



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

Luiz Fernando Pereira Marques Ramos

**Modelagem de um gerador de curto-circuito
com controle de super-excitação no
enrolamento de campo para utilização em
laboratórios de alta potência**

NITERÓI

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

Luiz Fernando Pereira Marques Ramos

Modelagem de um gerador de curto-circuito com controle de super-excitação no enrolamento de campo para utilização em laboratórios de alta potência

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Máquinas elétricas.

Orientador:

Dr. Bruno Wanderley França

Co-orientador:

Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo

NITERÓI

2024

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

P436m Pereira Marques Ramos, Luiz Fernando
Modelagem de um gerador de curto-circuito com controle de
super-excitação no enrolamento de campo para utilização em
laboratórios de alta potência : Modelagem de um gerador de
curto-circuito com controle de super-excitação no
enrolamento de campo para utilização em laboratórios de
alta potência / Luiz Fernando Pereira Marques Ramos. - 2024.
124 f.

Orientador: Bruno Wanderley França.
Coorientador: Guilherme Gonçalves Sotelo.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Escola de Engenharia, Niterói, 2024.

1. Curto circuito. 2. Gerador síncrono. 3. Centro de
Pesquisas de Energia Elétrica (Brasil). 4. Produção
intelectual. I. França, Bruno Wanderley, orientador. II.
Sotelo, Guilherme Gonçalves, coorientador. III. Universidade
Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD - XXX

Luiz Fernando Pereira Marques Ramos

Modelagem de um gerador de curto-circuito com controle de super-excitação no enrolamento de campo para utilização em laboratórios de alta potência

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Máquinas elétricas.

Aprovada em dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Bruno Wanderley França, D.Sc. – Orientador, UFF

Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc. –
co-orientador, UFF

Prof. Flávio Goulart dos Reis Martins, D.Sc. – UFF

Prof. Fernando Jorge Monteiro Dias, D.Sc. – UERJ

Niterói

2024

Dedico este trabalho a Deus acima de tudo, por ter me dado forças e motivação para continuar lutando apesar de todas as dificuldades nessa trajetória, a minha família e amigos pelo apoio e paciência nos momentos mais difíceis.

Agradecimentos

Sem dúvida, nem todos que fizeram parte dessa jornada, nos momentos serenos ou turbulentos, estão mencionados aqui, mas todos estão em meus pensamentos.

Agradeço primeiramente a Deus, que, em sua infinita sabedoria, deu-me forças para superar esta etapa tão importante da minha vida. A minha mãe, Elisabete, agradeço pelo exemplo e pela garra que foram essenciais para a formação do meu caráter, além de todo o esforço em sempre proporcionar o melhor dentro das suas possibilidades.

Agradeço também à minha mãe, à minha namorada, Bruna, e aos meus familiares em geral, que sempre acreditaram em meu potencial, me deram forças nos momentos mais difíceis e fizeram o possível e o impossível para que eu chegasse até aqui.

Aos professores desta universidade, especialmente aos meus orientadores, Bruno França e Guilherme Sotelo, que contribuíram de forma valiosa para meu crescimento acadêmico e pessoal, deixo minha eterna gratidão.

A todos que participaram direta ou indiretamente dessa trajetória, meu muito obrigado.

Resumo

O Laboratório de Alta Potência no *Centro de Pesquisa de Energia elétrica* (CEPEL), no Brasil, possui infraestrutura para testes de curto-circuito de média tensão em equipamentos como disjuntores, seccionadores, para-raios, transformadores e outros, simulando condições reais de operação em linhas de transmissão. Para alcançar uma corrente de curto-circuito de até 31,5 kA em 4,16 kV, o laboratório utiliza três transformadores monofásicos, com capacidade total de 1050 MVA, projetados especificamente para curtas durações de curto-circuito. Entretanto, devido a restrições da concessionária local, a capacidade desses transformadores é limitada a 450 MVA.

Com o aumento de energia na geração, transmissão e distribuição, espera-se que os níveis de curto-circuito também cresçam, superando os limites de curto-circuitos dos equipamentos atuais e exigindo ensaios de tipo com correntes ainda maiores. Dada a limitação do CEPEL, o laboratório enfrenta dificuldades em acompanhar essa expansão utilizando apenas transformadores, que dependem da potência fornecida pela rede elétrica.

Esta dissertação apresenta o estudo de viabilidade de um gerador de curto-circuito, capaz de ampliar a capacidade de ensaios do CEPEL sem depender diretamente da rede elétrica para desempenhar curtos-circuitos nos equipamentos a serem ensaiados. Com a implementação desse gerador, o laboratório de alta potência pode obter maior independência da rede elétrica, adequando-se melhor à expansão energética do Brasil.

Palavras-chave: Gerador de curto-circuito; Superexcitação; Conjuntor motor-gerador; Volante de alta inércia; Curto-circuito; Laboratório de alta potência; PSCAD/EMTDC.

Abstract

The High Power Laboratory at CEPEL in Brazil has the infrastructure for medium-voltage short-circuit testing on equipment such as circuit breakers, disconnect switches, surge arresters, transformers, and others, simulating real operating conditions on transmission lines. To reach a short-circuit current of up to 31.5 kA at 4.16 kV, the laboratory uses three single-phase transformers with a total capacity of 1050 MVA, specifically designed for short-duration short-circuits. However, due to restrictions from the local utility company, the capacity of these transformers is limited to 450 MVA.

With the increase in energy generation, transmission, and distribution, short-circuit levels are also expected to rise, exceeding current limits and requiring type tests with even higher currents. Given CEPEL's limitation, the laboratory faces challenges in keeping up with this expansion using only transformers, which rely on the power supplied by the electrical grid.

This dissertation presents a feasibility study for a short-circuit generator capable of expanding CEPEL's testing capacity without direct dependence on the grid. With the implementation of this generator, the high-power laboratory can achieve greater independence from the utility company, aligning more effectively with Brazil's energy expansion.

Keywords: Short-Circuit Generator; Overexcitation; Motor-Generator Set; High Inertia Flywheel; Short Circuit; High Power Laboratory; PSCAD/EMTDC.

Lista de Figuras

1.1	Ensaio de arco-elétrico em cubículos de média tensão no laboratório de alta potência do CEPEL	2
1.2	Ensaio de manobras de correntes induzidas em chave de aterramento no laboratório de alta potência do CEPEL	3
2.1	Diagrama elétrico do laboratório de alta potência do CEPEL	9
2.2	Configuração do Sistema Elétrico Brasileiro em 2027	9
2.3	Transformador monofásico de curto-circuito com potência de curto de 350 MVA	10
2.4	Vista do laboratório de alta potência e do novo possível laboratório de alta potência	11
2.5	Projeto Arquitetônico de um laboratório com um gerador de curto circuito de 330 MVA	11
2.6	Diagrama elétrico do novo laboratório de alta potência com o uso apenas do gerador de curto-circuito	12
2.7	Diagrama elétrico do novo laboratório de alta potência com o uso de gerador e transformador de curto-circuito	12
2.8	Gerador de curto circuito fabricado pela Electrosila	13
2.9	Gerador de curto circuito com motor de indução bobinado e gerador de corrente contínua	14
2.10	Gerador de curto circuito com partida estática	15
2.11	Gerador de curto circuito com sistema AVR e motor de indução com conversor de frequência	16
2.12	Circuitos de rotor e estator da máquina síncrona.	21
2.13	Circuitos equivalentes para o eixo direto e em quadratura	26

2.14 Circuitos equivalente simplificado para regime permanente	27
2.15 Corrente de falta durante os períodos de um curto circuito	27
2.16 Caminhos de fluxo para indutâncias de regime permanente, transitória e subtransitória	29
2.17 Circuito equivalente de eixo direto para o regime subtransitório	30
2.18 Circuito equivalente de eixo direto em curto circuito	31
2.19 Circuito equivalente de eixo direto com os terminais em aberto	31
2.20 Circuito equivalente de eixo em quadratura para o regime subtransitório .	32
2.21 Circuito equivalente de eixo em quadratura em curto circuito	32
2.22 Circuito equivalente de eixo em quadratura em curto aberto	33
2.23 Circuito equivalente de eixo direto para o período transitório	33
2.24 Circuito equivalente de eixo direto em curto circuito	34
2.25 Circuito equivalente de eixo direto em aberto	34
2.26 Circuito equivalente de eixo direto em regime permanente	35
2.27 Circuito equivalente de eixo em quadratura em regime permanente	35
2.28 Diagrama esquemático de um curto trifásico simétrico franco	37
2.29 Diagrama esquemático de um gerador	39
2.30 Excitador com sistema AVR	42
2.31 Excitador CA - Alimentação de tensão	43
2.32 Excitador CA - Alimentação de tensão e corrente	43
2.33 Excitador estático com retificador dual	44
2.34 Retificador a diodo e conversor CC-CC de quatro quadrantes como excita- dor estático.	45
2.35 Diagrama de bloco funcional para sistemas de controles de excitação para máquinas síncronas	47
2.36 Excitador retificador de fonte de potência tipo ST2C	49
2.37 Diagrama do circuito de superexcitação	52

2.38	Evento de um curto-circuito convencional com tensão de campo constante .	55
2.39	Evento de um curto-circuito com superexcitação	56
3.1	Diagrama do conjuntor motor-gerador	58
3.2	Tipos de conexões para o gerador de curto-circuito com acesso aos 12 terminais	59
3.3	Controle do excitador modelado no PSCAD	63
3.4	Exemplo de controle de tensão de ensaio	65
3.5	Controle do ângulo de fechamento simétrico modelado no PSCAD	66
3.6	Controle do ângulo de fechamento assimétrico modelado no PSCAD	66
3.7	Modelo PSCAD do gerador de curto-circuito	67
3.8	Corrente de curto-circuito sem superexcitação	68
3.9	Aplicação com uma carga de 55 kA	69
3.10	Integral Joule de uma aplicação com uma carga de 55 kA	71
4.1	Aplicação com uma carga de 5 kA	74
4.2	Aplicação com uma carga de 35 kA	75
4.3	Corrente bifásica em uma carga de 35 kA e ângulo de fechamento θ	77
4.4	Corrente trifásica em uma carga de 35 kA e ângulo de fechamento θ	78
4.5	Aplicação em uma carga de 35 kA com tensão de campo 0.25 pu	80
4.6	Modelo PSCAD gerador de curto-circuito em um curto bifásico	81
4.7	Aplicação em uma carga de 35 kA bifásica	82
4.8	Aplicação em uma carga de 35 kA com tensão de campo constante 1 pu	84
4.9	Modelo PSCAD gerador de curto-circuito em aplicação de corrente contínua	85
4.10	Aplicação em corrente contínua em uma carga de 35 kA	86
4.11	Modelo PSCAD gerador de curto-circuitos em paralelo	88
4.12	Aplicação de geradores em paralelo - gerador 1	89
4.14	Aplicação de geradores em paralelo Total	89

4.13	Aplicação de geradores em paralelo - gerador 2	90
4.15	Modelo PSCAD transformador de curto-circuito na saída dos terminais do gerador de curto-circuito	91
4.16	Aplicação de geradores com transformador de curto-circuito - gerador . . .	92
4.17	transformador de curto-circuito	93
A.1	Circuitos de rotor e estator da máquina síncrona.	101
B.1	Oscilogramas de curto-circuito com fechamento em θ_0	107

Lista de Tabelas

2.1	Laboratórios com geradores de curto-circuito	8
2.2	Laboratório de alta potência do CEPEL	10
2.3	Parâmetros do controle do excitador	50
3.1	Valores de parâmetros da máquina síncrona	58
3.2	Parâmetros do controle do excitador	64
3.3	Comparação de corrente de curto-circuito ao longo dos ciclos	70
4.1	Carga trifásica com fator de potência 0.2	73
4.2	Comparação de diferentes níveis de curto-circuito	76
4.3	Comparação de fechamento em diferentes ângulos	78
4.4	Comparação de fechamento trifásico em diferentes ângulos	79
4.5	Comparação de Variação de tensão aplicada	81
4.6	Comparação de tipos de curto-circuitos	83
4.7	Comparação de tensão de campo constante e superexcitação	84
4.8	Aplicação em corrente contínua	87
4.9	Aplicação com geradores em paralelo	90
4.10	Dados do transformador de curto-circuito	91
4.11	Aplicação com gerador e transformador de curto-circuito	93

Lista de Abreviaturas e Siglas

CEPEL	<i>Centro de Pesquisa de Energia elétrica</i>	iv
ONS	<i>Operador Nacional do Sistema Elétrico</i>	2
MSPS	<i>Máquina síncrona de polos salientes</i>	100
CC	<i>Corrente contínua</i>	36
CA	<i>Corrente alternada</i>	105
AVR	<i>Regulador de tensão automático</i>	6
EPE	<i>Empresa de Pesquisa Energética</i>	1
PSCAD	<i>Power Systems Computer Aided Design/Electromagnetic Transients</i>	4
OPGW	<i>Optical ground wire</i>	1
AVR	<i>Regulador Automático de Tensão</i>	6

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo do trabalho	4
1.2	Motivação	5
1.3	Estrutura da dissertação	6
2	Fundamentação teórica	7
2.1	Aplicações existentes no mundo	7
2.2	Análise técnico-econômica	8
2.3	Configurações	12
2.4	Máquina elétrica - Gerador	16
2.4.1	Construção da máquina síncrona	18
2.4.2	Modelagem matemática dos termos transitórios da máquina síncrona	20
2.4.2.1	Relações elétricas do estator	21
2.4.2.2	Relações elétricas do rotor	22
2.4.2.3	Modelo da máquina síncrona pela transformação dq0 . . .	24
2.4.3	Curto-circuito trifásico nos terminais de um gerador síncrono	27
2.4.3.1	Período subtransitório	29
2.4.3.2	Período transitório	33
2.4.3.3	Regime permanente	35
2.4.3.4	Equações de curto-circuito trifásico simétrico	37
2.4.3.5	Equações dinâmicas do gerador síncrono	38
2.5	Enrolamento de campo	41

2.5.1	Excitador e o sistema AVR	41
2.5.1.1	Excitador Estático	42
2.5.2	Modelagem de sistemas de excitação	45
2.5.2.1	Sistemas de excitadores estáticos	47
2.5.3	Conceito de superexcitação	50
2.5.3.1	Desmagnetização por efeito de armadura	50
2.5.3.2	Modelagem matemática da superexcitação no curto-circuito	51
2.5.3.3	Compensação de reação de armadura	54
3	Modelagem do sistema gerador de curto-circuito	57
3.1	Gerador Síncrono Trifásico	58
3.1.1	Níveis de tensões com acesso aos 12 terminais	59
3.1.2	Potência máxima de curto circuito	60
3.1.3	Inércia do gerador	61
3.2	Método de controle de superexcitação	63
3.3	Controle de tensão de ensaio	64
3.4	Controle de corrente de ensaio	65
3.5	Controle de ângulo de fechamento	65
3.6	Validação do modelo em PSCAD	67
3.6.1	Curto-Circuito Sem Superexcitação	67
3.6.2	Curto-Circuito com Superexcitação	68
3.6.3	Análise Comparativa	70
4	Simulações e resultados	72
4.1	Cenários construídos	72
4.2	Aplicação com variação de carga	73
4.3	Aplicação com variação de ângulo de fechamento	76

4.4	Aplicação com variação da tensão aplicada	79
4.5	Aplicação com diferentes tipos de curto-circuito	81
4.6	Aplicação com tensão de campo constante	83
4.7	Aplicação em corrente contínua	85
4.8	Aplicação com geradores em paralelo	87
4.9	Aplicação adicionando transformadores de curto-circuito na saída do gerador	91
5	Conclusão	95
	Referências	97
	Apêndice A – Transformada de Park (dq0)	100
	Apêndice B – Equações de curto-circuito no domínio da frequência 's'	102

Capítulo 1

Introdução

O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), localizado no Rio de Janeiro, Brasil, iniciou suas operações no final da década de 1970. Foi criado para realizar pesquisas experimentais e fornecer serviços tecnológicos, atendendo a demandas complexas de projetos, testes, medições, inspeções e assistência técnica. Além disso, realiza trabalhos de campo para o setor elétrico brasileiro e internacional, como demonstrado em [1]. A figura 1.2 e a 1.1 mostram exemplos de ensaios de tipo em equipamentos de média tensão.

O laboratório de alta potência, uma das instalações mais antigas do Cepel, abrange duas áreas principais: alta potência e alta corrente. A seção de alta corrente, inaugurada em 1981, é usada principalmente para avaliar o desempenho elétrico e termomecânico de equipamentos. Já a seção de alta potência, em operação desde 1983, é um dos laboratórios mais capacitados da América do Sul. Nessas áreas, o Cepel acumula um vasto histórico de testes de alta corrente em equipamentos de baixa, média e alta tensão, incluindo disjuntores, transformadores de corrente, barramentos blindados, painéis elétricos, transformadores de potência, transformadores de aterramento, reatores, comutadores de derivação em carga, limitadores de curto-circuito e cabos *Optical ground wire* (OPGW), entre outros. Entretanto, em termos internacionais, o laboratório possui uma das menores capacidades de potência, o que limita sua participação em projetos internacionais.

O aumento da demanda de energia elétrica global, impulsionado pelo crescimento populacional e pelo desenvolvimento tecnológico, levou à necessidade de expandir a geração e a capacidade dos sistemas de energia para garantir maior qualidade e confiabilidade [2]. De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2024, publicado pela *Empresa de Pesquisa Energética* (EPE), a geração de energia no Brasil cresceu 3,2 % entre 2021 e 2022, colocando o país como o quarto maior em aumento de geração nesse período, empatado com os Estados Unidos e, consequentemente, os níveis de curto-circuito também

aumentam na rede elétrica [3]. Com a elevação dos níveis de curto-circuito, os equipamentos precisam evoluir para suportar condições ainda mais severas. Além disso, novos equipamentos, como cubículos, transformadores e chaves seccionadoras devem ser testados para avaliar sua capacidade de suportar o maior nível de curto-circuito previsto para a instalação. No Brasil, o laboratório de alta potência do CEPEL é o único com capacidade para testar esses equipamentos em condições de média tensão e correntes elevadas com grandezas de dezenas de Quiloampère.



Figura 1.1: Ensaio de arco-elétrico em cubículos de média tensão no laboratório de alta potência do CEPEL

Com o aumento da geração, os equipamentos conectados à rede tornam-se suscetíveis a maiores níveis de curto-circuito em situações de falha, ocorrendo um fenômeno conhecido na análise de sistemas de potência como superação de disjuntor¹. Nesse caso, a capacidade máxima do disjuntor antigo deixa de ser suficiente para suportar um defeito a montante, sendo necessária sua substituição por um disjuntor de maior capacidade. Um exemplo desse fenômeno ocorreu por volta de 2010, quando os níveis máximos de curto-circuito para cubículos eram, geralmente, de até 31,5 kA. Atualmente, o Cepel recebe diversos pedidos para testes de curto-circuito de até 50 kA em cubículos, o que ultrapassa a capacidade do laboratório de alta potência caso a tensão de aplicação deva ser nominal.

Para a certificação da suportabilidade desses disjuntores a altos níveis de curto-circuito, são utilizadas fontes de alta potência. Contudo, não apenas disjuntores, mas também chaves seccionadoras, cabos OPGW, cabos de potência, painéis de média tensão, chaves fusíveis, transformadores, motores elétricos, reguladores de tensão e autotransfor-

¹Seus critérios de análise são definidos pelo *Operador Nacional do Sistema Elétrico* (ONS).

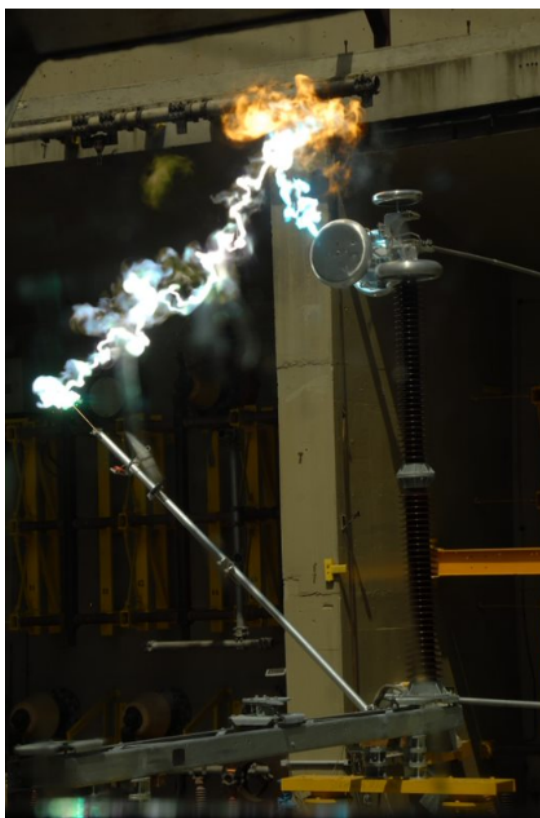


Figura 1.2: Ensaio de manobras de correntes induzidas em chave de aterramento no laboratório de alta potência do CEPEL

madores podem ser ensaiados para certificação de acordo com a norma. Essas fontes podem ser transformadores, geradores, circuitos sintéticos ou uma combinação dessas tecnologias. Atualmente, o CEPEL utiliza, como fonte, três transformadores monofásicos de 350 MVA de curto-circuito, totalizando 1050 MVA de capacidade total quando operados em paralelo. Contudo, sua capacidade é limitada a 450 MVA devido a restrições impostas pela concessionária local. Essa limitação tornou-se um problema no século 21, devido às numerosas recusas de ensaios, por não conseguir atingir o nível de potência de curto-circuito desejado, além de reduzir o impacto internacional, já que outros laboratórios no mundo possuem capacidades maiores. Portanto, para que o CEPEL, futuramente, consiga acompanhar os avanços tecnológicos e manter seu destaque mundial em pesquisas, é necessária a expansão do laboratório para alcançar maiores níveis de potência.

Além dos problemas relacionados às limitações externas, o laboratório de alta potência e o de alta corrente não podem ser energizados simultaneamente e, dependendo da potência, não podem realizar ensaios ao mesmo tempo. Ou seja, um dos laboratórios pode ficar ocioso enquanto o outro está em funcionamento, prejudicando a disponibilidade do laboratório.

1.1 Objetivo do trabalho

O objetivo principal desta dissertação é desenvolver e avaliar um gerador de curto-circuito para ensaios em laboratórios de alta potência. Este gerador deve ser capaz de realizar ensaios em equipamentos e manter a corrente sustentada durante todo o período de ensaio por meio da sobre-excitação.

Os Objetivos Específicos são:

1. Realizar um levantamento abrangente dos laboratórios que utilizam geradores de curto-circuito para ensaios de alta potência, demonstrando as possíveis configurações.
2. Apresentar propostas de construção nas dependências do CEPEL para o comissionamento de um gerador de curto-circuito.
3. Desenvolver um modelo de gerador especial com capacidade para aplicação em períodos curtos, visando reproduzir um curto-circuito de alta potência sem queda de corrente ao longo do período de ensaio, utilizando um controle de campo estático.
4. Analisar e modelar o gerador de curto-circuito, considerando a escassez de literatura sobre o tema, devido à existência de apenas cerca de nove laboratórios no mundo que possuem este tipo de equipamento.
5. Desenvolver controles adequados baseados na literatura atual sobre controle de campo.
6. Implementar simulações utilizando o programa *Power Systems Computer Aided Design/Electromagnetic Transients* (PSCAD) para validar o modelo e os controles desenvolvidos.
7. Analisar o comportamento do gerador de curto-circuito em diferentes cenários de operação, considerando que a máquina já está em velocidade nominal.
8. Desenvolver esquemas de controle simples para atender à sobre-excitação, com baixa complexidade de implementação em laboratório e adequação aos projetos dos fabricantes.
9. Avaliar a viabilidade técnica da aplicação do gerador de curto-circuito no laboratório de potência do CEPEL, demonstrando suas características subtransitórias, transitó-

rias e diversas faixas de aplicação e operação para testes de curto-circuito em níveis de até 1,3 GVA.

Para alcançar estes objetivos, serão realizadas as seguintes atividades:

- Condução de uma revisão sistemática da literatura disponível sobre geradores de curto-circuito.
- Adaptação das técnicas de controle de campo modernas para as especificidades do gerador de curto-circuito.
- Desenvolvimento de um modelo do gerador no ambiente PSCAD.
- Realização de uma série de simulações para testar e validar o modelo e os controles propostos.

O processo de modelagem do sistema de estudo e seus respectivos dados serão detalhados no Capítulo 3.

Espera-se que este estudo contribua significativamente para o entendimento e a modelagem de geradores de curto-circuito, fornecendo uma base para futuras pesquisas e aplicações práticas. Além disso, pretende-se demonstrar que, com o comissionamento de um gerador de curto-circuito, o laboratório do CEPEL terá a capacidade de atender ao mercado nacional e internacional de ensaios de alta potência.

1.2 Motivação

Com o aumento dos níveis de suportabilidade de curto-circuito em equipamentos elétricos, decorrente do contínuo crescimento da geração de energia no mundo, surge a necessidade de um estudo para ampliar a potência máxima no laboratório de alta potência do CEPEL, em função das limitações impostas pela concessionária local e pelas próprias restrições do laboratório. Dessa forma, o estudo de um gerador que não dependa diretamente da rede elétrica para gerar o curto-circuito de alta potência torna-se essencial. Além disso, o CEPEL precisa compreender a funcionalidade de um laboratório com o uso de um gerador de curto-circuito, a fim de entender sua tecnologia e estudar sua possível aplicação.

1.3 Estrutura da dissertação

De forma a atingir o objetivo apresentado, este trabalho está segmentado em 5 capítulos. No capítulo 1, é feita a introdução com o objetivo, motivação, aplicações existentes no mundo, bem como uma visão técnico-econômica superficial de seu projeto. No capítulo 2, é realizada a revisão bibliográfica com os fundamentos de geradores síncronos, revisão de transitórios em geradores síncronos, apresentação dos excitadores e do sistema *Regulador Automático de Tensão* (AVR), e, por fim, o conceito de superexcitação. Nessa revisão, são detalhadas as características dos geradores síncronos e das tecnologias que os complementam para atingir o objetivo do estudo, que é modelar um gerador de curto-circuito. No capítulo 3, é demonstrada a modelagem do gerador síncrono de polos lisos de curto-circuito a ser estudado. No capítulo 4, são apresentadas as simulações e resultados do uso de um gerador de curto-circuito em diversas aplicações. Por fim, no capítulo 5, é apresentada a conclusão do trabalho

Capítulo 2

Fundamentação teórica

Nesse capítulo, serão abordados conceitos referentes ao gerador de curto circuito, apresentando alguns fundamentos teóricos e evidenciando o potencial do gerador de curto-circuito para a fomentação do laboratório de alta potência.

2.1 Aplicações existentes no mundo

Geradores de curto-circuito são máquinas utilizadas para certificar a suportabilidade de equipamentos a altos níveis de curto-circuito, como disjuntores de média potência, chaves seccionadoras, transformadores e chaves fusíveis. Além disso, por se tratarem de geradores especiais, são poucos os existentes no mundo.

Historicamente, em 1938, foi construído um gerador de 700 MVA de curto-circuito na Toshiba, e, logo depois, em 1955, foi construído outro de 3.610 MVA, seguido por um de 7.400 MVA em 1964 [4].

Catalogando alguns geradores de curto-circuito existentes em laboratórios de alta potência, reconhecidos mundialmente e ainda em operação, podemos citar o KEMA, que possui 4 unidades de geradores de curto-circuito de 2.100 MVA; o CESI GROUP, com 2 unidades de 2.100 MVA; a Siemens Energy, com 3 unidades de 2.800 MVA; e a ABB, com 2 unidades de 2.500 MVA [5]. A Tabela 2.1 apresenta os principais laboratórios de alta potência do mundo que utilizam geradores de curto-circuito e suas características [6].

Tabela 2.1: Laboratórios com geradores de curto-circuito

Laboratório	DNV KEMA	CESI GROUP	SIEMENS ENERGY	SIEMENS	ABB	CPRI	AICHI ELETTRIC CO	Toshiba High Power	LG Industrial System
Local	Países baixos	Itália	Alemanha	Não disponível	Suécia	Bangalore	Japão	Coreia	Coreia
Números de unidades	4	Não disponível	3	1	2	3	1	1	1
Potência de curto-circuito unidade (MVA)	2100	2100	2800	1300	2500 / 1300	2500	330	8800	1603
Frequência (Hz)	50	10.6/50/60	10.6/50	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60	50/60
n° polos	2	2	8	2	4	2	2	2	2
Tensão nominal (kV)	Não disponível	Não disponível	19 (Y) / 11(delta)	19 (Y) / 11(delta)	7.5/13/15/26 (26 apenas em 25 e 10.6 Hz)	15	13.2 (Y) / 7.62 V(Delta)	13.2 (Y) / 11 (Delta)	18 (Y) / 15 (Delta)

2.2 Análise técnico-econômica

Nessa seção será apresentado um levantamento simplificado de custos com base em dados publicados sobre o comissionamento de novos geradores de curto-circuito em 2022 [7]. O objetivo é dar uma noção superficial dos custos globais para melhor contextualização.

Para atender à crescente demanda pelo desenvolvimento de infraestrutura no campo de atividades de pesquisa e testes do setor elétrico (geração, transmissão e distribuição), o CPRI está na vanguarda do desenvolvimento de capacidades para melhorar os testes de alta potência na Índia. A adição de dois geradores de curto-circuito de 2.500 MVA aos já existentes em Bangalore elevará a capacidade do laboratório de alta potência para 7.500 MVA, tornando-o o laboratório com maior capacidade de curto-circuito da Índia. O comissionamento desses dois novos geradores de curto-circuito para o "*Central Power Research Institute* (CPRI)", localizado em Bangalore, Índia [2], tem um custo de 32 milhões de dólares. O projeto inclui a compra de dois geradores de curto-circuito, cada um com capacidade de 2.500 MVA, e abrange o fornecimento, instalação, comissionamento e testes dos conjuntos dos dois geradores com superexcitação, sistema de partida e sistemas auxiliares. O laboratório CPRI, conforme demonstrado na tabela 2.1, já possui um gerador de 2.500 MVA e, com a aquisição dos dois novos geradores, sua capacidade total de curto-circuito será de até 7.500 MVA [7].

O fornecimento de energia expandido no Laboratório de Alta Potência do CPRI será utilizado para testar novos transformadores, disjuntores e outros componentes de redes e super-redes que transportam grandes volumes de eletricidade a longas distâncias, permitindo uma infraestrutura de energia segura e confiável para o país.

Do ponto de vista econômico, a compra de um gerador de curto-circuito de 16 milhões de dólares para uma potência de 2.500 MVA resulta em um custo médio de 0,0064 milhões de dólares por MVA. Assim, considerando a compra de um gerador de 1.300 MVA, o custo médio seria de 8,32 milhões de dólares, levando em conta que esses valores foram possivelmente cotados em 2020.

Do ponto de vista técnico, atualmente o laboratório de alta potência do CEPEL possui uma capacidade máxima de curto circuito de 1.050 MVA. Seu diagrama elétrico delta-estrela ligado é demonstrado na figura 2.1.

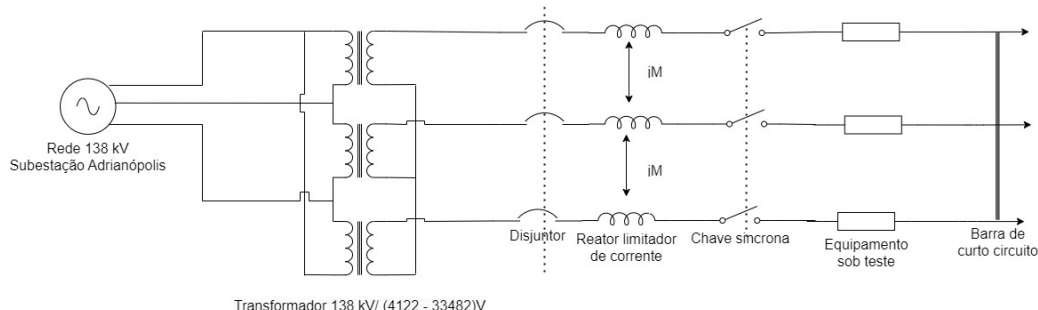


Figura 2.1: Diagrama elétrico do laboratório de alta potência do CEPEL

O laboratório de alta potência foi projetado com flexibilidade em mente, visando facilitar variações de configuração. Três transformadores monofásicos, com classificação de curto-circuito de 350 MVA, conforme apresentado na figura 2.3 e com seus parâmetros na tabela 2.2, com duração máxima de 1 segundo de aplicação, foram comissionados. Esta configuração forma um banco trifásico de transformadores, com potência de curto-circuito de 1.050 MVA. A potência é fornecida por meio de uma linha de transmissão de 138 kV interligada à subestação de Adrianópolis, pertencente à FURNAS, em Nova Iguaçu/RJ, sendo uma das suas alimentações o complexo nuclear de Angra, conforme demonstrado na figura 2.2 [8]. Para um arranjo trifásico, a conexão primária é normalmente em Delta, enquanto o secundário está em Estrela. Esta configuração é crucial, pois evita a circulação de corrente de sequência zero para a rede elétrica.

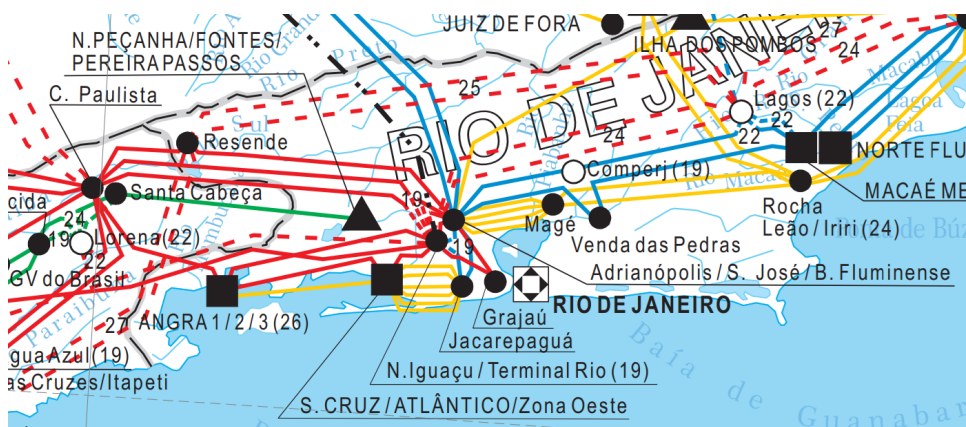


Figura 2.2: Configuração do Sistema Elétrico Brasileiro em 2027

O ajuste de corrente no laboratório de alta potência, atualmente, utiliza 78 reatores cobrindo uma faixa de $0,001 \, \Omega$ a $250 \, \Omega$ a 60 Hz, 108 caixas de resistores compostas por

Tabela 2.2: Laboratório de alta potência do CEPEL

Laboratório	equipamento	Unidade	Permanente/Transitório (1s) / Curto-circuito (MVA)	Número de taps	Tensão (kV)
					Primário / Secundário
Cepel	Transformador Curto-circuito Monofásico	3	10,9 / 350 MVA	84	138 / 4,122 - 33,482



Figura 2.3: Transformador monofásico de curto-circuito com potência de curto de 350 MVA

2592 resistores de 32Ω e 50 capacitores que cobrem uma faixa de $15 nF$ a $2 \mu F$. Esta combinação é frequentemente usada em uma variedade de situações, sendo um exemplo a modificação do fator de assimetria ou para aplicações como Tensão de Restabelecimento Transitória (TRV), entre outras finalidades.

Em relação à área ocupada, o atual laboratório de alta potência, apresentado na figura 2.4, ocupa uma área de $1.620 m^2$. O local com potencial para o novo laboratório de alta potência, também apresentado na mesma figura 2.4, tem uma área utilizável de $2.318 m^2$. Essa área atualmente é utilizada para eventos desportivos no Cepel. Portanto, em termos físicos, o novo laboratório possui área suficiente para ser construído nesse novo local. Um exemplo de layout de um laboratório de 330 MVA é apresentado na figura 2.5, pertencente à empresa AICHI ELECTRIC [9].

Para atender aos requisitos do CEPEL para a instalação de um novo laboratório de alta potência utilizando gerador de curto-circuito, podem-se classificar em possíveis modificações:

A primeira possível modificação consiste em designar o atual laboratório de alta potência como laboratório de média potência e construir um novo laboratório de alta potência,

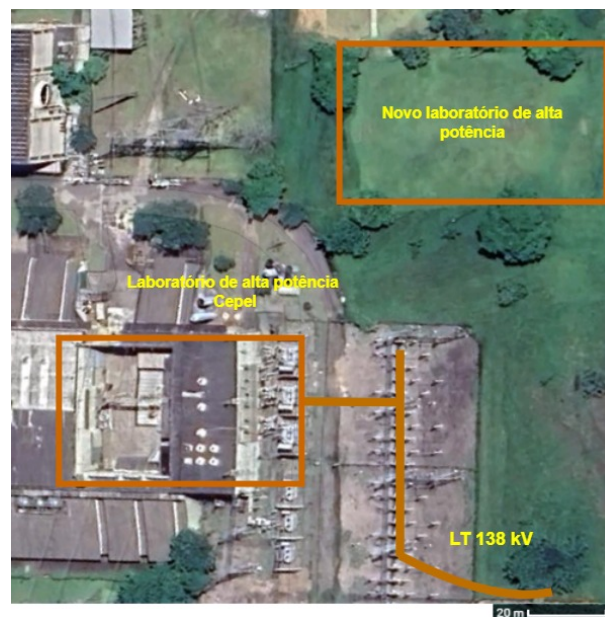


Figura 2.4: Vista do laboratório de alta potência e do novo possível laboratório de alta potência

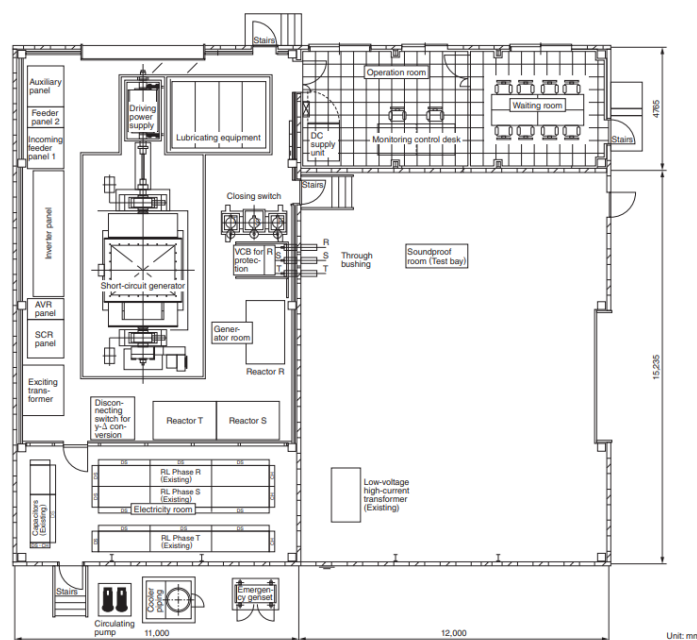


Figura 2.5: Projeto Arquitetônico de um laboratório com um gerador de curto circuito de 330 MVA

podendo ser instalado um banco de geradores de curto-circuito, como, por exemplo, a construção de 2 ou 3 geradores de 1.300 MVA, o que resultaria em uma capacidade total de 2.600 MVA ou 3.900 MVA. Nesse caso, a subestação deverá ser modificada para que a linha de 138 kV ou a saída de um transformador 138/13,8 kV na subestação consiga fornecer energia ao novo laboratório. Entretanto, não será necessária a alimentação dos geradores de curto-circuito, apenas a alimentação das pequenas cargas e dos motores de

indução para a partida do conjunto. Esse esquema é apresentado na figura 2.6.

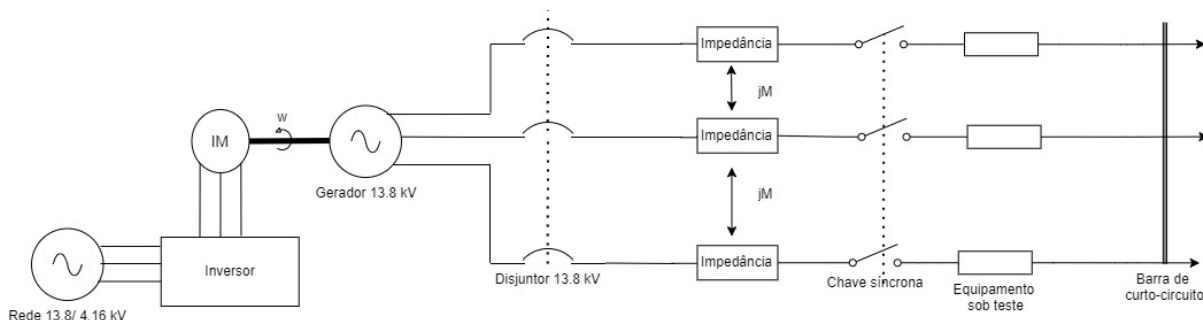


Figura 2.6: Diagrama elétrico do novo laboratório de alta potência com o uso apenas do gerador de curto-circuito

A segunda possível modificação, que teria um custo mais alto e uma ocupação maior, seria o mesmo esquema da primeira possibilidade, mas adicionando o uso de transformadores de curto-circuito na saída dos geradores. Neste caso, há uma maior flexibilidade quanto ao nível de corrente e tensão para a aplicação de ensaios, mas o custo será mais alto devido ao comissionamento de transformadores trifásicos ou monofásicos, os níveis de tensão dos transformadores a ser escolhido dependeria da necessidade do laboratório. Esse esquema é apresentado na figura 2.7. Os níveis de tensão e corrente podem assumir diversos valores ajustando os *taps* do transformador para atender os requisitos de ensaio desejado pelo cliente.

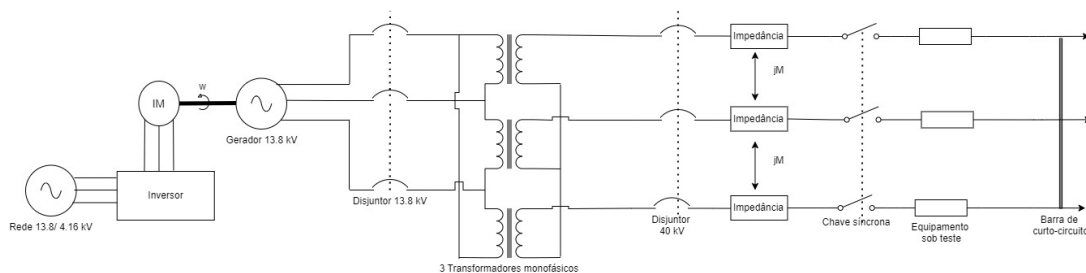


Figura 2.7: Diagrama elétrico do novo laboratório de alta potência com o uso de gerador e transformador de curto-circuito

Não há a possibilidade da reutilização eficiente dos transformadores existentes do atual laboratório de alta potência do CEPEL, pois seu primário não possui taps de tensão, mantendo-se o primário apenas em 138 kV.

2.3 Configurações

Para ensaios de alta potência utilizando turbogeradores, é necessária, para uma operação viável, a combinação de equipamentos como sistema de excitação, inversor de frequência

em um motor de indução, sistema de bomba de óleo para a unidade motor-gerador nos mancais fluidodinâmicos e um sistema de monitoramento e controle.

Como as condições de operação são consideradas dinamicamente críticas, o gerador deve ser projetado e fabricado de maneira conceitualmente diferente de um gerador convencional.

Semelhante à tecnologia flywheel, o gerador de curto-circuito é uma máquina dimensionada para fornecer energia em um curto espaço de tempo, por meio de uma alta inércia, que, neste caso, é obtida através de um rotor de grandes dimensões.

O uso do conjunto motor-gerador para ensaios de curto-circuito demonstrou-se mais vantajoso do que o uso de um transformador de curto-circuito ou de um circuito sintético desde o século XX [10]. A principal razão é que o conjunto evita possíveis e severos distúrbios na alimentação do laboratório, como o desligamento de toda a instalação devido a uma proteção acionada no lado de alta tensão da rede elétrica. Esse problema não ocorre com o conjunto motor-gerador, pois ele não possui conexão direta com a rede elétrica. A configuração do conjunto motor-gerador é apresentada na figura 2.8 [11].



Figura 2.8: Gerador de curto circuito fabricado pela Electrosila

O conjunto gerador de curto-circuito não é uma tecnologia nova. Com o passar dos anos, diferentes configurações foram desenvolvidas; no entanto, a fonte de curto-circuito sempre é um gerador síncrono de polos lisos. As principais configurações atualmente existentes para o conjunto gerador incluem:

1. Motor de indução rotor bobinado + gerador de corrente contínua
2. Motor de indução rotor bobinado + sistema AVR (utilizando Transformador auxiliar

e retificador)

3. Inversor para partida estática + gerador de corrente contínua
4. Inversor para partida estática + sistema AVR (utilizando Transformador auxiliar e retificador)
5. Motor de indução com inversor + gerador de corrente contínua
6. Motor de indução com inversor + sistema AVR (utilizando Transformador auxiliar e retificador)

Todas as configurações têm em comum o uso de um gerador síncrono de polos lisos e alta inércia como fonte para a aplicação de curto-circuito.

Na década de 1960, utilizava-se um motor de indução com rotor bobinado para iniciar o eixo, uma vez que não havia restrições quanto à frequência inicial de teste, conforme definido na norma [12]. Para esse tipo de máquina, a única opção era aumentar o escorregamento para incrementar o torque de partida, sem a possibilidade de exceder a velocidade nominal sem um inversor de frequência. Uma solução viável era conectar o motor a uma rede de 60 Hz para a partida do eixo, aumentando o escorregamento com resistências no rotor, permitindo que o eixo operasse a uma frequência correspondente a 50 Hz e, assim, o gerador produzia a frequência de 50 Hz necessária para o teste de curto-circuito. No entanto, tanto essa abordagem quanto outras opções similares (itens 1 e 2) tornaram-se desinteressantes, dadas as evoluções tecnológicas e a disponibilidade de soluções mais eficientes atualmente. Um exemplo desse tipo de conjunto, construído e apresentado em 1963, é mostrado na figura 2.9 [13].

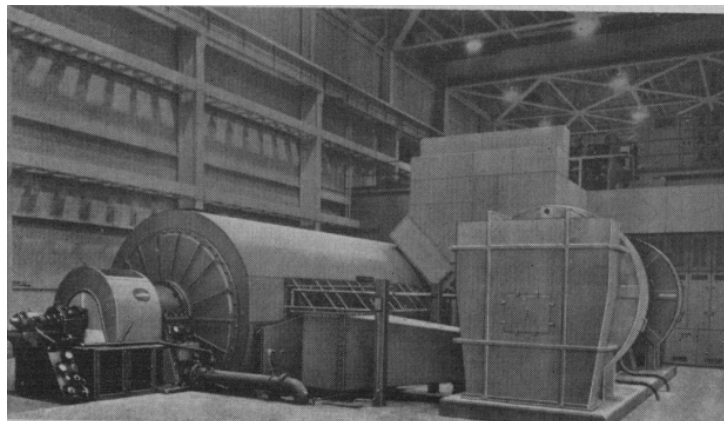


Figura 2.9: Gerador de curto circuito com motor de indução bobinado e gerador de corrente contínua

Por outro lado, a aplicação de um inversor de frequência baseado em tiristores para partida e controle de velocidade da máquina é uma solução utilizada mais recentemente. No entanto, existem alguns problemas devido a acoplamentos capacitivos e indutivos em relação ao eixo, resultando em tensões induzidas nos eixos [14], [2]. Portanto, embora factível, em termos de complexidade operacional e tecnológica, os itens 3 e 4 não são a escolha mais adequada. Um exemplo recente construído em 2022 de um gerador desse tipo é demonstrado na figura 2.10 [2].



Figura 2.10: Gerador de curto circuito com partida estática

A utilização de um motor de indução combinado com um inversor proporciona flexibilidade operacional, permitindo aplicações em diferentes frequências. Além disso, a potência necessária para o motor é reduzida graças ao uso de controle vetorial, que mantém o torque nominal ao longo de toda a partida.

Para o controle do enrolamento de campo, AVR tornou-se o padrão de mercado para geradores síncronos, pois a utilização de uma máquina excitatriz é incomum, exceto em alternadores mais antigos [14]. Dessa forma, esta configuração é a escolha mais adequada em termos de simplicidade e eficiência operacional. A figura 2.11 ilustra uma configuração desse tipo de gerador [15].

Este estudo propõe uma análise de expansão utilizando uma configuração composta por um gerador síncrono de alta inércia, um motor de indução controlado por um inversor e um sistema AVR. A escolha por esta configuração é justificada pelas suas vantagens em relação a outras opções, especialmente no que diz respeito à menor complexidade operacional e maior flexibilidade.

Além disso, considera-se a possibilidade de comissionar um transformador trifásico de curto-circuito a montante para alcançar níveis mais elevados de tensão ou corrente, o que



Figura 2.11: Gerador de curto circuito com sistema AVR e motor de indução com conversor de frequência

aumentaria a flexibilidade do laboratório. No entanto, ao adicionar esse componente ao circuito, é essencial considerar a impedância do transformador. Esse tipo de aplicação também será modelado neste estudo.

2.4 Máquina elétrica - Gerador

Neste tópico, serão discutidos conceitos fundamentais sobre máquinas síncronas, fornecendo a base teórica necessária para o estudo dos fenômenos transitórios. A máquina em análise será uma máquina síncrona de polos lisos, escolhida para a aplicação como gerador de curto-circuito.

O uso de máquinas síncronas com ímãs permanentes no contexto deste estudo apresenta uma desvantagem significativa: a suscetibilidade à desmagnetização devido a curtos-circuitos frequentes [16]. Durante esses eventos, a máquina pode perder a magnetização dos ímãs, inviabilizando o uso de máquinas com ímãs permanentes para essa aplicação.

Da mesma forma, o uso de geradores de indução como geradores de curto-circuito também possui limitações importantes [17]:

- Necessidade de Alimentação da Rede: Para alimentar o ramo de magnetização, o gerador de indução precisa estar conectado à rede elétrica.
- Falta de Sustentação de Corrente de Curto-Circuito: Não possui capacidade de gerar potência reativa suficiente durante um distúrbio na rede.
- Dependência de Capacitores: A maior parte da potência reativa é fornecida pelos

capacitores instalados nos terminais

- Instabilidade em Curto-Circuitos Indutivos: Curto-circuitos com fator de potência indutivo causam instabilidade no gerador de indução [18].

Além disso, a utilização de geradores duplamente alimentados não é recomendada devido à necessidade de um conversor back-to-back no rotor. Esses geradores enfrentam problemas semelhantes aos dos geradores de indução, incluindo a exigência de conexão dos terminais do estator à rede elétrica e aos capacitores.

A máquina síncrona, por sua vez, apresenta várias vantagens para ser utilizada como gerador de curto-circuito, tais como:

- Aplicação do curto-circuito na frequência síncrona;
- Controle de potência reativa através de uma fonte independente de valor muito baixo em relação a potência da máquina;
- Capacidade de sustentação de corrente de curto-circuito com o uso de superexcitação nos enrolamentos de campo;
- Não é necessário a ligação dos terminais do estator à rede, ficando isolada da rede elétrica local;
- Facilidade na modelagem transitória devido à quantidade de estudos de transitórios no sistema de potência;

Ao decidir entre máquinas de polos salientes e polos lisos, considera-se que limitações mecânicas restringem a velocidade periférica de rotores com polos salientes a menos de $2/3$ da de um rotor cilíndrico sólido, como o utilizado em geradores acoplados a turbinas. Assim, o rotor cilíndrico (ou de polos lisos) pode ser construído com cerca de $2/3$ do peso do material ativo. Para alcançar uma menor reatância de dispersão, utiliza-se o menor número possível de polos, maximizando o passo polar [19].

O passo polar, também conhecido como passo de polo, é a distância angular ou linear entre os centros de dois polos magnéticos adjacentes em uma máquina elétrica. Em máquinas síncronas, o passo polar é inversamente proporcional ao número de polos e diretamente proporcional à circunferência do rotor. Um passo polar maior geralmente resulta em um fluxo magnético mais uniforme e em uma menor reatância de dispersão, o que é desejável para melhorar o desempenho da máquina.

É importante notar que, mesmo com uma maior inércia, a máquina teria que ter dimensões consideravelmente maiores para obter um passo polar máximo possível e, conseqüentemente, uma menor reatância possível. Isso não implica necessariamente que uma maior inércia seja mais vantajosa. Na verdade, a máquina precisa ter inércia suficiente para suportar um curto-circuito de no máximo 1 segundo sem atingir os limites estabelecidos por norma, equilibrando assim desempenho e praticidade.

Além disso, empregar um gerador de 4 polos traz desafios físicos significativos. A necessidade de dimensões maiores para compensar o passo polar resulta em uma considerável diferença no momento de inércia, comparado a um gerador de 2 polos [11]. Em 1961, por exemplo, foi construído um gerador síncrono de curto-circuito de 8 polos para a *Siemens Energy*, que pesava 680 toneladas. Em comparação, um gerador de 2 polos de potência similar pesa aproximadamente 310 toneladas, evidenciando os desafios práticos de geradores de múltiplos polos em aplicações de curto-circuito. Ademais, geradores com mais polos, conseqüentemente, com mais peso e maior diâmetro despertam desafios para o transporte, para a fundação de onde o gerador será instalado, para os equipamentos mecânicos que suportam as forças axiais e radiais do conjuntor motor-gerador. Tais desafios influenciarão no desenvolvimento do projeto do gerador.

Em altas velocidades, o gerador síncrono de polos lisos é, portanto, a escolha mais viável, pois permite um passo polar maior e, conseqüentemente, uma melhor distribuição do fluxo magnético e menor reatância de dispersão, enquanto mantém dimensões e inércia dentro de limites práticos e normativos.

Portanto, a máquina síncrona de polos lisos de 2 polos é a opção mais adequada para gerador de curto-circuito, atendendo de forma ideal às exigências técnicas e operacionais para essa aplicação.

2.4.1 Construção da máquina síncrona

A máquina síncrona trifásica é composta basicamente por três enrolamentos, cujos eixos magnéticos estão defasados de 120 graus elétricos ao longo do perímetro do entreferro, formando o estator. Internamente, há um enrolamento ao redor de um núcleo de ferro, alimentado por corrente contínua, que gera um fluxo magnético estático. Este componente é conhecido como rotor, ou enrolamento de campo/excitação [19]. O rotor pode ser construído de duas formas: rotor cilíndrico ou rotor de polos salientes.

Nos geradores síncronos de rotor liso ou cilíndrico, o rotor consiste em um núcleo

cilíndrico, que pode ser maciço ou laminado. Este núcleo é projetado com ranhuras ou cavas, nas quais se encontra o enrolamento de campo, que pode ser recoberto por talas metálicas, geralmente feitas de material não magnético. O enrolamento é disposto ao longo do perímetro do núcleo de maneira a gerar um campo magnético o mais próximo possível de um formato senoidal [20]. Graças à sua robustez, o rotor, e consequentemente o enrolamento de campo, consegue resistir aos esforços centrífugos, o que permite à máquina operar em altas velocidades. Por essa razão, os geradores síncronos de rotor liso são frequentemente acionados por turbinas a vapor ou a gás, que operam a altas rotações. Esses geradores são comumente chamados de turbogeradores ou turboalternadores.

No caso dos geradores síncronos de polos salientes, o enrolamento de campo é fixado no eixo, de modo que os terminais polares ficam espaçados igualmente. Por exemplo, em uma máquina de 4 polos, os eixos polares estarão separados por 90° ; já em uma máquina de 6 polos, a separação será de 60° [21]. Devido à sua construção, as máquinas síncronas de polos salientes não são recomendadas para operar em altas velocidades, pois a força centrífuga resultante da rotação pode comprometer a fixação dos terminais polares. Assim, esse tipo de máquina é mais indicado para aplicações de baixa rotação, como nas turbinas hidráulicas, que exigem um número maior de polos para gerar a Força Eletromotriz Induzida (f.e.m) a 60 Hz, em velocidades baixas de rotação.

Como toda máquina elétrica, a máquina síncrona é reversível, ou seja, ela pode transformar energia elétrica em mecânica (quando atua como motor) ou, ao contrário, converter energia mecânica em elétrica. No modo gerador, ao fornecer energia mecânica ao eixo do rotor, este atinge uma velocidade angular que faz com que o fluxo magnético do campo induza tensão elétrica nos enrolamentos do estator, gerando energia elétrica a partir da energia mecânica [22].

Os enrolamentos amortecedores, também presentes na máquina síncrona, são localizados em ranhuras do rotor. São barras de material condutor que ficam curtos-circuitadas nas extremidades por um anel condutor. A principal função desses enrolamentos é proporcionar a partida da máquina como um motor de indução até que a máquina atinja a velocidade síncrona, já que o motor síncrono só começa a produzir torque quando atinge essa velocidade. Além disso, os enrolamentos amortecedores ajudam a garantir a estabilidade da máquina sob variações de carga e a eliminar oscilações de velocidade.

2.4.2 Modelagem matemática dos termos transitórios da máquina síncrona

Com base no modelo geral da máquina síncrona, cujo desenvolvimento matemático até aqui se encontra nas referências da literatura básica [18], [23]. É possível, primeiramente, analisar as condições de regime permanente. Nessas condições, o campo magnético resultante do estator gira à mesma velocidade que o campo induzido pelo rotor. Consequentemente, não há variação temporal nos enlaces de fluxo nos circuitos do rotor, o que implica que nenhuma tensão é induzida no rotor.

No caso de um distúrbio no sistema, como um curto-circuito, ou uma mudança abrupta nas condições de operação, os fluxos concatenados nos circuitos fechados do rotor não podem variar instantaneamente. Assim, em resposta a qualquer perturbação, correntes são induzidas nos enrolamentos de campo e nos enrolamentos amortecedores, com o objetivo de compensar as variações nos fluxos concatenados e mantê-los constantes.

Devido à complexidade das variáveis envolvidas numa máquina síncrona, a representação exata do comportamento da máquina exige a análise de um sistema de equações diferenciais simultâneas complexas para circuitos acoplados igualmente complexos. Por essa razão, na análise básica dos transitórios em uma máquina síncrona de polos lisos (MSPL), serão desprezados efeitos como histerese, saturação do ferro e correntes parasitas. Mesmo assim, será necessário criar um modelo que represente, ao menos, os efeitos mais relevantes para um estudo de transitórios em uma MSPL, conforme discutido em trabalhos como [20] e [24].

Inicialmente, serão apresentadas de forma concisa as principais relações da máquina síncrona, e em seguida será introduzida a transformação $dq0$ devido a não uniformidade do entreferro, que será a base para o desenvolvimento da teoria da máquina síncrona. A teoria de Transformada Park ou Transformada $dq0$ é mais detalhada no apêndice A.

Para a análise da máquina síncrona, os seguintes esquemas de ligação para os enrolamentos do estator e rotor serão considerados conforme apresentado na figura 2.12.

Na Figura 2.12, são apresentados os enlaces de fluxos nas fases "a", "b" e "c". Ao decompor o rotor nos eixos "d" e "q", devido à não uniformidade do entreferro, considera-se uma reatância associada ao efeito dos enrolamentos amortecedores, sendo representada no eixo "d" pelo coeficiente kd e no eixo "q" pelo coeficiente kq . O enrolamento de campo, por sua vez, exerce influência apenas no eixo "d", já que o fluxo gerado por ele está restrito a esse eixo, sendo representado na figura pelo coeficiente fd .

Além disso, existem as indutâncias próprias das fases do estator, representadas pelos coeficientes (aa, bb, cc) , e do rotor, com coeficientes (ffd, kkd, kkq) . Também são consideradas as indutâncias mútuas, que resultam da interação dos fluxos magnéticos entre os enlaces de fluxo das diferentes partes do sistema:

- Entre as fases do estator, com coeficientes (ab, bc, ac) ;
- Entre as fases do estator e os enrolamentos de amortecimento do rotor, com coeficientes $(akd, akq, bkd, bkq, ckd, ckq)$;
- Entre as fases do estator e o enrolamento de campo do rotor, com coeficientes (afd, bfd, cfd) ;
- Entre os enrolamentos de amortecimento e o enrolamento de campo do rotor, com coeficiente (fkq) .

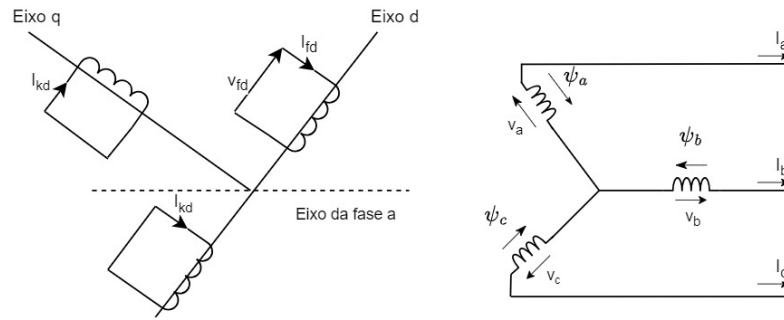


Figura 2.12: Circuitos de rotor e estator da máquina síncrona.

2.4.2.1 Relações elétricas do estator

Os enrolamentos do estator de um gerador síncrono podem ser caracterizados pelas seguintes equações representando as tensões terminais para as 3 fases:

$$e_a = \frac{d\Psi_a}{dt} - R_a \cdot i_a \quad (2.1)$$

$$e_b = \frac{d\Psi_b}{dt} - R_b \cdot i_b \quad (2.2)$$

$$e_c = \frac{d\Psi_c}{dt} - R_c \cdot i_c \quad (2.3)$$

Por sua vez o enlace de fluxo magnético por fase é definido por:

$$\Psi_a = -L_{aa}(\theta).i_a - L_{ab}(\theta).i_b - L_{ac}(\theta).i_c + L_{afd}(\theta).i_{fd} + L_{akd}(\theta).i_{kd} + L_{akq}(\theta).i_{kq} \quad (2.4)$$

$$\Psi_b = -L_{ba}(\theta).i_a - L_{bb}(\theta).i_b - L_{bc}(\theta).i_c + L_{bfd}(\theta).i_{fd} + L_{bkd}(\theta).i_{kd} + L_{bkq}(\theta).i_{kq} \quad (2.5)$$

$$\Psi_c = -L_{ca}(\theta).i_a - L_{cb}(\theta).i_b - L_{cc}(\theta).i_c + L_{cfd}(\theta).i_{fd} + L_{ckd}(\theta).i_{kd} + L_{ckq}(\theta).i_{kq} \quad (2.6)$$

Onde:

e_a, e_b, e_c são os valores instantâneos das tensões terminais fase neutro para as fases a, b e c respectivamente;

i_a, i_b, i_c são os valores instantâneos das correntes de linha nas fases a, b e c respectivamente;

i_{fd}, i_{kd}, i_{kq} são os valores de corrente nos circuitos de campo e armadura para os eixos d e q ;

R_a, R_b, R_c são as resistências de armadura para as fases a, b e c respectivamente;

L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} são as indutâncias próprias dos enrolamentos de armadura;

L_{ab}, L_{bc}, L_{ac} são as indutâncias mútuas entre os enrolamentos de armadura;

$L_{afd}, L_{akd}, L_{akq}, L_{bfd}, L_{bkd}, L_{bkq}, L_{cfd}, L_{ckd}, L_{ckq}$ são as indutâncias mútuas entre os enrolamentos de estator e rotor;

θ é o ângulo entre o eixo direto e o eixo da fase a.

2.4.2.2 Relações elétricas do rotor

O rotor é representado pelo enrolamento de campo e pelos enrolamentos amortecedores, um localizando-se nos eixos "d" e "q". Quando um enrolamento tem uma componente no eixo direto significa que há uma componente na direção do eixo polar, enquanto o eixo em quadratura significa uma componente no eixo interpolar, ou seja, com uma defasagem de 90° elétricos em relação ao polo. A teoria da Transformada de Park é explicada com

mais detalhes no apêndice A.

Como o enrolamento de campo está localizado no polo do rotor, ele será representado apenas como uma componente no eixo direto, sem componentes no eixo quadratura.

As equações que relacionam os circuitos do rotor são:

$$e_{fd} = \frac{d\Psi_{fd}}{dt} + R_{fd} \cdot i_{fd} \quad (2.7)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{kd}}{dt} + R_{kd} \cdot i_{kd} \quad (2.8)$$

$$0 = \frac{d\Psi_{kq}}{dt} + R_{kq} \cdot i_{kq} \quad (2.9)$$

O fluxo magnético enlaçado é definido por:

$$\Psi_{fd} = L_{ffd} \cdot i_{fd} + L_{fkd} \cdot i_{kd} - L_{afd} \left[i_a \cos(\theta) + i_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.10)$$

$$\Psi_{kd} = L_{fkd} \cdot i_{fd} + L_{kkd} \cdot i_{kd} - L_{akd} \left[i_a \cos(\theta) + i_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.11)$$

$$\Psi_{kq} = L_{kkq} \cdot i_{kq} - L_{akq} \left[i_a \sin(\theta) + i_b \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (2.12)$$

Onde:

e_{fd} é a tensão no enrolamento de campo;

R_{fd}, R_{kd}, R_{kq} são as resistências dos circuitos de campo e amortecedores para os eixos d e q ;

$L_{ffd}, L_{kkd}, L_{kkq}$ são as indutâncias próprias dos circuitos do rotor;

L_{fkd} é a indutância mútua entre os circuitos do rotor;

$L_{afd}, L_{akd}, L_{akq}$ são as indutâncias mútuas entre o enrolamento da fase a no estator e rotor;

Nos enrolamentos amortecedores as tensões instantâneas são levadas a zero devido ao

fato desse enrolamento ser curto circuitado em suas extremidades.

Para o rotor as indutâncias próprias e as indutâncias mútuas entre seus enrolamentos são constantes, já as indutâncias mútuas entre rotor e estator são variáveis com o ângulo do rotor.

2.4.2.3 Modelo da máquina síncrona pela transformação dq0

Com base na transformação $dq0$ serão demonstradas as equações da máquina síncrona para o regime transitório.

Aplicando as equações 2.1 a 2.3 na matriz de transformada de Park, conforme a equação A.1, será feita a decomposição das equações de circuito da máquina em suas componentes de eixo direto e quadratura.

$$e_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q \cdot \frac{d\theta}{dt} - R_a \cdot i_d \quad (2.13)$$

$$e_q = \frac{d\Psi_q}{dt} - \Psi_d \cdot \frac{d\theta}{dt} - R_a \cdot i_q \quad (2.14)$$

$$e_0 = \frac{d\Psi_0}{dt} - R_a \cdot i_0 \quad (2.15)$$

como o ângulo θ é o ângulo entre a fase "a" e o eixo direto da máquina, pode-se tirar a conclusão que, em regime permanente, $\frac{d\theta}{dt}$ é a velocidade angular da máquina em radianos por segundo, substituindo por w_s .

O fluxo magnético enlaçado pelo estator também pode ser transformado utilizando a transformação $dq0$. Da mesma forma, aplica-se a matriz de Park nas equações 2.4, 2.5 e 2.6.

$$\Psi_d = -L_d \cdot i_d + L_{afd} \cdot i_{fd} + L_{akd} \cdot i_{kd} \quad (2.16)$$

$$\Psi_q = -L_q \cdot i_q + L_{akq} \cdot i_{kq} \quad (2.17)$$

$$\Psi_0 = -L_0 \cdot i_0 \quad (2.18)$$

Pode-se simplificar mais ainda as equações, considerando que o cenário se encontra em condições balanceadas. Desse modo, $i_0 = 0$, então pela equação 2.18 o fluxo enlaçado de sequência zero ψ_0 também se iguala a zero, conseqüentemente, agora na equação 2.15 o ramo $\frac{d\Psi_0}{dt}$ é igual zero, uma vez que a derivada de uma constante é nula, portanto $e_0 = 0$.

o fluxo magnético enlaçado pelo rotor após a transformação é:

$$\Psi_{fd} = L_{ffd} \cdot i_{fd} + L_{fkd} \cdot i_{kd} - \frac{3}{2} L_{afd} \cdot i_d \quad (2.19)$$

$$\Psi_{kd} = L_{fkd} \cdot i_{fd} + L_{kkd} \cdot i_{kd} - \frac{3}{2} L_{akd} \cdot i_d \quad (2.20)$$

$$\Psi_{kq} = L_{kkd} \cdot i_{kq} - \frac{3}{2} L_{akq} \cdot i_q \quad (2.21)$$

A principal vantagem desse método é que agora as indutâncias observadas nas equações 2.16 a 2.21 são independentes da posição do rotor.

A partir das equações 2.16, 2.17, 2.19, 2.20, 2.21 é possível montar os circuitos equivalentes de eixo direto e em quadratura para o gerador, mas primeiro serão definidas algumas equivalências.

As indutância de estator L_d e L_q podem ser decompostas numa indutância de dispersão L_a idêntica nos eixos d e q , e em indutância mútuas L_{md} e L_{mq} para cada eixo, da mesma forma as indutâncias de rotor L_{ffd} , L_{kkd} , L_{kkq} também podem ser decompostas em indutâncias de dispersão mais as indutância mútuas. Dessa forma:

$$L_d = L_a + L_{md} \quad (2.22)$$

$$L_q = L_a + L_{mq} \quad (2.23)$$

$$L_{ffd} = L_{fd} + L_{md} \quad (2.24)$$

$$L_{kkd} = L_{kd} + L_{md} \quad (2.25)$$

$$L_{kkq} = L_{kq} + L_{mq} \quad (2.26)$$

Com essas relações já é possível montar os circuitos equivalentes para o eixo direto e quadratura, o circuito equivalente é demonstrado na figura 2.13.

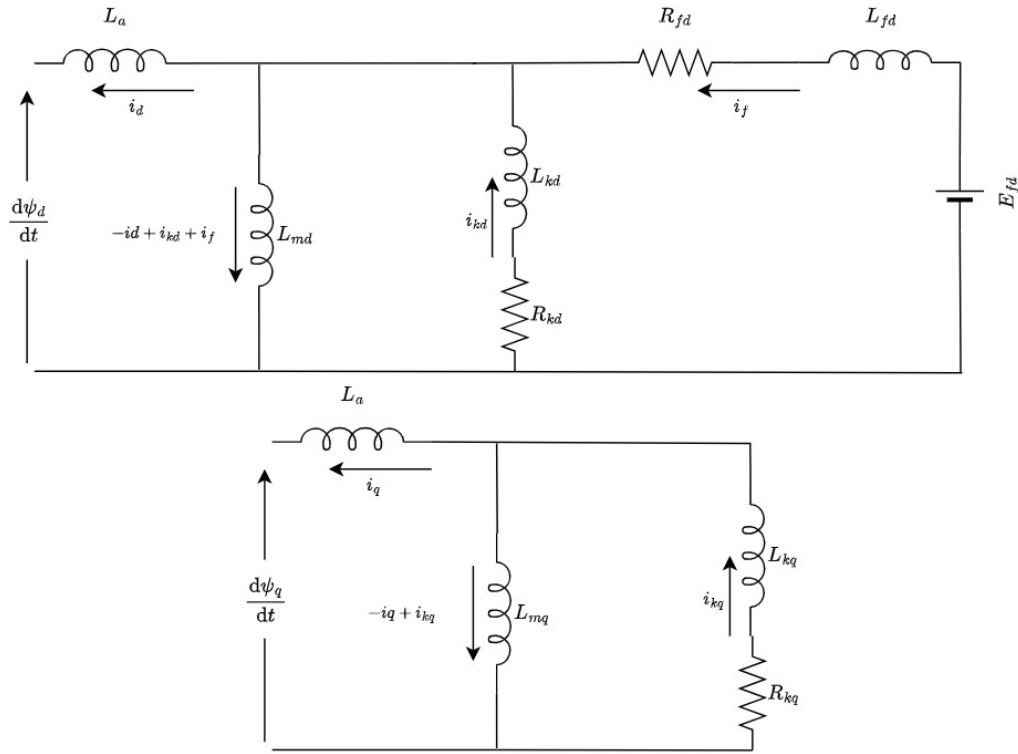


Figura 2.13: Circuitos equivalentes para o eixo direto e em quadratura

Onde:

L_a é a indutância de dispersão do estator;

L_{md} , L_{mq} são as indutâncias mútuas de eixo direto e quadratura respectivamente;

L_{fd} é a indutância de dispersão no enrolamento;

R_{fd} é a resistência do enrolamento de campo;

L_{kd} , L_{kq} são as indutâncias de dispersão do enrolamento amortecedor de eixo direto e quadratura;

R_{kd} , R_{kq} São as resistências do enrolamento amortecedor de eixo direto e quadratura;

O modelo acima é válido para análises de transitórios e regime permanente, embora em regime permanente possa ser simplificado para impedância em série demonstrado na figura 2.14, mas não é objeto de estudo desse trabalho [25].

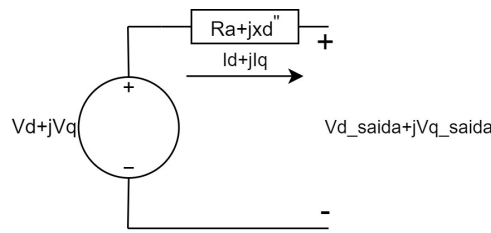


Figura 2.14: Circuitos equivalente simplificado para regime permanente

2.4.3 Curto-circuito trifásico nos terminais de um gerador síncrono

Neste tópico serão apresentados os principais parâmetros relevantes para a análise de desempenho de uma máquina síncrona após um curto-circuito. A dedução de parâmetros como reatâncias ou indutâncias transitórias e subtransitórias, bem como as constantes de tempo transitórias e subtransitórias, será abordada. Esses parâmetros serão posteriormente inseridos no modelo matemático, conforme as referências [25], [18], [26].

Em uma máquina síncrona, durante distúrbios, correntes são induzidas em seus circuitos, afetando seu funcionamento de forma geral. No caso de um curto-circuito, o enrolamento de armadura pode ser danificado devido à corrente excessivamente alta, o que pode causar sérios danos aos equipamentos e até representar um risco à segurança das pessoas. A figura 2.15 ilustra os diferentes períodos transitórios observados na corrente de curto-circuito em um gerador síncrono após a ocorrência de uma falha. Estes períodos são essenciais para a compreensão do comportamento dinâmico da máquina elétrica e para o dimensionamento adequado dos sistemas de proteção.

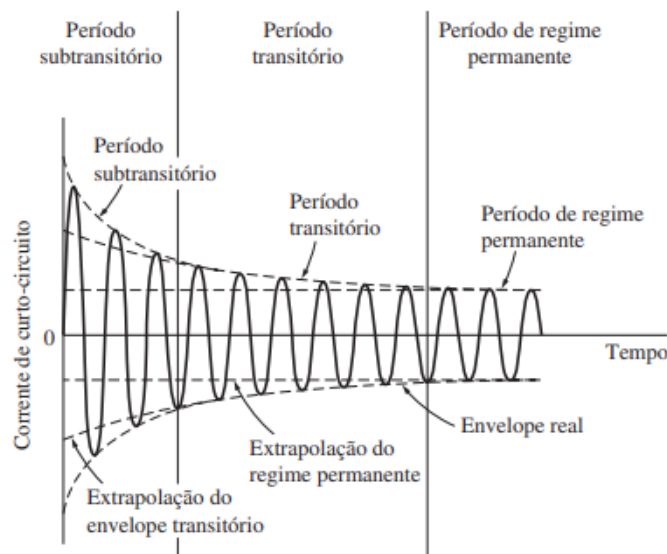


Figura 2.15: Corrente de falta durante os períodos de um curto circuito

Os métodos tradicionais para extração dos parâmetros necessários, especialmente aqueles dos enrolamentos do rotor a partir de medições no estator, baseiam-se na observação de que as constantes de tempo efetivas das várias correntes do rotor são significativamente diferentes. Uma demonstração comum desse fenômeno é o oscilograma de curto-circuito das correntes do estator, quando um curto-circuito trifásico é aplicado à máquina, com o estator inicialmente em circuito aberto e sua excitação de campo mantida constante (ver figura 2.15 [18]). Além do deslocamento contínuo (CC), a porção assimétrica da corrente de curto-circuito normalmente exibe dois períodos de decaimento distintos, chamados de períodos subtransitório e transitório. O período subtransitório refere-se aos primeiros ciclos após a falha, quando a queda da corrente ocorre muito rapidamente, principalmente devido às mudanças nas correntes dos enrolamentos amortecedores. Já a taxa de decaimento da corrente no período transitório é mais lenta, sendo atribuída principalmente às mudanças nas correntes dos enrolamentos de campo do rotor, por fim tem-se a componente simétrica que se trata da corrente de curto-circuito de regime permanente [27].

O teorema da ligação de fluxo constante é útil para determinar os valores iniciais dos fluxos transitórios em circuitos acoplados indutivamente. Em resumo, a ligação de fluxo de qualquer circuito indutivo com resistência finita e força eletromotriz (FEM) não nula não pode mudar instantaneamente. Na verdade, se não houver resistência ou FEM no circuito, a ligação de fluxo permaneceria constante. O teorema da ligação de fluxo constante pode, portanto, ser usado para determinar as correntes imediatamente após uma mudança, em termos das correntes antes da alteração. Esse teorema explica as distribuições típicas de fluxo mostradas na figura 2.16 de uma máquina síncrona durante os períodos subtransitório, transitório e de estado estacionário, após uma perturbação no lado do estator. No período subtransitório, imediatamente após a perturbação, mudanças nas correntes do enrolamento de amortecimento limitam a penetração do fluxo induzido pelo estator no rotor. À medida que essas correntes do enrolamento amortecedor diminuem, entra-se no período transitório, onde as mudanças de corrente no enrolamento de campo reagem de maneira similar, embora mais lentamente. Finalmente, no estado estacionário, o fluxo induzido pelo estator penetra nos enrolamentos de campo e amortecedores do rotor. As figuras 2.16 ajudam na compreensão do circuito equivalente que será apresentado [28].

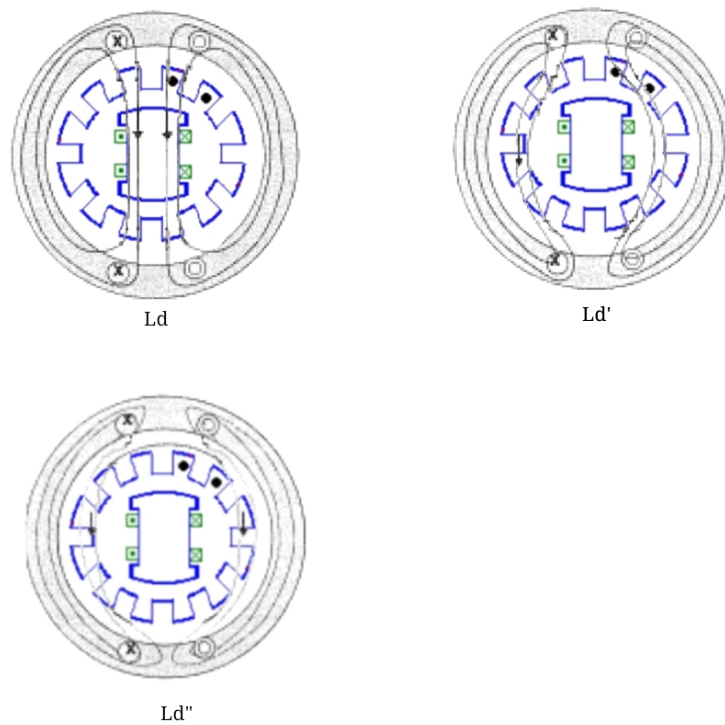


Figura 2.16: Caminhos de fluxo para indutâncias de regime permanente, transitória e subtransitória

2.4.3.1 Período subtransitório

O período subtransitório refere-se aos primeiros ciclos após a ocorrência de um curto-circuito. Nesse período, as correntes de armadura são muito elevadas, mas se amortecem rapidamente. Essas variações de corrente estão diretamente relacionadas às altas variações nas correntes dos enrolamentos amortecedores, que são induzidas pela incapacidade dos enlaces de fluxo nos circuitos fechados do rotor de se alterarem instantaneamente.

À medida que a corrente na armadura aumenta, correntes são induzidas nos amortecedores para equilibrar os fluxos concatenados. De acordo com a Lei de Lenz, o sentido da corrente induzida é tal que o campo magnético gerado por ela se opõe à variação do fluxo magnético que a originou, e também, como postulado em circuitos indutivos, a corrente não pode variar instantaneamente [18]. Com isso, as correntes elevadas nos amortecedores também atuam como uma excitação no rotor. Além disso, correntes são induzidas no enrolamento de campo com o mesmo objetivo, auxiliando no equilíbrio dos fluxos magnéticos. Essa variação de corrente é refletida no enrolamento de armadura durante esse intervalo de tempo, cujo decaimento ocorre a uma taxa que depende dos valores de resis-

tência e indutância vistos pelo amortecedor. Essa taxa de decaimento é conhecida como a constante de tempo subtransitória. Como as correntes de armadura nesse período são muito altas, podemos concluir que as indutâncias vistas pelo enrolamento de armadura no período subtransitório são menores em comparação com outros períodos [25].

As constantes de tempo subtransitórias, por definição, são o tempo necessário para que as envoltórias subtransitórias decaiam a um valor tal que a diferença entre elas e as envoltórias transitórias seja de 0,368 [25, 28]. Esse conceito baseia-se no princípio de que o fluxo em qualquer circuito fechado não pode variar instantaneamente, sendo necessário levar em consideração constantes de tempo apropriadas para o cálculo. No caso de uma máquina síncrona, que é modelada por um circuito RL , a constante de tempo é dada pela razão L/R , vista pelo enrolamento amortecedor durante o período subtransitório.

As constantes de tempo subtransitórias e as reatâncias subtransitórias podem ser determinadas a partir dos circuitos equivalentes apresentados nos itens anteriores do capítulo 2.

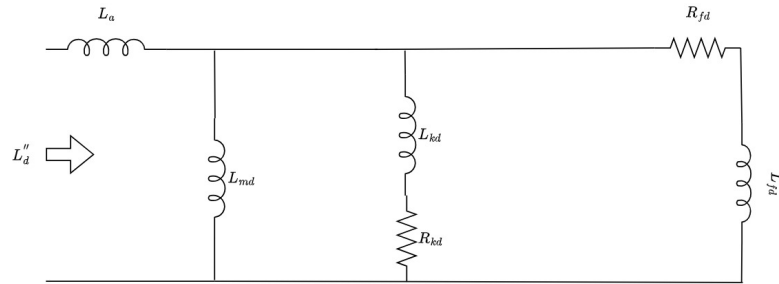


Figura 2.17: Circuito equivalente de eixo direto para o regime subtransitório

Nessa condição de regime subtransitório todas as correntes são diferentes de zero, e por conta disso todo o circuito deve ser considerado. A reatância subtransitória de eixo direto surge a partir da reatância equivalente vista pelos terminais do estator.

$$L_d'' = L_a + \frac{1}{\frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_{kd}} + \frac{1}{L_{fd}}} \quad (2.27)$$

Para encontrar a constante de tempo de eixo direto no curto circuito é necessário visualizar a figura 2.18. A constante de tempo é calculada tendo em vista a constante de tempo RL vista pelo terminais do enrolamento amortecedor, pois no momento subtransitório a impedância principal é o enrolamento amortecedor.

com base no circuito:

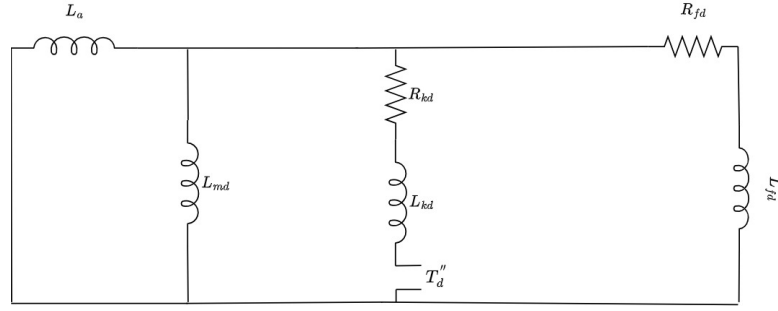


Figura 2.18: Circuito equivalente de eixo direto em curto circuito

$$T_d'' = \frac{L_{keq}}{R_{kd}} \quad (2.28)$$

onde L_{keq} é a indutância equivalente vista pelo ramo do enrolamento amortecedor de eixo direto:

$$T_d'' = \frac{1}{R_{kd}} \cdot \left(L_{kd} + \frac{1}{\frac{1}{L_f} + \frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_a}} \right) \quad (2.29)$$

e para se encontrar a constante de tempo de eixo direto em circuito aberto:

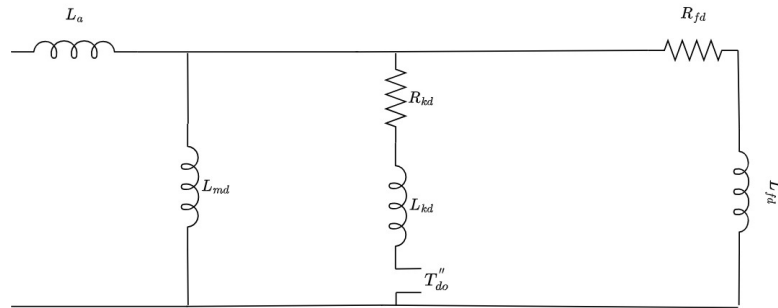


Figura 2.19: Circuito equivalente de eixo direto com os terminais em aberto

$$T_d'' = \frac{1}{R_{kd}} \cdot \left(L_{kd} + \frac{1}{\frac{1}{L_f} + \frac{1}{L_{md}}} \right) \quad (2.30)$$

Por outro lado, para o eixo em quadratura pode-se, analogamente, deduzir:

A partir do circuito equivalente da figura 2.20 pode-se deduzir a reatância subtransi-tório do eixo em quadratura vista nos terminais do estator:

$$L_q'' = L_a + \frac{1}{\frac{1}{L_{mq}} + \frac{1}{L_{kq}}} \quad (2.31)$$

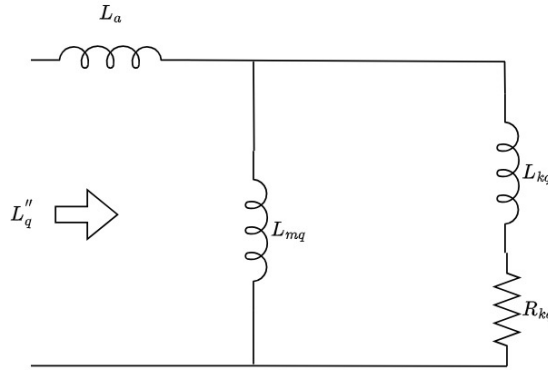


Figura 2.20: Circuito equivalente de eixo em quadratura para o regime subtransitário

e para a constante de tempo subtransitória em quadratura, pode-se deduzir pela figura 2.21:

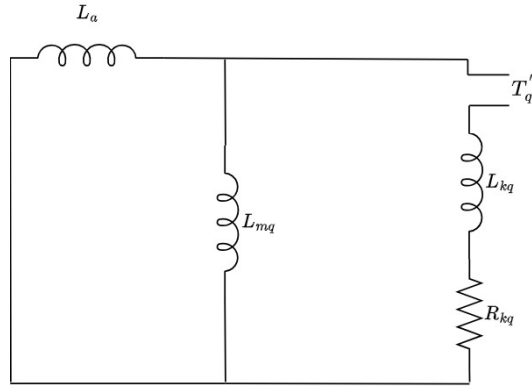


Figura 2.21: Circuito equivalente de eixo em quadratura em curto circuito

$$T_q'' = \frac{L_{kqeq}}{R_{kq}} \quad (2.32)$$

onde L_{kqeq} é a indutância vista pelo ramo do enrolamento amortecedor de eixo em quadratura:

$$T_q'' = \frac{1}{R_{kq}} \cdot \left(L_{kq} + \frac{1}{\frac{1}{L_a} + \frac{1}{L_{mq}}} \right) \quad (2.33)$$

A constante de tempo subtransitória para o eixo em quadratura em circuito aberto é deduzida por:

$$T_{q0}'' = \frac{1}{R_{kq}} \cdot (L_{kq} + L_{mq}) \quad (2.34)$$

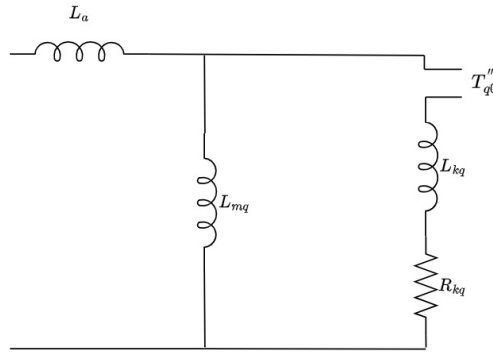


Figura 2.22: Circuito equivalente de eixo em quadratura em curto aberto

2.4.3.2 Período transitório

O período transitório é o período onde já ocorreu uma dissipação das correntes nos amortecedores conforme a figura 2.23. A seguir serão definidas as relações para as reatâncias transitórias e constantes de tempo transitórias para curto circuito e circuito aberto.

Para o eixo direto:

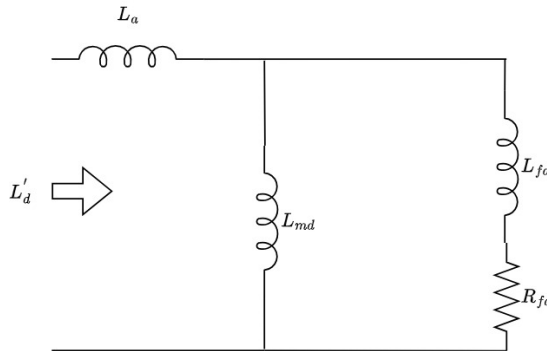


Figura 2.23: Circuito equivalente de eixo direto para o período transitório

Nesse período de tempo já houve uma atenuação nas correntes nos amortecedores, portanto o ramo do enrolamento amortecedor será desconsiderado no modelo.

$$L'_d = L_a + \frac{1}{\frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_{fd}}} \quad (2.35)$$

A constante de tempo transitória em curto circuito pode ser deduzida a partir da análise do circuito equivalente de eixo direto no período transitório ao curto circuitarmos os terminais conforme a figura 2.24.

$$T'_d = \frac{L_{fdeq}}{R_{fd}} \quad (2.36)$$

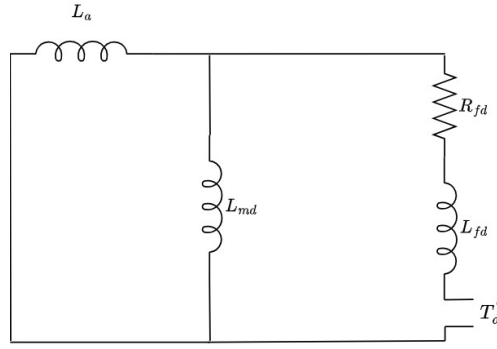


Figura 2.24: Circuito equivalente de eixo direto em curto circuito

Onde L_{fdeq} é a indutância equivalente vista pelo ramo do circuito de campo:

$$T'_d = \frac{1}{R_{fd}} \cdot \left(L_{fd} + \frac{1}{\frac{1}{L_{md}} + \frac{1}{L_a}} \right) \quad (2.37)$$

A constante de tempo transitória em circuito aberto pode ser deduzida a partir da análise do circuito equivalente de eixo direto no período transitório ao mantermos os terminais em circuito aberto conforme a figura 2.25.

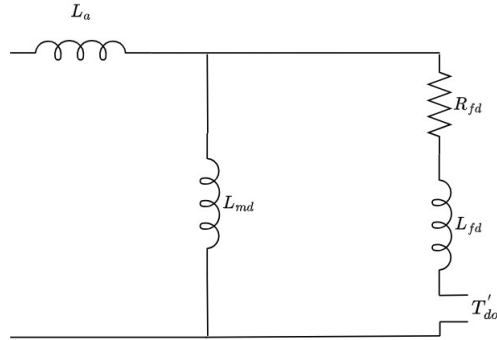


Figura 2.25: Circuito equivalente de eixo direto em aberto

$$T'_{d0} = \frac{L_{fdeq}}{R_{fd}} \quad (2.38)$$

Onde é L_{fdeq} a indutância equivalente vista pelo ramo do circuito de campo:

$$T'_{d0} = \frac{1}{R_{fd}} \cdot (L_{fd} + L_{md}) \quad (2.39)$$

2.4.3.3 Regime permanente

O regime permanente é alcançado quando não há mais variação de fluxo nos enrolamentos amortecedores e de campo.

Para o eixo direto:

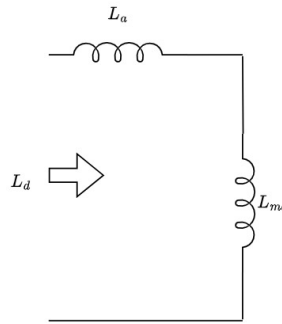


Figura 2.26: Circuito equivalente de eixo direto em regime permanente

$$L_d = L_a + L_{md} \quad (2.40)$$

Para o eixo em quadratura:

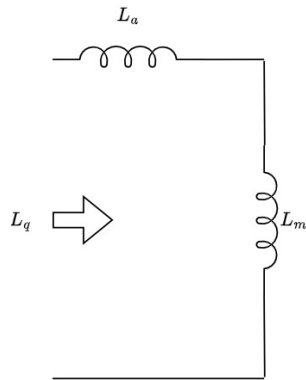


Figura 2.27: Circuito equivalente de eixo em quadratura em regime permanente

$$L_q = L_a + L_{mq} \quad (2.41)$$

Esses valores de reatâncias são fundamentais para a determinação de diversos componentes do sistema, como a capacidade de interrupção de disjuntores. Quando não há abertura instantânea, utiliza-se a reatância subtransitória nos estudos de curto-circuito. Em estudos de estabilidade, por outro lado, aplicam-se as reatâncias transitórias, pois seu objetivo é avaliar se um defeito pode causar a perda de sincronismo do sistema.

Outro parâmetro importante em determinados tipos de análise é a componente de *Corrente contínua* (CC) da onda. Essa componente é uma parte da corrente do estator que resulta em uma onda deslocada ao longo do eixo principal. Ela também influencia as oscilações nas correntes de campo, uma vez que a componente CC estabelece um campo magnético no entreferro que permanece invariante no espaço. Como o rotor gira em velocidade síncrona, isso induz uma corrente de frequência fundamental nos enrolamentos do rotor. A componente CC também decai com o tempo, e essa queda é caracterizada pela constante de tempo de armadura, que representa o tempo necessário para que a componente CC diminua 36,8% de seu valor inicial. Essa constante de tempo pode ser calculada a partir da constante de tempo vista pela armadura:

$$T_a = \frac{L_a''}{R_a} \quad (2.42)$$

Usualmente L_a'' é definido como a média aritmética entre as indutâncias subtransitórias, portanto:

$$L_a'' = \frac{L_d'' + L_q''}{2}$$

$$T_a = \frac{1}{R_a} \left(\frac{L_d'' + L_q''}{2} \right) \quad (2.43)$$

Dessa forma, foram deduzidos os parâmetros operacionais mais importantes para a análise de uma máquina síncrona durante a ocorrência de um curto-circuito. Alguns desses parâmetros também podem ser obtidos através de ensaios laboratoriais, nos quais a máquina opera em vazio, com a tensão de excitação mantida constante, e um curto-circuito trifásico simétrico é aplicado nos seus terminais. Durante este ensaio, as correntes de armadura são monitoradas por meio de oscilogramas. É importante destacar que as constantes de tempo deduzidas neste capítulo são válidas exclusivamente para estudos de curto-circuito trifásicos nos terminais da máquina. Além disso, como o estudo se baseia em uma máquina síncrona de polos lisos, algumas equações serão simplificadas, uma vez que as reatâncias dos eixos direto e quadratura são aproximadamente iguais.

$$L_q \cong L_d = L_a \quad (2.44)$$

2.4.3.4 Equações de curto-circuito trifásico simétrico

O curto-circuito simétrico entre fases, também conhecido como curto-circuito franco, é a modalidade de curto-circuito mais rara em sistemas de potência. No entanto, sua análise é de extrema importância, pois é o defeito mais grave, desencadeando os maiores valores de correntes de armadura e podendo causar instabilidade no funcionamento da máquina. Portanto, o estudo desse tipo de curto-circuito é fundamental, especialmente para o dimensionamento do sistema de proteção, dos equipamentos e materiais. Se um dispositivo for dimensionado para suportar as correntes geradas por esse tipo de falha, certamente ele será capaz de resistir a outros tipos de defeitos sem sofrer danos significativos.

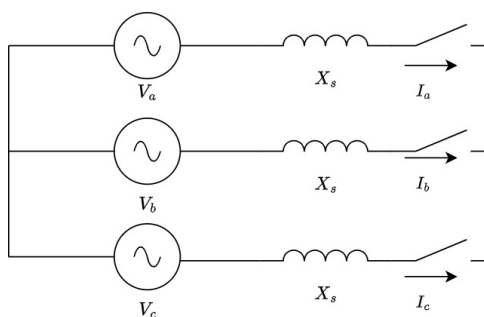


Figura 2.28: Diagrama esquemático de um curto trifásico simétrico franco

No instante em que o curto-circuito é aplicado, as correntes de armadura aumentam drasticamente, o que resulta em uma desmagnetização do estator. Isso ocorre porque o fluxo magnético não pode variar instantaneamente. Com base nesse princípio, e a partir da observação das equações 2.16 e 2.17, percebe-se que as correntes nos enrolamentos amortecedores e de campo devem aumentar de maneira a manter o enlace de fluxo constante naquele momento.

Observamos o mesmo efeito ocorrendo no rotor a partir da observação das equações 2.19 a 2.21. Os enrolamentos precisam “responder” a corrente variante de estator representadas por correntes para contrabalançar o efeito de desmagnetização.

Além das suas componentes de corrente alternada (CA), o curto-circuito também possui uma componente contínua (CC) que depende do valor do fluxo enlaçado em cada fase no momento da ocorrência do curto-circuito, ou seja, depende da posição do rotor no instante em que o curto ocorre. Isso ocorre porque o fluxo enlaçado por cada fase é uma função da posição do rotor. Por exemplo, se o curto-circuito ocorrer em um instante em que o fluxo enlaçado pela fase *a* for nulo, então não haverá componente CC nessa fase, restando apenas a componente CA. Esse efeito pode ser observado na figura B.1 (b).

Tendo como base as equações 2.13 a 2.17, e considerando a máquina em vazio com velocidade constante após a ocorrência do curto, podemos definir a componente CA das correntes de armadura nos eixos direto e quadratura na ocorrência de um curto-circuito trifásico nos terminais de um gerador, conforme mostrado em [25]:

$$I_a = \sqrt{2}E_{afo} \left(\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right) \cdot \cos(\omega t + \theta_0) \quad (2.45)$$

Onde:

E_{afo} é a tensão eficaz de armadura pré-falta.

θ_0 é a posição do rotor no instante de falta.

A componente CC do defeito, superposta à componente CA decai em função de seu valor inicial e da constante de tempo de armadura.

$$i_{cc} = i_{cco} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (2.46)$$

onde: i_{cc} é a componente CC da corrente de defeito;

$icc0$ é o valor inicial da componente CC da corrente de defeito;

Dessa forma está concluída a teoria geral da máquina síncrona e seu comportamento na ocorrência de uma falta trifásica simétrica.

2.4.3.5 Equações dinâmicas do gerador síncrono

A equação que descreve o movimento do rotor de uma máquina síncrona está baseada no princípio elementar da dinâmica que diz ser o torque de aceleração igual ao produto do momento de inércia do rotor pela sua aceleração angular [22]. Esta equação pode ser escrita para geradores na forma:

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + D \frac{d\theta_m}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (2.47)$$

onde θ_m é o deslocamento angular do rotor com respeito a um eixo estacionário, em radianos mecânico, t é o tempo em segundos, T_m é o torque do eixo ou torque suprido pela máquina primária menos o torque de retardo devido às perdas rotacionais em N.m, T_e é o torque elétrico ou eletromagnético resultando em N.m, T_a é o torque de aceleração

resultante em N.m, D é o coeficiente de amortecimento e J é o momento de inércia.

Em um sistema equilibrado sem nenhum distúrbio, tem-se que:

$$T_e = T_m$$

sabendo que $P = w.T$ e desconsiderando as perdas rotacionais, tem-se:

$$T_e w_s = T_m w_s$$

$$T_e w_s - T_m w_s = P_e - P_m = 0$$

Portanto, pode-se reescrever a equação 2.47 da seguinte forma:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + D \frac{d \theta_m}{dt} = P_a = P_e - P_m \quad (2.48)$$

deste forma ficará mais conveniente para mensurar a posição angular do rotor em relação a rotação síncrona de referência, pois:

$$\delta = \theta_e - w_s.t$$

sendo que $\frac{d^2 \theta_e}{dt^2} = \delta$, onde δ é a aceleração angular em *radianos/seg²*.

O torque mecânico T_m e o torque elétrico T_e são considerados positivos para um gerador síncrono. Isto significa que o torque mecânico é o torque resultante no eixo do motor que tende a acelerar o rotor no sentido positivo da rotação θ_m como indicado na figura 2.29. Onde, P_m é a potência mecânica de entrada e P_e é a potência elétrica de saída.

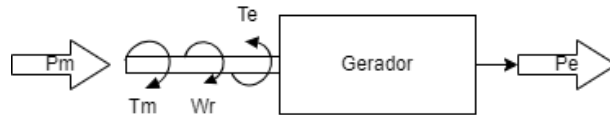


Figura 2.29: Diagrama esquemático de um gerador

Durante um curto-circuito há uma torque eletromagnético no sentido de desaceleração no gerador, ou seja, $P_m - P_e \neq 0$. Pode-se modelar essa desaceleração, matematicamente, realizando o mesmo conceito aplicado em sistemas de estabilidades em potência em dis-

túrbios e desconsiderando o coeficiente de amortecimento.

A energia cinética de um rotor é proporcional ao produto de momento de inércia do rotor, J em $kg.m^2$, e da velocidade angular média do rotor, w em $rads/s$:

$$E_c = \frac{1}{2} J w^2 \quad (2.49)$$

A energia cinética do rotor demonstrada na equação 2.49 pode ser escrita, sabendo que:

$$w_e = \left(\frac{P}{2}\right).w \quad (2.50)$$

Onde,

w é a velocidade do rotor em radianos/seg

w_e é a velocidade do rotor em radianos elétricos

P é o número de polos

Substituindo 2.50 em 2.49, tem-se:

$$E_C = \frac{1}{2} J \left(\frac{P}{2}\right)^2 . w_e^2$$

$$E_C = \left(\frac{1}{2}\right) \left[J \left(\frac{2}{P}\right)^2 w_e * 10^{-6} \right] w_e \quad (2.51)$$

Onde o momento de inércia em $MJ.seg/radianos.eletrico$, nesse caso será:

$$M = \left[J \left(\frac{2}{P}\right)^2 w_e * 10^{-6} \right] \quad (2.52)$$

sendo assim, a potência trifásica em MVA da máquina pode ser calculada da seguinte forma:

$$S_{3f}.H = E_C = \frac{1}{2} M w_e \quad (2.53)$$

onde H é constante de inércia em MJ/MVA ou $MW.segundo/MVA$ e S_{3f} é a potência trifásica em MVA da máquina.

pode-se reescrever a equação 2.52 em função da constante de inércia,

$$M = \frac{2S_{3f}H}{w_e} = \frac{2S_{3f}H}{2\pi \cdot f} = \frac{S_{3f}H}{\pi \cdot f} = \frac{S_{3f}H}{180 \cdot f} (MJ.seg/radianos.eletricos) \quad (2.54)$$

Por fim, as equações dinâmicas de torque para os casos de curto-circuito foram apresentadas. Essas equações serão utilizadas nos próximos capítulos para determinar o valor de inércia, de modo que a desaceleração devido ao curto-circuito seja limitada ao maior nível possível de corrente de curto nos terminais da máquina.

2.5 Enrolamento de campo

O enrolamento de campo de um gerador síncrono desempenha um papel essencial na geração de energia elétrica, sendo responsável por criar o campo magnético necessário para a conversão de energia mecânica em elétrica. Esse campo magnético é gerado pelo fluxo de corrente elétrica através do enrolamento de campo, e sua estabilidade é mantida por um sistema de controle, geralmente um regulador de tensão automático (AVR, sigla em inglês para Automatic Voltage Regulator). O desempenho e a eficiência do gerador síncrono dependem diretamente da qualidade e da configuração desse enrolamento, influenciando fatores como a tensão, a frequência e a estabilidade da saída de energia elétrica.

Além disso, existe um conceito relevante, porém pouco conhecido, chamado "Superexcitação". Esse fenômeno está relacionado a condições em que o sistema de excitação do gerador é ajustado para operar além de suas condições normais, resultando em um aumento da tensão gerada. A superexcitação pode ser útil em situações específicas, mas também exige cuidados no seu gerenciamento para evitar danos ao sistema ou perdas de eficiência.

Nesta seção, exploraremos os princípios de controle e excitação do enrolamento de campo, o papel que ele desempenha no funcionamento de um gerador síncrono e considerações importantes para seu projeto. Também será abordado o conceito de superexcitação, suas aplicações e implicações práticas.

2.5.1 Excitador e o sistema AVR

O AVR atua sobre a tensão contínua V_f que alimenta o enrolamento de excitação dos geradores síncronos, um exemplo é apresentado na figura 2.30. A variação da corrente

de campo no gerador síncrono aumenta ou diminui a tensão induzida (tensão em vazio); assim, finalmente, para uma carga específica, a tensão do gerador é controlada conforme necessário. O sistema de excitação de um gerador síncrono contém o excitador e o AVR.

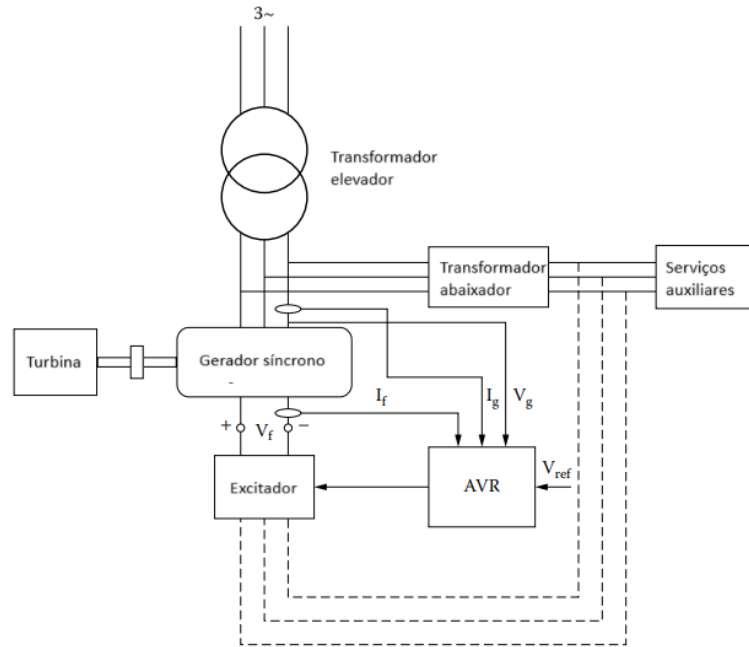


Figura 2.30: Excitador com sistema AVR

O excitador é, na verdade, a fonte de alimentação que fornece energia controlada para o enrolamento de excitação (campo) dos geradores síncronos. Como tal, os excitadores podem ser classificados da seguinte forma:

- Excitadores CC
- Excitadores CA
- Excitadores estáticos

Já que o estudo será apenas baseado no excitador estático, será abordado na fundamentação teórica apenas os excitadores estáticos.

2.5.1.1 Excitador Estático

As centrais elétricas modernas são equipadas com grupos de energia de emergência para serviços auxiliares que podem ser usados para iniciar o antigo sistema a partir de uma queda de energia. Portanto, um sistema de energia auxiliar geralmente está disponível. Essa tendência deu lugar aos excitadores estáticos, principalmente na forma de retificadores

controlados que fornecem diretamente a alimentação para o enrolamento de campo do gerador síncrono através de anéis coletores e escovas conforme as figuras 2.31 e 2.32. O transformador de excitação é necessário para adaptar a tensão da fonte de energia auxiliar ou dos terminais do gerador síncrono da figura 2.31.

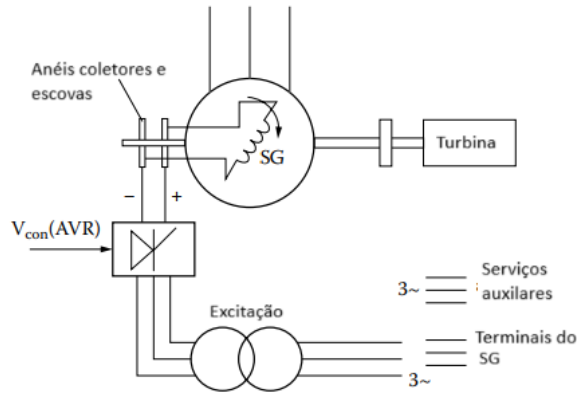


Figura 2.31: Excitador CA - Alimentação de tensão

Também é viável alimentar o retificador controlado a partir de um transformador de tensão (VT) e um transformador de corrente (CT) combinados conectados em paralelo e em série com os enrolamentos do estator do gerador síncrono demonstrado na figura 2.32. Essa solução fornece um tipo de estabilização básica de tensão alternada nos terminais de entrada do retificador. Dessa forma, curtos-circuitos ou quedas de tensão nos terminais do gerador síncrono não influenciam muito a tensão de excitação produzida pelo retificador controlado [27].

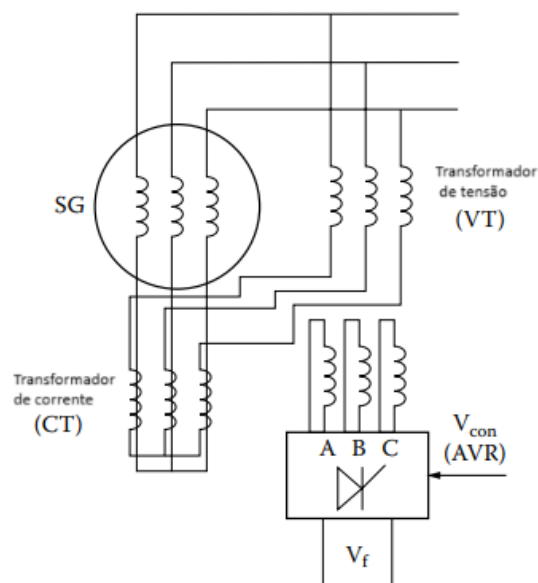


Figura 2.32: Excitador CA - Alimentação de tensão e corrente

Para lidar com o rápido controle da corrente de excitação do gerador síncrono, esta última deve ser forçada por uma sobretensão disponível para ser aplicada ao enrolamento de campo. A relação de teto de tensão (V_{fmax}/V_{frated}) caracteriza o excitador. Os excitadores de eletrônica de potência (estáticos) são caracterizados por uma resposta rápida de tensão, mas ainda assim a constante de tempo T'_d do gerador síncrono atrasa a resposta da corrente de campo. Consequentemente, é necessária uma alta tensão de teto para todos os excitadores.

Para aproveitar com perdas mínimas os excitadores estáticos, dois retificadores controlados separados podem ser usados, um para "estado estacionário" e outro para forçar o campo conforme a figura 2.33. Há uma chave que deve ser mantida aberta a menos que o retificador de campo forçado (com tensão mais alta) precise ser colocado em funcionamento. Quando V_{fmax}/V_{frated} é significativamente maior que dois, tal solução pode ser considerada.

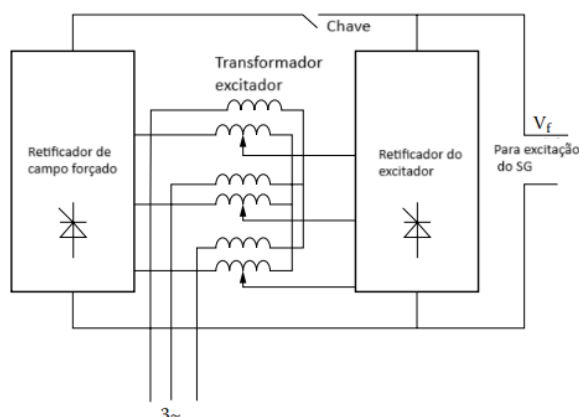


Figura 2.33: Excitador estático com retificador dual

O desenvolvimento de conversores moduladores de largura de pulso (PWM) IGBT de até 3 MVA por unidade (para acionamentos elétricos) em baixas tensões (690 V em CA, tensão de linha) permite novos excitadores estáticos eficientes e de menor volume. Os retificadores controlados por tiristores na figura 2.33 podem ser substituídos por retificadores de diodo mais conversores IGBT DC-DC na figura 2.34.

Alguns desses conversores CC-CC de quatro quadrantes podem ser paralelizados para atender ao nível de potência necessário para a excitação de geradores síncronos na faixa de centenas de MVA por unidade. A transmissão de toda a potência de excitação através de anéis coletores e escovas ainda permanece como um problema. No entanto, com os geradores de indução duplamente alimentados de hoje em dia com 400 MVA por unidade, 30 MVA são transmitidos para o rotor através de anéis coletores e escovas. Assim, a

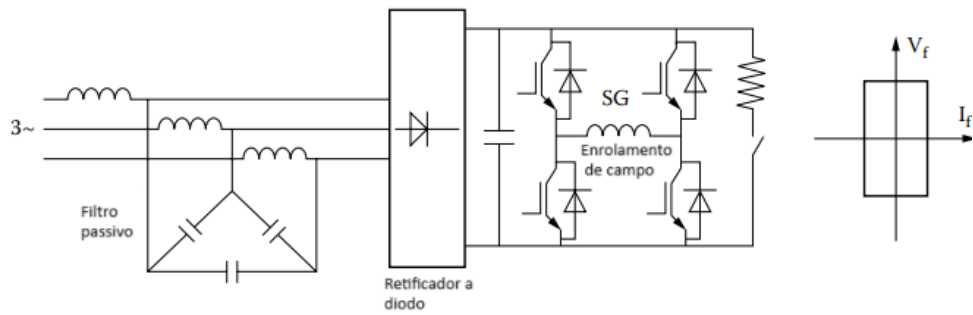


Figura 2.34: Retificador a diodo e conversor CC-CC de quatro quadrantes como excitador estático.

solução está aqui para as classificações de potência bastante inferiores dos excitadores (menos de 3 a 4% da classificação do gerador síncrono).

O excitador estático, chopper, de quatro quadrantes possui as seguintes características:

- Produz uma resposta rápida de corrente com um menor ripple na corrente do enrolamento de campo do gerador síncrono;
- Pode lidar com correntes de campo positivas e negativas que podem ocorrer durante transientes como resultado de transientes de corrente do estator;
- As correntes de entrada CA (na frente do retificador de diodo) são quase senoidais (com filtragem adequada), enquanto o fator de potência é próximo de um, independentemente da carga (corrente de campo);
- A resposta de corrente é ainda mais rápida do que com retificadores controlados.

Os excitadores estáticos, atualmente, são os mais utilizados em novos projetos de geradores de curto-circuito. Sua utilização se dá pela flexibilidade de controle e pela vantagem de descartar mais uma máquina rotativa no mesmo eixo do gerador de curto. Além disso, uma importante vantagem é a resposta transiente mais rápida do que os excitadores rotativos, que é fundamental para esse tipo de aplicação [29]. Portanto, para alcançar o objetivo do estudo será utilizado uma modelagem de excitador estático que será modelado no capítulo seguinte.

2.5.2 Modelagem de sistemas de excitação

O diagrama geral de blocos funcionais mostrado na figura 2.35 indica vários subsistemas de excitação de máquinas síncronas. Esses subsistemas podem incluir um transdutor de

tensão terminal e um compensador de carga, elementos de controle de excitação, um excitador e, em muitos casos, um estabilizador de sistema de energia. O controle de excitação suplementar descontínuo também pode ser utilizado. Modelos para todas essas funções são apresentados na norma IEEE 421.5 que trata sobre exemplos de controle práticos [30].

As condições terminais da máquina síncrona, usadas como entradas para os diferentes subsistemas mostrados na figura 2.35 (por exemplo, V , I , P , Q , pf , VSI), geralmente são medidas ou calculadas a partir dos sinais do transformador de potencial e corrente do gerador no sistema de excitação. Neste padrão, esses valores são considerados como os componentes de frequência fundamental de sequência positiva (medições de fasor) associados a essas quantidades.

Os elementos de controle de excitação incluem tanto funções de regulação quanto de estabilização de excitação. Os termos estabilizador do sistema de excitação e redução transitória de ganho são usados para descrever circuitos em vários dos modelos abrangidos pelos "elementos de controle de excitação" na figura 2.35 que afetam a estabilidade e a resposta desses sistemas.

Recentemente, a modelagem de limitadores de corrente de campo tornou-se cada vez mais importante em que é descrito como limitadores de sobreexcitação e subexcitação (OELs e UELs), respectivamente, e a adição de limitadores de corrente de estator (SCLs). Os modelos individuais de sistemas de excitação nesta prática recomendada mostram como os sinais de saída de tais limitadores (VOEL, VUEL e VSCL) seriam normalmente conectados [30].

A saída dos modelos de OEL e UEL pode ser recebida como entrada para o sistema de excitação (VOEL e VUEL) em várias localizações, seja como uma entrada de soma ou como uma entrada controlada; no entanto, para qualquer aplicação do modelo de sistema de excitação, apenas uma conexão para o sinal VOEL e uma conexão para a conexão VUEL seriam usadas.

Semelhante aos modelos de OEL e UEL, o modelo de SCL pode representar tanto um ponto de soma quanto uma ação de tomada. Mas, ao contrário dos modelos de OEL e UEL, o modelo de SCL deve definir o sinal VSCLsum ao representar uma ação de ponto de soma, mas deve definir dois sinais, VSCLoel e VSCLuel, ao representar uma ação de tomada. Na implementação de todos os modelos, deve-se fazer provisão para lidar com valores zero de parâmetros. Para alguns valores zero, pode ser apropriado ignorar blocos inteiros de um modelo. Como já foi introduzido os tipos de excitadores, esta seção

Para muitos dos sistemas estáticos, a tensão máxima do excitador é muito alta. Para tais sistemas, circuitos adicionais de limitadores de corrente de campo podem ser usados para proteger o excitador e o rotor do gerador. Esses frequentemente incluem elementos tanto instantâneos quanto com retardo de tempo, então os modelos definidos na versão anterior desta prática recomendada foram atualizados para fornecer maior flexibilidade em relação à conexão de tais limitadores.

Há inúmeros tipos de modelos de excitadores existentes do tipo ST na norma, indo do ST1 ao ST9 [31]. O modelo ST2 representa o sistema de excitação retificador de fonte composta. Este sistema de excitação utiliza tanto a tensão quanto a corrente do gerador. Em circuito aberto, a tensão do terminal do gerador é utilizada para fornecer energia de excitação. No caso de um curto-circuito (falta trifásica), cenário em que o modelo ST1 é incapaz de fornecer de forma eficiente tensão de sobre-excitação para compensar a reação de armadura devido ao controle só controlar uma variável do sistema, já o modelo ST2 tem a capacidade de forçar o campo utilizando a corrente como entrada [32]. Portanto, o modelo ST2 é o mais funcional para o caso em estudo, pois ele considera uma fonte que precisa ser monitorado tanto a corrente quanto a tensão (terminal do gerador) para compor a fonte de energia.

O modelo ST2C é modelado conforme mostrado na figura 2.36. É necessário formar um modelo da fonte de energia do excitador utilizando uma combinação de fasores da tensão do terminal (V_T) e da corrente do terminal (I_T). O parâmetro E_{FDmax} representa o limite da tensão do excitador devido à saturação dos componentes magnéticos. O regulador controla a saída do excitador por meio da saturação controlada dos componentes do transformador de potência. A constante de tempo, T_E , está associada à indutância dos enrolamentos de controle. O diagrama de blocos mostrado na Figura 2.36 foi modificado, em comparação com o diagrama de blocos ST2A definido desta prática recomendada, para incluir as conexões apropriadas para ponto de soma ou limitadores de sobre excitação de takeover, parâmetros adicionais na representação da fonte de energia, tornando o modelo da fonte de energia igual ao que é usado em outros modelos nesta prática recomendada, e a adição de um bloco de controle PI que permitiria a representação de equipamentos com um controlador digital [31, 33].

Onde,

V_c é a Tensão nos terminais de saída do gerador;

V_{ref} é a tensão de referência desejada;

Tabela 2.3: Parâmetros do controle do excitador

Descrição	Símbolo
Ganho do regulador de tensão	K_a
Constante de tempo do regulador de tensão	T_a
Máxima saída do regulador	V_{rmax}
Mínima saída do regulador	V_{rmin}
Ganho do feedback	K_F
Constante de tempo do feedback	T_F
Constante proporcional do excitador de campo	K_e
Constante de tempo do excitador de campo	T_e
Maxima tensão de campo	Efd_{max}
Constante proporcional do controle PI	K_{PR}
Constante de tempo do controle PI	K_{IR}
Ganho proporcional de carga do retificador a reatância de comutação	K_C
Ganho do circuito de tensão	K_p
Ganho do circuito de corrente	K_i
Reatância associada a fonte de potência	X_L

2.5.3 Conceito de superexcitação

Para a aplicação de um gerador de curto-circuito em um laboratório, é necessário o uso de uma tecnologia que permita sustentar a corrente de curto-circuito durante todo o tempo de aplicação. Caso fosse aplicado um curto-circuito em um gerador convencional próximo à carga, haveria uma queda de tensão ao longo do curto-circuito, tendendo a tensão a zero, devido à reação de armadura. Para compensar essa reação e manter a corrente sustentada, é necessária uma sobre-excitação no enrolamento de campo. Portanto, o uso da sobre-excitação é crucial no projeto de um gerador de curto-circuito.

A superexcitação pode ser aplicada por meio de um pequeno gerador CC ligado ao enrolamento de campo do gerador de curto-circuito [34], um pequeno gerador CA com retificador também ligado ao enrolamento de campo, ou um sistema AVR que utiliza um transformador para alimentar um retificador controlado a tiristor [29]. Dentre essas opções, o sistema mais utilizado é o estático, que emprega um retificador controlado a tiristor alimentado por um transformador, devido às evoluções tecnológicas.

2.5.3.1 Desmagnetização por efeito de armadura

Uma concisa revisão de um fenômeno transitório de curto circuito foi apresentado nas seções anteriores. Pode-se escrever a equação do terminal de tensão de um curto circuito como:

$$V_a = -R_a \cdot i_a - j \cdot X_s \cdot I_a + e_a \quad (2.55)$$

Onde e_a representa a tensão induzida na armadura do gerador e V_a representa a tensão nos terminais do gerador.

Como os curto-circuitos apresentam níveis de corrente muito mais altos em relação à corrente nominal, há uma maior queda de tensão na impedância, além de uma desmagnetização devido à reação de armadura. Como consequência, ocorre uma redução significativa da tensão.

Geradores de curto-circuito possuem baixos valores de reatância síncrona e resistência de armadura quando comparados a geradores convencionais [35]. Isso provoca uma constante de tempo subtransitória, T_d'' , extremamente baixa. O aumento na magnitude da corrente no período subtransitório pode ser facilmente observado na figura 2.15. Embora a figura mostre um curto-circuito distante do gerador síncrono, neste caso, para o gerador fictício, a corrente de armadura não seria suficiente para causar uma desmagnetização considerável do núcleo. No entanto, para curto-circuitos nos terminais do gerador ou bem próximos a eles, a influência da desmagnetização é muito mais significativa. Portanto, logo ocorre uma diminuição na corrente ao longo do curto-circuito. O efeito da reação de armadura é totalmente desmagnetizante, uma vez que o fator de potência é quase zero. Contudo, deseja-se manter a corrente sustentada para atender aos requisitos dos ensaios, que podem durar algumas centenas de milissegundos. Durante o curto-circuito, pode ser necessário manter a tensão de recuperação igual à tensão aplicada antes do curto-circuito, especialmente em testes de disjuntores. Portanto, a superexcitação é necessária para compensar o efeito da reação de armadura [29].

2.5.3.2 Modelagem matemática da superexcitação no curto-circuito

Até agora, consideramos apenas um curto-circuito em um circuito em estado estacionário no enrolamento de campo. No entanto, para o caso em estudo, é necessário um controle dinâmico no enrolamento de campo. Como exemplo, trataremos do curto-circuito com excitação de impulso. Esse caso ocorre na prática durante o teste de capacidade de desligamento de disjuntores de alta potência.

A figura 2.37 mostra o princípio do circuito utilizado para aplicações de sobre-excitação. As chaves S1, S2 são controladas por um dispositivo especial de tal forma que a chave S1 fecha primeiro curto circuitando o resistor R_s e logo em seguida um disjuntor S_2 conecta o gerador ao curto-circuito. Um certo tempo (aproximadamente 10 períodos) depois, S_2 é aberta e deve abrir o curto-circuito. A tensão do excitador é escolhida de modo que, com o resistor R_s ligada em série com a resistência de enrolamento de campo R_f , uma corrente

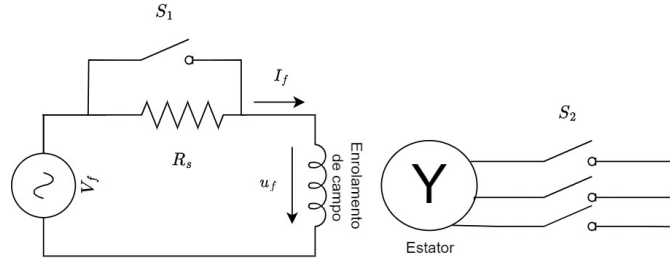


Figura 2.37: Diagrama do circuito de superexcitação

de campo aproximadamente igual à corrente de campo a vazio fluísse. Nesse caso, a tensão no campo é U_{fo} . Após o fechamento da chave S_1 , ela aumenta repentinamente para o valor $[\frac{(R_s+R_f)}{R_f}].U_{fo} = \rho.U_{fo} = \rho.I_{fdo}$. O fator $\rho = [\frac{(R_s+R_f)}{R_f}]$ é chamado de fator de excitação de impulso, total fator se trata de um fator de pré-excitação antes do curto-circuito. Como estamos interessados apenas no essencial aqui, negligenciamos a pequena diferença de tempo (cerca de 2 períodos) entre o fechamento de S_1 e S_2 [24]. Assim, assumimos o mesmo momento de comutação para ambos. Como o gerador está funcionando a vazio antes do curto-circuito, ou seja, mesmas condições aplicadas no apêndice B, obtêm-se as equações 2.56 e 2.57 no domínio da frequência(s).

$$\Psi_d + I_{fo} = i_d.x_d(s) - (\rho - 1).i_{fo}.G_f(s) \quad (2.56)$$

$$\Psi_q = i_q.x_q(s) \quad (2.57)$$

Sabendo que,

$$\Psi_q = \frac{s}{s^2 + 1}.I_{fo} \quad (2.58)$$

$$\Psi_d = -\frac{s^2}{s^2 + 1}.I_{fo} \quad (2.59)$$

Portanto,

$$i_d = i_{f0} \left(\frac{1}{(s^2 + 1).x_d(s)} + (\rho - 1). \frac{G_f(s)}{X_d(s)} \right) \quad (2.60)$$

$$i_q = i_{f0} \left(\frac{s}{(s^2 + 1).X_q(s)} \right) \quad (2.61)$$

Para i_q , obtemos exatamente a mesma expressão que antes na equação B.7. Não há necessidade de nos aprofundar mais nisso. i_d aparece como a soma do termo i_{d1} encontrado anteriormente sem superexcitação, de acordo com a equação B.5, e de um novo termo i_{d2} , que resulta da superexcitação. Por fim, substituindo $x_d(s)$ pela equação B.1 e $G_f(s)$ pela equação B.3, esse segundo termo se torna:

$$i_{d2} = i_{f0} (\rho - 1) \frac{B_f}{x_d''} \cdot \frac{s + \gamma_f}{(s + \beta_{d1})(s + \beta_{d2})}$$

$$i_{d2} = i_{f0}(\rho - 1) \left[\frac{1}{x_d} - \left(\frac{1}{x_d} \frac{\beta_{d2}}{\beta_{d2} - \beta_{d1}} - \frac{1}{x_d''} \frac{B_f}{\beta_{d2} - \beta_{d1}} \right) e^{-\beta_{d1}t} \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{x_d} \frac{\beta_{d1}}{\beta_{d2} - \beta_{d1}} - \frac{1}{x_d''} \frac{B_f}{\beta_{d2} - \beta_{d1}} \right) e^{-\beta_{d2}t} \right] \quad (2.62)$$

Na prática, o fator $e^{-\beta_{d1}t}$ é aproximadamente igual a $\frac{1}{x_d}$, enquanto o fator $e^{-\beta_{d2}t}$ é muito pequeno (da ordem de $0,01 \frac{1}{x_d}$). Portanto, pode-se escrever uma aproximação da equação 2.62:

$$i_{d2} = \frac{i_{f0}(\rho - 1)}{x_d} \cdot (1 - e^{-\beta_{d1}t}) \quad (2.63)$$

Se adicionar essa expressão a i_{d1} de acordo com a equação B.5 obtêm-se:

$$i_d = i_{fo} \left[\frac{\rho}{x_d} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{\rho}{x_d} \right) e^{-\beta_{d1}t} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\beta_{d2}t} - \frac{1}{x_d''} \cdot \cos(t) e^{-\alpha_r t} \right] \quad (2.64)$$

Então, fica claro que a superexcitação basicamente aumenta o valor da corrente de curto-circuito permanente para ρ vezes. Se ρ for definido como a razão $\frac{x_d'}{x_d}$, então a corrente de curto-circuito de impulso desaparece; a parte de corrente alternada da corrente de curto-circuito permanece constante desde o início, exceto pela contribuição da componente transitória. O momento de comutação para o disjuntor S2 é determinado de modo que a corrente assimétrica tenha diminuído para uma pequena fração de seu valor inicial. Além da corrente alternada no momento do fechamento, conforme obtida pela equação 2.64, a tensão recorrente que aparece entre os contatos que se separam é determinante para a suportabilidade dielétrica do disjuntor. A corrente após a equação 2.64 não se interrompe abruptamente. Imediatamente após a abertura dos contatos do disjuntor, um arco elétrico surge entre os contatos do disjuntor, através do qual uma corrente

gradualmente decrescente continuará a fluir. O curso exato desse processo depende da construção do disjuntor e, em parte, também de fatores aleatórios [36].

2.5.3.3 Compensação de reação de armadura

Conforme estudado nas seções anteriores, a superexcitação em um gerador de curto-circuito tem o objetivo de compensar a reação de armadura. Este comportamento pode ser verificado através das equações 2.13 e da equação 2.14, que mostram que as tensões nos eixos direto e em quadratura são proporcionais aos fluxos magnéticos. Durante um curto-circuito, a reação de armadura reduz drasticamente o fluxo, causando uma queda abrupta na tensão. Este evento é ilustrado na figura 2.16. Para compensar essa reação, é aplicado um degrau no controle de tensão do enrolamento de campo, fazendo com que a corrente de campo aumente consideravelmente e, conseqüentemente, que o fluxo magnético também aumente proporcionalmente.

O evento de um curto-circuito convencional nos terminais de um gerador síncrono pode ser visualizado nas figuras 2.38. Observa-se que a tensão nos terminais diminui ao longo do curto-circuito devido à desmagnetização, o que faz com que a corrente de armadura, também diminua proporcionalmente. A tensão nominal constante de 1 pu no enrolamento de campo, indicando a ausência de controle de superexcitação. Portanto, nesse caso, durante o evento de curto-circuito com o controle convencional, ocorre a desmagnetização do gerador, resultando em uma queda de tensão por reação de armadura e na redução proporcional da corrente.

Por outro lado, durante um evento de curto-circuito nos terminais de um gerador síncrono com controle de superexcitação, o comportamento é diferente. Esse comportamento pode ser visualizado nas figuras 2.39. A tensão se mantém ao longo do curto-circuito, evitando a queda de tensão causada pela reação de armadura. Isso ocorre porque um degrau de tensão no enrolamento de campo mantém a tensão de armadura constante e, como resultado, a corrente de armadura é mantida constante durante todo o evento.

Com base no conteúdo apresentado no capítulo 2, pode-se concluir que:

O capítulo 2 fornece uma fundamentação teórica abrangente sobre geradores de curto-circuito e seus componentes essenciais. Inicialmente, é apresentada uma visão geral das aplicações existentes de geradores de curto-circuito em laboratórios de alta potência ao redor do mundo, destacando sua importância e utilização.

Em seguida, o capítulo aborda uma análise técnico-econômica, explorando as confi-

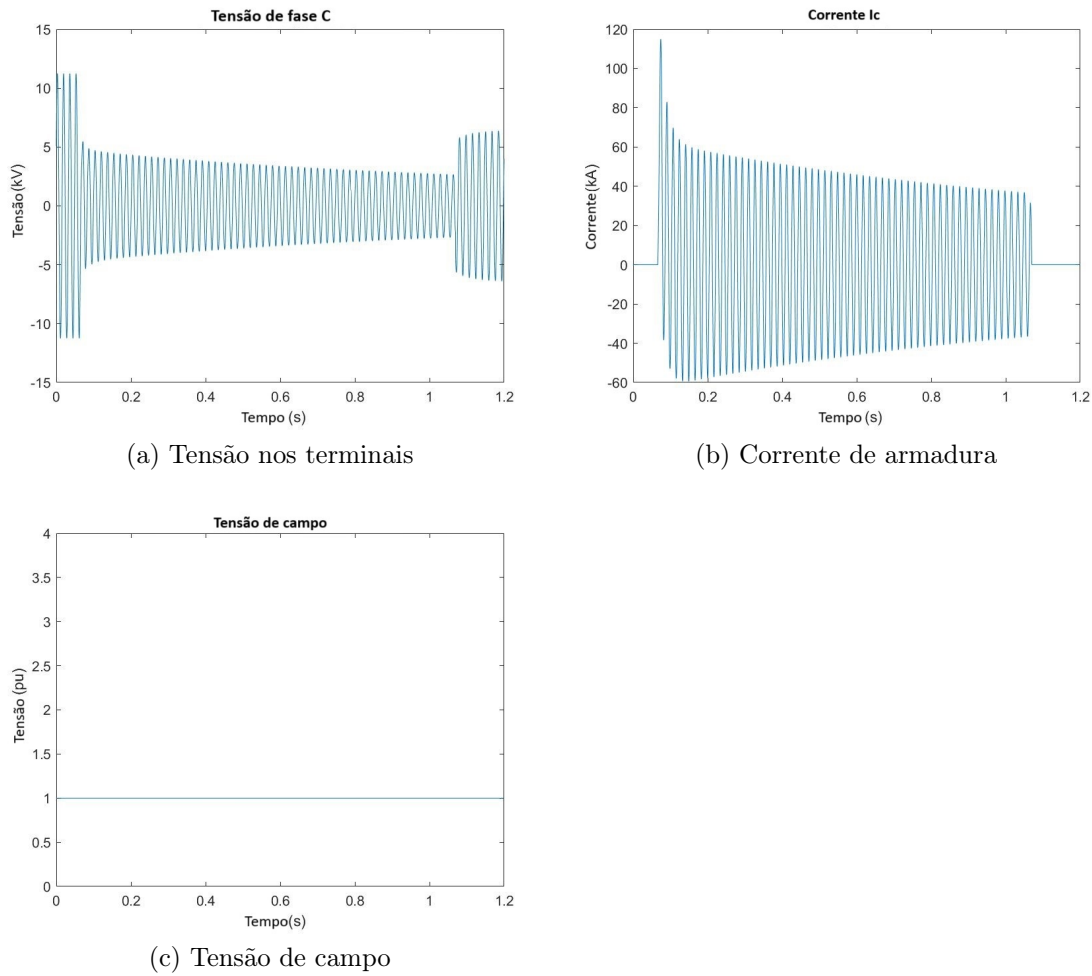


Figura 2.38: Evento de um curto-circuito convencional com tensão de campo constante

gurações possíveis para a implementação de um gerador de curto-circuito no laboratório do CEPEL. São discutidas as vantagens e desvantagens de diferentes arranjos, incluindo o uso de transformadores de curto-circuito em conjunto com o gerador.

O capítulo aprofunda-se na teoria das máquinas elétricas, com foco específico nos geradores síncronos. São apresentados os princípios de construção, modelagem matemática e comportamento durante condições de curto-circuito. Especial atenção é dada à análise dos períodos subtransitório, transitório e de regime permanente durante um evento de curto-circuito.

Um aspecto crucial abordado é o enrolamento de campo e seu sistema de excitação. O capítulo detalha os diferentes tipos de excitadores, com ênfase nos excitadores estáticos, que são os mais adequados para aplicações em geradores de curto-circuito. A modelagem de sistemas de excitação é discutida, apresentando o modelo ST2C como uma opção viável para o controle do gerador de curto-circuito.

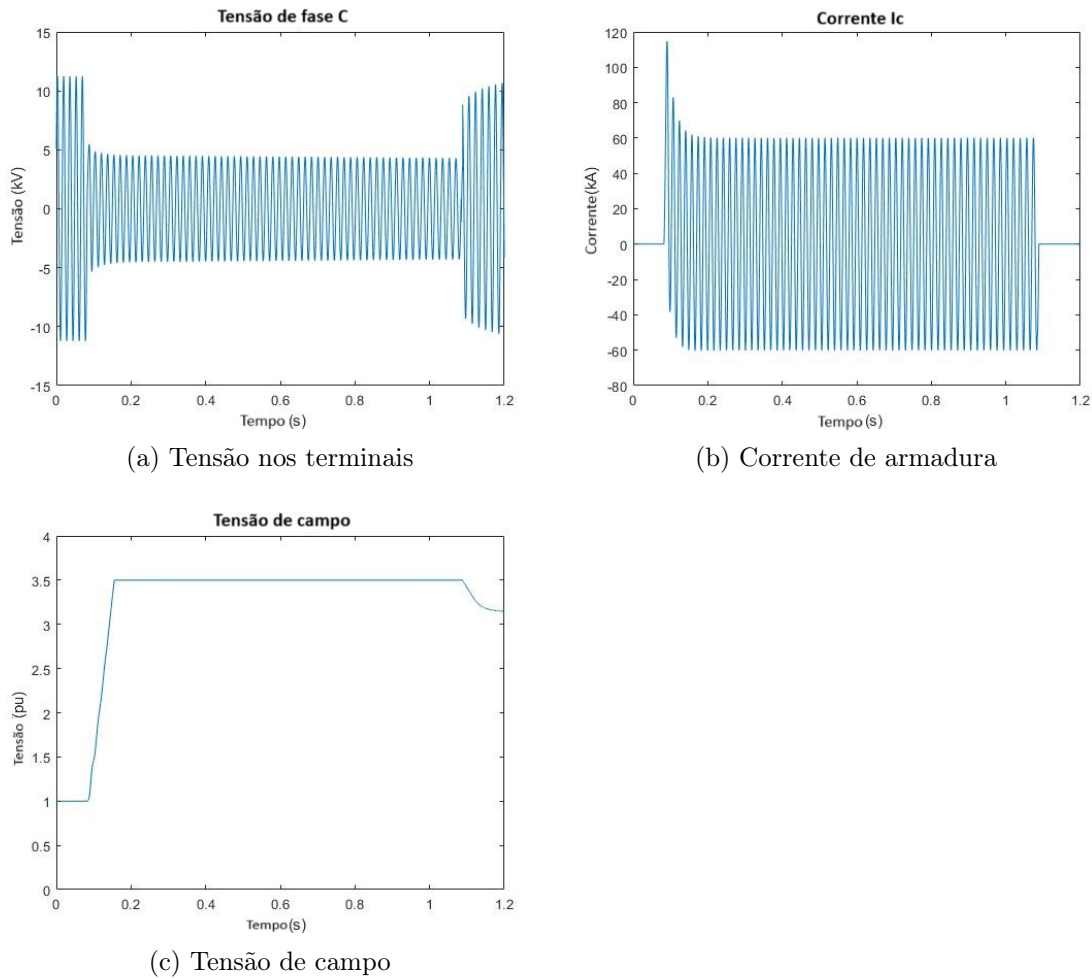


Figura 2.39: Evento de um curto-circuito com superexcitação

Por fim, o capítulo introduz o conceito de superexcitação, fundamental para a operação de geradores de curto-circuito. Este conceito é explorado tanto do ponto de vista teórico quanto prático, demonstrando como a superexcitação pode compensar a reação de armadura e manter a corrente de curto-circuito sustentada durante os ensaios.

Esta fundamentação teórica estabelece as bases necessárias para a compreensão do funcionamento e modelagem de um gerador de curto-circuito, preparando o terreno para as simulações e análises práticas que serão apresentadas nos capítulos subsequentes.

Capítulo 3

Modelagem do sistema gerador de curto-circuito

Essa seção tem o objetivo de fornecer a descrição de como foi desenvolvido o modelo do gerador de curto-circuito em estudo no software de transitórios PSCAD/EMTDC. Será introduzido o modelo de gerador a ser utilizado e, posteriormente, é detalhado os parâmetros elétricos do gerador que foi utilizado para as simulações.

O conjunto motor-gerador trata-se de um gerador síncrono de curto-circuito para aplicação de alta potência, um motor de indução com inversor de frequência para partir o eixo motor-gerador, um sistema AVR para o controle do nível de excitação no excitador, um transformador auxiliar abaixador para alimentar o excitador que é controlado por um AVR e uma impedância conhecida e definida para limitar os níveis de corrente de ensaio. O conjuntor motor-gerador modelado pode ser representado na figura 3.1, sendo composto, principalmente, pelo gerador síncrono de curto-circuito, sistema regulador de tensão automático (AVR) e o motor de indução trifásico partido por inversor de frequência.

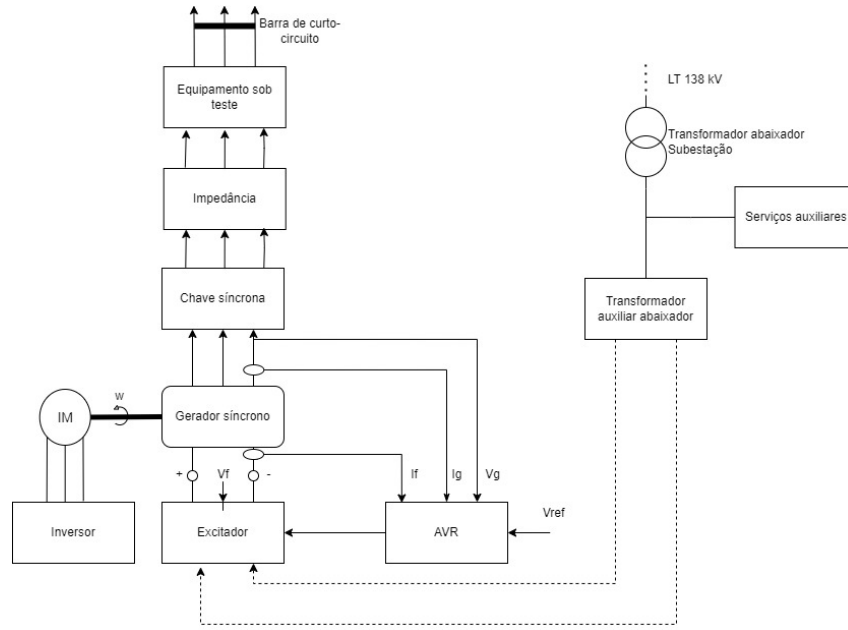


Figura 3.1: Diagrama do conjunto motor-gerador

O gerador de curto circuito a ser modelado será um gerador síncrono de polos lisos de 2 polos com capacidade de curto circuito de 1300 MVA, com acesso aos 12 terminais do enrolamento de armadura, sendo a tensão nominal de 13.8 kV de tensão de linha.

3.1 Gerador Síncrono Trifásico

Conforme explicitado nos capítulos anteriores, a máquina síncrona possui grande potencial para servir como uma fonte de curto-circuito em termos de vantagens em relação a máquina de indução, corrente contínua [5]. Para realizar as simulações do gerador síncrono foram retirados valores de uma máquina síncrona real conforme a tabela 3.1 [36].

Tabela 3.1: Valores de parâmetros da máquina síncrona

Parâmetros	Valor(pu)	Parâmetros	Valor(s)
R_a	0.0014	T'_{d0}	2.98
x_p	0.18	T''_{d0}	0.1455
x_d	1.26	T''_{q0}	0.1455
x'_d	0.422		
x''_d	0.29		
x_q	1.26		
x''_q	0.29		

As constantes de tempo da máquinas podem ser calculadas:

$$T'_d = \frac{x'_d}{x_d} \cdot T'_{d0} = 1(s)$$

$$T''_d = \frac{x''_d}{x_d} \cdot T''_{d0} = 0.1(s)$$

3.1.1 Níveis de tensões com acesso aos 12 terminais

A utilização de um transformador a montante do gerador, com o intuito de diminuir ainda mais o nível de tensão para alcançar níveis maiores de corrente, é muito interessante, pois em alguns equipamentos o nível de tensão precisa ser o valor nominal do equipamento. Além disso, outra maneira de ter mais variações nos níveis de tensão é a construção de um gerador síncrono com acesso aos 12 terminais [34]. Dessa forma, conforme mostrado nas figuras, haverá 4 variações de conexão: Estrela-série, Estrela-paralelo, Triângulo-série e Triângulo-paralelo que são representados na figura 3.2.

A máxima tensão em cada enrolamento do gerador de curto-circuito é de 6,9 kV, com uma corrente permissível de 55 kA em cada enrolamento. Ou seja, em qualquer configuração a tensão e corrente permitida em cada enrolamento é de 6,9 kV/55 kA.

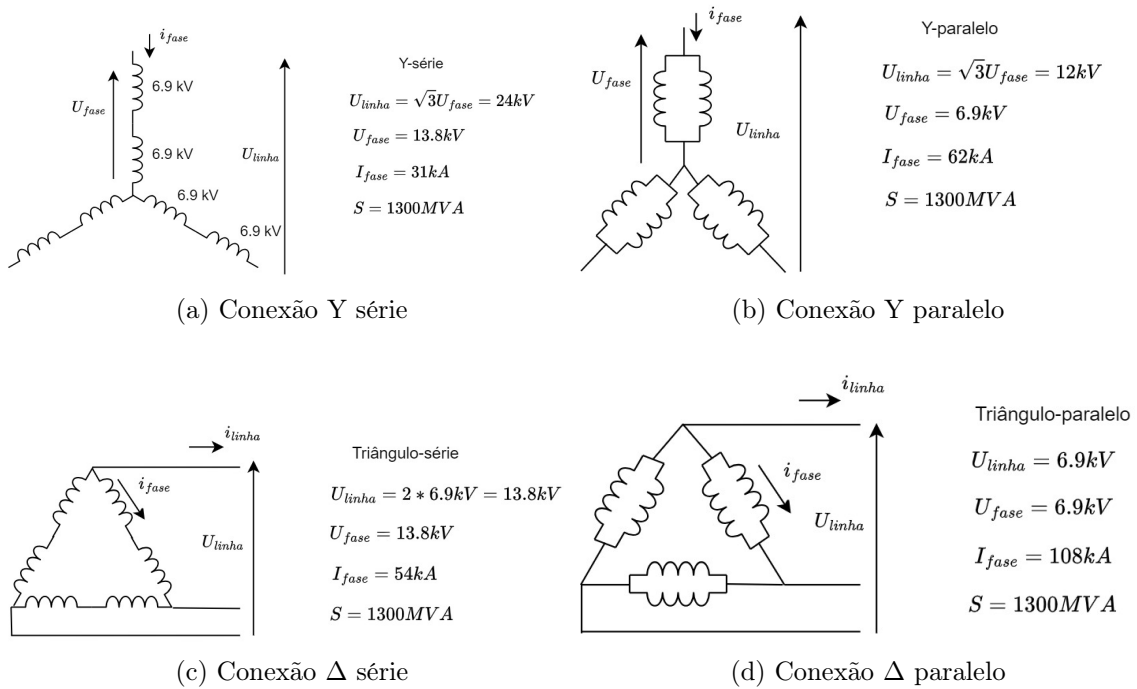


Figura 3.2: Tipos de conexões para o gerador de curto-circuito com acesso aos 12 terminais

Por fim, a vantagem de poder utilizar esses 4 tipos de conexões diferentes, devido ao

acesso aos 12 terminais, é a variação da tensão/corrente, que em alguns ensaios se faz necessária. Por exemplo, para alcançar níveis de corrente maiores em um ensaio de curto-circuito em que não seja necessário manter a tensão nominal do equipamento durante a aplicação, pode-se utilizar a conexão Delta-paralelo para atingir correntes próximas de 100 kA. Obviamente, dificilmente será possível realizar um ensaio com uma corrente de 100 kA utilizando apenas esse gerador, pois 100 kA está muito próximo do limite da máquina e, como o equipamento a ser testado é uma impedância no circuito, a corrente tende a diminuir consideravelmente. Uma solução para esse caso é o uso de um "banco" de geradores, o que aumenta a potência de curto-circuito. Por isso, a potência escolhida para essa máquina foi de 1300 MVA, pois para esse nível de potência de curto-circuito torna-se mais econômico adquirir mais de um gerador.

3.1.2 Potência máxima de curto circuito

A potência de curto-circuito máxima de um gerador de curto circuito pode ser definida como:

$$S_{cc} = S_{nominal} \frac{1}{x''_{d_{pu}}}$$

Sendo $x''_{d_{pu}}$ a reatância sub-transitória de eixo direto em termos de pu, S_{cc} a potência de curto-circuito em MVA e $S_{nominal}$ é a potência nominal da máquina. Essa potência de curto-circuito seria um curto-circuito trifásico ocorrido diretamente nos terminais da máquina, portanto, para a máquina escolhida temos uma potência máxima de curto-circuito subtransitória de:

$$S_{cc} = 638 * \frac{1}{0.29} = 2200 MVA$$

Ou seja, a potência de curto-circuito teórica que a máquina conseguiria alcançar é de 2200 MVA. Entretanto, alcançar esse valor é muito difícil, pois as impedâncias inerentes de um circuito montado considerando: terminais, barramentos, impedâncias mútuas e a impedância inerente do equipamento a ser ensaiado, limitam a corrente. Além disso, a referida potência de curto-circuito considera o valor de pico no primeiro ciclo de um curto-circuito. No entanto, para o caso em estudo, é necessário que a potência de curto-circuito seja mantida durante toda a duração do ensaio. Tais considerações limitam a corrente por sua natureza, e assim a potência máxima alcançável será de 1300 MVA. O

valor de 1300 MVA é definido pela potência de curto-circuito em regime permanente que o gerador irá conseguir sustentar durante no máximo um segundo. Esse valor é adquirido pela equação 2.45 em que depois que as constantes dos termos transitório e subtransitório se tornarem insignificantes, ficará apenas o termo $\frac{1}{x_d}$.

3.1.3 Inércia do gerador

Em um curto-circuito, há um nível alto de torque eletromagnético no gerador, com a tendência de desacelerar a máquina. No entanto, essas frenagens devem ser limitadas a um valor, pois, com frenagens muito bruscas, o sistema de mancais e os componentes mecânicos podem ter uma redução significativa em sua vida útil. Portanto, fabricantes de geradores de curto-circuito limitam a redução de velocidade no pior caso de curto-circuito a 5 a 10% da velocidade de ensaio [4, 13]. Por exemplo, em um ensaio realizado em um disjuntor de 60 Hz, o gerador de 2 polos irá girar a uma velocidade de 3600 RPM no início do ensaio. Após a aplicação do curto-circuito ou de outro ensaio no disjuntor que demande 1300 MVA, o gerador síncrono deverá, ao final do ensaio, ter uma velocidade máxima de 3240 RPM.

Portanto, pode-se calcular a variação de energia cinética necessária para ter uma desaceleração máxima de 10% em um gerador síncrono de potência de 1300 MVA/ 13.8 kV em uma aplicação com amplitude de 1s para 1300 MVA.

Para o cálculo de inércia temos, sendo $\Delta Ec = 5.4 \cdot 10^8 J$

$$w_{med} = \frac{(w_{max} + w_{min})}{2} = \frac{376.99 + 339.29}{2} = 358.14 \text{ (rad/s)}$$

$$c_f = \frac{(w_{max} - w_{min})}{w_{med}} = \frac{376.99 - 339.29}{358.14} = 0.1053$$

$$J = \frac{\Delta Ec}{c_f * (w_{med})^2} = \frac{5.4 \cdot 10^8}{0.1053 * (358.14)^2} = 4 \cdot 10^4 (kg.m^2)$$

Portanto, para verificar essa variação de forma matemática, pode-se analisar as equações dinâmicas desenvolvidas no capítulo 2.

Considerando um curto-circuito trifásico franco nos terminais da máquina, podemos deduzir que o curto-circuito de 55 kA, com fator de potência de 0,2 e duração de 1 segundo, ocorre a uma velocidade inicial de 3600 RPM.

A energia cinética total armazenada na máquina na velocidade nominal antes do curto-circuito é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 = \frac{1}{2} (4 \cdot 10^4) (376.99)^2 = 2.84 \cdot 10^9 (J)$$

Ao ocorrer um curto-circuito, haverá uma demanda de potência ativa por parte da resistência da carga e da resistência de armadura do estator, pois apenas a parte ativa realiza trabalho. Assim, ocorrerá uma desaceleração devido à transformação de energia cinética em energia elétrica. A energia necessária para alimentar o curto-circuito, com a limitação da redução de velocidade, será calculada através das potências ativas.

Para um curto trifásico com corrente de 55 kA com fator de potência de 0.2, a impedância da carga por fase é $\Omega/fase$ é $Z_{carga} = 0.0312 + j3.8223 \cdot 10^{-5}$ e a resistência de armadura do gerador é $R_a = 4.1789 \cdot 10^{-4} \Omega$. Portanto, tem-se uma potência ativa de:

$$P_{curto} = 3 * (55 \cdot 10^3)^2 * (R_a + R_{carga}) = 2.86 \cdot 10^8 W$$

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = -1987 (elect.deg/seg^2)$$

Portanto, há uma desaceleração de $\alpha = -331.2 (rpm/seg)$.

Como trata-se de um curto-circuito de 1 segundo, temos então 60 ciclos. Portanto, a velocidade do gerador ao final de 60 ciclos é de:

$$\omega_{final} = \frac{0.998 * 120 * f}{p} + \alpha \cdot \Delta t = \frac{0.998 * 120 * 60}{2} + (-331.2) * (1) = 3261 RPM$$

Portanto, a inércia necessária para que a velocidade do gerador não reduza além do limite para a pior condição de curto-circuito é $J = 4 \cdot 10^4 kg.m^2$. Este valor será utilizado nas simulações realizadas no PSCAD. Vale ressaltar que as contribuições do motor de indução e do sistema mecânico para a inércia foram desconsideradas por não possuírem significância no somatório.

Tabela 3.2: Parâmetros do controle do excitador

Descrição	Simbolo	Valor	Unidade
Ganho do regulador de tensão	K_a	20	pu
Constante de tempo do regulador de tensão	T_a	0.2	s
Máxima saída do regulador	V_{rmax}	0	pu
Mínima saída do regulador	V_{rmin}	0	pu
Ganho do feedback	K_F	0.05	pu
Constante de tempo do feedback	T_F	1	s
Constante proporcional do excitador de campo	K_e	1	pu
Constante de tempo do excitador de campo	T_e	0.5	s
Maxima tensão de campo	Efd_{max}	Variável	pu
Constante proporcional do controle PI	K_{PR}	100	pu
Constante de tempo do controle PI	K_{IR}	1	s
Ganho proporcional de carga do retificador a reatância de comutação	K_C	1.82	pu
Ganho do circuito de tensão	K_p	4.88	pu
Ganho do circuito de corrente	K_i	8	pu
Reatância associada a fonte de potência	X_L	0	pu

3.3 Controle de tensão de ensaio

Para realizar o controle de tensão de ensaio no gerador, pode-se utilizar dois métodos:

- Redução do valor de tensão no enrolamento de campo
- Uso de um transformador na saída do gerador

O primeiro método diminui o valor de referência no controle do AVR e, durante o curto-circuito, o AVR atuará de forma a manter o valor de referência da tensão. Este método é interessante, entretanto, só funciona para níveis de tensão abaixo do valor nominal, pois, se for colocado acima, pode ultrapassar o tempo de aplicação de sobretensão nos equipamentos, mesmo que estes sejam dimensionados para suportar sobretensões na superexcitação. Isso ocorre porque, quanto maior o nível de tensão que o gerador deve manter, maior será o nível de excitação exigido durante o curto-circuito para compensar a desmagnetização.

O segundo método utiliza transformadores para diminuir ou aumentar a tensão do ensaio. Consequentemente, a corrente é aumentada ou diminuída proporcionalmente. Esse método torna-se interessante para alcançar maiores ou menores níveis de corrente de curto-circuito nos equipamentos. Entretanto, como desvantagens, tem-se uma impedância adicional no circuito, a necessidade de adquirir um novo equipamento, o que eleva ainda mais o custo do projeto, e a potência do transformador deve ser, no mínimo, igual à do gerador de curto-circuito.

A figura 3.4 mostram como o controle responde a uma tensão inicial desejada de 0.5 pu nos terminais e depois a resposta da rampa de tensão no início do curto-circuito.

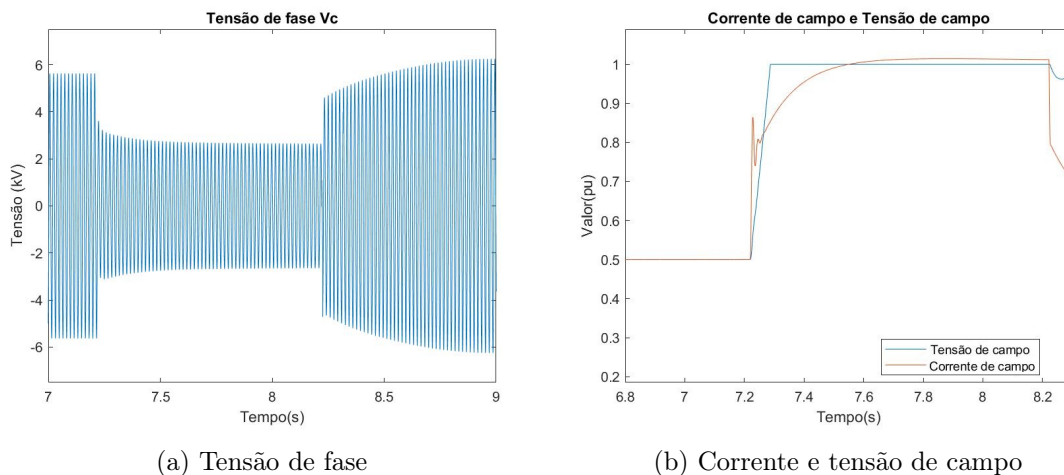


Figura 3.4: Exemplo de controle de tensão de ensaio

Os dois métodos serão apresentados no próximo capítulo. A principal diferença entre eles é que o segundo método envolve o comissionamento de um transformador trifásico de curto-circuito na saída do gerador. Isso implica em um maior custo, maior consumo de espaço e uma complexidade adicional no controle do sistema.

3.4 Controle de corrente de ensaio

Os níveis de corrente podem ser controlados através dos níveis de tensão, mas para obter uma redução ainda maior da corrente, utilizam-se reatores de núcleo a ar, a fim de evitar a saturação do reator, com valores conhecidos e bem definidos, que suportam a solicitação térmica do curto-circuito.

3.5 Controle de ângulo de fechamento

O controle de ângulo para o fechamento do circuito é crucial tanto para ensaios quanto para calibração. Em alguns ensaios, é necessário avaliar o equipamento em condições dinâmicas e térmicas separadamente. A condição dinâmica se refere ao pico de assimetria de uma corrente de curto-circuito no equipamento, onde o esforço dinâmico é máximo e sua duração é muito curta, cerca de 50 ms. Por outro lado, a condição térmica envolve uma corrente simétrica, ou seja, sem picos de assimetria no curto-circuito. Nesse caso,

a duração do ensaio é maior, aproximadamente 1 segundo, e avalia-se a suportabilidade térmica dos contatos. É importante ressaltar que o controle desenvolvido neste estudo foi baseado na aplicação específica no atual laboratório do CEPEL.

O controle de fechamento para uma aplicação simétrica segue a sequência ilustrada na Figura 3.5. O controle monitora a tensão na fase C, que serve como referência, e, quando ela atravessa o zero de tensão, o controle insere um atraso de tempo de 'n' graus. Após o atraso, a chave síncrona, que se trata de uma chave eletromecânica, é fechada, realizando um curto-circuito simétrico. Como, geralmente, se trata de um circuito predominantemente indutivo, o ângulo de atraso é aproximadamente 86° , de modo que o pico de assimetria de corrente não ocorra na fase C.

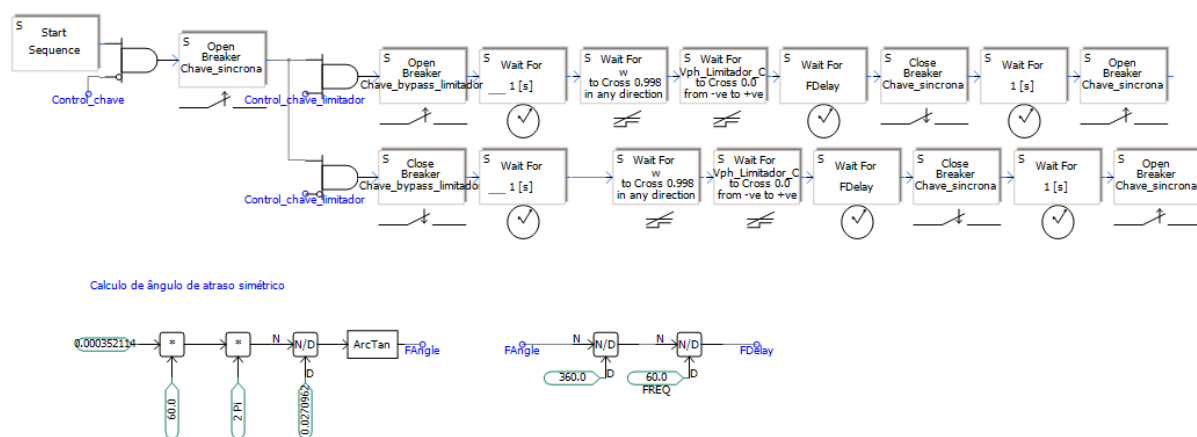


Figura 3.5: Controle do ângulo de fechamento simétrico modelado no PSCAD

O controle de fechamento para uma aplicação assimétrica segue a sequência mostrada na Figura 3.6. O controle monitora a tensão na fase C, que é a referência, e, quando ela atravessa o zero de tensão, a chave síncrona fecha o circuito, realizando um curto-circuito assimétrico. Como o circuito é praticamente indutivo em ensaios de curto-circuito, quando a tensão é zero, a corrente é máxima, já que sua defasagem está próxima de 90° .

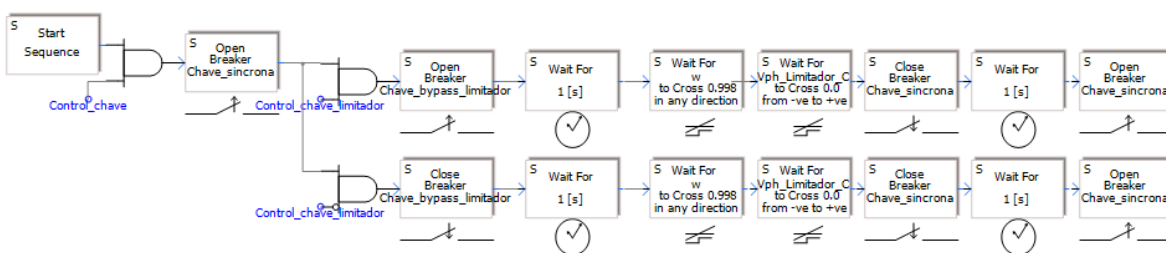


Figura 3.6: Controle do ângulo de fechamento assimétrico modelado no PSCAD

3.6 Validação do modelo em PSCAD

Neste trabalho, a validação do modelo de gerador de curto-circuito será realizada no software PSCAD. A validação é crucial para garantir que o modelo simule adequadamente próximo às condições reais e atenda às especificações de desempenho de um curto-circuito franco. Um dos testes fundamentais realizados é a simulação de um curto-circuito, tanto na condição sem superexcitação quanto com superexcitação. A figura 3.7 apresenta o gerador modelado no PSCAD para realizar a validação e verificar se o gerador atende às necessidades de um laboratório de alta potência. Para validar o circuito, será exigido do gerador uma corrente de curto-circuito de 55 kA, que seria a corrente máxima de curto-circuito do gerador modelado. Além disso, a validação é importante para verificar se a modelagem está em conformidade com as limitações impostas pela norma IEEE 62271-1 [12].

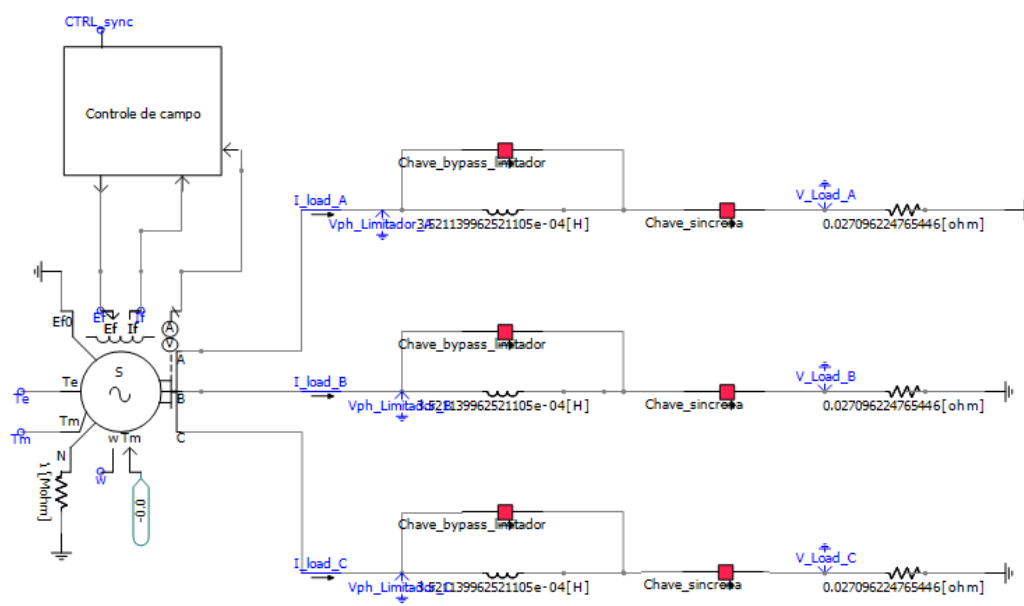


Figura 3.7: Modelo PSCAD do gerador de curto-circuito

3.6.1 Curto-Circuito Sem Superexcitação

Primeiramente, simula-se um curto-circuito no gerador sem a aplicação de superexcitação, o que representa um comportamento próximo ao de um curto-circuito nos terminais de um gerador síncrono convencional. Neste caso, espera-se que a corrente de curto-circuito não seja sustentada durante o período de aplicação. Esse teste é essencial para avaliar a resposta do gerador em uma situação de falha, na qual a superexcitação não está presente.

A simulação mostra que, na ausência de superexcitação, a corrente de curto-circuito manteve-se fora dos limites esperados para um ensaio de curto-circuito, conforme a norma IEC 62271-1, que trata de alguns ensaios realizados em um laboratório de alta potência [12], como ilustrado na figura 3.8.

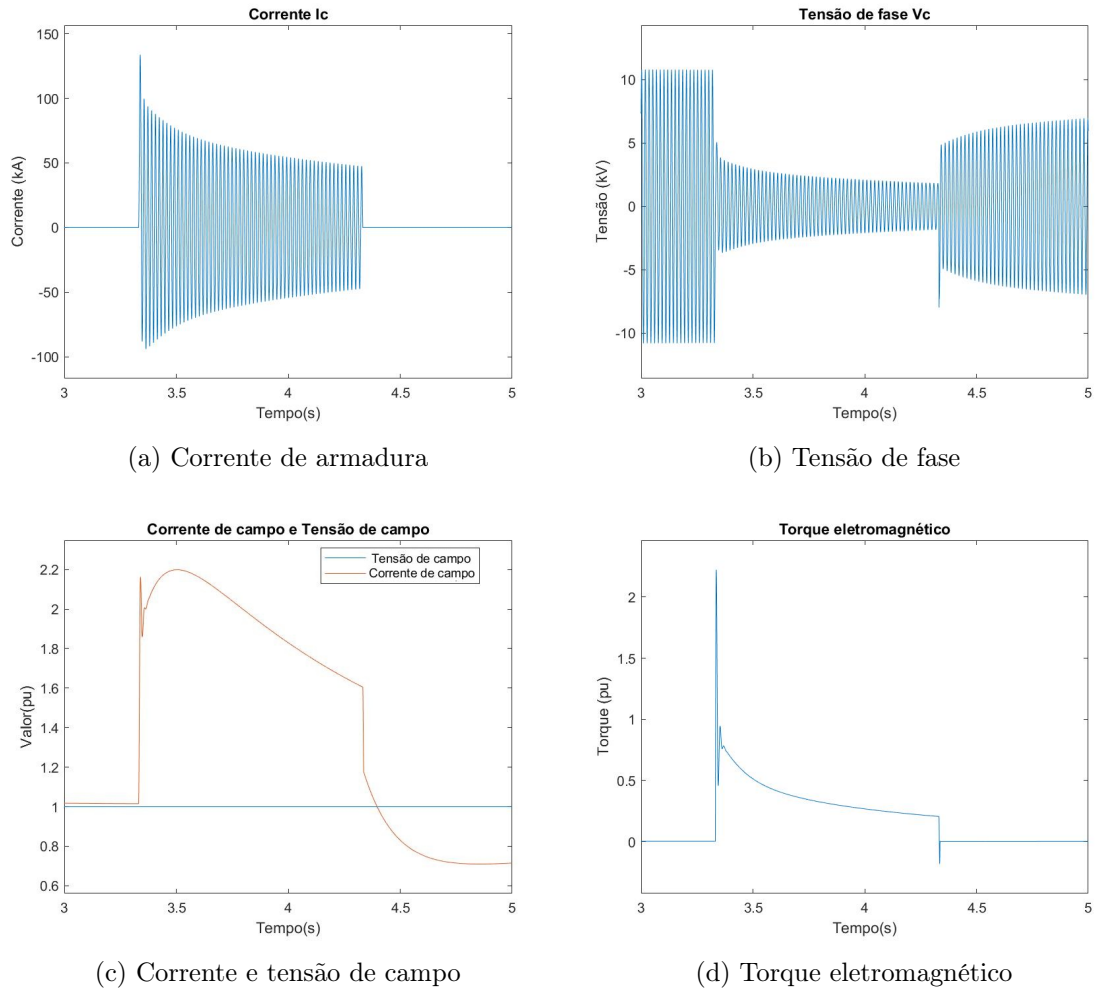


Figura 3.8: Corrente de curto-circuito sem superexcitação

Portanto, a curva da corrente apresentou um decréscimo gradual e significativo após o instante inicial do curto-circuito, refletindo a desmagnetização do núcleo do gerador de curto-circuito.

3.6.2 Curto-Circuito com Superexcitação

Em seguida, realiza-se a simulação do curto-circuito com superexcitação aplicada ao gerador apresentada na figura 3.9. A superexcitação é utilizada para inibir a reação de armadura, permitindo que a corrente de curto-circuito seja sustentada por um período

mais longo. Este teste é crucial para validar a capacidade do gerador de manter a estabilidade e fornecer a corrente necessária e sustentada durante um ensaio em que ocorre um curto-circuito nos terminais do gerador.

Os resultados da simulação, apresentados na figura 3.9, indicam que a corrente de curto-circuito com superexcitação é significativamente maior quando comparada à condição sem superexcitação.

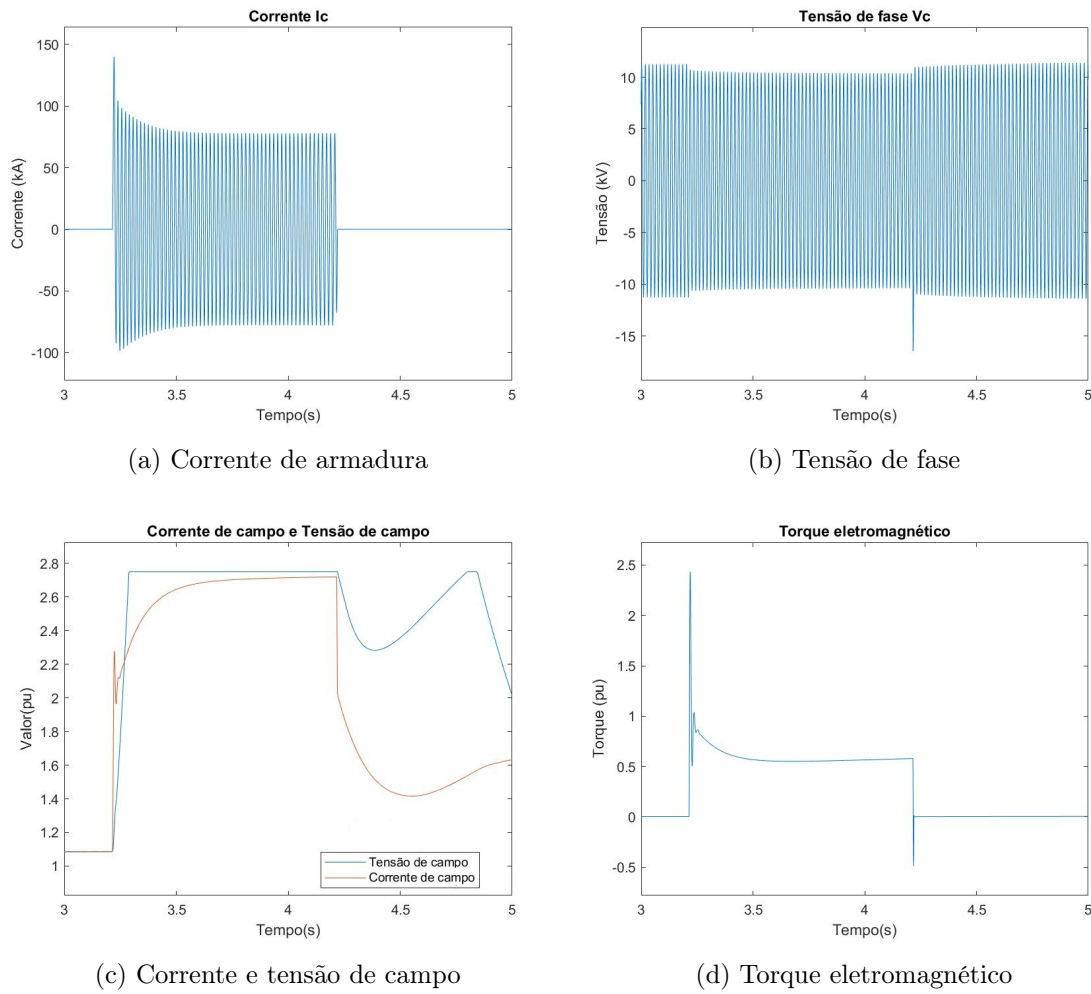


Figura 3.9: Aplicação com uma carga de 55 kA

Portanto, a corrente inicial se mantém sustentada por um período prolongado, demonstrando a eficácia da superexcitação em atender às necessidades de um laboratório de alta potência para ensaios de curto-circuitos.

3.6.3 Análise Comparativa

Para a validação, é importante considerar as limitações impostas pela norma de ensaios de laboratório de alta potência como referência, a fim de validar o gerador de curto-circuito modelado.

A norma IEEE 62271-1 estabelece algumas limitações que o gerador deve ser capaz de manter durante um ensaio de curto-circuito. São elas:

- O teste deve ser realizado com uma fonte de alimentação de qualquer tensão adequada e na frequência nominal com uma tolerância de $\pm 10\%$
- O componente CA da corrente de teste deve ser igual ao componente CA da corrente nominal suportável de curta duração (I_k) do equipamento de manobra, além disso, a corrente de pico (para um circuito trifásico, o valor mais alto em uma das fases) não deve ser inferior à corrente de pico nominal suportável (I_p) e não deve excedê-la em mais de 5% sem o consentimento do fabricante. Para testes trifásicos, o componente CA da corrente de teste em qualquer fase não deve variar em mais de 10% em relação à média das correntes nas três fases. A média dos valores RMS dos componentes CA das correntes de teste não deve ser inferior ao valor nominal.

A tabela 3.3 apresenta uma comparação entre os resultados das duas condições simuladas. Pode-se observar claramente a diferença nos níveis de corrente e na sustentação ao longo do tempo.

Tabela 3.3: Comparação de corrente de curto-circuito ao longo dos ciclos

Corrente de curto-circuito ao longo do tempo	1º ciclo (kA) pico	10º ciclo (kA) RMS	25º ciclo (kA) RMS	35º ciclo (kA) RMS	40º ciclo (kA) RMS	50º ciclo (kA) RMS	60º ciclo (kA) RMS	Tensão de campo (Pu)	Delta velocidade (%)
Sem Superexcitação	133.75	54.64	43.84	39.95	38.33	35.52	33.60	1	-5.9
Com superexcitação	139.44	60.10	55.34	55.05	55.05	55.10	55.15	2.75	-9.4

Conforme a tabela 3.3, é notável que a corrente ao longo dos ciclos do circuito sem superexcitação ultrapassa os limites estabelecidos pela IEEE 62271-1. Por outro lado, com a superexcitação, a variação da corrente é de, no máximo, 0,06%, e a frequência final de curto-circuito é reduzida em 9,4%. Portanto, o gerador de curto-circuito com superexcitação atende às limitações impostas pela norma.

Além disso, pode-se verificar, pela integral de Joule, que a energia acumulada até o final do ensaio é significativamente reduzida no caso de um curto-circuito sem superex-

citação, conforme ilustrado na figura 3.10, que apresenta a energia fornecida com e sem superexcitação.

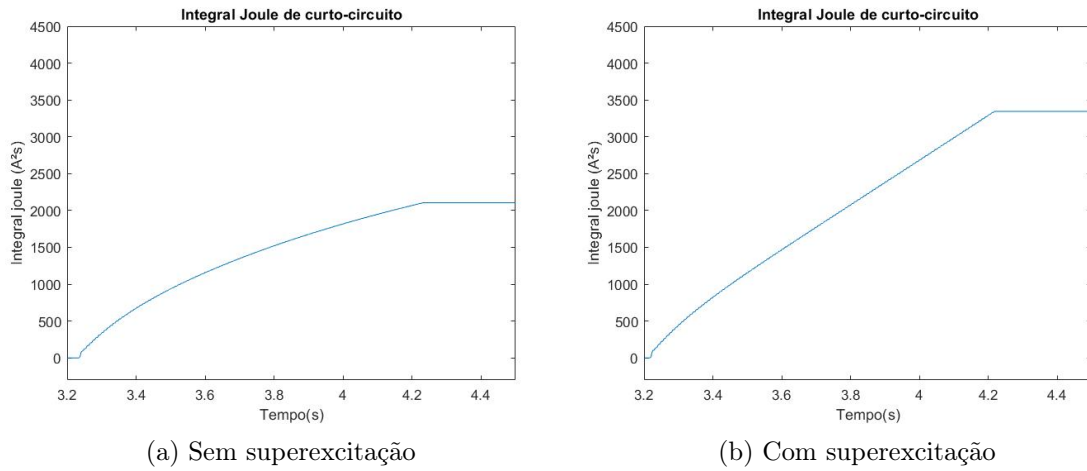


Figura 3.10: Integral Joule de uma aplicação com uma carga de 55 kA

Os resultados obtidos confirmam que o modelo de gerador de curto-circuito no PSCAD é capaz de simular com precisão as condições de um ensaio de curto-circuito em um laboratório de alta potência, com o uso da sobre-excitação no enrolamento de campo. Portanto, a modelagem consegue atender às condições estabelecidas pelas normas utilizadas para ensaios de laboratório de alta potência. Esta validação é essencial para garantir a confiabilidade do modelo, tornando-o aplicável em um laboratório de alta potência.

Capítulo 4

Simulações e resultados

Esta etapa do trabalho será apresentado as possíveis configurações e aplicações com o uso do gerador de curto-circuito modelado no PSCAD conforme já apresentado no capítulo 3.

4.1 Cenários construídos

Para a simulação dos casos foram feitas considerações como:

- O gerador/eixo já está em rotação nominal;
- O enrolamento de campo está com tensão inicial de 1 pu;

Para verificar todas as possíveis aplicações de ensaio para um gerador de curto-circuito, foram considerados diversos cenários a serem modelados, sendo eles:

- Variando a carga
- Variando o ângulo de fechamento da chave síncrona
- Variando a tensão a ser aplicada
- Diferentes tipos de curto-circuito a ser aplicado
- Aplicação de curto-circuitos com tensão de campo constante
- Aplicação em corrente contínua
- Aplicação com geradores em paralelo

- Aplicação adicionando transformadores de curto-circuito na saída do gerador

A carga genérica a ser escolhida é uma carga resistiva-indutiva com fator de potência 0.2 considerando as impedâncias do gerador. Essa carga pode ser representada, na prática, como reatores limitadores de corrente para o ensaio em conjunto com as impedâncias de barramentos e de um disjuntor a ser ensaiado. A carga modelada está expressa na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Carga trifásica com fator de potência 0.2

Corrente eficaz (kA)	Indutância (H)	Resistência (ohms)
5	0.0038935	0.32784
10	0.0018849	0.17327
15	0.0011326	0.11538
20	0.00069427	0.081647
25	0.00053068	0.069059
30	0.00038021	0.05748
35	0.00026089	0.048298
40	0.00019212	0.043005
45	0.00012942	0.038181
50	7.9261e-05	0.034321
55	3.8223e-05	0.031163

4.2 Aplicação com variação de carga

Para verificar a resposta transitória do gerador e do controle frente a variação de carga, será simulado um curto-circuito em diferentes cenários. O modelo PSCAD do gerador de curto-circuito para uma aplicação de curto-circuito é demonstrado na figura 3.7. Todas aplicações foram simuladas seguindo uma sequência pré-definida, representando um caso de curto-circuito real de um equipamento a ser ensaiado no laboratório.

Para uma aplicação de 5 kA com duração de 1 segundo, pode-se observar nas figuras 4.1 que, em um caso com corrente muito abaixo da corrente nominal de curto-circuito, não ocorre uma desmagnetização significativa do núcleo. Dessa forma, a excitação de campo não precisa ser aumentada de maneira considerável para sustentar a corrente. Nota-se também que o torque eletromagnético está muito abaixo do valor nominal da máquina, de modo que não ocorrerá uma desaceleração significativa.

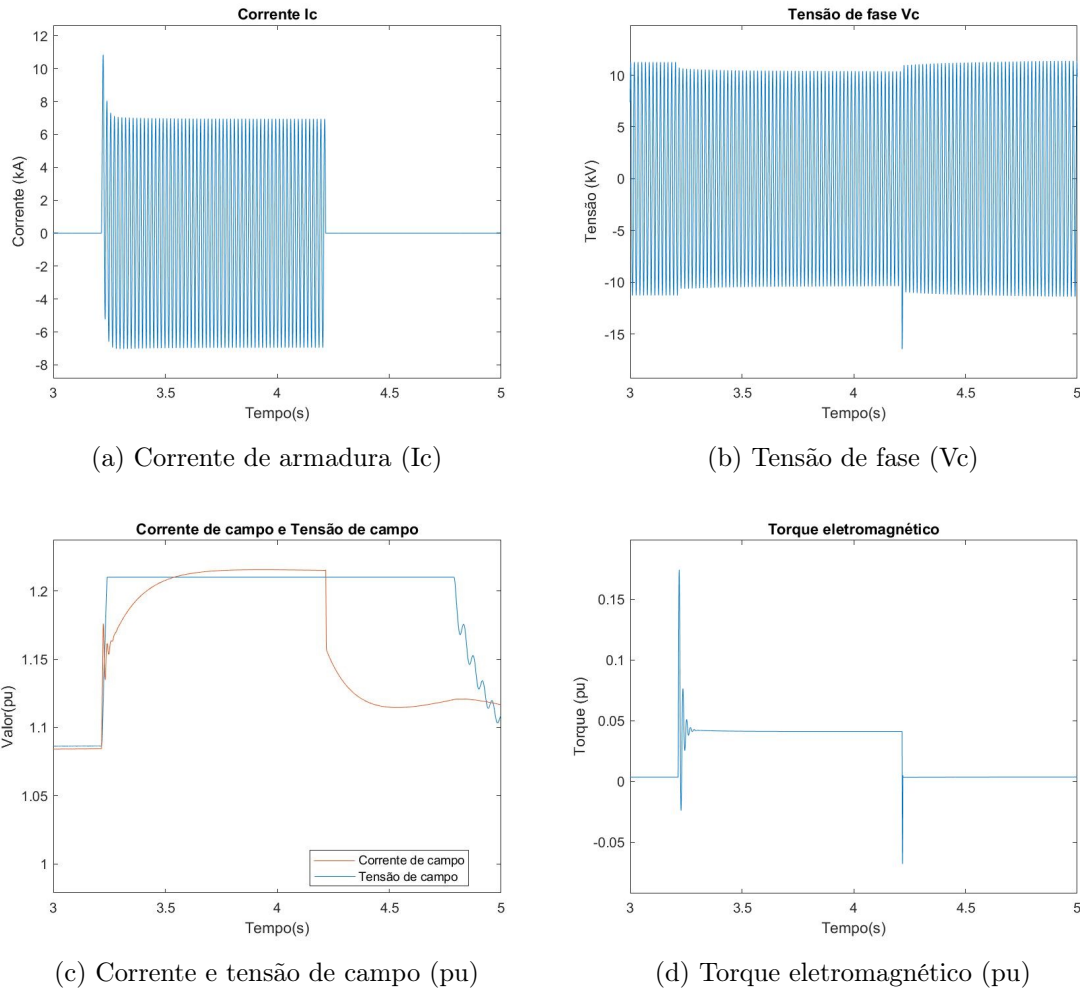


Figura 4.1: Aplicação com uma carga de 5 kA

Por outro lado, para uma carga de curto-circuito de 35 kA, representada na figura 4.2, pode-se perceber que há uma excitação considerável para sustentar toda a corrente de curto-circuito durante 1 segundo. Um aspecto importante a ser verificado neste caso é durante a abertura do disjuntor no instante depois do curto-circuito em que a máquina volta gradualmente a tensão nominal, o sistema AVR no enrolamento de campo neste caso irá manter a sobre-excitação até voltar tensão nominal e reduzir a tensão de campo conforme a tensão chega a nominal. Este evento pode ser observado que após os 4.6 segundos de simulação, a tensão de campo desce linearmente até chegar a 1 pu novamente. Outro ponto importante, é que agora o torque eletromagnético no momento dinâmico do curto-circuito é muito alto, mas durante o curto-circuito térmico o torque eletromagnético já está controlado.

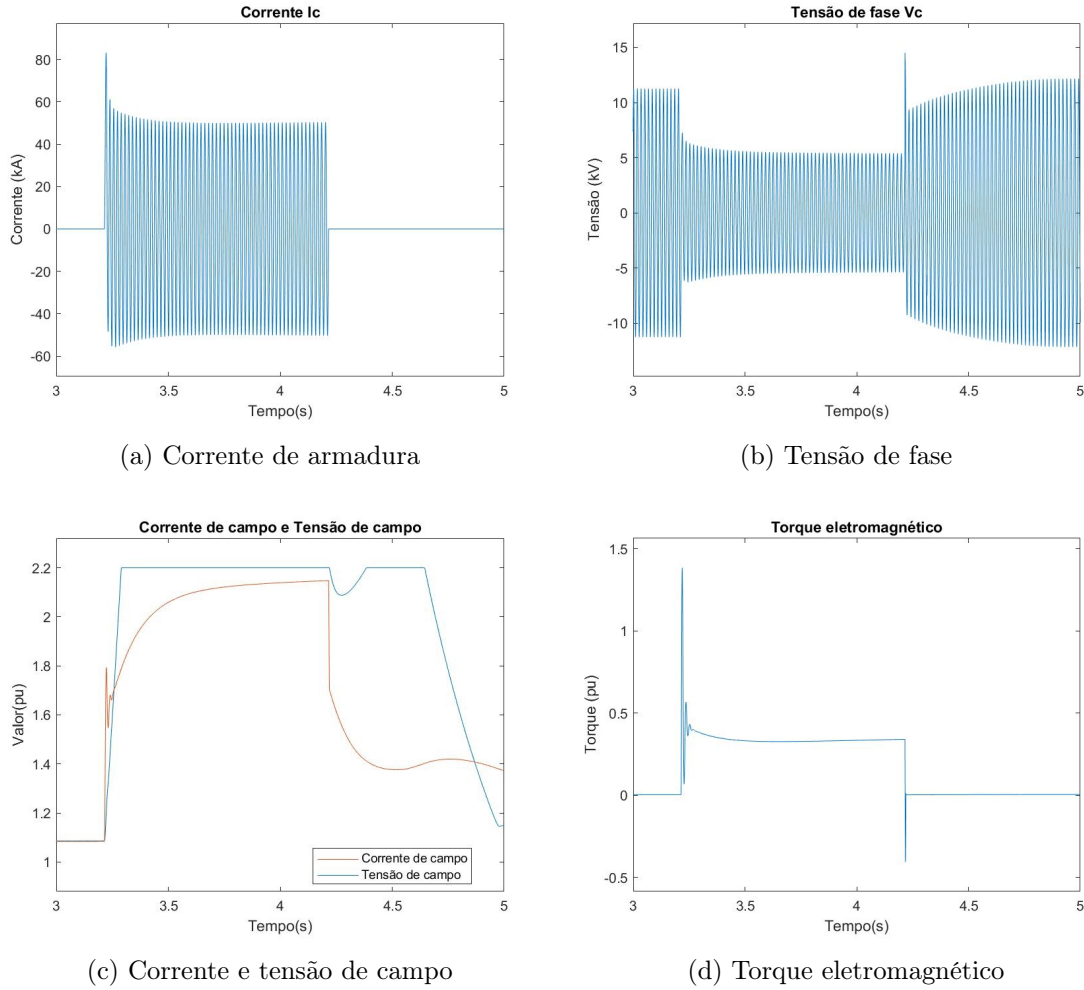


Figura 4.2: Aplicação com uma carga de 35 kA

A tabela 4.2 apresenta a comparação para diferentes níveis de curto-circuito. Observa-se que a tensão de campo durante o curto-circuito para uma corrente de 55 kA se eleva para 2,75 pu, precisando se manter por um pouco mais de 1 segundo para sustentar a corrente durante a aplicação. Embora esse nível de tensão no enrolamento de campo seja incomum em geradores convencionais, os geradores projetados para curto-circuito possuem a capacidade de atingir até 10 pu de tensão nos enrolamentos de campo, a fim de compensar a reação de armadura, conforme observado em geradores síncronos fabricados para laboratórios com o objetivo de realizar testes de curto-circuito em equipamentos [4].

Tabela 4.2: Comparação de diferentes níveis de curto-circuito

Aplicação	Queda de tensão (%)	Corrente pico assimétrica (kA)	Corrente simétrica (kA)	Torque assimétrico (pu)	Torque simétrico (pu)	Tensão campo (pu)	Delta Rotação final (%)
5 kA	7.62	10.84	4.92	0.17	0.04	1.21	-0.7
20 kA	33.95	46.34	20.47	0.75	0.18	1.7	-2.9
35 kA	53.00	83.14	35.3	1.41	0.33	2.2	-5.5
50 kA	69.44	124.31	50.43	2.13	0.50	2.65	-8.2
55 kA	73.33	139.94	55.1	2.43	0.56	2.75	-9.5

Portanto, conforme apresentado nos resultados, o gerador modelado consegue sustentar o curto-circuito para todos os níveis até a sua potência máxima de curto-circuito apresentados.

4.3 Aplicação com variação de ângulo de fechamento

Em alguns casos, é necessário um curto-circuito sem as componentes de assimetria, por exemplo, durante um ensaio é necessário uma aplicação de calibração, pois o valor de impedância do equipamento a ser ensaiado é desconhecido. Portanto, para não esforçar o equipamento com um esforço dinâmico, o ângulo de fechamento (ou tempo de fechamento) é alterado para ocorrer a menor assimetria no equipamento. Além disso, há ensaios em chaves seccionadoras em que o ensaio de corrente assimétrica e corrente simétrica são realizados separadamente. Entretanto, os ângulos de fechamentos são mais efetivos em uma aplicação bifásica, pois, em um circuito trifásico a assimetria percorre pelas fases, ou seja, caso diminua a assimetria na fase C, outra fase aumentará proporcionalmente. Por outro lado, há um ângulo em que possa conseguir a menor assimetria nas três fases. O equipamento, que desempenha o curto-circuito no tempo/ângulo de atraso, é a chave síncrona que se trata de uma chave eletromecânica com um controle de fechamento '*zero-crossing control*' com ajuste de tempo de atraso.

Pode-se mudar o fator de potência da carga para visualizar uma outra dinâmica. No caso anterior, foi utilizado a carga modelada que tem como fator de potência de 0.2, mas se pode considerar um fator de potência praticamente indutivo que poderia ser definido como um ensaio de curto-circuito com apenas reatores e suas resistências parasitas utilizados em laboratórios de alta potência. Portanto, será utilizado uma carga de 35 kA com fator de potência 0.02 indutiva, considerando as impedâncias do gerador também, tem-se uma

carga de valores RL:

$$R = 0.0046093 \text{ } (\Omega)$$

$$L = 0.00024956 \text{ } (H)$$

Para visualizar esse evento, a figura 4.3 ilustra um curto-circuito bifásico de 35 kA para diferentes ângulos de fechamento, demonstrando o menor esforço dinâmico sobre um possível equipamento conectado aos terminais do gerador. A tabela 4.3 apresenta o comportamento nos ângulos extremos dessa aplicação. A variação da corrente assimétrica com a mudança do ângulo de fechamento é de 16%. Além disso, o fator de assimetria é maior em comparação ao caso com fator de potência 0,2 indutivo, devido à relação X/R, que se torna mais elevada.

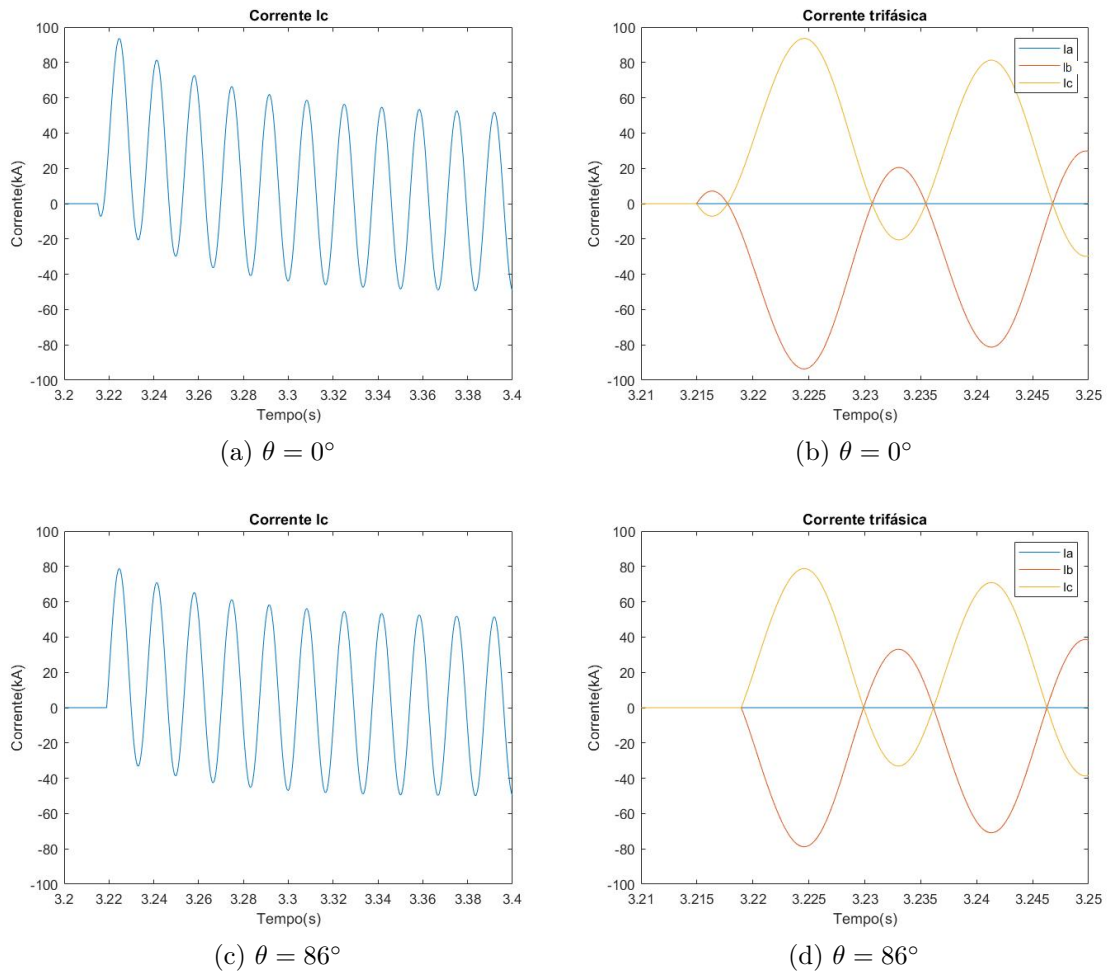


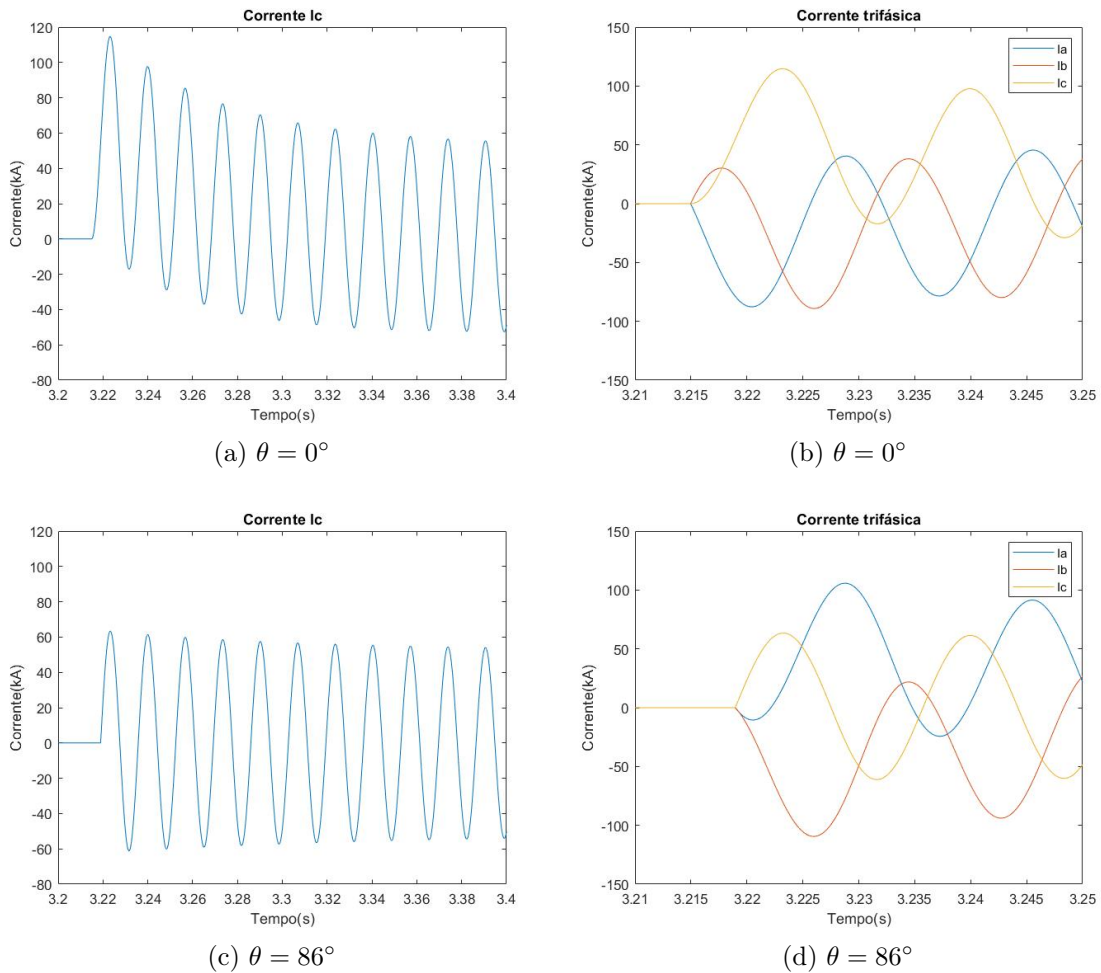
Figura 4.3: Corrente bifásica em uma carga de 35 kA e ângulo de fechamento θ

Por outro lado, outra forma de visualizar esse comportamento é através das correntes trifásicas, embora mudando o ângulo de fechamento para que a corrente na fase C dimi-

Tabela 4.3: Comparação de fechamento em diferentes ângulos

Ângulo de fechamento (θ)	Corrente pico assimétrica (kA)	Corrente simétrica RMS (kA)
0	93.61	36.00
86	78.80	36.00

nua, as outras fases irão aumentar. A mudança de ângulo não é muito afetada para uma aplicação trifásica, já que as assimetrias são trocadas para outra fase quando é variado o ângulo de fechamento. A figura 4.4 demonstra essa aplicação apresentando o comportamento nas 3 fases. A tabela 4.4 demonstra o comportamento nos ângulos extremos dessa aplicação.

Figura 4.4: Corrente trifásica em uma carga de 35 kA e ângulo de fechamento θ

Portanto, a utilização desse método é importante para conseguir níveis de assimetrias maiores ou menores a depender do tipo de ensaio solicitado ao laboratório, bem como,

Tabela 4.4: Comparação de fechamento trifásico em diferentes ângulos

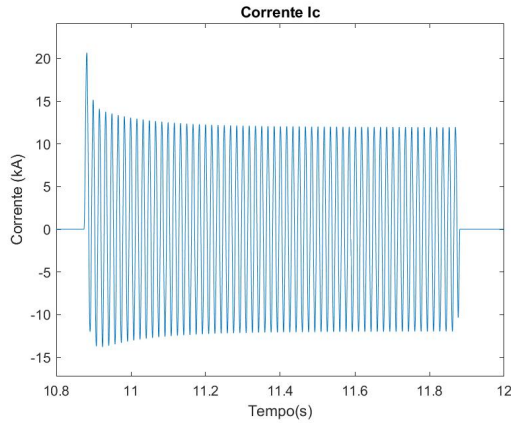
Ângulo de fechamento θ	Corrente pico assimétrica Fase A (kA)	Corrente pico assimétrica Fase B (kA)	Corrente pico assimétrica Fase C (kA)	Corrente simétrica Fase A (kA)	Corrente simétrica Fase B (kA)	Corrente simétrica Fase C (kA)
0	-87.63	-89.10	114.70	36.00	36.00	36.00
86	105.74	-109.41	63.38	36.00	36.00	36.00

utilizar na realização de calibrações simétricas antes do ensaio para não solicitar uma corrente dinâmica no equipamento desnecessária.

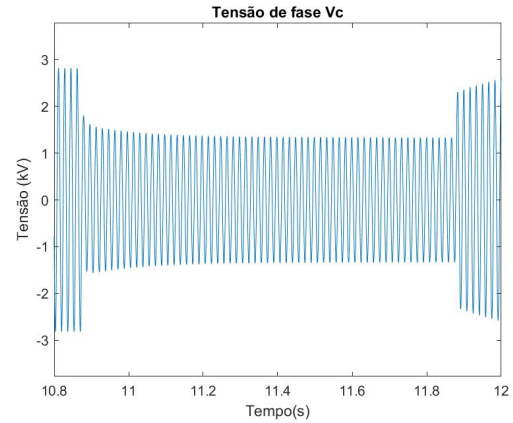
4.4 Aplicação com variação da tensão aplicada

Uma das dificuldades para ensaios com tensão fixada, utilizando apenas geradores de curto-circuito sem transformadores na saída, é a limitação na variação de tensão. Mesmo com acesso aos 12 terminais do gerador, a variação de tensão disponível é restrita. No entanto, para tensões abaixo da nominal, é possível superar esse problema através da redução da tensão aplicada no enrolamento de campo. Utilizando o sistema AVR, é viável reduzir a tensão abaixo da nominal, e o uso da superexcitação será aplicado da mesma forma. Por outro lado, para tensões acima da nominal, essa abordagem não é viável, pois manter uma tensão acima da nominal por um tempo crítico representa um risco para o isolamento da armadura do gerador.

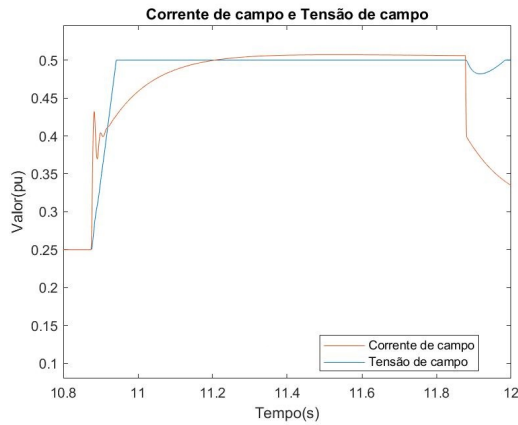
Como forma de visualizar esse evento, a figura 4.5 demonstra um curto-circuito com a carga de 35 kA para diferentes valores de tensão de campo de 0.25 pu e, portanto, é demonstrado sua possível aplicação em nível menor de tensão nos terminais. A figura 4.5 mostra a tensão reduzida para 25% da nominal, e consequentemente a corrente é reduzida, mas durante o curto-circuito a tensão de campo mantém uma tensão de 0.5 pu para manter a corrente sustentada.



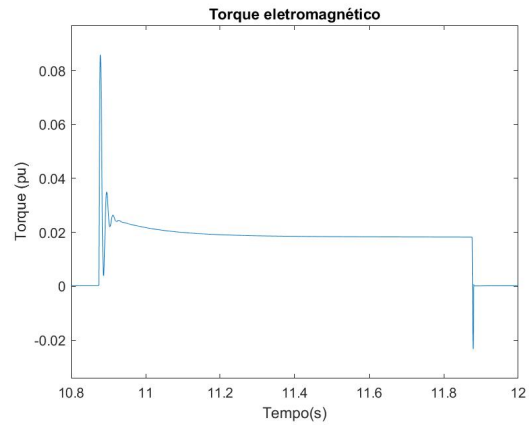
(a) Corrente de armadura



(b) Tensão de fase



(c) Corrente e tensão de campo



(d) Torque eletromagnético

Figura 4.5: Aplicação em uma carga de 35 kA com tensão de campo 0.25 pu

A tabela 4.5 detalha os transitórios em um variação de tensão aplicada de 0.25 a 1 pu. Comparando os valores, é possível perceber que há a possibilidade de uma tensão de ensaio de valor menor e, conseqüentemente, uma corrente menor com praticamente a mesma assimetria, pois o termo de fator de assimetria, $\frac{X}{R}$, não irá sofrer muita alteração, sua alteração é apenas afetada pela pequena variação da indutância síncrona do gerador devido ao alcance ou não da saturação do núcleo que faz com que a indutância varie.

Tabela 4.5: Comparação de Variação de tensão aplicada

Tensão (pu)	Queda de tensão (%)	Corrente pico assimétrica (kA)	Corrente RMS simétrica (kA)	Torque assimétrico (pu)	Torque simétrico (pu)	Tensão campo (pu)	Delta Rotação final (%)
0.25	50.45	20.68	8.53	0.09	0.018	0.5	~0
0.5	52.2	41.37	16.97	0.34	0.073	1	-1.2
0.8	53.0	66.257	27.78	0.88	0.21	1.7	-3.3
1	53.0	83.14	35.3	1.41	0.33	2.2	-5.5

Portanto, utilizar esse método para reduzir o nível de tensão abaixo da nominal e manter o nível de assimetria desejado torna-se interessante para algumas possíveis aplicações no laboratório.

4.5 Aplicação com diferentes tipos de curto-circuito

Em um gerador de curto-circuito as únicas aplicações viáveis é um curto-circuito trifásico ou bifásico, pois como são correntes altíssimas em até 50 kA, não é possível um curto-circuito fase-terra, pois, poderia danificar toda a malha de terra do laboratório.

O modelo PSCAD do gerador de curto-circuito para uma aplicação de curto-circuito bifásica é demonstrado na figura 4.6.

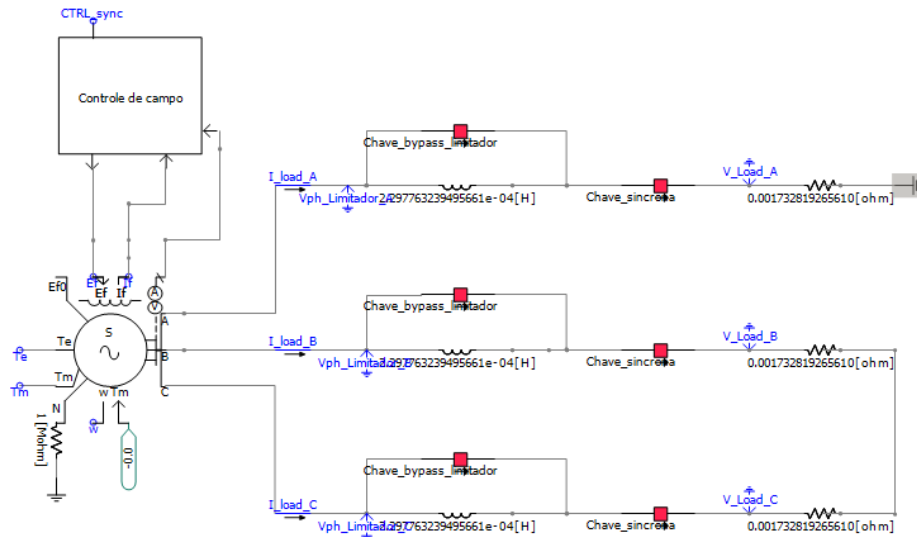


Figura 4.6: Modelo PSCAD gerador de curto-circuito em um curto bifásico

Um exemplo de aplicação trifásica já foi demonstrada na figura 4.2. Já uma aplicação bifásica é apresentada na figura 4.7, o controle de campo apresenta um transitório na

corrente de campo devido a falta de uma fase, mas a corrente ainda é sustentada durante o período de curto-circuito. Além disso, é esperado que o torque eletromagnético seja oscilatório, pois agora a máquina está em uma tensão bifásica em seu enrolamento.

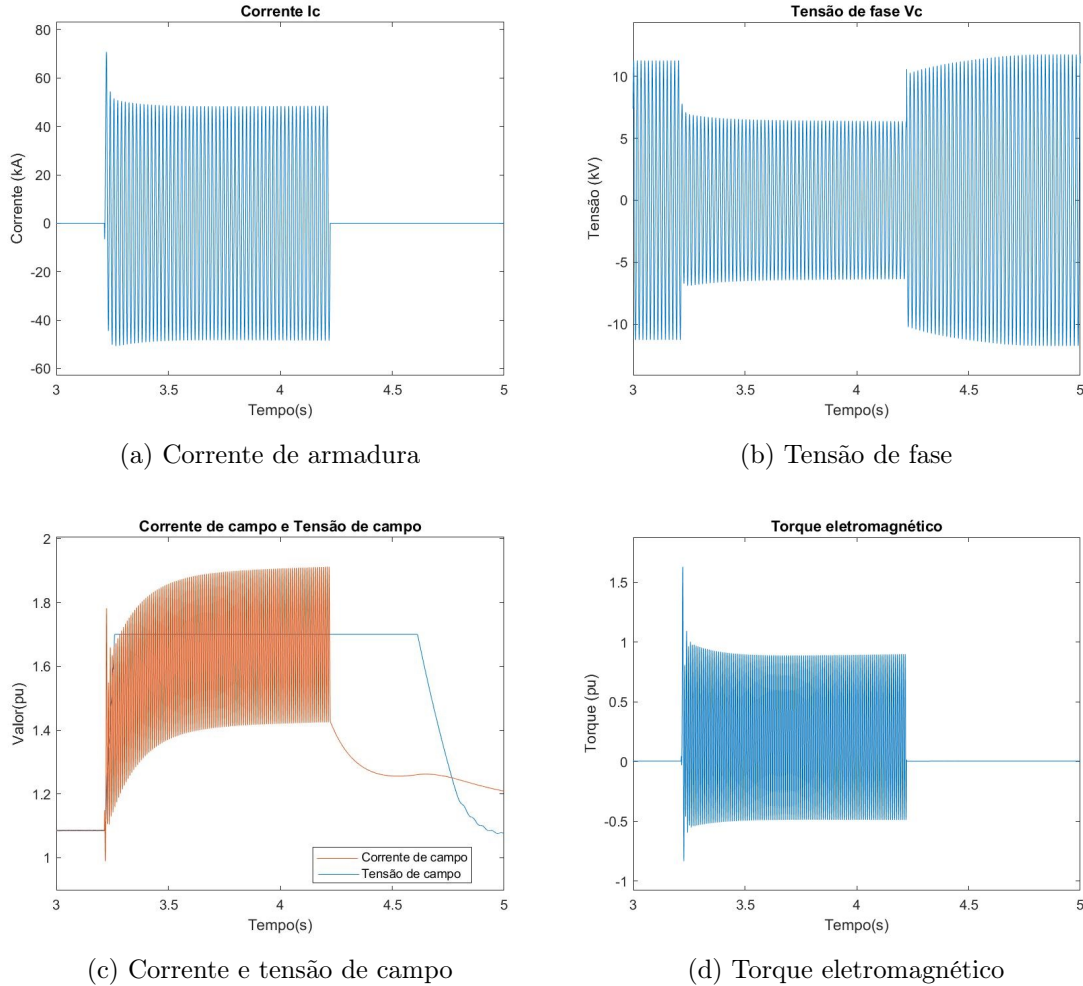


Figura 4.7: Aplicação em uma carga de 35 kA bifásica

A tabela 4.6 mostra as diferenças dos tipos de curto-circuitos. Pode se verificar que como há agora uma potência de curto-circuito bifásica a rotação diminui menos que uma aplicação trifásica, como também, a tensão de campo para sustentar uma corrente de curto-circuito bifásica é menor do que uma aplicação trifásica. Além disso, é verificado que com a falta de uma fase, a corrente de pico assimétrica bifásica é menor que a corrente de pico assimétrica trifásica.

Tabela 4.6: Comparação de tipos de curto-circuitos

Tipo de curto	Queda de tensão (%)	Corrente pico assimétrica (kA)	Corrente simétrica (kA)	Torque assimétrico (pu)	Torque simétrico (pu)	Tensão campo (pu)	Delta Rotação final (%)
Trifásico	53.00	83.14	35.30	1.41	0.33	2.2	-5.5
Bifásico	43.14	69.32	35.30	1.63	0.20	1.7	-3.3

4.6 Aplicação com tensão de campo constante

Pode-se verificar aplicações de um gerador de curto-circuito sem o uso do método de superexcitação. Para esses casos, não é possível eliminar a reação de armadura desmagnetizante em nenhum nível de curto-circuito. A figura 4.8 mostra uma aplicação com uma carga de 35 kA, mantendo constante a tensão de campo no controle.

O comportamento da figura 4.8 demonstra uma aplicação frequentemente simulada na modelagem de geradores síncronos. No estudo de caso, durante o curto-circuito, a tensão de campo é mantida em 1 pu durante todo o evento, fazendo com que apenas a corrente varie devido ao circuito LR, conforme estudado nos capítulos anteriores. Além disso, a tensão e a corrente diminuem significativamente ao longo do tempo. Portanto, neste tipo de aplicação, não é viável a utilização de tensão constante no enrolamento de campo, pois o gerador não consegue manter a corrente de curto-circuito sustentada durante o tempo de aplicação. Isso ocorre devido à insuficiência do fluxo de campo para inibir a reação de armadura.

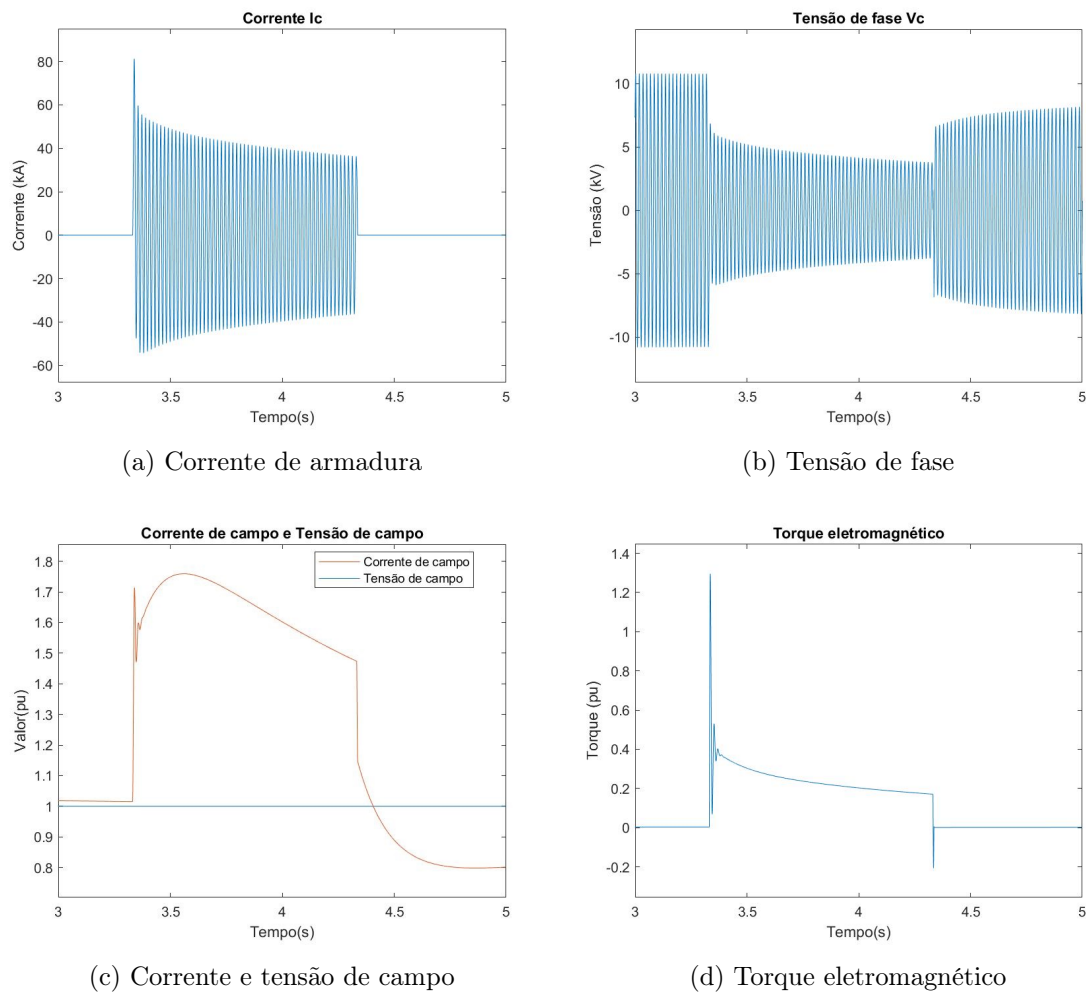


Figura 4.8: Aplicação em uma carga de 35 kA com tensão de campo constante 1 pu

A tabela 4.7 detalha as diferenças de uma aplicação com o método de superexcitação e com tensão de campo constante.

Tabela 4.7: Comparação de tensão de campo constante e superexcitação

Método de excitação	Queda de tensão (%)	Corrente pico assimétrica (kA)	Corrente simétrica (kA)	Torque assimétrico (pu)	Torque simétrico (pu)	Tensão campo (pu)	Delta Rotação final (%)
Superexcitação	53.00	83.14	35.30	1.41	0.33	2.2	-5.5
Tensão de campo constante	64.15(4.1s)	81.22	27.25 (4.1s)	1.29	0.19 (4.1s)	1	-3.8

4.7 Aplicação em corrente contínua

Alguns ensaios em um laboratório devem ser realizados em corrente contínua, por exemplo, ensaio de descarga atmosférica em cabos OPGW. Para realizar esse ensaio os terminais do gerador de curto-circuito é ligado a um retificador trifásico a diodo.

O modelo PSCAD do gerador de curto-circuito com um retificador trifásico a diodo é demonstrado na figura 4.9

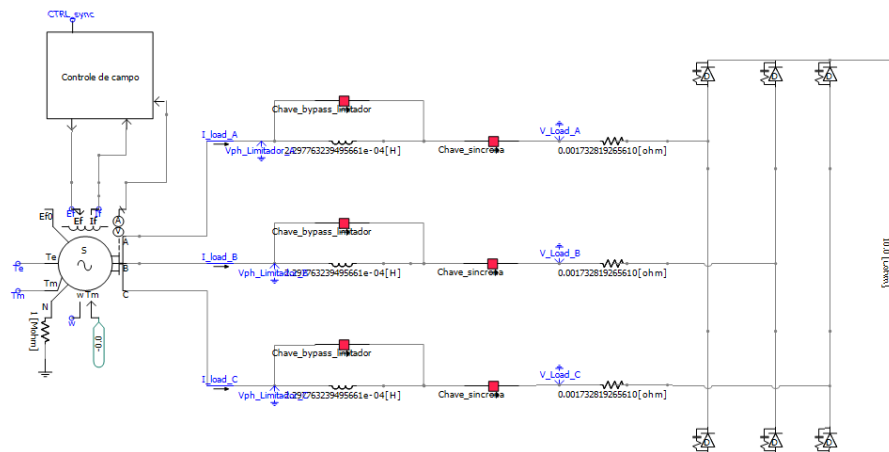


Figura 4.9: Modelo PSCAD gerador de curto-circuito em aplicação de corrente continua

A figura 4.10 mostra uma aplicação em corrente contínua com corrente eficaz de aproximadamente 50 kA. Da mesma forma, a corrente de campo mantém o mesmo valor que na aplicação CA de 35 kA demonstrada na figura 4.2. Por fim, utilizar um retificador trifásico a diodo é viável para aplicação em corrente contínua.

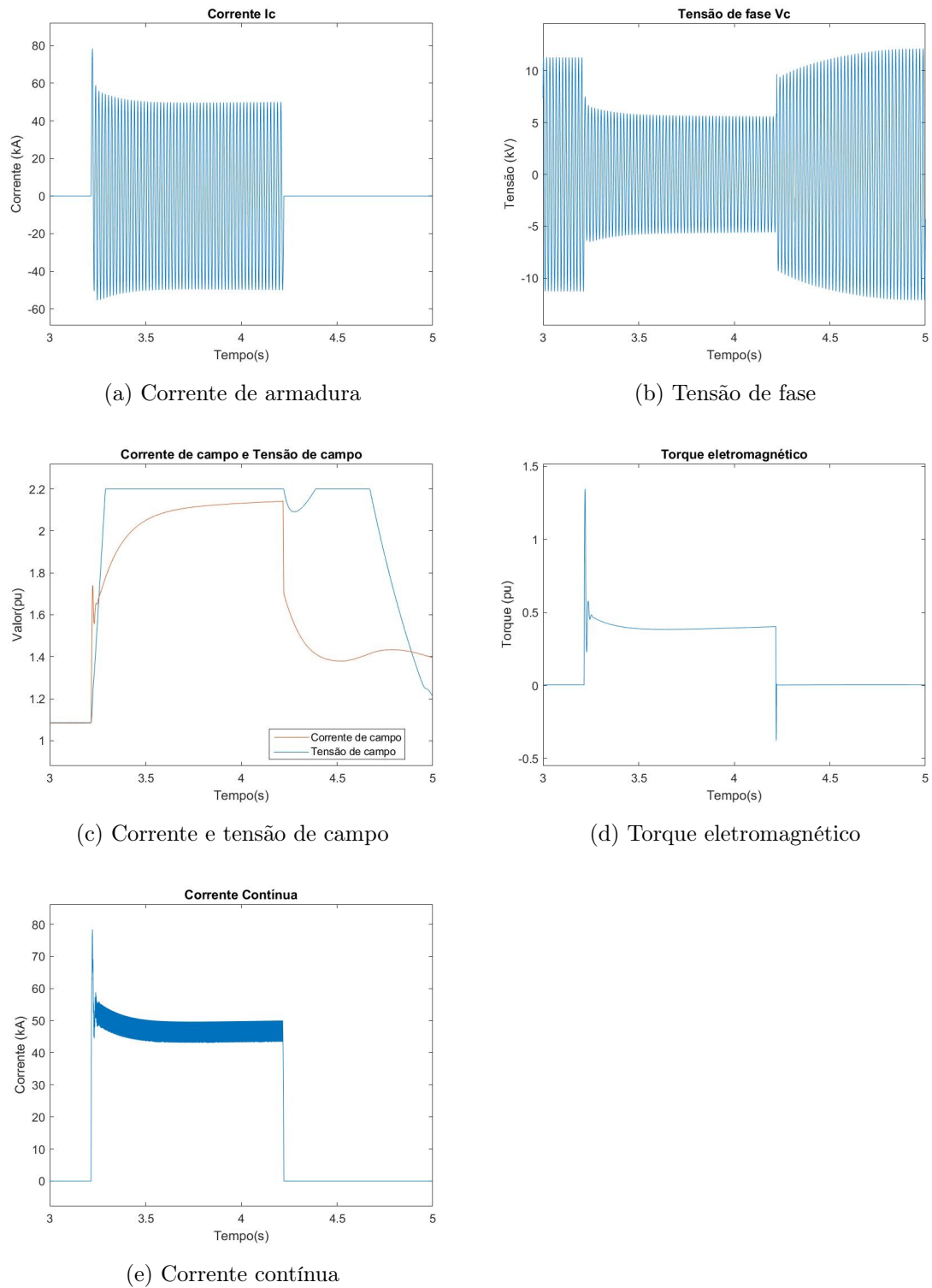


Figura 4.10: Aplicação em corrente contínua em uma carga de 35 kA

A tabela 4.8 detalha uma aplicação em corrente contínua. Uma visualização interessante neste caso é redução de velocidade ao final do ensaio ser mais severa que uma aplicação trifásica franca conforme a tabela 4.2 com uma carga de 35 kA.

Tabela 4.8: Aplicação em corrente contínua

Método de excitação	Queda de tensão (%)	Corrente pico assimétrica (kA)	Corrente simétrica (kA)	Corrente pico assimétrica CC (kA)	Corrente simétrica CC (kA)	Torque assimétrico (pu)	Torque simétrico (pu)	Tensão campo (pu)	Delta Rotação final (%)
Superexcitação	50.63	78.41	35.20	80.00	48.00	1.34	0.39	2.2	-6.3

4.8 Aplicação com geradores em paralelo

A potência de curto-circuito do gerador pode ser aumentada através do uso de geradores de curto-circuito em paralelo para alcançar níveis maiores de correntes. Torna-se mais interessante economicamente e tecnicamente construir um banco de geradores em paralelo do que comprar um gerador equivalente aos três, pois, a partida será mais suave e nem sempre é necessário a utilização dos 3 para um ensaio, aumentando sua vida útil e reduzindo a complexidade da manutenção, além disso, evita a ociosidade do laboratório caso algum gerador esteja com defeito ou em manutenção. Portanto, a potência de curto-circuito de 1300 MVA foi escolhida. É importante salientar que os geradores em paralelo devem ser semelhantes, pois seu controle de sincronismo será mais complexo caso não seja.

O modelo PSCAD do gerador de curto-circuito em paralelo é demonstrado na figura 4.11.

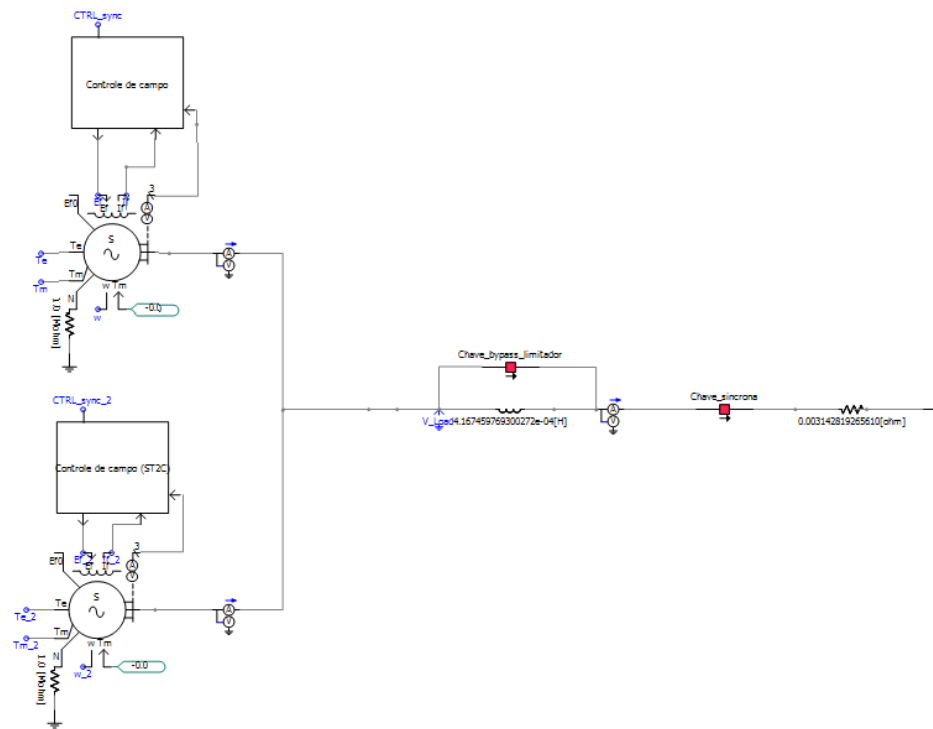


Figura 4.11: Modelo PSCAD gerador de curto-circuitos em paralelo

As figuras 4.12, 4.13 e 4.14 demonstram uma aplicação muito importante para um banco de geradores: a utilização de geradores em paralelo. Essa configuração mostra que, com geradores em paralelo, a capacidade de curto-circuito obviamente aumenta. Sua aplicação é interessante pelo fato de não ser necessário comissionar um gerador superdimensionado; em vez disso, pode-se comissionar geradores menores para criar um banco de geradores.

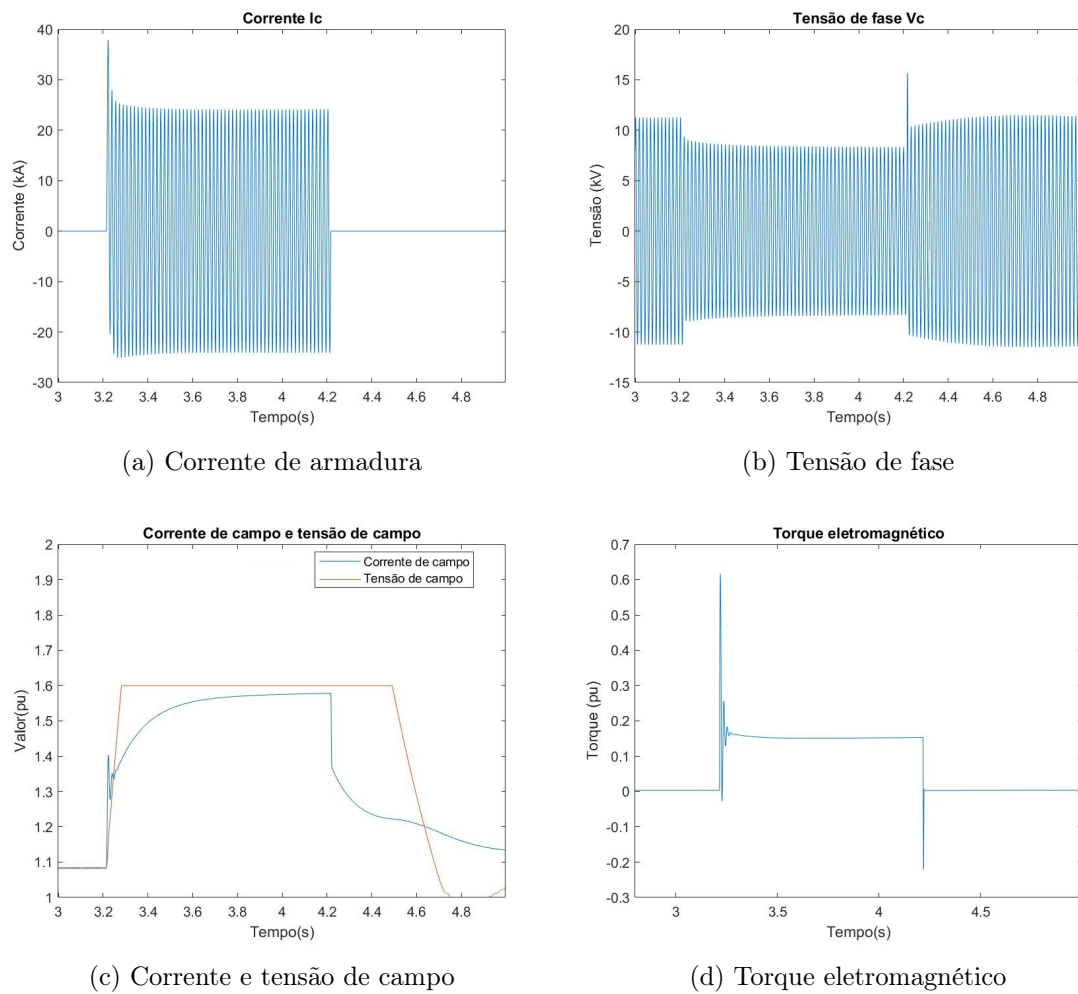


Figura 4.12: Aplicação de geradores em paralelo - gerador 1

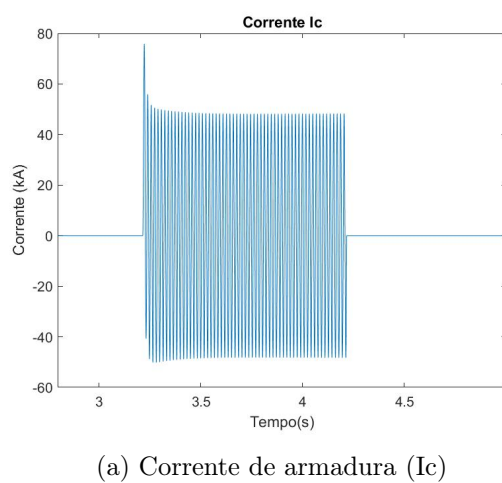


Figura 4.14: Aplicação de geradores em paralelo Total

A tabela 4.9 detalha uma aplicação utilizando banco de geradores. O banco de geradores oferece a vantagem de eliminar a necessidade de alimentar constantemente um

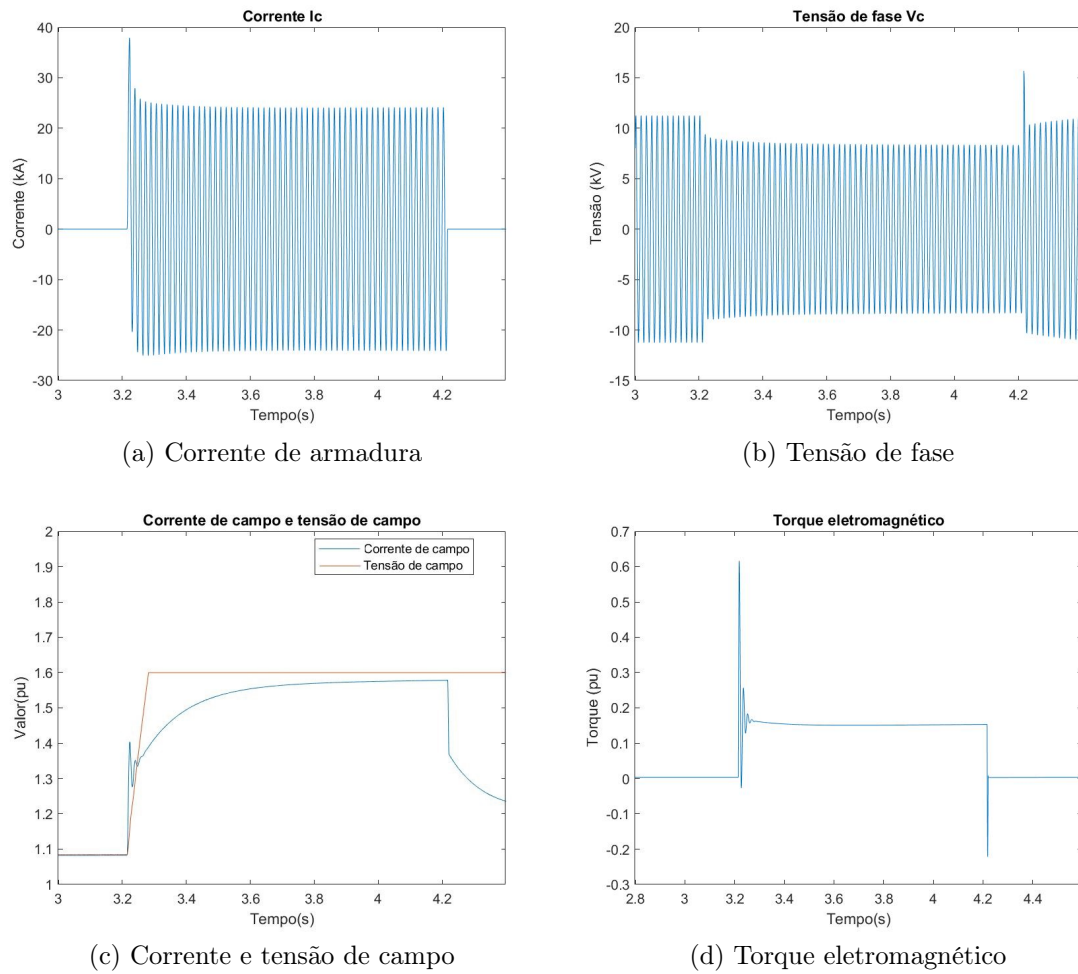
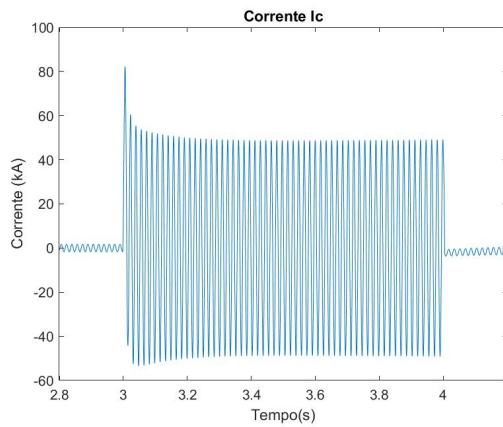


Figura 4.13: Aplicação de geradores em paralelo - gerador 2

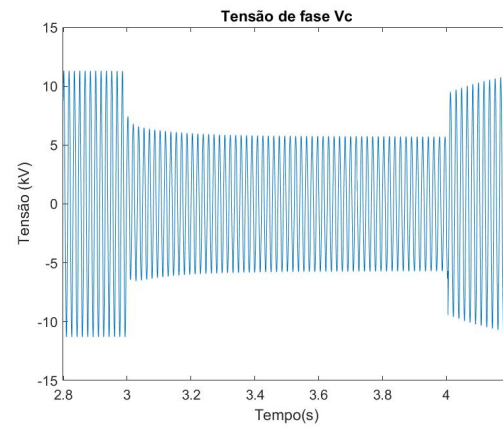
gerador muito grande para pequenos ensaios. Pode-se observar na tabela a redução de velocidade com dois geradores em paralelo será menor que em comparação ao uso de apenas um gerador para alimentar um curto de 35 kA conforme demonstrado na tabela 4.2. Entretanto, com a inclusão de dois geradores em paralelo a reatância é reduzida, então, o fator de assimetria fica menor devido a relação X/R . Para alcançar novamente o fator de assimetria deve-se reduzir a carga de resistência e aumentar a carga de reatância para manter o mesmo fator de assimetria.

Tabela 4.9: Aplicação com geradores em paralelo

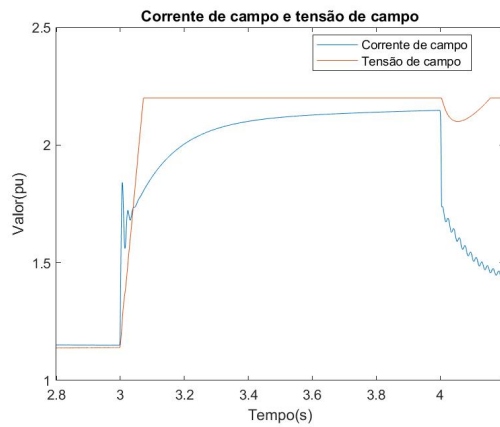
	Queda de tensão (%)	Corrente pico assimétrica (kA)	Corrente simétrica (kA)	Torque assimétrico (pu)	Torque simétrico (pu)	Tensão campo (pu)	Delta Rotação final (%)
Gerador 1	26.3	37.91	17.06	0.62	0.15	1.6	-2.4
Gerador 2	26.3	37.91	17.06	0.62	0.15	1.6	-2.4
Total	-	75.83	34.10	-	-	-	-



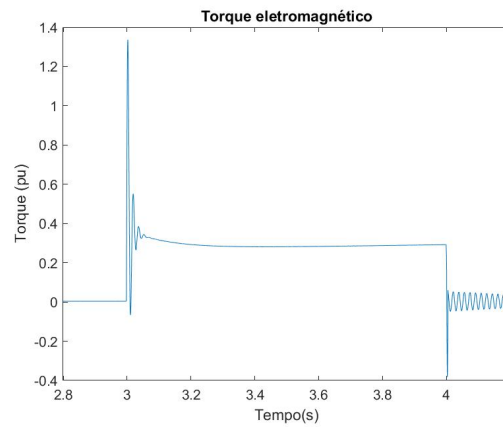
(a) Corrente de armadura



(b) Tensão de fase



(c) Corrente e tensão de campo



(d) Torque eletromagnético

Figura 4.16: Aplicação de geradores com transformador de curto-circuito - gerador

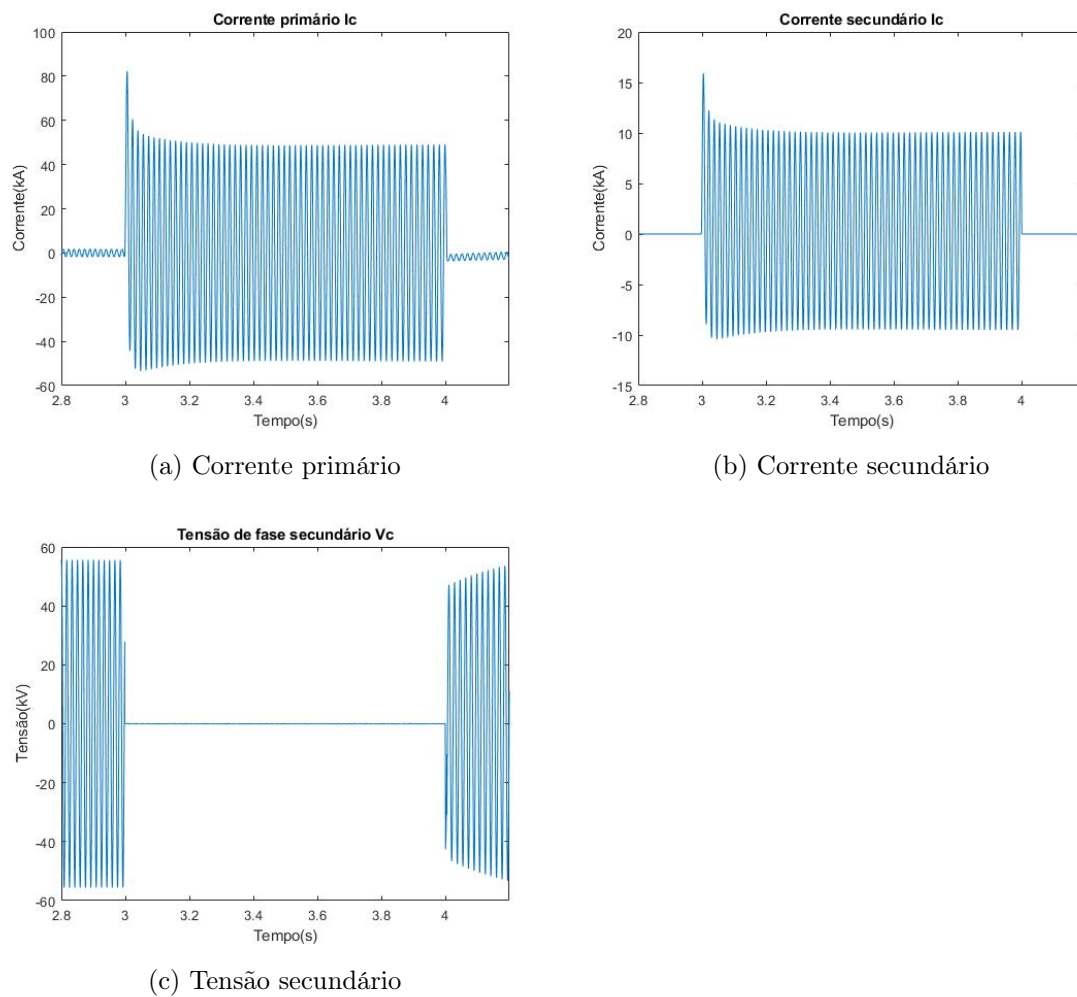


Figura 4.17: transformador de curto-circuito

A tabela 4.11 detalha o comportamento de um gerador de curto-circuito. Nesse caso, com a inclusão da impedância do transformador no circuito, a corrente de curto-circuito diminui, passando de aproximadamente 35.30 kA para 34.50 kA.

Tabela 4.11: Aplicação com gerador e transformador de curto-circuito

	Queda de tensão (%)	Tensão de fase (kV) secundário	Corrente pico assimétrica primário (kA)	Corrente simétrica primário (kA)	Corrente pico assimétrica secundário (kA)	Corrente simétrica secundário (kA)	Torque assimétrico (pu)	Torque simétrico (pu)	Tensão campo (pu)	Delta Rotação final (%)
Gerador	45	39.32	82.22	34.50	15.89	7.10	1.4	0.28	2.2	-4.7

Portanto, a utilização de um transformador na saída do gerador apresenta vantagens, como o aumento dos níveis de tensão e corrente disponíveis para realizar ensaios, o que amplia a variedade de produtos que o laboratório pode testar.

Com base no conteúdo apresentado no capítulo 4, pode-se concluir que:

O gerador de curto-circuito modelado demonstrou versatilidade e eficácia em diversas aplicações e cenários de teste. As simulações realizadas abrangeram uma ampla gama de condições operacionais, incluindo variações de carga, tensão aplicada, ângulos de fechamento, tipos de curto-circuito, aplicações em corrente contínua, operação de geradores em paralelo e uso de transformadores de curto-circuito na saída do gerador.

Os resultados obtidos indicam que o gerador é capaz de sustentar correntes de curto-circuito elevadas por períodos prolongados, em função do sistema de superexcitação implementado. Isso é particularmente importante para atender às exigências de ensaios em laboratórios de alta potência.

Algumas observações importantes incluem:

- A capacidade do gerador de manter correntes de curto-circuito estáveis em diferentes níveis de carga, desde 5 kA até 55 kA.
- A eficácia do controle de ângulo de fechamento para ajustar os níveis de assimetria nas correntes de curto-circuito, especialmente útil em aplicações bifásicas.
- A flexibilidade na variação da tensão aplicada, permitindo ensaios em diferentes níveis de tensão abaixo da nominal.
- A viabilidade de realizar ensaios tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua, ampliando a gama de aplicações possíveis.
- A possibilidade de utilizar múltiplos geradores em paralelo para aumentar a capacidade de curto-circuito total do sistema.
- A opção de adicionar transformadores de curto-circuito na saída do gerador para alcançar níveis mais altos de tensão ou corrente, embora com algumas limitações devido à impedância adicional.

Em todos os cenários testados, o gerador demonstrou capacidade de atender às exigências dos ensaios, mantendo a corrente de curto-circuito sustentada durante o período de aplicação. Isso valida a eficácia do modelo desenvolvido e seu potencial para aplicação em um laboratório de alta potência real.

Os resultados obtidos sugerem que o gerador de curto-circuito modelado é uma solução viável para a expansão da capacidade do laboratório do CEPEL, oferecendo flexibilidade e desempenho adequados para uma ampla gama de ensaios de alta potência.

Capítulo 5

Conclusão

As complexidades inerentes aos sistemas de laboratório de potência e as mudanças globais evidenciam a necessidade de expansão do laboratório de potência do CEPEL. Essa expansão visa atender a equipamentos com maiores exigências de suportabilidade em situações de falhas ou outras condições adversas. Os novos laboratórios de alta potência utilizam geradores de curto-circuito como fontes de curtos para realizar os ensaios em equipamentos.

Com o objetivo de apresentar a viabilidade técnica do funcionamento de um gerador de curto-circuito, considerando que existem poucos trabalhos publicados na literatura neste tema, foi proposto um estudo de expansão para um gerador síncrono de curto-circuito. Este gerador seria acoplado a um motor de indução, acionado por um inversor de frequência, e a um sistema AVR para realizar a sobre-excitação no possível laboratório a ser construído. O funcionamento desse conjunto se dá com o motor partindo o eixo em que o gerador síncrono também está acoplado até atingir a velocidade nominal ou desejada, conforme a frequência de ensaio. Quando a velocidade nominal é alcançada, o motor de indução é desligado da rede elétrica, e o sistema AVR permanece ligado à rede para controlar a tensão de saída do gerador de curto-circuito. Finalmente, o curto-circuito é aplicado através de uma chave síncrona, que realiza o fechamento no ângulo especificado para alcançar o valor de assimetria desejado. O sistema AVR utilizado foi modelado com base em um retificador trifásico a tiristor.

Em ocorrências de falha nos terminais de um gerador convencional, as correntes de curto-circuito tendem a ser muito altas, comparadas às correntes nominais do gerador. Nesse caso, há uma reação de armadura durante o evento de falha, o que causa uma queda de tensão e, conseqüentemente, uma redução da corrente de curto-circuito ao longo do evento. Porém, para curtos-circuitos a jusante do gerador, a corrente de curto-circuito

tende a ser sustentada ao longo do evento, pois esses curtos não são tão "significativos" para a potência de curto-circuito da máquina.

Para construir um gerador com capacidade de desenvolver correntes de dezenas de kA e sustentá-las durante todo o evento de curto-circuito, sem a necessidade de superdimensionar o gerador, utiliza-se o conceito de sobre-excitação para compensar a reação de armadura. Atualmente, esse conceito é empregado em geradores de curto-circuito, mas devido ao número limitado de publicações e equipamentos existentes, torna-se uma tecnologia complexa para encontrar parâmetros de máquina adequados. Dessa forma, foi feita a validação do funcionamento de um curto-circuito com a literatura alemã sobre aplicações de impulso no enrolamento de campo, para avaliar a sobre-excitação e demonstrar a sustentação da corrente de curto-circuito esperada, com a modelagem realizada no PSCAD/EMTDC.

Os resultados apresentados foram obtidos a partir de diversas simulações e modos operacionais para avaliar a capacidade do gerador de curto-circuito em atender às necessidades de um laboratório de alta potência, alcançando níveis muito altos de corrente e sustentando-os durante todo o ensaio de curto-circuito. Foram realizados testes com variações de carga, variações de tensão aplicada, ângulos de fechamento diferentes, diferentes tipos de curto-circuito, aplicação em corrente contínua, geradores em paralelo e transformadores de curto-circuito na saída do gerador. Além disso, foi destacada a importância do controle de excitação para manter a tensão de campo constante, aplicando-se também métodos de excitação normatizados. Todos os casos demonstraram que o gerador de curto-circuito é capaz de atender às exigências dos ensaios, mesmo que haja alguns transitórios inesperados no controle de excitação, como no caso de curto-circuito bifásico.

Diante do exposto, conclui-se que o gerador de curto-circuito modelado atende às necessidades para as quais foi desenvolvido e oferece possibilidades de expansão e ampliação no laboratório do CEPEL, frente às aplicações já existentes. Como trabalho futuro, será interessante realizar um estudo de um circuito sintético, onde a fonte de corrente de alta potência seria desenvolvida através de um gerador de curto-circuito, e a fonte de tensão seria fornecida por uma fonte de impulso já existente no laboratório. Além disso, o gerador de curto-circuito modelado se mostra viável para uma comissão no laboratório do CEPEL e abre possibilidades para futuros estudos transitórios de geradores de curto-circuito.

Referências

- [1] CARDOSO, J. A. d.; GARCIA, R. W. S. G.; ARRUDA, C. K. C. A Day in the Life of an Ultra-High-Voltage Facility. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 39, n. 6, p. 23–30, 2023.
- [2] RAMACHANDRAPPA, V.; RAGHAVIAH, B. V. India's largest short circuit generator & its salient features. *The journal of CPRI*, v. 10, n. 3, p. 499–506, 2014.
- [3] EPE, E. de P. E. *ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA 2024*. 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>.
- [4] YODA, H.; FUJITA, M.; NAKAMURA, E.; IKUZAWA, T.; OTAKA, T.; NAGANO, S. The world's largest class 8,880 MVA short circuit generator. In: *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 2, n. SUMMER, p. 688–693.
- [5] ZHELEZNYAK, V. N.; KOROVKIN, N. V. Short-Circuit Turbogenerators: Ways of Short-Circuit Power Increase for Modern Testing Facilities Operation. In: *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022*. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. p. 1307–1310. ISBN 9781665409933.
- [6] BEST High Power Tests Laboratories | INMR Laboratory Guide. Disponível em: <<https://www.inmrlaboratoryguide.com/listingcategory/high-wpower-laboratory/>>.
- [7] CONTRIBUTORS, T. S. . *Short circuit generator systems to advance research*. 3 2020. Disponível em: <<https://www.turbomachinerymag.com/view/short-circuit-generator-systems-to-advance-research>>.
- [8] ELETROBRAS. *Mapa do Sistema Elétrico Brasileiro Configuração de 2027*. 2024.
- [9] KOSHIZUKA, N. Short Circuit Generator Set for AICHI ELECTRIC CO. *MEIDEN REVIEW*, v. 2, n. 167, p. 24–28, 2016.
- [10] LANGGUTH, P. .; PANDIT, M. A. *IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION A Short-Circuit Testing Laboratory in an Educational Institution*. [S.l.], 1964.
- [11] ZHELEZNYAK, V. N.; BURMISTROV, A. A.; KOROVKIN, N. V. Short-Circuit Turbine Generator Package: Functional and Operational Features. In: . [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2023. p. 990–994. ISBN 9798350336870. ISSN 2325419X.

- [12] COMMISSION, I. E. *IEEE 62271-1 High-voltage switchgear and controlgear. Part 1, Common specifications for alternating current switchgear and controlgear*. [S.l.: s.n.], 2017. 256 p. ISBN 9782832243534.
- [13] KILGORE, L. A.; HILL, E. J.; FLICK, C. A new three-million kva short-circuit generator. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 82, p. 442–446, 1963. ISSN 00189510.
- [14] DATTA, A. K.; DUBEY, M.; JAIN, S. Effect of static power supply in alternator used for short-circuit testing-observation of shaft voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 29, n. 11, p. 6074–6080, 2014. ISSN 08858993.
- [15] SIEMENS. *High-Power Testing Laboratory - Siemens Global*. 2024. Disponível em: <<https://www.siemens.com/global/en/products/energy/medium-voltage/mv-system-services/test-and-research-laboratories/high-power-testing-laboratory.html>>.
- [16] KLONTZ, K. W.; MILLER, T. J.; MCGILP, M. I.; KARMAKER, H.; ZHONG, P. Short-circuit analysis of permanent-magnet generators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 47, p. 1670–1680, 7 2011. ISSN 00939994.
- [17] FREITAS, W.; JR, J. M. C. V.; FRANÇA, A. M.; SILVA, L. P. C. da; COSTA, V. F. da. *Análise comparativa entre geradores síncronos e geradores de indução com rotor tipo gaiola de esquilo para aplicação em geração distribuída*. 2006.
- [18] CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. 5. ed. [S.l.]: The McGraw-Hill Companie, 2012. 0-698 p. ISBN 0073529540/9780073529547.
- [19] BOLDEA, I. *The electric generators handbook. Synchronous generators*. [S.l.]: CRC/Taylor and Francis, 2006. ISBN 084935725X.
- [20] MENDONÇA, A. J. *Contribuição à determinação das reatâncias não saturadas de máquinas síncronas de polos lisos laminados*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- [21] DA, T.; ARAUJO, C. *Análise de máquina síncrona de pólos salientes sólidos*. [S.l.].
- [22] TONG, W. *Mechanical Design of Electric Motors*. [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 978-1-4200-9144-1.
- [23] TONG, W. *Mechanical Design of Electric Motors*. [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 978-1-4200-9144-1.
- [24] LAIBLE, T. *Die Theorie der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 1952.
- [25] UMANS, S. D. *Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery*. 7. ed. [S.l.]: The McGraw-Hill Global Education Holdings, 2014. 0-724 p. ISBN 0073380466 / 9780073380469.
- [26] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above. *IEEE Power and Energy Society*, p. 1–63, 2014.

- [27] BOLDEA, I. *The electric generators handbook. Synchronous generators*. [S.l.]: CRC/Taylor and Francis, 2006. ISBN 084935725X.
- [28] ONG, C. mun. *Dynamic Simulations of Electric Machinery*. 1. ed. [S.l.: s.n.], 1997. ISBN 0-13-723785-5.
- [29] KUMAR, A.; VENKATESWARLU, D. G.; ANSARI, M. A.; MONDAL, N. R. Excitation control during short circuit test sequence of 1500 mva short circuit generator. 2012.
- [30] POWER, I.; SOCIETY, E. *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005) : IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*. [S.l.]: IEEE, 2016. ISBN 978-1-5044-0855-4.
- [31] SCHAEFER, R. C.; KIYONG, K. Excitation control of the synchronous generator. *IEEE Industry Applications Magazine*, v. 7, p. 37–43, 2001. ISSN 10772618.
- [32] SHAIKH, S.; REHMAN, M.; NASEER, M. M.; KHAN, S.; AHMED, S. Comparative analysis of st1a and st2a excitation system models for voltage stability of alternator. In: . [S.l.: s.n.], 2017.
- [33] ESHRAGHNIA, R.; KLEEN, R. J. Modeling and simulation of the transient response of 138.75 mva synchronous generator with rotating and static excitation systems. In: . [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. ISBN 9781479936557. ISSN 21608563.
- [34] KINCES, M. *Digital Modelling of the Excitation and Short-Circuit Transient Characteristics of the Short-Circuit Generators*. 1–67 p. Tese (Doutorado) — Chalmer University of Technology, 2006.
- [35] SREERAM, V.; H, G. D.; R, R. M. M. A brief review of super-excitation schemes in short-circuit generators. *The Journal of CPRI*, v. 11, p. 45–50, 2015.
- [36] HELB, V. werner. Ermitilung der netzfrequenten wiederkehrspannung bei der direkten prifung von hochspannungs-leistungsschaltern. *ETZ-A*, v. 92, 1971.
- [37] GURGEL, N. B.; MOURA, A. A. F. de; MOURA, A. P. de; ROCHA, E. P. da; AGUIAR, V. de P. B. Transformações em sistemas elétricos de potência: Análise das transformadas de clarke e park. p. 1–12, 2021. ISSN 2763-5325. Disponível em: <<https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/r4em>>.
- [38] GUEDES, M. V. O cálculo operacional de heavyside. *Máquinas elétricas - Resenha histórica*, v. 1, 1997.

APÊNDICE A – Transformada de Park (dq0)

A transformação $dq0$, também chamada de transformação de Park, que foi desenvolvida em 1929 por R. H. Park, é uma transformação de coordenadas onde consideramos que os enrolamentos a, b e c, defasados de 120° , giram em sincronismo numa velocidade em relação ao referencial d e q, que é composto de 2 enrolamentos teoricamente estacionários e defasados de 90° entre si [37].

Essa transformação foi desenvolvida baseado no conceito de que como a *Máquina síncrona de polos salientes* (MSPS) possui relutância variável devido aos polos salientes, então as reatâncias vistas pelos enrolamentos do estator são variáveis em função do tempo porém, após serem transformadas as grandezas passam a “girar” junto com o rotor, enxergando os caminhos de fluxo magnético constantes que acompanham os polos do rotor, facilitando a análise [25].

A solução do problema da relutância variável surgiu a partir da observação de dois casos limítrofes para a máquina. Inicialmente observou-se o comportamento do fluxo quando a corrente de armadura está defasada de 90° da tensão gerada. Nesse caso a componente fundamental do fluxo magnético proveniente da reação de armadura está na posição inversa em relação ao fluxo de campo.

Quando a corrente de armadura está em fase com a tensão de excitação, a componente fundamental do fluxo resultante da reação de armadura é exatamente oposta a região interpolar do rotor, ficando no mesmo sentido que o fluxo de campo. Outro ponto a se considerar é que a relutância do entreferro é maior no eixo interpolar reduzindo a amplitude da componente fundamental da onda.

Assim podemos decompor as correntes de armadura em 2 componentes, uma em fase com a tensão gerada que chamamos de componente no eixo em quadratura da corrente de armadura e outra defasada de 90° em relação à tensão gerada que chamamos de componente de eixo direto da corrente de armadura [18].

A partir dessa decomposição é feita toda a modelagem da MSPL:

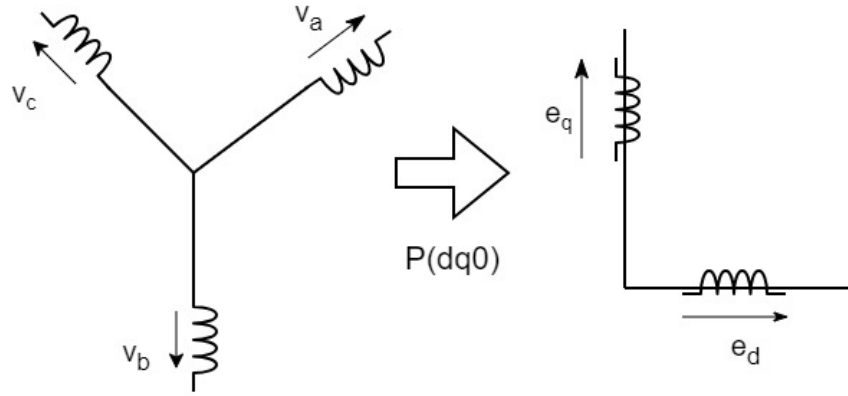


Figura A.1: Circuitos de rotor e estator da máquina síncrona.

A transformação na forma matricial pode ser representada da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Após realizar o procedimento algébrico para a inversão da matriz da equação A.1, chega-se à transformada $dq0$ inversa:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Da mesma forma que essa equação foi feita com corrente, também pode ser feita com outras grandezas que necessitem ser transformadas tais como tensão ou enlace de fluxo nas fases. Os índices d, q e 0 se referem às componentes de eixo direto, quadratura e sequência zero respectivamente.

Com a máquina devidamente balanceada, as componentes de sequência zero produzem fluxo líquido nulo de entreferro, portanto sob condições equilibradas não há grandezas de sequência zero.

APÊNDICE B – Equações de curto-circuito no domínio da frequência 's'

Para entender a modelagem matemática de super excitação, que será explicada na seção 2.5.3.2, deve-se considerar o caso mais simples dos processos de curto-circuito, principalmente para uma melhor explicação. Ou seja, durante o curto-circuito, a tensão da excitatriz, $e_{fd} = i_{fd0}$, e a velocidade de rotação são constantes, $w_{pu} = 1$. portanto, antes do curto-circuito, a máquina está ociosa, então os valores iniciais são:

$$i_{d0} = i_{q0} = i_{kd0} = i_{kq0} = 0$$

$$e_{d0} = \Psi_{qo} = 0;$$

$$e_{q0} = -\Psi_{do} = i_{fd0};$$

Para tornar os cálculos o mais claro possível, vamos temporariamente negligenciar a resistência do estator e colocar as equações no domínio da frequência 's' modificada de VAN DER POL [24, 38], As constantes de $X_d(s)$, $X_{dq}(s)$, $G_f(s)$ são desenvolvidas na literatura [24]. Por fim, as equações para o curto-circuito são:

$$e_d = 0 = -s(\Psi_d + i_{fd0}) + \Psi_q$$

$$e_q = 0 = -s\Psi_q - \Psi_d$$

$$X_d(s) = x_d'' \frac{(s + \beta_{d1})(s + \beta_{d2})}{(s + \alpha_{d1})(s + \alpha_{d2})} \tag{B.1}$$

$$X_q(s) = x_q'' \frac{s + \beta_q}{s + \alpha_q} \quad (\text{B.2})$$

$$G_f(s) = B_f \frac{(s + \gamma_f)(s + \beta_{d2})}{(s + \alpha_{d1})(s + \alpha_{d2})}$$

$$G_f(t) = B_{f1}(1 - e^{-\alpha_{d1}t}) + B_{f2}(1 - e^{-\alpha_{d2}t}) \quad (\text{B.3})$$

Sendo $\Psi_d = -i_{fd0} \cdot \cos(t)$ e $\Psi_q = i_{fd0} \cdot \sin(t)$, podemos reescrever no domínio da frequência:

$$\Psi_d = -\frac{s^2}{s^2 + 1} \cdot i_{fd0}, \Psi_q = \frac{s}{s^2 + 1} \cdot i_{fd0},$$

Ambos os fluxos oscilam com um deslocamento de fase de 90 graus e com a mesma amplitude i_{fd0} . Se a resistência do estator tivesse sido considerada, essas oscilações teriam sido amortecidas. Como é considerado $e_{q0} \neq 0$, precisa-se encontrar $\Psi_d - \Psi_{d0}$.

$$\Psi_d - \Psi_{d0} = \Psi_d + i_{fd0} = \frac{i_{fd0}}{s^2 + 1} = i_d \cdot X_d(s)$$

logo,

$$i_d = i_{fd0} \frac{1}{(s^2 + 1) \cdot X_d(s)} = i_{fd0} \frac{1}{s} \cdot \frac{s}{s^2 + 1} \cdot \frac{1}{X_d(s)} \quad (\text{B.4})$$

Assim, podemos aplicar o teorema da convolução,

$$i_d = i_{fd0} \cdot \sin(t) \left(\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\beta_{d1}t} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\beta_{d2}t} \right)$$

$$i_d = i_{fd0} \cdot \int_0^t \sin(t - \tau) \left(\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\beta_{d1}\tau} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\beta_{d2}\tau} \right) \cdot d\tau$$

$$i_d = i_{fd0} \left\{ \frac{1}{x_d} [1 - \cos(t)] + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{1}{1 + \beta_{d1}^2} [e^{-\beta_{d1}t} - \cos(t) + \beta_{d1} \sin(t)] + \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \frac{1}{1 + \beta_{d2}^2} [e^{-\beta_{d2}t} - \cos(t) + \beta_{d2} \sin(t)] \right\}$$

Para máquinas maiores, β_{d1} e β_{d2} são valores desprezíveis em relação a 1. Então, podemos reescrever da seguinte forma:

$$i_d \approx i_{fdo} \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\beta_{d1}t} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\beta_{d2}t} - \frac{1}{x''_d} \cdot \cos(t) \right] \quad (\text{B.5})$$

Analogamente, para o eixo em quadratura:

$$\Psi_q = i_{fdo} \cdot \frac{s}{s^2 + 1} = i_q \cdot X_q(s),$$

$$i_q = i_{fdo} \cdot \frac{s}{s^2 + 1} \frac{1}{X_q(s)} \quad (\text{B.6})$$

Temos,

$$i_q = i_{fdo} \cdot \cos(t) \left(\frac{1}{x_q} - \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-\beta_q t} \right),$$

$$i_q = i_{fdo} \cdot \int_0^t \cos(t - \tau) \left(\frac{1}{x_q} + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) e^{-\beta_q \tau} \right) d\tau,$$

$$i_q = i_{fdo} \left\{ \frac{1}{x_q} \cdot \sin(t) + \left(\frac{1}{x''_q} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{1}{1 + \beta_q^2} [\sin(t) + \beta_q \cos(t) + \beta_q e^{-\beta_q t}] \right\}$$

se β_q possui um valor desprezível em relação a 1, pode-se reescrever da seguinte forma:

$$i_q \approx i_{fdo} \cdot \frac{1}{x''_q} \cdot \sin(t) \quad (\text{B.7})$$

Com as equações B.5 e B.7, finalmente é encontrada a corrente do estator a partir da matriz $dq0$.

$$i_a = i_d \cdot \cos(t + \theta) - i_q \cdot \sin(t + \theta),$$

$$\begin{aligned}
 i_a = i_{fdo} & \left\{ \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\beta_{d1}t} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\beta_{d2}t} \right] \cos(t + \theta) - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{x''_d} \cos(t) \cos(t + \theta) - \frac{1}{x'_q} \sin(t) \sin(t + \theta) \right\}, \\
 i_a = i_{fdo} & \left\{ \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\beta_{d1}t} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\beta_{d2}t} \right] \cos(t + \theta) - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x'_q} \right) \cos(\theta) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_q} \right) \cos(2t + \theta) \right\} \quad (B.8)
 \end{aligned}$$

Os três primeiros termos representam uma *Corrente alternada* (CA), cuja frequência corresponde à velocidade síncrona do gerador, cuja amplitude diminui do valor inicial $\frac{i_{fd0}}{x''_d}$ para o valor final $\frac{i_{fd0}}{x_d}$. A diminuição de $\frac{i_{fd0}}{x''_d}$ para $\frac{i_{fd0}}{x'_d}$ ocorre rapidamente, pois a constante de tempo $T''_d = \frac{1}{\beta_{d2}}$ é muito pequena; por outro lado, a diminuição de $\frac{i_{fd0}}{x'_d}$ para $\frac{i_{fd0}}{x_d}$ ocorre mais lentamente devido à constante de tempo $T'_d = \frac{1}{\beta_{d1}}$ ser relativamente maior.

A parcela que desaparece rapidamente $i_{fdo} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\beta_{d2}t}$ é chamada de componente subtransitória da corrente de curto-circuito, sua constante de tempo correspondente é T''_d .

$$T''_d = \frac{1}{\beta_{d2}} \quad (B.9)$$

T''_d é a constante de tempo subtransitória de curto-circuito ao longo do eixo direto. Parcela que diminui mais lentamente é simplesmente chamada de corrente de curto-circuito transitória e a constante de tempo associada é chamada de constante de tempo transitória de curto-circuito, T'_d .

$$T'_d = \frac{1}{\beta_{d1}} \quad (B.10)$$

O termo restante da componente CA, $\frac{i_{fd0}}{x_d}$, é chamado de corrente de curto-circuito sustentada. O termo seguinte após a componente de corrente alternada na equação B.8, $-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x'_q} \right) \cos(\theta)$, é uma componente de corrente contínua ou componente assimétrico da corrente de curto-circuito, cuja magnitude depende do momento de comutação (θ). Essa componente decai com uma constante de tempo T_a que depende da resistência do enrolamento de armadura que foi negligenciada nesta seção. Se considerarmos a resistên-

cia de armadura, r_a , como não nula, mas ainda pequena em comparação com x_d'' e x_q'' , encontramos:

$$T_a = \frac{2x_d''x_q''}{r_a(x_d'' + x_q'')} \quad (\text{B.11})$$

O último termo da equação B.8 é uma corrente alternada com o dobro da frequência. Sua amplitude também não permanece constante, mas decai com a mesma constante de tempo T_a e, portanto, este termo é pequeno. Para máquinas com enrolamento de amortecimento, $x_d \approx x_q$ e, portanto, este termo é pequeno. No entanto, para máquinas sem amortecedor ou apenas com barramentos polares (ou seja, sem conexões de polo a polo), pode contribuir significativamente.

A amplitude da componente CC, como mencionado anteriormente, depende do momento de fechamento de um curto circuito. Dependendo disso, o enrolamento do estator tem diferentes posições em relação ao rotor no momento do curto-circuito. A amplitude da componente de corrente contínua é sempre ajustada de modo que a condição inicial $i_a = 0$ para $t = 0$ seja cumprida, ou seja, ele é oposto a soma dos diferentes componentes de corrente alternada no momento $t = 0$. Se o curto-circuito ocorrer, por exemplo, no momento em que o eixo do rotor coincidir com o eixo do enrolamento do estator ($\theta_0 = 0$), todas as componentes de corrente alternada começarão com seus valores máximos. Portanto, neste caso, a componente de corrente contínua também tem seu valor máximo possível, $\frac{i_{f0}}{2} \left(\frac{1}{x_d'} + \frac{1}{x_q'} \right)$. Portanto, a equação para a corrente de curto-circuito é:

$$\begin{aligned} i_a = i_{fdo} \left\{ \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] \cos(t) \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d''} + \frac{1}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q''} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(2t) \right\} \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

A figura B.1a com fechamento em $\theta_0 = 0$ mostra o oscilograma correspondente ao momento de comutação para uma máquina síncrona. Inicialmente, a corrente de curto-circuito apresenta um pico positivo em que se trata da soma das componentes de corrente alternada e contínua. Somente após o declínio da componente de corrente contínua é que a corrente se torna simétrica. Além disso, os picos positivos da corrente são agudos, enquanto os picos negativos são amortecidos, pois o termo de frequência dupla é subtraído na parte inferior e adicionado na parte superior.

O outro caso limite ocorre quando, no momento do curto-circuito, o eixo do rotor está

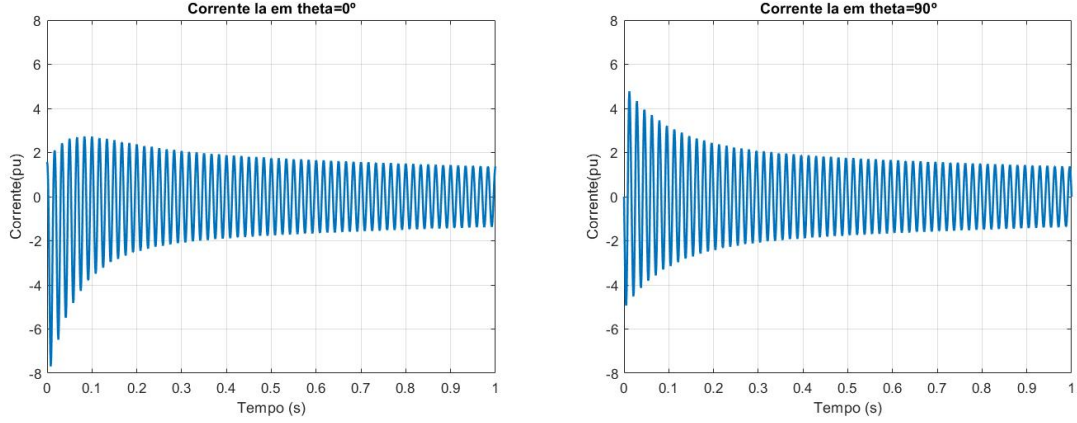

 (a) Oscilograma de um curto assimétrico $\theta_0 = 0$ (b) Oscilograma de um curto simétrico $\theta_0 = \pi/2$

 Figura B.1: Oscilogramas de curto-circuito com fechamento em θ_0

perpendicular ao eixo do enrolamento de armadura ($\theta_0 = \frac{\pi}{2}$). Nesse caso, os termos de corrente alternada se anulam, resultando na ausência de contribuição do termo de corrente contínua. A equação para a corrente é:

$$i_a = i_{fdo} \left\{ \left[\frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x'_d} - \frac{1}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \sin(t) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T_a}} \sin(2t) \right\} \quad (\text{B.13})$$

O oscilograma correspondente para a mesma máquina é mostrado na figura B.1b. A corrente é simétrica desde o início. O termo de frequência dupla mal aparece, pois seus máximos ocorrem entre os máximos e os cruzamentos com zero do componente principal. Para a avaliação e determinação experimental das constantes, x_d , x_q , T'_d , T_d , os oscilogramas da figura B.1b são muito mais adequados do que aqueles altamente assimétricos. Ao registrar as correntes de todos os três enrolamentos de uma máquina de corrente alternada, pelo menos uma delas será aproximadamente simétrica, independentemente do momento de comutação. Dessa forma, obtém-se sempre um resultado útil sem a necessidade de se concentrar especificamente no momento de comutação.