância das equações (48) e (49), a fim de melhorar o perfil de potência do sistema.

$$V_s = V_t = V \quad (42)$$

$$V_s = V \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) + j V \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (43)$$

$$V_t = V \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) - j V \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (44)$$

$$I = \frac{V_t - V_s}{jX} \quad (45)$$

$$I = \frac{2V \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)}{jX} \quad (46)$$

$$S = V I^{-1} \tag{47}$$

$$P = V \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \frac{2V \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)}{X} \tag{48}$$

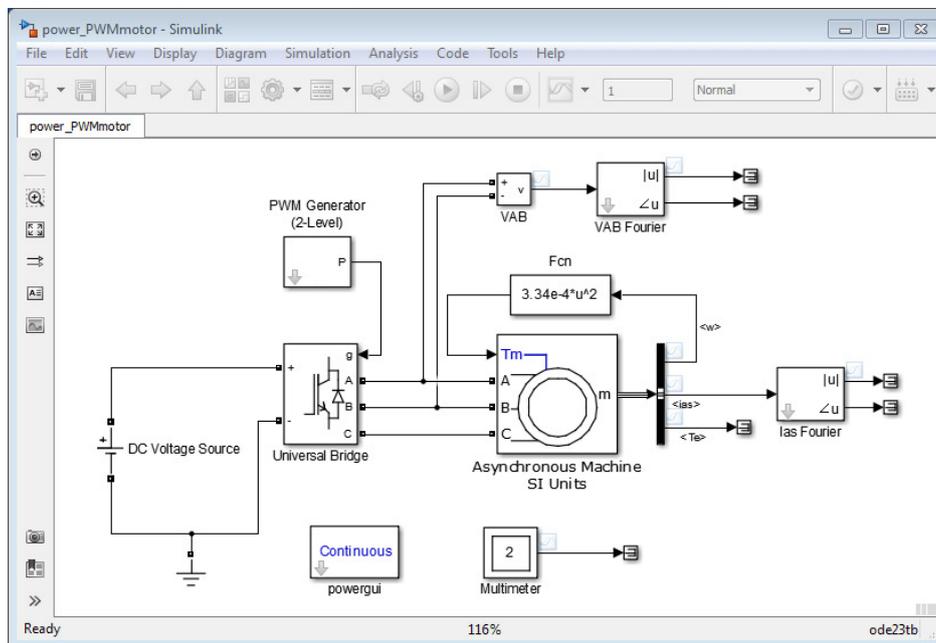
$$Q = V \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \frac{2V \sin\left(\frac{\delta}{2}\right)}{X} \tag{49}$$

## 2.5.ELEMENTOS DE CARGA

### 2.5.1. Controle variável de velocidade para máquinas AC

Regular a velocidade de máquinas elétricas AC pedem meios de comutação forçada como por exemplo MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ou chaves IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Máquinas assíncronas controladas com pulsos de largura modulada (PWM - Pulse Width Modulation) geradas em fontes conversoras de potência são ferramentas importantes e cada vez mais usadas, substituindo motores DC e ponte de tiristores. Com o PWM e técnicas de controle como “controle de fluxo orientado” ou “controle de fluxo direto de torque” têm-se uma liberdade antes só atingida em máquinas DC.

Figura 7 - Esquema de máquina assíncrona controlada por PWM no simulink

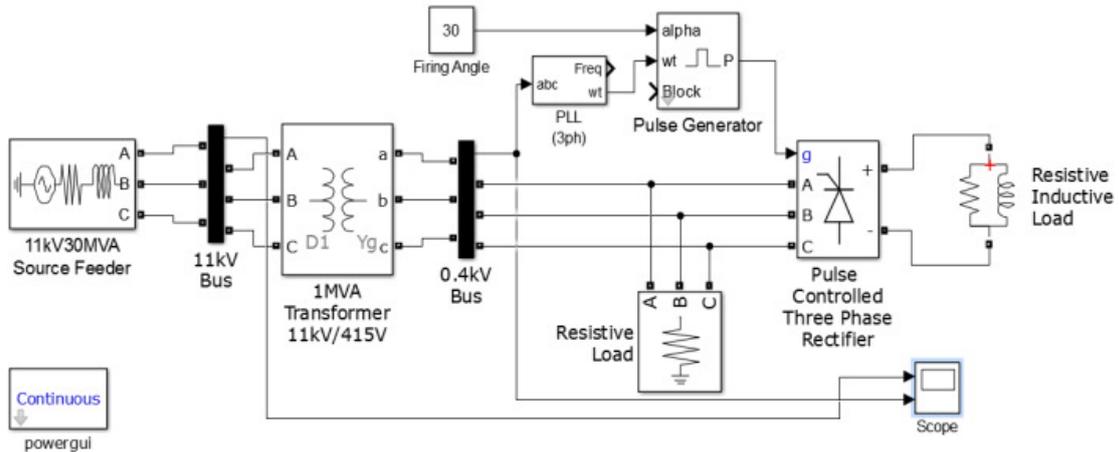


Fonte: [Simulate Variable Speed Motor Control - MATLAB & Simulink](#)

## 2.6. CARGAS NÃO LINEARES

Cargas não lineares (figura 8) costumam ser observadas em ambientes de potências, soldas a arco, indutores saturáveis, varistores e alguns tipos de motores possuem características não lineares. [10]

Figura 8 - Diagrama de carga não-linear programável



Fonte: [Circuit for simulating non-linear load on a threephase electric circuit... | Download Scientific Diagram](#)

## **2.7. ELEMENTOS AUXILIARES**

### **2.7.1. PSS - Power System Stabilizer**

Um sistema PSS atenua oscilações de máquinas síncronas através do controle de sua excitação, distúrbios do sistema de potência causam oscilações (power swings) elétricas e mecânicas nos geradores elétricos, estas oscilações devem ser estabilizadas.

Normalmente um PSS é controlado por uma constante análise do desvio da velocidade da máquina ou pelo aumento da geração de potência e gera um sinal de controle de tensão para manter a estabilidade.

### **2.7.2. Transformadores**

A geração em máquinas síncronas ocorre em tensões relativamente baixas por questões econômicas, já a transmissão é feita em tensões elevadas pelos mesmos motivos, para resolver esta questão técnica e financeira os transformadores de potência atuam aumentando ou diminuindo as tensões elétricas.

## 2.8. TIPOS DE GERAÇÃO NO BRASIL

No Brasil, aproximadamente noventa e nove (99%) da energia gerada se dá através da máquina síncrona, além disso mais de setenta por cento (70%) da energia gerada é de fonte hidráulica, devido ao grande potencial hídrico do país e por consequência a geração.

Contudo, com o crescimento da demanda de energia ao longo dos anos, o que implica na necessidade de aumentar a quantidade de energia gerada, é preciso avaliar melhor as opções para geração.

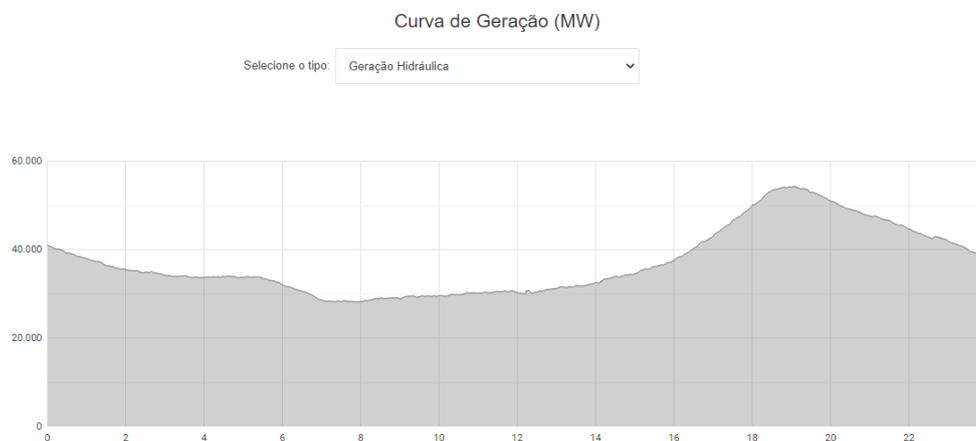
Como visto no início deste trabalho, para manter a estabilidade do sistema é necessário buscar um equilíbrio entre carga e geração, então deve-se levar em consideração a fonte desta energia que está sendo gerada.

Tal análise pode ser feita com base nas características de cada tipo de geração e também em suas curvas de geração que representam a quantidade de energia gerada por uma fonte ao longo do tempo, o que permite uma visualização clara da disponibilidade da fonte em diferentes períodos. Por exemplo, a geração hidrelétrica varia bastante ao longo do ano, sendo maior na época de chuvas e menor na época de estiagem. Já a geração eólica varia bastante durante o dia. Com base nessas curvas, é possível planejar a complementaridade entre as diferentes fontes e garantir uma geração estável e confiável de energia.

### 2.8.1. Hidráulica

“ É necessário que haja um fluxo de água para que a energia seja gerada de forma contínua, por isso existe a necessidade de construir um reservatório de água com uma represa/barragem, em geral construídas de cimento armado, que formam lagos artificiais.” [11]

Figura 9 - Curva de Geração hidráulica



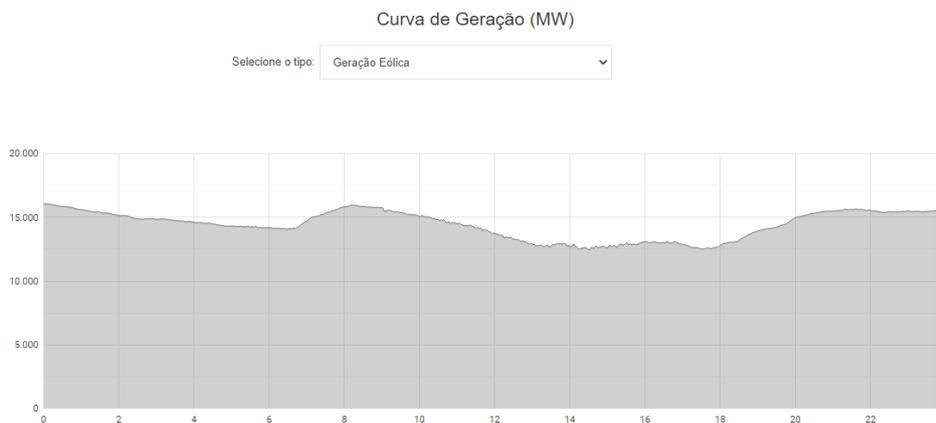
Fonte: [Carga e Geração](#)

Logo, uma de suas maiores vantagens é o fato de ser uma fonte renovável e abundante , o que implica em um custo relativamente baixo para o consumidor final. Porém, a construção de novas hidrelétricas requer o alagamento de grandes áreas , causando impacto ambiental e social devido ao deslocamento das comunidades próximas, além de que seu abastecimento depende do clima.

### 2.8.2. Eólica

“Semelhante a um moinho de vento, o aerogerador é composto de pás que se movimentam com a velocidade dos ventos, fazendo o rotor girar. Este, por sua vez, transmite a rotação multiplicada ao gerador, que transforma essa energia mecânica em energia elétrica.”[10]

Figura 10 - Curva de Geração eólica



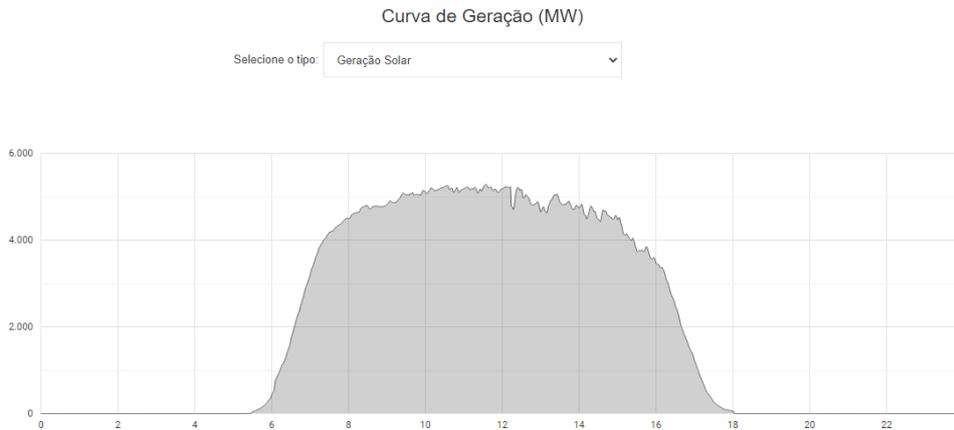
Fonte: [Carga e Geração](#)

Apesar de ocupar pouco espaço e ter impacto ambiental baixíssimo, a geração eólica apresenta uma descontinuidade do vento de um momento para outro, ou de um dia para o outro. Assim , esta imprevisibilidade pode ser bastante prejudicial diante da demanda.

### 2.8.3. Solar

A energia solar funciona a partir de tecnologias que captam a luz e a convertem em energia através do efeito fotoelétrico (células fotovoltaicas) ou redirecionam esta luz, com a finalidade de concentrar o calor do sol para o aquecimento de líquidos (energia solar térmica).

Figura 11 - Curva de Geração solar



Fonte: [Carga e Geração](#)

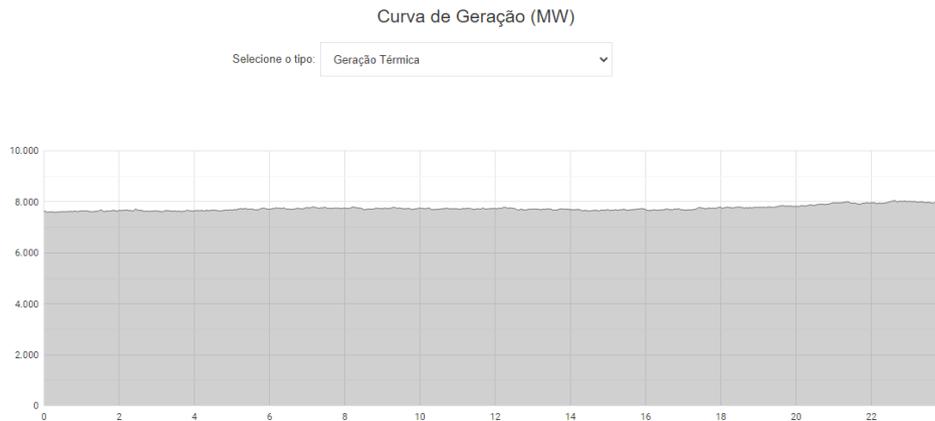
Similar à eólica, não precisa de áreas tão grandes quanto na geração hidráulica e tem baixo impacto ambiental, porém depende da disponibilidade de luz solar ao longo do dia.

#### 2.8.4. Térmica

“A geração térmica converte energia química dos combustíveis em energia elétrica. Isto ocorre em três fases distintas:

1. A energia química do combustível é transformada em calor através da queima do combustível ou a energia atômica do combustível é transformada em calor através da fissão nuclear.
2. O calor produzido é transformado em trabalho mecânico por uma máquina térmica.
3. O trabalho mecânico, produzido pela máquina térmica, é transformado em energia elétrica pelo gerador elétrico.” [12]

Figura 12 - Curva de Geração térmica



Fonte: [Carga e Geração](#)

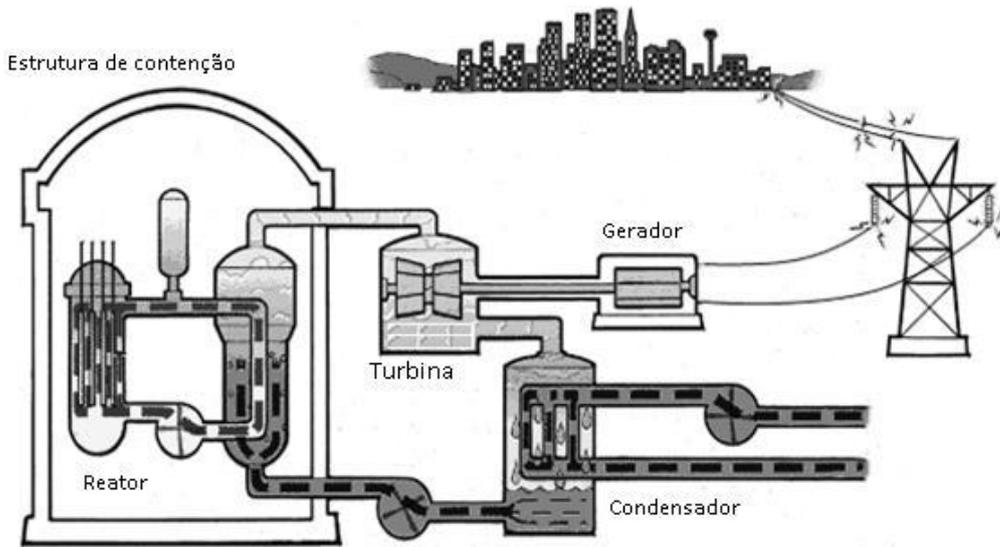
“As vantagens das termelétricas incluem uma fácil instalação e redução de custo em sua construção, além de não necessitarem de elementos naturais, como água e o vento, como ocorre com as usinas eólicas e hidrelétricas. As desvantagens estão no impacto ambiental, como desmatamento, poluição e a emissão de gases.” [13]

### 2.8.5. Nuclear

“A fissão dos átomos de urânio dentro das varetas do elemento combustível aquece a água que passa pelo reator a uma temperatura de 320 graus Celsius. Para que não entre em ebulição – o que ocorreria normalmente aos 100 graus Celsius –, esta água é mantida sob uma pressão 157 vezes maior que a pressão atmosférica.

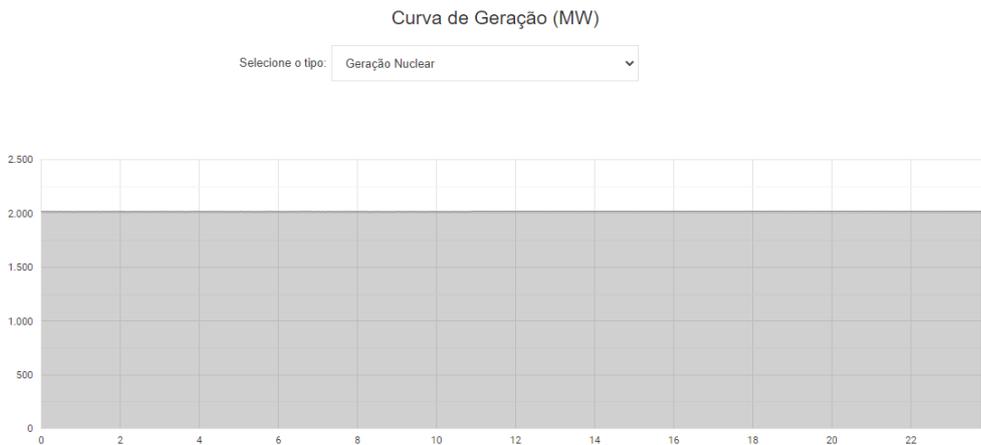
O gerador de vapor realiza uma troca de calor entre as águas deste primeiro circuito e a do circuito secundário, que são independentes entre si. Com essa troca de calor, a água do circuito secundário se transforma em vapor e movimentada a turbina - a uma velocidade de 1.800 rpm - que, por sua vez, aciona o gerador elétrico.” [14]

Figura 13 - Diagrama de uma usina nuclear



Fonte: [Ficheiro:Esquema de uma Usina Nuclear.png – Wikipédia, a enciclopédia livre](#)

Figura 14 - Curva de Geração nuclear



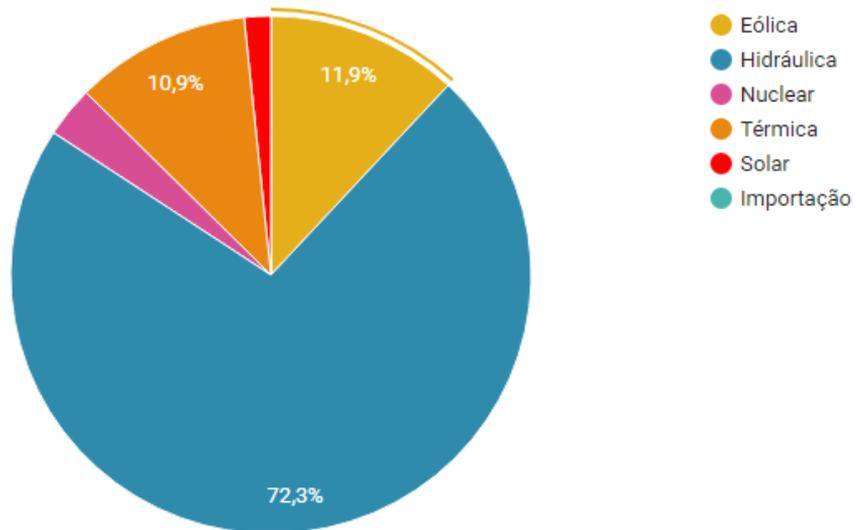
Fonte: [Carga e Geração](#)

A geração nuclear ou termonuclear tem grande semelhança no processo de geração das usinas térmicas convencionais, contudo, ela elimina o maior dos problemas destas, que é a emissão de gases poluentes.

Ainda que produza resíduos após a fissão do urânio, para obter o calor, estes resíduos se apresentam de forma bem mais contida, o que ajuda no momento de descarte. Além disso, ao longo prazo as usinas nucleares apresentam um baixo custo devido a abundância de urânio e não dependem de condições climáticas para seu funcionamento, como ocorre com usinas eólicas, solares e hidrelétricas.

Apesar das vantagens da energia nuclear, pode-se ver na figura 17 que ela não representa uma percentagem expressiva do total gerado.

Figura 15 - Gráfico de contribuição das fontes de energia



Fonte: [Carga e Geração](#)

### 3. SIMULAÇÃO HIDRÁULICA VERSUS NUCLEAR

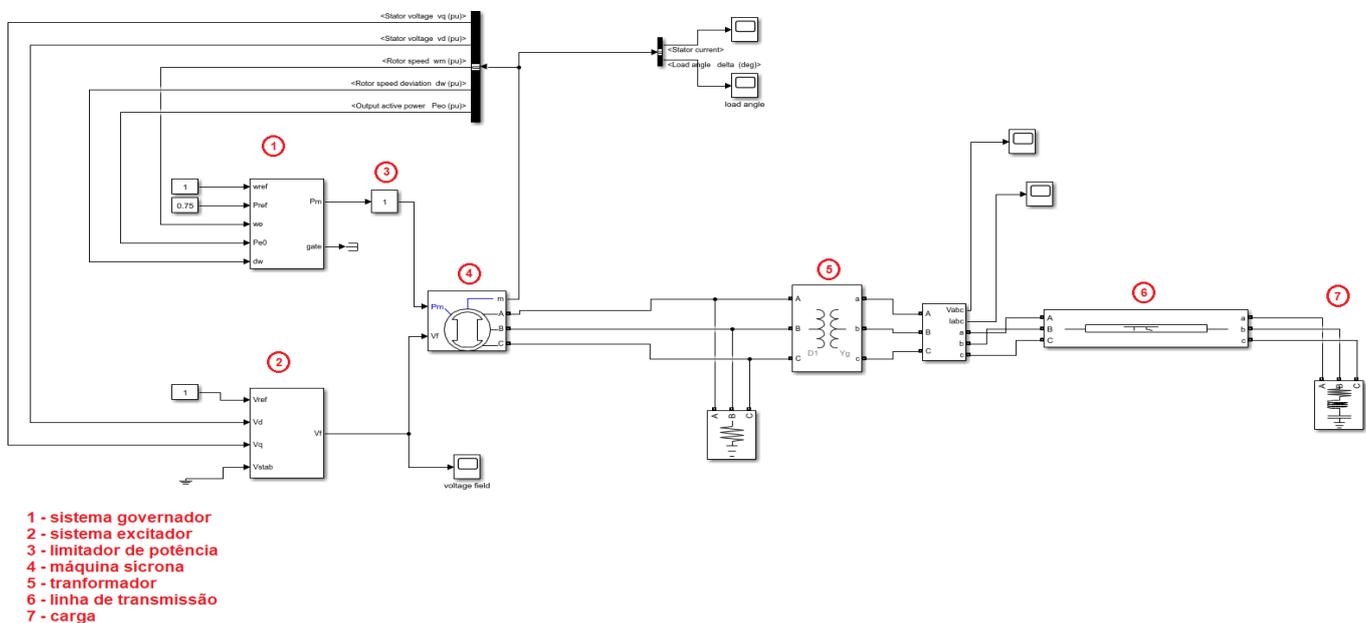
Por ser a forma de geração mais expressiva no Brasil, a análise comparativa será entre a geração hidráulica e a nuclear, que é o foco deste estudo.

Assim, ciente de toda a base teórica exposta no capítulo três deste trabalho, pode-se observar que ao considerar o sistema completo, a contribuição da geração nuclear se dá principalmente antes da etapa de conversão de energia mecânica em elétrica, ou seja, antes de passar pela máquina síncrona. Isto se deve a natureza desta forma de geração que independe de fatores climáticos, portanto contribuindo para a estabilidade total do sistema.

Portanto, com este entendimento, temos uma noção do que esperar e de como manipular as ferramentas disponíveis para simular os ambientes desejados. Logo, será simulado uma situação em que ocorre uma redução de potência mecânica de uma usina hidroelétrica genérica, devido a fatores climáticos e uma usina nuclear que não é afetada por tais empecilhos.

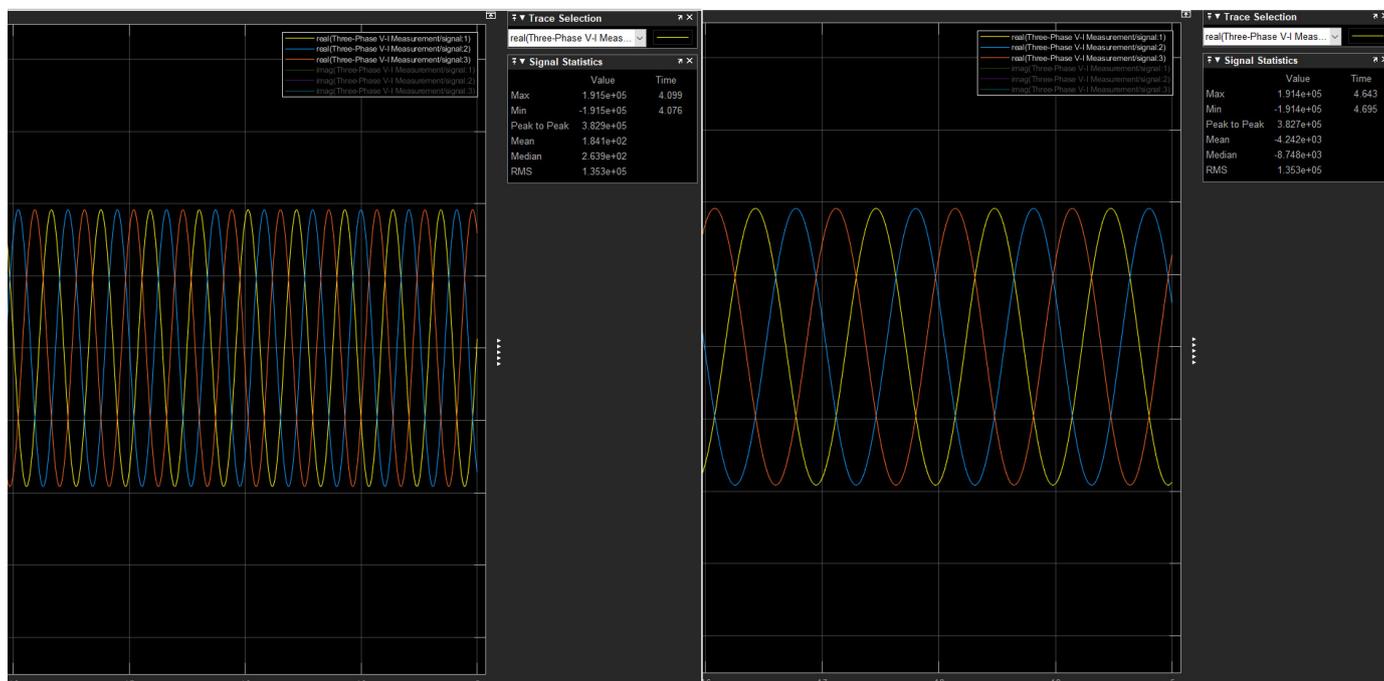
Em tal simulação foram utilizados apenas blocos nativos do Simulink [1], com parametros genéricos e buscando remontar a situação descrita acima, com base no estudo das referências citadas.

Figura 16 - Esquema de usina hidroelétrica no simulink



Fonte: autoral

Figura 17 - Análise da tensão com a queda de potência



Fonte: autoral

A comparação entre os gráficos de tensão trifásica, na mesma escala (figura 17) revela uma importante diferença em relação à frequência. O gráfico à esquerda representa uma situação padrão, enquanto que o da direita apresenta uma redução na frequência devido a uma queda na potência mecânica desta hidrelétrica hipotética.

Essa queda na frequência pode ter impactos significativos na qualidade e estabilidade da energia elétrica fornecida aos usuários, pois afeta diretamente a sincronização das redes de distribuição de energia. Além disso, pode levar a interrupções no fornecimento de energia e comprometer a segurança dos equipamentos elétricos ligados à rede. Portanto, em uma situação real, para garantir a estabilidade e um fornecimento de energia confiável e seguro, poderiam ser tomadas medidas como:

Controle da geração: Ajustando a quantidade de energia gerada por unidades de geração, é possível ajustar a frequência da rede elétrica.

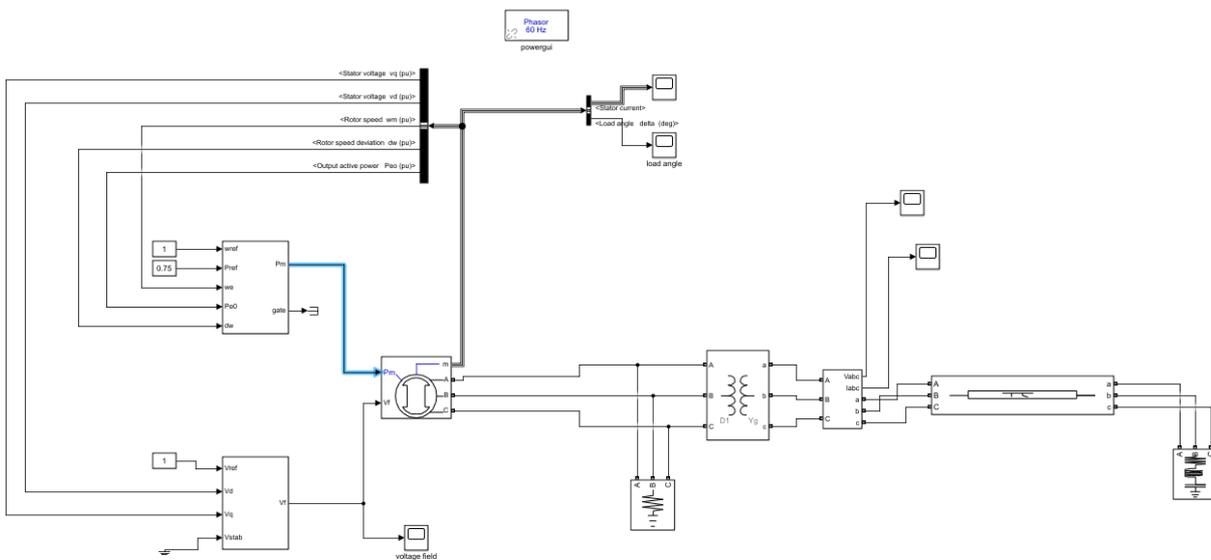
Sincronização de reserva: Adicionando unidades de geração ou cargas à rede elétrica, é possível sincronizar a frequência e corrigi-la caso haja algum desequilíbrio.

Controle automático de frequência: Sistemas de controle automático podem ser implementados para monitorar e ajustar a frequência da rede elétrica de maneira automática.

Uso de fontes de energia complementares: A adição de fontes de energia complementares, para ajudar a equilibrar a geração de energia e manter a frequência da rede elétrica estável.

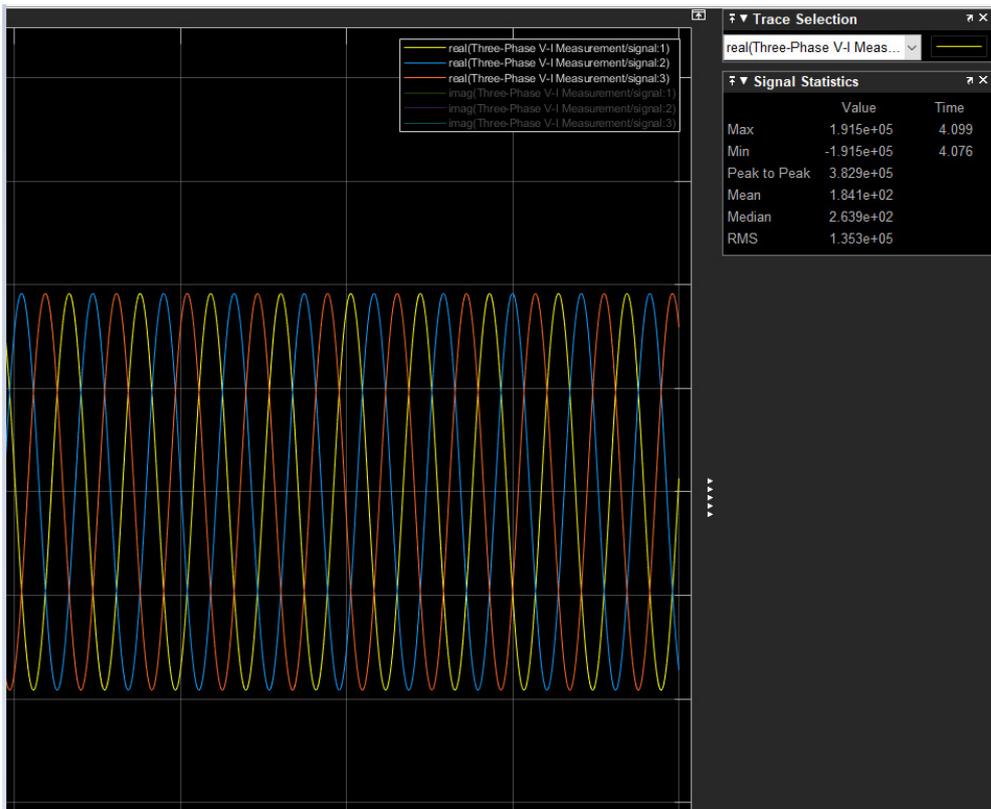
Assim, com base na análise exposta nas figuras 18 e 19, onde pode-se ver o esquema semelhante ao da figura 16, porém sem o fator limitante de potência mecânica, tais medidas seriam bem menos necessárias diante da estabilidade da usina nuclear.

Figura 18 - diagrama da usina nuclear



Fonte: autoral

Figura 19 - tensão gerada pelo esquema da usina nuclear



Fonte: autoral

## 4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi discutido conhecimentos fundamentais e necessários ao estudo e análise da estabilidade de sistemas elétricos de potência, elementos essenciais de máquinas síncronas, características de dispositivos conectados às redes elétricas e equacionamentos matemáticos. Este conjunto de conhecimentos se reúne nas ferramentas computacionais que foram utilizadas para comprovar as capacidades de simulação modernas.

Assim, ao considerar o sistema completo, e a natureza desta forma de geração que contribui para a estabilidade total do sistema.

Observamos que apesar de não contribuir diretamente contra falhas na distribuição, ainda assim, a geração nuclear demonstra forte constância no fornecimento de energia mecânica para a máquina síncrona geradora, o que contribui na prevenção de desgaste de outros equipamentos do sistema como um todo e evitando medidas relacionadas a contenção de gastos energéticos.

Com isso, o objetivo almejado foi concluído. No entanto, muito mais é possível de ser estudado, desde modelos mais complexos de máquinas até a interação dos elementos FACTS e cargas não lineares. Ainda assim, as simulações feitas demonstram a relevância do estudo e a importância da análise para a tomada de decisões.

## 5. REFERÊNCIAS

### [1] Power System Stability and Control:

KUNDUR,P. Power System Stability and Control. mcgraw hill, 1993 , pg.8

### [2] Power System Stability and Control:

KUNDUR,P. Power System Stability and Control. mcgraw hill, 1993 , pg.8

### [3] Electrical energy systems:

El-Hawary, M. E. Electrical energy systems. mcgraw hill, 2nd ed, 2008

### [4] Power System Stability and Control:

KUNDUR,P. Power System Stability and Control. mcgraw hill, 1993 , pg.19

### [5] Máquinas elétricas:

FITZGERALD E KINGSLEY. Máquinas elétricas. AMGH, 2014.

### [6] Máquinas elétricas:

FITZGERALD E KINGSLEY. Máquinas elétricas. AMGH, 2014. pg .308

### [7] Modelling and simulation of synchronous machine transient analysis using SIMULINK :

Modelling and simulation of synchronous machine transient analysis using SIMULINK. ResearchGate ,2022. Disponível em: <[\(PDF\) Modelling and simulation of synchronous machine transient analysis using SIMULINK](#)>. Acesso em: 27 out. 2022.

### [8] Gerador Síncrono e Assíncrono :

Gerador Síncrono e Assíncrono | Quais Diferenças? Como Funciona?. ALUGAGERA ,2022. Disponível em: <[Gerador Síncrono e Assíncrono | Quais Diferenças? Como Funciona?](#)>. Acesso em: 30 out. 2022.

### [9] Dispositivos FACTS :

Dispositivos FACTS – Parte 1. ProNext,2022.

Disponível em: <[Dispositivos FACTS – Parte 1 - ProNext Engenharia](#)>. Acesso em: 2 nov. 2022.

### [10] Cargas não lineares :

B. N. Rao, Y. Suresh, A. K. Panda, B. S. Naik and V. Jammala, "Development of cascaded multilevel inverter based active power filter with reduced transformers," in CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. 5, no. 2, pp. 147-157, June 2020, doi: 10.24295/CPSSTPEA.2020.00013.

**[11] COMO FUNCIONA A GERAÇÃO HIDRÁULICA? :**

COMO FUNCIONA A GERAÇÃO HIDRÁULICA?. CBIE,2022.

Disponível em: <[Como funciona a geração hidráulica? – CBIE](#). >. Acesso em: 2 nov. 2022.

**[12] VOCÊ SABE COMO FUNCIONA UM AEROGERADOR? :**

VOCÊ SABE COMO FUNCIONA UM AEROGERADOR?. NEOENERGIA,2022.

Disponível em: <[Você sabe como funciona um aerogerador? - Neoenergia](#) >. Acesso em: 2 nov. 2022.

**[13] Geração térmica :**

Geração térmica. antoniolima.web , 2022.

Disponível em: <[geração térmica](#). >. Acesso em: 2 nov. 2022.

**[14] Energia térmica :**

Energia térmica.PreParaENEM, 2022.

Disponível em: <[Energia térmica: o que é, tipos, fórmula, vantagens](#). >. Acesso em: 3 nov. 2022.

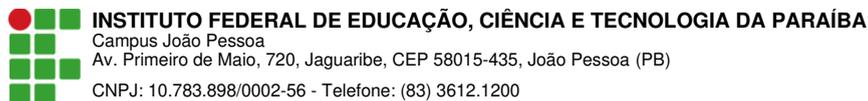
**[15] Energia Nuclear :**

Energia Nuclear. EletroNuclear, 2022.

Disponível em: <[Energia Nuclear](#) >. Acesso em: 2 nov. 2022.

**[16] Power Systems Control and Stability :**

P.M. Anderson. Power Systems Control and Stability.,2022. Disponível em: <[\(PDF\) Power-Systems-Control-and-Stability-2nd-Ed-by-P-M-Anderson-a-a-Fouad.pdf | Rocío Venegas - Academia.edu](#) >. Acesso em: 5 nov. 2022.



## Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

### TCC com ordem de folhas corrigida

**Assunto:** TCC com ordem de folhas corrigida  
**Assinado por:** Ricardo Cunha  
**Tipo do Documento:** Anexo  
**Situação:** Finalizado  
**Nível de Acesso:** Ostensivo (Público)  
**Tipo do Conferência:** Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Ricardo Falcão Carneiro da Cunha, ALUNO (20182610033) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA**, em 16/03/2023 11:13:12.

Este documento foi armazenado no SUAP em 16/03/2023. 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: 780464  
Código de Autenticação: c4491b202b

