UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

CESAR BERNARDINI DE FRANCO

Caracterização de geradores hidrelétricos por ensaio de
rejeição de carga

São Paulo

2014

CESAR BERNARDINI DE FRANCO

Caracterização de geradores hidrelétricos por ensaio de
rejeição de carga

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Sistema de Potência

Orientador: Prof. Dr. Silvio
Ikuyo Nabeta

São Paulo

2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de dezembro de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catlogação-na-publicação

De Franco, Cesar Bernardini

Caracterização de geradores hidrelétricos por ensaio de rejeição de carga / C.B. De Franco. -- versão corr. -- São Paulo, 2014.

133 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Geração de energia elétrica 2.Usinas hidrelétricas I.Universidade São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

A minha família.

Quero agradecer a todos aqueles que contribuíram com este trabalho direta ou indiretamente. São eles minha família, meu orientador prof. Silvio Nabeta, os colegas do mestrado e os colegas de trabalho das empresas Alstom e Voith que participaram e incentivaram este trabalho.

"... e propus no meu coração inquirir e investigar sabiamente todas as coisas, que se fazem debaixo do sol. Esta péssima ocupação deu Deus aos filhos dos homens, para que se ocupassem nela. Eu vi tudo o que passa debaixo do sol e eis que achei que tudo era vaidade e desejo vão..."

Eclesiastes, capítulo 1, versículos 13-14

RESUMO

Atualmente, os procedimentos normalizados para determinar os parâmetros transitórios e subtransitórios dos geradores hidrelétricos impõem dificuldades de execução. Assim, em muitos casos, esses ensaios não são realizados e, conseqüentemente, os respectivos geradores hidrelétricos ficam carentes de uma comprovação em campo de suas características transitórias e subtransitórias. Para preencher essa lacuna, o presente trabalho apresenta uma metodologia para execução do ensaio por rejeição de carga como forma de viabilizar a caracterização de grandes e médios geradores hidrelétricos dentro de determinadas condições e faixa de aplicação.

Palavras-chave: Caracterização de geradores, ensaio de rejeição de carga.

ABSTRACT

Currently, the standards procedures to determine the hydro generators transient and subtransient parameters impose several execution difficulties. Therefore, in several cases those tests cannot be conducted and consequently the respective hydro generators miss a field measurement of its transient and subtransient characteristics. In order to fill this gap, the present work presents a method to execute the load rejection test for determination of medium and large hydro generator parameters.

Key words: characterization of generators parameters, load rejection test

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPRI	Electric Power Research Institute
FP	Fator de Potência
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
RMxprt	Rotational Machine Expert
TRAF.SINAL	Transformador de Sinal
UHEs	Usinas Hidrelétricas de Energia

Sumário

Catologação-na-publicação	2
1. Introdução	11
2. Objetivo	14
3. Motivação.....	15
4. Normas vigentes e trabalhos relacionados	18
5. Estrutura do trabalho.....	21
6. Máquina síncrona de polos salientes típica na geração hidráulica	22
7. Definição dos parâmetros das máquinas síncronas de polos salientes	24
i. Circuito magnético	24
ii. Enrolamentos e circuito elétrico	29
iii. Fluxo magnético e tensão induzida	32
iv. Definição e interpretação física das características de eixo direto e eixo de quadratura.....	40
v. Resposta da máquina síncrona em rejeição de carga no eixo direto	44
vi. Saturação.....	49
a) Fluxo alinhado com o eixo direto	50
b) Subexcitada e sobre-excitada	52
8. Procedimento de ensaio de rejeição de carga da máquina síncrona particularizado para a geração hidrelétrica	53
i. Considerações iniciais	53
ii. Quando realizar o ensaio	53
iii. Sistema elétrico da usina hidrelétrica.....	57
iv. Sistema regulador de velocidade.....	60
v. Sistema de excitação e regulação de tensão	62
vi. Sistema de proteção	63
vii. Sistema elétrico de transmissão e condições de operação das unidades geradoras.....	65
viii. Procedimento de ensaio.....	66
9. Ensaio em bancada preliminar – Determinação da curva de magnetização em circuito aberto e em curto-circuito.....	67
10. Aplicação do ensaio em bancada – Ensaio de rejeição de carga	72
i. Esquema elétrico	72
ii. Procedimento de ensaio.....	73

iii.	Filtro de harmônicos.....	75
iv.	Determinação da envoltória da tensão	75
v.	Decomposição do sinal em funções exponenciais	76
vi.	Cálculo das reatâncias	82
vii.	Outros pontos de carga ensaiados.....	85
11.	Ensaio em bancada – Determinação de X_d'' não saturado	88
12.	Modelagem pelo método dos elementos finitos	91
i.	Modelo aplicado	91
ii.	Modelagem geométrica da máquina elétrica	93
iii.	Configuração dos materiais utilizados, seleção das suas propriedades	95
iv.	Curva de magnetização da máquina síncrona.....	97
v.	Configuração das condições de ensaio	98
vi.	Pós-processamento	101
vii.	Resultados	107
13.	Comparativo de resultados	109
14.	Conclusões.....	112
15.	Bibliografia	116
	ANEXO A – Características da máquina síncrona.....	119
	ANEXO B – Instrumentos utilizados.....	125
	ANEXO C – Tratamento numérico em Matlab.....	126
	ANEXO D – Material combinado ar e aço-carbono	131

1. Introdução

O desenvolvimento das máquinas elétricas trouxe a necessidade de prever o comportamento desses equipamentos nas diversas condições de operação, sendo elas permanentes ou transitórias. Segundo consta na norma IEEE 115 (1), antes mesmo da sua primeira publicação em 1945, os primeiros estudos com a máquina elétrica fora da sua condição de operação permanente tinham o objetivo de determinar as correntes de falta balanceadas ou desbalanceadas.

Com o crescimento e aumento da complexidade do sistema elétrico, tornou-se também fundamental compreender o comportamento das máquinas elétricas e do próprio sistema nas diversas condições de operação, sejam elas permanentes ou transitórias. Para tanto, diversos fundamentos desenvolvidos anteriormente para as máquinas elétricas foram empregados em simulações do sistema elétrico.

Em meados de 1930, iniciaram-se os primeiros estudos de estabilidade por meio de computadores analógicos. Embora fosse possível elaborar modelos teóricos relativamente complexos, as limitações computacionais exigiram que grandes simplificações fossem adotadas. Mesmo assim, esses modelos simplificados foram capazes de solucionar a maior parte dos problemas de estabilidade do sistema de potência daquela época. Com o advento do computador digital, a capacidade de processamento cresceu a grandes taxas. Concomitantemente, o próprio sistema elétrico evoluiu em termos de complexidade. Segundo a IEEE 1110 (2), no final do século XX, esse contexto despertou o interesse de diversas pesquisas, por exemplo Dandeno et al. (3), que pretendeu verificar a precisão das simulações de estabilidade do sistema. O objetivo era investigar o desempenho dos modelos da máquina síncrona em determinar seu próprio desempenho em condições transitórias.

A aplicação de modelos do gerador elétrico nos estudos de estabilidade do sistema tem ao menos os propósitos de embasar o planejamento e o projeto do sistema elétrico, determinar condições de operação normais, limites e de emergência, e prever as condições após grandes perturbações. Atualmente, existem diversas

ferramentas computacionais disponíveis no mercado que são capazes de realizar cálculos simulando o comportamento dos sistemas elétricos. Entre elas, é possível citar o pacote de programas Matlab (4), ANATAM (5), ANAREDE (5), PSIM (6) entre outros. Essas ferramentas computacionais são capazes de resolver modelos matemáticos complexos. Esses modelos concatenam diversos elementos que compõem o sistema em estudo, sendo estes representados por modelos equivalentes de características elétricas e mecânicas. Um deles é a máquina elétrica, mais especificamente o gerador elétrico.

As máquinas elétricas tipicamente utilizadas na geração hidrelétrica são geradores síncronos trifásicos de polos salientes, com um enrolamento de campo e um enrolamento amortecedor. Com o desenvolvimento de modelos desse gerador típico, verificou-se ser possível simplificar a análise ao referenciar o modelo aos eixos rotacionais dos polos. Park (7) definiu na sua obra um conjunto de parâmetros que representam de forma compreensível esses equipamentos em um modelo elétrico de circuito equivalente.

Devido à importância dos parâmetros da máquina elétrica, foram estabelecidos procedimentos de ensaio capazes de acessar esse conjunto de parâmetros e, portanto, determiná-los na máquina real. Diante disso, alguns grupos normalizaram os procedimentos de ensaio capazes de acessar os parâmetros das máquinas. Entre eles, destacam-se a norma IEEE (1) e a IEC (8). O procedimento de ensaio normalizado mais usual capaz de determinar as reatâncias e constantes de tempo transitórias e subtransitórias de eixo direto envolve a realização de curto-circuito trifásico brusco.

Para realizar a medição das reatâncias e constantes de tempo subtransitórias e transitórias, as normas sugerem ensaios que submetem o gerador a um excessivo estresse mecânico e elétrico. Esse estresse excessivo provoca um envelhecimento prematuro do equipamento, tanto do aspecto elétrico (isolação) como do aspecto estrutural (mecânico). Por esse motivo, os ensaios envolvendo curto-circuito brusco não são obrigatoriamente exigidos pelos proprietários e fabricantes de grandes máquinas elétricas. Como alternativa, outros métodos foram desenvolvidos, em especial o ensaio de resposta em frequência e o ensaio por rejeição de carga.

O ensaio de resposta em frequência (9) faz uso de um inversor de frequência com características especiais. Esse, em geral, é um equipamento caro e tem seu custo diretamente proporcional à potência do gerador a ser ensaiado. Portanto, para as unidades de geração de potências elevadas, esse método tem um custo elevado, podendo ser inviável.

Por outro lado, o método de rejeição de carga não necessita de equipamentos especiais e as condições em que o ensaio é realizado são propícias para ser replicadas em grandes geradores. Além disso, a rejeição de carga é um evento de gravidade moderada e as máquinas elétricas são capazes de diariamente suportar ocorrências como esta durante seu longo ciclo de vida. Em outras palavras, isso não compromete significativamente a expectativa de vida do equipamento, o que não é válido para um curto-circuito brusco.

2. Objetivo

O objetivo desse trabalho é desenvolver uma metodologia para caracterização das reatâncias não saturadas de eixo direto de geradores síncronos apropriada para medição em usinas hidrelétricas.

A dissertação contém uma introdução teórica, a descrição do procedimento de ensaio, a metodologia de análise dos resultados e a comprovação experimental.

O ponto de partida são os trabalhos anteriores sobre o ensaio de rejeição de carga, seguida pela abordagem dos fundamentos teóricos sobre o tema. E então, o procedimento de ensaio e a metodologia de tratamentos de dados são apresentados. Por fim, são aplicadas duas abordagens diferentes para verificação da metodologia: o teste em bancada e a simulação em elementos finitos. Os resultados são comparados e o trabalho é concluído.

3. Motivação

O comportamento dos geradores hidrelétricos e das máquinas elétricas usualmente é traduzido em modelos elétricos. Os modelos elétricos que representam os geradores hidrelétricos possuem diversas características, sendo elas constantes de tempo e reatâncias em regime permanente, transitório e subtransitório. Entre as formas capazes de acessar os parâmetros transitórios e subtransitórios, apenas dois tipos de ensaios estão bem difundidos e consolidados. São eles o ensaio de curto-circuito brusco e o ensaio de resposta em frequência. Para a maior parte dos casos no contexto do setor hidrelétrico, devido aos riscos associados ao primeiro e o custo financeiro associado ao segundo, diversas características do gerador usualmente não são acessadas. Todavia, três grandes grupos se beneficiariam de metodologias capazes de acessar tais características do gerador de forma mais simples, mais barata e com a mesma confiabilidade. São eles os fabricantes de geradores hidrelétricos, os proprietários desses equipamentos e o próprio sistema elétrico integrado.

Do lado do fabricante de geradores hidrelétricos, a caracterização do gerador por meio do ensaio de rejeição de carga facilita o acesso a uma parcela dos parâmetros do gerador usualmente não medida. E por mais que hoje já se encontrem disponíveis modernas ferramentas de projeto, ainda assim os fabricantes podem se beneficiar, pois no equipamento sempre existirão tolerâncias intrínsecas advindas do projeto, dos materiais, da fabricação, da montagem e, por fim, da instalação (comissionamento). Um método de ensaio prático permite comprovar dados de projeto para uma ampla gama de equipamentos. A frequente comprovação em campo contribui para aferir os métodos e ferramentas de projeto. Também amplia o conhecimento sobre os desvios estatísticos entre o projetado e o executado.

Do lado do proprietário de geradores hidrelétricos, contar com a caracterização por meio do ensaio de rejeição de carga significaria um recurso adicional para executar medições e verificar se os valores garantidos estão de acordo com o projeto e respeitam as tolerâncias de normas. Além disso, contar com mais dados medidos contribuiria com o ajuste fino do sistema de proteção, aumentando a segurança sobre esse bem de capital. Adicionalmente, uma primeira análise do ensaio de

rejeição de carga sugere que este exige muito menos recursos financeiros para sua execução se comparado ao de curto-circuito brusco ou mesmo o de resposta em frequência. Isso se dá já que o ensaio de rejeição de carga não demanda equipamentos especiais além dos já disponíveis durante a instalação (comissionamento) dos geradores.

No contexto das reformas de geradores hidrelétricos, o ensaio de rejeição de carga representa para ambos, fabricantes e proprietários, uma opção viável de medição dos citados parâmetros da máquina. Nesses casos, normalmente não é recomendado executar o ensaio de curto-circuito brusco, já que o equipamento pode estar próximo ou mesmo ter excedido a sua expectativa de vida. Assim, aplicar um curto-circuito com o intuito de medir os parâmetros da máquina poderia colocá-la sob um estresse perigoso e, em um caso mais crítico, levá-la ao colapso.

Conhecer os parâmetros pode ser especialmente importante no caso dos serviços de reparos, reformas, modernizações e repotenciações de geradores hidrelétricos existentes. Nesses casos, os parâmetros do gerador podem já não estar disponíveis. Mesmo que estejam, acessá-los antes e depois de, por exemplo, uma reforma, permite verificar o impacto do serviço dentro do escopo de trabalho. Um caso típico é quando a reforma abrange apenas o estator, por exemplo. Assim, acessar os parâmetros do gerador é uma segurança adicional de que o novo estator, quando entregue, irá atender determinadas características contratuais. Por outro lado, é uma segurança ao fornecedor quanto a seus limites de responsabilidade sobre eventuais problemas nas partes fora do escopo de fornecimento.

No mesmo contexto de reformas, muitas vezes é importante que os parâmetros do gerador sejam mantidos mesmo após a modernização. Isso se faz necessário principalmente quando o escopo de fornecimento é limitado à parte dos componentes da usina, por exemplo, só o gerador. Assim, caso não sejam feitas reformas nos sistemas no entorno do gerador, a saber o sistema de proteção e excitação, é importante que diversos parâmetros de interface não se alterem.

O mesmo procedimento se aplica quando partes do gerador a ser reformado forem reutilizadas no novo gerador. Um exemplo típico é a reutilização de elementos

estruturais do gerador, como carcaça e anel magnético do rotor. Os esforços mecânicos de origem elétrica (como os que surgem na ocorrência de faltas) sobre esses componentes estão intimamente relacionados às reatâncias do gerador. Assim, manter as reatâncias do equipamento original pode ser importante mesmo com incremento de desempenho (potência e rendimento). O ensaio de rejeição de carga pode ser aplicado para delimitar as responsabilidades de fabricantes e proprietários dentro do contexto de fornecimento com base nos ensaios antes da desinstalação do equipamento (etapa de descomissionamento) e instalação.

Do lado do sistema elétrico, a caracterização do gerador por meio do ensaio de rejeição de carga pode significar um refinamento nos trabalhos que fazem uso das características do gerador. São eles o planejamento e o projeto do sistema elétrico, a determinação das condições de operação normais, limites e de emergência, e os estudos das condições após grandes perturbações ou mesmo apagões. A estabilidade do sistema se torna uma preocupação mais crítica em um contexto em que há fontes de geração renováveis, como eólica e outras, afetando o comportamento do sistema interligado.

Portanto, por meio do estudo da caracterização do gerador por ensaio de rejeição de carga, o presente trabalho está motivado a contribuir com a construção de melhores técnicas de projeto de máquinas elétricas e com os estudos de sua interligação.

4. Normas vigentes e trabalhos relacionados

As principais normas que atualmente estabelecem procedimentos de ensaio para os geradores hidrelétricos típicos são IEEE 115 (1), IEC 34-4 (8) e NEMA MG1 (10). Nelas, os procedimentos de ensaio relacionados às características transitórias e subtransitórias impõem algumas dificuldades que em diversos casos acabam por inviabilizar sua execução. Assim, para determinar tais características, procedimentos alternativos de ensaio foram desenvolvidos, como o ensaio por rejeição de carga.

O ensaio de rejeição de carga é, neste trabalho, voltado à determinação dos parâmetros das máquinas elétricas aplicados à geração hidráulica. Entre outros trabalhos importantes, as publicações de Park e Robertson (7), Kilgore (11), Wright (12), Shildneck (13), Prentice (14) e Rankin (15) carregam a responsabilidade pela definição física e matemática das reatâncias e constantes aplicadas nos modelos das máquinas elétricas.

Ching e Adkins (16) desenvolveram com rigor matemático as equações que descrevem o comportamento da máquina elétrica sob diversas condições de curto-circuito. Essas condições são diferentes da rejeição de carga, no entanto, possuem diversas similaridades, haja vista que, tanto em uma rejeição de carga como em um curto-circuito, a máquina elétrica experimenta as condições de operação permanente, transitória e subtransitória. O próprio Adkins discorreu em outro artigo (17) sobre condições de operação em que há grandes variações de carga, como em uma rejeição de carga. O pesquisador faz uso dos modelos de circuito equivalente e do diagrama de fasores para esclarecer o fenômeno que se sucede após uma rejeição de carga, por exemplo.

As vantagens do ensaio por rejeição de carga motivaram diversas pesquisas. Mello (18) propõe em seu trabalho um procedimento de ensaio e comprova a sua eficácia por simulações. Shackshaft (19) sugere em seu trabalho uma metodologia para determinar os parâmetros das máquinas síncronas, sendo uma delas utilizando o ensaio por rejeição de carga, e compara os resultados teóricos com ensaios em campo.

O instituto Electric Power Research Institute (EPRI) apresenta um estudo detalhado envolvendo ensaios em campo e desenvolvimento teórico aplicados à turbo geradores de uma usina térmica (20). Nele foi possível concluir que o ensaio de rejeição de carga é um método prático que provê informações de alta qualidade para determinação do modelo elétrico da máquina. Em outro artigo (21), Mello reporta parte dos resultados desse estudo.

Sugiyama (22) propõe um método de determinação dos parâmetros de um turbo gerador sob condições de pequenas perturbações de tensão terminal, corrente e ângulo de carga. Comparativamente, são realizados testes de rejeição de carga e ensaio de resposta em frequência.

A EPRI também avaliou diversos métodos para parametrização de geradores (23), sendo um deles o método por ensaio de rejeição de carga. Apesar dos ótimos resultados avaliados pela EPRI, Hirayama (24) relata a dificuldade de alguns modelos matemáticos em prever com precisão a variação da tensão terminal sob a rejeição de carga em alguns turbo geradores de rotor sólido. Então, propõe a constante T'_{q0} como forma de ajustar o modelo nesses casos específicos e a aplicação da saturação do fluxo.

Suni (25) (26) utiliza o pacote de softwares Matlab para realizar simulações numéricas da máquina elétrica submetida à rejeição de carga. O método de ensaio proposto tanto por Suni (25) como por Mello (18) apresenta duas dificuldades principais. Primeiramente, o ensaio precisa ser realizado em diversas condições de carga para que seja possível medir separadamente os parâmetros relacionados com o eixo direto e com o eixo de quadratura. Em segundo lugar, a condição necessária para medir os parâmetros de eixo de quadratura demanda um esforço inicial de cálculo de tentativa e erro por causa da definição do ângulo de carga.

Bortoni (27) propõe uma metodologia capaz de sanar essa dificuldade. Em seu artigo, é proposto um modelo matemático que decompõe a resposta da máquina elétrica nas componentes de eixo direto e eixo de quadratura. Assim, tanto os parâmetros de eixo direto como os parâmetros de eixo de quadratura podem ser

obtidos a partir de um único ensaio realizado para uma condição de carga arbitrária e conhecida. Para tanto, é utilizado um algoritmo de Levenberg-Marquardt.

A norma IEEE 115 do ano de 2009 (36) apresenta uma metodologia de análise dos dados coletados no ensaio de rejeição de carga puramente de eixo direto. Nesse documento, é feita a aplicação do mesmo método gráfico aplicado ao ensaio de curto-circuito, ou seja, a análise gráfica da envoltória do sinal coletado.

De forma geral, os diversos trabalhos que são referências nesta dissertação focam principalmente equipamentos voltados para a geração térmica por turbo-máquinas, possíveis equipamento voltados para geração hidrelétrica de pequeno porte e pequenas máquinas síncronas. No entanto, o ensaio de rejeição de carga não se difundiu no setor de geração hidrelétrica.

O presente trabalho consolida um procedimento de ensaio composto por um conjunto de ações que adéquam o ensaio à realidade do setor hidrelétrico. Além disso, apresenta o momento ideal para aplicação do ensaio, as condições e preparativos necessários, tanto para o gerador síncrono como para os equipamentos que fazem interface a ele. Também aplica uma técnica para filtrar os harmônicos de tensão pelo método de Fourier por médias móveis, faz a análise do sinal registrado pela curva envoltória ao invés da tensão eficaz. Por fim, complementa o apresentado em trabalhos anteriores ao confrontar a simulação do ensaio por elementos finitos com o ensaio em bancada. Adicionalmente ao ensaio de rejeição de carga em bancada, é feito o ensaio de tensão aplicada para determinação da reatância subtransitória de eixo direto não saturada. O resultado desse ensaio de tensão aplicada é comparado com o ensaio de rejeição de carga e a simulação em elementos finitos.

5. Estrutura do trabalho

Primeiramente, o presente trabalho lança suas bases sobre o desenvolvimento teórico, partindo de uma descrição física da máquina elétrica em questão e avança sobre a definição do modelo matemático. Então, o comportamento da máquina elétrica é descrito por meio desses parâmetros e particularizado para a condição de rejeição de carga, que é o objeto de estudo.

A partir do desenvolvimento teórico construído nos primeiros tópicos, será possível prever e entender qual será o comportamento da máquina. Então, são descritos o procedimento de ensaio e a metodologia de análise dos dados obtidos.

A metodologia do ensaio de rejeição de carga é aplicada de duas formas: em bancada e por simulação de elementos finitos, ambas nas mesmas condições. Adicionalmente, são feitos os ensaios para determinação da reatância síncrona de eixo direto a partir das curvas de magnetização (curto-circuito e em vazio) e o ensaio de tensão aplicada para determinação da reatância subtransitória de eixo direto não saturada. Os resultados são comparados entre si e também com os resultados encontrados por De Souza (47), que realizou o ensaio de resposta em frequência no mesmo equipamento.

Com base nesse conjunto de informações, são tecidas as conclusões do trabalho.

Adicionalmente são apresentados informações em anexo. Os anexos tratam das características da máquina síncrona ensaiada e simulada, a instrumentação utilizada nos ensaios, o algoritmo de análise numérica e a explicação sobre a curva de magnetização do material do corpo polar.

6. Máquina síncrona de polos salientes típica na geração hidráulica

Segundo Simone e Creppe (28), a conversão eletromecânica de energia ocorre em dispositivos que podem armazenar energia na forma de campo elétrico ou magnético, sendo este constituído por partes fixas e móveis. Esse campo de origem elétrica ou magnética estabelece forças entre as partes fixas e móveis de forma que uma força externa é necessária para manter as partes na posição original. Quando um deslocamento é permitido, existe um intercâmbio de energia entre a fonte externa e o dispositivo. Entre os equipamentos que se encaixam nessa definição, estão os conversores de potência, grupo em que estão as máquinas elétricas rotativas.

As máquinas elétricas clássicas são divididas em estáticas e rotativas. As máquinas estáticas são os transformadores e reatores. As máquinas estáticas não são conversores eletromecânicos de energia, mas estão citadas aqui devido sua importância no contexto das máquinas elétricas. As máquinas rotativas podem ser divididas em três grupos tradicionais: máquinas síncronas, de indução e de corrente contínua. As máquinas síncronas podem ser projetadas para desempenhar o papel de geradores, motores ou mesmo de compensadores síncronos. Entre as máquinas síncronas, há duas configurações principais: as de polos salientes e a de polos lisos.

O gerador síncrono de polos salientes é a máquina elétrica tipicamente aplicada nas Usinas Hidrelétricas de Energia (UHEs). Esse equipamento é, de forma simplificada, um conversor eletromecânico que converte em energia elétrica a energia mecânica de origem hidráulica disponibilizada em seu eixo.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética, EPE (29), em 2011, a potência instalada da matriz energética brasileira era de 117.136 MW, sendo que 66,9% eram provenientes de geração hidrelétrica de grande e médio porte, aqui denominadas UHEs. Nesse mesmo ano, foram gerados ao todo 532.872 GWh, dos quais 80,4% eram provenientes de fonte hidráulica. De acordo com a Aneel (30), em janeiro de 2013, encontravam-se em operação 204 UHEs no território nacional. Além das próprias UHEs, outras fontes de geração, como térmicas e eólicas, eventualmente podem contar com a máquina síncrona de polos salientes. Essas máquinas têm

grande importância, já que são responsáveis pela maior parte da energia elétrica gerada no território brasileiro.

O gerador síncrono tipicamente utilizado na geração hidráulica pode ser detalhado a partir dos seus componentes estáticos e rotativos. Em ambos os grupos de componentes, temos os elementos ativos e os não ativos, que são divididos dessa forma de acordo com sua atuação ou não no funcionamento eletromagnético do gerador.

Os componentes ativos do estator são o núcleo e o enrolamento. Os outros componentes são não ativos, pois exercem um papel estrutural. São eles a carcaça, as cruzetas e os mancais. Já o rotor é constituído pelos seguintes componentes ativos: núcleo polar, bobina polar, enrolamento amortecedor e anel magnético do rotor. Os componentes não ativos são a aranha do rotor, o eixo e os ventiladores. Certamente, algumas soluções de geradores hidrelétricos podem não conter alguns dos componentes citados devido às particularidades de cada solução adotada.

7. Definição dos parâmetros das máquinas síncronas de polos salientes

Os parâmetros das máquinas elétricas são um conjunto de reatâncias e constantes de tempo que permitem calcular o comportamento da máquina elétrica tanto sob o ponto de vista do sistema elétrico no qual ela está conectada quanto do ponto de vista mecânico estrutural. Isso significa que, para diversas condições, as tensões, as correntes e os torques mecânicos da máquina elétrica podem ser calculados com o uso de seus parâmetros. Os parâmetros, por sua vez, reservam uma correspondência com a construção geométrica e características eletromagnéticas do conjunto de componentes que compõem o gerador.

Cada componente desempenha um papel no funcionamento do gerador síncrono e suas características afetam os fenômenos físicos associados à conversão eletromecânica. A integração entre os diversos componentes pode ser observada de duas perspectivas: a do circuito magnético e a do circuito elétrico. Essas duas perspectivas permitem modelar matematicamente os fenômenos eletromagnéticos segundo a representação da "máquina síncrona ideal" de Park (31), resultando nas expressões gerais do gerador síncrono segundo Concordia (32). Da interpretação dessas equações, são definidos os parâmetros da máquina síncrona de polos salientes tipicamente representados em um modelo de circuito equivalente segundo a IEEE 1110 (2). Desse modelo de circuito equivalente, é possível fazer diversas análises e prever o comportamento da máquina síncrona, inclusive quando o equipamento é submetido a uma rejeição de carga, conforme apresentado na IEEE 115 (36).

i. Circuito magnético

Segundo Fitzgerald (33), o circuito magnético é uma estrutura composta em sua maior parte por material com característica de alta permeabilidade magnética. A presença desse material de alta permeabilidade permite que o fluxo magnético fique confinado nos caminhos delimitados por sua estrutura.

O circuito magnético pode ser entendido como sendo constituído pelo núcleo do estator, o núcleo polar, o anel magnético do rotor e o entreferro. O entreferro é o vão localizado entre o material ferromagnético do estator e do rotor, sendo necessário para permitir o movimento entre as partes estáticas e rotativas.

Figura 7.1 – Representação simplificada bidimensional da seção de um quarto da máquina síncrona, estando identificados os elementos do circuito magnético: (1) núcleo do estator, (2) menor comprimento de entreferro, (3) núcleo polar e (4) anel magnético do rotor

Fonte: Elaboração própria utilizando o programa Maxwell.

Na Figura 7.1, vê-se uma representação em que o anel magnético do rotor e o corpo polar são constituídos por uma peça única. No entanto, é conveniente definir os dois separadamente já que podem ser constituídos como componentes independentes.

Existem diferenças entre os materiais normalmente empregado no rotor e no estator devidas a característica do campo magnético em cada uma das estruturas. Considerando como referência no espaço uma posição fixa no rotor, é possível afirmar que o campo magnético fundamental que flui no rotor tem a característica de não variar no tempo para uma condição de operação permanente. Sendo assim, os

materiais do núcleo dos polos e do anel magnético do rotor são usualmente constituídos de aço carbono que combinam boas características magnéticas com características mecânicas. O aspecto mecânico é importante uma vez que as partes rotativas estão sujeitas a grandes esforços mecânicos e também desempenham uma função estrutural.

Quando se refere ao estator (armadura) do gerador síncrono, o seu núcleo está sujeito a um campo magnético variável. Assim, é propícia a aplicação de chapas de aço silício que possuem perdas por histerese reduzidas. Os materiais aplicados no rotor e no estator para compor o circuito magnético são tipicamente materiais ferromagnéticos. Segundo Fitzgerald (33), os materiais ferromagnéticos são compostos por um grande número de regiões chamadas de domínios. Essas regiões possuem um momento magnético resultante proporcionado pelo posicionamento em paralelo dos momentos magnéticos individuais dos átomos contidos nesse domínio. Quando o material ferromagnético não está magnetizado, os domínios estão orientados aleatoriamente e o fluxo magnético líquido resultante é nulo. Mas quando um campo magnético externo é aplicado a esse material, os momentos dos domínios magnéticos têm a tendência de se alinhar com o campo aplicado. Como resultado, um valor muito mais elevado de densidade de fluxo é obtido se comparado com apenas a aplicação do campo magnético no vácuo. Isso ocorre, pois os momentos magnéticos dos domínios somam-se ao campo aplicado. Assim, é possível definir a permeabilidade magnética efetiva, ou seja, a razão entre a densidade do fluxo magnético total e a intensidade do campo magnético aplicado.

À medida que o campo magnético aplicado aumenta, os domínios magnéticos continuam se alinhando até que todos os momentos magnéticos estejam alinhados com o campo aplicado. Dessa etapa em diante, os domínios já não podem contribuir para o aumento da densidade de fluxo magnético, estando assim o material completamente saturado.

A saturação é um efeito importante observado tanto nos materiais ferromagnéticos quanto nos circuitos magnéticos constituídos por esses materiais. A curva de magnetização do material permite observar esse efeito. Ela relaciona a densidade do campo magnético (B) com a intensidade do campo magnético (H) aplicado. O

Gráfico 7.1 mostra como a curva se comporta para um material ferromagnético genérico.

Gráfico 7.1 – Curva de magnetização de material ferromagnético genérico

Fonte: Elaboração do autor.

No exemplo acima, o comportamento do material se apresenta não linear na resposta da densidade de campo (B) para duas condições. Quando a intensidade do campo (H) é aproximadamente 40 A.e/m e para uma alta intensidade acima de 200 A.e/m. Para os valores intermediários de intensidade, a densidade de campo no material apresenta uma resposta que pode ser considerada linear. A resposta não linear da densidade do fluxo magnético se caracteriza como o efeito da saturação no material. As características de saturação são diferentes para cada um dos materiais aplicados ao gerador e o ponto de operação deste está relacionado com a densidade do fluxo a que está submetido.

O circuito magnético da máquina elétrica pode também ser observado do ponto de vista da saturação, a exemplo dos materiais ferromagnéticos que individualmente têm a condição de saturação analisada por meio da curva de magnetização. A norma IEEE 115 (1) estabelece o procedimento de ensaio para obtenção da curva de magnetização em vazio (circuito aberto). A curva de magnetização permite analisar a saturação do circuito magnético da máquina elétrica.

Segundo a IEEE115 (1), a curva de magnetização em vazio deve ser levantada com a máquina elétrica em velocidade nominal e terminais em circuito aberto. A máquina elétrica deve ser excitada de forma a obter diversas condições de tensão terminal. Sendo um ponto sem excitação, cinco pontos até 60% da tensão terminal, mínimo de dez pontos entre 60% a 110% da tensão terminal a passos de 5%, dois pontos acima de 110% da tensão nominal (incluindo um próximo de 120% da corrente nominal de campo) e, por fim, um ponto em tensão terminal nominal. A sequência de medições deve ser realizada de forma sempre crescente, para remover os efeitos da histerese.

Gráfico 7.2 – Curva de magnetização em vazio de uma máquina elétrica síncrona.

Fonte: Elaboração do autor.

As máquinas que fazem um uso adequado e otimizado dos materiais ferromagnético tipicamente possuem uma curva de magnetização tal qual o ponto de operação em circuito aberto e tensão terminal nominal posicionado na região de transição entre a região linear e a região de saturação.

A IEEE115 (1) define também a curva de magnetização em curto-circuito. A curva de magnetização em curto-circuito é obtida com a máquina elétrica em velocidade

nominal e terminais em circuito fechado. A máquina elétrica deve ser excitada de forma a obter diversas condições de corrente de armadura. Nesse ensaio a corrente de armadura e a corrente de campo são registradas. Usualmente, para esse ensaio devem ser registradas as informações para a corrente de armadura nas condições aproximadas de 125%, 100%, 75%, 50% e 25% da corrente nominal. Pode não ser possível registrar a condição de corrente de armadura em 125%, pois o excesso de corrente pode representar um risco para o equipamento.

A análise combinada das curvas de magnetização em circuito aberto e em curto-circuito permite a determinação de algumas características da máquina síncrona, como será aplicado nesse trabalho.

ii. Enrolamentos e circuito elétrico

O circuito elétrico da máquina síncrona em estudo é composto por três principais componentes. São eles o enrolamento de armadura (enrolamento do estator), o enrolamento de campo (enrolamento do rotor) e o enrolamento amortecedor (localizado no rotor).

Figura 7.2 – Representação tridimensional da máquina síncrona de polos salientes.

Fonte: Elaboração própria utilizando o software Maxwell.

Figura 7.3 – Representação tridimensional da metade axialmente simétrica dos enrolamentos da máquina síncrona de polos salientes.

Fonte: Elaboração própria utilizando o software Maxwell.

O enrolamento de armadura é composto por conjuntos de fios de cobre isolados em barras Roebel ou bobinas. Para o caso típico das máquinas síncronas de polos salientes aplicadas na geração hidrelétrica, o enrolamento do estator é imbricado ou ondulado, de dupla camada, trifásico e de isolamento classe F ou B, sendo classe B normalmente encontrada em equipamentos com muitos anos de operação.

Figura 7.4 – Representação tridimensional da metade axialmente simétrica do enrolamento de armadura.

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Maxwell.

O enrolamento de campo é composto principalmente pelas bobinas polares constituídas de cobre com isolação entre espiras.

Figura 7.5 – Representação tridimensional da metade axialmente simétrica do enrolamento de campo.

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Maxwell.

O enrolamento amortecedor é composto por barras de material condutor, por exemplo cobre, inseridas nas ranhuras da sapata polar. As barras amortecedoras do

mesmo polo são conectadas entre si. A conexão elétrica entre os enrolamentos amortecedores de diferentes polos pode ser feita ou pelo corpo polar ou por um anel condutor, como representado na Figura 7.6.

Figura 7.6 – Representação tridimensional da metade axialmente simétrica do enrolamento amortecedor.

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o software Maxwell.

iii. Fluxo magnético e tensão induzida

A formação dos fluxos magnéticos na máquina síncrona se dá pela ação dos enrolamentos tanto do rotor (campo) como do estator (armadura) quando energizados. Esse fluxo, por sua vez, produz a tensão interna da máquina (tensão induzida no estator pelo fluxo do enrolamento de campo), que é a tensão terminal quando a unidade está sem carga. Quando em carga, a ação combinada dos diversos enrolamentos se faz presente e pode ser modelada matematicamente em termos de reatâncias.

Concordia (32) propõe um equacionamento matemático a partir da "máquina síncrona ideal" de Park (31). Nesse equacionamento, o pesquisador propõe um modelo matemático genérico, no qual há abertura para definição de vários enrolamentos segundo a necessidade particular de cada aplicação. De acordo com a IEEE 1110 (2), é satisfatório representar a máquina de geração hidrelétrica de polos salientes pelo modelo particularizado, no qual o estator possui um

devido a essa corrente. Dizemos que as espiras desse indutor estão concatenadas por esse fluxo partilhado. Assim, segundo Halliday (34), a indutância do indutor é:

$$L = \frac{N\phi}{i} \quad (7.1)$$

Onde:

L = indutância;

ϕ = fluxo magnético devido a corrente i ;

N = número de espiras do indutor;

i = corrente que circula no indutor.

Quando a corrente que circula nesse indutor varia com o tempo, surge uma tensão autoinduzida em seus terminais. Halliday (34) a define como:

$$|\varepsilon_L| = \left| L \frac{di}{dt} \right| \quad (7.2)$$

Onde:

ε_L = tensão autoinduzida;

L = indutância;

i = corrente que circula no indutor;

t = tempo.

Analogamente, é possível definir relações de indutância mútua quando duas ou mais bobinas estabelecem relações de fluxo magnético entre si. Em uma situação simplificada na qual há interação entre duas bobinas, segundo Halliday (34), temos:

$$M = \frac{N_2\phi_{21}}{i_1} = \frac{N_1\phi_{12}}{i_2} \quad (7.3)$$

$$|\varepsilon_2| = \left| M \frac{di_1}{dt} \right| \quad (7.4)$$

$$|\varepsilon_1| = \left| M \frac{di_2}{dt} \right| \quad (7.5)$$

Onde:

M = indutância mútua entre as bobinas 1 e 2;

N_1, N_2 = número de espiras da bobina 1 e 2 respectivamente;

ϕ_{21}, ϕ_{12} = fluxo através da bobina 2 associado à corrente na bobina 1, e vice-versa;

i_1 , i_2 = corrente que circula no indutor 1 e 2 respectivamente;

ε_1 , ε_2 = tensão autoinduzida na bobina 1 por causa da corrente na bobina 2, e vice-versa;

t = tempo.

Tomando em conta as considerações de Ching (16), é assumido que a máquina está em rotação constante, que não há saturação no circuito magnético e que apenas a primeira harmônica é relevante nas análises. Assim, será assumido também que a tensão terminal nos enrolamentos é senoidal e possui frequência constante. Dessa forma, é conveniente definirmos a frequência angular e a reatância indutiva:

$$\omega = 2\pi f \quad (7.6)$$

$$X_L = \omega L \quad (7.7)$$

Onde:

ω = frequência angular;

f = frequência em Hz;

X_L = reatância indutiva;

L = indutância.

A reatância indutiva será daqui em diante chamada apenas de indutância, já que o equacionamento em por unidade (pu) assim permite.

A definição física geral pode ser particularizada para a aplicação de máquinas síncronas. Segundo Concordia (32), a tensão induzida nos terminais dos três enrolamentos da armadura do gerador pode ser escrita como a derivada no tempo do fluxo total que concatena o enrolamento menos a queda de tensão devido à circulação de corrente através da resistência elétrica desse mesmo enrolamento. Para os enrolamentos de campo e de amortecimento, essa mesma descrição é válida, no entanto, particularizada pelo fato de que a tensão sobre a resistência elétrica é somada e, apenas no caso do enrolamento amortecedor, a tensão terminal é nula, pois seus terminais estão curto-circuitados.

$$e = p\psi + ri \quad (7.8)$$

Onde:

e = tensão terminal do enrolamento;

ψ = fluxo total que concatena o enrolamento;

r = resistência ôhmica do enrolamento;

i = corrente que circula no enrolamento;

p = operador derivativo d/dt , sendo t = tempo.

Segundo Halliday (34), o fenômeno da autoindução ocorre quando a corrente que circula em uma bobina varia no tempo, fazendo surgir nela própria uma tensão elétrica autoinduzida no sentido de se opor a variação que a produziu. Esse fenômeno define a característica de indutância própria de um enrolamento. Já a indução mútua, segundo Halliday (34), ocorre quando duas bobinas próximas uma da outra e uma corrente variando em uma das bobinas induz uma tensão elétrica na outra bobina. Esse fenômeno define a indutância mútua. Na máquina síncrona, a disposição dos enrolamentos faz que eles estabeleçam entre si ocorrências de autoindução e indução mútua.

Os enrolamentos, portanto, produzem fluxos magnéticos que interagem entre si. Segundo o próprio Concordia (32), o fluxo magnético total que concatena cada enrolamento pode ser entendido como a somatória de diversos fluxos magnéticos. Esses fluxos estão relacionados com os fenômenos de autoindução e indução mútua. Assim, o fluxo total que concatena cada bobina pode ser definido como o produto da indutância pela corrente que circula através dos diversos enrolamentos, sendo as indutâncias própria e mútuas.

$$\psi = X_{própria}i_{própria} + \sum_{k=1}^n X_{mk}i_k \quad (7.9)$$

ψ = fluxo total que concatena um dos enrolamentos;

$X_{própria}$ = indutância própria do enrolamento;

$i_{própria}$ = corrente que circula no enrolamento;

$X_{m1} \dots X_{mn}$ = indutâncias mútuas entre os dois enrolamentos, sendo sempre um deles o enrolamento avaliado e o outro um dos enrolamentos existentes;

$i_1 \dots i_n$ = corrente que circula através do enrolamento correspondente à indutância mútua.

Nesse momento é conveniente comparar os enrolamentos a indutores, mais especificamente a solenoides. Esse comparativo permite emprestar a definição de indutância de um solenoide segundo Halliday (34) para desenvolver os conceitos físicos aplicados aqui. Vale salientar que a relutância magnética de um meio é o inverso da permeância magnética. Assim, adaptando a definição de Halliday (34) à aplicação, é possível afirmar que para um solenoide a indutância é proporcional à área da sua seção transversal, ao número de espiras e à permeabilidade magnética do meio:

$$X \propto \mu n^2 A \quad (7.10)$$

Onde:

X = indutância;

n = número de espiras;

A = área de seção transversal do indutor;

μ = permeabilidade magnética do meio;

$\propto$ = símbolo de proporcionalidade entre os lados da equação.

Por conta da construção em polos salientes, as indutâncias próprias do enrolamento de armadura dependem da posição angular do rotor, variando de um valor mínimo para um máximo de acordo com o mínimo e o máximo entreferro. Já que, de acordo com a posição do rotor, as fases experimentam relutâncias diferentes – ora por estar alinhadas com o polo, ora por não estarem alinhadas com ele. O mesmo vale para as indutâncias mútuas da armadura, que dependem da posição angular do rotor, variando de um valor mínimo para um máximo.

As indutâncias próprias de campo e do circuito amortecedor são constantes, independentemente da posição angular do rotor, quando os efeitos das ranhuras do estator e da saturação são ignorados. As indutâncias mútuas entre os enrolamentos

do rotor são constantes independentemente da posição angular, já que a posição relativa entre eles não varia com a rotação da máquina síncrona.

As indutâncias mútuas entre o enrolamento do estator e os enrolamentos do rotor variam senoidalmente com a posição do rotor, tendo em vista que a relutância entre eles varia de acordo com a posição do rotor.

Até o momento, foram apresentadas definições genéricas das relações de fluxo e indutâncias em relação às tensões na máquina síncrona. Concordia (32), ao substituir as relações de fluxo e as expressões das indutâncias dos circuitos magneticamente acoplados da máquina nas equações de tensão, obteve as expressões resultantes das tensões nos enrolamentos, formando um complexo sistema de equações diferenciais, o qual é o modelo matemático original representativo da máquina síncrona.

As equações de tensão da máquina, envolvendo todos os seus enrolamentos, dão seu desempenho em qualquer situação de regime permanente ou transitório, bastando para isso impor as condições particulares de cada caso.

As equações desenvolvidas por Concordia (32) são suficientes para analisar o comportamento da máquina elétrica. Não obstante, é conveniente representá-las na forma de um circuito equivalente. Para tanto, as equações são referenciadas ao eixo direto e ao eixo de quadratura. Os eixos direto e quadratura estão identificados na Figura 7.7, na qual se visualiza o eixo direto alinhado com a linha de centro do polo (caminho de menor relutância) e o eixo de quadratura alinhado com o centro da região entre polos (caminho de maior relutância). Após referenciadas a esses eixos, as equações da máquina elétrica podem ser organizadas na forma de uma matriz. Esta pode ser interpretada como uma matriz de um circuito elétrico, técnica que utiliza leis de Tensão e Corrente de Kirchhoff aplicadas a um circuito.

A IEEE 1110 (2) sugere que para os estudos de máquinas síncronas de polos salientes aplicadas a geração hidrelétrica seja utilizado o modelo intitulado "modelo 2.1", representado na Figura 7.8.

Figura 7.8 – Modelo 2.1 de circuito equivalente da máquina elétrica síncrona segundo IEEE 1110.

Fonte: *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*, 2002. Legenda: L_ℓ – Indutância de dispersão do estator, tanto para o eixo direto como de quadratura; L_{ad} , L_{aq} – Indutâncias mútuas do estato-rotor tanto para o eixo direto (d) quanto ao de quadratura (q); R_{fd} , L_{fd} – Resistência do enrolamento de campo e indutância de dispersão do enrolamento de campo referidas ao estator; R_{1d} , L_{1d} – Resistência do enrolamento amortecedor e indutância de dispersão do enrolamento amortecedor referidas ao estator, ambas de eixo direto; R_{1q} , L_{1q} – Resistência do enrolamento amortecedor e indutância de dispersão do enrolamento amortecedor referidas ao estator, ambas de eixo de quadratura; L_{f1d} – indutância mútua entre o enrolamento de campo e o enrolamento amortecedor de eixo direto referidas no estator; E_{fd} – Tensão interna, ou seja, tensão induzida no estator pelo fluxo do enrolamento de campo.

O modelo apresentado é baseado no conceito de eixo direto e eixo de quadratura. Note que um dos circuitos possui elementos de eixo direto e o outro de eixo de quadratura. A representação segregada é proposital, pois o modelo apresenta os eixos direto e de quadratura desacoplados magneticamente. Isso significa dizer que a corrente em um eixo não produz fluxo ou qualquer mudança de fluxo no outro eixo. Segundo a IEEE 1110 (2), na máquina real, as não linearidades magnéticas (saturação) produzem em certo grau um acoplamento entre eixos. No entanto, os modelos com os eixos desacoplados são apropriados para representar o funcionamento da máquina síncrona.

O circuito equivalente que representa o eixo direto possui dois terminais que são a representação equivalente dos terminais de armadura no eixo direto. No circuito do

eixo direto podemos notar três ramos. De forma simplificada, podemos entender que o primeiro ramo (da esquerda para a direita) está associado ao enrolamento de armadura. O segundo ramo está associado ao enrolamento amortecedor do rotor. O terceiro ramo, ao enrolamento de campo.

O circuito equivalente que representa o eixo de quadratura possui dois terminais que são a representação equivalente dos terminais de armadura no eixo de quadratura. Já no circuito do eixo de quadratura podemos notar dois ramos, uma vez que o eixo de quadratura não possui enrolamento de campo. Assim, de forma análoga, podemos entender que o primeiro ramo está associado ao enrolamento de armadura. O segundo ramo está associado ao enrolamento amortecedor do rotor.

O modelo de circuito elétrico é a base para definição das reatâncias de eixo direto e eixo de quadratura, nas condições permanente, transitória e subtransitória. As reatâncias de eixo direto em condições permanente, transitória e subtransitória são o foco desse estudo.

iv. Definição e interpretação física das características de eixo direto e eixo de quadratura

De acordo com o circuito equivalente apresentado, podemos notar a existência de circuitos RL, ou seja, de associação de indutâncias e resistências. Assim, vamos explorar a definição das constantes de tempo.

Segundo Halliday (34), para um circuito RL, a constante de tempo pode ser definida por:

$$T = L/R \quad (7.11)$$

Sendo:

T = constante de tempo [s];

L = indutância [Henry (H)];

R = resistência [ohm].

Recordando como foi definido anteriormente:

$$X_L = \omega L \quad (7.12)$$

Podemos escrever, segundo Kilgore (11) e Mello (37):

$$\mathbf{T}'_{d0} = \frac{L_{fd}}{R_{fd}} \quad (7.13)$$

E segundo Adkins (17) e Mello (37), temos:

$$\mathbf{T}''_{d0} = \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{L_{ad}L_{fd}}{L_{ad}+L_{fd}} \right) \quad (7.14)$$

$$\mathbf{T}''_d = \frac{1}{R_{1d}} \left(L_{1d} + \frac{L_{ad}L_{fd}L_{\ell}}{L_{ad}L_{\ell}+L_{ad}L_{fd}+L_{fd}L_{\ell}} \right) \quad (7.15)$$

$$\mathbf{T}''_{q0} = \frac{L_{1q}+L_{aq}}{R_{1q}} \quad (7.16)$$

Além das constantes de tempo apresentadas, é possível definir as reatâncias de eixo direto e eixo de quadratura para as condições de operação permanente, transitória e subtransitória. Partindo novamente da definição física, a reatância indutiva é dada por:

$$\omega L = X_L \quad (7.17)$$

Portanto,

$$\omega L_{\ell} = X_{\ell} \quad (7.18)$$

$$\omega L_{ad} = X_{ad} \quad (7.19)$$

$$\omega L_{aq} = X_{aq} \quad (7.20)$$

$$\omega L_{fd} = X_{fd} \quad (7.21)$$

$$\omega L_{1d} = X_{1d} \quad (7.22)$$

$$\omega L_{1q} = X_{1q} \quad (7.23)$$

Assim sendo, vamos definir, a princípio, duas reatâncias importantes:

$$X_d = X_{\ell} + X_{ad} \quad (7.24)$$

$$X_q = X_\ell + X_{aq} \quad (7.25)$$

Onde:

X_d, X_q = reatâncias síncronas de eixo direto e de quadratura respectivamente;

X_{ad}, X_{aq} = reatância mútua entre estator e rotor, de eixo direto e de quadratura respectivamente;

X_ℓ = Reatância de dispersão do estator para ambos os eixos, direto e quadratura.

Operação em condição permanente

Quando a máquina síncrona de polos salientes opera como gerador em rotação nominal com corrente de sequência positiva circulando em seus terminais, é possível observar a contribuição das reatâncias síncronas de eixo direto e de quadratura na composição da tensão terminal. Como sugere o próprio circuito equivalente, a contribuição de cada reatância na tensão dependerá do fluxo magnético através dos eixos direto e de quadratura.

Caso o ponto de carga de operação do gerador síncrono faça circular o fluxo magnético apenas pelo eixo direto, a tensão terminal será decorrente da soma vetorial da tensão interna e da queda de tensão sob a reatância síncrona de eixo direto. O equivalente ocorre com o eixo de quadratura quando o fluxo circula somente por ele.

Operação em condição transitória e subtransitória

Vamos definir as reatâncias abaixo segundo Shildnick (13) e Mello (37):

$$X'_d = X_\ell + \frac{X_{ad}X_{fd}}{X_{ad} + X_{fd}} \quad (7.26)$$

$$X''_d = X_\ell + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{1d}} + \frac{1}{X_{fd}}} \quad (7.27)$$

$$X''_q = X_\ell + \frac{X_{aq}X_{1q}}{X_{aq} + X_{1q}} \quad (7.28)$$

Como não há enrolamento de campo no eixo de quadratura, por convenção é definido que:

$$\mathbf{X''}_q = \mathbf{X}'_q \quad (7.29)$$

Onde:

$\mathbf{X}'_d, \mathbf{X''}_d$ = reatâncias de eixo direto, transitória e subtransitória respectivamente;

$\mathbf{X}'_q, \mathbf{X''}_q$ = reatâncias de eixo de quadratura, transitória e subtransitória respectivamente;

X_ℓ = reatância de dispersão do estator para ambos os eixos, direto e quadratura;

X_{ad} = reatância mútua entre estator e rotor, de eixo direto;

X_{aq} = reatância mútua entre estator e rotor, de eixo de quadratura;

X_{fd} = reatância de dispersão do enrolamento de campo de eixo direto;

X_{1d}, X_{1q} = reatância de dispersão do enrolamento amortecedor para os eixos direto e quadratura respectivamente.

Interpretação física de $\mathbf{X}'_d$ e $\mathbf{X''}_d$

Da perspectiva dos enrolamentos do polo, não há variação da permeância. Assim, em uma operação síncrona permanente, não há tensão induzida nos bobinas de campo. No entanto, segundo Prentice (14), quando as condições de operação estão mudando (condição transiente), surgem correntes induzidas nos enrolamentos do rotor, o que modifica a permeância dos caminhos do fluxo magnético. Sendo assim, consideremos um gerador síncrono em velocidade nominal com o circuito de campo fechado e desexcitado e os outros circuitos do rotor (amortecedor) abertos. Quando então é aplicada tensão de sequência positiva nos terminais de fase do estator, fazendo surgir uma força magnetomotriz alinhada com o eixo direto. Essa força magnetomotriz encontrará uma reação de contraposição criada por uma corrente induzida no próprio enrolamento de campo. Eventualmente, a corrente induzida irá sumir. Contudo, enquanto essa corrente estiver atuando de forma a resistir à variação, o fluxo magnético será forçado pelo caminho de baixa permeância da região interpolar. Assim, o fluxo concatenado será muito menor que na condição síncrona, caracterizando a atuação de uma reatância. Interpretamos essa reatância como a reatância transitória de eixo direto. Tendo em vista que o fluxo é menor do

que na condição de operação permanente, essa reatância transitória será de menor magnitude do que a síncrona.

A mesma situação ocorre para a reatância subtransitória de eixo direto. Entretanto, nesse caso temos a variação de permeância relacionada com a ação do enrolamento amortecedor. Assim, no caso de uma variação da carga nos terminais do gerador, ou seja, uma variação na magnitude da corrente, uma reação do enrolamento amortecedor será provocada. Segundo Shildnick (13), o tempo de resposta do enrolamento amortecedor é mais rápido do que o enrolamento de campo, pois sua reatância é menor e também por estar localizado mais próximo ao estator. Além disso, comparativamente com o enrolamento de campo, o enrolamento amortecedor possui uma resistência elétrica maior. E também por isso sua constante de tempo tende a ser menor e, portanto, a sua atuação tende a ser mais rápida.

Interpretação física de X''_q

O eixo de quadratura não possui enrolamento de campo. Assim, está convencionada que a reatância transitória de eixo de quadratura é a mesma reatância subtransitória desse mesmo eixo. Para a reatância subtransitória de eixo de quadratura, podemos considerar a mesma situação da reatância correspondente de eixo direto. No entanto, nesse caso o fluxo principal resultante está alinhado com o eixo de quadratura devido a uma condição específica de carga. A interpretação física é análoga.

v. Resposta da máquina síncrona em rejeição de carga no eixo direto

A resposta de tensão de uma máquina síncrona submetida a uma rejeição de carga pode ser determinada pela análise do circuito equivalente colocado sob determinadas condições de contorno. Como visto acima, o circuito equivalente é composto por indutores, resistores e uma fonte de tensão. O princípio físico que norteia o caso particular da rejeição de carga em eixo direto é o mesmo princípio do caso simples e genérico do funcionamento de um circuito RL; ou seja, um circuito constituído por um indutor, uma resistência e uma fonte de tensão.

Considerando o circuito proposto por Halliday (34), de malha única, constituído por um resistor e um indutor em série. Quando a essa malha uma tensão é aplicada, a corrente através do circuito começa a crescer. Para introduzir o conceito, vamos considerar que essa tensão é contínua. Se o indutor não estivesse presente, a corrente atingiria rapidamente o valor permanente, ou seja, a corrente seria igual à tensão aplicada dividida pela resistência. Entretanto, por causa do indutor, uma tensão autoinduzida aparece no circuito, de acordo com a lei de Lenz descrita em Halliday (34). Essa tensão se opõe à variação da corrente (que é crescente), o que significa que sua polaridade é oposta a da tensão aplicada ao circuito. Assim, o resistor fica sujeito a uma diferença de tensão que é igual à tensão aplicada menos a tensão autoinduzida no indutor.

Com o passar do tempo, a taxa de variação da corrente torna-se cada vez mais lenta. Assim, o módulo da tensão autoinduzida diminui, pois este é diretamente proporcional à derivada da corrente no tempo, conforme definido na fórmula 7.2.

Caso a fonte de tensão desse exemplo seja curto-circuitada, a variação da corrente será no sentido de decaimento e a tensão autoinduzida no indutor irá da mesma forma se opor a essa variação. A constante de tempo que pauta o decaimento ou crescimento da corrente foi definida na equação 7.11. No exemplo genérico aqui discutido, Halliday (34), determina, então, o decaimento da corrente por:

$$i = \frac{E}{R} e^{-t/T_L} = i_0 e^{-t/T_L} \quad (7.30)$$

Na equação acima temos que:

i = corrente elétrica em função do tempo;

i_0 = corrente elétrica inicial antes do decaimento;

E = tensão aplicada pela fonte;

R = resistência elétrica;

t = tempo;

T_L = constante de tempo indutiva.

O circuito RL genérico utilizado como exemplo é simples e serve para introduzir o conceito de decaimento de corrente. O modelo de circuito equivalente da máquina síncrona, quando submetido a uma rejeição de carga, também experimenta o efeito de decaimento de corrente. No entanto, devido a sua maior complexidade, as interações entre seus elementos resultam em expressões de decaimento mais complexas.

Na rejeição de carga puramente no eixo direto é possível simplificar a análise, pois é necessário apenas observar o comportamento do circuito equivalente que corresponde ao eixo direto, já que nesse caso apenas ele contribui para a tensão terminal. Considerando que a máquina operando em um ponto de carga em que o fluxo magnético circula apenas através do eixo direto e, em determinado momento, os terminais da máquina são desconectados da carga e ocorre uma rejeição desta. Obviamente, a corrente terminal será interrompida imediatamente. No entanto, o fluxo magnético não será interrompido de imediato por ação dos indutores do circuito equivalente.

Os indutores têm a característica de se opor à variação do fluxo magnético que circula por ele. A rejeição de carga significa para o indutor essa variação de fluxo. A resposta do circuito equivalente se opõe a essa variação, fazendo, portanto surgir correntes internas ao circuito equivalente capazes de produzir um fluxo magnético. Essas correntes internas ao circuito equivalente decaem em função do tempo. As correntes internas fazem surgir nos terminais da máquina uma tensão que varia segundo esse mesmo decaimento.

Tendo em vista a atuação de diversas reatâncias e o tempo de resposta desta, a norma IEEE 115 (36) de 2009 apresenta as equações que descrevem por unidade (pu) tanto a envoltória da tensão terminal como a tensão terminal eficaz (rms) da máquina síncrona sob a rejeição de carga. Assim temos:

$$V_t(t) = V_0 - X_d I_a - I_a (X'_d - X_d) e^{-\frac{t}{\tau'_{d0}}} - I_a (X''_d - X'_d) e^{-\frac{t}{\tau''_{d0}}} \quad (7.31)$$

Onde:

$V_t(t)$ = tensão terminal (rms e envoltória) em pu após a rejeição de carga, em função do tempo;

V_o = tensão terminal em pu na condição estabilizada no instante da rejeição de carga;

I_a = corrente terminal em pu na condição estabilizada no instante da rejeição de carga.

Vale ressaltar que o comportamento da tensão terminal, quando a máquina síncrona é sujeita à rejeição de carga, pode ser descrito por essa equação caso a tensão de campo permaneça constante durante o tempo todo. Se a tensão de campo não for constante, o enrolamento de campo será uma fonte adicional de variação no fluxo magnético, o que provocará outro comportamento no circuito equivalente e, portanto, resultará em outra equação de tensão terminal.

O comportamento dado pela equação anterior pode ser visto graficamente como no Gráfico 7.3. Para tanto, foram adotados alguns valores genéricos para as características da máquina síncrona quando operando como gerador, com o fluxo alinhado ao eixo direto e fornecendo reativos capacitivos, ou seja, a tensão de excitação menor do que o valor nominal (gerador subexcitado).

Gráfico 7.3 – Comportamento esperado no caso de uma rejeição de carga de eixo direto para uma máquina genérica subexcitada (gráfico semi-log). Sem escala de tempo.

Envoltória da tensão terminal

Fonte: Elaboração do autor.

Mello (18) identificou que da análise gráfica da tensão terminal é possível extrair as reatâncias e constantes de tempo. Para o caso em estudo, no qual é feita uma rejeição de eixo direto, é possível analisar a tensão terminal da forma representada no Gráfico 7.4.

Gráfico 7.4 – Interpretação da tensão terminal sob rejeição de carga.

Envoltória da tensão terminal

Fonte: Mello (18).

$$X_d = \frac{c}{i_\theta} \quad (7.32)$$

$$X'_d = \frac{B}{i_0} \quad (7.33)$$

$$X''_d = \frac{A}{i_0} \quad (7.34)$$

Sendo i_o a corrente de fase em pu no instante da rejeição de carga.

vi. Saturação

O presente trabalho está focado na medição das reatâncias X_d , X'_d , X''_d , todas não saturadas. Apesar disso, o método de ensaio de rejeição de carga não é limitado apenas às reatâncias de eixo direto ou à medição de reatâncias não saturadas. Na verdade, o método é capaz de medir as reatâncias e constantes de tempo de eixo direto e de quadratura, saturadas e não saturadas. Para cada conjunto de característica, uma determinada condição de contorno é necessária.

Dentro da proposta do presente trabalho, o ensaio é utilizado para medir as reatâncias de eixo direto não saturadas. Para tanto, é necessário que o ponto de

carga de operação da máquina no instante antes da rejeição faça com que o fluxo magnético esteja alinhado com o eixo direto e que a máquina esteja subexcitada (tensão de excitação menor que o nominal).

a) Fluxo alinhado com o eixo direto

O artigo do IEEE (39) recomenda como deve ser elaborado o diagrama de fasores das máquinas síncronas. Segundo essas recomendações, é possível traçar o diagrama de fasores que inclui os vetores de fluxo magnético da máquina síncrona de polos salientes operando como gerador. Para atender ao requisito de ensaio que diz que o fluxo magnético deve estar totalmente alinhado com o eixo direto, duas situações são possíveis. A primeira ocorre para os pontos de carga com a máquina síncrona fornecendo potência reativa indutiva e nenhuma potência ativa. A segunda situação ocorre com os pontos de carga em que a máquina síncrona está fornecendo reativo capacitivo e nenhuma potência ativa.

A Figura 7.9 representa as duas situações.

Figura 7.9 – Diagrama de fasores para a máquina síncrona operando como gerador subexcitado (fator de potência capacitivo) e sobre-excitado (fator de potência indutivo).

Fonte: Elaboração do autor; Legenda: ψ_{ar} – fluxo de reação de armadura; ψ_f – fluxo do enrolamento de campo; ψ_R – fluxo resultante; V_1 – tensão terminal; E_{af} – tensão interna; X_d – reatância síncrona de eixo direto; I_a – corrente de armadura; I_d – projeção da corrente de armadura no eixo direto

b) Subexcitada e sobre-excitada

Note que no diagrama de fasores anterior, na condição de fornecimento de reativos capacitivos, é possível observar que a tensão interna da máquina é menor do que a tensão terminal. Nesse caso, dizemos que o gerador síncrono está subexcitado. Não obstante, a tensão de excitação aplicada no campo do gerador é menor do que o valor nominal. Portanto, o próprio sistema elétrico ao qual a máquina está conectada se encarrega de fornecer a magnetização complementar ao enrolamento de campo.

Para as condições de subexcitação, quando o gerador síncrono é submetido a uma rejeição de carga, perde-se a contribuição de magnetização advinda do sistema elétrico. Nas condições de ensaio propostas neste trabalho, a tensão terminal irá decrescer. Assim, os valores de reatâncias serão obtidos da análise de tensão quando em valores abaixo do nominal. Entende-se que o gerador está operando em uma condição não saturada. Logo, os valores de reatância obtidos no ensaio de rejeição de carga que partam dessa condição serão de reatâncias não saturadas.

É importante destacar que a queda de tensão ocorre em função do tempo. Nos instantes iniciais, a tensão ainda não caiu de forma significativa para caracterizar claramente uma condição não saturada. E nesse instante inicial é que é possível determinar a reatância subtransitória. Dessa forma, definir a reatância subtransitória como sendo não saturada pode ser considerado uma afirmação duvidosa. Para tanto, foi realizado o ensaio em bancada para determinação da reatância subtransitória de eixo direto não saturada segundo a IEC 60034-4 (8). De posse do valor de reatância subtransitória de eixo direto não saturada, foi possível comparar com o resultado do ensaio de rejeição e confirmar a hipótese de que as condições de ensaio permitem medir as reatâncias não saturadas.

Na condição de fornecimento de reativos indutivos, a tensão interna da máquina é maior do que a tensão terminal. Nesse caso, dizemos que o gerador síncrono está sobre-excitado e a máquina elétrica está magnetizando o sistema elétrico ao qual está conectada. Quando o ensaio de rejeição de carga é realizado na condição de sobre-excitação, entende-se que as reatâncias resultantes serão saturadas, já que a análise de tensão se dará sobre a tensão terminal que assume valores maiores a tensão nominal.

8. Procedimento de ensaio de rejeição de carga da máquina síncrona particularizado para a geração hidrelétrica

i. Considerações iniciais

O procedimento de ensaio aqui apresentado está elaborado para determinar as reatâncias X_d , X'_d e X''_d , através do comportamento da máquina elétrica sob a condição de rejeição de carga. A determinação das reatâncias pelo ensaio de rejeição de carga é considerada um ensaio especial.

O procedimento de ensaio aqui apresentado está particularizado para a aplicação em usinas hidrelétricas e limitado a algumas configurações típicas de usinas. Isso significa dizer que o método poderá ser aplicado diretamente em algumas plantas e em outras possivelmente mediante adaptações do método ou transpondo as condições limitantes. As adaptações não serão discutidas, no entanto, o presente documento serve de base para elaborá-las.

As condições particulares do método serão apresentadas a seguir. Serão apontados os diversos aspectos que precisam ser observados para realizar o planejamento e a execução do ensaio.

O método pode ser aplicado em novos hidrogeradores e também em hidrogeradores que serão ou foram submetidos a serviços de reformas ou reparos. É importante que o hidrogerador, a planta hidrelétrica como um todo e o respectivo sistema elétrico estejam plenamente operantes.

ii. Quando realizar o ensaio

Os recursos humanos, materiais e financeiros empregados na execução do ensaio são um aspecto muito importante que pode determinar a viabilidade ou não do ensaio de rejeição de carga para caracterização de geradores hidrelétricos. Nos dois contextos, ou seja, o das novas usinas e o das usinas sob reforma e reparos, existem alguns momentos mais adequados que otimizam os recursos empregados neste ensaio.

Os momentos mais apropriados para realizar o ensaio são aqueles em que:

- já há uma equipe técnica mobilizada para realizar um conjunto maior de atividades;
- equipamentos e instrumentos já estarão disponíveis por conta de um conjunto de outras atividades planejadas;
- a planta hidrelétrica está plenamente operativa;
- há recursos hídricos para realizar o ensaio;
- a interrupção da operação do hidrogerador tenha o menor impacto nos contratos de geração de energia com fins comerciais.

Há alguns momentos que conciliam as condições citadas anteriormente. Em unidades que serão reformadas ou submetidas a reparos, existe um momento conhecido como descomissionamento. O descomissionamento é uma etapa que antecede o início dos reparos e reformas. Essa etapa inclui um conjunto de testes que são realizados no hidrogerador de forma a determinar suas condições antes da execução das intervenções de reforma e reparo. É uma etapa importante do ponto de vista contratual, pois o conjunto de ensaios qual o hidrogerador é submetido registra a condição em que ele foi entregue pelo seu proprietário para a empresa responsável pela reforma. Após a execução dos serviços de reparo e reforma, as novas condições em que o hidrogerador é devolvido ao seu proprietário poderão ser comparadas com as que ele foi entregue. Assim é possível avaliar o serviço realizado dentro das condições do escopo contratado.

O descomissionamento tipicamente possui um conjunto de procedimentos que podem ser chamados de “Ensaio Dinâmico com a Máquina Excitada em Vazio”. Estes compreendem procedimentos como a determinação das curvas de magnetização em vazio e, em curto, a sequência de fases entre outros ensaios descritos na norma IEEE 115 (36). Esse conjunto de procedimentos se utiliza de uma fonte de tensão independente para excitar o hidrogerador sob teste, sendo que este não é sincronizado ao sistema elétrico. Após esse conjunto de testes, é tipicamente realizado o ensaio de sincronismo com o gerador realimentado, ou seja, a fonte de tensão independente que alimentava o sistema de excitação não é mais utilizada.

A sugestão deste trabalho é que o ensaio de rejeição de carga seja realizado entre as duas etapas acima, ou seja, após os ensaios dinâmicos com a máquina excitada em vazio e antes do ensaio de sincronismo com o gerador realimentado. Dessa forma, é possível otimizar o tempo de execução do ensaio aproveitando que o sistema de excitação já está sendo alimentado por uma fonte de tensão independente.

Figura 8.1 – Ensaio de rejeição de carga para unidade em reforma sem sinistros.

Fonte: Elaboração do autor

São feitas as recomendações acima com o objetivo de otimizar o tempo de ensaio e garantir a sua segurança. No caso de uma unidade que será reformada (ou reparada) que não tenha nenhum sinistro, quando executado o ensaio de rejeição de carga tratado neste estudo, a equipe de campo já tem a certeza de que todos os equipamentos de geração envolvidos estão operantes. Assim, é possível executar uma sincronização com alimentação independente e nenhum risco de algum dos diversos equipamentos envolvidos venha falhar em decorrência desse procedimento. Quando o ensaio é realizado na sequência sugerida, é possível melhorar o prazo de execução, uma vez que as instalações elétricas que alimentam de forma independente o sistema de excitação já estão disponíveis e seguramente operantes, como verificado por ensaios anteriores e corroborado pelo próprio funcionamento do equipamento.

A Figura 8.1 apresenta onde o ensaio de rejeição de carga se encaixa na sequência de descomissionamento. A título de planejamento das atividades em campo e estimativa de custo do ensaio, é conveniente prever a duração mínima de quatro horas para sua realização.

Já os hidrogeradores novos passam por uma etapa chamada de comissionamento. O comissionamento é uma etapa de testes em que o hidrogerador é colocado em operação. Nela, o equipamento é testado individualmente e também em conjunto com os diversos equipamentos e sistemas da usina hidrelétrica. Tipicamente nessa etapa o equipamento está sob responsabilidade do seu fabricante. Dependendo do resultado dos testes, ou seja, se o hidrogerador atende ou não os requisitos contratados, o proprietário do equipamento irá aceitá-lo ou não.

No comissionamento, o hidrogerador é submetido a uma sequência de testes. Essa sequência compreende ensaios dos componentes individuais que constituem o gerador, em seguida do gerador todo em condição estática (sem rotação), depois em rotação, mas sem carga, e por fim em rotação e com carga. Um dos ensaios que faz parte da etapa de ensaios com o hidrogerador em rotação e com carga é o ensaio de sincronismo com o hidrogerador realimentado, no qual a unidade geradora é sincronizada à rede, tendo o seu sistema de excitação realimentado pela própria tensão de saída do hidrogerador. A etapa de ensaios em rotação e com carga pode anteceder uma etapa de ensaios especiais. Para os casos de unidades novas em comissionamento, recomenda-se que a realização do ensaio de rejeição de carga proposto neste trabalho seja feita após os ensaios de sincronismo com o hidrogerador realimentado.

No caso de uma unidade nova, como todos os equipamentos ainda estão em teste, só há segurança suficiente para executar o ensaio de rejeição aqui proposto após a realização do ensaio de sincronização padrão, já que depois dessa etapa há segurança de funcionamento para os equipamentos envolvidos.

Um momento conveniente é que esse ensaio seja realizado após o ensaio de rendimento do gerador. Tipicamente o ensaio de rendimento é programado para ser realizado meses após os ensaios de sincronismo, quando há meses já teve início a operação do gerador. Programar para que o ensaio de rejeição de carga seja realizado logo após ensaio de rendimento garante que a máquina está em condições plenas para o teste e otimiza os custos relacionados com mobilização de pessoal e equipamentos. Diferentemente do caso das unidades sob reparos, nesse caso não é possível melhorar o prazo atribuído à ligação da fonte de energia independente ao

sistema de excitação. Dessa forma, a recomendação de ensaio para máquinas novas necessita de um prazo maior já que se faz necessário religar o circuito de alimentação independente.

Figura 8.2 – Ensaio de rejeição de carga para unidade nova.

Fonte: Elaboração do autor

A Figura 8.2 apresenta onde o ensaio de rejeição de carga pode ser encaixado na sequência de ensaios. A título de planejamento das atividades em campo e estimativa de custo do ensaio, é conveniente prever a duração mínima de doze horas para a realização deste. Isso compreende o tempo para fazer os preparativos que antecedem o ensaio, realizá-lo, retirar os instrumentos e refazer as ligações adequadas para a unidade voltar à operação comercial.

iii. Sistema elétrico da usina hidrelétrica

A aplicação do ensaio de rejeição de carga para caracterização de hidrogeradores, como apresentado aqui, requer alguns aspectos referentes ao sistema elétrico da usina. Uma configuração genérica para o sistema elétrico de usina será utilizada para exemplificar essas necessidades do ensaio de rejeição de carga.

Figura 8.3 – Diagrama unifilar de um sistema elétrico genérico de uma usina hidrelétrica.

Fonte: . Legenda: G1 – Hidrogerador unidade 1, trifásico; G2 – Hidrogerador unidade 2, trifásico; TR1 – Transformador elevador trifásico da unidade 1; TR2 – Transformador elevador trifásico da unidade 2; CB1 – Disjuntor da unidade 1; CB2 – Disjuntor da unidade 2; CB – Disjuntor.

O diagrama unifilar genérico da Figura 8.3 apresenta duas unidades hidrogeradoras, cada uma com seu respectivo disjuntor, conectando-se em um barramento comum entre as unidades. O barramento comum tem tensão no nível de geração, ou seja, usualmente algum valor entre 6,9 kV a 22 kV. Esse barramento da usina alimenta os sistemas auxiliares da usina e conecta os geradores aos transformadores elevadores. Entre cada transformador e o barramento existe um disjuntor de proteção. O transformador elevador eleva a tensão de geração para o nível de transmissão, por exemplo, 230 kV. O valor da tensão de transmissão depende de cada usina e de cada sistema elétrico a que ela se encontra conectada.

O diagrama genérico também mostra o barramento da usina conectando as duas unidades hidrogeradoras. No entanto, há configurações de usinas em que as unidades não necessariamente se conectam pelo barramento da usina. Independentemente disso, o importante para que o ensaio de rejeição de carga aqui apresentado seja factível é que o sistema elétrico da usina permita alimentar as cargas auxiliares de ambas as unidades, mesmo em decorrência da rejeição de carga em uma das unidades geradoras.

Na figura, estão representados, dois disjuntores entre a unidade hidrogeradora e o barramento de transmissão. Porém, não necessariamente essa configuração será dessa forma para todas as usinas hidrelétricas. A posição e a quantidade de disjuntores dependem da filosofia de proteção adotada em cada caso. Independente disso, para que o ensaio da forma que é aqui apresentado seja factível, é necessário que na rejeição de carga o hidrogerador fique isolado, ou seja, que exista um disjuntor conectado aos terminais do gerador, como representado pelos disjuntores CB1 e CB2 no diagrama unifilar. Esses disjuntores são capazes de isolar os hidrogeradores do resto do sistema elétrico.

Se por acaso ocorrer uma rejeição de carga nos disjuntores CB ou no sistema de transmissão, e CB1 e CB2 continuarem fechados, os geradores não estarão isolados. Assim, a variação da tensão terminal destes, em decorrência da rejeição de carga, sofrerá influência da conexão entre eles, entre esses geradores e o primário dos transformadores e qualquer outra conexão que não tenha sido interrompida.

O ensaio de rejeição de carga não deve afetar o funcionamento das cargas elétricas dos sistemas auxiliares. Usualmente, os sistemas auxiliares da usina são alimentados pelas próprias unidades hidrogeradoras. Assim, o sistema elétrico da usina deve ser capaz de manter as cargas auxiliares, ou pelo menos parte delas, mesmo diante da rejeição de carga. Esse suprimento de energia deve ter origem pela unidade hidrogeradora que não rejeitou carga ou por alguma fonte independente de energia (moto geradores, sistema de baterias etc.).

Em especial, para o ensaio de rejeição de carga aqui proposto, é preciso que o sistema de excitação do hidrogerador que é ensaiado tenha uma fonte de energia independente do próprio gerador, pois dessa forma poderá cumprir a condição de manter a tensão de excitação constante ao longo do ensaio. Tendo em conta que, como representado no diagrama genérico, usualmente a usina hidrelétrica possui mais de uma unidade geradora, uma possibilidade comum é conectar a alimentação do sistema de excitação e de todas as outras cargas auxiliares na unidade que não será submetida à rejeição de carga. O diagrama unifilar genérico permite isso, pois possui um barramento comum entre os hidrogeradores.

Os disjuntores CB1 e CB2 representados no diagrama unifilar, devem ser capazes de abrir o circuito com carga. Eventualmente, podem ocorrer em algumas usinas que o disjuntor tenha sido dimensionado para desconectar o hidrogerador quando ele está sem carga; ou seja, é um disjuntor ou outro tipo de chave que serve para isolar o hidrogerador quando for necessário fazer, por exemplo, alguma manutenção. Para que o ensaio de rejeição de carga como apresentado aqui seja factível, o disjuntor conectado aos terminais da máquina deve ser capaz de abrir o circuito em carga.

iv. Sistema regulador de velocidade

De forma simplificada é possível descrever que o sistema regulador de velocidade (43) tem a função de controlar e estabilizar a velocidade de giro da unidade hidrogeradora, controlar a entrada de potência ativa proveniente do aproveitamento hidráulico, otimizar a partida e parada, e atuar com funções que restringem a operação dentro dos limites da máquina hidráulica. O sistema regulador de velocidade pode ser dividido nos equipamentos de acionamento e no equipamento de comando. Os equipamentos de acionamentos são constituídos por atuadores que restringem a passagem do fluxo de água modificando a posição das pás ou injetores. Os equipamentos de comando são sistemas lógicos que comandam os atuadores de acionamento.

É importante destacar três condições distintas de operação do sistema regulador de velocidade. Na primeira condição a unidade hidrogeradora está em rotação nominal, no entanto, desconectada do sistema elétrico, ou seja, quando não está provendo carga elétrica ao sistema. Nessa condição, o regulador controla a velocidade de giro na unidade hidrogeradora e não faz controle de potência já que a unidade está desconectada do sistema. Na segunda condição a unidade hidrogeradora está em rotação nominal provendo carga elétrica ao sistema. Quando a unidade hidrogeradora está fornecendo carga elétrica ao sistema, o regulador de velocidade atua no controle tanto da potência quanto da rotação de forma que a turbina hidráulica permaneça dentro da sua faixa operativa.

É importante destacar que na segunda condição de operação descrita, ou seja, quando a unidade hidrogeradora está em rotação nominal provendo carga elétrica ao sistema, aplicam-se limitantes na faixa operativa da turbina. As turbinas usuais aplicadas em usinas hidrelétricas são as turbinas Pelton, Francis, Kaplan e Propeler (43). Dependendo do tipo de turbina, há um valor de potência mínima definido pela faixa operativa. Esse valor mínimo é tipicamente superior a 25% da potência nominal da turbina.

A terceira condição pode ser definida como a transição entre as duas anteriores, quando a unidade hidrogeradora está sincronizada à rede, no entanto, está com uma potência ativa muito baixa, aguardando autorização para tomar carga. Nessa terceira condição, a potência disponibilizada pela turbina é suficiente para vencer as perdas mecânicas de giro da máquina mais as perdas elétricas correspondentes à condição de operação. Além disso, a potência ativa disponibilizada pela turbina deve assegurar que a unidade não irá operar como motor, ou seja, absorver potência ativa da rede. Essa terceira condição será aplicada para realizar o ensaio de rejeição de carga aqui proposto.

Para o ensaio de rejeição de carga aqui proposto, a potência ativa da turbina deve ser a mínima possível, ou seja, o ensaio de rejeição de carga será realizado na terceira condição. Nessa condição o limitador de potência mínima na faixa operativa da turbina não é aplicável. Nesse caso o limitador aplicável está relacionado com a condição de motorização do gerador.

O ensaio de rejeição de carga como apresentado neste estudo necessita que o fluxo magnético do gerador esteja alinhado com o eixo direto. As condições de carga que possibilitam isso são aquelas em que o hidrogerador opera com potência ativa nula (ou mínima) e com potência reativa. Assim, para realizar o ensaio proposto, é necessário que o sistema regulador de velocidade permita que o gerador esteja sincronizado à rede e esteja provendo o mínimo de potência ativa.

Operando no limite entre potência ativa mínima e nula com o hidrogerador sincronizado, pode ocorrer a situação da unidade hidrogeradora transitar da condição de gerador para motor, ou seja, ao invés de gerar potência ativa, absorver

potência ativa da rede elétrica. Caso isso ocorra dentro de certos limites de potência e tempo, não caracteriza um problema para o hidrogerador. O sistema de regulação de velocidade deve na sua lógica de controles limitar a operação do gerador como motor dentro de limites de tempo e potência de forma a permitir o ensaio e, concomitantemente, proteger a unidade hidrogeradora dessa condição eventual.

v. Sistema de excitação e regulação de tensão

De forma simplificada, o sistema de excitação e regulação de tensão (46) tem a função de controlar a tensão terminal do hidrogerador, controlar o fornecimento de potência reativa e atuar com algumas funções que estabelecem limites e garantem a operação dentro da faixa operativa do gerador. Ele pode ser dividido em um sistema de excitação e um sistema de regulação de tensão. O sistema de excitação é composto pelo equipamento de potência, que disponibiliza a alimentação elétrica para o enrolamento de campo da máquina elétrica. O sistema de regulação de tensão é o sistema de controle que recebe as informações do gerador (tensão e corrente) e controla a excitatriz para garantir as condições de operação definida, podendo controlar a tensão terminal do gerador ou a potência reativa, além de supervisionar os limites operacionais do gerador.

Para o ensaio de rejeição de carga, o sistema de excitação e regulação de tensão deverá manter a tensão de excitação constante durante todo o ensaio. Tendo em vista que, em decorrência da rejeição de carga, a tensão terminal do gerador irá variar, é necessário que o sistema seja alimentado por uma fonte independente de tensão, ou seja, não estará sendo realimentado pelo hidrogerador.

Em uma situação normal de operação, o sistema regulador de tensão tem a função de manter a tensão terminal na faixa de operação nominal. No ensaio de rejeição aqui proposto, é necessário desabilitar essa função de operação durante a rejeição de carga, pois assim a tensão terminal irá variar segundo a ação das reatâncias. Além disso, é recomendável verificar se há limitadores que poderiam atuar em decorrência do ensaio, especialmente por conta da queda de tensão que pode ser interpretada como uma função de proteção por subtensão.

vi. Sistema de proteção

O sistema de proteção tem a função de proteger o hidrogerador de condições de operações anormais e perigosas (39). O sistema de proteção monitora diversos parâmetros do hidrogerador e da usina hidrelétrica de forma a atuar na ocorrência de uma condição que pode causar algum dano. Para o ensaio de rejeição de carga aqui proposto, o hidrogerador é submetido a uma condição de operação fora do usual. Assim, o sistema de proteção pode equivocadamente interpretá-la como sendo danosa ao equipamento e inadvertidamente interromper o ensaio.

Em artigo da IEEE (39), estão listadas as proteções aplicáveis aos geradores síncronos e o propósito de funcionamento de cada uma. Tipicamente, o conjunto de proteções está coordenado segundo um estudo de seletividade. Segundo IEEE (39), as proteções podem ser divididas em proteções contra faltas, contra operação anormal e outras proteções especiais.

As proteções contra faltas são, por exemplo, proteções contra diversos tipos de curto-circuito que podem ocorrer. Essas proteções devem ser mantidas durante o ensaio. Para o ensaio de rejeição de carga aqui proposto, não há risco de atuação indevida dessas proteções. É importante ressaltar que o ensaio de rejeição de carga apresentado neste trabalho não submete o hidrogerador a nenhuma condição de risco de falta. No entanto, se durante o ensaio uma falta ocorrer em decorrência de fatores alheios, as proteções contra falta devem estar ativas. Pelo mesmo motivo, a proteção especial contra energização indevida deve ser mantida.

Entre as proteções, há as proteções de corrente. As proteções que envolvam o monitoramento de correntes (39), como corrente de sequência negativa, sobrecorrente etc., não serão uma preocupação e deverão ser mantidas ativas. Essas proteções não irão interromper o ensaio de rejeição de carga, pois durante o processo não há corrente terminal em decorrência da própria rejeição. Da mesma forma, não devem atuar de forma inadvertida as proteções de operação anormal relacionadas com variação de frequência (sobre e subfrequência) nem relacionadas com sobre-excitação. Pois o ensaio aqui proposto não impõe variação significativa da velocidade de rotação da unidade hidrogeradora, e também porque aqui o ensaio

é subexcitado, ou seja, a tensão de excitação estará durante todo o ensaio abaixo do valor nominal.

As proteções que necessitam análise são as relacionadas com a perda de excitação, subtensão terminal e proteção contra motorização. A proteção de perda de excitação atua quando o hidrogerador está sincronizado ao sistema e a tensão de excitação ultrapassa um limite inferior. Isso ocorre caso o sistema de excitação seja desconectado ou mesmo quando a tensão de excitação aplicada for menor que o limite mínimo. Segundo o IEEE (39), essa proteção tem a função de evitar danos ao gerador e ao sistema elétrico. Do ponto de vista do gerador síncrono, quando nessa condição, ele está fornecendo potência reativa capacitiva à rede. Se o fornecimento de potência reativa capacitiva exceder os valores especificados de projeto do gerador, haverá um sobreaquecimento majoritariamente por conta do aumento significativo das correntes de Foucault. Esse sobreaquecimento pode gerar danos e, por isso, a proteção deve atuar.

Para o sistema elétrico essa proteção é importante, pois o fornecimento excessivo de reativos capacitivos pode causar distúrbios de tensão e distúrbios no fluxo de potência no sistema elétrico. Para o ensaio de rejeição de carga proposto neste trabalho, o hidrogerador é posicionado em um ponto de carga que pode estar próximo aos limites da proteção de perda de excitação. Portanto, é importante verificar se a condição inicial de ensaio com a máquina subexcitada não atingirá o ponto de atuação da proteção. Caso necessário, pode ser adotado um ajuste provisório para a função apenas para poder realizar o ensaio.

O ensaio de rejeição de carga conforme proposto irá causar uma queda na tensão terminal, que será analisada para determinação das reatâncias. Essa queda na tensão terminal pode ser interpretada pelo sistema de proteção como uma condição de subtensão terminal, fazendo atuar indesejavelmente a respectiva proteção. A função dessa proteção é evitar que o gerador funcione fora da faixa operativa de tensão terminal. Operar o gerador em subtensão com potência nominal, por exemplo, significa que a corrente terminal está acima do nominal. No caso da rejeição de carga, a tensão nominal irá cair após desconectar o gerador da rede.

Assim, não haverá circulação de corrente e essa proteção precisará ser observada, para que não atue de forma inadequada durante o ensaio.

A motorização do conjunto gerador é um exemplo de operação anormal. A motorização ocorre quando a unidade geradora está sincronizada à rede e a fonte de torque mecânico não fornece potência ativa suficiente para girar o conjunto rotativo. Dessa forma, a unidade geradora irá absorver potência ativa da rede para suprir a demanda do conjunto girante, operando como motor. A motorização pode causar danos especialmente à turbina (39). A proteção contra motorização observa o fluxo de potência ativa para verificar se a unidade geradora está operando como gerador ou como motor, limitando a operação de motorização dentro de certos limites seguros (39).

Para o ensaio de rejeição de carga aqui proposto, o hidrogerador irá operar próximo ao limite mínimo de potência ativa, podendo eventualmente transitar para a condição de motorização. É importante que essa proteção fique ativa e que a unidade hidrogeradora esteja em um ponto de carga no qual as eventuais oscilações de carga não façam atuar essa proteção.

vii. Sistema elétrico de transmissão e condições de operação das unidades geradoras

Como discutido anteriormente, para o ensaio de rejeição de carga proposto neste trabalho, o hidrogerador fornecerá reativos capacitivos ao sistema elétrico. O fornecimento excessivo de potência reativa capacitiva pode desequilibrar o fluxo de potência no sistema e também causar distúrbios de tensão. O limite entre a quantidade aceitável de potência reativa capacitiva está relacionado com as características do sistema elétrico e quão significativa em termos de potência instalada é a unidade hidrogeradora em teste. Para tanto, uma recomendação é que na disponibilidade de mais de uma unidade hidrogeradora, estas atuem de forma complementar, sendo que uma unidade compensa o fornecimento de potência reativa capacitiva ao fornecer ao sistema elétrico uma quantidade maior de potência reativa indutiva.

viii. Procedimento de ensaio

Para a preparação do ensaio, estabeleça a alimentação do sistema de excitação por uma fonte de tensão independente do hidrogerador ensaiado. É necessário que o sistema de proteção esteja ajustado segundo discutido anteriormente para que não ocorra nenhuma atuação indevida durante o ensaio. O regulador de velocidade deve estar ajustado segundo discutido anteriormente para permitir a realização do ensaio.

A princípio, a unidade hidrogeradora deve ser partida e sincronizada à rede. Em seguida, o hidrogerador deve ser colocado no ponto de operação que alinha o fluxo magnético ao eixo direto em uma condição subexcitada. Esse ponto de operação ocorre para as condições de carga com potência reativa capacitiva proporcionalmente algumas vezes superior à potência ativa. A potência ativa deve ser mínima tanto para permitir que o fluxo magnético esteja alinhado com o eixo direto como para evitar aceleração da unidade hidrogeradora após a rejeição de carga. Os terminais do hidrogerador devem ser desconectados, caracterizando a rejeição de carga. O regulador de tensão deverá ser capaz de manter a tensão de excitação constante mesmo após a rejeição, conforme discutido anteriormente. O valor da tensão terminal irá variar em decorrência do ensaio e deve ser registrado por um osciloscópio.

9. Ensaio em bancada preliminar – Determinação da curva de magnetização em circuito aberto e em curto-circuito

Os ensaios em bancada foram realizados para determinar as curvas de magnetização em circuito aberto e em curto-circuito para a máquina síncrona de polos salientes disponível nas dependências da Escola Politécnica da USP. A máquina síncrona trifásica de polos salientes pode operar como gerador e motor e as suas características estão descritas no Anexo A. Adicionalmente, no Anexo B constam os instrumentos utilizados no ensaio. Os resultados destes ensaios serão utilizados para determinar a reatância síncrona de eixo direto e para verificar se o modelo em elementos finitos pode ser comparável à máquina de bancada.

Os ensaios para determinar as curvas de magnetização das máquinas elétricas foram realizados segundo as recomendações da norma internacional IEEE 115 (36). O procedimento de ensaio para levantar a curva de magnetização em circuito aberto da máquina síncrona requer que o equipamento esteja em rotação síncrona e com os terminais em aberto. No ensaio, são registradas a tensão terminal, a corrente de campo e a rotação do eixo. Os registros devem ser feitos em uma sequência crescente da tensão terminal. Neste ensaio, foram registrados ao todo dezenove níveis de tensão, sendo seis até 60% da tensão nominal, onze pontos entre 60% e 110% e dois pontos acima de 110% da tensão nominal.

Figura 9.1 – Esquema do ensaio para determinação da curva de magnetização em circuito aberto.

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 9.1 ilustra a montagem feita para o ensaio. Como resultado do ensaio, foi possível levantar a curva de magnetização da máquina síncrona (Gráfico 9.1).

Gráfico 9.1 – Curva de magnetização em circuito aberto da máquina síncrona.

Fonte: Elaboração do autor.

O procedimento de ensaio para levantar a curva de magnetização em curto-circuito da máquina síncrona requer que o equipamento esteja em rotação síncrona e com os terminais curto-circuitados. No ensaio, são registradas as correntes de armadura, a corrente de campo e a rotação do eixo. Os registros devem ser feitos em uma sequência decrescente da corrente de armadura. Neste ensaio, foram registradas dez condições de corrente de armadura entre 3% da até 112% corrente nominal. O ensaio não foi levado até ao extremo de 125% da corrente nominal, pois é conhecido e recomendado pela própria norma IEEE 115 (36) que o excesso de corrente pode representar um risco para o equipamento.

Figura 9.2 – Esquema do ensaio para determinação da curva de magnetização em curto-circuito.

Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 9.2 – Curva de magnetização em curto-circuito da máquina síncrona.

Fonte: Elaboração própria.

Para determinação gráfica de X_d não saturado, utilizamos as curvas de magnetização em curto circuito e em vazio. Adicionalmente, uma reta auxiliar chamada de linha de entreferro é traçada de maneira a estender a região linear da curva de magnetização em vazio.

Gráfico 9.3 – Curva de magnetização em curto-circuito da máquina síncrona

Fonte: Elaboração própria.

Nas intersecções entre a curva de magnetização em circuito aberto e a tensão nominal, é definida a corrente de excitação **IFO**. Entre a intersecção da linha do entreferro e a tensão nominal, é definida a corrente de excitação **IF'**. Entre a intersecção da curva de magnetização em curto-circuito e a corrente de armadura nominal, é definida a corrente de excitação **IFK**.

Segundo a norma IEEE 115 (36), a reatância síncrona de eixo direto não saturada pode ser então determinada por:

$$X_d = \frac{IFK}{IF'} = \frac{1,08}{0,76} = 1,42 \text{ pu} \quad (9.1)$$

Segundo a mesma norma, a relação de curto-circuito (**RCC**) pode ser determinada por:

$$RCC = \frac{IFO}{IFK} = \frac{1,00}{1,08} = 0,93 \text{ pu} \quad (9.2)$$

10. Aplicação do ensaio em bancada – Ensaio de rejeição de carga

O ensaio em bancada foi realizado para determinar experimentalmente as reatâncias não saturadas de eixo direto da máquina síncrona disponível nas dependências da Escola Politécnica da USP. A máquina síncrona trifásica de polos salientes, que pode operar como gerador e motor, tem suas características descritas no Anexo A. Adicionalmente, no Anexo B, constam os instrumentos utilizados no ensaio.

i. Esquema elétrico

O esquema elétrico da Figura 10.1 ilustra o ensaio.

Figura 10.1 – Esquema elétrico do ensaio.

Fonte: Produção própria

A máquina síncrona de polos salientes foi instrumentada como na Figura 10.1. As tensões e correntes de fase foram medidas por uso de multímetros digitais. A corrente de campo também foi monitorada por um multímetro. O enrolamento de campo foi alimentado por uma fonte de tensão contínua. A máquina síncrona foi então conectada à rede por uma chave trifásica que também tem a função de sincronoscópio. A tensão de fase foi registrada por um osciloscópio digital. Note que o osciloscópio digital não está conectado diretamente às fases. O osciloscópio digital utilizado não era capaz de suportar diretamente na ponta de prova a tensão de fase. Assim, foi utilizado um transformador, aqui chamado de TRAF.SINAL, para que fosse possível medir a tensão de fase da máquina síncrona.

ii. Procedimento de ensaio

Um motor de corrente contínua acionou mecanicamente a máquina síncrona. A máquina síncrona foi então excitada e sincronizada à rede. Após a sincronização, ela foi posicionada em um ponto de carga no qual absorveu potência reativa da rede e esteve próximo à geração nula de potência ativa. Esse ponto de carga impõe que o fluxo magnético flua praticamente todo pelo eixo direto. A chave trifásica foi então aberta e a máquina síncrona, desconectada da rede.

A Tabela 10.1 apresenta o ponto de operação da máquina síncrona antes da rejeição de carga.

Tabela 10.1 – Condições de operação antes da rejeição de carga.

	Valores antes da rejeição de carga
Tensão de linha eficaz (média das três fases)	222,67 V
Corrente de linha eficaz (média das três fases)	2,69 A
Corrente de linha (pu)	0,536 pu
Corrente de excitação	101 mA
Fator de potência & ângulo	FP= 0,067; 86,1° Capacitivo
Potência ativa trifásica	70 W
Potência reativa trifásica	1035 VAr
Potência aparente trifásica	1037 VA
Rotação	1797 rpm

Fonte: Produção própria

A tensão terminal apresentou um comportamento decrescente no tempo. Da análise da tensão terminal foram calculadas as reatâncias X_d , X'_d e X''_d .

Gráfico 10.1 – Resposta de tensão terminal após a rejeição de carga.

Fonte: Elaboração própria

O Gráfico 10.1 está em pu, sendo que o valor de base é a tensão de fase antes da rejeição. Note que a rejeição ocorre no tempo de 0,222 segundos.

iii. Filtro de harmônicos

A máquina síncrona estudada apresenta harmônicos no sinal de tensão. Estes distorcem o sinal e inviabilizam a análise matemática. Foi, então, adotado um procedimento matemático para filtrar os principais harmônicos de tensão.

Cabe mencionar que o transformador de sinal disponibiliza diferentes terminais em sua saída. Cada terminal corresponde a uma relação de transformação. Naturalmente, o transformador de sinal filtra alguns harmônicos. Essa filtragem do transformador não foi suficiente, sendo necessário adotar o método matemático citado anteriormente.

O método matemático é explicado em detalhes no Anexo C e será chamado aqui de Fourier com Média Móvel. Resumidamente, aplica a transformação de Fourier no sinal para decompô-lo em seus diversos harmônicos. Então, reconstitui o sinal apenas com a componente fundamental, ou seja, componente de frequência 60 Hz. Esse sinal reconstituído é então analisado. O filtro de harmônicos aplicado adiciona um atraso de um ciclo em relação ao sinal original. Esse atraso será considerado nas análises, sendo que os níveis de tensão estudados são os que ocorrem um ciclo após a ocorrência da rejeição registrada no sinal original.

iv. Determinação da envoltória da tensão

O sinal de tensão filtrado é constituído principalmente pelo sinal de tensão senoidal fundamental. A envoltória desse sinal de tensão é a curva que tangencia seus máximos locais. Para determinar essa envoltória, foi elaborado o procedimento descrito no Anexo D. O procedimento cria uma sequência de pontos composta pelos máximos locais do sinal de tensão.

Gráfico 10.2 – Comparação entre a curva envoltória e a tensão terminal.

Fonte: Elaboração própria.

v. Decomposição do sinal em funções exponenciais

O sinal de tensão terminal da máquina síncrona após a rejeição de carga pode ser decomposto em três parcelas. Uma parcela constante e outras duas que variam exponencialmente com o tempo. A primeira parcela, a constante, pode ser determinada quando a envoltória da tensão terminal da máquina síncrona estabiliza em um nível após a rejeição de carga. Esse nível de tensão está associado à reatância X_d .

Gráfico 10.3 – Componente permanente da envoltória de tensão.

Fonte: Produção própria.

A linha de tendência para a componente permanente, conforme apresentada acima, é descrita por:

$$Tensão(pu) = 0,51 \quad (10.1)$$

As outras duas parcelas que compõem a envoltória podem ser encontradas com o auxílio de um gráfico semilog. Ao subtrair da envoltória do sinal a parcela constante determinada anteriormente, o gráfico semilog apresenta a composição de duas retas de inclinações diferentes. Uma das retas decresce com intensidade na região imediatamente após a rejeição, a região subtransitória. A outra reta decresce entre a região subtransitória e a região em que o sinal se estabiliza permanentemente. Essa região intermediária é a região transitória.

Gráfico 10.4 – Componente transitória da envoltória de tensão.

Fonte: Elaboração própria.

Para isolar o comportamento transitório do subtransitório, uma linha de tendência é traçada de forma a representar o comportamento transitório.

Gráfico 10.5 – Linha de tendência da componente transitória.

Fonte: Elaboração própria.

A linha de tendência para a componente transitória, conforme apresentada acima, é descrita pela seguinte equação:

$$Tensão(pu) = 0,7989 \times e^{-3,187 \times t} \quad (10.2)$$

Sendo t o tempo em segundos.

Note que neste ensaio a rejeição de carga ocorre no tempo de 0,222 segundos, mas o ponto análise é de 0,238 segundos, ou seja, um ciclo após a rejeição de carga que ocorre no sinal original. Isso se faz necessário, pois o filtro de harmônico aplicado adiciona um atraso de um ciclo na curva envoltória.

A linha de tendência anterior representa o comportamento transitório. Subtraindo do sinal da envoltória tanto a parcela permanente quanto a parcela transitória, resta apenas a parcela subtransitória. Uma linha de tendência exponencial consegue representar o comportamento subtransitório do sinal.

Gráfico 10.6 – Envoltória de tensão decomposta em tendências transitórias e subtransitórias.

Fonte: Elaboração própria.

A linha de tendência para a componente subtransitória, conforme apresentada acima, é descrita pela seguinte equação:

$$Tensão(pu) = 92,473 \times e^{-33,16 \times t} \quad (10.3)$$

Sendo t o tempo em segundos.

Note que neste ensaio a rejeição de carga ocorre no tempo de 0,222 segundos, mas o ponto análise é de 0,238 segundos, ou seja, um ciclo após a rejeição de carga que ocorre no sinal original. Isso se faz necessário, pois o filtro de harmônico aplicado adiciona um atraso de um ciclo na curva envoltória.

As linhas de tendência, quando reagrupadas, resultam em um sinal de tensão praticamente idêntico à envoltória da tensão de ensaio. A pequena diferença é atribuída às aproximações das linhas de tendência.

Reagrupando as três equações de tensão, temos a equação válida para qualquer instante de tempo após a rejeição de carga, ou seja, após 0,238 segundos, ou seja, 0,222 segundos mais um ciclo.

$$\text{Tensão terminal (pu)} = 0,51 + 0,7989 \times e^{-3,187 \times t} + 92,473 \times e^{-33,16 \times t} \quad (10.4)$$

Comparando graficamente a envoltória medida e a calculada, temos a curva apresentada no Gráfico 10.7.

Gráfico 10.7 – Comparação entre envoltória de tensão medida e calculada.

Fonte: Elaboração própria.

vi. Cálculo das reatâncias

A determinação das reatâncias é possível graças ao método gráfico descrito por Melo (18) e reiterado pela norma IEEE 115 (36). Na análise anterior, a envoltória do sinal de tensão foi desacoplada nas tendências permanente, transitória e subtransitória. Ao prolongar individualmente essas tendências para o instante exato da rejeição de carga, é possível determinar a contribuição de cada tendência na queda da tensão terminal após a rejeição. Lembrando que o instante da rejeição de carga na curva de envoltória é de 0,238 segundos, ou seja, um ciclo após a rejeição de carga que ocorre no sinal original. Esse atraso de um ciclo em relação ao sinal original é adicionado pela aplicação do filtro de harmônico.

As reatâncias calculadas a seguir serão apresentadas em pu. A base para o cálculo da corrente de linha em pu é de 5,02 A, ou seja, a corrente nominal da máquina síncrona. Conforme apresentado anteriormente, a corrente de linha antes da rejeição de carga era de 0,536 pu.

Para a contribuição da parcela permanente, temos a curva representada no Gráfico 10.8.

Gráfico 10.8 – Determinação de "C".

Fonte: Produção própria.

Sendo a queda de tensão representada no Gráfico 10.8 descrita por:

$$C = 1 - 0,51 = 0,49 \text{ (pu)} \quad (10.5)$$

É possível calcular a reatância síncrona de eixo direto não saturada.

$$Xd = \frac{C}{I} \text{ (pu); sendo } I = 0,536 \text{ pu} \quad (10.6)$$

$$Xd = \frac{C}{I} = 0,91 \text{ pu} \quad (10.7)$$

Para a contribuição da parcela transitória, temos a curva apresentada no Gráfico 10.9.

Gráfico 10.9 – Determinação de "B".

Fonte: Produção própria.

Sendo a queda de tensão determinada graficamente:

$$B + (1 - C) = 1 - 0,37 \quad (10.8)$$

$$B + (1 - 0,49) = 0,63 \quad (10.9)$$

$$B + 0,51 = 0,63 \quad (10.10)$$

$$B = 0,12 \text{ (pu)} \quad (10.11)$$

É possível calcular a reatância transitória de eixo direto não saturada.

$$X'd = \frac{B}{I} (pu) \quad (10.12)$$

$$X'd = 0,22 (pu) \quad (10.13)$$

Para a contribuição da parcela subtransitória, temos a curva apresentada no Gráfico 10.10.

Gráfico 10.10 – Determinação de "A".

Fonte: Elaboração própria.

Sendo a queda de tensão determinada graficamente, é possível calcular:

$$A + (1 - B) = 1 - 0,04 = 0,96 \quad (10.14)$$

$$A + (1 - 0,12) = 0,96 \quad (10.15)$$

$$A + 0,88 = 0,96 \quad (10.16)$$

$$A = 0,08 (pu) \quad (10.17)$$

É possível calcular:

$$X''d = \frac{A}{I} (pu) \quad (10.18)$$

$$X''d = 0,15 (pu) \quad (10.19)$$

vii. Outros pontos de carga ensaiados

O ensaio de rejeição de carga foi realizado para o ponto de carga estudo anteriormente e para uma sequência de outros pontos. Os outros pontos de carga qual a máquina foi testada estão representados abaixo na Curva de Capacidade do gráfico 10.11.

A Curva de Capacidade é uma representação gráfica dos limites operativos de uma máquina elétrica. Segundo WALKER (48), nela estão representados os seguintes limites:

- a) Limite de aquecimento do enrolamento do estator;
- b) Limite de aquecimento do enrolamento do rotor;
- c) Limite de estabilidade teórica;
- d) Limite de estabilidade prático;
- e) Círculo de relutância;
- f) Limite de excitação mínima definida pelo círculo de relutância;

Adicionalmente na representação do gráfico 10.11, estão indicados diversos pontos de carga a partir dos quais foram conduzidas rejeições de carga, com destaque para o ponto de carga estudado nos itens anteriores. Adjacente aos pontos está indicado o valor da reatância síncrona de eixo direto calculada para cada situação. Por exemplo, para o caso anteriormente estudado em detalhes, está indicado o valor de 0,91, correspondente ao valor de X_d calculado nesse ensaio.

O gráfico 10.11 foi traçado considerando a reatância síncrona de eixo direto não saturada determinada pelo ensaio de magnetização do capítulo 9. A reatância síncrona de eixo de quadratura considerada foi estimada com base do modelo de elementos finitos aplicado nesse estudo, sendo o seu valor de 0,85 pu. O gráfico 10.11 foi traçado para a tensão do ensaio desse capítulo, ou seja, 0,97 pu.

Gráfico 10.11 – Curva de Capacidade do Gerador Síncrono testado em laboratório.

Fonte: Elaboração própria.

Note que os diversos pontos de carga ensaiados tem potência aparente predominantemente reativa capacitiva, ou seja, alinham a maior parte do fluxo magnético com o eixo direto e respeitam essa premissa necessária para aplicação do ensaio de rejeição de carga na determinação das características de eixo direto.

A sequência em que os ensaios foram realizados partiu dos pontos mais próximos da potência reativa nula em direção ao círculo de relutância. Repare que os últimos pontos ensaiados encontraram o círculo de relutância e a região de excitação mínima como limitante. Na mesma sequência, é possível destacar que o valor da reatância síncrona de eixo direto calculado aumentou progressivamente.

As máquinas síncronas pouco saturadas tem tipicamente sua faixa operativa reduzida pelo círculo que relutância. Ou seja, o círculo de relutância se afasta da origem do plano cartesiano a medida que o valor das reatâncias síncronas de eixo direto e de quadratura diminuem. No caso estudado, o círculo de relutância limitou a faixa operativa da máquina de forma que a máxima potência reativa proveniente da rede ficou limitada à aproximadamente 50% da potência aparente nominal. O círculo de relutância representa uma região de autoexcitação, ou seja, a máquina não irá responder à redução da tensão de excitação pois nesse limite ela está autoexcitada.

Assim, fica estabelecido um valor máximo para a quantidade de reativos absorvidas da rede.

No ensaio de rejeição de carga para determinação da reatância síncrona de eixo direto não saturada é importante que a rede elétrica magnetize o gerador ao fornecer suficientemente reativos que estabeleçam uma diferença suficiente entre a tensão terminal antes da rejeição e a tensão interna da máquina após a rejeição de carga. A sequência de pontos ensaiados ilustra bem essa condição. Ao observar o rótulo de cada ponto, onde estão indicadas as reatâncias síncronas de eixo direto calculadas, é possível notar a progressão no valor a medida que o ponto de carga ensaiado se afasta da origem do plano cartesiano, dando a entender que a condição de carga máxima não foi suficiente para a determinação da reatância síncrona de eixo direto não saturada.

As reatâncias de eixo direto transitória e subtransitória são analisadas de forma desacoplada da tensão interna do gerador síncrono, sendo assim, não são influenciadas por esse limitante.

11. Ensaio em bancada – Determinação de X''_d não saturado

O ensaio de tensão aplicada com o rotor na posição de eixo direto foi realizado em bancada com o propósito específico de determinar X''_d . Foi realizado segundo a IEC 60034-4 (8). Nesse teste, uma tensão alternada na frequência nominal do equipamento foi aplicada entre duas fases. O enrolamento de campo foi curto-circuitado. Então, o rotor foi lentamente movimentado até identificar as posições angulares em que a corrente no enrolamento de campo era máxima e mínima.

A tensão aplicada, a corrente de armadura e a potência no estator são registradas. A determinação da reatância subtransitória não saturada exige que o ensaio seja realizado com tensão abaixo de 70% da nominal, segundo definição da norma. Foram conduzidos ensaios em diversas tensões e nas três fases para verificar a validade dos resultados.

Figura 11.1 – Esquemático do ensaio.

Fonte: Elaboração própria.

Abaixo seguem as características dos enrolamentos de armadura e de campo.

Tabela 11.1 - Características medidas.

Características medidas	
Resistência fase	1,8 ohm
Resistência campo	0,223 ohm
Resistência base cálculo pu	26,45 ohm

Fonte: Produção própria.

Segundo IEC 60034-4 (8), a reatância subtransitória pode ser determinada:

$$X_d'' = \sqrt{Z_d''^2 - R_d''^2} \Omega \quad (11.1)$$

Onde:

$$Z_d'' = \frac{U}{2.I} \Omega \quad (11.2)$$

$$R_d'' = \frac{P}{2.I} \Omega \quad (11.3)$$

Sendo P , I e U a potência de entrada, a corrente de armadura e a tensão aplicada respectivamente.

Tabela 11.2 – Tensão aplicada entre as fases R-S.

Tensão aplicada entre as fases R-S			
Potência de Entrada (W)	251	385	560
Tensão aplicada (V)	36,5	44,9	54
Corrente de Armadura (A)	11,13	13,62	16,25
Corrente excitação (A)	0,24	0,29	0,34
Z_d'' (ohm)	1,64	1,65	1,66
R_d'' (ohm)	1,01	1,04	1,06
X_d'' (ohm)	1,29	1,28	1,28
X_d'' (pu)	0,05	0,05	0,05

Fonte: Produção própria.

Tabela 11.3 – Tensão aplicada entre as fases T-S.

Tensão aplicada entre as fases T-S			
Pot. Entrada (W)	280	384	564
Tensão armadura (V)	37,9	44,6	53,6
Corrente Armadura (A)	11,6	13,54	16,11
Corrente exc. Maior (A)	0,24	0,28	0,34
Z''_d (ohm)	1,63	1,65	1,66
R''_d (ohm)	1,04	1,05	1,09
X''_d (ohm)	1,26	1,27	1,26
X''_d (pu)	0,05	0,05	0,05

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 11.4 – Tensão aplicada entre as fases T-R.

Tensão aplicada entre as fases T-R			
Pot. Entrada (W)	91	109	164
Tensão armadura (V)	40,5	44,4	54,5
Corrente Armadura (A)	3,97	4,29	5,32
Corrente exc. Maior (A)	0,14	0,15	0,19
Z''_d (ohm)	5,10	5,17	5,12
R''_d (ohm)	2,89	2,96	2,90
X''_d (ohm)	4,21	4,24	4,22
X''_d (pu)	0,16	0,16	0,16

Fonte: Elaboração própria.

A diferença entre os valores encontrados para as diferentes combinações de fases pode ser decorrente de algum dano no enrolamento amortecedor. Uma inspeção visual não foi suficiente para identificar a integridade do enrolamento amortecedor em todos os polos. O acesso limitado ao interior da máquina também não permitiu fazer uma investigação desse aspecto.

O resultado desse ensaio apresentou seu maior valor para X''_d quando a tensão foi aplicada entre as fases T-R. Sendo assim, compreende-se que foi possível encontrar nesse caso o melhor alinhamento com o caminho de menor relutância correspondente ao eixo direto. Será assumido como o valor de X''_d não saturado o valor encontrado no ensaio entre as fases T-R.

12. Modelagem pelo método dos elementos finitos

A simulação em elementos finitos foi feita utilizando os softwares ANSYS Maxwell (35) e ANSYS Ansoft Simplorer (35). O ANSYS Maxwell é um software de simulação eletromagnética para análises 3D e 2D. Pode ser aplicado no projeto de diversos equipamentos eletromagnéticos, como geradores, motores, atuadores, transformadores e sensores. Pode ser aplicado na solução de problemas eletromagnéticos estáticos, no domínio da frequência, no domínio do tempo, entre outros.

O software ANSYS Maxwell é capaz de lidar com soluções eletromagnéticas de baixa frequência. Baixa frequência são os casos operando com frequências de 50 Hz e 60 Hz, por exemplo. Do ponto de vista do software, casos com frequência de poucos kHz também são consideradas de baixa frequência. No caso das antenas, na ordem de MHz, o software Maxwell não é aplicável.

O software ANSYS Maxwell é capaz de resolver problemas e fazer as análises eletromagnéticas em 2D e 3D. Também pode determinar os campos, as impedâncias, as forças, os torques, as perdas, a saturação etc.

O software ANSYS Ansoft Simplorer é um programa de simulação capaz de integrar no mesmo ambiente os sistemas elétricos e eletrônicos. Pode simular componentes individuais integrados em um sistema e está sendo utilizado neste trabalho para integrar o modelo eletromagnético das máquinas elétrica a um sistema elétrico que sofre a rejeição de carga.

i. Modelo aplicado

A simulação em elementos finitos está dividida em quatro etapas.

Primeira etapa: Modelagem geométrica da máquina elétrica

Nessa primeira etapa, a máquina elétrica original a ser simulada terá sua geometria reproduzida no ambiente do software Maxwell. Já se encontram instalados no

software componentes usuais, como barras e bobinas, anel magnético etc., sendo apenas necessário parametrizar sua geometria, como diâmetros e número de ranhuras.

Tendo em vista as capacidades do programa, será necessário modelar apenas uma das múltiplas seções simétricas que compõe a máquina elétrica. Com apenas uma seção simétrica, o software é capaz de simular o comportamento da máquina completa.

Segunda etapa: Configuração dos materiais utilizados, seleção das suas propriedades.

O software Maxwell já possui instalada uma biblioteca de materiais, como fios de cobre e materiais ferromagnéticos. Essas características facilitam o modelamento especialmente quanto aos materiais do circuito magnético, que possuem curva de magnetização não linear dependendo de sua especificação.

Para a geometria da máquina elétrica determinada na etapa anterior serão associadas as propriedades dos materiais, de forma que o modelo represente a máquina original.

Terceira etapa: Configuração das condições de ensaio

Tendo em vista que a máquina modelada corresponde com certo nível de fidelidade ao projeto original, as condições de ensaio serão configuradas. Para tanto, será utilizado o programa ANSYS Ansoft Simplorer. A máquina elétrica será integrada a um sistema elétrico. Nesse sistema, a máquina será colocada em determinada condição de operação e, em seguida, sofrerá uma rejeição de carga.

Quarta etapa: Pós-processamento

Os dados obtidos nos ensaios são tratados utilizando rotinas desenvolvidas em MatLab e em Microsoft Excel. As reatâncias procuradas são calculadas nessa etapa de pós-processamento.

ii. Modelagem geométrica da máquina elétrica

Para modelagem geométrica da máquina elétrica, foi utilizado o modelo paramétrico Rotational Machine Expert (RMxprt). Esse modelo paramétrico é um software integrado ao Ansys Maxwell próprio para modelagem das máquinas de indução trifásicas e monofásica, máquina síncrona trifásica de polos salientes ou lisos, máquinas de corrente contínua, máquina de relutância chaveada, entre outras diversas.

O RMxprt foi parametrizado para reproduzir o modelo da máquina síncrona de polos salientes trifásica. O Anexo A apresenta todos os parâmetros que foram inseridos no modelo e os compara com o projeto da máquina testada na bancada do laboratório. O Anexo A também descreve as características da máquina original disponível no laboratório.

O modelo RMxprt foi parametrizado de forma a representar com o máximo de fidelidade a máquina disponível em laboratório. Os principais parâmetros construtivos foram disponibilizados pelo fabricante e aplicados no modelo. Esses parâmetros principais são determinantes para a performance do equipamento. No entanto, nem todos os parâmetros construtivos da máquina estão apresentados na documentação de projeto disponibilizada. Esses parâmetros desconhecidos têm pouco impacto no desempenho do equipamento, sendo assim foram estimados sem prejuízo ao resultado da simulação.

O modelo RMxprt não conseguiu reproduzir integralmente a geometria da máquina do laboratório. Os dois destaques são o formato da sapata polar e o entreferro entre a sapata polar e o corpo polar.

A máquina do laboratório possui uma sapata polar laminada que é encaixada no corpo polar em uma ranhura tipo rabo de andorinha, conforme o desenho a seguir (Figura 12.1).

Figura 12.1 – Detalhe da sapata polar da máquina do laboratório (sem escala).

Fonte: Dados disponibilizados pelo fabricante.

A sapata polar da máquina do laboratório possui um formato que não pode ser replicado no modelo RMxp_{rt}, por uma limitação do próprio modelo. Para que a fidelidade do modelo com relação à máquina real do laboratório não fosse prejudicada, foram feitas algumas considerações.

Figura 12.2 – Projeto da máquina do laboratório (sem escala).

Fonte: Dados disponibilizados pelo fabricante.

Figura 12.3 – Modelo RMxpirt (sem escala).

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 12.1 – Comparativo dimensões reais e modelo RMxpirt.

	Modelo Maxwell RMxpirt	Máquina do Laboratório
A	12 mm	12mm aproximadamente
A'	-	13,5 + - 0,1 mm
B	80.1 mm	81.4 + - 0,15 mm

Fonte: dados disponibilizados pela fabricante e produção própria.

A sapata polar adotada no projeto propicia a formação de um entreferro na região de encaixe entre a sapata e o corpo polar. O modelo RMxpirt não consegue incluir esse entreferro entre as duas regiões, pois considera a sapata e o corpo polar um conjunto único, composto pelo mesmo material. A forma adotada para que o modelo inclua esse entreferro foi considerar que o material do corpo polar possui uma curva de magnetização composta pelo material ferromagnético e pelo entreferro. O tópico a seguir apresenta mais detalhes sobre a escolha desse material.

iii. Configuração dos materiais utilizados, seleção das suas propriedades

A seleção do material do rotor foi feita com base na informação disponibilizada pelo fabricante do equipamento. No entanto, a aplicação direta do material não iria reproduzir exatamente a característica magnética do rotor. Entre a sapata do polo e o corpo polar há um entreferro devido à montagem entre as duas partes distintas. O material possui uma característica magnética que é a combinação do material aço-carbono utilizado na fabricação mais um entreferro de 0,05 mm.

Gráfico 12.1 – Comparativo entre aço-carbono e aço-carbono combinado com entreferro adicional.

Fonte: Produção própria e dados disponibilizados pelo fabricante.

O Gráfico 12.1 compara a curva de magnetização do material aço-carbono utilizado na construção do rotor com a curva do aço-carbono com um entreferro de 0,05 mm. O núcleo magnético do estator foi simulado utilizando a característica magnética disponibilizada pelo fabricante.

Gráfico 12.2 – Curva de magnetização do aço-silício.

Fonte: Dados disponibilizados pelo fabricante do equipamento.

O eixo é de material não magnético e, portanto, não participa do circuito magnético.

iv. Curva de magnetização da máquina síncrona

A máquina síncrona parametrizada no modelo RMxprt do Maxwell gerou uma curva de magnetização muito parecida com a da máquina original do laboratório. O Gráfico 12.3 compara as duas curvas.

Gráfico 12.3 – Curva de magnetização do gerador real comparado com o simulado em Maxwell.

Fonte: Elaboração própria.

As duas curvas apresentam um comportamento muito semelhante na região que vai de $V/V_N = 0$ até $V/V_N = 1$. Na região onde a tensão terminal V/V_N é maior do que 1, as curvas apresentam comportamento bem distinto.

A região de interesse desse estudo compreende as tensões terminais V/V_N menores que 1, pois o estudo irá tratar a máquina operando em regiões subexcitadas. Sendo assim, foi assumido que as diferenças entre as curvas de magnetização que se apresentaram após a tensão $V/V_N=1$ não irão afetar a validade do ensaio em elementos finitos comparativamente ao ensaio em laboratório.

v. Configuração das condições de ensaio

O modelo em elementos finitos mostrou-se geometricamente similar ao projeto da máquina do laboratório. Ao mesmo tempo, o mesmo modelo mostrou-se similar também do ponto de vista magnético, quando comparamos as curvas de magnetização.

O próximo passo foi submeter a máquina elétrica ao ensaio de rejeição de carga. A simulação do ensaio de rejeição de carga necessita fazer o uso combinado do programa Maxwell e do Simplorer. O circuito apresentado na Figura 12.4 foi preparado no programa Simplorer.

Figura 12.4 – Circuito elétrico simulado em Simplorer.

Fonte: Produção própria utilizando o programa Simplorer.

Tabela 12.2 – Descrição dos componentes do circuito simulado em Simplorer.

Elemento	Descrição
RMxpvt	Máquina síncrona de polos salientes simulada no programa Maxwell
ec1, ec2, ec3	Fontes de tensão. A tensão de saída das fontes depende de um sinal digital de entrada, fornecido por sine1, sine2 e sine3
sine1, sine2, sine3	Sinais senoidais defasados em 120° entre si, de valor eficaz de $230/\sqrt{3}$
AM1, AM2, AM3, AM4	Amperímetros
E1	Fonte de tensão contínua que alimenta o circuito de campo da máquina síncrona
R8, R9, R10	Resistores que têm função de chave. A resistência elétrica deles varia de 0 ohm à 1 Mohm por comando do pulse1
pulse1	Sinal de pulso de período dez segundo, cuja amplitude varia de -1 a 1 instantaneamente
TR_Probe1	Função matemática para cálculo de valor eficaz. Está associada aos amperímetros AM2, AM3 e AM4 para cálculo da corrente eficaz antes da rejeição
VM1, VM2	Voltímetros
v_rot1	Fonte de velocidade angular. Está acionando o eixo da máquina síncrona colocando ela em rotação síncrona durante toda a simulação
VM_ROT1	Medição de rotação
Terra específico para VM_ROT1

Fonte: Elaboração própria.

O circuito elétrico anterior apresenta a máquina síncrona conectada a um sistema elétrico. A máquina elétrica está subexcitada durante todo o ensaio, sendo que o sistema fornece reativos a ela. Após um período inicial, a máquina é instantaneamente desconectada do sistema por meio dos resistores que passam da condição de condutores perfeitos (resistência zero) para uma resistência 1 Mohm. A máquina continua durante todo o ensaio sendo excitada pelo mesmo valor de tensão de excitação. Após a rejeição de carga a tensão terminal decresce.

Tabela 12.3 – Parâmetros dos elementos ativos do circuito elétrico simulado.

Elemento	Valor
ec1, ec2, ec3	Tensão senoidal com valor eficaz de $230/\sqrt{3}$, defasadas em 120° entre si
E1	23 Vcc
R8, R9, R10	Variam de 0 ohm a 1 Mohm instantaneamente para simular a rejeição de carga
v_rot1	1800 rpm durante toda a simulação

Fonte: Elaboração própria.

A simulação em Simplerer foi realizada de forma que a rejeição de carga acontecesse no tempo de 5 segundos. Para facilitar a comparação entre os ensaios em laboratório e a simulação, a curva foi trasladada no tempo, de forma que a rejeição graficamente fique representada próxima ao ocorrido no ensaio em bancada. Em laboratório a rejeição ocorreu em 0,222 segundos. Na simulação em elementos finitos ocorre em 0,214 segundos. A tensão terminal, após a rejeição de carga, tem o comportamento descrito no Gráfico 12.4.

Gráfico 12.4 – Tensão terminal em decorrência da rejeição de carga.

Fonte: Elaboração própria.

vi. Pós-processamento

A exemplo do que foi realizado no ensaio em laboratório, a seguir será apresentada a análise da forma de onda de saída.

A envoltória da tensão é determinada pela curva descrita no Gráfico 12.5. Para determinação da envoltória da tensão foi utilizado o mesmo filtro de harmônicos aplicado na análise dos ensaios de laboratório. O filtro de harmônicos tem a característica de adicionar um atraso à curva envoltória em relação ao sinal original. Assim, as análises da envoltória irão considerar tempo de 0,230 segundos, ou seja, um ciclo após a rejeição de carga.

Gráfico 12.5 – Tensão terminal em decorrência da rejeição de carga e respectiva envoltória.

Fonte: Elaboração própria.

Segue a parcela constante do sinal de tensão terminal da máquina síncrona após a rejeição de carga (Gráfico 12.6).

Gráfico 12.6 – Envoltória da tensão terminal e componente permanente.

Fonte: Elaboração própria.

A linha de tendência para a componente permanente, conforme apresentada acima, é descrita pela seguinte equação:

$$\text{Tensão(pu)} = 0,47 \quad (12.1)$$

Ao subtrair da envoltória do sinal a parcela constante determinada anteriormente, o gráfico semilog apresenta a composição de duas retas de inclinações diferentes, como mostrado no Gráfico 12.7.

Gráfico 12.7 – Envoltória da tensão terminal e componentes transitórias.

Fonte: Produção própria.

Para isolar o comportamento transitório do subtransitório, uma linha de tendência é traçada de forma a representar o comportamento transitório (Gráfico 12.8).

Gráfico 12.8 – Envoltória da tensão terminal e linha de tendência transitória.

Fonte: Produção própria.

A linha de tendência para a componente transitória, conforme apresentada acima, é descrita pela seguinte equação:

$$Tensão(pu) = 0,629 \times e^{-1,89 \times t} \quad (12.2)$$

Sendo t o tempo em segundos. Note que a análise foi adequada para o tempo da rejeição de carga ocorrendo em 0,230 segundos, ou seja, um ciclo de atraso em relação à rejeição ocorrida no sinal original em 0,214 segundos devido à aplicação do filtro de harmônicos.

A linha de tendência anterior representa o comportamento transitório. Subtraindo do sinal da envoltória tanto a parcela permanente quanto a parcela transitória, resta apenas a parcela subtransitória. Uma linha de tendência exponencial consegue representar o comportamento subtransitório do sinal (Gráfico 12.9).

Gráfico 12.9 – Envoltória da tensão terminal, componente transitórias e tendência subtransitória

Fonte: Elaboração própria.

A linha de tendência para a componente subtransitória, conforme apresentada acima, é descrita pela seguinte equação:

$$\textit{Tensão}(pu) = 115,6 \times e^{-34,63 \times t} \quad (12.3)$$

Sendo t o tempo em segundos. Note que nesse ensaio a rejeição de carga ocorre no instante 0,230 segundos, ou seja, considera o atraso provocado pelo filtro de harmônicos no valor de um ciclo em relação ao sinal original, qual a rejeição ocorre em 0,216 segundos.

As linhas de tendência quando reagrupadas resultam em um sinal de tensão praticamente idêntico à envoltória da tensão de ensaio. A pequena diferença é atribuída às aproximações das linhas de tendência.

Reagrupando as três equações de tensão, temos a equação válida para qualquer instante de tempo após a rejeição de carga, ou seja, após 0,230 segundos.

$$\textit{Tensão terminal}(pu) = 0,47 + 0,629 \times e^{-1,89 \times t} + 115,6 \times e^{-34,63 \times t} \quad (12.4)$$

Comparando graficamente a envoltória medida e a calculada, obtemos a curva apresentada no Gráfico 12.10.

Gráfico 12.10 – Comparação entre a envoltória da tensão terminal medida e calculada.

Fonte: Elaboração própria.

vii. Resultados

A Tabela 12.4 apresenta o ponto de operação da máquina síncrona antes da rejeição de carga.

Tabela 12.4 – Condição de operação da máquina síncrona antes da rejeição de carga

	Valores antes da rejeição de carga
Tensão de linha eficaz (média das três fases)	230
Corrente de linha eficaz (média das três fases)	2,91 A
Corrente de linha (pu)	0,579 pu
Corrente de excitação	107,1 mA
Fator de potência & ângulo	FP= 0; 90° Capacitivo
Potência ativa trifásica	0 W
Potência reativa trifásica	1159 VAr
Potência aparente trifásica	1159 VA
Rotação	1800 rpm

Fonte: Elaboração própria.

As reatâncias podem ser determinadas utilizando a mesma metodologia empregada no ensaio em laboratório.

$$C = 1 - 0,47 = 0,53 \text{ (pu)} \quad (12.5)$$

É possível calcular:

$$Xd = \frac{C}{I} \text{ (pu); sendo } I = 0,579 \text{ pu} \quad (12.5)$$

$$Xd = \frac{C}{I} = 0,92 \text{ pu} \quad (12.6)$$

Para a contribuição transitória:

$$B + (1 - C) = 1 - 0,41 \quad (12.7)$$

$$B + (1 - 0,53) = 0,59 \quad (12.8)$$

$$B + 0,47 = 0,59 \quad (12.9)$$

$$B = 0,12 \text{ (pu)} \quad (12.10)$$

É possível calcular:

$$X'd = \frac{B}{I} \text{ (pu)} \quad (12.11)$$

$$X'd = 0,21 \text{ (pu)} \quad (12.12)$$

Para a contribuição da parcela subtransitória, temos:

$$A + (1 - B) = 1 - 0,04 = 0,96 \quad (12.13)$$

$$A + (1 - 0,12) = 0,96 \quad (12.14)$$

$$A + 0,88 = 0,96 \quad (12.15)$$

$$A = 0,08 \text{ (pu)} \quad (12.16)$$

É possível calcular:

$$X''d = \frac{A}{I} \text{ (pu)} \quad (12.17)$$

$$X''d = 0,14 \text{ (pu)} \quad (12.18)$$

13. Comparativo de resultados

Nos ensaios e simulações realizados foi possível obter resultados próximos.

Seguem na tabela 13.1 os dados coletados e um comparativo dos resultados obtidos.

Tabela 13.1 – Comparação dos resultados e variação percentual em relação os ensaios.

	X_d (pu); (desvio)	X'_d (pu); (desvio)	X''_d (pu); (desvio)
Ensaio das curvas de magnetização	1,42 pu; (base)	-	-
Ensaio Rejeição de carga em laboratório	0,91 pu; (-36%)	0,22 pu; (base)	0,15 pu; (-6%)
Simulação Maxwell/Simplorer	0,92 pu; (-35%)	0,21 pu; (-5%)	0,14 pu; (-13%)
Ensaio de tensão aplicada segundo IEC60034-4 (fases T-R)	-	-	0,16 pu; (base)

Fonte: Elaboração própria.

O ensaio das curvas de magnetização determinou um valor de X_d muito diferente do valor determinado pelos ensaios de rejeição de carga. Conforme discutido no capítulo 10, o ensaio de rejeição de carga encontrou um limitante. Não foi possível posicionar um ponto de carga adequado para a determinação de X_d já que a característica da máquina síncrona estudada limitou a tomada de carga reativa da rede à aproximadamente 50% da potência aparente nominal do gerador. Essa limitação foi estabelecida por uma região de auto-excitação delimitada pelo círculo de relutância, conforme a curva de magnetização do gráfico 10.11. Já as reatâncias de eixo direto transitória e subtransitória não foram influenciadas por esse limitante já que são analisadas de forma desacoplada da tensão interna do gerador síncrono.

O ensaio de rejeição de carga realizado em bancada e o mesmo ensaio simulado em Maxwell/Simplorer apresentaram resultados muito próximos para todas as reatâncias, inclusive para X_d .

O ensaio de tensão aplicada segundo IEC60034-4 (8) para medição de X''_d apresentou diferenças entre as fases ensaiadas. Conforme discutido no capítulo 11,

não foi possível verificar se há danos no enrolamento amortecer pois o acesso a ele é limitado e uma inspeção visual não foi suficiente para verificar problemas. Dentre os resultados obtidos, o ensaio entre as fases T-R apresentou o maior valor para a reatância X''_d . Por se tratar de um ensaio para determinação do valor não saturado, apenas o ensaio entre as fases T-R está sendo considerado nas análises. Comparativamente com outros métodos, o ensaio de tensão aplicada segundo IEC60034-4 (8) para medição de X''_d apresentou um resultado com desvio. Segundo o resultado dos ensaios e simulação, a reatância X''_d do caso estudado tem um valor em por unidade na ordem de quinze décimos. Por conta da magnitude dessa reatância, a variação de um centésimo representa um desvio de aproximadamente 13%. Como referência é possível citar a norma IEEE C50-12 (44) que estabelece alguns percentuais de variação entre valores medidos em campo e os valores garantidos na fase de contratação do fornecimento de geradores ou motores síncronos. A norma cita o teto para uma variação máxima da reatância subtransitório de 30%.

No trabalho de De Souza (47), a mesma máquina síncrona foi ensaiada utilizando cinco outros métodos, são eles: o método de resposta em frequência; curva de magnetização, ensaio de curto-circuito trifásico abrupto e ensaio estático com e sem enrolamento amortecedor. Pela aplicação desses cinco métodos, De Souza (47) encontrou alguns valores de reatâncias que estão organizados na tabela 13.2 em valores máximos e mínimos. Os resultados entre os ensaios de De Souza (47) e os resultados do presente trabalho estão comparados na tabela 13.2. O desvio percentual entre os resultados considera o valor médio de cada reatância, calculado por uma média simples entre o máximo e o mínimo encontrado em cada trabalho.

Tabela 13.2 – Comparação dos resultados e variação percentual com relação ao De Souza (47).

	X_d Mínimo - Máximo (pu)	X'_d Mínimo - Máximo (pu)	X''_d Mínimo - Máximo (pu)
De Souza (47)	1,22 - 1,33	0,22 - 0,23	0,17 - 0,19
Presente trabalho	1,42	0,21 - 0,22	0,14 - 0,16
Variação Percentual entre valores médios	+10%	- 5%	- 20%

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados encontrados são comparativamente próximos. Os desvios em relação às reatâncias não saturadas X_d , X'_d e X''_d são respectivamente +10%, -5% e -20%. O desvio com relação à reatância subtransitória de eixo direto foi o que apresentou maior desvio. Com relação a essa reatância, o ensaio de rejeição de carga tem particularmente a dificuldade de contar com poucos pontos de amostragem. Como apresentado anteriormente, após a rejeição de carga há o decréscimo rápido da tensão terminal. No período que compreende a contribuição subtransitória, há um número limitado de pontos para realizar a análise, o que pode contribuir com um desvio maior entre outros métodos. Outra particularidade do método aplicado foi a utilização de filtros ativos de média móvel. Da forma que foi aplicado, o filtro adiciona um atraso de um ciclo na curva envoltória em relação ao sinal original, o que não se mostrou ser um problema para a análise, já que a análise pode ser deslocada facilmente e compensar esse atraso.

Apesar dessas dificuldades, o ensaio de rejeição de carga foi capaz de determinar um valor próximo ao verificado pelo ensaio de tensão aplicada segundo IEC60034-4 (8), conforme apresentado na tabela 13.1. Por outro lado, o trabalho de De Souza (47) faz uso de um algoritmo qual o valor de X_d precisa ser inserido como uma condição de contorno para determinação das outras reatâncias. Tendo em vista que os trabalhos partiram de um valor de X_d diferente, parte das diferenças pode ter origem nessa condição de contorno.

14. Conclusões

O presente trabalho investigou a aplicação do ensaio de rejeição de carga na determinação de um grupo de características das máquinas elétricas síncronas. O estudo particularizou o uso do ensaio para grandes hidrogeradores, tendo em vista as vantagens desse ensaio em relação a outros métodos. Infelizmente, questões alheias a esse trabalho impossibilitaram aplicar o método proposto a uma usina hidrelétrica antes do prazo máximo de conclusão do curso de mestrado. Alternativamente, o desenvolvimento prático e experimental do trabalho foi feito em laboratório, em um equipamento de bancada que reserva uma série de similaridades com um hidrogerador no contexto eletromagnético. Não obstante, foram aplicadas as inovações para análise dos resultados originalmente concebidas para os hidrogeradores. São elas a análise da forma de onda de tensão pela envoltória do sinal de tensão de pico e a aplicação do método de Fourier por médias móveis para filtrar os harmônicos de tensão indesejáveis.

O início do trabalho dedicou-se à definição das máquinas elétricas e seus respectivos componentes. Assim, foi possível particularizar o desenvolvimento teórico do estudo ao gerador tipicamente aplicado a geração de energia hidrelétrica. Além disso, foram discutidos os aspectos práticos para viabilizar o ensaio de rejeição de carga, tendo em conta os diversos sistemas que fazem interface com hidrogerador e os cuidados que necessitam ser tomados.

O ensaio foi realizado tanto em bancada quanto em simulação por elementos finitos. Adicionalmente, foram realizados ensaios para determinar a curva de magnetização e o ensaio de tensão aplicada para determinação da reatância subtransitória de eixo direto não saturada (X''_d).

Comparativamente, os resultados relacionados à reatância síncrona de eixo direto (X_d) apresentaram uma grande variação entre o valor determinado na curva de magnetização e os valores determinados pelos ensaios de rejeição de carga. Foi possível identificar que a máquina síncrona possui uma faixa operativa reduzida por conta da autoexcitação do círculo de relutância representado na curva de capacidade do gráfico 10.11. Assim, a potência reativa capacitiva da máquina

síncrona ficou limitada à aproximadamente 50% da potência aparente do equipamento. Sendo assim, não foi possível provocar a partir do ensaio uma variação suficiente entre a tensão terminal da máquina antes e depois da rejeição. Tendo em vista que a determinação por rejeição de carga da reatância síncrona de eixo direto não saturada depende dessa variação, a mesma ficou prejudicada. Esse ocorrido foi de certa forma conveniente para ao presente estudo que propõe a aplicação do ensaio de rejeição de carga em grandes hidrogeradores, uma vez que um hidrogerador pode se deparar com uma limitação similar. Uma diferença importante a ser destacada entre a máquina ensaiada em laboratório e um hidrogerador típico de médio e grande porte é que o hidrogerador usualmente é mais saturado. Sendo assim, o limitante de autoexcitação do círculo de relutância provoca uma redução menor na região operativa de uma usina real. Por outro lado, muito provável que outra razão impeça o hidrogerador de assumir cargas reativas capacitivas muito elevadas, já que o próprio sistema elétrico qual a máquina está conectada pode não ser capaz de suprir tal demanda. Tendo em vista que essa limitação tem a princípio impacto apenas sobre a determinação de X_d , isso pode ser facilmente contornado pelo ensaio das curvas de magnetização, que é sem dúvida o método mais aplicado para determinação de X_d .

Comparando o presente trabalho com outros métodos de ensaio realizados por De Souza (47) na mesma máquina síncrona, foi possível observar uma variação de 10% em relação à reatância síncrona de eixo direto não saturada. O desvio encontrado nas outras reatâncias pode em parte estar relacionado com essa variação, já que o método inovador de De Souza (47) adota como premissa um valor de reatância síncrona de eixo direto não saturada para a determinação das outras reatâncias.

Com relação à reatância transitória de eixo direto não saturada (X'_d), a mesma apresentou resultados muito parecidos, tendo um desvio de 5% em relação ao trabalho de De Souza (47).

Já a reatância subtransitória de eixo direto não saturada (X''_d) apresentou um desvio de 20% em relação ao trabalho de De Souza (47). No entanto, vale destacar que, no que se refere a reatâncias subtransitórias de eixo direto, trata-se de um valor numericamente baixo. Isso significa que mesmo um desvio de 0,01 pu, que

representa a menor variação mensurável nesse estudo, esse menor desvio é equivalente a uma variação de 13% entre os resultados comparados.

Com relação a essa mesma reatância, um aspecto importante discutido foi a não saturação. O trabalho assumiu que o ensaio de rejeição de carga para o hidrogerador subexcitado é proporcional à medição das reatâncias não saturadas. Isso pode ser facilmente aceito no caso das reatâncias síncrona de eixo direto e a transitória, já que ambas são determinadas pela tendência originada de tensões terminais aproximadamente 30% menores que a nominal. No entanto, isso não pode ser afirmado para a reatância subtransitória de eixo direto, cuja tendência é originada de uma condição de tensão pouco menor que a tensão terminal nominal. Para essa reatância em específico, foi realizado o ensaio de tensão aplicada segundo IEC60034-4 (8), a título de comparação. Comparando com as rejeições de carga, a variação máxima foi de 13%.

Por meio deste trabalho foi possível verificar a relevância do teste de rejeição de carga como método de caracterização de geradores, em especial, aplicado no setor de geração hidrelétrica. De forma geral, o método proposto é capaz de prover uma forma mais segura de medição dos parâmetros da máquina elétrica. No entanto, não irão isentar os resultados de diversas fontes de erros, sendo necessário observar os resultados dentro de algumas tolerâncias.

O método, da forma como é apresentado aqui possui uma limitação importante já destacada anteriormente. A localização do disjuntor da máquina tem influência no método. Para a proposta de ensaio aqui apresentada, é importante que o disjuntor principal da máquina esteja localizado entre os terminais da máquina e o transformador elevador.

Outra limitação importante é o fato de que eventualmente não pode ser possível tomar a carga reativa capacitiva suficiente para a determinação de X_d , seja por conta de uma limitação do equipamento ou seja por uma limitação do próprio sistema elétrico qual a unidade está conectada.

O presente trabalho investigou a aplicação do ensaio de rejeição de carga como método para determinação das reatâncias de eixo direto não saturadas síncrona, transitória e subtransitória em geradores hidrelétricos. Em um contexto geral, o método de rejeição de carga apresenta-se como uma solução viável, segura e principalmente complementar ao método por curvas de magnetização. Isso se dá já que o ensaio de rejeição de carga contribuiu na determinação das reatâncias transitória e subtransitória, mas no que se refere à determinação da reatância síncrona, o ensaio de rejeição de carga não superou em termos de praticidade e confiabilidade o método por curvas de magnetização.

15. Bibliografia

1. IEEE. IEEE Std 115. *IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines*. New York : s.n., 1995.
2. IEEE std 1110. *IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses*. New York : s.n., 2002.
3. DANDENO, Paul L.; HAUTH, Ronald L. & SCHULZ, Richard P. Effects of Synchronous Machine Modeling in Large Scale Stability Studies. *IEEE Transactions on PAS*, vol. 92, pp. 574-582, 1973.
4. MATHWORKS. *MATLAB – The Language of Technical Computing*. Disponível em: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. Acessado em: 18 maio 2013.
5. ELETROBRAS CEPEL. *Descrição dos Programas*. Disponível em: <http://www.cepel.br/servicos/descprog.shtm>. Acessado em: 18 maio 2013.
6. POWERSIM. *Powering Your Design* | Powersim. Disponível em: <http://powersimtech.com/>. Acessado em: 18 maio 2013.
7. PARK, R. H. & ROBERTSON, B. L. *The Reactances of Synchronous Machines*. Transactions A.I.E.E. 1928.
8. IEC. *Methods for determining synchronous machine quantities from tests*. IEC std 60034-4. 1985.
9. NABETA, Silvio I. et al. *Determinação dos parâmetros de máquinas síncronas pela simulação por elementos finitos do ensaio de resposta em frequência*. Controle & Automação (Impresso), São Paulo: s.n., 1998, vol. 9, pp. 165-170.
10. ANSI/NEMA. *Motors and Generators Revision 1*. MG1. 2006.
11. KILGORE, L. A. Calculation of Synchronous Machine Constants - Reactances and Time Constants Affecting Transient Characteristics. *Transactions A.I.E.E.*, pp. 1201-1213, 1933.
12. WRIGHT, Sherwin H. Determination of Synchronous Machine Constants by Test. *Transactions A.I.E.E.*, pp. 1331-1350, 1931.
13. SHILDNECK, Lloyd P. Synchronous Machine Reactances A fundamental and physical viewpoint. *General Electric Review*, vol. 35, pp. 560-565, 1932.
14. PRENTICE, B. R. Fundamental concepts of Synchronous Machine Reactances. *Supplement to 1937 A.I.E.E. Transactions*, pp. 1-21, 1937.
15. RANKIN, A. W. Per-Unit Impedances of Synchronous Machines - II. *Transactions A.I.E.E.*, 1945.
16. CHING, Y. K. & ADKINS, B. Transient Theory of Synchronous Generators under unbalanced conditions. *Institution Monograph*, n. 85, pp. 166 -182, 1953.
17. ADKINS, B. *The General Theory of Alternating Current Machines: Application to Practical Problems*. London: Chapman and Hall, 1975.

18. MELLO, F. P. de & RIBEIRO, J. R. Deviation of synchronous machine parameters from tests. *IEEE Trans. on PAS*, vols. PAS-96, 1977.
19. SHACKSHAFT, G. & PORAY, A. T. Implementation of new approach to determination of synchronous-machines parameters from tests. *Proc.IEE*, vols. 124, n. 12, 1977.
20. EPRI. Determination of Synchronous Machine Stability Study Constants. *EPRI Report EL 1424*, vol. V3, 1980.
21. MELLO, F. P. & HANNETT, L. H. Validation of synchronous machine models and derivation of model parameters from tests. *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS 100, n. 2, pp. 662-672, 1981.
22. SUGIYAMA, T. et al. Measurements of synchronous machine parameters under operating condition. *IEEE Transactions on PAS*, vols. PAS-101, n. 4, pp. 895-904, 1982.
23. EPRI. Confirmation of test methods for synchronous machine dynamic performance models. *EPRI Report EL-5736*. 1988.
24. HIRAYAMA, Kaiichiro. Practical Detailed Model for Generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, n. 1, pp. 105-110, 1985.
25. SUNI, J. C. P.; RUPPERT, E. & FAJONI, F. C. Simulação dinâmica do ensaio de rejeição de carga para estudos de identificação de parâmetros elétricos de geradores síncronos. IV ENAM (Encontro Nacional de Máquinas Rotativas), Curitiba, 2010.
26. SUNI, J. C. P. & FILHO, E. R. On the Synchronous Generator Parameters Determination Using Dynamic Simulations Based on IEEE Standards. Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference. 2010.
27. BORTONI, E. D. C. & JARDINI, J. A. Synchronous Machines Parameters identification using load rejection test data. Electric Machines and Drives Conference Record IEEE International. 1997.
28. SIMONE, G. A. & CREPPE, R. C. Conversão eletromecânica de energia. São Paulo: Érica, 1999.
29. EPE (Empresa de Pesquisa Energética). *Balanço Energético Nacional - 2012*. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/> . Acessado em: 12 ago 2013 .
30. ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acessado em: 17 ago. 2014.
31. PARK, R. H. Definition of an Ideal Synchronous Machine and Formula for the Armature Flux Linkages. *General Electric Review*, 1928.
32. CONCORDIA, C. *Synchronous Machines Theory and Performance*. New York: John Wiley & Sons, 1951.
33. FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. Jr. & UMANS, S. U. Máquinas elétricas. São Paulo: Bookman Companhia Editora, 2006.
34. HALLIDAY, D.; RESNICK, R. & WALKER, J. Fundamentos de física 3: Eletromagnetismo. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

35. ANSYS. Brochura ANSYS Maxwell. Disponível em: <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-maxwell-brochure-14.0.pdf>. Acessado em: 25 abr. 2013.
36. IEEE. *IEEE Guide: Test Procedures for Synchronous Machines*. New York: IEEE Standards 115., 2009.
37. MELLO, F. P. de. *Dinâmica de máquinas elétricas-I*. Vol. 4. Editora Santa Maria, Rio Grande do Sul: Eletrobrás/UDSM, 1979.
38. IEEE COMMITTEE REPORT. Recommended Phasor Diagram for Synchronous Machines, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. Pas-88, n. 11, Novembro, 1969.
39. IEEE POWER System Relaying Committee, IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators. 2 ed. S.l.: s.n., 2011
40. DESTRO, R.; MATAKAS, L.; KOMATSU et al. Implementation aspects of adaptive window moving average filter applied to PLLs — Comparative study. *Power Electronics Conference (COBEP)*, pp.730-736, 27-31, oct. 2013.
41. AMA, N.; DESTRO, R.; KOMATSU et al. PLL performance under frequency fluctuation-compliance with standards for distributed generation connected to the grid. *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA)*, IEEE PES Conference On, pp. 1,6, 15-17, Abril. 2013.
42. AMA, N. R. N; KOMATSU, W.; KASSAB JUNIOR, F. et al. Adaptive single phase moving average filter PLLs: analysis, design, performance evaluation and comparison. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, R. 90 NR 5/2014.
43. NECHLEBA, Miroslav. *Hydraulic Turbines Their Design and Equipment*. Editora ARTIA Prague, República Checa, 1957.
44. IEEE. IEEE Std C50.12. IEEE Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above. New York: s.n., 2005.
45. MATAKAS, Lourenço Junior. "Pacote de Funções para análise de sinais usando o MATLAB - da disciplina PEA 5726, 2013
46. Cigré Brasil (Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica) - Guia para especificação de Sistemas de Excitação, s.l: s.n., Setembro de 1998
47. DE SOUZA, M., Determinação de parâmetros de máquinas síncronas pelo ensaio de resposta em frequência: proposta de metodologia com inversor de frequência, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
48. WALKER, J. H., Operating characteristics of salient-pole machines. *Proceedings of the IEE - Part II: Power Engineering* (Volume:100, Issue: 73) February 1953

ANEXO A – Características da máquina síncrona

DADOS GERAIS	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Tipo	Máquina síncrona trifásica de polos salientes	Máquina síncrona trifásica de polos salientes	-
Número de polos	4	4	-
Rotação nominal	1800	1800	rpm
Operação	Gerador/motor	Gerador/motor	-
Potência aparente nominal	2	2	kVA
Tensão nominal fase-fase	230	230	V
Fator de potência nominal	1	1	-
Conexão enrolamento estator	Dupla estrela (Y)	Dupla estrela (Y)	-

ESTATOR

NÚCLEO ESTATOR	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Diâmetro externo	240	240 +- 0,2	mm
Diâmetro interno	149,95	150 +- 0,2	mm
Comprimento núcleo	60	60 +-0,15	mm
Característica aço-silício	Vide gráfico A.1	Vide gráfico A.1	-
Número ranhuras	48	48	-
Seções do núcleo	Seção única	Seção única	-
Placa de pressão	Placa de pressão não magnética	Placa de pressão não magnética	mm

RANHURAS ESTATOR	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Tipo da ranhura	Veja figura A.1	Veja figura A.1	-
Hs0	0,6	0,6 +-0,05	mm
Hs2	12,5	12,5+-0,1	mm
Bs0	2,2	2.2 +-0,05	mm
Bs1	5,9	5,9+-0,05	mm
Bs2	8,1	8,1+-0,1	mm

Figura A.1 – Ranhura estator.

Fonte: Programa Maxwell.

ENROLAMENTO ESTATOR	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Número de camadas	2	2	-
Tipo de enrolamento	Bobinas 12 grupos (4 por fase) 4 bobinas por grupo 27 espiras por bobina	Bobinas 12 grupos (4 por fase) 4 bobinas por grupo 27 espiras por bobina	-
Circuitos paralelos	2	2	-
Condutores por ranhura	54	54	-
Passo de bobina	10	10	-
Fios por volta da bobina	1	1	-
Material fio	Cobre	Cobre	
Diâmetro seção de cobre	19AWG diâmetro = 0.912 mm	19AWG diâmetro = 0.912 mm	-

ROTOR

ROTOR	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Diâmetro externo	148.5	148.6 + - 0.2	mm
Diâmetro interno	47.85	48+-0,15	mm
Comprimento	60	60	mm
Material	Vide gráfico A.1	Vide gráfico A.1	-
Entreferro sapata-polo	Considerado na curva do material entreferro de 0,05 mm	Valor desconhecido	-
Fator de empilhamento	1 (rotor sólido)	1 (rotor sólido) exceto sapata polar	-

POLO	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Largura sapata polar	80.1*	81.4 + - 0,15*	mm
Altura sapata polar	12*	13.5 + - 0.1*	mm
Largura copo polar	38.1	38 + - 0,15	mm
Altura corpo polar	32.4	32.4 + - 0,15	Mm
Placa de pressão	Não contém	Não contém	-
Sapata	Sólida	Laminada	-
Desenho polo	*Vide figura 12.3	*Vide figuras 12.1 e 12.2	-

ENROLAMENTO POLAR	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Tipo de enrolamento	4 bobinas de campo em série 2000 espiras por bobina	4 bobinas de campo em série 2000 espiras por bobina	-
Circuitos Paralelos	1	1	-
Fios por volta da bobina	1	1	-
Material fio	Cobre	Cobre	-
Isolação fio	0,1	Desconhecido	mm
Diâmetro seção de cobre	25 AWG Diâmetro 0.483 mm	25 AWG Diâmetro 0.483 mm	-

ENROLAMENTO AMORTECEDOR	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Barras amortecedoras por polo	7	7	-
Passo de ranhura	7.2	7.2 (valor médio)	Graus
Material barra amortece	Cobre	Cobre	-
Conexão	Todas as barras e polos conectados	Todas as barras e polos conectados	-

RANHURA BARRAS AMORTEC.	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Hs0	0.1	0.1*	Mm
Hs01	0	0*	Mm
Hs2	0	0*	Mm
Bs0	1.6	1.6*	Mm
Bs1	3.71	5x4mm + 2x3mm => MÉDIO 7x3.71	mm
Bs2	3.71	5x4mm + 2x3mm => MÉDIO 7x3.71	mm

* estimado com base no desenho

Figura A.2 – Ilustração ranhura do enrolamento amortecedor.

Fonte: Programa Maxwell.

Valores assumidos para o modelo de elementos finitos

DADOS GERAIS	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Temperatura de operação	75	Desconhecido	°C

NÚCLEO ESTATOR	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Fator de empilhamento	0.99	Desconhecido	-

ENROLAMENTO ESTATOR	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Isolação fio	0.1	Desconhecido	mm

ISOLAÇÃO	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Extensão parte reta bobina	27	Desconhecido	mm
Raio interno base	2	Desconhecido	mm
Diâmetro interno "TIP"	2	Desconhecido	mm
Abertura final	0.2	Desconhecido	mm
Isolação ranhura	0.3	Desconhecido	mm
Espessura cunha	2	Desconhecido	mm
Camada de Isolação	1	Desconhecido	mm
Fator de preenchimento limite	0.9	Desconhecido	mm

ISOLAÇÃO POLAR	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Isolação sapata-bobina polar	1	Desconhecido	mm
Isolação corpo-bobina polar	1	Desconhecido	mm
Vão enrolamento	1	Desconhecido	mm

ENROLAMENTO POLAR	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Vão axial	1	Desconhecido	mm
Comprimento limite cruzado	6	Desconhecido	mm
Altura limite cruzada	6	Desconhecido	mm
Filamento enrolamento	0	Desconhecido	mm

EIXO	Modelo elementos finitos	Máquina laboratório (dados projeto)	Unid.
Material eixo	não magnético	não magnético	-

Gráfico A.1 – Curvas de Magnetização dos materiais aplicados.

Fonte: Elaboração própria e dados do fabricante do equipamento.

ANEXO B – Instrumentos utilizados

Instrumentos utilizados nos ensaios.

Multímetros Dower DM 20-20

Transformador de sinal Código 264//96

Fonte de tensão CC

Chave trifásica e Sincronoscópio

Osciloscópio Infiniivision DSO-X 3034-A

Watímetro Yokogawa 2433 Clip-on AC Power Meter

Tacógrafo Minipa MDT 2305

ANEXO C – Tratamento numérico em Matlab

O método de Fourier por médias móveis foi aplicado nesse trabalho para análise do sinal da tensão terminal do gerador ensaiado em laboratório. A tensão terminal do gerador ensaiado em laboratório apresentou harmônicos de tensão com magnitude suficiente para interferir na análise dos resultados. Para evitar a influência desses harmônicos, foi implementado o método de Fourier por médias móveis. O método foi capaz de identificar os harmônicos de tensão que foram filtrados do sinal de tensão original. Assim, a análise dos resultados de laboratório se deu sobre o sinal fundamental. O filtro de harmônicos aplicado adiciona um atraso de um ciclo, ou seja, de 0,016 segundos. Assim, nas análises realizadas a partir do sinal filtrado consideraram esse atraso.

O software utilizado para tal tratamento foi o MATLAB R2011a. O algoritmo foi elaborado segundo Matakas (45). Esse anexo contém os seguintes algoritmos em linguagem de programação MATLAB:

1) AnaliseNumerica1etapa

Procedimento de análise numérica capaz de filtrar as harmônicas do sinal amostrado e traçar a curva de envoltória do mesmo sinal.

2) movfor(i,h,N)

Cálculo de harmônicos pelo método de Fourier Média Móvel. Extrai os valores instantâneos dos coeficientes a e b, do harmônico de ordem h, do sinal “i” com “N pontos por período”

3) coefsina(a,b,h,N)

Algoritmo para recompor a forma de onda senoidal a partir dos vetores de coeficientes de Fourier. Recompõe o harmônico de ordem h do sinal de coeficientes instantâneos a e b com “N pontos por período”.

Sobre o Método de Fourier por médias móveis, os trabalhos de Destro et al. (40) e Ama et al. (41) (42) explicam o método que é utilizado em aplicações distintas ao presente trabalho.

```

%                               AnaliseNumericaletapa
% Procedimento para análise numérica dos dados obtidos em Laboratório
% -----
% Esse procedimento foi desenvolvido para a tese de Mestrado de
% Cesar Bernardini De Franco, aluno da Escola Politécnica da USP,
% ano 2014.
%
% versão 17/Junho/2014
%
% Os dados obtidos no ensaio de rejeição de carga elaborado em
% laboratório apresentam um nível elevado de ruído. Assim, esse
% procedimento numérico pretende filtrar parcialmente esse ruído,
% encontrar a envoltória do sinal e comparar a envoltória com o
% sinal original (puro e sem filtrar).

function y=AnaliseNumericaletapa(DADOS,H,Vpeakref)

% y=AnaliseNumericaletapa(DADOS,H,Vpeakref)
%
% DADOS = matriz de duas colunas e "n" linhas, sendo a coluna 1 o
%         tempo e a coluna 2 o valor da tensão terminal do gerador em%
%         rejeição de de carga.
%
% H = número de pontos por período da forma de onda fundamental,
%     segundo dados colhidos no ensaio.
%
% Vpeakref = tensão de pico antes da rejeição de carga, valor em
%            Volts, para apresentar resultados em pu.
%

[numdados]=size(DADOS,1);

% "numdados" é o número de pontos obtidos no ensaio.

auxill=((1:1:numdados)');

DADOS2=[DADOS auxill];

% DADOS2 é a variável que consolida as seguintes informações:
%         Coluna 1 = tempo
%         Coluna 2 = tensão terminal entre fases
%         Coluna 3 = posição da informação no vetor

DADOS3=DADOS2';
% DADOS3 é a transposta de DADOS2. Transposição necessária para fazer a
% filtragem das harmônicas
% DADOS3 consolida as seguintes informações:
%         Linha 1 = tempo
%         Linha 2 = tensão terminal entre fases
%         Linha 3 = posição da informação no vetor

y=movfor(DADOS3(2,:),1,H);
a=y(1,:);
b=y(2,:);
z=coefsine(a,b,1,H);
% z é o vetor reconstituído com as harmonicas filtradas. Esse vetor
% apresenta apenas os pontos da forma de onda reconstituída. Não há
% relação com o tempo.

```



```

DADOS4 = [ DADOS3(1,:);z;1:1:numdados];
% DADOS4 apresenta mescla a forma de onda filtrada com a respectiva
% posição no vetor e o respectivo tempo.

% 1) Encontra os picos

[Vpeak(2,:),Vpeak(3,.)]=findpeaks(DADOS4(2,:));
auxil2=size(Vpeak,2);

% Vetor Vpeak
%     Linha 1 = tempo
%     Linha 2 = valor do pico da tensão
%     Linha 3 = posição em relação a amostragem original

% 2) Associar ao tempo

for i=1:1:auxil2,
    Vpeak(1,i)=DADOS3(1,Vpeak(3,i));
end

% 3) comparar a envoltória com o sinal original graficamente

semilogy(Vpeak(1,:),Vpeak(2,:)/Vpeakref,'r-')
grid
ylim([0.1 1.1])

% 4) Exporta o vetor da envoltória para a variável externa
y=Vpeak;

end

```

```

%                               movfor
%                               Metodo de Fourier por Médias Móveis
% -----
% Esse procedimento foi aplicado na tese de Mestrado de
% Cesar Bernardini De Franco, aluno da Escola Politécnica da USP,
% ano 2014.
%
% versão 17/Junho/2014
%
% Cálculo de harmônicos pelo método de Fourier Média Móvel. O
% algoritmo extrai os valores instantâneos dos coeficientes a e b, do
% harmônico de ordem h, do sinal "i" com "N pontos por período" no
% formato matriz coluna y.

function y=movfor(i,h,N)
% y=movfor(i,h,N)
% i= vetor contendo o sinal a ser processado, seu tamanho deve ser
% múltiplo de N
% N número de pontos por período do sinal a ser processado
% h ordem do harmônico a ser calculado;
%
% para o cálculo de a(m) e b(m) esta rotina considera que o sinal era
% periódico
% e igual ao primeiro ciclo do sinal fornecido, para os instantes
% anteriores a m=0

[k,ki]=size(i); % extrai o tamanho do vetor i
M=(0:N-1);      % cria uma escala de tempo

i=[i(1:N) i];
% acrescenta à série original , um trecho igual ao seu primeiro
% período
a=zeros(1,ki); b=zeros(1,ki); % criando os vetores a e b

a(1)=(cos(h*2*pi*M/N)*i(1:N)')*2/N;
% coeficientes inicial da série de fourier
b(1)=(sin(h*2*pi*M/N)*i(1:N)')*2/N;
% coeficientes inicial da série de fourier

% calculando os demais coeficientes

for m=1:ki-1
    a(m+1)=a(m)+2/N*(i(m+N)-i(m))*cos((m-1)*2*pi*h/N);
    b(m+1)=b(m)+2/N*(i(m+N)-i(m))*sin((m-1)*2*pi*h/N);
end
y=[a;b];

end

```

```

%                                Coefsin
%                                Recompõe o sinal harmônico
% -----
% Esse procedimento foi aplicado na tese de Mestrado de
% Cesar Bernardini De Franco, aluno da Escola Politécnica da USP,
% ano 2014.
%
% versão 17/Junho/2014
%
% Recompõe a h ésima harmônica a partir dos vetores de coeficientes de
% fourier a e b

function y=coefsin(a,b,h,N)
% y=coefsin(a,b,h,N)
% recompõe a h ésima harmônica a partir dos vetores de coeficientes de
% fourier a e b
% H ordem do harmônico
% N numero de pontos por ciclo
[k,ki]=size(a); % extrai o tamanho do vetor a
y=abs(a+b*j).*cos((1:ki)*2*pi*h/N+angle(a-b*j));

```

ANEXO D – Material combinado ar e aço-carbono

A construção mecânica da sapata polar do gerador do laboratório possui um encaixe no corpo polar. Esse encaixe favorece o surgimento de um pequeno entreferro. Por menor que seja o entreferro, ele afeta a curva de magnetização do conjunto. Sendo a mudança significativa, foi necessário representá-la na simulação em elementos finitos. Tendo em vista a metodologia utilizada para modelar o gerador em elementos finitos, o programa não permitiu considerar o entreferro existente entre a sapata polar e o corpo polar. Para que esse entreferro ainda assim estivesse representado na simulação, foi concebida uma curva de magnetização equivalente ao conjunto composto pelo polo mais entreferro entre a sapata-corpo polar.

Para determinar uma curva de magnetização equivalente, a princípio foi suposto um bloco do material aço carbono de largura "L", comprimento "C" e altura "A", cuja curva de magnetização é conhecida e descrita por densidades de fluxo magnético B e as respectivas intensidades do campo magnético H.

Figura D.1 – Bloco de aço-carbono.

Fonte: Elaboração própria.

Quando o bloco de aço-carbono é submetido a um campo magnético de intensidade H, surge uma densidade de fluxo B correspondente, conforme a curva de magnetização desse material. Tendo em conta que a intensidade de campo faz circular um fluxo magnético no sentido da altura (A) do material, é possível determinar esse fluxo pela densidade do fluxo e pela área da seção transversal ($S_{aço}$).

$$H_{aço} \rightarrow B_{resultante} \quad (D.1)$$

$$\Phi = B_{resultante} \cdot S_{aço} \quad (D.2)$$

Suponha agora que o mesmo material tenha sido dividido ao longo da sua altura A, formando um entreferro de altura "G". O estudo desse material composto por aço-carbono e entreferro irá fornecer a curva de magnetização do material equivalente.

Figura D.2 – Bloco de aço-carbono com entreferro.

Fonte:Elaboração própria.

O fluxo magnético que atravessa perpendicularmente a maior seção formada pelo entreferro observa a seção transversal no entreferro (S_g) que considera o efeito de espraçamento. A seção é:

$$S_g = (L + G) \cdot (C + G) \quad (D.3)$$

Supondo que o mesmo fluxo magnético que atravessava o bloco de aço-carbono agora passa através do material composto ar (entreferro) e aço-carbono.

$$B_g = \Phi / S_g \quad (D.4)$$

Por se tratar do entreferro formado por ar, a relação entre B_g e H_g é dada por μ_0 . Assim sendo:

$$H_g = \mu_0 \cdot B_g \quad (D.5)$$

Ou seja, é possível determinar o $H_{equivalente}$ para o conjunto combinado aço carbono e ar quando submetido aos mesmos fluxos associados às densidades de fluxo B da curva de magnetização do aço carbono.

$$H_{equivalente} = \frac{H_{aço} \cdot A + H_g \cdot G}{A + G} \quad \text{(D.6)}$$