



Universidade de Taubaté
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190

Rodrigo Santos Prudente do Amaral

ESTUDO DE FALTAS E PROTEÇÕES EM MÁQUINA SÍNCRONA PARA USINAS HIDRELÉTRICAS

Taubaté

2019



Universidade de Taubaté
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190

Rodrigo Santos Prudente do Amaral

ESTUDO DE FALTAS E PROTEÇÕES EM MÁQUINA SÍNCRONA PARA USINAS HIDRELÉTRICAS

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Me. Seide da Cunha Filho

Taubaté
2019

SIBi - Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

A485e Amaral, Rodrigo Santos Prudente do
 Estudo de faltas e proteções em máquina síncrona para usinas
 hidrelétricas / Rodrigo Santos Prudente do Amaral. – 2019.
 52f. : il.

 Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento
 de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

 Orientação: Prof. Me. Seide da Cunha Filho, Departamento de
 Engenharia Elétrica.

 Coorientação: Prof. Me. Sandro Botossi dos Santos, Departamento
 de Engenharia Elétrica.

 1. Faltas. 2. Gerador. 3. Máquina síncrona. 4. Proteção. I.
 Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica. II. Título

CDD 621.312134



Universidade de Taubaté
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

ESTUDO DE FALTAS E PROTEÇÕES EM MÁQUINA SÍNCRONA PARA USINAS HIDRELÉTRICAS

RODRIGO SANTOS PRUDENTE DO AMARAL

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA”

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. SEIDE DA CUNHA FILHO
Orientador/UNITAU-DEE

Prof. Me. SANDRO BOTOSSÍ DOS SANTOS
Co-Orientador/UNITAU-DEE

Prof. RUBENS CASTILHO JUNIOR
UNITAU-DEE

Dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais que sempre me apoiaram, me deram forças, se preocuparam com meus estudos e possibilitaram a minha busca pelo desenvolvimento profissional e também ao meu irmão que me apoiou desde o início e me ajudou sempre que pôde.

Aos amigos que me acompanharam durante toda a graduação, me ajudando, orientando e me possibilitando uma grande amizade para toda a vida. Aos professores que nos apoiaram durante todo esse tempo, cobrando de nós para que nos tornássemos melhores, em especial ao meu orientador que teve toda a paciência de me guiar ao longo do trabalho e ao meu co-orientador que me deu o suporte necessário.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos os profissionais que me acompanharam dentro do meu estágio, me ajudando e proporcionando conhecimentos que agregaram valor a minha formação.

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade”

Albert Einstein

RESUMO

Em Usinas Hidrelétricas, comumente são utilizadas máquinas síncronas como geradores, acoplados às turbinas, que são responsáveis por gerar a energia mecânica. O rotor forma o campo girante junto aos polos, que quando excitados geram fluxo variante resultando na força eletromotriz. Nesse processo, a diferença de potencial gerada no estator é a tensão a ser entregue pela máquina. O fato de utilizarmos tais máquinas como geradores dá-se pela a mesma ser sincronizada com o campo magnético, ou seja, sua frequência elétrica é muito próxima ou igual à frequência angular, o que permite trabalhar com velocidades variáveis, obter um maior rendimento e respostas mais dinâmicas do sistema. Porém, no ponto de vista literário, essas máquinas são pouco analisadas em termos de proteção. Pensando nisso, o trabalho visa abordar o funcionamento de um gerador de uma usina hidrelétrica, estudando as principais partes e analisando as faltas comuns que ocorrem no estator da máquina, ou seja, os curtos circuitos que ocorrem devido às falhas nas proteções e aterramento. O estudo de proteção é iniciado após a abordagem dos conceitos fundamentais de funcionamento do gerador, analisando principalmente a falta Fase-Terra e o sistema de aterramento. Também é realizado a análise dos tipos de enrolamentos presentes no estator e a verificação das ranhuras no núcleo do estator. Para completar, há o estudo dos componentes utilizados para abordar o curto circuito fase terra, como relés de proteção e sistema de aterramento, verificando o funcionamento e aplicação dos mesmos para atuarem no momento adequado, evitando perdas no sistema. O trabalho se divide em apresentar as principais partes da máquina síncrona, aprofundando-se mais no estator, fornecendo base para o estudo das faltas propostas e posteriormente os tipos de proteções associadas àquela falta. Ao final da análise dos componentes utilizados para proteção elétrica da máquina síncrona, verifica-se a necessidade de existir proteções adequadas ligadas ao sistema, bem como a necessidade do dimensionamento das proteções bem definidos, entendendo o objetivo de cada equipamento e sua função dentro do circuito.

Palavras Chave: Máquina Síncrona, Gerador, Faltas, Proteção

ABSTRACT

In hydroelectric plants, synchronous machines are commonly used as generators, coupled to turbines, which are responsible for generating mechanical energy. The rotor forms the rotating field near the poles, which when excited generate variant flow resulting in electromotive force. In this process, the potential difference generated in the stator coils is the voltage to be delivered to the system. The fact that we use such machines as generators is because it is synchronized with the magnetic field, that is, its electric frequency is very close to or equal to the angular frequency, which allows to work with variable speeds, to obtain a higher yield and responses. more dynamic of the system. However, from the literary point of view, these machines are little analyzed in terms of protection. With this in mind, the work aims to approach the operation of a generator of a hydroelectric plant, studying the main parts and analyzing the common faults that occur in the stator of the machine, that is, the short circuits that occur due to faults in the protections and grounding, with emphasis on lack Phase-Ground. The protection study is started after addressing the fundamental concepts of system faults, mainly analyzing the Phase-Ground fault. The components used to approach the ground phase short circuit, such as protective relays and grounding system, are verified, checking the operation and application of them to act at the appropriate time, avoiding major disturbances in the industrial electrical system. The study is divided into presenting the main parts of the synchronous machine, going deeper into the stator, providing the basis for the study of the proposed faults and later the types of protections associated with that fault. Finally, there is the need to have adequate protections connected to the system, as well as the need to design well defined protections, understanding the purpose of each equipment and its function within the circuit.

Keywords: Synchronous Machine, Generator, Faults, Protection

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

F.E.M – Força eletromotriz

VEI – Vocabulário Elétrico Internacional

PP – Pares de polo

UHE – Usina Hidrelétrica

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

Std - Standart

SEP – Sistema Elétrico de Potência

ANSI – American National Standarts Institute

A/D – Analógico/Digital

COG – Coefficient of Grounding

LISTA DE SÍMBOLOS

- n_s – Rotação síncrona
- f – Frequência
- PP – Par de polo
- rpm – Rotação por minuto
- I_a^1 – Corrente de sequência positiva da fase A
- I_b^1 – Corrente de sequência positiva da fase B
- I_c^1 – Corrente de sequência positiva da fase C
- X''_{du} – Reatância subtransitória
- X'_{du} – Reatância transitória
- X_{du} – Reatância síncrona de eixo direto
- I_a^2 – Corrente de sequência negativa da fase A
- I_b^2 – Corrente de sequência negativa da fase B
- I_c^2 – Corrente de sequência negativa da fase C
- X_2 – Reatância de sequência negativa
- X''_d – Reatância subtransitória de eixo direto
- X''_q – Reatância subtransitória de quadratura
- I_a^0 – Corrente de sequência zero da fase A
- I_b^0 – Corrente de sequência zero da fase B
- I_c^0 – Corrente de sequência zero da fase C
- 3ϕ - Sistema trifásico
- ϕ - Sistema monofásico
- \hat{a} – Operador unitário de Fortescue
- \hat{I}_a – Corrente da fase A (componente do sistema)
- \hat{I}_b – Corrente da fase B (componente do sistema)
- \hat{I}_c – Corrente da fase C (componente do sistema)
- \hat{I}_n – Corrente de Neutro
- C_s – Capacitância entre fases
- C_0 – Capacitância à terra
- X0 – Reatância de sequência zero
- X1 – Reatância de sequência positiva
- R0 – Resistência de sequência zero

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Formas de onda trifásica geradas no estator da máquina síncrona.....	16
Figura 1.2: Vetores dos campos magnéticos gerados por correntes trifásicas.	17
Figura 1.3: Excitatriz Brushless (sem escovas).....	19
Figura 1.4: Excitatriz Estática	20
Figura 1.5: Chapas do núcleo do estator	21
Figura 1.6: Núcleo do estator montado	21
Figura 1.7: Barra com fios de cobre e isolamento	22
Figura 1.8: Transposição 360° da barra de 10 fios.....	23
Figura 1.9: Transposição 540° da barra de 10 fios.....	23
Figura 1.10: Enrolamento distribuído concêntrico	25
Figura 1.11: Enrolamento distribuído imbricado	25
Figura 1.12: Enrolamento distribuído ondulado.....	26
Figura 1.13: Carcaça do estator de belo monte	27
Figura 1.14: Rotor de polos salientes.....	28
Figura 1.15: Rotor de polos lisos.....	29
Figura 1.16: Enrolamentos de campo e enrolamento amortecedor.....	30
Figura 2.1: Sequência de fase: positiva (a); negativa (b); zero (c)	35
Figura 2.2: Composição de um sistema desequilibrado.....	36
Figura 2.3: Análise de tensões durante a falta fase-terra.....	38
Figura 2.4: Fusão das lâminas do núcleo do estator.....	39
Figura 3.1: Sistema trifásico idealizado com representação para curto circuito	45
Figura 3.2: circuito equivalente de proteção contra falta fase-terra.....	49

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO I – Máquina síncrona.....	15
1.1 Geradores síncronos	15
1.2 Sistema de excitação	17
1.2.1 Excitação independente	17
1.2.2 Excitação por eletrônica de potência	17
1.2.3 Excitação estática	17
1.2.4 Excitatriz	18
1.2.4.1 Excitatriz Brushless.....	18
1.2.4.2 Excitatriz Estática.....	19
1.3 Estator.....	20
1.3.1 Barras do estator.....	22
1.3.2 Circuito do estator	24
1.4 Carcaça	26
1.5 Rotor.....	27
1.5.1 Circuito do rotor.....	29
CAPÍTULO II - Faltas.....	31
2.1 Sequência positiva	31
2.2 Sequência negativa	32
2.3 Sequência zero	32
2.4 Análise do teorema de Fortescue.....	33
2.4.1 Sistema assimétrico	34
2.5 Falta Fase-Terra.....	36
2.5.1 Falta Fase-Terra no estator da máquina.....	37
CAPÍTULO III - Sistemas de proteção.....	40

3.1 Relés de proteção	41
3.1.1 Relé fluidodinâmico	43
3.1.2 Relé eletromagnético	43
3.1.3 Relé eletrodinâmico	43
3.1.4 Relé de indução	43
3.1.5 Relé térmico	43
3.1.6 Relé eletrônico	44
3.1.7 Relé digital	44
3.2 Aterramento.....	44
3.2.1 Coeficiente de aterramento	46
3.2.2 Classes de aterramento	47
3.2.2.1 Efetivamente aterrado.....	47
3.2.2.2 Não efetivamente aterrado	47
3.2.2.2.1 Sistema aterrado por resistência	47
3.2.2.2.2 Sistema aterrado por indutância.....	47
3.2.2.2.3 Sistema aterrado por neutralizadores (ressonante)	48
3.2.2.2.4 Sistema não aterrado	48
3.3 DISJUNTOR E FUSÍVEL.....	48
CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

INTRODUÇÃO

Os geradores de usinas hidrelétricas formam um conjunto completo ao serem acoplados às turbinas, as quais são as responsáveis por transformar a energia cinética da água em energia de rotação para o eixo da máquina. Assim, o rotor é o responsável por acoplar o gerador à turbina, transmitindo essa rotação para o eixo girante da máquina, que no gerador são acoplados os polos, que ao serem excitados geram fluxo variante que resulta na força eletromotriz (f.e.m). Assim o campo magnético é criado e a diferença de potencial presente entre as bobinas do estator e rotor é a tensão que será entregue ao sistema.

Para fixar melhor o conceito de máquina síncrona, entende-se que a mesma possui maior facilidade de sincronizar sua frequência com a frequência angular do sistema, permitindo que a velocidade da máquina possa variar, sendo esta variação comum em uma usina hidrelétrica. Dessa forma, define-se que este tipo de máquina é a que possui maior rendimento no quesito geração de energia, visto que a mesma se adapta melhor às diversas condições e também possui respostas mais dinâmicas do sistema. Porém, dentro de um gerador, como em qualquer outra máquina elétrica, podem ocorrer faltas que acarretam em distúrbios na rede elétrica, gerando riscos e prejuízos se não tratadas de forma correta pelos equipamentos de proteção. Essas faltas, comumente chamadas de curto circuito, podem ser Fase-Terra, Fase-Fase, Trifásica e Trifásica-Terra, podendo assumir características simétricas ou assimétricas, sendo essa última composta por componentes de sequência zero, positiva e negativa. Os curtos circuitos podem ocorrer devido a falhas na isolação do sistema, bem como por chaveamento ou até por descargas atmosféricas. Assim sendo, os sistemas de proteção e aterramento das máquinas devem ser dimensionados para que possam conter a falta em questão, evitando danos no equipamento e perturbações ao sistema elétrico industrial.

Primeiramente, deve-se entender que a máquina síncrona é composta por diversas partes, necessitando todas elas de proteção. Dessa forma, se faz necessário o estudo de cada parte e definição das mesmas para fundamentar e entender as faltas ocorrentes. Este trabalho aborda as partes da máquina síncrona, tais como: Sistema de Excitação, Estator e Rotor. Esta abordagem valida o conhecimento para um melhor entendimento das faltas. A falta Fase-Terra será a mais analisada, por isso uma análise nos tipos de enrolamentos do estator e funcionamento de polos faz-se

necessária. Por fim, antes de abordar um caso de falta e analisar as proteções necessárias e as normas vigentes, o entendimento de sistemas de aterramento é imprescindível, dando base para toda a análise deste trabalho.

CAPÍTULO I – Máquina Síncrona

Uma máquina síncrona, basicamente pode ser definida por duas características comuns: possuir uma velocidade variável de acordo com a frequência e possuir fator de potência regulável. Segundo o Vocabulário Eletrotécnico Internacional (VEI 411-01.06) *“uma máquina síncrona é uma máquina de corrente alternada na qual a frequência da tensão induzida e a velocidade possuem uma relação constante”*.

Sendo a mais utilizada em sistemas de geração de energia elétrica, a máquina síncrona pode trabalhar tanto como gerador quanto como compensador de potência reativa. Seu uso pode se estender à sistemas de acionamento de grandes potências, bombeamento e tração elétrica. Dessa forma, classificamos esse tipo de máquina da seguinte forma:

- (1) Geradores Síncronos:
 - a. Polos salientes;
 - b. Polos Lisos
- (2) Motores Síncronos.

1.1 Geradores síncronos

Geradores síncronos, também denominados de alternadores, são máquinas que convertem energia mecânica em energia elétrica. Esse tipo de máquina tem sua rotação inversamente proporcional ao número de polos e diretamente proporcional a frequência. Essa velocidade é chamada de velocidade de rotação do campo girante, a qual define a rotação síncrona da máquina pela seguinte fórmula:

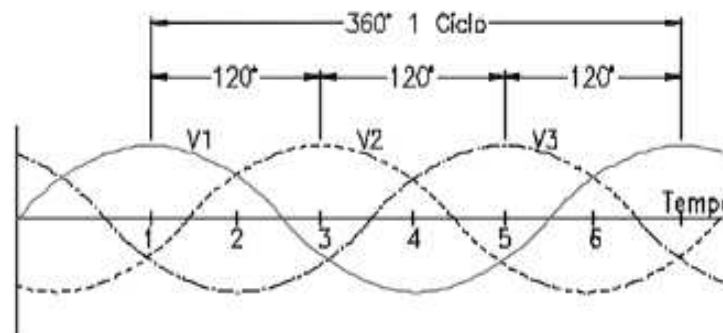
$$n_s = \frac{60 \times f}{PP} \text{ [rpm]} \quad (1)$$

Os pares de polos do estator, definidos por “PP”, são distribuídos alternadamente (pólo norte e pólo sul) ao longo da periferia do núcleo magnético. A frequência é definida por “f”, representando o campo girante percorrendo um par de polos a cada ciclo.

Em termos construtivos, gerador e motor síncrono são basicamente idênticos. O induzido da máquina, normalmente no estator, é constituído por um enrolamento distribuído, geralmente trifásico e com 1 ou mais pares de polos. Já o indutor, geralmente no rotor, é constituído por um enrolamento monofásico excitado por

corrente contínua. Assim, a circulação de corrente no enrolamento distribuído do estator produz fluxo magnético girante, que progride pelo entreferro da máquina. Esse campo girante é criado conforme o eixo da bobina e proporcional a corrente que percorre a mesma. Podemos observar, na figura 1.1, a forma de onda gerada em um sistema trifásico equilibrado devido a distribuição simétrica das bobinas, formando um ângulo de 120° .

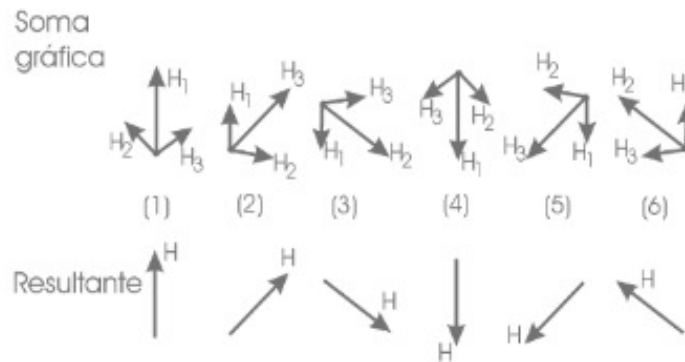
Figura 1.1: Formas de onda trifásica geradas no estator da máquina síncrona



Fonte: Manual Weg Máquinas Síncronas

Usando o exemplo encontrado no manual de Motores Síncronos da WEG, se o enrolamento de um motor trifásico for alimentado por um sistema também trifásico, podemos analisar a figura 1.2 da seguinte maneira: as correntes trifásicas geradas criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos representados na figura 1.2. Estes campos estão defasados em 120° entre si e, como são proporcionais às correntes, também serão defasados em 120° no tempo. Assim, em cada instante, o campo resultante H será a soma gráfica dos 3 campos gerados naquele instante.

Figura 1.2: Vetores dos Campos Magnéticos gerados por correntes trifásicas.



Fonte: Manual Weg Máquinas Síncronas

1.2 Sistema de excitação

As máquinas síncronas possuem um sistema de excitação que tem por função estabelecer uma tensão interna no gerador. Este sistema é responsável pela regulação da tensão induzida no estator, bem como o controle do Fator de Potência.

Em Máquinas síncronas, podemos observar diversos tipos de sistemas de excitação, conforme analisados abaixo:

1.2.1 Excitação independente

Alimenta o rotor através de anéis rotativos e escovas.

1.2.2 Excitação por eletrônica de potência

O sinal de saída do gerador trifásico é retificado para alimentar, em corrente contínua, o rotor, por meio de anéis e escovas. O arranque na partida utiliza suporte de uma fonte externa.

1.2.3 Excitação estática

O enrolamento do campo do rotor é alimentado por um transformador com sinal retificado, que toma como base a tensão e corrente de saída do estator. Os dois enrolamentos primários do transformador se conectam em paralelo e em série na saída do estator. A tensão é reduzida e retificada, e posteriormente aplicada ao rotor por meio das escovas e anéis deslizantes. Este sistema é chamado de autorregulado intrínseco, pois aumentando o consumo sobre o gerador tem-se o enrolamento em

série aumentando o fluxo do transformador, aumentando assim a excitação do gerador.

1.2.4 Excitatriz

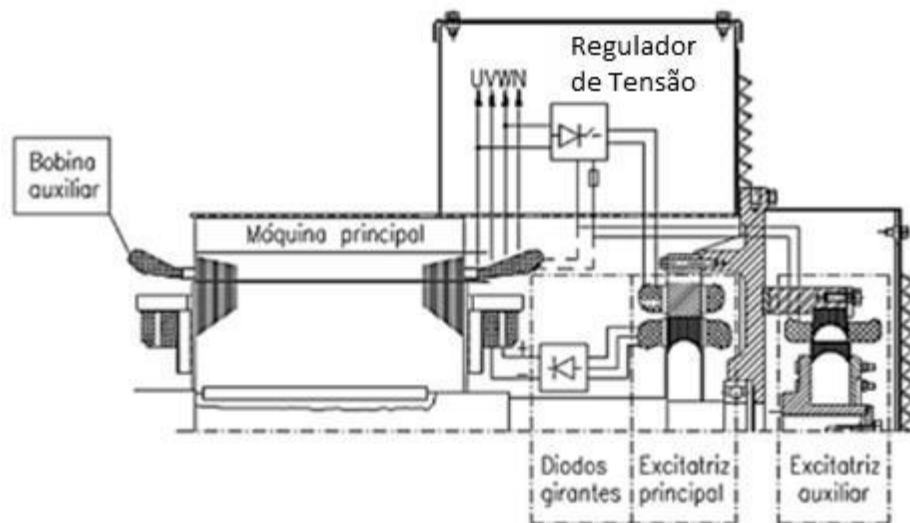
A máquina síncrona possui o enrolamento induzido do estator, que é um enrolamento polifásico onde circulam correntes alternadas. O enrolamento de excitação fica no rotor e é alimentado por corrente contínua através de anéis de coletores e escovas. Essa corrente contínua de excitação demanda uma potência de aproximadamente 1% da nominal, podendo ser fornecida pela rede através de retificadores controlados, ou por meio de uma excitatriz, que é um gerador menor, autoexcitado ou não, que fornece corrente contínua.

A excitatriz tem a função de fornecer corrente magnetizante para as bobinas do motor. Existem 2 tipos, sendo a Excitatriz Brushless (sem escovas) e a Excitatriz Estática.

1.2.4.1 Excitatriz Brushless

É formada pelo conjunto rotor, estator, diodos retificadores e circuito de disparo. Esta excitatriz é do tipo girante, fornecendo corrente alternada por meio do rotor do eixo, que contém um enrolamento trifásico. O estator é formado por polos alternados em Norte e Sul, que são alimentados por uma fonte externa de corrente contínua. O enrolamento trifásico é conectado em uma ponte de diodos retificadores, que controla a amplitude da tensão gerada no rotor, que irá alimentar o enrolamento do campo do motor, como pode ser observado na figura 1.3. Este tipo de excitação para motores síncronos costuma ser mais barato em termos de manutenção, pois não possui escovas e contatos elétricos deslizantes, o que elimina a possibilidade de ocorrer faíscas e reduz o desgaste. São recomendados para áreas especiais com atmosfera explosiva.

Figura 1.3: Excitatriz Brushless (sem escovas)

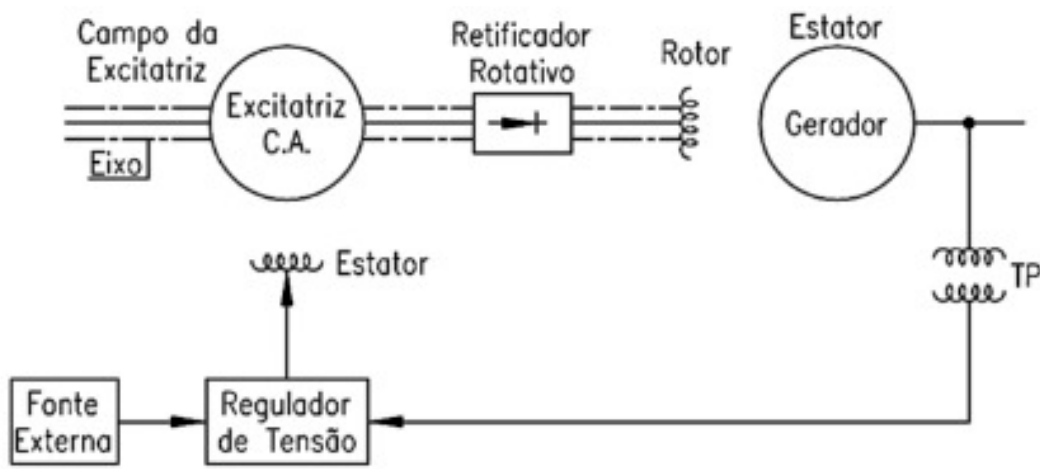


Fonte: Adaptado de (WEG Equipamentos Elétricos S.A)

1.2.4.2 Excitatriz Estática

É formada por anéis coletores e escovas e depende de uma fonte externa para alimentar o campo do motor, a qual envia um sinal para o regulador de tensão que faz a comparação com a tensão de saída da máquina principal. Como afirmado por VOIGT (2018), “O erro resultante da operação alimenta o estator da excitatriz principal com tensão contínua que induz uma tensão alternada no enrolamento de campo montado no próprio eixo do gerador. A tensão alternada é aplicada nos terminais do circuito retificador que fornece corrente contínua para o enrolamento de campo da máquina principal. Desta forma, o regulador de tensão controla a saída da excitatriz principal tal que a tensão gerada e a potência reativa variam de maneira desejada.”. Podemos constatar essa afirmação observando a figura 1.4. Este tipo de sistema de excitação é amplamente utilizado em aplicações que utilizam variação de velocidade através de inversores de frequência.

Figura 1.4: Excitatriz Estática



Fonte: Catálogo WEG

1.3 Estator

O estator é a parte fixa do motor síncrono. Este é composto por diversas subpartes, como núcleo, carcaça, enrolamento e terminais. Sua função principal é conduzir o fluxo magnético, transformando a energia cinética do rotor em energia elétrica.

O núcleo estator de uma máquina síncrona para usina hidrelétrica é basicamente formado por chapas de ferro silício, conforme visto na figura 1.5 que ajuda na redução de perdas por corrente de Foucault e por efeito Skin. Essas chapas formam o núcleo do estator, onde ocorrem todos os fenômenos eletromagnéticos que irão induzir a corrente elétrica até os terminais. O núcleo é dotado de ranhuras internas, onde se alocam as bobinas da máquina e também de ranhuras e aletas externas, que ajudam no processo de refrigeração da máquina.

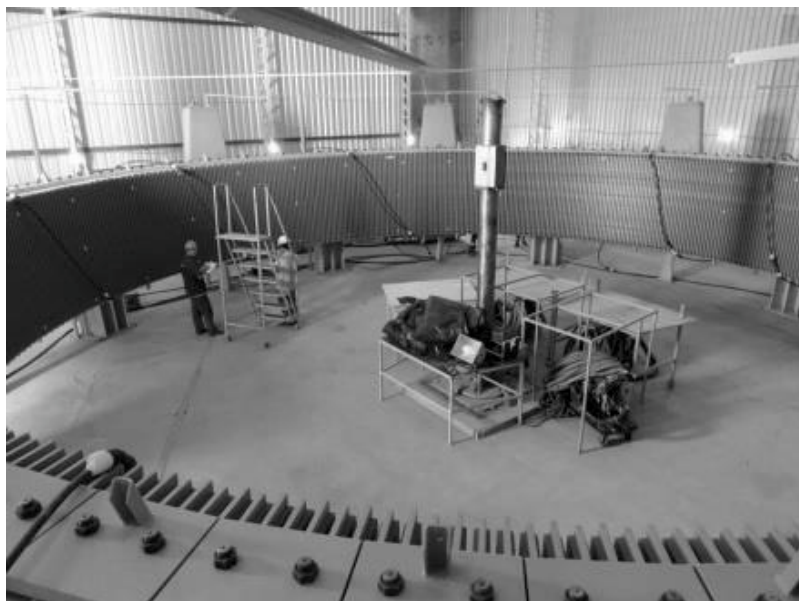
Figura 1.5: Chapas do Núcleo do Estator



Fonte: Assessoria UHE Sinop, 2016

As máquinas de usinas hidrelétricas buscam eliminar perdas eliminando quinas nos componentes, a fim de evitar que o campo magnético se concentre nos cantos da máquina. Assim aplica-se essa metodologia em todo o núcleo, conforme visto na figura 1.6, dando o formato final arredondado e reduzindo as perdas, aumentando rendimento, e conseqüentemente reduzindo o efeito corona entre as barras e o núcleo em si.

Figura 1.6: Núcleo do Estator Montado



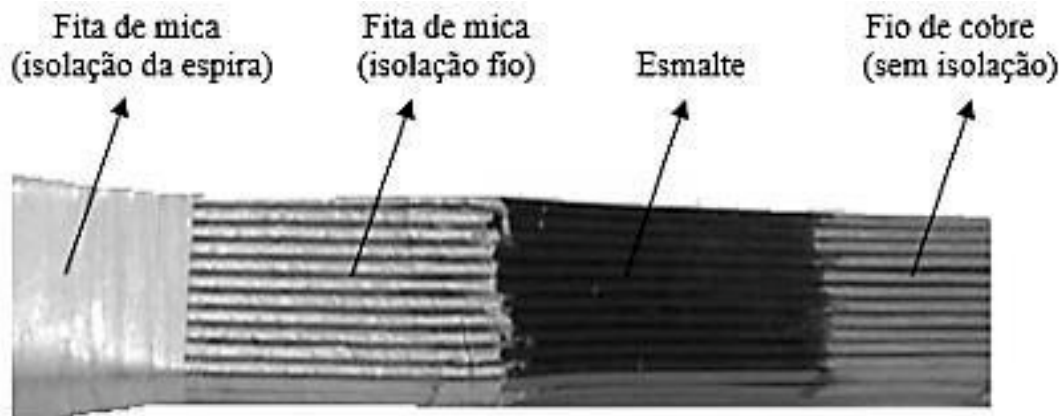
Fonte: Assessoria UHE Sinop, 2016

1.3.1 Barras do estator

O núcleo do estator suporta as bobinas da máquina, que irão condensar toda a energia elétrica gerada e carregar até os terminais para distribuir até os transformadores fora do gerador. Essas bobinas são de fato bobinas para máquinas pequenas, porém para máquinas grandes, formamos as bobinas por meio de barras, utilizando distribuição Roebel, que são dispostas por todo o estator e se conectam em suas pontas por meio de olhais, realizando a ligação e montando o enrolamento da máquina.

As barras ou bobinas são formadas por fios de cobre de alta pureza, de formato retangular em máquinas que trabalham com tensão acima de 1kV e espessura variável, conforme o projeto. Normalmente é utilizado fita de mica para a isolação da barra, bem como um esmalte protetor aplicado direto no cobre de cada fio, revestindo e protegendo contra curto circuito, como mostrado na figura 1.7 logo abaixo.

Figura 1.7: Barra com fios de cobre e isolação



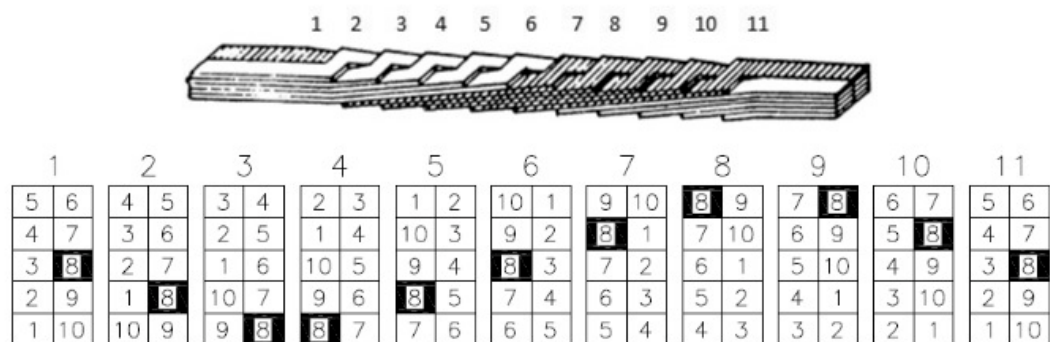
Fonte: VOIGT, 2018

Os fios são empilhados e distribuídos em transposição Roebel, que diminui as perdas de corrente e campo magnético na barra e garante que, ao longo de toda a barra, o campo magnético aplicado seja igualmente distribuído, realizando assim uma distribuição de carga e de esforços. O projeto define o comprimento do pacote de chapas do estator, que define o passo de transposição e o ângulo. Este passo de transposição é definido como o espaço entre as duas dobras da barra.

Na transposição Roebel, o fio altera sua posição a cada passo de transposição e o ângulo de transposição é definido pela relação entre a posição inicial e a posição

final do fio. Comumente são utilizadas, em indústrias, angulação de 360° e 540°. Conforme demonstrado por VOIGT, supondo uma barra com 10 fios, pode-se observar na Figura 1.8 que os fios mudam de posição ao longo da barra, sendo que na transposição de 360° o mesmo fio anda 1 posição e após 10 vezes, visto que a barra possui 10 fios, este retorna para sua posição inicial. Já na transposição de 540°, vista na figura 1.9, o mesmo fio irá percorrer 1 ½ posição ao longo de toda a barra.

Figura 1.8: Transposição 360° da barra de 10 fios



Fonte: VOIGT, 2018

Figura 1.9: Transposição 540° da barra de 10 fios

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16															
5	6	4	5	3	4	2	3	1	2	10	1	9	10	8	9	7	8	6	7	5	6	4	5	3	4	2	3	1	2	10	1
4	7	3	6	2	5	1	4	10	3	9	2	8	1	7	10	6	9	5	8	4	7	3	6	2	5	1	4	10	3	9	2
3	8	2	7	1	6	10	5	9	4	8	3	7	2	6	1	5	10	4	9	3	8	2	7	1	6	10	5	9	4	8	3
2	9	1	8	10	7	9	6	8	5	7	4	6	3	5	2	4	1	3	10	2	9	1	8	10	7	9	6	8	5	7	4
1	10	10	9	9	8	8	7	7	6	6	5	5	4	4	3	3	2	2	1	1	10	10	9	9	8	8	7	7	6	6	5

Fonte: VOIGT, 2018

A barra passa por um processo de prensagem para que todos os fios fiquem firmes e tomem forma. Após o processo de prensa, a barra é submetida ao processo de lixamento e retirada de resinas para expor o cobre e remover quinas que possam prejudicar durante o processo de isolamento. O próximo passo consiste em dobrar a barra para obter o formato desejado para ligação do enrolamento e realizar a solda e colocação do olhal, o que possibilita a conexão das barras para fechar o enrolamento.

O processo de isolamento da barra consiste em aplicação de fitas não condutivas, como a mica, e fitas semicondutoras do tipo Leit 05 e Leit 10, em partes específicas da barra. A mica isola principalmente o centro da barra, o qual estará em contato com a carcaça, necessitando de isolamento para evitar faltas do tipo Fase Terra.

As fitas Leit 05 e Leit 10 são semicondutoras e aplicadas nas extremidades da barra, com o intuito de direcionar uma possível corrente de fuga ou de falta até o centro da barra para que seja descarregado para Terra de forma correta, evitando arcos voltaicos e maiores perdas.

Depois da fase de isolamento, a barra passa pelo processo de impregnação, onde recebe um verniz especial e é exposta a um forno para que ocorra a fixação do mesmo. Ao sair do forno, esta barra será limpa e passará por testes elétricos que permitiram confirmar se a mesma está apta para ser utilizada. Os testes variam conforme projeto, mas em todos são verificadas as tensões máximas de sobrecarga e curto, expondo a barra a limites superiores aos especificados, garantindo que a mesma está dimensionada de forma que atenda às especificações do cliente.

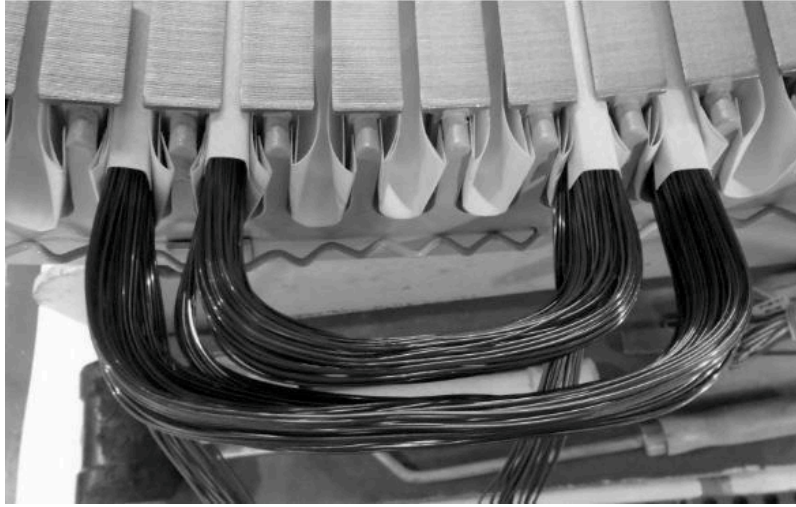
1.3.2 Circuito do estator

O enrolamento do estator ou armadura da máquina síncrona, possui 3 fases iguais e simétricas entre si, defasadas em 120° elétricos cada uma. Cada fase possui seu próprio grupo de bobinas, que é composta por grupos de fios, espiras e condutores. Os fios para máquinas síncronas de usinas hidrelétricas, geralmente são fios retangulares e em cobre. A espira é formada por uma volta do condutor e constituem as bobinas nas máquinas, que formam grupos de bobinas que irão formar os polos. Como afirmado por VOIGT, *“A quantidade de bobinas por grupo depende do número de ranhuras do estator, do número de polos, do número de camadas do enrolamento e do modo como os grupos serão ligados.”*. Assim, o tipo de enrolamento utilizado na máquina é definido pelo número de bobinas do grupo.

O primeiro tipo de enrolamento visto em máquinas elétricas girantes é do tipo distribuído, cuja característica é possuir grupos de bobinas com duas ou mais bobinas. Do tipo de enrolamento distribuído, temos 3 subgrupos do mesmo: Enrolamento distribuído concêntrico; enrolamento distribuído imbricado; enrolamento distribuído ondulado.

O enrolamento distribuído concêntrico é formado por bobinas com passos diferentes, conforme é mostrado na figura 1.10, sendo constituído por grupos que contém mais de duas bobinas de tamanhos diferentes, respeitando o fato de não haver cruzamento entre as cabeças das bobinas.

Figura 1.10: Enrolamento distribuído concêntrico



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A

O segundo tipo de enrolamento, imbricado, possui uma distribuição onde cada ranhura é ocupada por dois lados da bobina, sendo que o número de bobinas é igual ao número de ranhuras do estator. Este é um enrolamento simétrico, pois todas as bobinas possuem o mesmo formato, tamanho e mesmo número de espiras, conforme visto na figura 1.11.

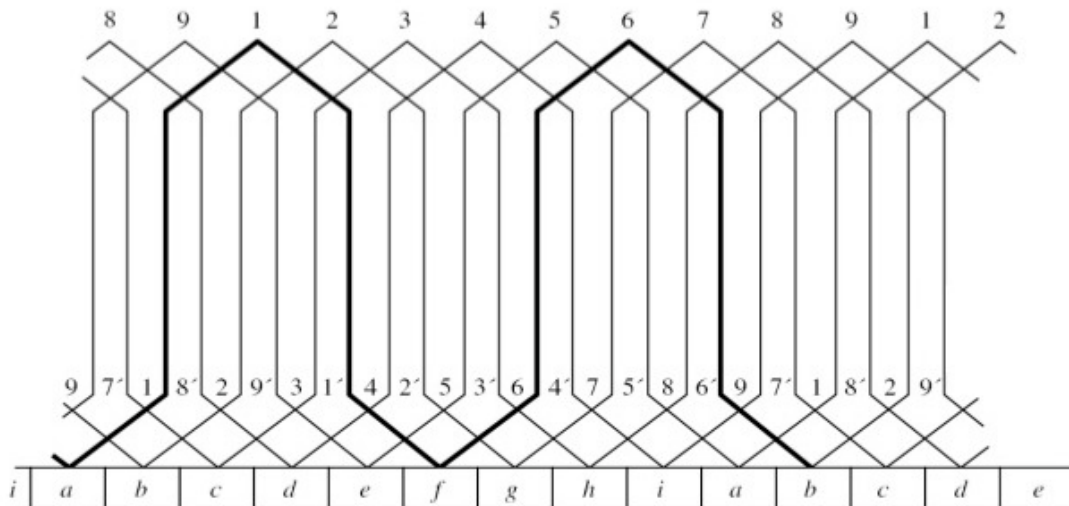
Figura 1.11: Enrolamento distribuído imbricado



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A

Já o enrolamento distribuído ondulado, diferente do imbricado, não é simétrico, formando-se primeiro meio lado de uma fase e a seguir o outro meio lado, como mostrado na figura 1.12.

Figura 1.12: Enrolamento distribuído ondulado



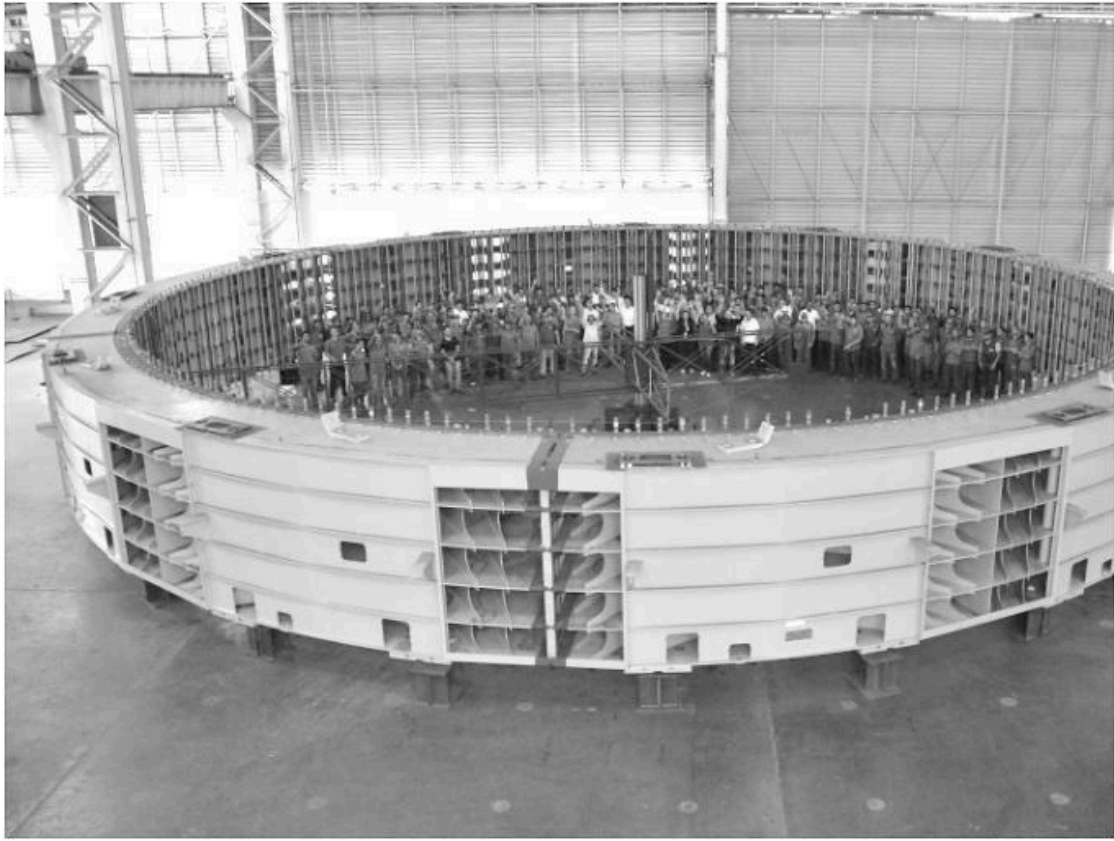
Fonte: HAFNER, 2013

1.4 Carcaça

A carcaça do estator é uma estrutura de extrema importância, pois compõe o gerador da máquina e também sustenta o núcleo e todo o enrolamento, compondo assim a parte fixa da máquina como um todo.

Para obter uma perspectiva de dimensão de uma carcaça, no site da empresa Jumbo Indústria Mecânica é disponibilizado informações a respeito da carcaça para a Usina em Belo Monte: “A Carcaça com diâmetro de 22,0 metros / 3,0 de altura e ~180 toneladas, envolveu mais de 30 colaboradores diretos e indiretos.”. A figura 1.13 mostra a carcaça do Estator de Belo Monte.

Figura 1.13: Carcaça do Estator de Belo Monte



Fonte: Jumbo Indústria Mecânica

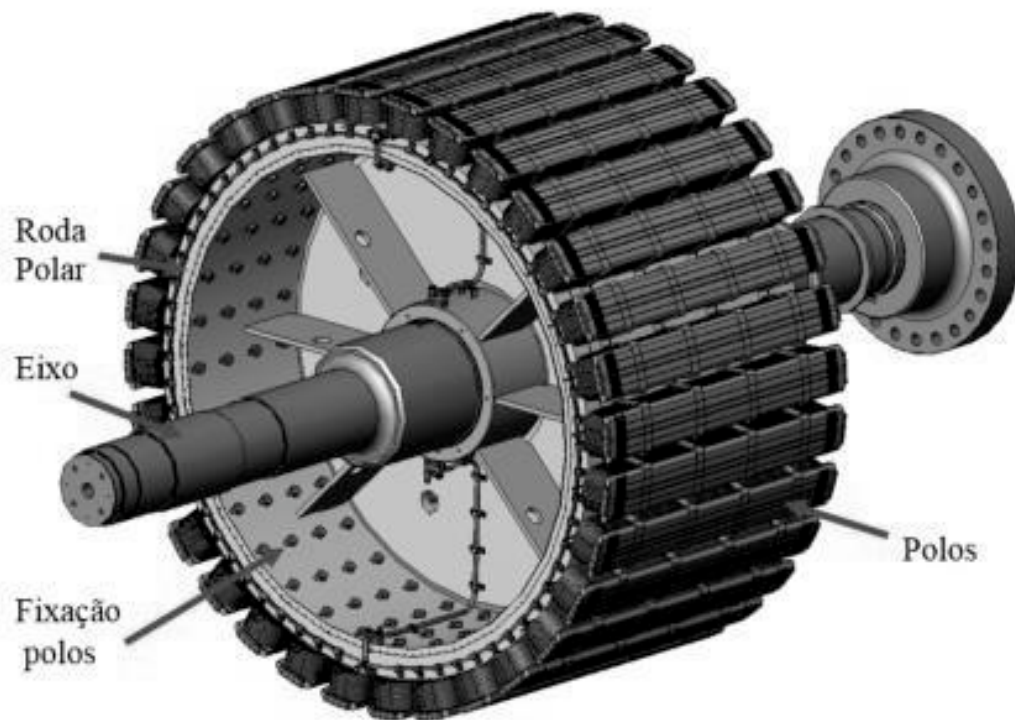
1.5 Rotor

O rotor é a parte rotativa da máquina, responsável por transmitir a energia mecânica gerada nas turbinas para o centro do gerador. Este pode ser de dois tipos: polos salientes e polos lisos. Os polos são alimentados por corrente contínua proveniente do sistema de excitação, que é responsável por criar o campo magnético necessário para que ocorra o processo de indução para as bobinas do enrolamento do estator.

Os rotores de polos salientes, conforme visto na Figura 1.14, são caracterizados por possuírem o diâmetro externo da chapa do rotor grande o suficiente para serem projetados para fora do mesmo. Estes tipos de rotores, segundo o autor VOIGT, “*possuem polos magnéticos individuais e apresentam uma descontinuidade no entreferro ao longo da periferia do núcleo de chapas onde se encontram as regiões interpolares, no qual o entreferro é muito grande tornando visível a saliência dos polos*”. Em geral, máquinas que necessitam de grande número de polos por possuírem baixa rotação e serem acionadas por turbinas hidráulicas, são

configuradas para utilizarem rotores com polos salientes. Outras características desse grupo é possuir o seu eixo na vertical e ter um pequeno comprimento do pacote de chapas do núcleo do pólo.

Figura 1.14: Rotor de Polos Salientes



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A

Os rotores de polos lisos, representado na Figura 1.15, tem como característica principal sua forma cilíndrica e o entreferro constante pela periferia do núcleo. Segundo VOIGT, “Geradores de elevada rotação nominal são fabricados nesta configuração devido à acentuada velocidade periférica e conseqüentemente elevada força centrífuga. Nestes casos, utiliza-se uma cinta de aço sobre o bobinado com o objetivo de oferecer rigidez e segurança à estrutura.”. Estes tipos de rotores geralmente são atrelados às turbinas a vapor ou gás e em motores Diesel. Outras características desse grupo é possuir o seu eixo na horizontal e ter um grande comprimento do pacote de chapas do núcleo do pólo. Um exemplo de aplicação em Usinas hidrelétricas são os turbogeradores, que trabalham em alta rotação e possuem pouca quantidade de polos.

Figura 1.15: Rotor de Polos Lisos

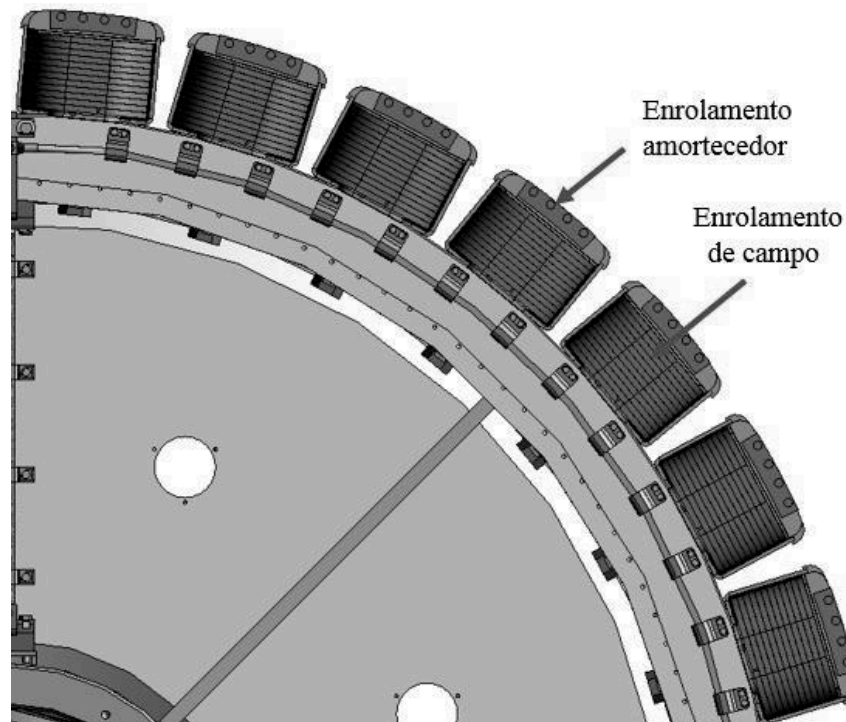


Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A

1.5.1 Circuito do rotor

O circuito elétrico do rotor pode ser dividido entre enrolamento de campo e enrolamento amortecedor, conforme é visto na figura 1.16. Estes enrolamentos podem mudar de disposição conforme o tipo de rotor empregado.

Figura 1.16: Enrolamentos de campo e enrolamento amortecedor



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A

Para rotores de pólos salientes, o enrolamento de campo possui finas lâminas de cobre e é enrolado ao redor dos pólos, com o objetivo de gerar todo o fluxo magnético que irá induzir tensões no enrolamento do estator, enquanto que o enrolamento amortecedor fica situado na superfície dos pólos e é feito por várias barras cilíndricas que se conectam entre si. Como citado por VOIGT, este enrolamento, para máquinas que operam como gerador, traz vantagens como:

- (1) Redução das sobretensões induzidas no enrolamento de campo pelos surtos de tensão que atingem o enrolamento do estator;
- (2) Redução das sobretensões no enrolamento do estator causadas por falhas desequilibradas na máquina;
- (3) Redução na oscilação da tensão de saída do gerador e conseqüentemente estabilidade do sistema.

Já os rotores de pólos lisos possuem menor quantidade de pólos, portanto são caracterizadas por serem máquinas mais rápidas, devido a isso sofrem grandes esforços mecânicos, necessitando de estruturas do tipo monobloco e o emprego de aços e materiais mais resistentes.

CAPÍTULO II - Falhas

As falhas presentes em máquinas elétricas podem ser resumidas em simétricas e assimétricas. A falta simétrica ocorre quando acontece um curto circuito nas 3 fases do sistema, podendo ser uma falta trifásica ou trifásica à terra, onde todas as componentes estarão defasadas de 120° elétricos, cada uma, e irão possuir o mesmo módulo e valor de corrente. Já a falta assimétrica relaciona as fases de módulos diferentes, que estão defasadas aleatoriamente uma da outra, constituindo um sistema assimétrico.

Charles L. Fortescue, em 1918, propôs um teorema que se aplica para sistema polifásicos, podendo ser utilizado para cálculos de tensões e correntes, afirmando que “qualquer sistema de N fasores desequilibrados, sendo N um número primo, pode ser escrito como a soma de N conjuntos de fasores equilibrados”. Assim, analisando um sistema trifásico ($N=3$), os conjuntos de fasores equilibrados são conhecidos como as sequências, sendo essas classificadas em 3 componentes: sequência positiva (índice 1), sequência negativa (índice 2) e sequência zero (índice 0).

2.1 Sequência positiva

A sequência positiva define a sequência de fases do sistema em análise, ou seja, é a sequência de fases na qual os geradores estão conectados no sistema. Pode ser representado com sobre índice “1”, ou “+” ou “abc”.

Sabe-se que, em um sistema equilibrado as fases estão defasadas de 120° e os módulos de tensões ou correntes são iguais entre si, portanto, pode-se obter a seguinte equação abaixo:

$$|I_a^1| = |I_b^1| = |I_c^1| \quad (2)$$

De acordo com SANTOS (2013) “Em geradores síncronos, a reatância de sequência positiva é representada por três valores distintos, a reatância subtransitória (X''_{du}), a reatância transitória (X'_{du}) e a reatância síncrona de eixo direto (X_{du}).” Baseado nestes valores, é possível calcular a corrente de curto circuito em diferentes períodos após ocorrer a falta, empregando as reatâncias não saturadas, pois a tensão na máquina é reduzida ao ocorrer faltas próximas à unidade.

Para a parametrização de relés de proteção, utiliza-se os valores obtidos na reatância subtransitória, enquanto que a reatância transitória é utilizada para estudos de estabilidade e a reatância síncrona auxilia na determinação da amplitude da corrente de falta em estado permanente.

2.2 Sequência negativa

Ao contrário da sequência positiva, a sequência negativa possui o fluxo de corrente inverso à sequência de fases em que os geradores estão conectados. Em condições de equilíbrio, possuem defasagem angular de 120° elétricos e pode ser representada com sobre índice “2”, “-” ou “cba”. Assim como na sequência positiva, a sequência negativa pode ser expressa pela seguinte equação:

$$|I_a^2| = |I_b^2| = |I_c^2| \quad (3)$$

De acordo com SANTOS, baseando-se em FLEMING (1998), *“a reatância de sequência negativa pode ser aproximada como sendo o valor médio entre as reatâncias subtransitórias de eixo direto e quadratura $[X_2 = (X''_d + X''_q)/2]$ em máquinas de polos salientes, ou como a metade da reatância subtransitória de eixo direto em geradores de polos lisos”*.

2.3 Sequência zero

O teorema de Fortescue exige que uma terceira sequência faça parte do sistema para que sejam satisfeitas as equações. Assim, a sequência zero, geralmente representada pelo sobre índice “0”, possui fasores que não giram e que permanecem paralelos uns aos outros. De forma análoga às equações apresentadas anteriormente, a sequência zero pode ser representada pela equação:

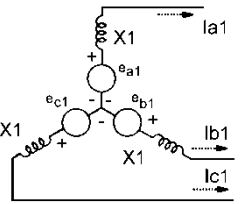
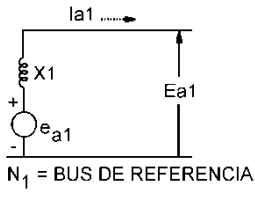
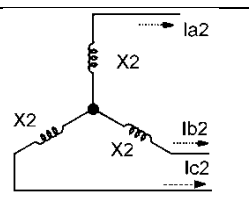
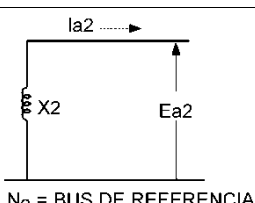
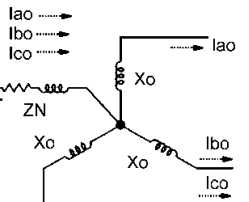
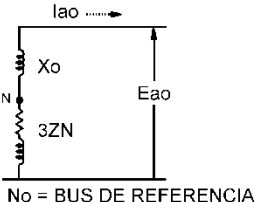
$$|I_a^0| = |I_b^0| = |I_c^0| \quad (4)$$

A reatância de sequência zero possui valor inferior às outras reatâncias das sequências positiva e negativa.

2.4 Análise do teorema de Fortescue

Para calcular as correntes e tensões em geradores em condições de desequilíbrio e/ou curto-circuito, a análise das componentes simétricas se faz necessário. Na tabela 1 abaixo, podemos verificar a representação das componentes simétricas em circuitos:

Tabela 1: Representação de Componentes Simétricos

REPRESENTAÇÃO 3ϕ	EQUIVALENTE 1 ϕ
SEQUÊNCIA POSITIVA	
	 <p>$N_1 = \text{BUS DE REFERENCIA}$</p>
SEQUÊNCIA NEGATIVA	
	 <p>$N_2 = \text{BUS DE REFERENCIA}$</p>
SEQUÊNCIA ZERO	
	 <p>$N_o = \text{BUS DE REFERENCIA}$</p>

Fonte: Adaptado do (Tutorial IEEE de Proteção de Geradores Síncronos, 2001)

Analisando os circuitos equivalentes da tabela 1, verifica-se que representam o gerador síncrono apenas com uma impedância em série e uma tensão alimentando o sistema. A parte resistiva da impedância do gerador é desprezada para os cálculos manuais de corrente de falta, pois é muito pequena se comparada à reatância do

gerador. Em caso de estudos feitos em simuladores, em geral, utiliza-se o equivalente completo com todas as impedâncias.

Observando o sistema, tem-se que a sequência positiva é produzida por um campo girante trifásico que gira no sentido da sequência de fases do sistema, enquanto que a sequência negativa é produzida por um campo girante trifásico que gira no sentido contrário à sequência de fases do sistema. Por fim, a sequência zero é a única que não gira no sistema, pois é produzida por um campo pulsante.

2.4.1 Sistema assimétrico

Quando o sistema está em desequilíbrio, ou seja, as correntes ou tensões estão assimétricas entre si, o teorema de *Fortescue* é escrito em função das componentes de sequência positiva, negativa e zero. Conforme visto em STEVENSON, em um caso de correntes desequilibradas no sistema a análise é feita conforme demonstrado abaixo:

$$\begin{cases} \dot{I}_a = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \\ \dot{I}_b = I_b^0 + I_b^1 + I_b^2 \\ \dot{I}_c = I_c^0 + I_c^1 + I_c^2 \end{cases} \quad (5)$$

Para simplificar os cálculos, o operador unitário \hat{a} é introduzido na equação. O mesmo é definido como:

$$\hat{a} = 1 \angle 120^\circ \quad (6)$$

Aplicando o operador \hat{a} na igualdade e realizando os devidos arranjos para a sequência positiva, pode-se reescrever a igualdade tal como:

$$\begin{aligned} \dot{I}_a &= I_a^0 + I_a^1 + I_a^2 \\ \dot{I}_b &= I_a^0 + \hat{a}^2 I_a^1 + \hat{a} I_a^2 \\ \dot{I}_c &= I_a^0 + \hat{a} I_a^1 + \hat{a}^2 I_a^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Dessa forma, pode-se escrever a igualdade na forma matricial como sendo:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a^0 \\ i_a^1 \\ i_a^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para obter-se as componentes de sequência em função das componentes do sistema, utiliza-se a matriz inversa, resultando em:

$$\begin{bmatrix} i_a^0 \\ i_a^1 \\ i_a^2 \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

Dessa forma, a corrente de neutro pode ser calculada pela seguinte equação:

$$i_a^0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) = \frac{i_n}{3} \quad (10)$$

Pode-se verificar que a sequência zero só existirá em circuitos que possuírem caminhos para a corrente de neutro, sendo assim, caso a conexão seja delta, a corrente de sequência zero será nula.

O teorema de *Fortescue* pode ser utilizado tanto para cálculo das componentes simétricas quanto para cálculo das componentes assimétricas, diferenciando-se pelo ângulo de defasagem entre as fases ou tensões a serem analisadas. A figura 2.1 ilustra as sequências de fases equilibrada, conforme mencionado anteriormente, defasadas 120° cada uma. Dessa forma, após calcular-se as componentes de sequência positiva, negativa e zero, é possível definir a componente equivalente de cada sequência, como mostrado na figura 2.2, baseado no exemplo calculado por FLEMING.

Figura 2.1: Sequência de fase: Positiva (a); Negativa (b); Zero (c)

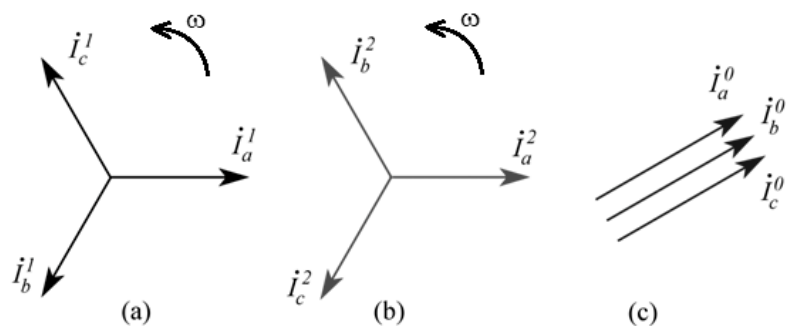
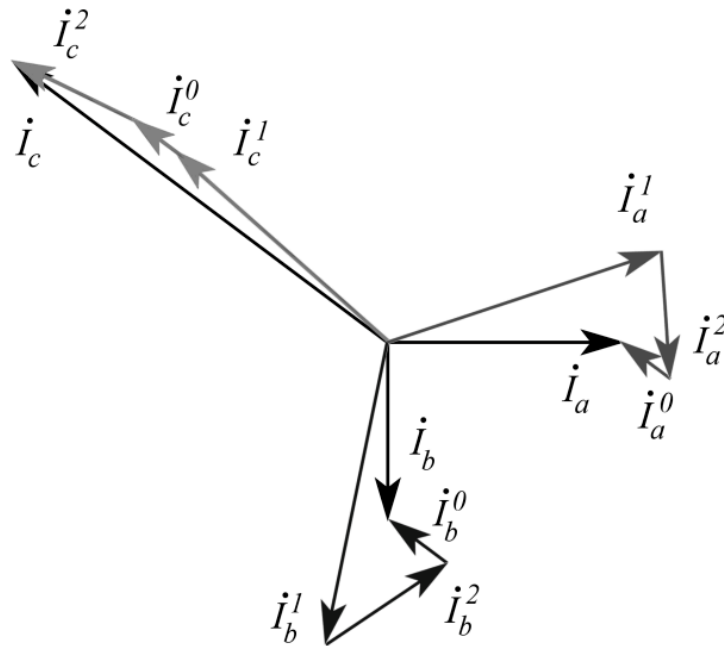


Figura 2.2: Composição de um sistema desequilibrado



Fonte: FLEMING (1998)

2.5 Falta Fase-Terra

Para o cálculo baseado no teorema de *Fortescue*, no caso de uma falta Fase-Terra com o gerador a vazio, iguala-se as componentes de corrente de linha do sistema referentes às outras duas fases que não foram afetadas, à zero. Assim, tem-se a seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} i_a^0 \\ i_a^1 \\ i_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Simplificando a Matriz anterior, tem-se que:

$$\begin{bmatrix} i_a^0 \\ i_a^1 \\ i_a^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_a \\ i_a \\ i_a \end{bmatrix} \quad (12)$$

Logo:

$$i_a^0 = i_a^1 = i_a^2 = \frac{1}{3}i_a \quad (13)$$

2.5.1 Falta Fase-Terra no estator da máquina

A falta Fase-Terra pode ocorrer por diversos fatores, sendo que, em uma análise estatística realizada em 2015, este tipo de falta é a mais comum dentre todas as outras possíveis faltas que podem ocorrer em uma máquina síncrona. Neste trabalho é analisado sua ocorrência no estator da máquina.

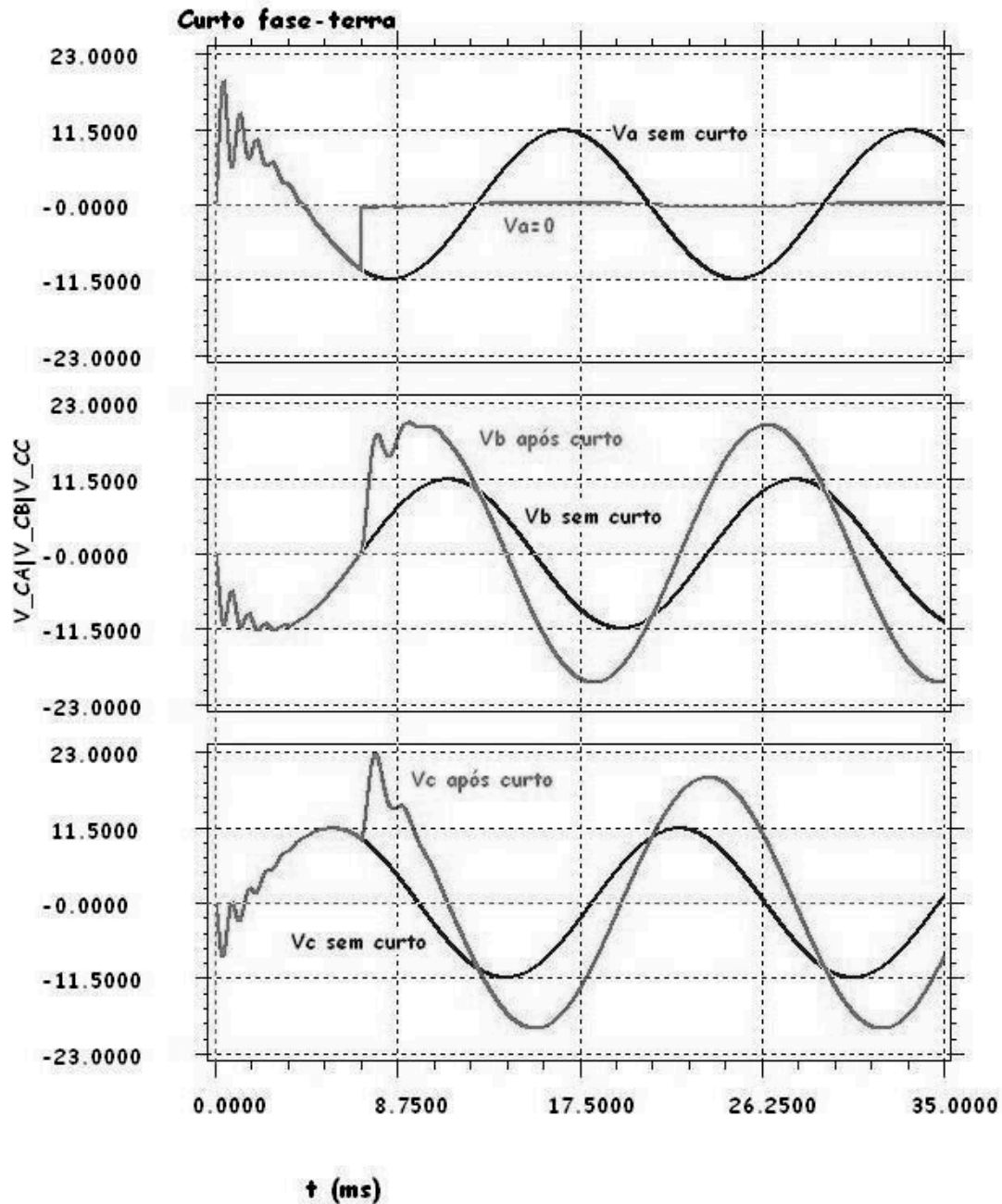
Diversos fatores contribuem para a ocorrência da falta, sendo as causas mais comuns, segundo MAMEDE (2014), as descargas atmosféricas, ocorrência de falhas na cadeia de isoladores, a fadiga e/ou envelhecimento de materiais, entrada ou presença de animais em equipamentos do sistema e manobras erradas.

Em uma máquina síncrona para usinas hidrelétricas, é comum que este tipo de falta ocorra no núcleo do estator, geralmente envolvendo as barras e as chapas do núcleo, podendo acarretar em danos não só à máquina, mas ao SEP como um todo.

Segundo SANTOS, durante uma operação normal da máquina, as correntes observadas em cada fase no enrolamento do estator do gerador, são praticamente equilibradas entre si e a corrente de neutro é nula. Ao ocorrer uma falta Fase-Terra, as correntes das fases são sofrerão um pico e aumento no módulo, devido a sobretensão, levando circulação de corrente pelo neutro.

Na análise feita no momento de uma falta Fase-Terra, verifica-se que, ao ocorrer a falta tem-se uma queda na fase afetada, levando a mesma à zero e, conseqüentemente, um aumento no módulo das fases subsequentes. Além da sobretensão gerada e aumento da corrente, o ângulo de defasagem é alterado, conforme observado na figura 2.3.

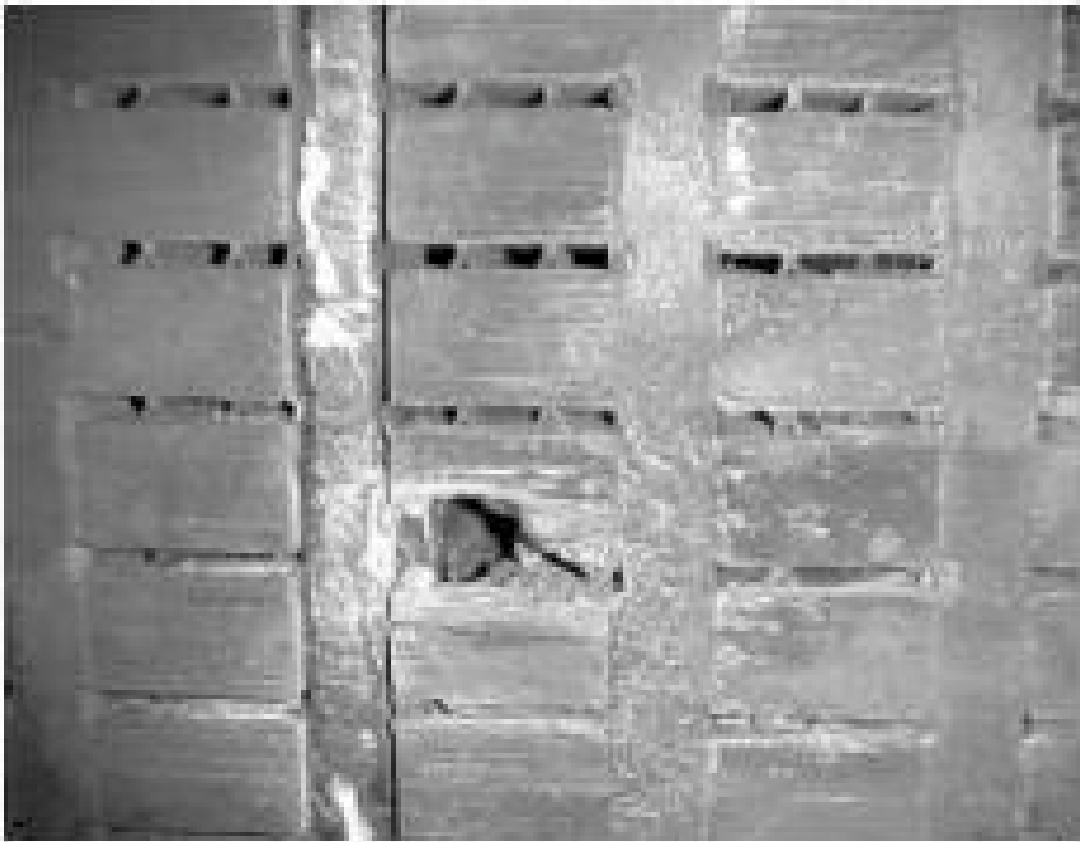
Figura 2.3: Análise de tensões durante a falta Fase-Terra



Fonte: MOURENTE (2005)

O aumento da tensão e da corrente nas demais fases acarreta no sobreaquecimento das barras do núcleo do estator. O aquecimento, quando não evitado, pode ocasionar danos na máquina, como a fusão das lâminas do núcleo devido à temperatura, visto na figura 2.4. O caso ocorreu no estator de um gerador de usina hidrelétrica, sendo necessária a troca parcial do núcleo do estator.

Figura 2.4: Fusão das lâminas do Núcleo do Estator



Fonte: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

Dessa forma, para se evitar maiores danos e prevenir a ocorrência das faltas, faz-se o estudo de proteções para as faltas ocorrentes, sendo este trabalho focado em faltas Fase-Terra.

CAPÍTULO III - Sistemas de proteção

Como visto anteriormente, máquinas elétricas são constantemente submetidas a faltas e/ou condições anormais de operação. Essas faltas podem se originar no próprio gerador, no estator da máquina, em equipamentos agregados e também proveniente da rede externa. Baseado neste problema, o sistema de proteção deve ser bem dimensionado para a detecção da falta e isolamento da mesma. Um bom sistema de proteção evita que, na ocorrência de uma falta, danos ocorram tanto na máquina quanto para o SEP por inteiro, evitando transmitir o curto circuito para a rede. Para um falta Fase-Terra, a proteção é de extrema importância para evitar que a mesma se torne uma falta entre fases e chegue no estágio de uma falta trifásica, se tornando um evento sistêmico de grandes proporções.

Dessa forma, para um bom sistema de proteção, conforme visto em MAMEDE, deve-se considerar algumas propriedades, tais como:

- (1) Seletividade: Somente o elemento de proteção mais próximo da falta atua, desconectando a parte defeituosa do sistema elétrico;
- (2) Zonas de atuação: O elemento de proteção define se a falta está dentro do seu limite de proteção ou não. Se a mesma estiver dentro dos limites de proteção, o elemento de proteção deve atuar e acionar a abertura do disjuntor associado, dentro do intervalo de tempo estipulado pelo estudo da proteção. Caso a falta esteja fora dos limites de proteção, o relé não deve acionar.
- (3) Velocidade: Ao definir o tempo mínimo de atuação da proteção, a velocidade de atuação deve ser a mínima possível, a fim de reduzir o tempo de afundamento das tensões durante as ocorrências nos sistemas de potência e permitir a resincronização dos geradores;
- (4) Sensibilidade: É a capacidade do elemento de proteção de reconhecer a faixa de atuação de sua operação;
- (5) Confiabilidade: É a propriedade do elemento de proteção de cumprir com segurança e exatidão as funções definidas para sua operação.
- (6) Automação: É a capacidade do elemento de proteção de operar automaticamente quando solicitado.

3.1 Relés de proteção

Os relés de proteção utilizados em usinas hidrelétricas geralmente são de tecnologia eletromecânica, estática ou digital. Para as máquinas síncronas das usinas, os relés eletromecânicos e estáticos são os mais utilizados, pois são focados para a proteção do estator, abrangendo também outros tipos de proteção e alarmes próximos às funções de controle.

O funcionamento dos relés eletromecânicos baseia-se em bobinas, discos de indução, molas, contatos fixos e móveis. Os relés estáticos são constituídos de circuitos integrados dedicados para cada função desempenhada pelo equipamento e possuem dimensões menores do que os relés eletromecânicos. Já os relés digitais, segundo VELÁSQUEZ, convertem os sinais analógicos em sinais digitais por meio de conversores A/D, processando numericamente as quantidades binárias por meio de algoritmos computacionais, cuja função é de detectar as falhas e detectar os sinais de disparo dos circuitos de comando para que a proteção possa atuar.

Todos os modelos de relés são parametrizados pelas normas ANSI (American National Standards Institute) e classificados conforme o tipo de sua proteção. A tabela 2 representa os códigos ANSI de proteção para relés utilizados em geradores síncronos:

Tabela 2 – Normas ANSI

Nr	Denominação
21	Relé de distância
24	Relé de sobreexcitação ou Volts por Hertz
25	Relé de verificação de Sincronismo ou Sincronização
27	Relé de subtensão
27HT	Subtensão sintonizado na frequência terceira harmônica
32	Relé direcional de potência
32P	Antimotorização (potência reversa)
32Q	Direcional contra potência reativa
37	Relé de subcorrente ou subpotência

Nr	Denominação
40	Relé de perda de excitação ou relé de perda de campo
46	Relé de reversão ou desbalanceamento de corrente
49	Relé térmico
50	Relé de sobrecorrente instantâneo
51	Relé de sobrecorrente temporizado
50/51N	Sobrecorrente de neutro do gerador
50/51V	Sobrecorrente de fase do gerador com restrição por tensão
52	Disjuntor de corrente alternada
59	Relé de sobretensão
59G	Sobretensão no neutro do gerador
60	Relé de balanço de corrente ou tensão
61	Sensor de densidade
64	Relé detetor de terra
64G	Falhas à terra do estator (baseadas em tensões 3 ^o harmônico)
64R	Falhas à terra do rotor
76	Relé de sobrecorrente CC
78	Relé de medição de ângulo de fase / proteção contra falta de sincronismo
81	Relé de frequência (sub ou sobre)
87	Relé de proteção diferencial
87G	Diferencial do gerador
87T	Diferencial do transformador elevador
87U	Diferencial da unidade

Fonte: MAMEDE, 2013.

Os três tipos básicos de relés ainda podem ser divididos em classes de construção, podendo ser:

3.1.1 Relé fluidodinâmico

Utiliza óleo de vaselina como elemento temporizador. Eram utilizados em ligações diretas com a rede e montados nos polos do disjuntor de proteção, porém a norma NBR14039 eliminou seu uso como proteção principal em subestações de consumidores.

3.1.2 Relé eletromagnético

É baseado na força de atração entre elementos de material magnético. É constituído por uma bobina envolvendo um núcleo magnético, onde o entreferro contém um contato elétrico móvel que, ao se movimentar, diminui o valor de relutância no circuito magnético.

3.1.3 Relé eletrodinâmico

Possuem duas bobinas, sendo uma delas móvel, interagindo dentro do campo magnético formado pela outra bobina. Ao passar corrente contínua pela bobina móvel, os campos entre as duas bobinas se interagem e geram uma rotação a fim de fornecer o contato desejado.

3.1.4 Relé de indução

É formado por dois magnetos e um disco de indução fixado em torno de seu eixo. Os núcleos magnéticos permitem a formação de quatro entreferros, sendo estes responsáveis pelo torque de acionamento do disco. O disco de indução possui o contato móvel, que com o movimento de rotação atua sobre o contato fixo. Uma mola de restrição controla o retorno do disco para a posição original.

3.1.5 Relé térmico

É formado por elementos térmicos ajustáveis, cuja função é capturar a temperatura da máquina, atuando sobre o circuito de alimentação da bobina do disjuntor, desenergizando o sistema antes que a temperatura atinja valores maiores do que o permitido.

3.1.6 Relé eletrônico

Consiste no mesmo funcionamento do relé eletromecânico, porém com tecnologia de componentes eletrônicos, tendo como vantagem a compactidade, maior precisão e facilidade na modificação das curvas de operação.

3.1.7 Relé digital

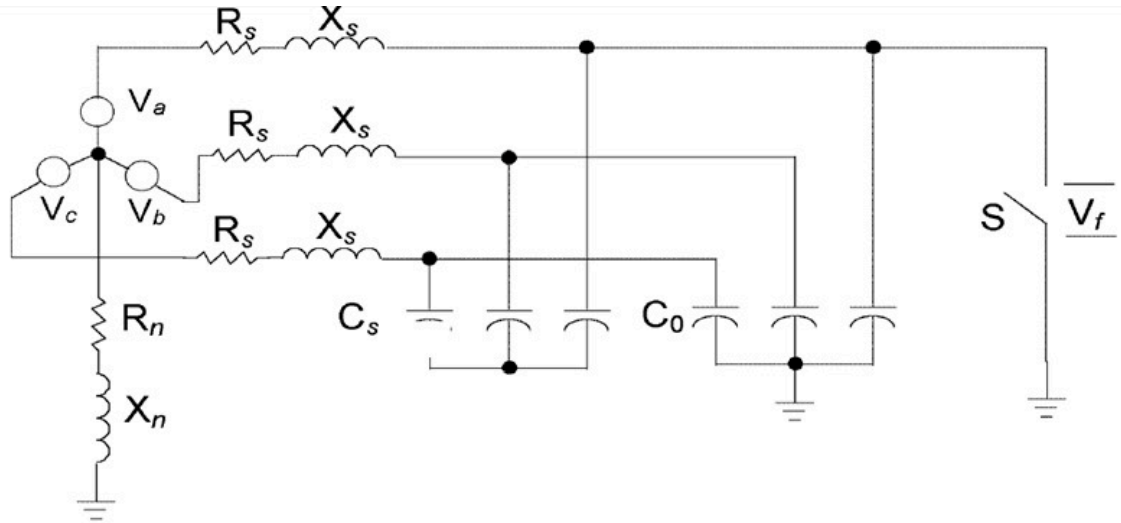
Possuem o mesmo princípio dos relés eletromecânicos e eletrônicos, porém utilizam técnicas de microprocessadores, possuindo mais funções, maior velocidade, sensibilidade, acesso remoto etc. As entradas são analógicas, porém são convertidas para sinais digitais por meio de um conversor A/D.

3.2 Aterramento

As máquinas síncronas, assim como qualquer outra máquina elétrica, devem ser aterradas para que haja um sistema de proteção mais efetivo. As classes do sistema de aterramento podem ser definidas com base nos parâmetros obtidos do cálculo das componentes simétricas do sistema, como a reatância de sequência positiva e negativa e resistência de sequência positiva, negativa e zero.

Para exemplificar e facilitar o entendimento, a figura 3.1 representa um circuito trifásico, em que é simulado o sistema de aterramento. A chave S representa o curto circuito no SEP, o qual irá se distribuir e atingir o gerador em estrela referente a fase afetada. Os capacitores empregados no circuito, C_s e C_0 , representam as capacitâncias entre fases do sistema e capacitâncias à terra, respectivamente.

Figura 3.1: Sistema trifásico idealizado com representação para curto circuito



Fonte: IEEE Std. C62.92.1, 2000

Em complemento ao circuito, ao definir as componentes simétricas, podemos definir a classe de aterramento com o auxílio da tabela 3 abaixo, retirada da norma IEEE Std. C62.92.2 (IEEE, 1989), Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems, Part I – Introduction.

A tabela 3 apresenta uma classificação geral de aterramentos, juntamente com classe associada, corrente de falta e características de tensão transiente. Segundo SANTOS, a escolha da classe de aterramento influencia significativamente na sensibilidade e velocidade de atuação da proteção de falta à terra tanto no gerador quanto nos demais componentes conectados no mesmo barramento. Outros fatores que implicam na escolha do tipo de aterramento são os requisitos de seletividade de proteção e o controle de sobretensão no SEP.

Tabela 3 – Características de aterramento

Classe de Aterramento e meios	Razões de parâmetros obtidos através de componentes simétricas			Porcentagem da corrente de falta Fase-Terra em relação à corrente de curto circuito trifásico [%]	Sobretensão transiente Fase-Terra [p.u]
	X0/X1	R0/X1	R0/X0		
A. Efetivamente					
1. Efetivo	0 - 3	0 - 1	-	> 60	≤ 2
2. Muito Efetivo	0 - 1	0 - 0,1	-	> 95	< 1,5
B. Não Efetivamente					
1. Indutância					
Baixa Indutância	3 - 10	0 - 1	-	> 25	< 2,3
Alta Indutância	> 10		< 2	< 25	≤ 2,73
2. Resistência					
Baixa Resistência	0 - 10		≥ 2	< 25	< 2,5
Alta Resistência		> 100	≤ (-1)	< 1	≤ 2,73
3. Indutância e Resistência	> 10	-	> 2	< 10	≤ 2,73
4. Ressonante		-	-	< 1	≤ 2,73
5. Não aterrado					
Range A	-∞ a 40	-	-	< 8	≤ 3
Range B	-40 a 0	-	-	> 8	> 3

Fonte: Adaptado do (IEEE Std. C62.92.1, 2000)

3.2.1 Coeficiente de aterramento

Conforme afirmado por SANTOS, o coeficiente de aterramento, ou *coefficient of grounding* (COG) em inglês, é utilizado nos sistemas de aterramento e pode ser definido como $100\% \times ELG/ELL$, sendo:

ELG: maior valor RMS da tensão Fase-Terra, na frequência fundamental, em uma determinada localidade durante a falta Fase-Terra.

ELL: tensão Fase-Fase, na frequência fundamental, que seria obtida em uma determinada localidade após a remoção da falta.

O COG é calculado a partir das impedâncias de sequência de fases, vistas a partir do ponto de falta. O cálculo do COG é utilizado no dimensionamento dos equipamentos de proteção contra surtos em uma determinada localidade do SEP.

3.2.2 Classes de aterramento

As classes de aterramento são caracterizadas pelos parâmetros obtidos através dos componentes simétricos. Assim, conforme visto na tabela 3, temos as seguintes classes de aterramento:

3.2.2.1 Efetivamente aterrado

Este tipo de sistema possui impedância suficientemente baixa; sendo esta inerente ao sistema, adicionada propositalmente ou ambos; e é aplicado em sistemas de distribuição e transmissão de energia. O cálculo do COG não excede 80%.

3.2.2.2 Não efetivamente aterrado

Quando o valor de COG supera os 80%, o sistema é classificado como não efetivamente aterrado. São configurados sistemas não aterrados:

3.2.2.2.1 Sistema aterrado por resistência

É, predominantemente, aterrado por resistências. Conforme afirmado por SANTOS, neste tipo de sistema a reatância de sequência zero, analisada a partir do ponto da falta, pode ser indutiva ou capacitiva, dependendo de fatores como: número de resistores de aterramento de neutro, tamanho e localização dos mesmos, bem como do valor da capacitância à terra restante no sistema após a falta.

3.2.2.2.2 Sistema aterrado por indutância

É composto, predominantemente, por indutores de neutro, transformadores de aterramento ou por conexões à terra em alguns transformadores de um sistema com aterramentos múltiplos. Quando a indutância é inferior ao observado em neutralizadores de falta à terra, a reatância de sequência zero, vista a partir da falta, tende a ser indutiva, enquanto que a resistência de mesma sequência se torna relativamente pequena no sistema.

3.2.2.2.3 Sistema aterrado por neutralizadores (ressonante)

São aterrados por indutâncias, de modo que, durante uma falta Fase-Terra, a corrente em frequência fundamental fluindo pela indutância para terra e a corrente capacitiva fluindo para terra pelas fases sãs, sejam iguais em módulo e defasadas e 180° . Este tipo de indutor é conhecido como neutralizador de falta à terra, bobina de supressão de arco ou bobina de Peterson.

3.2.2.2.4 Sistema não aterrado

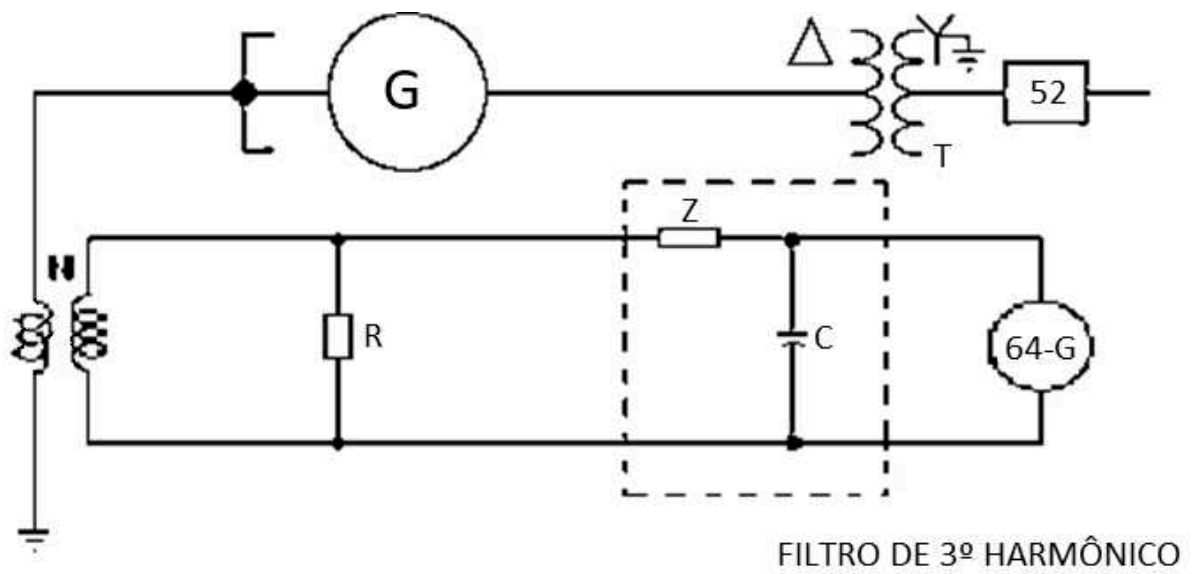
Neste sistema não existe conexão para terra. Em caso de falta Fase-Terra no sistema, a tensão na condição de frequência fundamental pode exceder o valor nominal das tensões entre fases.

3.3 Disjuntor e Fusível

Outros tipos de equipamentos de proteção também utilizados em máquinas síncronas são os disjuntores e fusíveis.

Com aplicações sempre em conjunto com o SEP e com outros tipos de proteção, os disjuntores e fusíveis atuam auxiliando na proteção de faltas, sobrecorrentes, efeitos térmicos causados no sistema e curto circuito. Na figura 3.2, o circuito mostrado equivale ao sistema de proteção de uma das fases do sistema. O disjuntor parametrizado na função ANSI 52 (disjuntor de corrente alternada) atua após o comando do relé, evitando que a falta se propague para o restante do sistema. O relé parametrizado na função 64G protege o sistema contra falhas à terra, com sensibilidade de tensões de 3º harmônico no sistema.

Figura 3.2: Circuito equivalente de proteção contra falta Fase-Terra



Fonte: BARROS, 2017

CONCLUSÃO

Ao analisar e entender todo o funcionamento da máquina síncrona e as partes principais que compõem a máquina para aplicação em usinas hidrelétrica, é possível obter uma visão amplificada de ordem de grandeza e importância de componentes.

Ao estudar as faltas ocorrentes no sistema, a compreensão do que ocorre no interior da máquina, as partes atingidas e a forma em que se pode mensurar a falta e suas consequências, consegue-se então prever e trabalhar com sistemas que evitem essa ocorrência e que tratem da falta de forma coerente para que a mesma não prejudique ainda mais o sistema.

Foi observado que as faltas em uma máquina síncrona podem ser de diversas ordens e fatores, sendo que foi abordada somente a falta Fase-Terra. Assim, verificou-se seus impactos no sistema abrangendo também os sistemas de proteção mais adequados para este tipo de falta. Na realidade de uma usina hidrelétrica, o sistema de proteção das máquinas geradores tornam-se muito mais complexos ao protegerem o sistema de outros tipos de faltas que ocorrem na máquina.

A importância desse estudo veio da necessidade de comprovar a ocorrência da falta Fase-Terra no SEP dentro de uma usina hidrelétrica, promovendo as formas de proteção que atendem aos requisitos de um único tipo de falta. Porém, é comum os casos em que o sistema de proteção não é bem definido e desenvolvido durante o projeto de concepção da máquina, o que pode acarretar em um despreparo, por parte do sistema, para atender e suportar uma falta ocorrente na máquina.

O trabalho visou conceituar brevemente os componentes principais e mostrar, de forma acadêmica, a máquina síncrona utilizada em usinas hidrelétrica como geradores, abordando os sistemas principais, e posteriormente, estudando o caso de Falta-Fase terra no sistema. Dessa forma, verificou-se que, para o tipo de falta Fase-Terra, o sistema de proteção isolado com maior eficiência é o próprio aterramento da máquina, porém, em casos reais, todos os sistemas trabalham integrados de forma a garantir a melhor proteção possível à máquina, evitando danos ao gerador e ao SEP em geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. ANSI C50.10: General requirements for synchronous machines, New York, 1977.

ESTG-IPL. Máquinas Síncronas. 2001. Acesso em: 02 de setembro de 2019.

Disponível em:

<<http://www.alunoeletrica.eng.ufba.br/material/conversaoi/materialauxiliar/maquinassincronasprincipal.pdf>>

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std. C62.92: Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems, Part I - Introduction, New York, 2000.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std. C62.92: Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems, Part II - Grounding of Synchronous Generator Systems, New York, 1989.

MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro: Proteção de Sistemas Elétricos de Potência – Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARIANO, César A. S.; LEAL, Edson M.: Estudo de Falha de Isolação no Estator das Ugs 01 e 02 da UHE Ilha Solteira com Reforma e Modernização do Gerador - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Curitiba, 2005.

Nascimento, B.; Carvalho, E.K; Tedesco, P.A; Soares, W.M.: Princípio de funcionamento de gerador síncrono. Universidade do Estado do Mato Grosso, 2016.

SANTOS, Fábio J. G.: Análise da Influência dos Diferentes Tipos de Sistema de Aterramento na Proteção de Geradores Síncronos, Monografia (Pós-Graduação – Gestão da Qualidade da Energia em Sistemas Elétricos) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2013.

STEVENSON, W. D.: Elementos de Análise de Sistemas de Potência. 2ª ed. Editora MacGraw-Hill do Brasil. São Paulo.1986.

VELÁSQUEZ, Omar Chayña: Ajuste e Ensaio de Sistemas de Proteção de Geradores Síncronos, Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2015.

VOIGT, Tiago: Modelagem Analítica e Numérica de Bobinas Pré-Formadas e de Barras Roebel Aplicadas em Máquinas Elétricas de Grande Porte, Dissertação (Pós-Graduação – Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2018

WEG. Motores Síncronos. Rev.7, 2015. Acesso em: 02 de setembro de 2019. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h13/h7e/WEG-motores-sincronos-50005369-catalogo-portugues-br.pdf>>

WEG. Motores Síncronos. Acesso em: 03 de setembro de 2019. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/edisonsilva/conversao-de-energia-2/maquina-sincrona/Motor_Sincrono_Especific_W.pdf/>