



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DAS ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDERSON VIEIRA FERNANDES

**PARAMETRIZAÇÃO E ANÁLISE DE UM MODELO DE UMA MÁQUINA
SÍNCRONA PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS**

CARAÚBAS

2018

ANDERSON VIEIRA FERNANDES

**PARAMETRIZAÇÃO E ANÁLISE DE UM MODELO DE UMA MÁQUINA
SÍNCRONA PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Rodrigo Prado de Medeiros, Prof. Dr.

Co-orientador: Rafael Lucas da Silva França, Eng. Msc.

CARAÚBAS

2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

V363p Vieira Fernandes, Anderson.

PARAMETRIZAÇÃO E ANÁLISE DE UM MODELO DE UMA
MÁQUINA SÍNCRONA PARA ESTUDOS DE
TRANSITÓRIOS / Anderson Vieira Fernandes. - 2018.
70 f. : il.

Orientador: Rodrigo Prado de Medeiros.
Coorientador: Rafael Lucas da Silva França.
Monografia (graduação) - Universidade
Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Elétrica, 2018.

1. Potência. 2. Máquinas Síncronas. 3.
Estabilidade. I. Prado de Medeiros, Rodrigo,
orient. II. Lucas da Silva França, Rafael,
co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANDERSON VIEIRA FERNANDES

**PARAMETRIZAÇÃO E ANÁLISE DE UM MODELO DE UMA MÁQUINA
SÍNCRONA PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS**

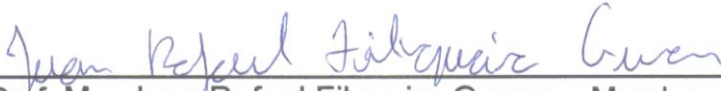
Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

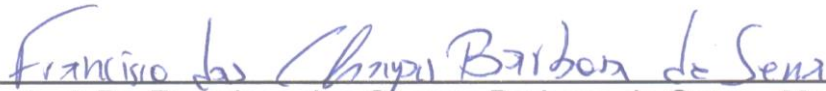
Defendida em: 13 / 09/ 2018

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Rodrigo Prado de Medeiros – Presidente


Eng. Me. Rafael Lucas da Silva França – Coorientador


Prof. Me. Juan Rafael Filgueira Guerra – Membro


Prof. Dr. Francisco das Chagas Barbosa de Sena – Membro

*Ao meu avô Bonifácio Fernandes (In
Memoriam).*

*A Deus pela vida e por todos os aprendizados
que me concedeu até hoje.
Aos meus pais, Alexandre Fernandes Neto e
Consolação Vieira Fernandes.
À minha irmã Alessandra Vieira Fernandes.
(presentes)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por ter me guiado e proporcionado sabedoria ao decorrer do curso.

Aos meus pais, por todo o amor, educação e confiança. E por sempre mostrar que o estudo é a porta para o sucesso profissional.

À minha irmã Alessandra Fernandes, por ser meu espelho para vencer os desafios da vida e minha psicóloga nos momentos difíceis.

À minha namorada Vivian de Araújo, por estar sempre ao meu lado mesmo eu estando distante e por apoiar tudo que faço. Sem dúvida, você foi o melhor presente que a vida me deu.

À família mais feliz desse mundo, Francigleibe Duarte Figueiredo, Jainara Fernandes Figueiredo e Tobias Fernandes Figueiredo por todo apoio, carinho e confiança.

Ao professor Dr. Rodrigo Prado de Medeiros e ao Engenheiro Eletricista Msc. Rafael Lucas da Silva França pela paciência e por terem me orientado, transmitindo o conhecimento para a realização deste trabalho.

Aos grandes amigos que a graduação me proporcionou em especial Alefjohn, Gonçalo, Esdras, Garibaldi, Alan, aos grupos de whatsapp Thuplá Thuplá, e Bobilete Voadora. A sequência dos nomes não aumenta ou diminui o carinho que eu sinto por cada um de vocês.

À equipe Acceptor Aerodesign SAE por todo conhecimento transmitido ao longo da graduação.

“ Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,
mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou
o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o
que era antes. ”

(Marthin Luther King)

RESUMO

A demanda da população mundial por energia elétrica vem crescendo exponencialmente nas últimas décadas, permitindo com que os sistemas elétricos de potência se tornem cada vez mais complexos para que o consumo possa ser ininterrupto e com elevada qualidade de serviço. Como fontes geradoras de energia elétrica, as máquinas síncronas apresentam uma contribuição de grande importância para o sistema elétrico, podendo suprir, em boa parte, o consumo de energia elétrica demandado pela população de uma região. Portanto, o estudo minucioso sobre o comportamento operativo dessas máquinas tem se aprimorado ao longo do tempo, tornando necessário modelá-las adequadamente, a fim de se manter o seu sincronismo e a sua estabilidade perante diversas situações transitórias que podem ocorrer durante o seu funcionamento, a exemplo de curtos-circuitos em seus terminais e perdas súbitas de carga. Dessa maneira, esse trabalho tem como objetivo realizar uma parametrização e análise de um gerador síncrono trifásico de pólos salientes em um *software* de simulação para a avaliação do seu comportamento perante algumas condições em regime permanente e em regime transitório. Os resultados avaliados demonstram o comportamento do gerador síncrono e a sua capacidade de operação quanto à manutenção do seu sincronismo e da estabilidade do sistema a ele conectado.

Palavras-Chave: Potência, Máquinas Síncronas, Estabilidade.

ABSTRACT

The world population's demand for electric energy has been growing exponentially in the last decades, allowing power systems to become increasingly complex so that consumption can be uninterrupted and with a high quality of service. As sources of electric power, synchronous machines have a very important contribution to the electric system, which can supply, in large part, the consumption of electric energy demanded by the population of a region. Therefore, the detailed study on the operational behavior of these machines has improved over time, making it necessary to model them properly, in order to maintain their synchronism and their stability in the face of various transient situations that may occur during their operation, such as short circuits at its terminals and sudden losses of load. In this way, the objective of this work is to perform the modeling of a three-phase synchronous generator of protruding poles in a simulation software for the evaluation of its behavior under some conditions in a permanent regime and in a transitional regime. The results evaluated demonstrate the behavior of the synchronous generator and its ability to operate to maintain its synchronism and the stability of the system connected to it.

Keywords: Power, Synchronous Machine, Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação das máquinas elétricas.	18
Figura 2: Gerador Síncrono de Pólos Salientes.	19
Figura 3: Eixo direto e em quadratura na máquina síncrona de pólos salientes.	20
Figura 4: Máquina Síncrona de Pólos Saliente.	24
Figura 5: Métodos construtivos de máquinas síncronas: a) rotor de pólos salientes; b) rotor de pólos lisos.	24
Figura 6: Circuito da máquina síncrona: a) estator; b) rotor.	26
Figura 7: Circuito equivalente para o eixo direto.	34
Figura 8: Modelo simplificado do circuito equivalente para o eixo direto.	35
Figura 9: Circuito equivalente para o eixo em quadratura.	35
Figura 10: Tensão e corrente de armadura em função da corrente de campo.	37
Figura 11: Formas das ondas de tensão e corrente para o ensaio de baixo escorregamento.	37
Figura 12: Correntes nas três fases do estator após aplicação do Curto-Circuito Abrupto.	39
Figura 13: Tensão eficaz para a rejeição de carga do eixo direto.	41
Figura 14: Rejeição de carga de eixo em quadratura.	43
Figura 15: Caminho do fluxo magnético no regime subtransitório: a) enrolamento do eixo em quadratura; b) enrolamento do eixo direto.	44
Figura 16: Caminho do fluxo magnético no regime transitório: a) enrolamento do eixo em quadratura; b) enrolamento do eixo direto.	45
Figura 17: Caminho do fluxo magnético no regime permanente: a) enrolamento do eixo em quadratura; b) enrolamento do eixo direto.	45
Figura 18: Classificação dos diferentes tipos de estabilidade no SEP.	47
Figura 19: Gráfico que relaciona potência elétrica com o ângulo de carga.	49
Figura 20: IDE do <i>Simulink</i> Matlab.	52
Figura 21: Diagrama de blocos para simulação.	53
Figura 22: Modelo da Máquina Síncrona usado para simulação.	54
Figura 23: Bloco de configuração da Máquina Síncrona.	55
Figura 24: Diagrama de Blocos do bloco “ <i>Hydraulic Turbine and Governor</i> ”.	56
Figura 25: Diagrama de blocos do modelo não linear da turbina hidráulica.	57
Figura 26: Diagrama de blocos do sistema de segunda ordem do servomotor.	57
Figura 27: Diagrama de blocos para o bloco <i>Excitation System</i>	57

Figura 28: Tensões e correntes nas fases do estator do gerador síncrono de pólos salientes...	61
Figura 29: Comportamento do ângulo de carga, potência ativa e velocidade do rotor do gerador síncrono de pólos salientes.	62
Figura 30: Resposta do ângulo de carga e potência ativa após uma entrada rampa na potência mecânica do gerador síncrono de pólos salientes.....	62
Figura 31: Reposta da corrente de campo e potência reativa após uma entrada rampa na tensão de excitação do gerador síncrono de pólos salientes.	63
Figura 32: Tensões e correntes nas fases do estator após retirada brusca de carga.....	64
Figura 33: Velocidade do rotor antes e depois da retirada de carga.....	65
Figura 34: Correntes nas fases do estator antes e depois da aplicação de um curto-circuito trifásico.....	66
Figura 35: Tensões nas fases do estator antes e depois da aplicação do curto-circuito trifásico.....	66
Figura 36: Comportamento do ângulo de carga e potência ativa da máquina antes e depois do curto-circuito trifásico.	67
Figura 37: Velocidade do rotor antes e depois do curto-circuito trifásico.	68
Figura 38: Ângulo crítico de carga em função do ângulo de carga.	69
Figura 39: Ângulo crítico de carga em função do tempo crítico de abertura da falta.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros da Máquina Síncrona.	58
Tabela 2: Parâmetros elétricos do Transformador Elevador.	59
Tabela 3: Parâmetros distribuídos para a linha de transmissão.	59
Tabela 4: Parâmetros para o Equivalente de Thévenin.	60
Tabela 5: Ângulo de carga, ângulo crítico de carga e tempo crítico de abertura da falta.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS

A = Amper;

Hz = Hertz;

kg = Quilograma;

m = metros;

N = Newton;

pu = por unidade;

rad ele/s = radianos elétricos por segundo;

rpm = rotações por minuto;

s = segundos;

V = Volts;

Wb = Weber;

Ω = ohms;

$\frac{d^2\delta}{dt^2}$ = aceleração angular da máquina;

e_a, e_b, e_c = tensões trifásicas instantâneas do estator;

e_d, e_q, e_0 = tensões trifásicas instantâneas do estator no domínio (d, q, 0);

e_{fd} = tensão instantânea de campo;

E = tensão instantânea;

E' = tensão induzida nos enrolamentos do estator;

E_∞ = tensão do barramento infinito;

f = frequência;

H = constante de inércia;

I_a, I_b, I_c = correntes trifásicas instantâneas do estator;

i_d, i_q = corrente no eixo direto e em quadratura;

I_{fd}, I_{kd}, I_{kq} = correntes de campo e dos amortecedores;

$I_{m\acute{a}x}, I_{m\acute{i}n}$ = correntes máxima e mínima;

I = corrente eficaz da armadura no curto-circuito;

I_0 = corrente antes da abertura do curto;

i_{fd0} = corrente antes da abertura do curto;

I_{d0} = corrente de armadura inicial de eixo direto anterior a rejeição;

i_{q0} = corrente do eixo em quadratura antes da rejeição;

J = momento de inércia da máquina;

L_d, L'_d, L''_d = valores em pu das indutâncias de regime permanente, transitória e subtransitória de eixo direto;

L_q, L''_q = indutâncias em pu de regime permanente e subtransitório do eixo em quadratura;

n = velocidade da máquina;

p = número de polos;

P_a = Potência de aceleração;

P_m = Potência mecânica;

P_{m0} = potência mecânica inicial;

P_{m1} = potência mecânica final;

P_e = Potência elétrica;

δ_0 = ângulo de carga inicial;

δ_1 = Ângulo de carga correspondente a P_{m1} ;

δ_{crit} = ângulo de carga crítico;

T'_{d0}, T''_{d0} = constantes de tempo de circuito aberto transitório e subtransitório respectivamente;

T'_d, T''_d = constantes de tempo subtransitório e transitório de curto-circuito do eixo direto;

T''_{q0} = constante de tempo subtransitório do eixo em quadratura;

T_{kd} = constante de tempo do fluxo concatenado do amortecedor de eixo direto;

T_e = torque eletromagnético;

T_a, T_m = torque de aceleração e mecânico da máquina;

X_s = reatância equivalente entre a barra interna da máquina e a barra infinita;

t_{crit} = tempo crítico de abertura da falta;

$U_{m\acute{a}x}, U_{m\acute{i}n}$ = tensões máximo e mínimo;

V_q = tensão no eixo de quadratura;

V_{rp} = tensão de armadura em regime permanente;

V_0 = tensão de armadura antes da rejeição;

ω_r = velocidade angular do rotor;

X_{aa}, X_{bb}, X_{cc} = reatâncias próprias dos enrolamentos de armadura;

$X_{ab}, X_{ac}, X_{ba}, X_{bc}, X_{ca}, X_{cb}$ = reatâncias mútuas dos enrolamentos de armadura;

$X_{afd}, X_{bfd}, X_{cfd}$ = reatâncias mútuas entre os enrolamentos de armadura e o enrolamento de campo;

$X_{akd}, X_{akq}, X_{bkd}, X_{bkq}, X_{ckd}, X_{ckq}$ = reatâncias mútuas entre os enrolamentos de armadura e os enrolamentos de amortecimento;

X_d, X_q = reatâncias no domínio (d, q);

X_d', X_d'' = reatância subtransitório e transitório do eixo direto;

X_q'' = reatância transitório do eixo em quadratura;

θ = ângulo entre o eixo d e os enrolamentos da fase a;

ψ_a, ψ_b, ψ_c = Fluxo concatenado dos enrolamentos do estator;

ψ_q, ψ_d, ψ_0 = fluxo concatenado no eixo em quadratura, direto e de sequência zero respectivamente;

$\psi_{fd}, \psi_{jd}, \psi_{jq}$ = fluxo concatenado no enrolamento de campo e nos enrolamentos de amortecimentos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1.	OBJETIVOS.....	21
1.1.1.	OBJETIVO GERAL.....	21
1.1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.2.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	21
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1.	A MÁQUINA SÍNCRONA.....	23
2.2.	MODELAGEM ELÉTRICA DO GERADOR SÍNCRONO.....	26
2.3.	A TRANSFORMADA DE PARK	29
2.4.	MODELAGEM MECÂNICA DO GERADOR SÍNCRONO.....	32
2.4.1.	TORQUE ELETROMAGNÉTICO	32
2.4.2.	TORQUE DE ACELERAÇÃO	33
2.4.3.	TORQUE MECÂNICO	33
2.4.4.	EQUAÇÃO DE OSCILAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	33
2.5.	CIRCUITOS EQUIVALENTES.....	34
2.5.1.	CIRCUITO EQUIVALENTE DO EIXO DIRETO	34
2.5.2.	CIRCUITO EQUIVALENTE DO EIXO EM QUADRATURA.....	35
2.6.	ENSAIOS ELÉTRICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	36
2.6.1.	ENSAIOS EM REGIME PERMANENTE.....	36
2.6.1.1.	ENSAIO DE SATURAÇÃO EM ABERTO E DE CURTO-CIRCUITO	36
2.6.1.2.	ENSAIO DE BAIXO ESCORREGAMENTO	37
2.6.2.	ENSAIOS EM REGIME TRANSITÓRIO.....	38
2.6.2.1.	ENSAIO DE CURTO-CIRCUITO ABRUPTO	38
2.6.2.2.	ENSAIO DE RECUPERAÇÃO DE TENSÃO.....	40
2.6.2.3.	ENSAIO DE REJEIÇÃO DE CARGA DE EIXO DIRETO	41
2.6.2.4.	ENSAIO DE REJEIÇÃO DE CARGA DE EIXO EM QUADRATURA	42
2.7.	SIGNIFICADO FÍSICO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA SÍNCRONA	43
2.7.1.	PERÍODO SUBTRANSITÓRIO	44
2.7.2.	PERÍODO TRANSITÓRIO.....	44
2.7.3.	PERÍODO DE REGIME PERMANENTE	45

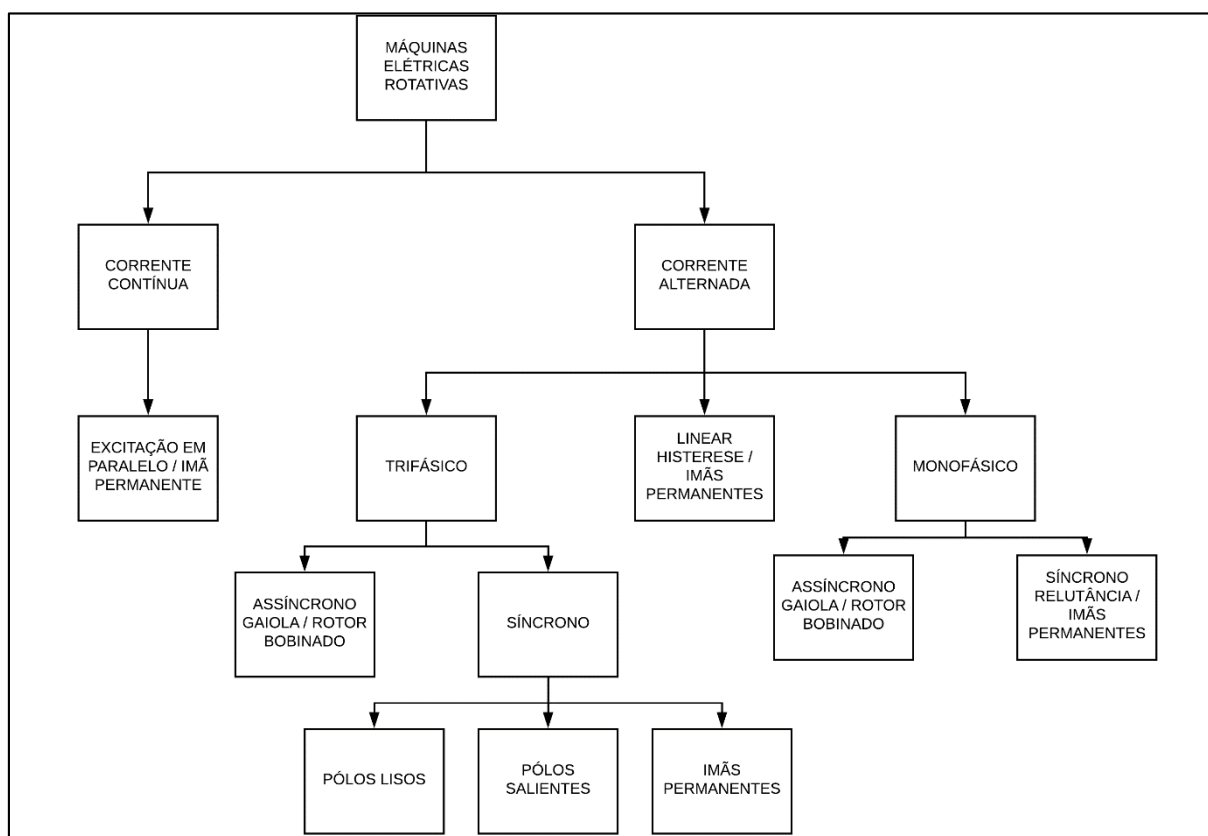
2.8. ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	46
2.8.1. CRITÉRIO DAS ÁREAS IGUAIS	48
3. METODOLOGIA	52
3.1. DIAGRAMA DE BLOCOS PARA A SIMULAÇÃO DO SISTEMA	52
3.2. PARÂMETROS ELÉTRICOS PARA SIMULAÇÃO.....	58
4. RESULTADOS.....	61
4.1. ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE	61
4.2. ANÁLISE EM REGIME TRANSITÓRIO	63
4.2.1. PERDA SÚBITA DE CARGA	63
4.2.2. CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICO NOS TERMINAIS DO ESTATOR	65
5. CONCLUSÃO	71
6. REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas são dispositivos que podem converter energia elétrica em energia mecânica e energia mecânica em energia elétrica. Quando a energia elétrica é convertida em energia mecânica, a máquina está trabalhando como motor, no entanto quando o processo é inverso, a máquina funciona como um gerador (CHAPMAN, 2013).

Segundo Mamede Filho (2017), as máquinas elétricas rotativas podem ser divididas em dois grandes grupos no que diz respeito à sua excitação: as máquinas de corrente contínua (CC) e as máquinas de corrente alternada (CA). Na Figura 1 apresenta-se um fluxograma ilustrando a classificação das máquinas elétricas quanto à sua forma de excitação.

Figura 1: Classificação das máquinas elétricas.



Fonte: Autoria Própria.

As máquinas de corrente contínua são aquelas acionadas a partir de uma fonte de corrente contínua. Essas máquinas são utilizadas quando se quer ter um controle fino da velocidade em um processo de fabricação, por exemplo. As máquinas de corrente alternada, por sua vez, são acionadas por meio de uma fonte de alimentação alternada, e podem ser

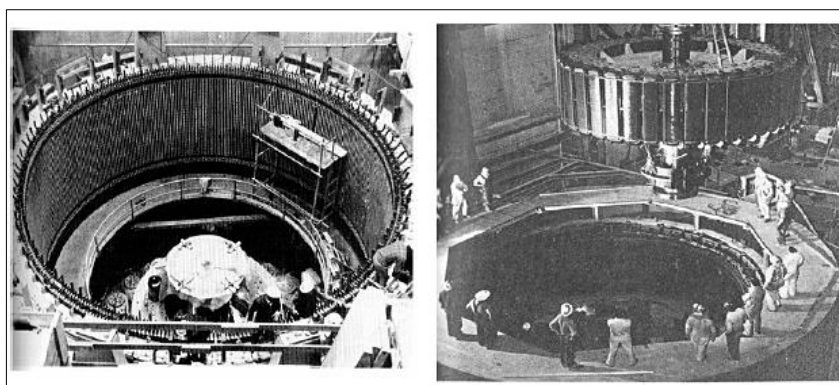
trifásicas ou monofásicas, possuindo diversas aplicações desde a geração de energia, a exemplo dos geradores em grandes usinas hidrelétricas, até a sua aplicação no setor industrial, a exemplo dos motores devido à sua simplicidade de construção, vida útil longa, preço e manutenção reduzidos quando comparados com as máquinas CC (MAMEDE FILHO, 2017).

No tocante aos aspectos construtivos, as máquinas de corrente alternada podem ser divididas em dois grupos como: máquinas assíncronas (ou de indução) e máquinas síncronas. Apesar da existência das máquinas CC, a energia no processo de conversão é primordialmente obtida com a utilização das máquinas de corrente alternada (ARAUJO, 2011).

Segundo Bim (2014), tradicionalmente, a produção de energia elétrica em corrente alternada no Brasil é realizada, em quase toda a sua totalidade, por meio de geradores síncronos de potência elevada, como por exemplo, os geradores da Usina Hidrelétrica de Itaipu que possuem potência nominal de cerca de 737 MVA operando com uma frequência de 60 Hz. Usinas eólicas e nucleares também utilizam geradores síncronos na produção de energia elétrica, apresentando características de potência típicas para cada forma de geração.

Ainda segundo Bim (2014), as máquinas síncronas, quando comparadas com as máquinas de indução, apresentam vantagens quanto ao funcionamento para diferentes cargas com fatores de potência capacitivo, indutivo e resistivo, por meio do ajuste da corrente de campo, possuindo também uma eficiência mais elevada. Outro aspecto importante diz respeito ao circuito de excitação de campo. Na máquina síncrona, há um circuito independente para a obtenção do campo, ao passo que na máquina de indução a corrente de campo é fornecida por meio da indução magnética em seus enrolamentos de campo (CHAPMAN, 2013). A Figura 2 apresenta um gerador síncrono de pólos salientes de grande potência.

Figura 2: Gerador Síncrono de Pólos Salientes.



Fonte: Antunes (2007).

Dessa maneira, as máquinas síncronas são equipamentos que exercem papel fundamental em um sistema elétrico de potência (SEP), possuindo contribuições vitais para a manutenção e evolução dos padrões de vida de uma sociedade contemporânea que depende diretamente do consumo de energia elétrica (SOUSA, 2011).

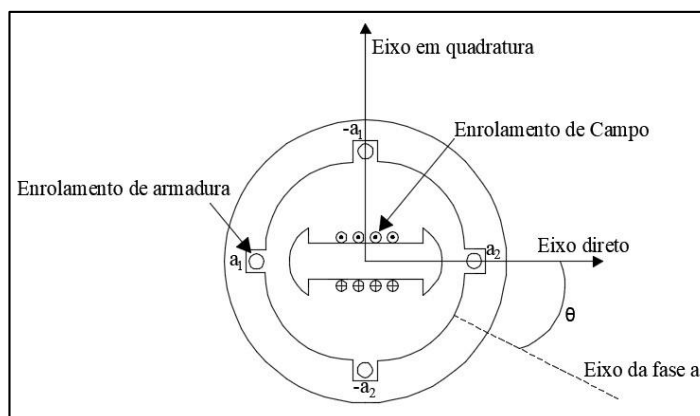
Devido à importância que as máquinas síncronas apresentam para a operação do sistema elétrico de potência, estudos para a obtenção de modelos cada vez mais representativos para o seu funcionamento em condições transitórias são constantemente requeridos pelos centros de pesquisa.

Segundo Bernades Junior (2015), a estimação de parâmetros elétricos, tais como as reatâncias (subtransitória, transitória e permanente) que surgem na máquina devido à indutância associada aos circuitos equivalentes de eixo direto e de quadratura ao longo do tempo, têm sido tema de estudo de muitos pesquisadores. A criação de métodos para a obtenção desses parâmetros e a utilização dos seus diversos modelos representativos foram desenvolvidos para esse importante equipamento.

O avanço da tecnologia computacional permitiu o surgimento de uma gama de ferramentas que proporcionam novas formas de modelagem e simulações com a implementação de novos modelos nunca antes construídos, tornando possível um modelo de máquina que possui um comportamento mais próximo da realidade (SOUSA, 2011).

A modelagem de uma máquina síncrona se caracteriza pela construção de circuitos equivalentes de eixo direto e de quadratura (Figura 3), bem como na identificação de parâmetros que compõem o circuito. Em geral, o próprio fabricante desses equipamentos fornece os parâmetros da máquina, porém quando isso não é possível, existem ensaios práticos que permitem encontrar os valores desses parâmetros (BERNADES JUNIOR, 2015).

Figura 3: Eixo direto e em quadratura na máquina síncrona de pólos salientes.



Fonte: Autoria Própria.

A obtenção de modelos matemáticos que demonstrem o comportamento de uma máquina síncrona é de fundamental importância para o estudo de fenômenos elétricos que possam interferir no seu funcionamento (SOUSA, 2011). Além disso, a correta modelagem desse equipamento torna possível a observação do seu comportamento sob diversas condições operativas, tais como situações de retirada brusca de cargas, variações de velocidade e ocorrência de curto-circuito (POSSATTI, 2013). Portanto, a obtenção de modelos precisos para as máquinas síncronas permite a determinação dos seus limites de condições operativas, a fim de preservar a sua integridade, bem como a integridade dos equipamentos do sistema elétrico a elas conectados (BERNADES JUNIOR, 2015).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma parametrização e análise de um modelo dinâmica de um gerador síncrono trifásico de pólos salientes em um *software* de simulação.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Estudar máquinas elétricas;
- Desenvolver simulações para prever o comportamento da máquina síncrona em várias condições operativas;
- Verificar o perfil de estabilidade de uma máquina síncrona quando da ocorrência de um curto-circuito trifásico em seus terminais.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em 4 capítulos, conforme descrito abaixo:

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre as máquinas síncronas, bem como de sua modelagem matemática usando a Transformada de Park. Ainda está presente neste capítulo, a modelagem mecânica, alguns tipos de ensaios que podem ser realizados para descobrir parâmetros que incorporam o modelo da máquina síncrona e uma breve introdução sobre estabilidade em sistemas elétricos de potência.

No capítulo 3 apresenta a metodologia da pesquisa proposta, bem como o *software* de simulação utilizado para obtenção dos resultados.

No capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir da simulação do sistema por meio do *software* computacional.

O capítulo 5 descreve a conclusão do trabalho, resumizando os principais aspectos desenvolvidos com esta pesquisa e associando os resultados alcançados às expectativas e às sugestões para possíveis trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado uma revisão bibliográfica das temáticas concernentes a esse estudo, sendo abordado, primordialmente, os detalhes acerca da modelagem exata de uma máquina síncrona.

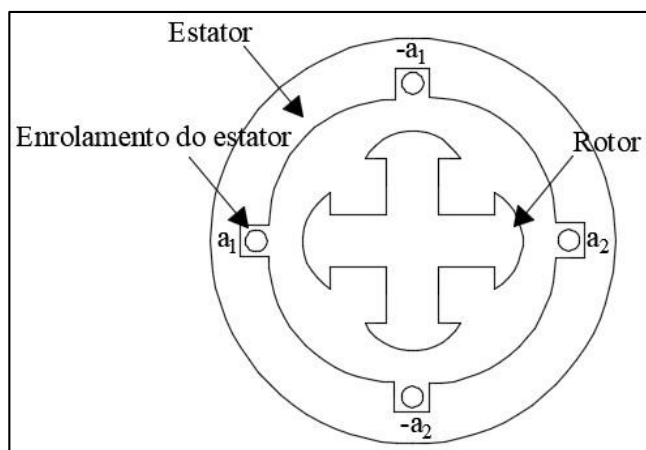
2.1. A MÁQUINA SÍNCRONA

A máquina síncrona, definida como motor ou gerador, constitui uma máquina de corrente alternada (CA), na qual uma excitação CC é fornecida ao enrolamento de campo que está localizado normalmente no rotor, além disso uma corrente alternada flui no enrolamento de armadura que está instalado no estator da máquina. A máquina é denominada síncrona devido ao fato de o campo gerado no rotor girar na mesma velocidade que o campo girante criado em sua armadura (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2006).

Segundo Chapman (2013), estes geradores são denominados síncronos em virtude da frequência elétrica produzida estar sincronizada com a taxa de rotação dos campos magnéticos, isto é, com a velocidade mecânica de rotação do gerador. Para Silva (2016), a palavra “síncrono” indica que a velocidade do rotor se iguala à velocidade do campo magnético girante da máquina, entrando em sincronismo e operando em regime permanente.

O rotor da máquina síncrona se caracteriza por ser a parte girante, já o estator corresponde à sua parte estática – fixada próximo à carcaça da máquina. No estator está presente o enrolamento de armadura, composto por um núcleo ferromagnético. Esses enrolamentos normalmente são feitos de cobre e possuem as três fases (a, b e c) e eixos magnéticos defasados de 120 graus entre si. O núcleo ferromagnético é composto por um empilhamento de chapas axiais de material de baixa relutância, como ferrosilício, o qual diminui o fluxo disperso e concentra o campo no entreferro (BERNADES JUNIOR, 2015). O rotor é constituído por um núcleo ferromagnético e pelo enrolamento de campo excitado por um circuito de corrente contínua, denominado excitatriz. Conforme Chapman (2013), o rotor é um grande eletroímã no qual aplica-se uma corrente contínua para gerar o campo magnético principal da máquina. A Figura 4 demonstra um corte de uma máquina síncrona de pólos salientes.

Figura 4: Máquina Síncrona de Pólos Salientes.

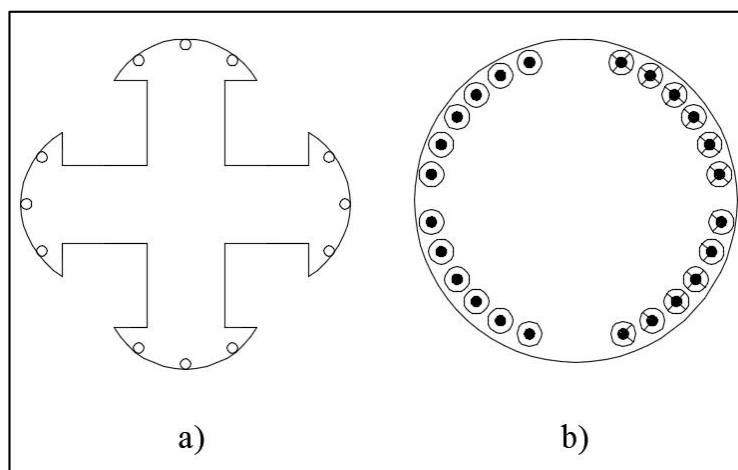


Fonte: Autoria Própria.

Os rotores podem ser de pólos lisos ou salientes. Rotores de pólos lisos são empregados, usualmente, em máquinas que giram em velocidades elevadas com um número de pólos pequenos (cerca de 2 ou 4 pólos, por exemplo). Esses rotores são empregados em turbogeradores e em sistemas de geração distribuída. Já os rotores de pólos salientes são utilizados em máquinas que operam com baixa rotação, como os geradores de centrais hidrelétricas que são acoplados em turbinas hidráulicas. Devido à baixa rotação, utiliza-se um número de pólos maior para a produção da energia elétrica (PERES, 2013).

As características de velocidade referentes a cada tipo de rotor dizem respeito às forças que irão atuar nesse dispositivo durante o seu funcionamento, como por exemplo a força centrífuga. Em rotores de pólos lisos, por exemplo, devido ao fato de suas cavas estarem fechadas por talas metálicas (material não magnético), há uma resistência positiva a essa força. Por outro lado, nos rotores de pólos salientes, a força centrífuga poderá atingir valores que podem comprometer a resistência mecânica da fixação dos terminais polares (FERNANDES, 2006). A Figura 5 apresenta a geometria de um rotor com pólos lisos e com pólos salientes.

Figura 5: Métodos construtivos de máquinas síncronas: a) rotor de pólos salientes; b) rotor de pólos lisos.



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com Peres (2013), na máquina síncrona ainda estão presentes os enrolamentos amortecedores, localizados na superfície do rotor. Esses enrolamentos são curto-circuitados e tem a função de amortecer oscilações causadas em regimes transitórios, como a retirada brusca de cargas, oscilações na tensão e curtos-circuitos.

Segundo Souza (2017), o estator de um gerador síncrono é responsável por fornecer ao sistema conectado a ele as potências ativa e reativa. Conforme Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umans (2006), quando conectado à uma carga, o gerador síncrono atua como uma fonte de tensão na qual a frequência é diretamente proporcional à velocidade de acionamento da máquina motriz (acionador mecânico do gerador) e ao número de pólos do rotor, conforme apresentado na Equação (2.0):

$$f = \frac{n \times p}{120}, \quad (2.0)$$

em que:

f = frequência elétrica, em Hz;

n = velocidade da máquina, em rpm;

p = número de pólos do estator.

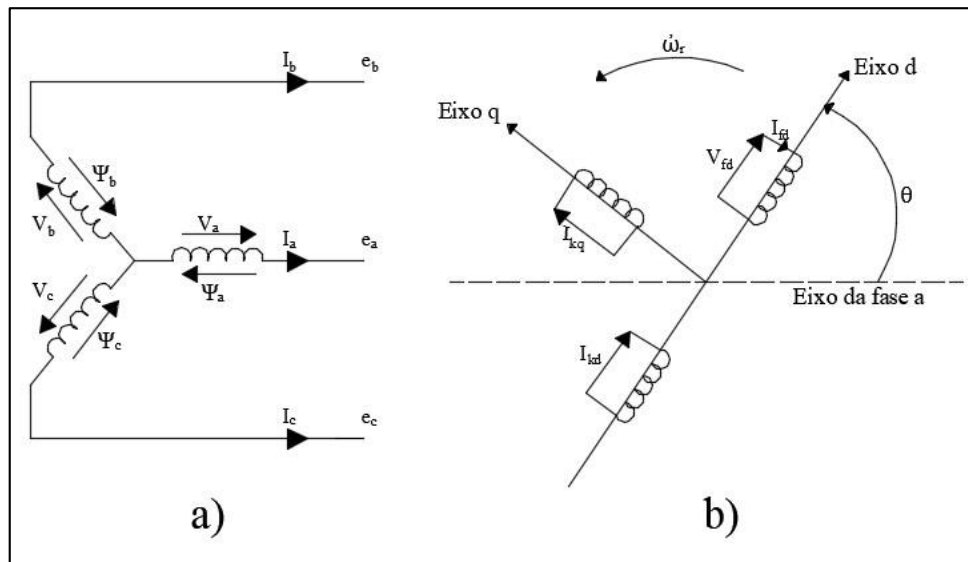
A geração de energia elétrica por meio do gerador síncrono ocorre da seguinte maneira: a corrente contínua no enrolamento de campo produz um fluxo magnético girante que induz uma força magnetomotriz (FMM) em cada uma das fases localizadas no enrolamento de armadura do estator, criando uma corrente circulante nessas fases que, por sua vez, gera um novo campo magnético distorcendo o campo magnético criado anteriormente. Esse fenômeno é conhecido como reação de armadura. A intensidade desse campo magnético é constante,

todavia ele gira na mesma velocidade angular do rotor. A combinação desses dois fluxos magnéticos gera um fluxo resultante que é variável em relação ao estator e estacionário no tocante ao rotor (SOUZA, 2017).

2.2. MODELAGEM ELÉTRICA DO GERADOR SÍNCRONO

Para modelar a máquina síncrona, consideram-se alguns aspectos construtivos da máquina em questão. Pondera-se, então, que a máquina se comporta como um gerador síncrono de pólos salientes, sendo constituída por enrolamentos trifásicos simétricos no estator com mesma resistência de armadura. Esses enrolamentos apresentam uma distribuição senoidal ao longo do entreferro, levando em consideração os efeitos mútuos com relação ao rotor. Pode-se discorrer ainda que as perdas por histerese magnética são desprezíveis, bem como os efeitos da saturação magnética. Nessa máquina, são considerados dois enrolamentos amortecedores que são curtos-circuitados. A Figura 6 apresenta os circuitos do estator e do rotor para o gerador síncrono.

Figura 6: Circuito da máquina síncrona: a) estator; b) rotor.



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 6, tem-se:

e_a, e_b, e_c = tensões trifásicas instantâneas do estator, em V;

e_{fd} = tensão instantânea de campo, em V;

I_a, I_b, I_c = correntes trifásicas instantâneas do estator, em A;

I_{fd}, I_{kd}, I_{kq} = correntes de campo e dos amortecedores, em A;

ψ_a, ψ_b, ψ_c = fluxo concatenado dos enrolamentos do estator, em Wb;

θ = ângulo entre o eixo d e os enrolamentos da fase a, em rad ele/s;

ω_r = velocidade angular do rotor, em rad ele/s.

As Equações (2.1) a (2.3) representam as tensões em cada fase para o circuito do estator:

$$e_a = \frac{d\psi_a}{dt} - R_a I_a, \quad (2.1)$$

$$e_b = \frac{d\psi_b}{dt} - R_a I_b, \quad (2.2)$$

$$e_c = \frac{d\psi_c}{dt} - R_a I_c, \quad (2.3)$$

Para o rotor, têm-se:

$$e_{fd} = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + R_{fd} I_{fd}, \quad (2.4)$$

$$0 = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + R_{jkd} I_{jkd}, \quad (2.5)$$

$$0 = \frac{d\psi_{jq}}{dt} + R_{jkq} I_{jkq}. \quad (2.6)$$

O sinal negativo nas Equações (2.1) a (2.3) está relacionado ao comportamento da máquina, adotada como sendo um gerador. Nas Equações (2.5) e (2.6), a soma é igual a zero, devido aos enrolamentos amortecedores estarem curto-circuitados, tornando nula a diferença de potencial nesses enrolamentos.

As equações de tensões podem ser rearranjadas no formato de matriz, dado por:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ e_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_{fd} \\ \psi_{jd} \\ \psi_{jq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{jkd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{jkq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_a \\ -I_b \\ -I_c \\ I_{fd} \\ I_{jkd} \\ I_{jkq} \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Para o fluxo concatenado no estator, têm-se as seguintes expressões:

$$\psi_a = -X_{aa}I_a - X_{ab}I_b - X_{ac}I_c + X_{afd}I_{fd} + X_{akd}I_{kd} + X_{akq}I_{kq}, \quad (2.8)$$

$$\psi_b = -X_{ba}I_a - X_{bb}I_b - X_{bc}I_c + X_{bfd}I_{fd} + X_{bkd}I_{kd} + X_{bkq}I_{kq}, \quad (2.9)$$

$$\psi_c = -X_{ca}I_a - X_{cb}I_b - X_{cc}I_c + X_{cfd}I_{fd} + X_{ckd}I_{kd} + X_{ckq}I_{kq}, \quad (2.10)$$

em que:

X_{aa}, X_{bb}, X_{cc} = reatâncias próprias dos enrolamentos de armadura, em Ω ;

$X_{ab}, X_{ac}, X_{ba}, X_{bc}, X_{ca}, X_{cb}$ = reatâncias mútuas dos enrolamentos de armadura, em Ω ;

$X_{afd}, X_{bfd}, X_{cfd}$ = reatâncias mútuas entre os enrolamentos de armadura e o enrolamento de campo, em Ω ;

$X_{akd}, X_{akq}, X_{bkd}, X_{bkq}, X_{ckd}, X_{ckq}$ = reatâncias mútuas entre os enrolamentos de armadura e os enrolamentos de amortecimento, em Ω .

Conforme observado nas Equações (2.8) a (2.10), o fluxo concatenado em cada fase corresponde à soma das reatâncias próprias e mútuas de cada fase com suas respectivas correntes, além das contribuições das reatâncias do rotor e dos enrolamentos amortecedores. Para o fluxo concatenado no rotor, têm-se:

$$\psi_{fd} = -X_{afd}I_a - X_{bfd}I_b - X_{cfd}I_c + X_{ffd}I_{fd} + X_{fkd}I_{kd} + X_{fkq}I_{kq}, \quad (2.11)$$

$$\psi_{jd} = -X_{jad}I_a - X_{jbd}I_b - X_{jcd}I_c + X_{jdfd}I_{fd} + X_{jdkd}I_{kd} + X_{jdkq}I_{kq}, \quad (2.12)$$

$$\psi_{jq} = -X_{jaq}I_a - X_{jbq}I_b - X_{jqc}I_c + X_{jqfd}I_{fd} + X_{jqkd}I_{kd} + X_{jqkq}I_{kq}, \quad (2.13)$$

em que:

$X_{ffd}, X_{jdkd}, X_{jdkq}, X_{jqkd}, X_{jqkq}$ = reatâncias próprias do enrolamento de campo e dos enrolamentos de amortecimento, em Ω ;

$X_{fkd}, X_{fkq}, X_{jdfd}, X_{jqfd}$ = reatâncias mútuas do enrolamento de campo com os enrolamentos de amortecimento, em Ω .

De forma análoga, o fluxo concatenado no rotor e nos enrolamentos amortecedores corresponde à soma das reatâncias próprias e mútuas de cada componente acrescidas das contribuições das reatâncias do enrolamento de armadura.

Matricialmente, têm-se que o fluxo concatenado é dado por:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_{fd} \\ \psi_{jd} \\ \psi_{jq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{aa} & X_{ab} & X_{ac} & X_{afd} & X_{akd} & X_{akq} \\ X_{ba} & X_{bb} & X_{bc} & X_{bfd} & X_{bkd} & X_{bkq} \\ X_{ca} & X_{cb} & X_{cc} & X_{cfd} & X_{ckd} & X_{ckq} \\ X_{afd} & X_{bfd} & X_{cfd} & X_{ffd} & X_{fkd} & X_{fkq} \\ X_{ad} & X_{bd} & X_{cd} & X_{dfd} & X_{dkd} & X_{dkq} \\ X_{aq} & X_{bq} & X_{cq} & X_{qfd} & X_{qkd} & X_{kq} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Devido ao fluxo magnético no estator ser variável com a angulação do rotor e consequentemente variável com o tempo, as equações de tensão, corrente e fluxo concatenado em cada fase do enrolamento de armadura se tornam complexas, o que dificulta o estudo do comportamento da máquina em várias fases de operação (PERES, 2017).

Para simplificar essas equações, P. H. Park (1929 – 1933) propõe um tratamento generalizado para a máquina síncrona, desenvolvendo uma série de equações fundamentais que relacionam tensões com fluxo concatenado, correntes elétricas e rotações da máquina (BERNADES JUNIOR, 2015). Esse procedimento foi realizado com a mudança de eixos de coordenadas, em que as grandezas vistas do estator são transformadas em grandezas equivalentes que giram no referencial do rotor, eliminando dessa maneira todas as variáveis que dependem da angulação (PERES, 2017). Essa mudança de eixo de coordenadas ficou conhecida como Transformada de Park.

2.3. A TRANSFORMADA DE PARK

Considera-se G uma grandeza que, para o caso de estudo, pode ser fluxo concatenado, corrente ou tensão elétrica. A matriz de transformação G permite representar as grandezas vistas no estator (a, b, c) em grandezas fixas nos eixos ($d, q, 0$), como apresentado na Equação (2.15) (SOUSA, 2011).

$$\begin{bmatrix} G_d \\ G_q \\ G_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta-120) & -\sin(\theta+120) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} G_a \\ G_b \\ G_c \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

Como pode ser observado em (2.15), com a Transformada de Park, criam-se três novas variáveis (G_d, G_q, G_0), onde o índice “d” corresponde à “projeção” das correntes, tensões ou

fluxos concatenados ao longo de um eixo paralelo ao eixo magnético do enrolamento de campo, denominado eixo direto (eixo d). O índice “q” corresponde a essa mesma projeção, defasada de 90° em relação ao eixo “d”, chamado de eixo em quadratura (eixo q). O índice “0” corresponde aos valores de corrente, tensão ou fluxo concatenado de sequência zero.

A escolha dos eixos “d” e “q” está associada à direção preferencial de magnetização. Em máquinas de pólos salientes, por exemplo, essa direção é determinada pelas protuberâncias dos pólos do campo. Ou seja, a relutância ao longo do eixo polar - dita como relutância de eixo direto (eixo “d”) - é menor do que ao longo do eixo interpolar, referido comumente como eixo de quadratura (eixo “q”) (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2006).

Ainda segundo Fitzgerald, Kingsley Jr. e Umans (2006), o enrolamento de campo, por definição, produz um fluxo que está orientado segundo o eixo direto do rotor e a tensão interna está adiantada em relação a esse fluxo em 90°.

Pode-se definir também a Transformada Inversa de Park, que consiste em transformar as grandezas (d, q, 0) em grandezas (a, b, c), conforme apresentado na Equação (2.16):

$$\begin{bmatrix} G_a \\ G_b \\ G_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta-120) & -\sin(\theta-120) & 1 \\ \cos(\theta+120) & -\sin(\theta+120) & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} G_d \\ G_q \\ G_0 \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Aplicando a Transforma de Park para as equações de tensão no estator, têm-se:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta-120) & -\sin(\theta+120) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Desenvolvendo a equação (2.17), obtém-se as expressões para a tensão no estator no referencial (d, q, 0), conforme apresentado nas Equações (2.18) a (2.20).

$$e_d = \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \frac{d\theta}{dt} - R_a i_d, \quad (2.18)$$

$$e_q = \frac{d\psi_q}{dt} - \psi_d \frac{d\theta}{dt} - R_a i_q, \quad (2.19)$$

$$e_0 = \frac{d\psi_0}{dt} - R_a i_0, \quad (2.20)$$

em que:

e_d, e_q, e_0 = tensões trifásicas instantâneas do estator no domínio (d, q, 0), em V;

ψ_d, ψ_q, ψ_0 = fluxos concatenados no domínio (d, q, 0), em Wb;

i_d, i_q = correntes nos eixos direto e em quadratura, respectivamente, em A.

Matricialmente, têm-se as equações de tensão no estator e no rotor, como segue:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \\ e_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_{fd} \\ \psi_{jd} \\ \psi_{jq} \end{bmatrix} - \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{jkd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{jkq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Para o fluxo concatenado no estator e no rotor, as equações no domínio (d, q, 0) são respectivamente:

$$\psi_d = -X_d i_d + X_{afd} i_{fd} + X_{akd} i_{kd}, \quad (2.22)$$

$$\psi_q = -X_q i_q + X_{akq} i_{kq}, \quad (2.23)$$

$$\psi_0 = -X_0 i_0, \quad (2.24)$$

$$\psi_{fd} = -\frac{3}{2} X_{afd} i_d + X_{ffd} i_{fd} + X_{fkd} i_{kd}, \quad (2.25)$$

$$\psi_{jd} = -\frac{3}{2} X_{akd} i_d + X_{fkd} i_{fd} + X_{kd} i_{kd}, \quad (2.26)$$

$$\psi_{jq} = -\frac{3}{2} X_{akq} i_q + X_{kq} i_{kq}, \quad (2.27)$$

em que:

X_d, X_q = reatâncias no domínio (d, q), em Ω ;

$\psi_{fd}, \psi_{jd}, \psi_{jq}$ = fluxo concatenado no enrolamento de campo e nos enrolamentos de amortecimentos, em Wb.

Finalmente, tem-se a seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_{fd} \\ \psi_{jd} \\ \psi_{jq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_a & 0 & 0 & X_{afd} & X_{akd} & 0 \\ 0 & X_q & 0 & 0 & 0 & X_{akq} \\ 0 & 0 & X_0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{3}{2}X_{afd} & 0 & 0 & X_{ffd} & X_{fkd} & 0 \\ -\frac{3}{2}X_{akd} & 0 & 0 & X_{fkd} & X_{kd} & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2}X_{akq} & 0 & 0 & 0 & X_{kq} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_{fd} \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix}. \quad (2.28)$$

Comparando a Equação (2.14) com a Equação (2.28), percebe-se que os termos anulados em (2.28) dependiam da posição angular do rotor no modelo (a, b, c). No modelo (d, q, 0), no entanto, os fluxos concatenados vistos pelos enrolamentos trifásicos se tornam constantes devido à transformação de Park.

As equações (2.7), (2.14), (2.21) e (2.28) representam, analiticamente, o comportamento de uma máquina síncrona, tanto no domínio (a, b, c) como no domínio (d, q, 0). Com a utilização dessas equações, é possível prever o comportamento da máquina em diversas condições de operação (SOUSA, 2011).

2.4. MODELAGEM MECÂNICA DO GERADOR SÍNCRONO

2.4.1. Torque Eletromagnético

O Torque eletromagnético para a máquina síncrona é um conjugado que se opõe ao torque mecânico devido às cargas que estão conectados na máquina e pode ser definido como:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d), \quad (2.29)$$

em que:

T_e = torque eletromagnético, em N.m;

i_q, i_d = correntes no eixo em quadratura e direto, em A;

P = número de polos da máquina.

2.4.2. Torque de Aceleração

O torque de aceleração consiste em um conjugado que acelera o rotor da máquina, sendo dado por:

$$T_a = J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e, \quad (2.30)$$

em que:

T_a, T_m = torque de aceleração e mecânico da máquina, em N.m;

J = momento de inércia da máquina, em kg.m².

2.4.3. Torque Mecânico

O torque mecânico é definido pela força motriz que está conectada à máquina. Para o caso de uma hidrelétrica o torque mecânico é exercido pela força da água. Esse torque pode ser extraído das equações (2.30) e (2.29) como:

$$T_m = T_a + T_e, \quad (2.31)$$

$$T_m = J \frac{d\omega_r}{dt} + \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\psi_d i_q - \psi_q i_d). \quad (2.32)$$

2.4.4. Equação de Oscilação da Máquina Síncrona

A equação de oscilação ou equação do movimento de uma máquina síncrona, representa uma relação entre a potência mecânica, potência eletromagnética e a aceleração angular da máquina dado por:

$$P_a = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} = \frac{2H}{\omega_r} \frac{d^2 \delta}{dt^2}, \quad (2.33)$$

em que:

P_a = Potência de aceleração, em W;

P_m = Potência mecânica, W;

P_e = Potência elétrica, em W;

H = constante de inércia, em s;

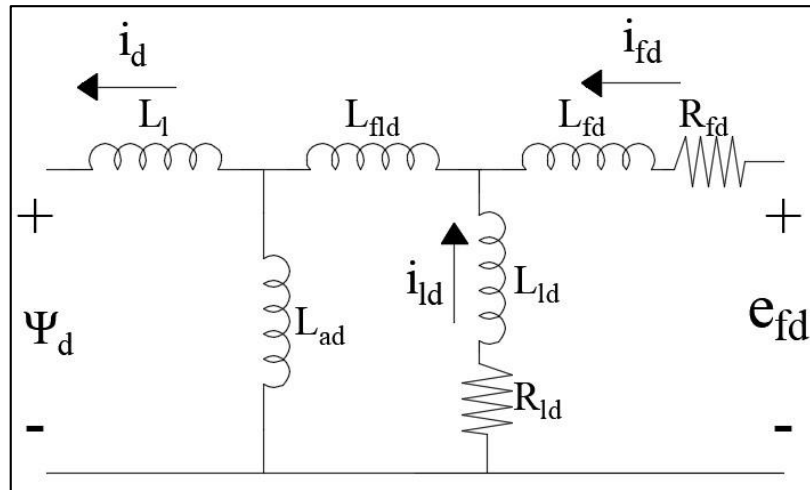
$\frac{d^2 \delta}{dt^2}$ = aceleração angular da máquina, em graus elétricos/s².

2.5. CIRCUITOS EQUIVALENTES

2.5.1. Circuito Equivalente do Eixo Direto

A Figura 7 apresenta o circuito equivalente para o eixo direto.

Figura 7: Circuito equivalente para o eixo direto.

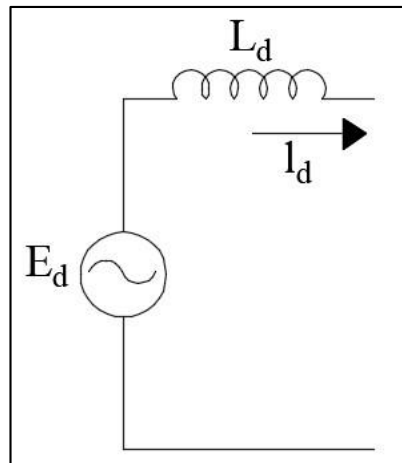


Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser visto na Figura 7, esse circuito é considerado de segunda ordem por apresentar dois ramos (ramos de amortecimento “ ld ” e o ramo de campo “ fd ”). Ainda é levado em consideração o fenômeno de dispersão e de magnetização representado respectivamente pelos índices “ l ” e “ ad ”. A Reatância em série “ fld ” representa a diferença entre a) as indutâncias mútuas de enrolamento de armadura com enrolamento de campo e b) a indutância de acoplamento de enrolamento de amortecimento com enrolamento de campo.

A forma mais simplificada desse circuito está presente na Figura 8, na qual é considerado apenas a reatância síncrona X_d .

Figura 8: Modelo simplificado do circuito equivalente para o eixo direto.



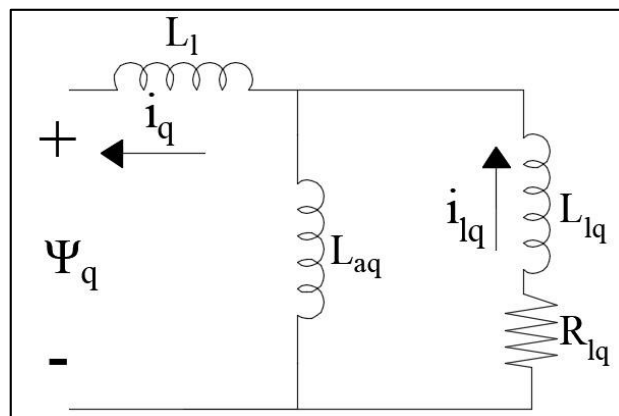
Fonte: Autoria Própria.

O circuito simplificado (Figura 8) é a representação mais simples da máquina nesse eixo, sendo aplicado apenas para rotores de polos lisos em que o circuito equivalente é idêntico para o eixo direto e eixo de quadratura. Para estudar fenômenos transitórios, recomenda-se utilizar o circuito da Figura 7.

2.5.2. Circuito Equivalente do Eixo em Quadratura

A Figura 9 apresenta o circuito equivalente para o eixo em quadratura. Esse circuito é similar ao do eixo direto, diferenciando apenas pela ausência do enrolamento de campo que, por construção, não possui influência no eixo em quadratura.

Figura 9: Circuito equivalente para o eixo em quadratura.



Fonte: Autoria Própria.

O circuito equivalente do eixo em quadratura é considerado de primeira ordem por apresentar apenas o ramo do enrolamento rotórico representado pelo índice “ lq ”.

2.6. ENSAIOS ELÉTRICOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DA MÁQUINA SÍNCRONA

Os ensaios no domínio do tempo para identificação de parâmetros de uma máquina síncrona, apresentam uma metodologia de cálculo bem definida possuindo uma baixa complexidade matemática nas equações. Estes podem ser classificados em dois tipos: a) ensaios em regime permanente e b) ensaios em regime transitório. Tais ensaios serão abordados a seguir.

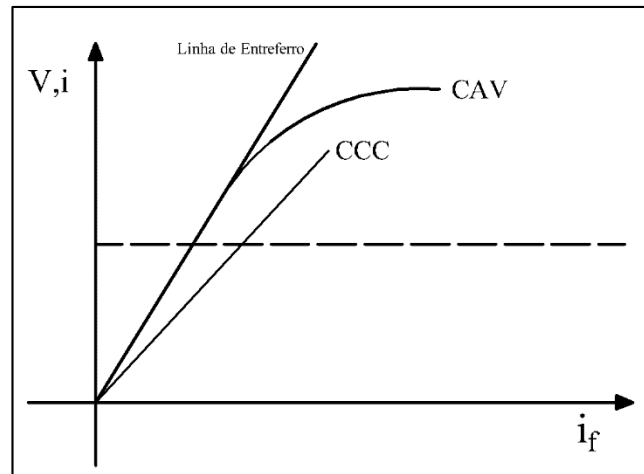
2.6.1. Ensaios em Regime Permanente

Os ensaios em regime permanente discutidos nesse estudo consistem em: Ensaio de Saturação em Aberto e de Curto-Circuito e Ensaio de Baixo Escorregamento.

2.6.1.1. Ensaio de Saturação em Aberto e de Curto-Circuito

O ensaio de saturação em aberto e de curto-circuito consiste em acionar o gerador síncrono por meio de uma fonte primária. Com a máquina funcionando em rotação nominal, mede-se a tensão de armadura nos terminais do estator e a corrente de campo. Para os terminais de armadura em curto-circuito, mede-se a corrente de armadura e corrente de campo. A Figura 10 apresenta o gráfico para este ensaio.

Figura 10: Tensão e corrente de armadura em função da corrente de campo.



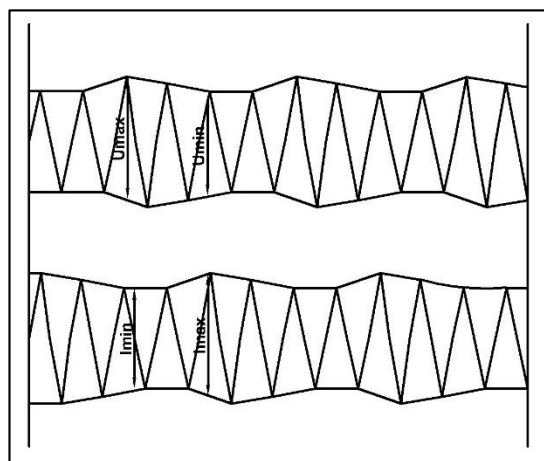
Fonte: Autoria Própria.

Traçando as curvas características de tensão em vazio e corrente de armadura de curto-circuito, em função da corrente de campo, obtêm-se a reatância síncrona do eixo direto “ X_d ”.

2.6.1.2. Ensaio de Baixo Escorregamento

Neste ensaio, deve-se impor uma condição de baixo escorregamento à máquina, ou seja, o teste é realizado com uma velocidade levemente diferente da síncrona. O comportamento das formas de ondas de tensão e corrente são apresentados na Figura 11.

Figura 11: Formas das ondas de tensão e corrente para o ensaio de baixo escorregamento.



Fonte: Autoria Própria.

Por meio da manipulação gráfica, pode-se determinar as reatâncias síncronas do eixo direto (X_d) e em quadratura (X_q) por meio das equações (2.34) e (2.35):

$$X_d = \frac{U_{m\acute{a}x}}{\sqrt{3}I_{m\acute{i}n}}, \quad (2.34)$$

$$X_q = \frac{U_{mn}}{\sqrt{3}I_{m\acute{a}x}}, \quad (2.35)$$

em que:

$U_{m\acute{a}x}, U_{m\acute{i}n}$ = tensões máximo e mínimo, em V;

$I_{m\acute{a}x}, I_{m\acute{i}n}$ = correntes máxima e mínima, em A.

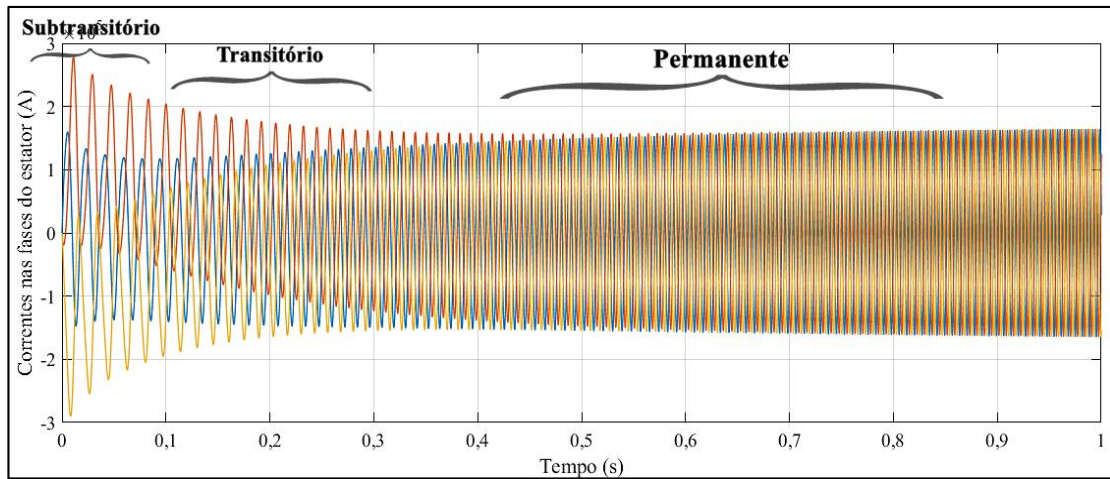
2.6.2. Ensaios em Regime Transitório

Os ensaios em regime transitório discutidos nesse estudo consistem em: Ensaio de Curto-Circuito Abrupto, Ensaio de Recuperação de Tensão e Ensaio de Rejeição de Carga no eixo Direto e em Quadratura.

2.6.2.1. Ensaio de Curto-Circuito Abrupto

O ensaio de curto-circuito abrupto consiste na aplicação de um curto-circuito trifásico nos terminais de armadura, com a máquina operando em rotação nominal, sem carga no eixo e com os terminais de campo ligados a uma fonte CC. Neste ensaio, os terminais de armadura devem ser curto-circuitado no mesmo instante. O comportamento da forma de onda da corrente em função do tempo, assim como em cada fase do estator é demonstrado na Figura 12.

Figura 12: Correntes nas três fases do estator após aplicação do Curto-Circuito Abrupto.



Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser visto na Figura 12, existem três períodos que podem ser considerados na curva: período subtransitório, transitório e permanente. Para estudar o comportamento transitório da máquina recomenda-se modelá-la através de equações com constantes de decaimento como apresentado na Equação (2.36).

$$I = E \left\{ \frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} \right\}, \quad (2.36)$$

em que:

I = corrente eficaz da armadura no curto-circuito, em A;

E = tensão instantânea, em V;

X_d'' , X_d' = reatância subtransitória e transitória do eixo direto, em Ω ;

X_q'' = reatância subtransitória do eixo em quadratura, em Ω ;

T_d'' , T_d' = constantes de tempo subtransitória e transitória do eixo direto, em s.

Utilizando manipulações gráficas, ou por meio de ferramentas computacionais, pode-se obter os diversos parâmetros desta equação a partir de uma forma de onda obtida diante da aplicação do curto-circuito trifásico. A desvantagem dessa técnica é a ausência de informações referentes ao eixo em quadratura.

2.6.2.2. Ensaio de Recuperação de Tensão

O ensaio de recuperação de tensão é uma alternativa ao ensaio de curto-circuito abrupto. O procedimento do ensaio é o mesmo do anterior, diferenciando apenas na análise que, para esse caso, analisa-se o comportamento transitório do reestabelecimento da tensão após a retirada do curto-circuito.

Devido à ausência de carga no ensaio, o campo girante se alinha com o eixo direto, impossibilitando dessa forma obter parâmetros como as reatâncias de eixo em quadratura.

A tensão de terminal é formada basicamente por tensão de efeito rotacional devido seu valor ser consideravelmente superior as tensões de efeito transformador e é dada segundo ao eixo em quadratura:

$$V_q = I_0 \left[X_d - (X_d - X'_d) e^{-\frac{t}{T'_{d0}}} - (X'_d - X''_d) e^{-\frac{t}{T''_{d0}}} \right], \quad (2.37)$$

em que:

V_q = tensão no eixo de quadratura, em V;

I_0 = corrente antes da abertura do curto, em A.

Quando a tensão de armadura entra em regime permanente, têm-se que:

$$X_d = \frac{V_{rp}}{I_0}, \quad (2.38)$$

em que:

V_{rp} = tensão de armadura em regime permanente, em V.

As reatâncias subtransitórias e transitórias, bem como suas respectivas constantes de tempo são calculadas a partir de uma curva representativa desses períodos. Essa curva foi encontrada por meio de ensaios de recuperação de tensão e os cálculos dessas reatâncias podem ser encontradas em Fernandes (2006).

Uma alternativa para obter os parâmetros do eixo direto constitui-se na variação da corrente de campo durante este ensaio. A corrente de campo é dada por:

$$i_{fd} = i_{fd0} - i_{fd0} \left[\left(\frac{X_d - X'_d}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_{d0}}} - \left(1 - \frac{T_{kd}}{T''_{d0}} \right) e^{-\frac{t}{T''_{d0}}} \right], \quad (2.39)$$

em que:

i_{fd0} = corrente de campo antes da abertura do curto, em A;

T_{kd} = constante de tempo do fluxo concatenado do amortecedor de eixo direto, em s.

2.6.2.3. Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo Direto

O ensaio de rejeição de carga de eixo direto é realizado apenas com carga puramente reativa (potência ativa nula), quando a corrente de armadura está alinhada com o eixo direto com o fluxo de armadura apenas nesse eixo. A tensão de armadura para a rejeição de carga de eixo direto é dada por:

$$V_{rp} = V_0 - I_{d0} [L_d - (L_d - L'_d) e^{\frac{-t}{T'_{d0}}} - (L'_d - L''_d) e^{\frac{-t}{T''_{d0}}}], \quad (2.40)$$

em que:

V_0 = tensão de armadura antes da rejeição, em pu;

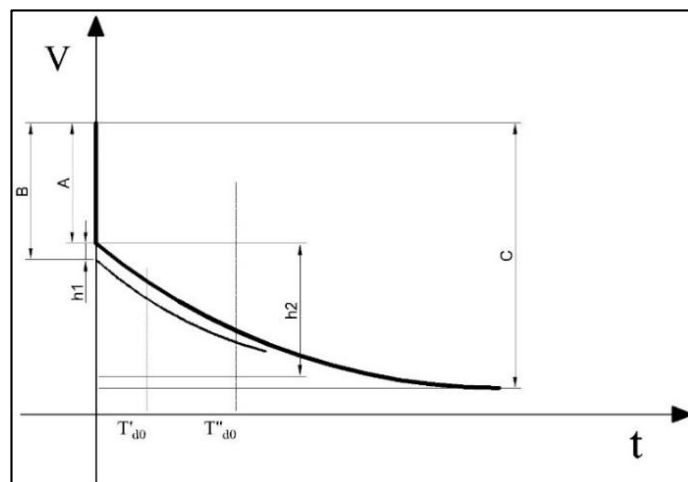
I_{d0} = corrente de armadura inicial de eixo direto anterior a rejeição, em pu;

L_d, L'_d, L''_d = valores em pu das indutâncias de regime permanente, transitória e subtransitória de eixo direto;

T'_{d0}, T''_{d0} = constantes de tempo de circuito aberto transitório e subtransitório respectivamente, em s.

Pode-se obter as indutâncias da Equação (2.39) por meio do gráfico da excursão do valor eficaz da tensão de armadura ao longo do tempo. A Figura 13 apresenta o gráfico mencionado.

Figura 13: Tensão eficaz para a rejeição de carga do eixo direto.



Fonte: Autoria Própria.

Por meio do gráfico (Figura 13), pode-se calcular as indutâncias dado por:

$$L_d = \frac{A}{I_0}, \quad (2.41)$$

$$L'_d = \frac{B}{I_0}, \quad (2.42)$$

$$L''_d = \frac{C}{I_0}. \quad (2.43)$$

A rejeição de carga nesse ensaio deve ser feita com cargas indutivas para evitar a sobretensão, ou seja, a máquina deve estar subexcitada. Caso a carga seja capacitiva, o comportamento da tensão ao longo do tempo apresentará uma tensão em regime permanente maior que a tensão anterior à rejeição devido à natureza da carga.

2.6.2.4. Ensaio de Rejeição de Carga de Eixo em Quadratura

O ensaio de rejeição de carga de eixo em quadratura é realizado com carga que demanda potência ativa e reativa, que pode ser de natureza capacitiva ou indutiva. Outro requisito importante é que a máquina deve estar subexcitada e com o regulador de velocidade funcionando normalmente pois, havendo potência ativa com a abertura dos disjuntores, o regulador deve atuar contra a aceleração do conjunto turbina-gerador. A desconexão com a carga deve ser feita no momento em que o ângulo da carga seja igual ao ângulo do fator de potência da mesma.

A equação que representa este ensaio é dada por:

$$V_{rp} = V_0 \sin(\omega t - \delta) - i_{q0} \left[L_q - (L_q - L''_q) e^{\frac{-t}{T''_{q0}}} \right], \quad (2.44)$$

em que:

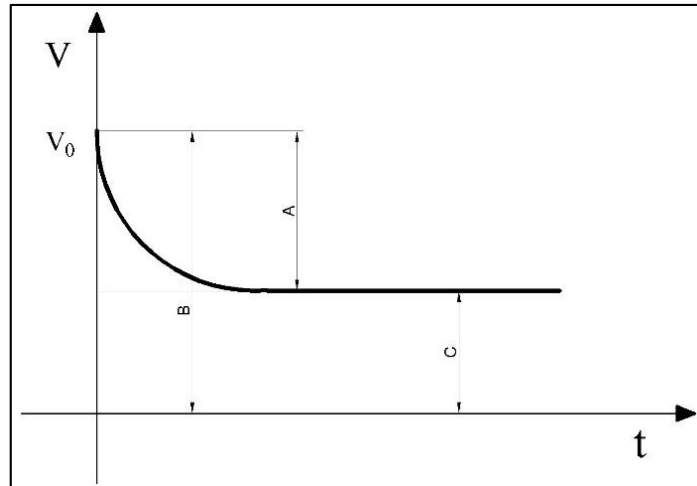
i_{q0} = corrente do eixo em quadratura antes da rejeição [A];

L_q, L''_q = indutâncias em pu de regime permanente e subtransitório do eixo em quadratura;

T''_{q0} = constante de tempo subtransitório do eixo em quadratura [s].

A Figura 14 apresenta o comportamento da forma de onda da tensão para a rejeição de carga de eixo em quadratura.

Figura 14: Rejeição de carga de eixo em quadratura.



Fonte: Autoria Própria.

Por meio do gráfico, pode-se calcular as indutâncias dado por:

$$L_q = \frac{\sqrt{A^2 - C^2}}{I_0}, \quad (2.45)$$

$$L''_q = \frac{\sqrt{A^2 - C^2} - \sqrt{B^2 - C^2}}{I_0}. \quad (2.46)$$

2.7. SIGNIFICADO FÍSICO DOS PARÂMETROS DA MÁQUINA SÍNCRONA

Os parâmetros da máquina síncrona tipicamente fornecidos pelos construtores são reatâncias, resistências e constantes de tempo. Quando esses parâmetros não são fornecidos, existem os ensaios mencionados no tópico (2.6) que podem ser realizados para obtê-los.

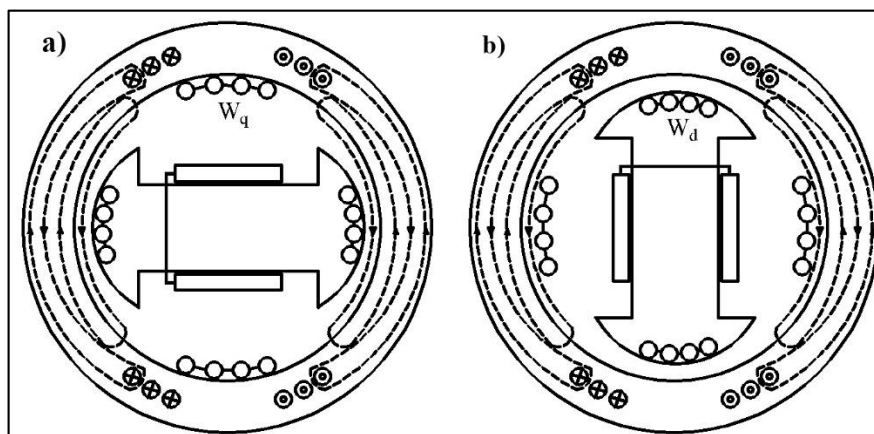
Existem dois períodos de amortecimentos que representam uma porção de curto-circuito em torno do envelope de corrente contínua, a saber: o período subtransitório e o período transitório. O primeiro período relaciona aos ciclos iniciais após o curto-circuito com o rápido amortecimento da corrente. Nesse período as variações de corrente são atribuídas aos enrolamentos amortecedores. No período subsequente denominado de transitório, a taxa de amortecimento é mais lenta, atribuindo as variações das correntes essencialmente nos enrolamentos de campo do rotor (FERNANDES, 2006).

Dessa forma, para cada período de regime, o fluxo magnético bem como sua distribuição ao longo da máquina variam após perturbações que possam surgir no estator, tornando necessário a compreensão sobre o comportamento do fluxo para cada período mencionado.

2.7.1. Período Subtransitório

A Figura 15 apresenta o caminho do fluxo magnético na máquina síncrona no período subtransitório para o eixo direto e em quadratura.

Figura 15: Caminho do fluxo magnético no regime subtransitório: a) enrolamento do eixo em quadratura; b) enrolamento do eixo direto.



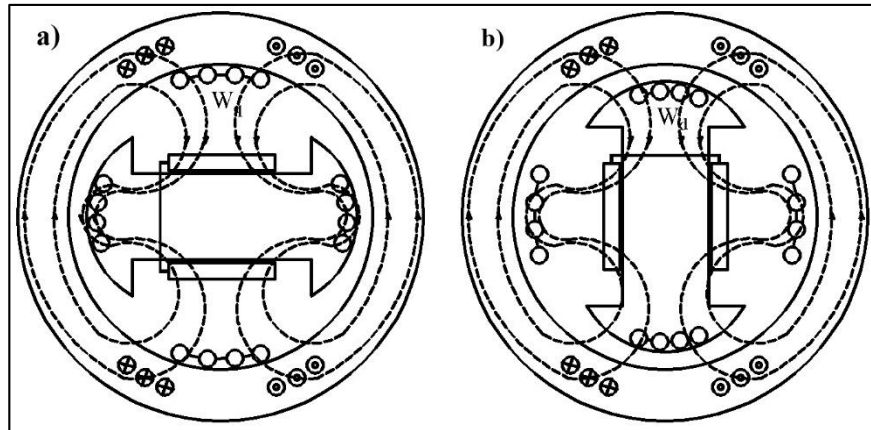
Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser visto na Figura 15, no período subtransitório o enrolamento amortecedor se comporta como um escudo contra à penetração do fluxo magnético do estator. Dessa forma, as reatâncias subtransitórias tornam-se mais pequenas do que as reatâncias no período transitório e permanente (FERNANDES, 2006).

2.7.2. Período Transitório

Consoante Fernandes (2006), com a dissipação da corrente nos enrolamentos amortecedores durante o período subtransitório, as variações de corrente no enrolamento de excitação reagem da mesma forma no período transitório, porém, com um período de tempo mais longo. O fluxo magnético começa a penetrar no rotor, fazendo com que as reatâncias do eixo direto e em quadratura aumentem. A Figura 16 apresenta o comportamento do fluxo magnético.

Figura 16: Caminho do fluxo magnético no regime transitório: a) enrolamento do eixo em quadratura; b) enrolamento do eixo direto.

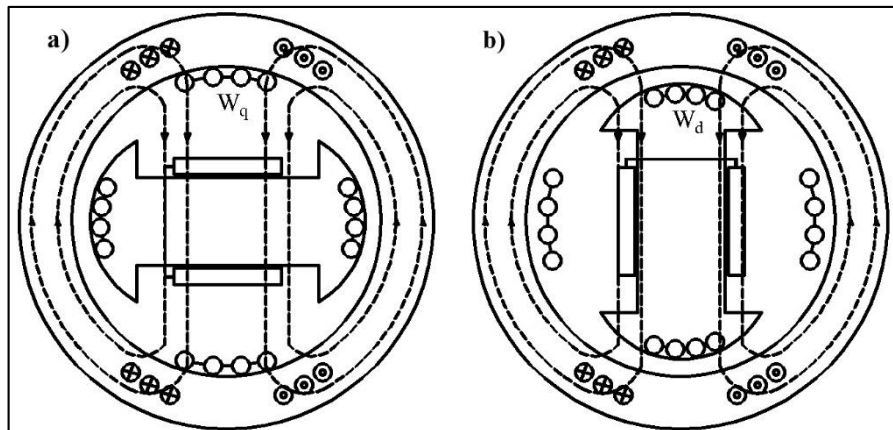


Fonte: Autoria Própria.

2.7.3. Período de Regime Permanente

Após os regimes subtransitário e transitório, o período de regime permanente é alcançado. A Figura 17 mostra o caminho do fluxo magnético nesse regime.

Figura 17: Caminho do fluxo magnético no regime permanente: a) enrolamento do eixo em quadratura; b) enrolamento do eixo direto.



Fonte: Autoria Própria.

Como apresentado na Figura 17, o fluxo magnético produzido pelo estator no regime permanente penetra, simultaneamente, nos enrolamentos de amortecedor e campo.

2.8. ESTABILIDADE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

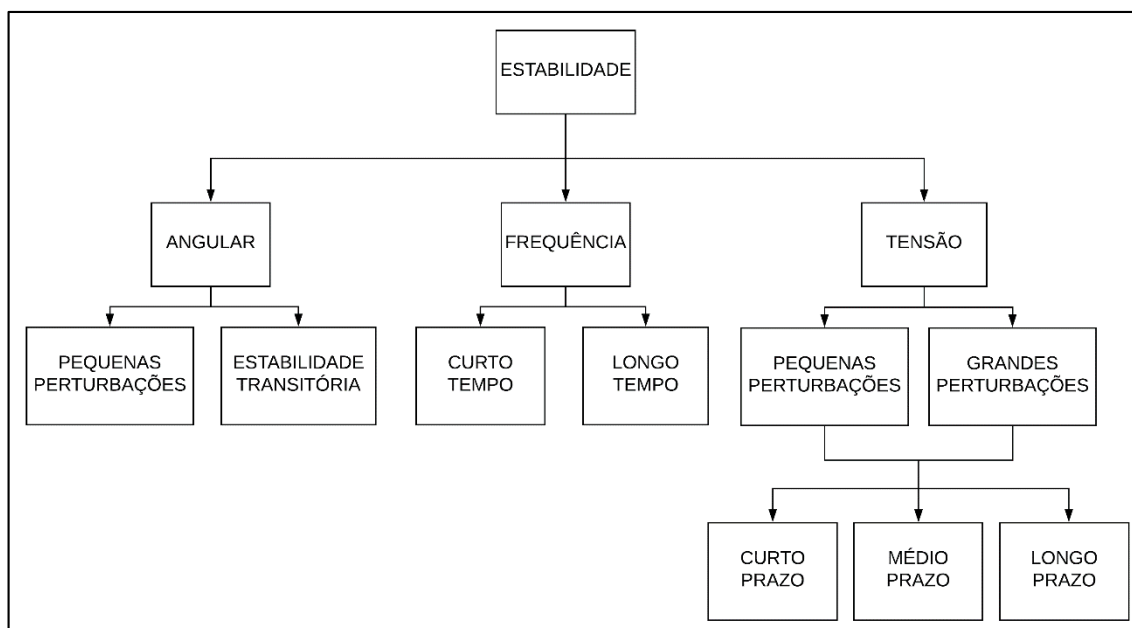
A demanda por energia elétrica pela população mundial vem crescendo consideravelmente, fazendo com que os Sistemas Elétricos de Potência (SEE) se torne cada vez mais complexo para que o consumo possa ser ininterrupto e com elevada qualidade de serviço (BARBOSA, 2013).

Ainda segundo Barbosa (2013), existe a necessidade e a preocupação do sistema alimentar as cargas de forma contínua com tensão e frequência dentro dos valores aceitáveis. Embora isso se torne algo ideal, a variação da tensão e frequência está presente em um SEP, porém tal variação deve estar dentro da tolerância para que os equipamentos dos consumidores possam operar de forma satisfatória. Existem diversos aspectos a serem considerados no SEP, porém a estabilidade das máquinas síncronas se torna um dos mais fundamentais.

Como foi visto anteriormente, as máquinas síncronas mantêm o sincronismo em condições normais de funcionamento, porém em condições adversas como perturbações (curtos-circuitos, saída de serviço de uma linha, alteração de carga) a máquina pode perder o sincronismo, o que se torna fundamental conhecer o comportamento para essas condições (SILVA, 2016).

Se a perturbação for pequena e de curta duração o sistema tende a voltar para o mesmo ponto de funcionamento. Caso contrário, ou seja, uma perturbação grande e de longa duração, essa tendência não ocorrerá. Assim, o estudo de estabilidade procura obter o comportamento da máquina síncrona após a ocorrência da perturbação (BARBOSA, 2013). A Figura 18 apresenta um diagrama de blocos que classifica o estudo da estabilidade em um SEP.

Figura 18: Classificação dos diferentes tipos de estabilidade no SEP.



Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser observado na Figura 18, a classificação é dada pela natureza do fenômeno e as causas físicas que dirigem à sua ocorrência. Assim, a estabilidade angular é definida pela capacidade da máquina síncrona em manter o sincronismo após uma perturbação. A estabilidade de tensão é dada pela capacidade do sistema em manter níveis de tensões em todos os barramentos, após a ocorrência, iguais ou próximos aos níveis anteriores à perturbação. Por fim, a estabilidade de frequência é definida como sendo a capacidade de um sistema em manter a frequência em níveis satisfatórios após a ocorrência de uma perturbação (SILVA, 2016).

Portanto, o estudo da estabilidade é dividido em três tipos: estabilidade estacionária, de longo termo e transitória. A estabilidade estacionária, analisa o comportamento dos sistemas após a ocorrência de pequenas perturbações. A estabilidade de longo termo estuda o comportamento dinâmico do sistema durante longos períodos após a ocorrência. Por último, a estabilidade transitória analisa o comportamento do sistema nos primeiros segundos após ocorrências de grandes perturbações (BARBOSA, 2013).

Dessa forma, para um sistema constituído por uma máquina síncrona ligada a um barramento infinito, é possível estudar a estabilidade em regime transitório por meio do critério das áreas iguais, permitindo compreender alguns fatores que influenciam a estabilidade do sistema.

2.8.1. Critério das Áreas Iguais

Conforme já discutido, a Equação (2.33) representa a equação de oscilação de uma máquina síncrona conectada a um barramento infinito. Multiplicando ambos os lados desta equação por $\frac{d\delta}{dt}$ têm-se:

$$\frac{d\delta}{dt} (P_{m(pu)} - P_{e(pu)}) = \frac{2H}{\omega_r} \frac{d^2\delta}{dt^2} \frac{d\delta}{dt}, \quad (2.47)$$

podendo ser escrita como:

$$\frac{d\delta}{dt} \frac{\omega_r}{H} (P_{m(pu)} - P_{e(pu)}) = 2 \frac{d^2\delta}{dt^2} \frac{d\delta}{dt}, \quad (2.48)$$

ou ainda,

$$\frac{d\delta}{dt} \frac{\omega_r}{H} (P_{m(pu)} - P_{e(pu)}) = \frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right]. \quad (2.49)$$

Eliminando o índice dt , têm-se:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_r}{H} (P_{m(pu)} - P_{e(pu)}) d\delta. \quad (2.50)$$

Em sincronismo, a máquina síncrona apresenta uma aceleração nula, sendo $\frac{d^2\delta}{dt^2} = 0$.

Logo, a Equação (2.50) se resume a:

$$0 = \frac{\omega_r}{H} (P_{m(pu)} - P_{e(pu)}) d\delta. \quad (2.51)$$

Integrando a Equação (2.51), têm-se:

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_{m(pu)} - P_{e(pu)}) d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta} P_a = 0. \quad (2.52)$$

A Equação (2.52) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\int_{\delta_0}^{\delta} P_a = \int_{\delta_0}^{\delta} P_m d\delta + \int_{\delta_0}^{\delta} [P_m - P_{\max} \sin(\delta)] d\delta = 0, \quad (2.53)$$

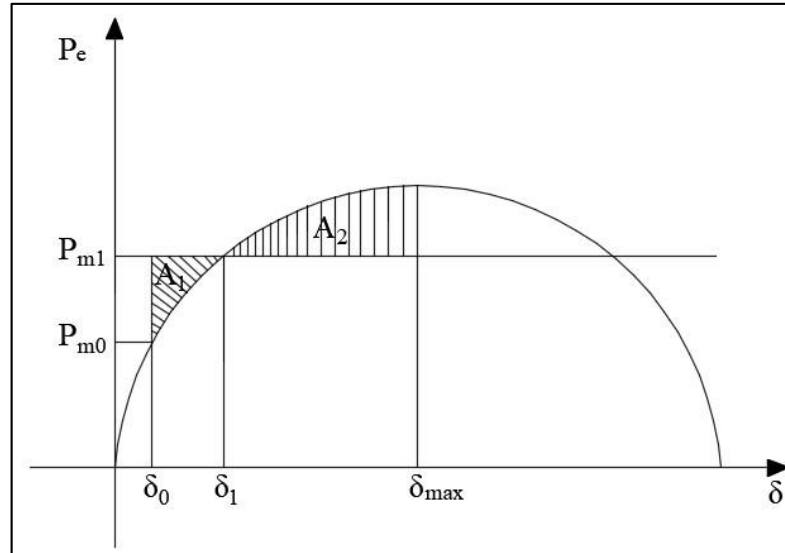
ou ainda,

$$\int_{\delta_0}^{\delta} P_m d\delta = - \int_{\delta_0}^{\delta} [P_m - P_{\max} \sin(\delta)] d\delta. \quad (2.54)$$

O primeiro membro da Equação (2.54) corresponde à quantidade de energia necessária para acelerar a máquina (Área A1) e o segundo membro corresponde à quantidade de energia

necessária para desacelerar a máquina (Área A2). A Figura 19 apresenta o gráfico que relaciona a potência elétrica como função do ângulo de carga.

Figura 19: Gráfico que relaciona a potência elétrica como função do ângulo de carga.



Fonte: Autoria Própria.

em que:

P_{m0} = potência mecânica inicial;

P_{m1} = potência mecânica final;

δ_0 = Ângulo de carga inicial;

δ_1 = Ângulo de carga correspondente a P_{m1} .

De acordo com a Figura 19, o semicírculo representa a potência elétrica fornecida ao barramento infinito, dada segundo a Equação (2.55):

$$P_e = \frac{E' E_\infty}{X_s} \sin(\delta), \quad (2.55)$$

em que:

E' = tensão induzida nos enrolamentos do estator, em V;

E_∞ = tensão do barramento infinito, em V;

X_s = reatância equivalente entre a máquina e o barramento infinito, em Ω .

A reta que corta o semicírculo apresentada na Figura 19, representa a potência mecânica que é considerada constante na máquina.

A energia que acelera a máquina ocorre quando a potência mecânica se torna maior que a potência elétrica (reta da potência mecânica acima da curva da potência elétrica). Nesta situação, o rotor começa a acelerar aumentando o ângulo de conjugado (Área A1). Dessa forma, a Área A1 representa o ganho de energia cinética resultante da aceleração da máquina. Essa energia ocorre quando existe a presença de um curto-circuito nos terminais do estator ou em algum ponto do sistema elétrico de potência no qual a máquina está conectada.

A energia que desacelera a máquina (curva da potência elétrica acima da reta da potência mecânica) ocorre quando a potência elétrica se torna maior que a potência mecânica (Área A2). Essa energia é gerada a partir do ângulo δ_1 , em que toda a energia cinética gerada pela máquina é despachada para o barramento infinito e o rotor começa a ser freado.

Para que o sistema apresente estabilidade, a área A1 tem que ser igual à área A2, significando que todo o ganho de energia cinética inicial foi compensado ao ser entregue ao barramento infinito, fazendo com que o rotor voltasse a girar com velocidade igual à velocidade nominal. Dessa maneira, têm-se que:

$$A1 = \int_{\delta_0}^{\delta} (P_{m1} - P_e) d\delta, \quad (2.56)$$

$$A2 = \int_{\delta_1}^{\delta_{mas}} (P_e - P_{m1}) d\delta. \quad (2.57)$$

Os engenheiros de proteção que atuam nos Sistemas Elétricos de Potência têm a preocupação de projetar uma proteção adequada para cada situação de falta. Quando a falta influencia diretamente o comportamento da máquina, existem dois parâmetros essenciais que devem ser levados em consideração para projetar a proteção do sistema, que são: o ângulo crítico da abertura do defeito e o tempo de abertura da falta (BARBOSA, 2013).

O ângulo crítico da abertura do defeito representa o ângulo máximo de carga que pode ser atingido pela máquina, após uma falta, antes da perda de sincronismo e estabilidade. Caso o ângulo de conjugado alcançasse valores maiores que o ângulo de conjugado crítico, a máquina eventualmente perderia o sincronismo. Para cada ângulo de operação existe um ângulo crítico a ser atingido, sendo dado pela Equação (2.58), a qual considera o sistema máquina-barramento infinito (BARBOSA, 2013).

$$\delta_{crit} = \cos^{-1}[(\pi - 2\delta_0)\sin(\delta_0) - \cos(\delta_0)], \quad (2.58)$$

em que:

δ_0 = ângulo de carga inicial, em graus;

δ_{crit} = ângulo de carga crítico, em graus.

O tempo de abertura da falta é definido como sendo a soma do tempo de atuação dos relés de proteção e do tempo de abertura do disjuntor. Esse tempo é um fator essencial para a escolha de relés e disjuntores que irão compor a proteção do sistema (BARBOSA, 2013).

Com o conhecimento do ângulo crítico torna possível o cálculo do tempo crítico definido como tempo em que o ângulo de carga levará para aumentar até o seu valor máximo sem que perca o sincronismo, após uma falta. Por meio da equação de oscilação da máquina (2.33), considerando agora que a potência elétrica durante a falta é nula, têm-se:

$$P_a = P_m - 0 = \frac{2H}{\omega_r} \frac{d^2 \delta}{dt^2}, \quad (2.59)$$

$$P_m = \frac{H}{\pi \times f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2}. \quad (2.60)$$

Integrando a Equação (2.60) sucessivamente em ambos os lados, têm-se:

$$\frac{P_m(\pi \times f_0)}{H} t = \frac{d\delta}{dt}, \quad (2.61)$$

$$\frac{P_m(\pi \times f_0)}{H} \int_0^t t dt = \int_{\delta_0}^{\delta} d\delta. \quad (2.62)$$

Para $\delta = \delta_{crit}$, conclui-se que:

$$\frac{P_m(\pi \times f_0)}{H} t_{crit}^2 = \delta_{crit} - \delta_0, \quad (2.63)$$

$$\delta_{crit} = \delta_0 + \frac{P_m(\pi \times f_0)}{2H} t_{crit}^2. \quad (2.64)$$

O tempo crítico é uma variável que depende essencialmente dos parâmetros da máquina e é dado isolando o t_{crit} na Equação (2.64):

$$t_{crit} = \sqrt{\frac{2H}{P_m(\pi \times f_0)} (\delta_{crit} - \delta_0)}, \quad (2.65)$$

em que:

t_{crit} = tempo crítico, em s.

Dessa forma, o tempo de abertura da falta deve ser projetado para ser menor que o tempo crítico.

As Equações (2.58) e (2.65) calculam os parâmetros fundamentais que são levados em consideração para as especificações dos tempos de atuação dos relés e disjuntores que irão compor o sistema de proteção para o modelo máquina-barra infinita.

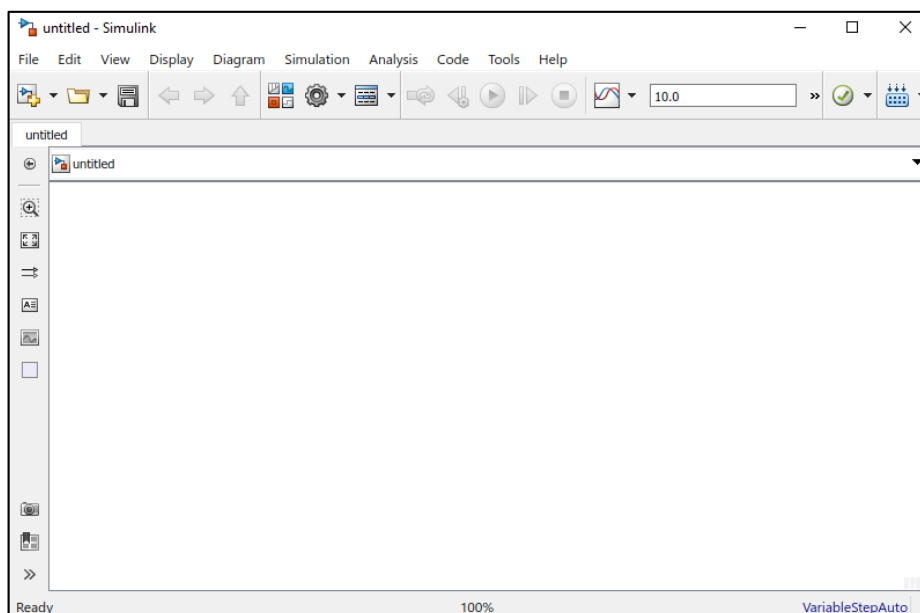
3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o *software* utilizado nas simulações bem como os parâmetros que irão compor a máquina síncrona e o diagrama de blocos utilizado para a modelagem do sistema.

3.1. DIAGRAMA DE BLOCOS PARA A SIMULAÇÃO DO SISTEMA

Para a modelagem do sistema, foi utilizada a interface *Simulink* do software Matlab, que modela, simula e analisa diversos sistemas dinâmicos. Esse *software* disponibiliza uma interface gráfica que permite construir modelos através de diagramas de blocos possuindo diversas bibliotecas para vários problemas da engenharia como: aeroespacial, controle, telecomunicações, potência, etc. A Figura 20 apresenta a interface do *Simulink*.

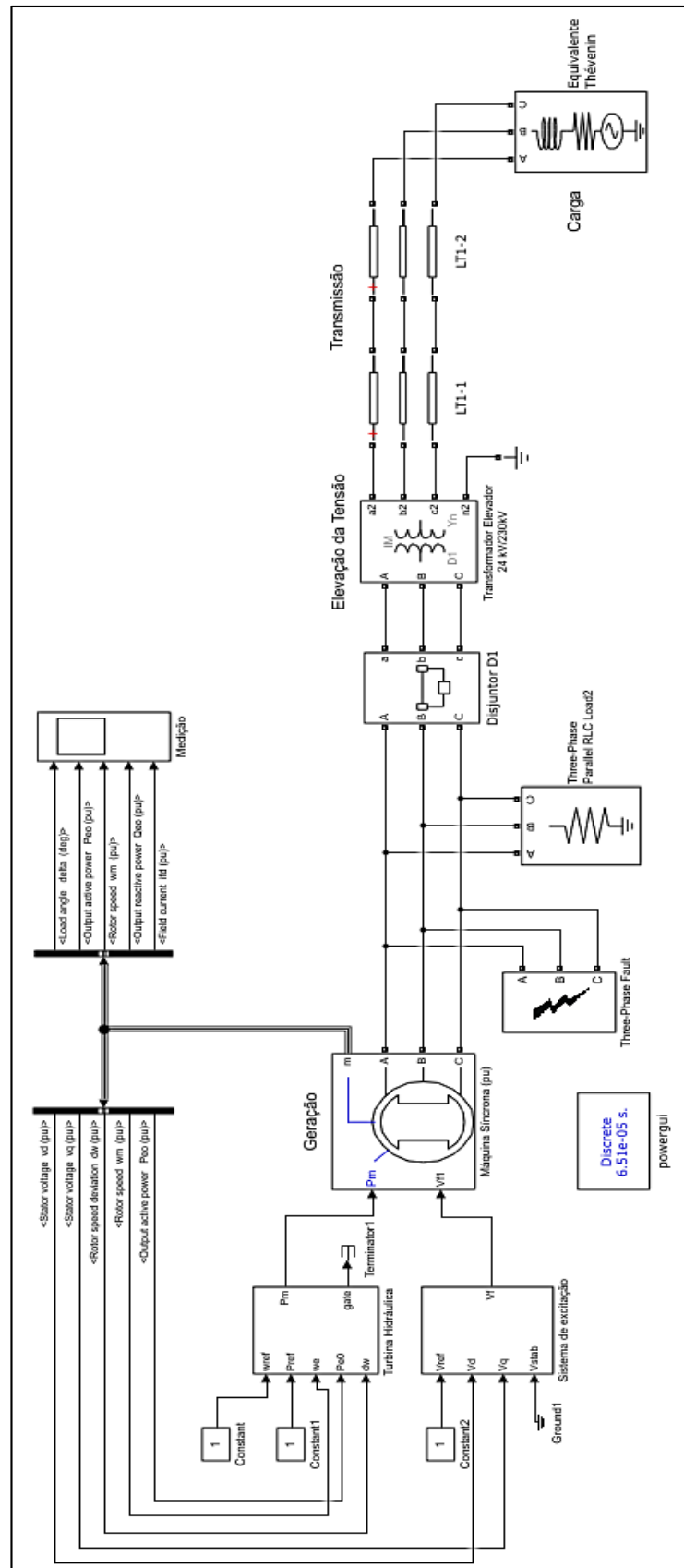
Figura 20: IDE do Simulink Matlab.



Fonte: Simulink Matlab.

Dentro do *Simulink*, há a biblioteca *SimPowerSystems*, que apresenta modelos de dispositivos e equipamentos típicos do sistema elétrico de potência, como linhas de transmissão, transformadores e máquinas elétricas. Baseando-se nesta biblioteca, montou-se o diagrama de blocos para a simulação de um sistema elétrico compreendendo uma geração até uma rede de transmissão, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21: Diagrama de blocos para simulação.

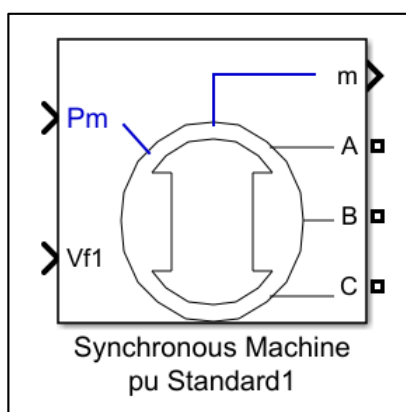


Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 21, uma tensão elétrica é gerada nos terminais da máquina síncrona, sendo elevada por meio de um transformador para que seja então distribuída pela linha de transmissão. Um grande sistema de potência (equivalente de Thevénin) se conecta a essa mesma linha de transmissão.

A Figura 22 ilustra o modelo da máquina síncrona utilizado na simulação, o qual está presente na biblioteca *SimPowerSystems*, podendo operar como motor ou gerador. O modo de operação é definido pelo sinal da potência mecânica (P_m) de entrada no bloco. Em geradores síncronos, por exemplo, esse sinal é positivo.

Figura 22: Modelo da Máquina Síncrona usado para simulação.



Fonte: Bloco “Synchronous Machine pu Standard”.

Além da potência mecânica de entrada, especifica-se, na entrada da máquina, a tensão de excitação (V_f). O índice “ m ”, apresenta os parâmetros de medição da máquina, tais como as correntes de armadura, tensões e correntes de eixo direto e em quadratura, velocidade do rotor, ângulo de carga, dentre outras.

Os parâmetros elétricos da máquina síncrona estão todos referenciados ao rotor, ou seja, em eixo direto e em quadratura. Essa máquina permite que o usuário defina o tipo de rotor (pólos lisos ou salientes) e a variável que caracteriza o acionador mecânico da máquina, podendo ser potência mecânica ou velocidade. A Figura 23 apresenta o bloco de configurações da máquina síncrona para este estudo.

Figura 23: Bloco de configuração da Máquina Síncrona.

Block Parameters: Synchronous Machine pu Standard

Synchronous Machine (mask) (link)

Implements a 3-phase synchronous machine modelled in the dq rotor reference frame. Stator windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced Load Flow

Nominal power, line-to-line voltage, frequency [Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz)]: [830e6 24e3 60]

Reactances [Xd Xd' Xd'' Xq Xq'' Xl] (pu): [1.89 0.23 0.1775 1.8 0.177 0.15]

Time constants

d axis: Open-circuit

q axis: Open-circuit

[Tdo' Tdo'' Tqo''] (s): [4.2 0.031 0.063]

Stator resistance Rs (pu): 0.00199

Inertia coefficient, friction factor, pole pairs [H(s) F(pu) p()]: [0.1028 0.02056 2]

Initial conditions [dw(%) th(deg) ia,ib,ic(pu) pha,phb,phc(deg) Vf(pu)]: [0 0 0 0 0 0 0 1]

☐ Simulate saturation Plot

[ifd; vt] (pu): [56,1.082,1.19,1.316,1.457;0.7,0.7698,0.8872,0.9466,0.9969,1.046,1.1,1.151,1.201]

OK Cancel Help Apply

Fonte: Bloco “Synchronous Machine pu Standard”.

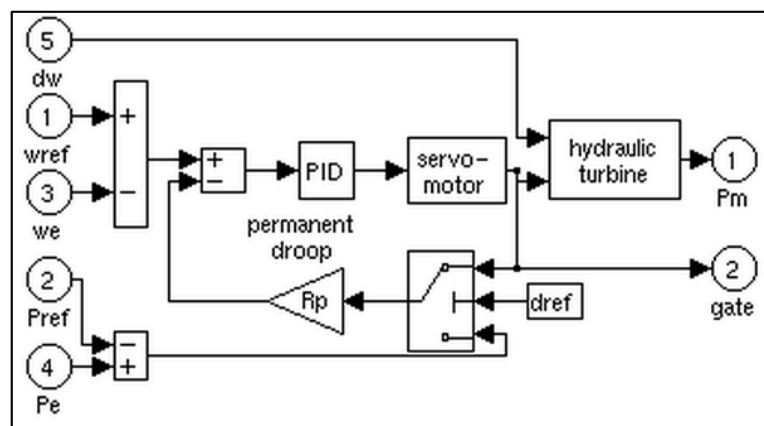
Conforme apresentado na Figura 23, os parâmetros da máquina estão agrupados da seguinte maneira:

- ✓ Potência nominal, tensão de linha, frequência;
- ✓ Reatâncias
 - X_d : Reatância síncrona do eixo direto;
 - X'_d : Reatância transitória do eixo direto;
 - X''_d : Reatância subtransitória do eixo direto;
 - X_q : Reatância síncrona do eixo em quadratura;
 - X''_q : Reatância subtransitória do eixo em quadratura;
 - X_l : Reatância de dispersão.
- ✓ Constantes de tempo que podem ser de circuito aberto ou de curto-circuito:
 - T'_d, T'_{do} : transitória do eixo direto em curto-circuito e circuito aberto respectivamente;
 - T''_d, T''_{do} : subtransitória de eixo direto em curto-circuito e circuito aberto respectivamente;

- T_q'', T_{qo}'' : subtransitória do eixo em quadratura em curto-circuito e circuito aberto respectivamente.
- ✓ Resistência do estator R_s ;
- ✓ Constante de Inércia, fator de atrito, par de pólos;
- ✓ Condições iniciais
 - $dw(\%)$: Desvio inicial da velocidade em relação a velocidade nominal;
 - $th(deg)$: ângulo elétrico do rotor;
 - $i_a, i_b, i_c(pu)$: correntes iniciais trifásicas do estator;
 - $pha, phb, phc(deg)$: ângulos iniciais nas correntes trifásicas do estator;
 - V_f : Tensão inicial nos enrolamentos de campo.

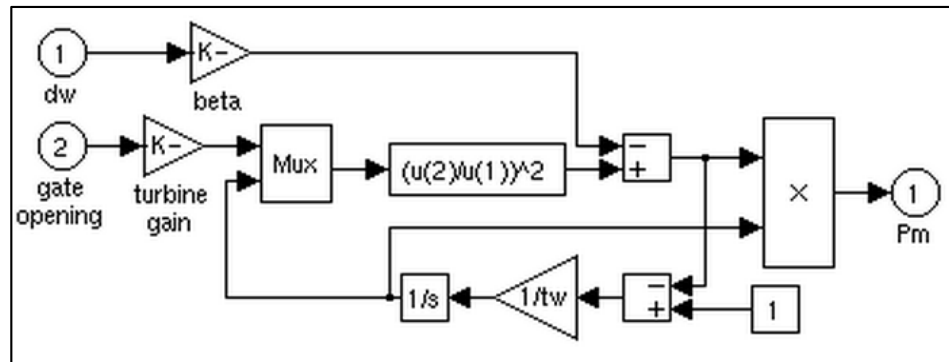
A potência mecânica do gerador está conectada ao bloco denominado “*Hydraulic Turbine and Governor*”. Esse bloco simula um modelo de uma turbina hidráulica não linear, um sistema de regulação Proporcional Integral Derivativo (PID) e um servomotor. As Figuras (24) – (26) apresentam os diagramas de blocos para o sistema “*Hydraulic Turbine and Governor*”, para o modelo não linear da turbina hidráulica e para o sistema de segunda ordem do servomotor, respectivamente.

Figura 24: Diagrama de Blocos do bloco “*Hydraulic Turbine and Governor*”.



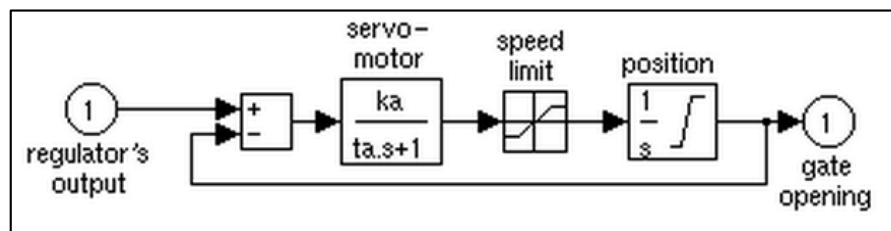
Fonte: Help Matlab Simulink.

Figura 25: Diagrama de blocos do modelo não linear da turbina hidráulica.



Fonte: Help Matlab Simulink.

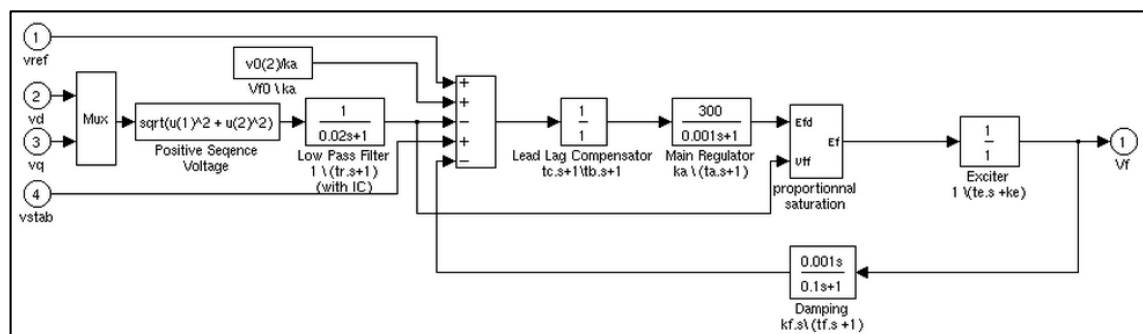
Figura 26: Diagrama de blocos do sistema de segunda ordem do servomotor.



Fonte: Help Matlab Simulink.

A tensão de excitação da máquina está conectada ao bloco “Excitation System”. Esse bloco simula o sistema regulador da tensão da máquina síncrona, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27: Diagrama de blocos para o bloco Excitation System.



Fonte: Help Matlab Simulink.

Os blocos (Figuras 25 e 27) são alimentados com os parâmetros de medição da máquina como as tensões no eixo direto e em quadratura, desvio de velocidade, velocidade do rotor e potência ativa de saída.

3.2. PARÂMETROS ELÉTRICOS PARA SIMULAÇÃO

Para carregar os dados dos elementos do sistema (máquina síncrona, transformador, linha de transmissão e sistema equivalente de Thévenin), utilizou-se os parâmetros de um sistema elétrico apresentado na referência “*EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*”. As Tabelas 1, 2, 3 e 4 apresentam estes parâmetros, respectivamente.

Tabela 1: Parâmetros da Máquina Síncrona.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão Gerada	24	kV(rms)
Potência Aparente	830	MVA
Frequência	60	Hz
R_a	0.00199	pu
X_l	0.15	pu
X_d	1.89	pu
X_q	1.8	pu
X'_d	0.23	pu
X'_q	0.435	pu
X''_d	0.1775	pu
X''_q	0.177	pu
T'_{do}	4.2	s
T'_{qo}	0.589	s
T''_{do}	0.031	s
T''_{qo}	0.063	s
X_0	0.145	pu
R_n	0	pu
X_n	0	pu

Fonte: *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*.

Tabela 2: Parâmetros elétricos do Transformador Elevador.

Parâmetro	Valor	Unidade
Ligação	Delta – Estrela (aterrado)	-
Potência Nominal	725	MVA
Frequência	60	Hz
Tensão no primário	24	kV(rms)
Tensão no secundário	241,5	kV(rms)
Resistência no enrolamento primário	0,002	pu
Resistência no enrolamento secundário	0,0061	pu
Corrente de excitação sem carga (sequência positiva)	0,706	% da corrente nominal
Perdas sem carga (sequência positiva)	466,303	kW
Reatância de curto-circuito (sequência positiva)	0,0921	pu

Fonte: EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing.

Tabela 3: Parâmetros distribuídos para a linha de transmissão.

Parâmetro	Valor	Unidade
Números de fases	3	kV(rms)
Frequência	60	Hz
Resistência de sequência positiva	0.0584647256800	Ω/km
Resistência de sequência zero	0.2221162552000	Ω/km
Indutância de sequência positiva	1.23441630863103	mH/km
Indutância de sequência zero	3.96022581702849	mH/km
Capacitância de sequência positiva	9.22013475136620	$\mu\text{F}/\text{km}$
Capacitância de sequência zero	5.47378289597271	$\mu\text{F}/\text{km}$
Comprimento da linha	100	km

Fonte: EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing.

As linhas de transmissão foram divididas em duas linhas em série de 50 km cada, para posteriores estudos de casos.

Tabela 4: Parâmetros para o Equivalente de Thévenin.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão	241,5	kV(rms)
Ângulo da fase A	10	Graus
Frequência	60	Hz
Resistência	6,1	Ω
Indutância	44,298	mH
Tensão de Base	230	kV

Fonte: *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing.*

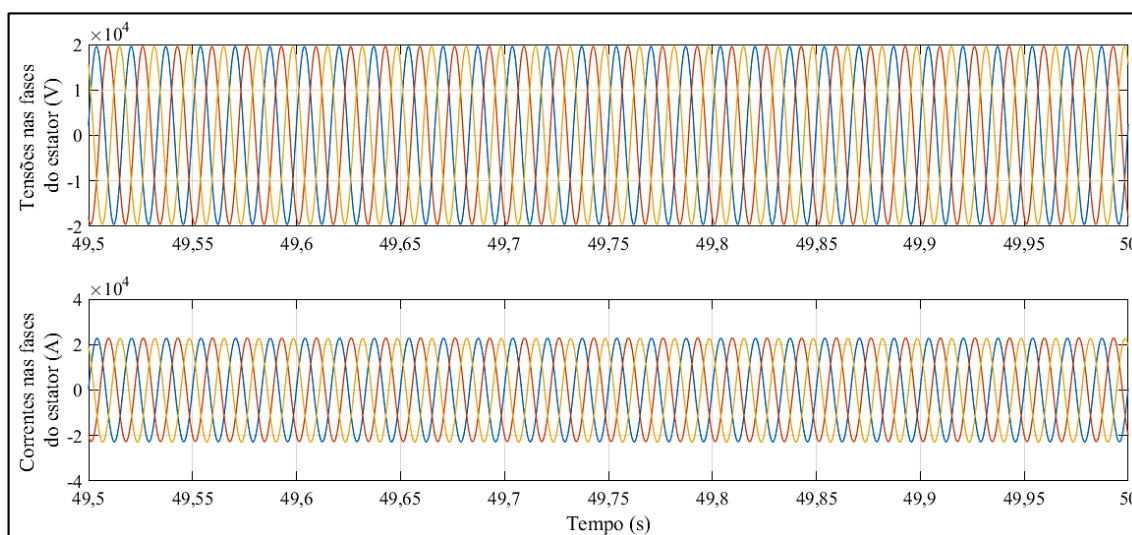
4. RESULTADOS

A fim de dar consistência ao estudo de modelagem e simulação de geradores síncronos de pólos salientes conectados a sistemas de transmissão, foram realizadas simulações para a análise de algumas condições operativas da máquina.

4.1. ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE

Inicialmente foi realizada uma análise do gerador síncrono em regime permanente. A Figura 28 apresenta o perfil de tensões e correntes no circuito do estator da máquina, em regime permanente de operação.

Figura 28: Tensões e correntes nas fases do estator do gerador síncrono de pólos salientes.

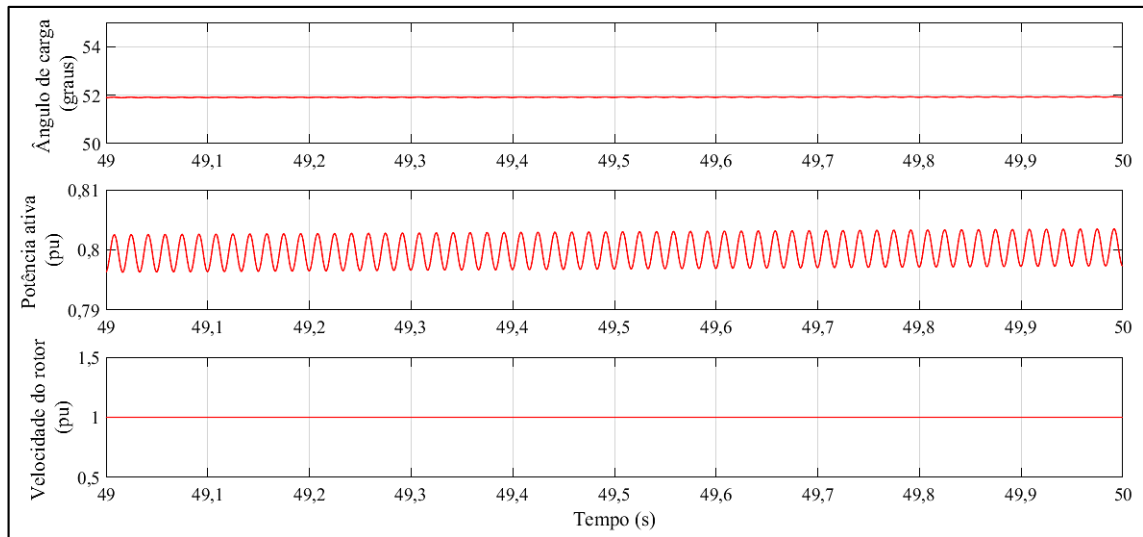


Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 28, a máquina gera uma tensão de linha RMS de 24 kV com uma tensão de fase de amplitude de aproximadamente 19,5 kV. As amplitudes das correntes no estator são da ordem de aproximadamente 20 kA.

A Figura 29 apresenta o comportamento do ângulo de conjugado, potência ativa e velocidade do rotor em regime permanente de operação.

Figura 29: Comportamento do ângulo de carga, potência ativa e velocidade do rotor do gerador síncrono de pólos salientes.

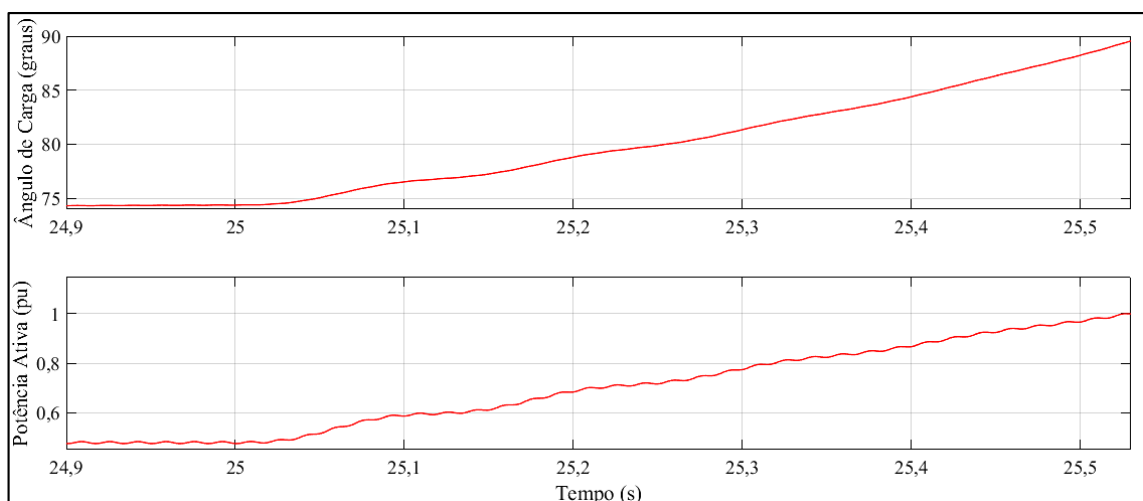


Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 29, em regime permanente, a máquina síncrona opera com um ângulo de carga de aproximadamente 52 graus e despachando uma potência ativa de cerca de 0,8 pu com o rotor girando a uma velocidade constante de 1 pu.

A fim de verificar o efeito do aumento da potência mecânica de entrada no gerador, a Figura 30 ilustra o comportamento da potência ativa fornecida pela máquina ao sistema após a aplicação de uma rampa de potência mecânica ao gerador.

Figura 30: Resposta do ângulo de carga e potência ativa após uma entrada rampa na potência mecânica do gerador síncrono de pólos salientes.

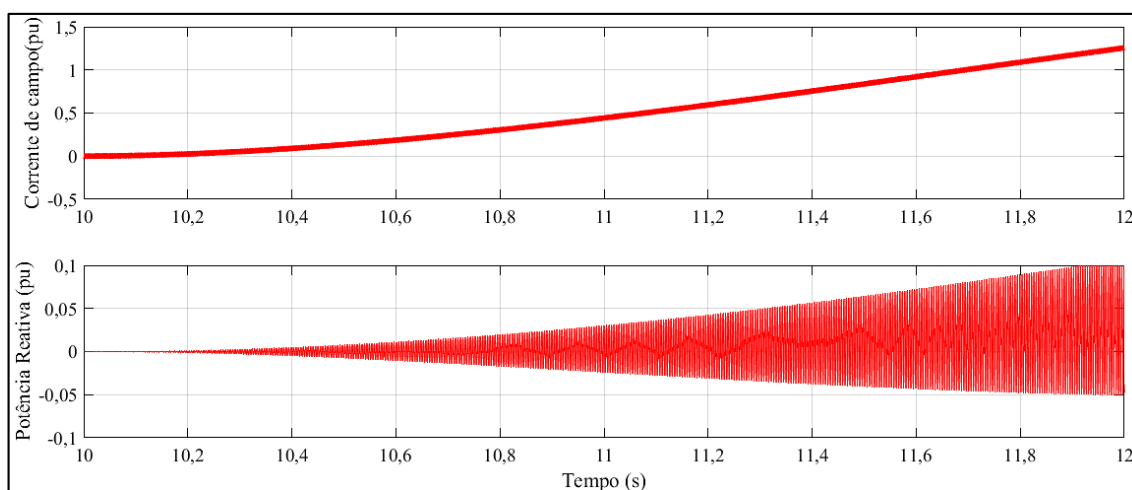


Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 30, inicialmente, a máquina apresenta um ângulo de conjugado de aproximadamente 75 graus fornecendo uma potência ativa de 0,5 pu. Com o aumento da potência mecânica devido à aplicação da rampa nos seus terminais, o ângulo de conjugado e a potência ativa do gerador acompanham essa variação. Assim, o ângulo de carga varia entre 75 a 90 graus gerando um maior despacho de potência ativa para o sistema, a qual passa a variar entre 0,5 a 1 pu.

No que tange ao efeito que se tem devido às variações no sistema de excitação do gerador síncrono, a Figura 31 apresenta o perfil da potência reativa fornecida pela máquina ao sistema a partir de variações na corrente de campo, quando uma entrada rampa é aplicada na tensão de excitação da máquina.

Figura 31: Reposta da corrente de campo e potência reativa após uma entrada rampa na tensão de excitação do gerador síncrono de pólos salientes.



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 31, o aumento na tensão de excitação da máquina eleva a corrente de campo, fazendo com que o despacho de potência reativa do gerador para a rede se eleve.

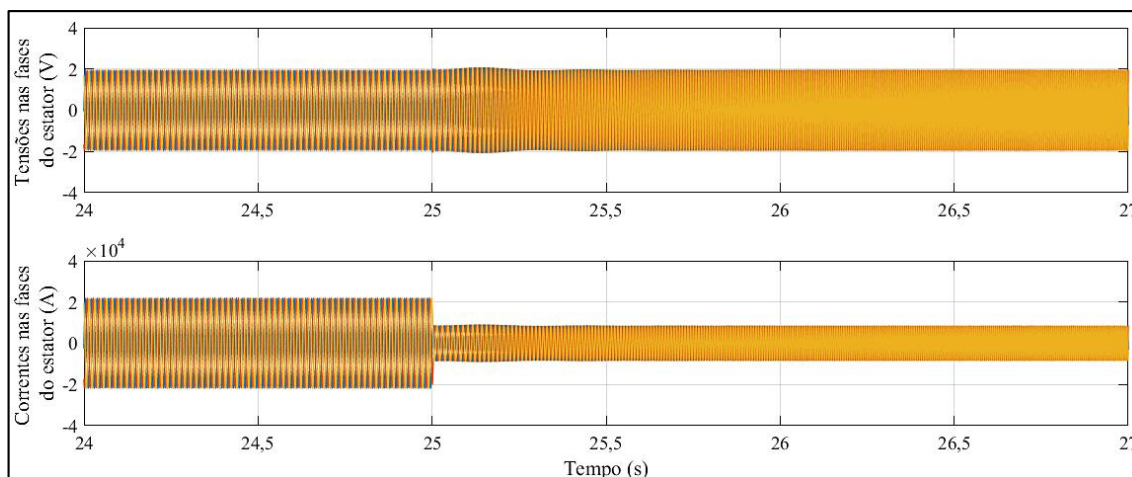
4.2. ANÁLISE EM REGIME TRANSITÓRIO

4.2.1. Perda súbita de carga

Para analisar o comportamento da máquina síncrona perante uma perda súbita de carga (retirada de carga), foi inserido um disjuntor em série com os terminais do estator. A retirada

de carga foi realizada no tempo de 25 segundos. A Figura 32 apresenta as formas de ondas das tensões e correntes no estator antes e depois da ação do disjuntor.

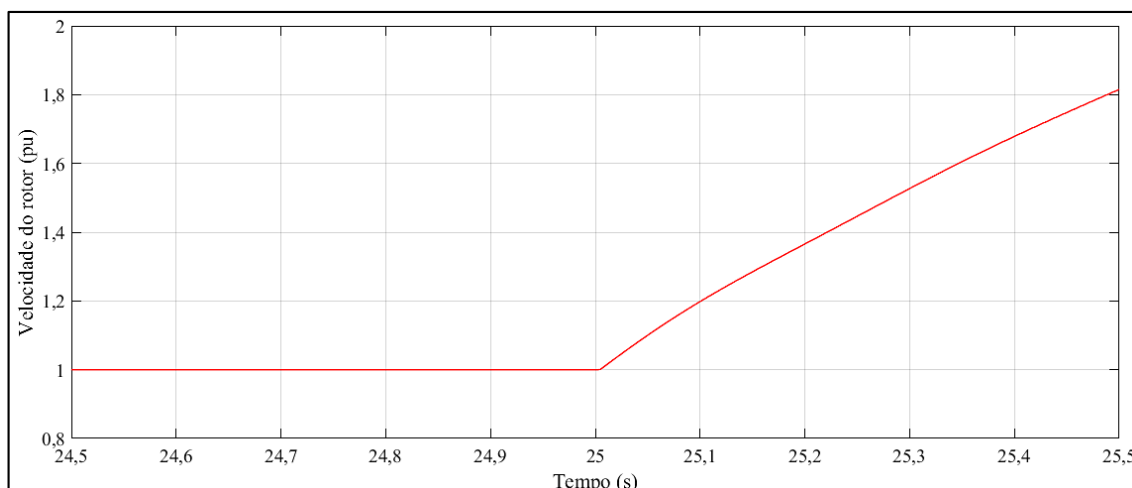
Figura 32: Tensões e correntes nas fases do estator após retirada brusca de carga.



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 32, antes da retirada de carga, as amplitudes das tensões e correntes fornecidas pelo estator do gerador síncrono correspondiam a, aproximadamente, 19,5 kV e 20 kA, respectivamente. Após a retirada de carga, as tensões no estator apresentaram uma rápida oscilação, tendendo a se igualarem às tensões induzidas em seus enrolamentos, enquanto que as correntes apresentaram uma queda brusca, justificada pela interrupção do fluxo de potência. A Figura 33 apresenta o comportamento da velocidade mecânica antes e depois da abertura do disjuntor.

Figura 33: Velocidade do rotor antes e depois da retirada de carga.



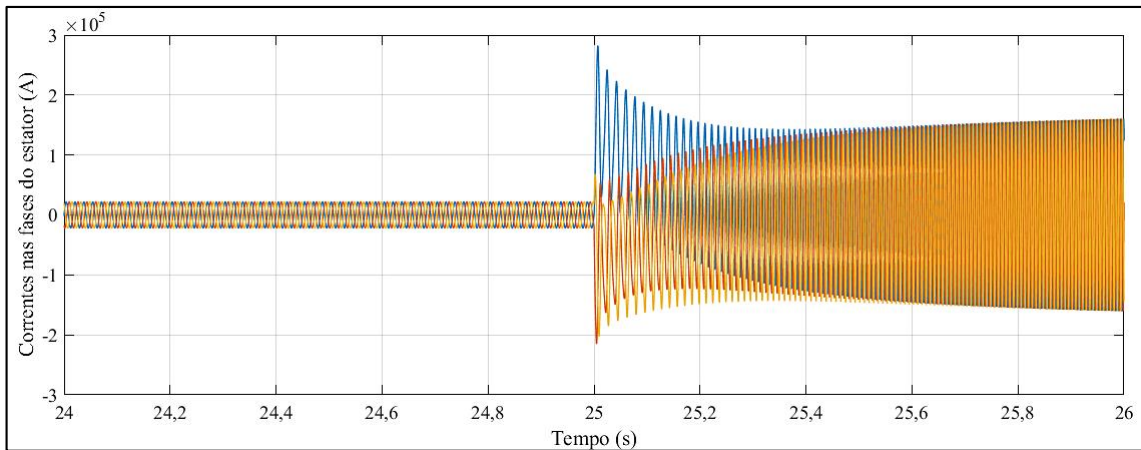
Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 33, antes da abertura do disjuntor, o rotor girava em sua velocidade nominal (1 pu). Após a retirada de carga, o rotor começou a girar a uma velocidade superior a velocidade síncrona. Isso ocorreu devido ao bloqueio do fluxo da potência elétrica por meio da abertura do disjuntor, ou seja, antes da abertura do disjuntor, toda a energia cinética gerada pela máquina era despachada para o sistema. Com a abertura, a energia cinética ficou concentrada no rotor, fazendo com que a máquina acelerasse ganhando cada vez mais velocidade.

4.2.2. Curto-circuito simétrico nos terminais do estator

Após a análise do comportamento da máquina em regime permanente e na ocasião de perda súbita de carga, aplicou-se um curto-circuito trifásico nos terminais do gerador. A Figura 34 apresenta as formas de onda das correntes do estator da máquina antes e depois da falta.

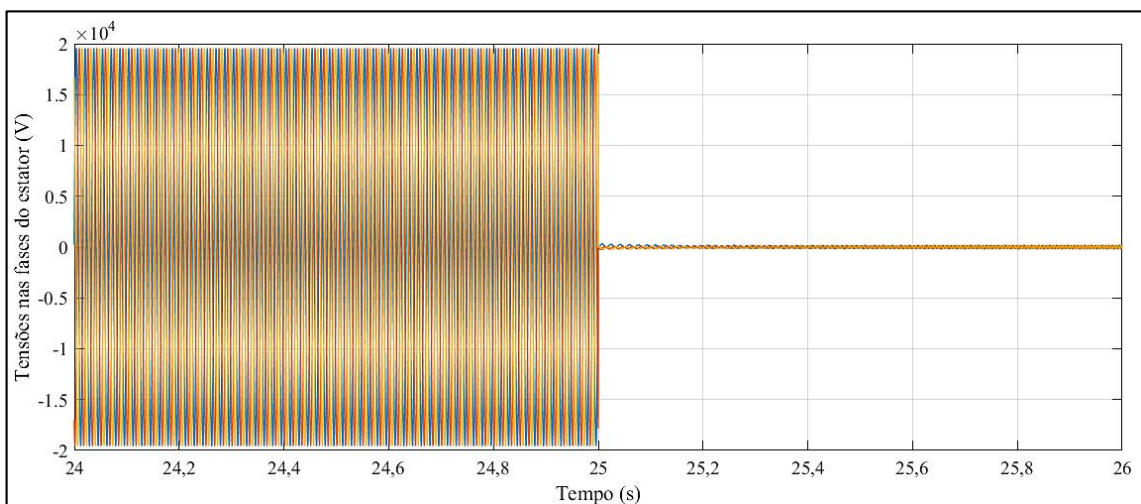
Figura 34: Correntes nas fases do estator antes e depois da aplicação de um curto-circuito trifásico.



Fonte: Autoria Própria.

Com a aplicação do curto-circuito trifásico (Figura 34), verificou-se o surgimento dos períodos subtransitário, transitório e permanente de falta. O valor máximo que a corrente de curto-circuito alcançou no regime subtransitário (corrente assimétrica de curto-circuito) ocorreu cerca de um quarto de ciclo após o instante em que a falta foi aplicada. Após os períodos subtransitário e transitório de falta, as correntes tenderam a ser amortecidas devido à presença dos enrolamentos amortecedores e se estabeleceram no regime permanente de falta com um nível de aproximadamente 6 pu. A Figura 35 apresenta a forma de onda das tensões no estator antes e depois da falta.

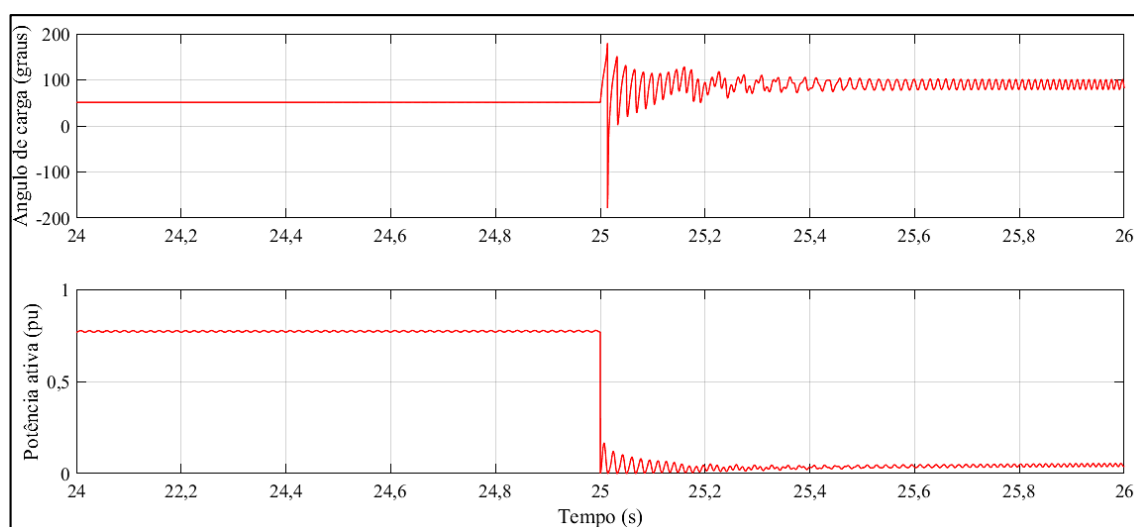
Figura 35: Tensões nas fases do estator antes e depois da aplicação do curto-circuito trifásico.



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 35, as amplitudes das tensões de fase do estator antes da falta foram da ordem de 19,5 kV. Com a aplicação da falta em 25 segundos, as tensões caíram drasticamente. Os comportamentos do ângulo de conjugado e da potência ativa antes e depois da aplicação do curto-circuito simétrico nos terminais da máquina são apresentados na Figura 36.

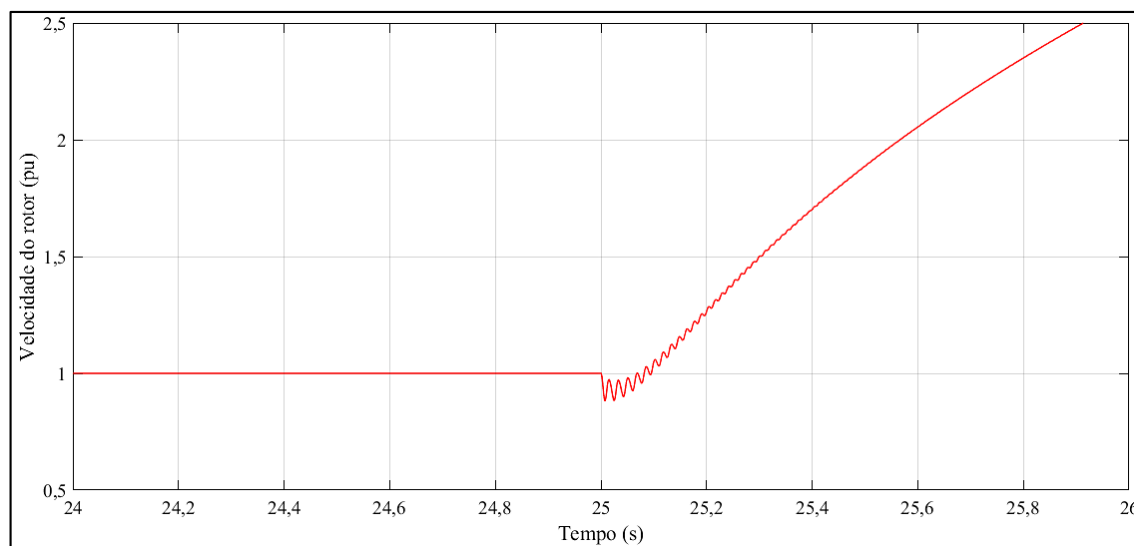
Figura 36: Comportamento do ângulo de carga e potência ativa da máquina antes e depois do curto-circuito trifásico.



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 36, antes da falta a máquina operava com um ângulo de carga de 52 graus e despachando uma potência ativa de cerca de 0,8 pu. Com a aplicação da falta, o ângulo de carga oscilou obtendo inicialmente valores máximos e mínimos de -180 a 180 graus, e atingindo o regime permanente de falta com valores de 60 a 120 graus devido à permanência do curto-circuito, o que pode indicar uma provável perda de sincronismo e da estabilidade. A potência ativa após a falta caiu bruscamente para zero. A Figura 37 apresenta o comportamento da velocidade do rotor da máquina antes e depois da falta.

Figura 37: Velocidade do rotor antes e depois do curto-circuito trifásico.

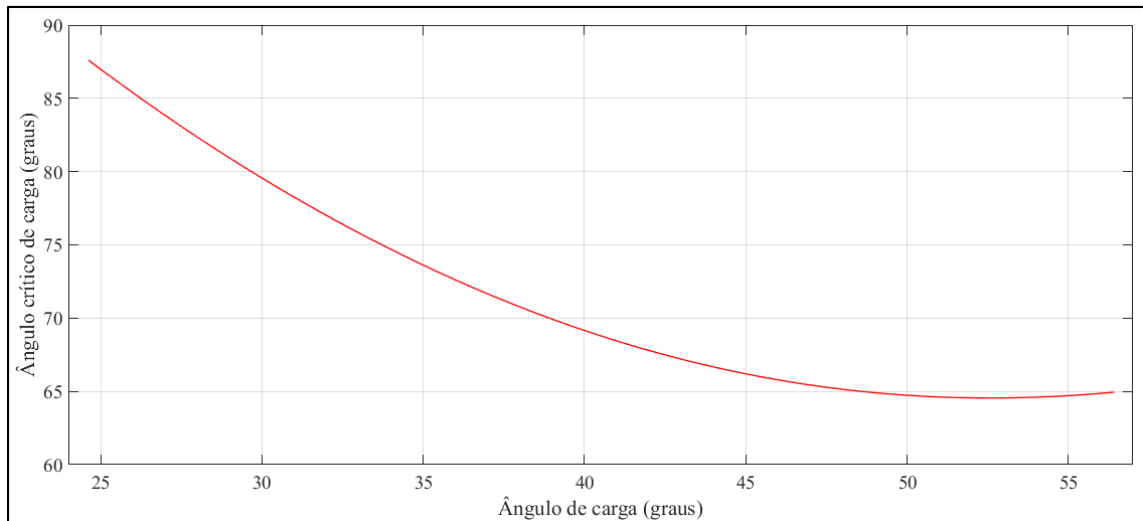


Fonte: Autoria Própria.

Antes da falta, o rotor girava em sua velocidade nominal de 1 pu (Figura 37). Com a aplicação da falta em 25 segundos, a velocidade do rotor inicialmente sofreu uma oscilação seguida de um aumento brusco. A velocidade imediatamente após o curto variou entre 1 a 0,9 pu. Após esse tempo, o rotor começou a girar com uma velocidade superior a 1 pu, perdendo o sincronismo e a estabilidade. Essa variação na velocidade se deu pelo mesmo motivo do aumento na velocidade na retirada de carga. A energia cinética que antes era despachada para o sistema de potência, ficou acumulada na máquina no período do curto, fazendo com que o rotor ganhasse aceleração e provocando um aumento na sua velocidade.

Após analisar o comportamento da máquina em diversas condições de operação, procedeu-se de maneira a obter o ângulo crítico de operação e o tempo crítico em que esse ângulo é atingido. Por meio da Equação (2.58), plotou-se uma curva relacionando o comportamento do ângulo crítico de carga em função do ângulo de carga, conforme apresentado na Figura 38.

Figura 38: Ângulo crítico de carga em função do ângulo de carga.

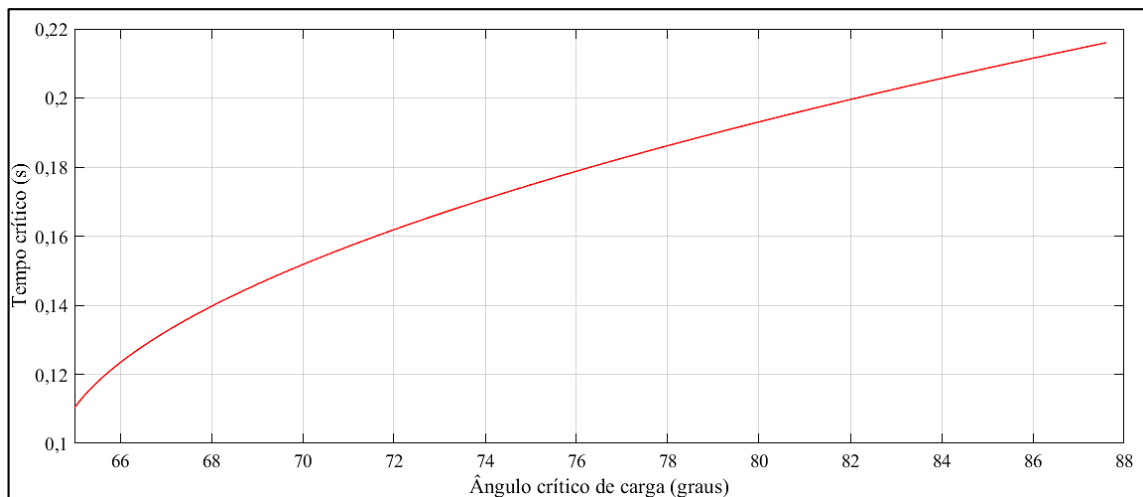


Fonte: Autoria Própria.

Observando a Figura 38, plotou-se diversos valores de ângulo de carga que a máquina pode operar e os seus respectivos valores de ângulo crítico. Dessa maneira, para um ângulo de carga de 50 graus, o ângulo crítico de carga é de aproximadamente 65 graus, correspondendo, então, ao ângulo máximo que a máquina poderia alcançar após a aplicação de um curto-circuito sem que houvesse a perda de estabilidade.

Por meio da equação (2.65) tornou-se possível plotar uma curva relacionando a variação no tempo crítico de abertura da falta em função do ângulo crítico de carga (Figura 39).

Figura 39: Ângulo crítico de carga em função do tempo crítico de abertura da falta.



Fonte: Autoria Própria.

Para a máquina operando inicialmente com um ângulo de carga de 50 graus, o ângulo crítico correspondente seria de aproximadamente 65 graus. De acordo com a Figura 39, esse ângulo crítico seria atingido em um tempo de 0,12 segundos, o que corresponderia a 7,5 ciclos da frequência fundamental. A Tabela 5 apresenta alguns valores de ângulo de carga e os respectivos ângulos críticos de carga e tempos críticos de abertura.

Tabela 5: Ângulo de carga, ângulo crítico de carga e tempo crítico de abertura de falta.

Ângulo de carga (graus)	Ângulo crítico de carga (graus)	Tempo crítico de abertura de falta (s)
25,73	85,81	0,2110
30,53	78,87	0,1892
40,63	68,70	0,1442
50,23	64,70	0,1036

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Tabela 5, quanto menor o ângulo de carga que a máquina está operando, maiores serão o ângulo crítico e o tempo crítico de abertura. Por exemplo, considerando um ângulo de carga inicial de 30,53 graus, a ocorrência de um curto-circuito trifásico permitiria que esse ângulo aumentasse até 78,87 graus sem que houvesse perda de estabilidade. O tempo crítico de abertura da falta, ou seja, o tempo máximo para a atuação do sistema de proteção, nessas condições, deverá ser igual a 0,1892 segundos (cerca de 11,825 ciclos na frequência fundamental).

O tempo crítico encontrado considerando o ângulo de carga inicial da máquina de 50 graus e ângulo crítico de 65 graus foi de 0,12 segundos. Dessa maneira, o sistema de proteção deveria atuar nesse intervalo de tempo para que a máquina não perdesse o sincronismo e a estabilidade na presença da falta.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se a modelagem matemática de um gerador síncrono trifásico de pólos salientes por meio da Transformada de Park, tornando possível a obtenção dos seus circuitos equivalentes, bem como a obtenção dos parâmetros das máquinas síncronas por meio dos ensaios que podem ser realizados.

Algumas simulações foram realizadas a partir do modelo da máquina no software *simulink*, de maneira didática e prática, a fim de se verificar o comportamento da máquina perante algumas condições operativas. No regime permanente, o gerador apresentou características estáveis, despachando tensão, corrente e potência ativa com um ângulo de carga e velocidade constantes. No entanto, e como era de se esperar, esses comportamentos não foram verificados em situações transitórias. Durante a perda súbita de carga, por exemplo, observou-se uma elevação da velocidade do rotor e uma queda na corrente de armadura da máquina devido à interrupção do fluxo de potência. Na simulação do curto-circuito trifásico, notou-se uma elevação nas correntes de armadura, uma diminuição brusca nas tensões e na potência ativa, além de variações no ângulo de carga e um aumento da velocidade do rotor, caracterizando a perda de estabilidade e sincronismo. Por fim, foi possível traçar curvas teóricas relacionando o ângulo de carga em função do ângulo crítico de carga, bem como o tempo crítico de abertura da falta em função do ângulo crítico de carga, com o objetivo de entender a relação que existia entre essas grandezas.

Devido ao fato da máquina ter sido modelada usando os sistemas reguladores de potência mecânica de entrada e de excitação fornecidos pelas bibliotecas do *software* utilizado, bem como da ausência de alguns dados que representassem de maneira mais realística o comportamento da máquina, a exemplo da constante de inércia, cujo valor utilizado foi bastante inferior aos que são utilizados na prática, sobretudo quando se trata da aplicação de geradores síncronos de grande porte, a estimação com precisão do tempo crítico de abertura da falta não foi realizada neste trabalho.

Para pesquisas futuras, propõe-se modelar a máquina com um modelo próprio, bem como incorporar a esse modelo sistemas mais realísticos para o controle da potência mecânica de entrada e da tensão de excitação. Além disso, pretende-se realizar estudos de dimensionamento dos sistemas de proteção para atuação em casos de falta sem que haja perda de sincronismo da máquina.

6. REFERÊNCIAS

ANTUNES, Hélio Marcos André. **Modelagem Matemática do Gerador Síncrono Trifásico de Pólos Salientes**. 2007. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

ARAUJO, Thiago da Cunha. **Análise de Máquina Síncrona de Pólos Salientes Sólidos**. 2011. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003931.pdf>>.

BARBOSA, F. Maciel. **ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA**. 2013. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~fmb/wp-content/uploads/2018/01/EstabilidadeSEE2013.pdf>.

BERNARDES JUNIOR, José Vitor. **Determinação de parâmetros através de abertura e fechamento de curto-circuito**. 2015. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

BIM, Edson. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

CHAPMAN, Stephen J.. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013.

FERNANDES, João Leal. **Máquina Síncrona em Regime Transitório após Brusco Curto-Circuito no Estator**. 2006. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/1071/1/fernandes_2006.pdf>.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR. Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas: Com introdução a eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétrica Industriais**. 9. ed. São Paulo: Ltc, 2017.

PERES, Larissa Marques. **Estudo do Desempenho Dinâmico de Geradores Síncronos de Produtores Independentes em Sistema de Geração Distribuída via ATPDraw**. 2013. 181

f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

POSSATTI, Luiz Henrique Frohlich. **Identificação de parâmetros de máquinas síncronas utilizando dados operacionais**. 2013. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013

SILVA, Antonio Manoel Batista da. **Análise do desempenho de geradores síncronos distribuídos com controladores dotados de modos de operação comutáveis**. 2016. 231 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

SOUSA, Murilo Hinojosa de. **Determinação de parâmetros de máquinas síncronas pelo ensaio de resposta em frequência: proposta de metodologia com inversor de frequência**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SOUZA, Sabrina de Angeli. **Implementação de um gerador síncrono virtual e desenvolvimento de uma estratégia de sintonia para seus sistemas de excitação e governador de velocidade**. 2017. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.