

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP
ESCOLA POLITÉCNICA

Luan Andrade de Sousa

**Desenvolvimento e implementação de controle e
proteção para geração eólica de energia utilizando
geradores de indução gaiola de esquilo com teste em
bancada**

Versão corrigida

São Paulo
2023

Luan Andrade de Sousa

**Desenvolvimento e implementação de controle e
proteção para geração eólica de energia utilizando
geradores de indução gaiola de esquilo com teste em
bancada**

Versão corrigida

Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica para a obtenção do título de Mestre em Ciência.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Renato Machado Monaro

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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

São Paulo, 10 de fevereiro de 2023

Assinatura do autor:

Luan Andrade de Sousa

Assinatura do orientador:

Renato M. Morano

Catálogo-na-publicação

Sousa, Luan Andrade de

Desenvolvimento e implementação de controle e proteção para geração eólica de energia utilizando geradores de indução gaiola de esquilo com teste em bancada / L. A. Sousa -- versão corr. -- São Paulo, 2022.

119 p.

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

1. Proteção de equipamentos elétricos 2. Controle digital 3. Máquina elétrica de corrente alternada 4. Energia eólica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, Maria José e Luis, por todo o suporte que me deram, permitindo que eu conseguisse chegar onde cheguei, por sempre estar do meu lado nos momentos felizes e difíceis, por me darem a oportunidade de estudar e ter uma formação de qualidade. Aos meus irmãos, principalmente a Larissa, pelo apoio e carinho durante toda essa jornada, dando o apoio necessário para que eu conseguisse seguir em frente.

Agradeço a minha família, principalmente a minha tia Joana e minha prima Flávia, por cuidarem de mim quando precisei e pelo incentivo a continuar tentando.

Agradeço muito ao meu orientador, Professor Dr. Renato Machado Monaro, acima de tudo por ser um amigo, um parceiro durante toda essa jornada, agradeço pelos ensinamentos passados tanto relacionados ao mestrado quanto a vida, pela paciência durante esses anos me guiando através dos erros e dificuldades que encontramos.

Agradeço meu colegas do Lgrid, que me ajudaram durante o mestrado, principalmente ao meu amigo Rodolfo, que seguiu junto comigo nessa jornada, aprendemos juntos e um com o outro, sem ele não teria sido tão gratificante essa jornada.

*“Success is walking from failure to failure
with no loss of enthusiasm.”
(Winston Churchill)*

Resumo

SOUSA, LUAN ANDRADE DE. **Desenvolvimento e implementação de controle e proteção para geração eólica de energia utilizando geradores de indução gaiola de esquilo com teste em bancada.** 119 p. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2023.

Devido ao aumento da necessidade de fontes de energia, principalmente renováveis, há um crescente estudo e desenvolvimento nestes tipos de tecnologia. Uma das formas que está se destacando tanto no mercado quanto no meio acadêmico é a energia eólica. Duas metodologias bastante estudadas para melhorar não só a eficiência da geração de energia como também diversificar a funcionalidade desta modalidade de geração, são as ações de controle e os sistemas de proteção, pois estes, quando bem implementados, podem aumentar a vida útil da fazenda eólica, melhorar a produção de energia, dar auxílio à rede em faltas, dentre outras vantagens. Este trabalho apresenta, para uma geração de energia eólica baseada no gerador de gaiola de esquilo, a confecção de um método de controle, análise de sua funcionalidade e a resposta do sistema a faltas externas e internas. Por fim, verificou-se a influência mútua entre a rede e a turbina atuando uma sobre a outra na ocorrência de falha no sistema. Essa análise foi feita primeiramente em simulações utilizando os softwares Simulink[®] e MATLAB[®] do MathWorks, usando diferentes modelos para o controle e proteção. Verificado o funcionamento em simulação dos modelos, implementaram-se os parâmetros identificados em uma bancada experimental construída para testes desse tipo. Os dados obtidos nesta bancada foram usados para verificar o funcionamento correto quanto a estratégia de controle escolhida e suas influências. Outra utilização desta bancada é observar como o sistema reage a uma falta interna do gerador e a análise dos dados obtidos ao realizá-la.

Palavras-chave: Gerador gaiola de esquilo; Controle de fluxo de potência; Faltas internas; Testes em bancada.

Abstract

SOUSA, LUAN ANDRADE DE. **Development and implementation of control and protection for wind power generation using squirrel cage induction generator with a test bench.** 119 p. Master Thesis – Polytechnic School, University of São Paulo, 2023.

Due to the increasing need for energy sources, especially renewable ones, there is a growing study and development in these types of technology. One of the technologies that is being highlighted, both in the market and in academia, is wind energy. Two widely studied ways to improve, not only the efficiency of power generation, but also to diversify the functionality of this type of generation are the control actions and protection protocols, because these, when well implemented, can increase the life span of the farm, improve energy production and assist the grid in faults among other advantages. The aim of this study is, for a wind power generation based on squirrel cage generator, to make a control method, verify its functionality and analyze the response of the system to external and internal faults. Finally, the objective is to confirm the mutual influence between the grid and the turbine acting over each other in the occurrence of a fault in the system. This analysis will first be done in simulations using the MathWorks software Simulink[®] and MATLAB[®], with different models for control and protection. Once the models are confirmed to work in simulation, the identified parameters are implemented on an experimental bench built for such tests. The data obtained on this bench is used to verify the correct operation regarding the chosen control strategy and its influences. Another use of this bench is to investigate how the system reacts to an internal fault in the generator and the analysis of the data obtained by performing it.

Keywords: Squirrel cage induction generator; Power flow control; Intern faults; Test bench.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Modelo simplificado do sistema estudado.	25
Figura 2 – Circuito equivalente do lado da rede do sistema.	26
Figura 3 – Circuito equivalente do lado do gerador em referencial síncrono.	28
Figura 4 – Diagrama de blocos equivalente para o circuito do lado da rede.	33
Figura 5 – Diagrama de blocos equivalente para o circuito do lado do SCIG.	36
Figura 6 – Representação em Diagrama de blocos do estimador de fluxo.	38
Figura 7 – Modelo simplificado do conjunto rede+conversor usando fonte de tensão no link CC.	43
Figura 8 – Degrau no referencial da corrente I_q do conversor do lado da rede.	43
Figura 9 – Degrau no referencial da corrente I_d do conversor do lado da rede.	44
Figura 10 – Modelo simplificado do conversor do lado da rede com a adição do <i>chopper</i> e capacitor no lugar da fonte de tensão no elo CC.	45
Figura 11 – Controle da tensão do Link CC ao inserir uma carga.	45
Figura 12 – Modelo simplificado do conjunto gerador+conversor com conjunto de fontes de tensão no link CC.	46
Figura 13 – Degrau no referencial da corrente I_q do conjunto gerador+conversor.	47
Figura 14 – Degrau no referencial da corrente I_d do conjunto gerador+conversor.	48
Figura 15 – Controle de fluxo na inicialização do sistema em conjunto com o controle da variável I_d	49
Figura 16 – Controle de velocidade ao colocar torque no sistema em conjunto com o controle da variável I_q	50
Figura 17 – Bancada de testes completa.	51
Figura 18 – Modelo completo da bancada de testes.	54
Figura 19 – Força motriz ligada ao gerador, composta por motor de indução e inversor.	55
Figura 20 – Conjunto de pólias e correia.	55
Figura 21 – Gerador de indução com o rotor em curto, emulando um gerador gaiola de esquilo.	56
Figura 22 – Configuração das derivações adicionadas nos enrolamentos do estator.	57

Figura 23 – Vista superior dos conversores, placas de medição e dos filtros.	57
Figura 24 – Conversor de 2 níveis, com 4 braços usado no lado da rede e suas especificações.	58
Figura 25 – Esquema interno do Conversor de 2 níveis com o <i>chopper</i>	58
Figura 26 – Conversor de 3 níveis, com 4 braços usado no lado do gerador e suas especificações.	59
Figura 27 – Esquema interno do Conversor de 3 níveis.	59
Figura 28 – Processo de produção de pulsos de disparo para o conversor de 3 níveis.	60
Figura 29 – Placas de medição de tensão (a esquerda), corrente (a direita) e de <i>shift-level</i> (primeira placa da direita de cima para baixo)	60
Figura 30 – Diagrama do funcionamento das placas de medição	61
Figura 31 – MicrolabBox [®]	62
Figura 32 – Entradas e saídas analógicas e digitais do MicrolabBox [®]	62
Figura 33 – Interface gráfica criada no DSPACE [®] para monitoramento e controle dos sinais.	63
Figura 34 – Variac trifásico usado para controlar o nível de tensão de entrada. . . .	64
Figura 35 – Variac bifásico usado para controla o nível de tensão do link CC, em conjunto com o retificador (entrada do retificador ao lado esquerdo do varic).	64
Figura 36 – Resistência de 42,8 Ω usada para ajuste de ganhos e como <i>chopper</i>	65
Figura 37 – Conjunto de 8 resistências de 22 Ω construída em base de madeira e ligada a borners para facilitar mudança de configuração	65
Figura 38 – Multímetro, amperímetro e osciloscópio usados durante a construção e testes da bancada.	66
Figura 39 – Teste do controle de tensão do link CC através de ativação do <i>chopper</i> .	68
Figura 40 – Teste do controle de reativos através de mudanças no referencial de corrente I_q	68
Figura 41 – Testes de controle de fluxo do gerador em conjunto com teste de controle do da corrente I_q aumentada em step de 1 A.	70
Figura 42 – Testes de controle de velocidade.	72
Figura 43 – Sistema estudado dividido em zonas, identificando as proteções utilizadas durante a simulação.	75
Figura 44 – Modelo simplificado do sistema indicando pontos de falta e local dos medidores.	76
Figura 45 – Resposta do lado da rede à falta fase terra no Ponto A - Zona 3	77
Figura 46 – Resposta do lado do gerador à falta fase terra no Ponto A - Zona 3 . .	77
Figura 47 – Resposta do lado da rede à falta fase terra no Ponto B - Zona 3. . . .	78
Figura 48 – Resposta do lado do gerador à falta fase terra no Ponto B - Zona 3. . .	78
Figura 49 – Resposta do lado da rede à falta fase terra no Ponto C - Zona 1. . . .	79

Figura 50 – Resposta do lado do gerador à falta fase terra no Ponto C - Zona 1. . .	79
Figura 51 – Resposta do lado da rede à falta fase terra no Ponto D - Zona 1.	80
Figura 52 – Resposta do lado do gerador à falta fase terra no Ponto D - Zona 1. . .	80
Figura 53 – Potência do sistema durante falta fase terra - gráficos a esquerda são referentes a rede e gráficos a direita ao gerador, são eles de cima pra baixo no ponto A, B, C e D.	81
Figura 54 – Possíveis faltas a realizar nos enrolamentos da máquina.	83
Figura 55 – Diagrama usado para realizar as faltas nos enrolamentos da máquina.	83
Figura 56 – Influência da falta interna nas derivações D_{05} D_{08} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$ nos parâmetros da máquina.	85
Figura 57 – Sobreposição da tensão antes da falta e durante ela, para a falta nas derivações D_{05} D_{08} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$	86
Figura 58 – Componentes harmônicas da tensão do gerador antes e durante a falta.	87
Figura 59 – Sobreposição da corrente antes e durante a falta, para a falta nas derivações D_{05} D_{08} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$	87
Figura 60 – Componentes harmônicas da tensão do gerador antes e durante a falta.	88
Figura 61 – Influência da falta interna nas derivações D_{05} D_{08} com falta franca nos parâmetros da máquina.	89
Figura 62 – Sobreposição da tensão antes da falta e durante ela, para a falta nas derivações D_{05} D_{08} com falta franca.	90
Figura 63 – Componentes harmônicas da tensão do gerador antes e durante a falta.	91
Figura 64 – Sobreposição da corrente antes da falta e durante ela, para a falta nas derivações D_{05} D_{08} com falta franca.	92
Figura 65 – Componentes harmônicas da corrente do gerador antes e durante a falta.	92
Figura 66 – Influência da falta interna nas derivações D_{02} D_{03} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$ nos parâmetros da máquina.	94
Figura 67 – Sobreposição da tensão antes da falta e durante ela, para a falta nas derivações D_{02} D_{03} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$	95
Figura 68 – Componentes harmônicas da tensão do gerador antes e durante a falta.	95
Figura 69 – Sobreposição da corrente antes da falta e durante ela, para a falta nas derivações D_{02} D_{03} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$	96
Figura 70 – Componentes harmônicas da corrente do gerador antes e durante a falta.	96
Figura 71 – Influência da falta interna nas derivações D_{02} D_{03} com falta franca nos parâmetros da máquina.	97
Figura 72 – Sobreposição da tensão antes da falta e durante ela, para a falta nas derivações D_{02} D_{03} com falta franca.	98
Figura 73 – Componentes harmônicas da tensão do gerador antes e durante a falta.	99
Figura 74 – Sobreposição da corrente antes da falta e durante ela, para a falta nas derivações D_{02} D_{03} com falta franca.	100

Figura 75 – Componentes harmônicas da corrente do gerador antes e durante a falta.	100
Figura 76 – Resposta do lado da rede à falta trifásica no Ponto A - Zona 3, a esquerda do medidor.	108
Figura 77 – Resposta do lado do gerador à falta trifásica no Ponto A - Zona 3, a esquerda do medidor.	109
Figura 78 – Resposta do lado da rede à falta trifásica no Ponto B - Zona 3, à direita do medidor.	110
Figura 79 – Resposta do lado do gerador à falta trifásica no Ponto B - Zona 3, à direita do medidor.	111
Figura 80 – Resposta do lado da rede à falta trifásica no Ponto C - Zona 1, à esquerda do medidor.	112
Figura 81 – Resposta do lado do gerador à falta trifásica no Ponto C - Zona 1, à esquerda do medidor.	113
Figura 82 – Resposta do lado da rede à falta trifásica no Ponto D - Zona 1, à direita do medidor.	114
Figura 83 – Resposta do lado do gerador à falta trifásica no Ponto D - Zona 1, à direita do medidor.	115
Figura 84 – Circuito equivalente do lado da rede do sistema.	116
Figura 85 – Esquema elétrico das placas de corrente e tensão.	118
Figura 86 – Esquema elétrico das placas de ajuste de nível de tensão.	119

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores dos parâmetros do sistema.	42
Tabela 2 – Valores dos parâmetros dos controladores.	42
Tabela 3 – Parâmetros do gerador utilizado.	56
Tabela 4 – Valores dos parâmetros dos controladores do lado da rede embarcados no MicrolabBox [®]	66
Tabela 5 – Valores dos parâmetros dos controladores do lado do gerador embarcados no MicrolabBox [®]	69
Tabela 6 – Valores dos disparos para as proteções usadas	76
Tabela 7 – Tempo de ativações dos gatilhos de proteção implementados	82
Tabela 8 – Tabela contendo as posições das derivações presentes na máquina.	84
Tabela 9 – Pares de derivações de diferentes bobinas de uma mesma fase que compartilham da mesma ranhura, possibilitando a existência de curto entre elas.	84
Tabela 10 – Pares de derivações de uma mesma bobina que compartilham da mesma ranhura, possibilitando a existência de curto entre elas.	93

Lista de Siglas

CA Corrente Alternada

CC Corrente Contínua

ONS Operador Nacional do Sistema elétrico

PI Proporcional-Integral

PWM *Pulse Width Modulation* (Modulação por largura de pulso)

RMS *Root Mean Square* (valor eficaz)

SCIG *Squirrel Cage induction Generator* (gerador de indução gaiola de esquilo)

SIN Sistema Interligado Nacional

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivo	23
1.2	Estrutura da dissertação	23
2	METODOLOGIA	25
2.1	Modelagem	26
2.1.1	Fonte de torque	26
2.1.2	Rede, filtro e conversor do lado da rede	26
2.1.3	Gerador e o seu conversor	28
2.1.4	PWM	31
2.2	Controle	31
2.2.1	Método de ajuste dos controladores	32
2.2.2	Controle do lado da rede	32
2.2.3	Controle do lado do SCIG	35
3	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	39
3.1	Breve Resumo Bibliográfico	39
3.2	Parâmetros do sistema	41
3.3	Simulações no lado da rede	42
3.3.1	Controle de corrente	42
3.3.2	Controle de tensão do Link CC	44
3.4	Simulações do lado do gerador	46
3.4.1	Controle de corrente	46
3.4.2	Controle de fluxo e velocidade	47
4	BANCADA DE TESTES	51
4.1	Breve Resumo Bibliográfico	52
4.2	Descrição geral da bancada de teste	53

4.2.1	Força motriz, gerador, conversores	54
4.2.2	Equipamentos de medição e tratamento inicial dos sinais	59
4.2.3	Controlador - MicrolabBox	61
4.2.4	Equipamentos auxiliares	63
4.3	Testes de controle em bancada	66
4.3.1	Teste no lado da rede	66
4.3.2	Testes no lado da máquina	69
5	PROTEÇÃO DE GERADORES DE VELOCIDADE VARIÁ- VEL	73
5.1	Breve Resumo Bibliográfico	74
5.2	Proteções e faltas externas - Simulação	75
5.2.1	Simulação de faltas	75
5.3	Proteções e faltas internas - Bancada	82
5.3.1	Faltas internas	82
6	CONCLUSÃO	101
	REFERÊNCIAS	103
A	ANEXOS/SIMULAÇÃO DE FALTA TRIFÁSICA	107
B	ANEXOS/ESQUEMAS ELÉTRICOS DAS PLACAS DE ME- DIÇÃO	117

Introdução

A produção de energia renovável vem crescendo em ritmo acelerado pelo mundo, e uma das tecnologias predominante neste crescimento é a geração eólica. Esta teve, em 2020, o maior aumento em potência instalada da história, com um aumento de mais de 93 GW, 59% a mais que no ano anterior. Com isso, a potência total instalada pelo mundo agora chega a 743 GW. Também é previsto que sejam instalados até 469 GW de potência até 2025 (COUNCIL, 2021). Aumentos desta proporção no número de fazendas eólicas instaladas trazem uma necessidade de analisar os padrões atuais deste sistema, buscando melhoras em sua eficiência e estabilidade.

Uma ampla gama de estudos está sendo realizada pelo mundo para suprir as dificuldades e necessidades introduzidas pela implementação desta tecnologia e suas particularidades. Grande parte destes estudos são focados nos tipos de geradores a serem implementados conforme a demanda e a disponibilidade da tecnologia ou da forma de geração. Uma das maneiras investigadas para atender à esses fatores é a implementação de controle no sistema, de forma a aumentar sua funcionalidade e eficiência. Outra possível alternativa é a implementação de algoritmos de proteção do sistema para garantir o funcionamento destas novas vertentes de geração de energia. Tais estudos são frequentemente baseados em simulações do sistema utilizando modelos matemáticos e softwares de simulação, alterando o tipo de gerador usado, a forma de transmissão, o tipo de controle e/ou os algoritmos de proteção.

Os geradores utilizados na conversão de energia eólica são na maioria de velocidade variável (LETCHER, 2017; BOLDEA, 2017). Segundo ACKERMANN (2005), parte das fazendas eólicas utilizam geradores de indução, tal fato se deve ao baixo custo de fabricação em larga escala deste tipo de gerador, aliado a uma alta robustez e simplicidade mecânica. Uma das opções neste caso são os geradores de gaiola de esquilo ou *Squirrel Cage Induction Generator* (SCIG). Estes são escolhidos por serem mais simples de se trabalhar, ao passo em que mantém uma alta eficiência energética e baixa necessidade de manutenção. Nesta configuração são normalmente utilizados 2 conversores, em configuração *back-to-back*, para compensar a diferença de frequências entre o gerador de velocidade variável e a rede, além

de auxiliar no controle de troca de energia entre as turbinas e a rede (BOLDEA, 2017).

Com a utilização dos conversores *back-to-back*, a necessidade de implementar formas de controle para manter o fluxo de potência e a frequência nos pontos de máxima eficiência ou em pontos de utilização escolhidos pelos usuários fica aparente. Assim sendo, a utilização deste conjunto gerador+conversor somada a necessidade da implementação de controle leva a uma mudança da dinâmica do sistema como um todo. Mudanças estas também observadas no comportamento do sistema durante a ocorrência de falhas, tanto mecânicas quanto elétricas, ao longo do seu funcionamento. Considerando geradores eólicos, uma vez que existe a preferência por geradores de velocidade variável, tais estudos apresentam notável importância dada a falta destes voltados à proteção quando se consideram a influência das particularidades deste tipo de sistema (BATAGLIOLI; MONARO; COURRY, 2019).

Um bom passo inicial para investigar a dinâmica deste caso e como aproveitá-la para o melhoramento do sistema é a utilização de simulações numéricas de modelos matemáticos. Um segundo passo, complementar às simulações numéricas e a utilização de uma bancada de testes. Nesta abordagem, a influência de interferências e/ou parâmetros não considerados nos modelos matemáticos pode ser investigada, além de permitir a verificação de como erros e atrasos de equipamentos reais interferem na ação de proteção e do controle.

O estudo detalhado das ações dos conversores, gerador e rede em falta externa e interna é realizado através de uma análise dos parâmetros do sistema obtidos tanto em simulação como em bancada, permitindo então identificar melhor as diferenças entre faltas internas e externas bem como a influência do controle nestas faltas. Esse resultado motiva a investigação das características dos sinais de tensão e corrente para, principalmente, os casos de faltas internas. Essa motivação vem da escassez, na literatura, de estudos e métodos voltados especificamente para este tipo de falta na topologia estudada. A investigação destes sinais visa indicar a direção para a proposição de novos algoritmos de proteção aplicáveis aos equipamentos em questão.

Especificamente com a construção da bancada de testes, é possível fazer um estudo mais profundo de faltas internas no gerador, devido a sua construção, onde é disponível ao usuário diversas maneiras de se realizar uma falta interna, garantindo um estudo mais completo destas falhas, como a falta entre bobinas em uma mesma fase ou em uma bobina particular desta fase. Outra particularidade importante estudada é que a bancada traz a oportunidade de avaliar como as medidas particulares de um conversor de 3 níveis podem auxiliar na detecção de falhas no sistema, tópico em que não foram encontradas referências sobre o assunto durante a confecção desta dissertação.

1.1 Objetivo

Este trabalho visa primeiramente o estudo com modelos matemáticos existentes do SCIG e dos conversores. A partir destes, são escolhidos e implementados os algoritmos de controle e proteção e por fim são realizadas as simulações do seu funcionamento no software Simulink[®] do MATLAB[®]. De posse dos resultados desta simulação é possível verificar a influência do controle e das proteções quando em estado de falta, além de averiguar o motivo das interferências.

O segundo objetivo é a construção da bancada de testes e modificações nas simulações para acomodar os equipamentos utilizados. Usando nesta bancada os parâmetros encontrados na modelagem e simulação, são feitos os testes no modelo de controle e proteção, e, na sequência, verificam-se as interferências nos funcionamentos de um devido à inclusão do outro.

Visto que esse tipo de teste pode prover uma análise mais real do comportamento de uma fazenda eólica, a presente dissertação pode se tornar um ponto de partida para futuras análises deste comportamento dinâmico e sua utilização para auxiliar e aprimorar a geração de energia eólica na totalidade.

1.2 Estrutura da dissertação

Para auxiliar o entendimento e compreensão das propostas supracitadas, a dissertação foi separada da seguinte maneira:

Metodologia

Este capítulo disserta sobre as modelagens matemáticas dos componentes do sistema, assim como o método de controle utilizado, o cálculo dos parâmetros de controle e quais serão as proteções utilizadas no sistema.

Simulação computacional

Este capítulo utiliza os parâmetros de controle encontrados com os dados do sistema estudado, mostrando o funcionamento do controle passo a passo. Em seguida, fazem-se simulações em estado de falta mostrando os sinais de disparo dos sistemas de proteção. Por fim, coloca-se em teste a influência do controle no sistema em falta com as proteções.

Testes em bancada

Este capítulo mostra como foi construída a bancada, os componentes que pertencem ao sistema e às simulações presente no capítulo anterior, mas agora utilizando um sistema real.

Proteção e faltas

Este capítulo apresenta a situação atual de proteção para geração eólica com geradores de velocidade variável, as simulações computacionais do sistema em falta externa e os testes em bancada para falta interna, analisando o comportamento do sistema quando estas ocorrem.

Conclusão

O último capítulo sintetiza os principais resultados obtidos, assim como as contribuições dessa dissertação para o desenvolvimento de fazendas eólicas, principalmente SCIG.

Metodologia

Este capítulo apresenta os modelos dos principais componentes de um sistema de geração eólica, baseado em gerador de indução. Os blocos de controles para os conversores e como seus parâmetros são ajustados são discutidos. Por fim, as proteções aplicáveis para esse tipo de geração são detalhadas em paralelo com os tipos de faltas.

A Figura 1 mostra quais são os principais componentes do sistema que precisam ser modelados para o cálculo dos parâmetros de controle e estabelecimento das diretrizes de proteção a serem utilizados. Nesta são destacados dois blocos que representam os conversores na configuração *back-to-back*. O conversor do lado da rede é responsável pelo controle da tensão do elo CC e injeção de potência reativa na rede AC. O conversor do lado do gerador controla o fluxo magnético da máquina e a velocidade angular pelo ajuste do torque elétrico do gerador.

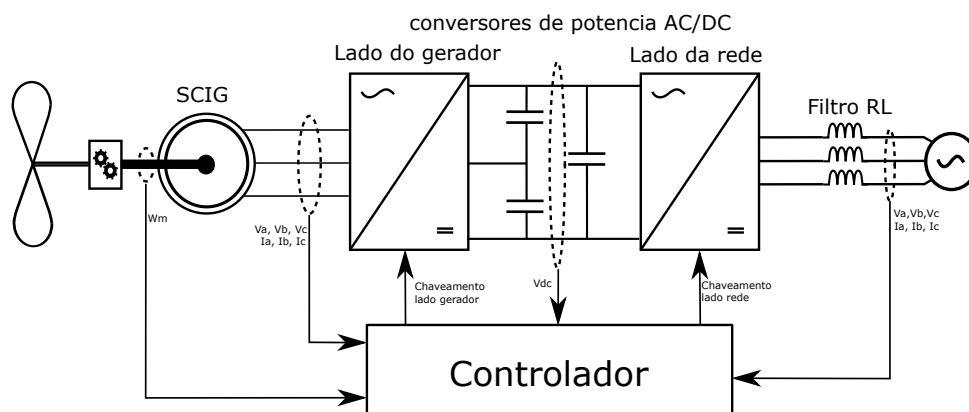


Figura 1 – Modelo simplificado do sistema estudado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1 Modelagem

Nesta seção são estabelecidos modelos matemáticos para cada componente a ser utilizado no sistema. De forma a facilitar o entendimento de cada modelo, ela é dividida em: fonte de torque (no caso o vento), gerador de gaiola de esquilo e o conversor ligado a ele, rede em conjunto com o filtro e o conversor a quem estão ligados e o PWM.

2.1.1 Fonte de torque

Para a modelagem da influência do vento, são utilizados duas maneiras diferentes neste texto para representar o vento, usando ele como uma fonte de velocidade constante no eixo do gerador, ou uma fonte de torque constante no eixo do gerador. Estes modos distintos permitem ver a influência do controle nos parâmetros do gerador de modo particularizado, certificando-se do funcionamento do mesmo de maneira correta e eficiente.

O modo de velocidade constante é usado para verificar o controle de fluxo de potência através do controle das correntes entre o gerador e o conversor, sem a influência direta da mudança de velocidade do eixo do motor. O modo de torque permite verificar o controle de velocidade quando são introduzidos diferentes níveis de torque.

2.1.2 Rede, filtro e conversor do lado da rede

A Figura 2 mostra uma forma simplificada do conjunto Rede-filtro-conversor. Neste caso é considerado o funcionamento do sistema em regime permanente, o conversor como uma fonte de tensão ideal, a rede como um barramento infinito de tensão constante e o filtro como uma resistência + indutância.

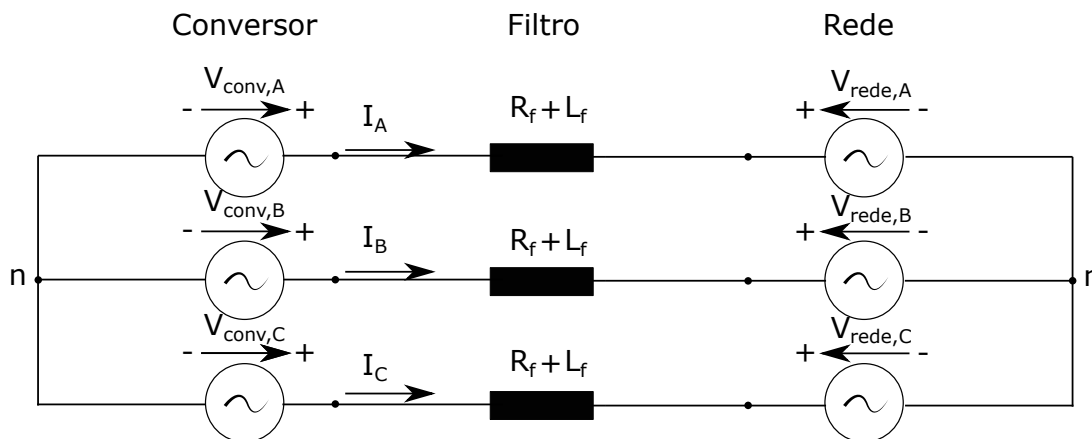


Figura 2 – Circuito equivalente do lado da rede do sistema.

Fonte: Adaptado de)abad2011doubly.

Usando a Lei de Kirchhoff neste modelo pode-se obter as seguintes equações no sistema

trifásico:

$$V_{Conv,k} = I_k R_f + L_f \frac{dI_k}{dt} + V_{rede,k} \quad (1)$$

Sendo $V_{Conv,k}$ as tensões do conversor, $V_{rede,k}$ as tensões da rede e k é referente à tensão na fase A, B ou C.

Aplicando a transformada de Park à Equação 1, com a velocidade angular de rotação igual a da rede, para sair do sistema abc para o sistema dq0 obtêm-se as seguintes equações:

$$\begin{cases} V_{dConv} = I_d R_f + L_f \frac{di_d}{dt} + V_{drede} + L_f \omega_{rede} I_q \\ V_{qConv} = I_q R_f + L_f \frac{di_q}{dt} + V_{qrede} - L_f \omega_{rede} I_d \end{cases} \quad (2)$$

Onde ω_{rede} é a frequência de rede, V_{qConv} , V_{dConv} , V_{drede} , V_{qrede} as tensões nas coordenadas dq da tensão do conversor e da rede, I_q , I_d são a corrente do sistema nas coordenadas dq e R_f , L_f a resistência e indutância do filtro entre o conversor e a rede.

É possível também definir as potências ativa e reativa trocadas por esses componentes ao alinhar o eixo d da transformada de Park com a fase A, controle vetorial orientado à tensão (implicando em $V_{qrede} = 0$ e $V_{drede} = V_{rede}$), resulta em:

$$P_{rede} = \frac{3}{2} V_{drede} I_d \quad (3)$$

$$Q_{rede} = -\frac{3}{2} V_{drede} I_q \quad (4)$$

Com o valor da potência ativa pode-se calcular qual será a tensão no elo CC (V_{CC}), ponto de conexão dos conversores do lado da rede e do lado do gerador. Considerando que a transferência de potência é instantânea, tem-se:

$$P_{CC} = I_{CCrede} V_{CC} \quad (5)$$

Desta forma é possível calcular a corrente que passa pelo elo CC como:

$$C \frac{dV_{CC}}{dt} = -I_{CCrede} - I_{CCgerador} \quad (6)$$

Nesta, $I_{CCgerador}$ é a corrente entregue pelo conversor do lado do gerador ao elo CC e I_{CCrede} é a corrente retirada do elo CC pelo conversor do lado da rede. De acordo com Abad et al. (2011) é valido considerar $I_{CCgerador}$ como uma perturbação e removê-la da equação, para aproximar V_{drede} como $V_{CC}/2$, juntamente com as Equações 3, 5 e 6 obtendo:

$$\frac{dV_{CC}}{dt} = -\frac{3}{4C} I_d \quad (7)$$

2.1.3 Gerador e o seu conversor

Para o controle de um SCIG, pode-se usar diversos métodos diferentes, como, por exemplo, o controle pelo fluxo do estator, pelo fluxo do entreferro, pelo torque ou pelo fluxo no rotor (de modo indireto ou direto). O controle escolhido para esta dissertação foi o indireto pelo fluxo do rotor, devido a sua popularidade no âmbito da geração eólica e pela sua simplicidade (WU et al., 2011). Neste tipo de controle são utilizadas as transformadas de Park para colocar a corrente do estator I_s nos referenciais dq0, obtendo a corrente do eixo direto I_{ds} e a corrente do eixo de quadratura I_{qs} . Ao alinhar o eixo d transformada com λ_{dr} configura-se um controle vetorial orientado ao campo. Isso permite que a corrente I_{ds} possa ser usada para o controle do fluxo do rotor λ_r e I_{qs} possa ser usada para controlar o torque eletromagnético do gerador.

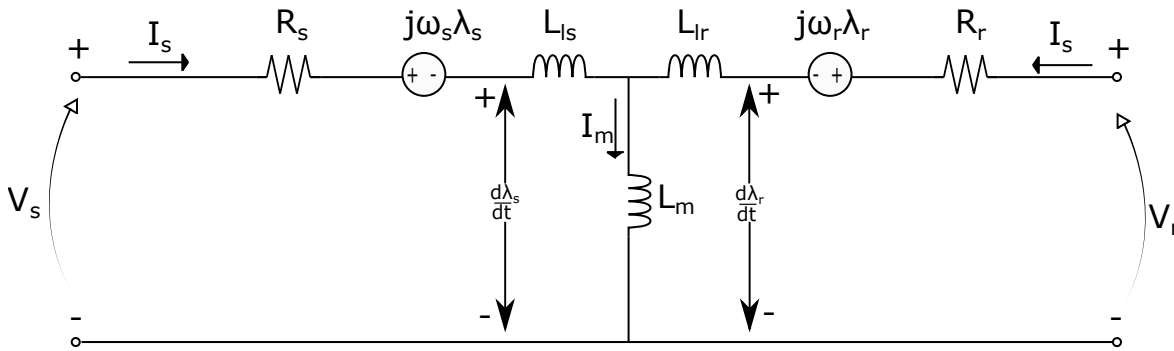


Figura 3 – Circuito equivalente do lado do gerador em referencial síncrono.

Fonte: Adaptado de)wu2011

A Figura 3 mostra o circuito equivalente para um SCIG em referencial síncrono. Este modelo é similar ao utilizado em geradores duplamente alimentados, mas considera o rotor em curto, ou seja, $V_r = 0$. Tem-se também que a tensão do estator, fluxo no estator, fluxo no rotor e torque magnético podem ser calculados neste gerador como:

$$V_s = I_s R_s + \frac{d\lambda_s}{dt} + j\omega_s \lambda_s \quad (8)$$

$$V_r = I_r R_r + \frac{d\lambda_r}{dt} - j(\omega_s - \omega_r)\lambda_s = I_r R_r + \frac{d\lambda_r}{dt} - j(\omega_{ls}\lambda_s) \quad (9)$$

$$\lambda_s = (L_{ls} + L_m)I_s + L_m I_r = L_s I_s + L_m I_r \quad (10)$$

$$\lambda_r = (L_{lr} + L_m)I_r + L_m I_s = L_r I_r + L_m I_s \quad (11)$$

$$J \frac{d\omega_{mec}}{dt} = T_e - T_m \quad (12)$$

$$T_e = \frac{3P}{2} \operatorname{Re}\{j\lambda_s I_s^*\} = -\frac{3P}{2} \operatorname{Re}\{j\lambda_r I_r^*\} \quad (13)$$

Sendo:

V_s e V_r as tensões do estator e rotor.

I_s e I_r as correntes do estator e rotor.

R_s e R_r as resistências do estator e do rotor.

ω_s e ω_r as velocidades angulares do estator e do rotor.

ω_{mec} e ω_{ls} a velocidade angular mecânica e a frequência angular de escorregamento do gerador.

λ_s e λ_r os fluxos do estator e do rotor.

L_s e L_r as indutâncias próprias do estator e do rotor.

L_{ls} e L_{lr} as indutâncias de dispersão do estator e do rotor.

L_m a indutância mútua entre o estator e o rotor.

T_e e T_m o torque eletromagnético e o torque mecânico do gerador.

J o momento de inércia do gerador.

P_p o número de pares de polos do gerador.

O fluxo no estator é calculado como:

$$\lambda_s = \int (V_s - R_s I_s) dt \quad (14)$$

Ou seja, pode-se obter os valores do fluxo do estator com os valores medidos de tensão, corrente, os parâmetros do gerador e um integrador.

Já o fluxo no rotor pode ser calculado usando as Equações 10 e 11 para isolar I_r :

$$\lambda_r = L_r I_r + L_m I_s = L_r \left(\frac{\lambda_s - L_s I_s}{L_m} \right) + L_m I_s = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_s - D_1 I_s) \quad (15)$$

Onde D_1 é:

$$D_1 = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \quad (16)$$

Para obter o ângulo do fluxo do rotor (θ_f), o ângulo que orienta a transformada de Park, emprega-se a equação:

$$\theta_f = \int (\omega_r - \omega_{ls}), dt \quad (17)$$

Realizando a transformada de Park, orientado para o fluxo do rotor, as seguintes equações são obtidas:

$$\begin{cases} \lambda_{dr} = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{ds} - D_1 I_{ds}) \\ \lambda_{qr} = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_{qs} - D_1 I_{qs}) \end{cases} \quad (18)$$

Relacionando o fluxo do rotor com a corrente I_{ds} , utilizando a Equação 9 com a tensão do rotor nula e a Equação 11 obtém-se:

$$\frac{d\lambda_r}{dt} = -\frac{R_r}{L_r}(\lambda_r - L_m I_s) - j\omega_{ls}\lambda_r \quad (19)$$

Rearranjando a equação e aplicando a transformada de Laplace:

$$\lambda_r(1 + \tau_r(s + j\omega_{ls})) = L_m I_s \quad (20)$$

Onde $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$ é a constante de tempo do rotor.

Considerando a orientação escolhida, onde $\lambda_{dr} = \lambda_r$ e $\lambda_{qr} = 0$ e rearranjando a equação acima nos eixos d e q, sendo o primeiro a parte real da equação e o segundo a parte imaginária, chega-se a:

$$\lambda_r(1 + \tau_r s) = L_m I_{ds} \quad (21)$$

$$\lambda_r \tau_r j\omega_{ls} = L_m I_{qs} \quad (22)$$

O fluxo λ_r é então calculado como:

$$\lambda_r = \frac{L_m}{(1 + \tau_r s)} I_{ds} \quad (23)$$

Este processo é iterativo, pois é necessário conhecer o ângulo do fluxo do rotor θ_f para fazer a transformada de Park neste referencial, e a partir dos parâmetros obtidos nele, torna-se possível estimar o fluxo λ_r e calcular as correntes dq0, I_{qs} e I_{ds} . Por conta disso este método é denominado controle indireto orientado ao fluxo do gerador.

Calculando a potência T_e neste referencial com um arranjo matemático da Equação 13 obtém-se:

$$T_e = K_T \lambda_r I_{ds} \quad (24)$$

Sendo $K_T = 3P_p L_m / 2Lr$.

Para as tensões no estator no referencial d:

$$V_{ds} = I_{ds} R_s + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_s \lambda_{qs} \quad (25)$$

Substituindo λ_{ds} , usando as Equações 30 e 31, considerando fluxo constante no rotor (ou seja $\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = 0$) e simplificando, chega-se a:

$$V_{ds} = I_{ds} R_s + D_1 \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega_s D_1 I_{qs} \quad (26)$$

De forma semelhante, as tensões do estator no referencial q são:

$$V_{qs} = I_{qs}R_s + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_s\lambda_{ds} \quad (27)$$

$$V_{qs} = I_{qs}R_s + D_1\frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s D_1I_{ds} + \omega_s\frac{L_m}{L_r}\lambda_r \quad (28)$$

O termo $\omega_s\frac{L_m}{L_r}\lambda_r$ pode ser considerado uma perturbação para os propósitos da presente dissertação, uma vez que as variáveis envolvidas não participam do controle escolhido nas próximas sessões, obtendo:

$$V_{qs} = I_{qs}R_s + D_1\frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s D_1I_{ds} \quad (29)$$

2.1.4 PWM

O PWM será o componente que vai receber as ações de controle e irá mandar o comando para as chaves dos conversores. Os 2 PWMs envolvidos (tanto o que controla o conversor do lado da rede como o conversor do lado do gerador) são modelados como um atraso entre o comando do controle e o chaveamento dos conversores. Segundo (QUÉVAL; OHSAKI, 2012) esse atraso pode ser modelado como uma função de transferência de 1ª ordem e será relativo à frequência de chaveamento segundo a equação:

$$F_{pwm}(s) = \frac{V_{saida}}{V_{entrada}} = \frac{1}{1 + \tau_{pwm}s} \quad (30)$$

Onde τ_{pwm} é o inverso da frequência de chaveamento do PWM.

2.2 Controle

Visando utilizar o SCIG com o máximo aproveitamento energético e explorar todas as funcionalidades fornecidas por esse gerador na topologia estudada, a implementação de controle nos 2 conversores do sistema é indispensável. Uma das formas mais frequentes de se efetuar este controle é a utilização de controladores PI. O método adotado neste trabalho é uma adaptação para o gerador de indução do método utilizado por Quéval e Ohsaki (2012), este permite a utilização destes PI para realizar um controle mais rápido, visando ajustar a corrente (o controle interno) e outro mais lento que engloba o controle interno sendo usado para regular a velocidade ou potência (controle externo), além de permitir um cálculo mais direto dos parâmetros desses PI conforme os parâmetros dos componentes modelados no capítulo anterior. Usando uma adaptação deste método para os SCIG estabelecem-se os valores utilizados de Kp e Ki nos nossos PI para o controle do sistema.

Os controles são divididos entre lado da rede e lado da máquina, cada um tratando de um dos conversores do sistema. Estes são subdivididos em controle interno, visando um controle de corrente, mais rápido, e controle externo, responsável por parâmetros como a potência, velocidade, tensão no elo CC e fluxo do gerador.

2.2.1 Método de ajuste dos controladores

O método utilizado para o cálculo dos parâmetros do PI dos controladores é chamado de Método Simétrico Ótimo (*Symmetrical Optimum Method*), primeiramente utilizado por (KESSLER, 1958) em seguida sendo adaptado para o cálculo de parâmetros de PI por (PREITL; PRECUP, 1999), posteriormente modificado para uso na obtenção dos parâmetros para máquinas síncronas (QUÉVAL; OHSAKI, 2012) e por fim adaptado para máquinas de indução de gaiola de esquilo neste trabalho. Quando os parâmetros dos controladores são calculados através desse método, permite-se ao sistema ter um *delay* maior além de permitir o cálculo direto dos parâmetros integrais e proporcionais dos controladores, bastando que a função de transferência do sistema esteja no formato:

$$H_{OL}(s) = \frac{K}{(1 + T_a s)s} \quad (31)$$

Quando a função do sistema é posta neste formato os parâmetros do controlador PI são:

$$G_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i}\right) \quad (32)$$

$$(\alpha, K_p, T_i) = \left(\frac{1}{T_a \omega_c}, \alpha^2 T_a, \frac{1}{\alpha T_a K}\right) \quad (33)$$

Tendo que ω_c é a frequência crítica do sistema. Neste tipo de sistema ela pode ser calculada na maioria das vezes como $\omega_c = \frac{2\pi f_{PWM}}{20}$ (QUÉVAL; OHSAKI, 2012).

Algumas equações do sistema não chegam diretamente nesse resultado, portanto Quéval e Ohsaki (2012) utiliza de outra técnica para aproximar funções de transferência de 2ª ordem para uma de 1ª ordem. Esse método é chamado de Método de Síntese Direta (*Direct Synthesis Method*).

2.2.2 Controle do lado da rede

Para criar a função de transferência que define o sistema do lado da rede, pode-se utilizar as Equações 2. Porém, essas equações ainda estão acopladas em I_d e I_q . As seguintes variáveis podem ser criadas para desacoplá-las:

$$\Delta V_{dg} = V_{dConv} - V_{drede} + L_f \omega_{rede} I_q \quad (34)$$

$$\Delta V_{qg} = V_{qConv} - V_{qrede} - L_f w_{rede} I_d \quad (35)$$

Substituindo estas variáveis nas Equações 1 e 2 chega-se a:

$$L \frac{di_d}{dt} = \Delta V_{dg} R_f I_d \quad (36)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = \Delta V_{qg} R_f I_q \quad (37)$$

Usando a transformada de Laplace chega-se na função de transferência da corrente:

$$F_{corrente,g}(s) = \frac{I_d}{\Delta V_{dg}} = \frac{I_q}{\Delta V_{qg}} = \frac{\frac{1}{R_f}}{1 + \tau_f s} \quad (38)$$

Com $\tau_f = \frac{L_f}{R_f}$.

Já para o elo CC a equação que modela o valor de tensão é dada pela Equação 7, utilizando a transformada de Laplace obtém-se:

$$F_{LinkCC}(s) = \frac{V_{CC}}{I_d} = -\frac{3}{4C} \frac{1}{s} \quad (39)$$

Uma melhor visualização de interação entre as plantas referentes ao sistema e os PIs de controle é dada na Figura 4.

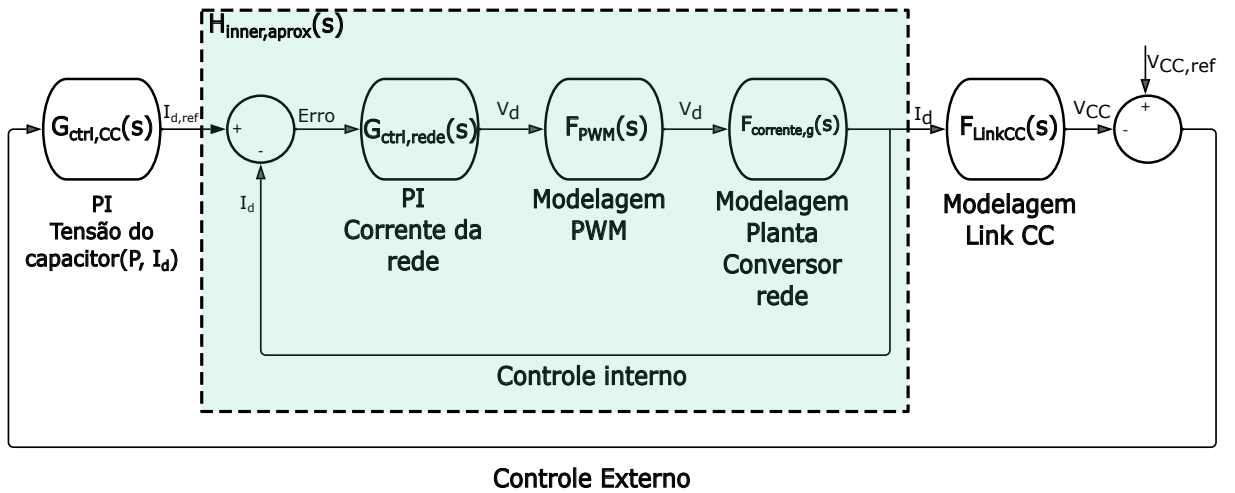


Figura 4 – Diagrama de blocos equivalente para o circuito do lado da rede.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2.2.1 Controle interno ou de corrente

Observando a região sombreada da Figura 4, o controle interno deste sistema, percebe-se que a função de transferência vista pela planta do sistema é dada por:

$$G_{ctrl,rede}(s) = F_{pwm}(s)F_{corrente,g}(s) = \frac{1}{(1 + \tau_{pwm}s)} \frac{\frac{1}{R_f}}{1 + \tau_f s} \quad (40)$$

Considerando que τ_f é muito maior que τ_{pwm} neste caso, é válida a aproximação $\frac{1}{1+\tau_f s} \approx \frac{1}{\tau_f s}$, pois os polos nestes 2 casos são quase coincidentes devido à posição do polo da função do PWM, chegando à equação:

$$G_{ctrl,rede}(s) = F_{pwm}(s)F_{corrente,g}(s) = \frac{\frac{1}{R_f \tau_f}}{(1 + \tau_{pwm} s)} \frac{1}{s} \quad (41)$$

Usando o Método Simétrico Ótimo nesta nova equação, os parâmetros do controlador PI são:

$$(\alpha, K_p, T_i) = \left(\frac{1}{\tau_{pwm} \omega_c}, \alpha^2 \tau_{pwm}, \frac{1}{\alpha \tau_{pwm} \frac{1}{R_f \tau_f}} \right) \quad (42)$$

2.2.2.2 Controle Externo ou de tensão do link CC

Para o controlador externo, toda a malha interna pode ser resumida em um único bloco, o qual inclui o controlador interno visto na Equação 41 e a tensão do elo CC na Equação 39.

Neste caso o Método Simétrico Ótimo não é aplicável, pois a função de transferência resultante do conjunto não está no formato especificado pela Equação 32. É usado o Método de Síntese Direta para aproximar a função de laço interno de corrente de 2ª ordem por uma de 1ª ordem com atraso:

$$H_{inner,aprox}(s) = \frac{I_d}{I_d^*} = \frac{I_q}{I_q^*} = \frac{1}{(1 + \tau_{inner,aprox} s)} \quad (43)$$

$$\tau_{inner,aprox} = \frac{T_{10\%}}{2,3} \quad (44)$$

Onde $T_{10\%}$ corresponde ao tempo de acomodação de 10% da função original. Essa relação entre a constante de tempo e o tempo de acomodação vem do cálculo do $\tau_{inner,aprox}$ da função de primeira ordem sintetizada quando aplicado um degrau unitário e pegando o valor de tempo de acomodação $T_{10\%}$ onde a função original se estabiliza em 10% de diferença do sinal de controle, como mostra as equações:

$$G_{ctrl,rede}(s)_{T_{10\%}} = \frac{1}{(1 + \tau_{inner,aprox} s)} \frac{1}{s} \quad (45)$$

Pode-se assim voltar ao domínio do tempo, como o valor da função original no tempo $T_{10\%}$ é 0,9, ou seja, com um erro de 10% do degrau dado, obtemos a equação:

$$0,9 = 1 - e^{\frac{-T_{10\%}}{\tau_{inner,aprox}}} \quad (46)$$

$$-0,1 = -e^{\frac{-T_{10\%}}{\tau_{inner,aprox}}} \quad (47)$$

$$0,1 = e^{\frac{-T_{10\%}}{\tau_{inner,aprox}}} \quad (48)$$

Aplicando o logaritmo natural à equação tem-se:

$$\ln(0,1) = -\frac{T_{10\%}}{\tau_{inner,aprox}} = -2,3 \quad (49)$$

Obtendo ao final a Equação 44.

Esse processo pode ser melhor visualizado na Figura 4 aproximando toda a região destacada em verde pela nova função. Agora a função de laço externo fica no formato correto:

$$G_{ctrl,vcc}(s) = F_{LinkCC}(s)H_{inner,aprox}(s) = \frac{-\frac{3}{4C}}{(1 + \tau_{inner,aprox}s)} \frac{1}{s} \quad (50)$$

Com isso, calculam-se os parâmetros do PI:

$$(\alpha, K_p, T_i) = \left(\frac{1}{\tau_{inner,aprox}\omega_c}, \alpha^2\tau_{inner,aprox}, \frac{1}{\alpha\tau_{inner,aprox}\frac{-3}{4C}} \right) \quad (51)$$

2.2.3 Controle do lado do SCIG

Semelhante ao caso do controle do lado da rede, as variáveis nas Equações 52 e 53 são criadas para desacoplar as correntes I_d e I_q das Equações 26 e 29:

$$\Delta V_{ds} = V_{ds} + \omega_s D_1 I_{qs} \quad (52)$$

$$\Delta V_{qs} = V_{qs} - \omega_s D_1 I_{ds} \quad (53)$$

Aplicando essas variáveis nas Equações 26 e 29 e usando a transformada de Laplace obtemos a seguinte função de transferência de 1ª ordem:

$$F_{corrente,s}(s) = \frac{I_{ds}}{\Delta V_{ds}} = \frac{I_{qs}}{\Delta V_{qs}} = \frac{1}{R_s + D_1 s} = \frac{\frac{1}{R_s}}{1 + \tau_s s} \quad (54)$$

Sendo: $\tau_s = \frac{D_1}{R_s}$

Para a função de transferência que relaciona a velocidade mecânica do gerador com a corrente I_{qs}^* usada como referência no controle interno, considerando $T_m = 0$ e as Equações 24 e 12:

$$\frac{d\omega_{mec}}{dt} = \frac{K_T \lambda_r}{J} I_{qs}^* \quad (55)$$

Usando a transformada de Laplace:

$$G_w(s) = \frac{\omega_{mec}}{I_{qs}^*} = \frac{K_T \lambda_r}{J} \frac{1}{s} \quad (56)$$

Para a função de transferência que relaciona o fluxo com a corrente de referência I_{ds}^* , utiliza-se a Equação 23:

$$G_{fluxo} = \frac{\lambda_r}{I_{ds}^*} = \frac{L_m}{1 + \tau_r s} \quad (57)$$

O diagrama das funções da planta e do controle pode ser observado na Figura 5:

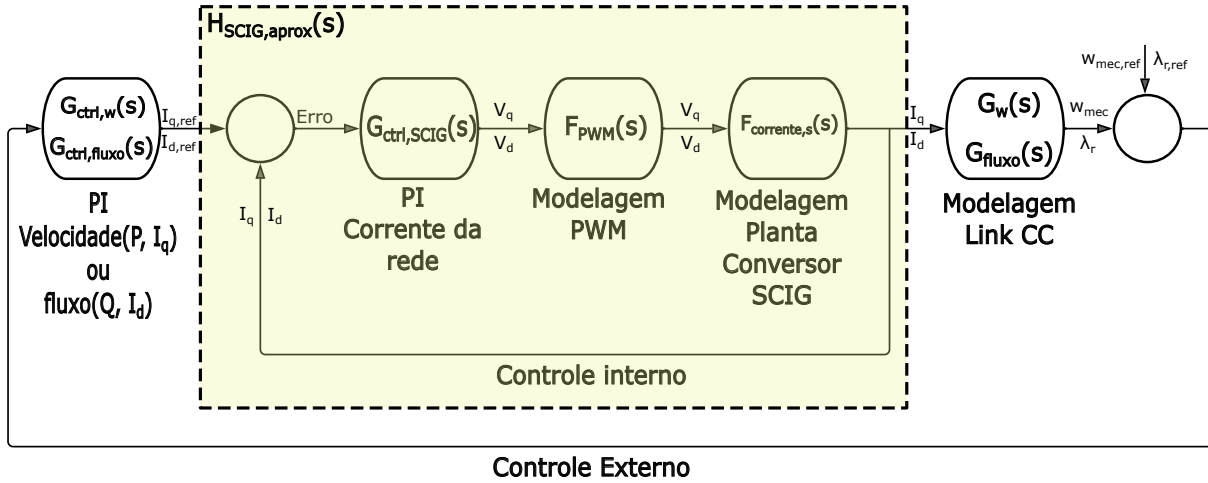


Figura 5 – Diagrama de blocos equivalente para o circuito do lado do SCIG.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como é necessário controlar tanto o fluxo como a velocidade, é possível ver alterações no diagrama para acomodar essas diferenças, mas a abordagem para ambos os casos é semelhante.

2.2.3.1 Controle interno ou de corrente

Ao observar a Figura 5 percebe-se que a função de transferência vista pela planta é:

$$G_{ctrl,SCIG}(s) = F_{pwm}(s)F_{corrente,s}(s) = \frac{1}{(1 + \tau_{pwm}s)} \frac{1}{1 + \tau_s s} \frac{1}{R_s} \quad (58)$$

Semelhante ao ocorrido no controle interno do lado da rede, a distância do polo do PWM torna viável a aproximação de $\frac{1}{1 + \tau_s s} \approx \frac{1}{\tau_s s}$, chegando à equação:

$$G_{ctrl,SCIG}(s) = F_{pwm}(s)F_{corrente,s}(s) = \frac{1}{(1 + \tau_{pwm}s)} \frac{1}{s} \frac{1}{R_s \tau_s} \quad (59)$$

Neste formato é possível usar o Método Simétrico Ótimo nesta equação para obter os parâmetros do PI:

$$(\alpha, K_p, T_i) = \left(\frac{1}{\tau_{pwm} \omega_c}, \alpha^2 \tau_{pwm}, \frac{1}{\alpha \tau_{pwm} \frac{1}{R_s \tau_s}} \right) \quad (60)$$

2.2.3.2 Controle externo ou de fluxo e velocidade

O controle externo do SCIG é dividido em 2 partes, o controle de fluxo que fornece o referencial para a corrente I_{ds}^* e o controle de velocidade que dá o referencial para a corrente I_{qs}^*

A Figura 5 mostra o diagrama de blocos para o controle de fluxo e velocidade, pode-se ver que a planta enxerga o bloco de controle interno $G_{ctrl,SCIG}(s)$ como:

$$G_{ctrl,fluxo}(s) = \frac{I_{ds}}{\lambda_r^* - \lambda_r} = G_{fluxo}(s)G_{ctrl,SCIG}(s) = \frac{L_m}{1 + \tau_r s} \frac{\frac{1}{R_s \tau_s}}{(1 + \tau_{pwm} s)} \frac{1}{s} \quad (61)$$

Similar ao ocorrido no controle externo da rede, é utilizado o Método de Síntese Direta, para encontrar uma função de transferência de 1ª ordem aproximada com atraso da planta de controle interno $G_{ctrl,SCIG}(s)$ levando a:

$$H_{SCIG,aprox}(s) = \frac{I_{ds}}{I_{ds}^*} = \frac{I_{qs}}{I_{qs}^*} = \frac{1}{(1 + \tau_{SCIG,aprox} s)} \quad (62)$$

$$\tau_{SCIG,aprox} = \frac{T_{10\%}}{2,3} \quad (63)$$

Como o polo dessa nova função está muito distante do polo da função $G_{fluxo}(s)$, pode-se aproximar $\frac{L_m}{1 + \tau_r s} \approx \frac{L_m}{\tau_r} \frac{1}{s}$, chegando em:

$$G_{ctrl,fluxo}(s) = \frac{I_{ds}}{\lambda_r^* - \lambda_r} = G_{fluxo}(s)H_{SCIG,aprox}(s) = \frac{\frac{L_m}{\tau_r}}{(1 + \tau_{SCIG,aprox} s)} \frac{1}{s} \quad (64)$$

Utilizando o Método Simétrico Ótimo:

$$(\alpha, K_p, T_i) = \left(\frac{1}{\tau_{SCIG,aprox} \omega_c}, \alpha^2 \tau_{SCIG,aprox}, \frac{1}{\alpha \tau_{SCIG,aprox} \frac{L_m}{\tau_r}} \right) \quad (65)$$

Outro ponto a se considerar é o valor medido λ_r . Para acessar este valor é necessário, como visto pela Equação 23, usar os valores de I_{ds} e um integrador, como mostra a Figura 6.

Esse fluxo é usado, junto com a corrente I_{qs} , para calcular a velocidade de escorregamento ω_{ls} , como mostra a Equação 22, que por sua vez é usada para achar o ângulo do fluxo do rotor θ_f .

A Figura 5 mostra o diagrama de blocos do controle de velocidade, chegando nas equações:

$$G_{ctrl,w}(s) = \frac{I_{qs}}{\omega_r^* - \omega_r} = G_w(s)G_{ctrl,SCIG}(s) = \frac{K_T \lambda_r}{J} \frac{1}{s} \frac{\frac{1}{R_s \tau_s}}{(1 + \tau_{pwm} s)} \frac{1}{s} \quad (66)$$

Semelhante ao problema encontrado no controle de fluxo, utiliza-se o Método de Síntese Direta para aproximar a função $G_{ctrl,SCIG}(s)$ para a função $H_{SCIG,aprox}(s)$, com isso:

$$G_{ctrl,w}(s) = \frac{I_{qs}}{\omega_r^* - \omega_r} = G_w(s)H_{SCIG,aprox}(s) = \frac{K_T \lambda_r}{J} \frac{1}{s} \frac{1}{(1 + \tau_{SCIG,aprox} s)} \quad (67)$$

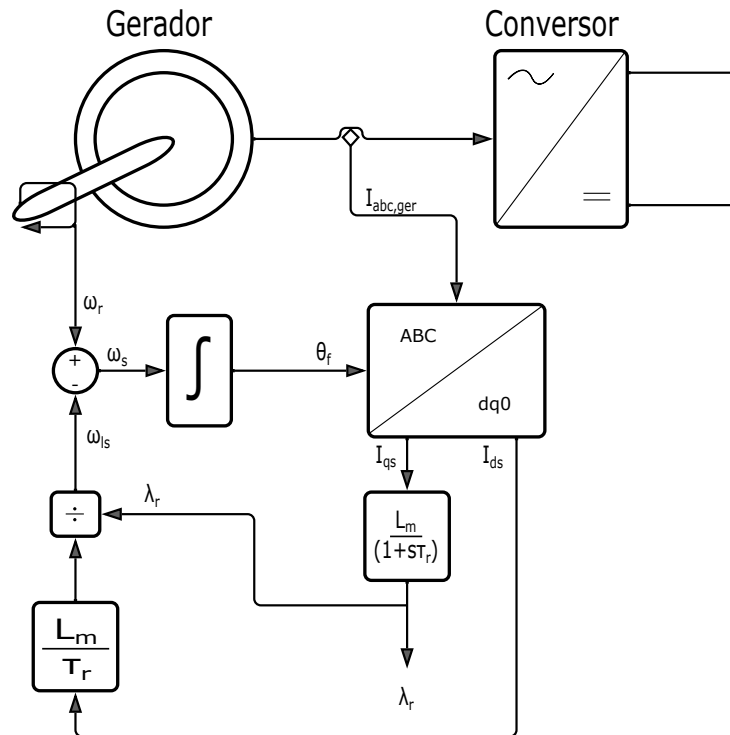


Figura 6 – Representação em Diagrama de blocos do estimador de fluxo.

Fonte: Adaptado de Wu et al. (2011).

Aplicando então o Método Simétrico Ótimo para obter os parâmetros do PI:

$$(\alpha, K_p, T_i) = \left(\frac{1}{\tau_{SCIG,aprox} \omega_c}, \alpha^2 \tau_{SCIG,aprox}, \frac{1}{\alpha \tau_{SCIG,aprox} \frac{K_T \lambda_r}{J}} \right) \quad (68)$$

Simulações computacionais

Neste capítulo é mostrado o arranjo utilizado para simular o comportamento do SCIG em um sistema de potência com conversores *back-to-back* controlados externamente pelos algoritmos calculados em capítulos anteriores, com o intuito de observar o comportamento do sistema em situações de funcionamento normal e em situações de falta. O sistema é composto por um barramento infinito simulando a rede, um filtro RL, os conversores *back-to-back* e o SCIG. Essas simulações foram realizadas no Simulink[®] em conjunto com o MATLAB[®] o qual foi escolhido devido a familiaridade com os programas e a facilidade de se montar esse arranjo neles.

No final deste capítulo são inseridos pontos de falta em diferentes locais do arranjo com algumas diretrizes para disparos de proteções comuns para este sistema. Foi escolhido realizar o estudo desta maneira com o intuito de analisar o comportamento do sistema controlado quando há uma falta e quais proteções são acionadas para diferentes faltas aplicadas. O resultado obtido será usado para analisar o comportamento do controle do sistema quando há uma mudança no local da falta.

3.1 Breve Resumo Bibliográfico

Estão presentes na literatura trabalhos que abordam o funcionamento de turbinas eólicas através de simulação. Nestes são estudados diversos aspectos do sistema como um todo, sendo o controle, cogeração, proteção, qualidade da energia e proteção.

Em)SEIXAS2014357 é estudado o comportamento de uma turbina eólica com gerador de Imã-permanente *offshore* e como a perturbação causada pelas ondas afetam a qualidade da energia produzida, particularmente as distorções causadas pelas componentes harmônicas. Neste trabalho foi criado um modelo do comportamento físico do conjunto torre, base e gerador para considerar a oscilação causada pelo movimento das ondas quanto a transferência de torque do vento para o eixo do gerador, tendo sido utilizada uma simulação da parte elétrica com um gerador de Imã-permanente e conversores *back-to-back* de 3 e 4 níveis com controle implementado para averiguar a influência desse distúrbio.

Chegam na conclusão que mesmo em alto-mar as ondas não causam, nos conjuntos estudados, uma alteração grande o suficiente para passar o limite de 5% estabelecido pela IEEE (IEEE . . . , 1981).

O trabalho de)8601414 apresenta um modelo de geração híbrida utilizando-se de energia solar e eólica e como otimizar a produção e entrega de energia à rede deste conjunto usando o controle dos conversores e também a reação do sistema às faltas no barramento da rede. É realizado a ligação dos dois sistemas usando conversores *back-to-back* com a ligação do sistema eólico e solar acontecendo no elo CC do conjunto. Cada topologia apresenta seu próprio controle vetorial e rastreamento de ponto de operação otimizado para transferência de potência. As simulações foram realizadas no Simulink[®], usando um gerador de ímã permanente para a turbina eólica. Nesta simulação foi analisada a qualidade e a eficiência na transferência de potência, tendo ao final um teste com falta na rede, com e sem a ativação de uma proteção no elo CC (um *chopper*) e outra no controle do ângulo de ataque das pás. É concluído neste trabalho a eficácia do uso deste tipo de geração híbrida tanto para gerar energia para a rede com baixa injeção de harmônicas e fornecendo auxílio à rede em momentos de falta.

Simulações de uma turbina eólica usando um gerador de indução duplamente alimentado com conversores *back-to-back* utilizando um RTDS e a técnica *hardware-in-the-loop* é utilizada no trabalho de Ni et al. (2019). O conjunto é usado para realizar ensaios em um novo método de controle e de ligação dos conversores para aumentar a confiabilidade do sistema quanto às faltas nas chaves dos conversores. A topologia empregada para realizar isso é composta pelos conversores da rede e do gerador numa configuração *back-to-back* padrão, mas com TRIACs colocados diretamente em cada fase do gerador e da rede, interligando-as diretamente. Quando ocorre uma falta em algum braço dos conversores, a proteção desativa este e liga diretamente a fase retirada do conversor entre o gerador e a rede, a partir desse momento o controle passa a operar somente com 2 braços dos conversores e tenta manter o fluxo de potência mesmo com uma das fases do conjunto passando por fora dos conversores. É concluído que esse tipo de topologia aumenta a confiabilidade do sistema para este tipo específico de falta quando usado com a proteção e o controle adequado.

Em Muñoz-Jadán et al. (2019) é proposto o uso de um filtro LCL entre os conversores e a rede e gerador de ímãs permanentes com o intuito de melhorar a qualidade da energia entregue pela turbina eólica. São utilizados testes em simulação e teste em *hardware-in-the-loop* com os conversores e o filtro reais, enquanto a rede e o gerador são gerados em âmbito computacional. Ao final, o resultado destes testes mostra que esse modelo de filtro pode ter uma eficiência melhor do que o filtro LR quanto à injeção de harmônicas na rede se o controle implementado se aproveitar da compensação de 5^a e 7^a harmônica existente no sistema.

A dissertação de Franco (2017b) faz uma análise dos efeitos de faltas em um sistema

de geração de energia eólica baseada em DFIG com conversores em configuração *back-to-back*. Este estudo é realizado por meio de simulações no Simulink onde é estabelecida uma malha de controle para os conversores visando ajustar a potência ativa entregue para a rede, seguidos de testes com e sem a aplicação de faltas pelo sistema e analisando o comportamento do mesmo. Por fim é realizado uma bateria de testes em diversos pontos de operação, estabelecendo um valor de disparo para uma proteção diferencial. Já o trabalho de Silva (2018) usa simulações similares no DFIG para analisar o funcionamento da topologia quando adotados sistemas de proteção convencionais, tendo até o estudo da ativação de uma proteção *crowbar* quando colocado uma falta na região entre o rotor e o conversor do gerador e a influência dessas mudanças no comportamento do sistema. O estudo Franco (2017a) amplia essa análise usando do *Processor-in-the-Loop* onde é colocado o controle e os algoritmos de proteção em um microcontrolador real.

Em Anders (2018) realiza-se um equacionamento dinâmico de uma topologia de turbina eólica com gerador síncrono e conversores em configuração *back-to-back*. A simulação teve como objetivo testar um controle vetorial nesta topologia e por fim aplicar faltas em diversos pontos do sistema e analisar a resposta do sistema a estas faltas. Ao longo do trabalho é discutido o funcionamento do controle em cada conversor e no sistema como um todo. Durante a análise de faltas vemos a mudança do comportamento desse sistema com quando introduzida uma falha nos lados AC e DC dos conversores. Também é analisado a ação de algumas proteções típicas em cada região desta topologia.

Vemos em (BATAGLIOLI, 2018) o estudo do comportamento da geração eólica utilizando um gerador síncrono em funcionamento normal e em falta. São observadas as vantagens e desvantagens da inclusão de armazenamento de energia no elo CC dos conversores para a estabilidade e qualidade da energia entregue. Os testes foram realizados em operação normal, operação ilhada e por fim é analisado o sistema em falta em diferentes pontos da topologia, analisando os sinais medidos e verificando o desempenho dos algoritmos de proteção propostos no trabalho. As simulações foram realizadas em um *Real time digital simulator*(RTDS[®]) e seu algoritmo de controle e de proteção foram testados usando o *software* MATLAB[®]. Além disso, é utilizado de *hardware-in-the-loop* com o RTDS[®] em conjunto com relés comerciais para testar as propostas do trabalho.

3.2 Parâmetros do sistema

A Figura 1 que foi usada para a modelagem teórica do sistema também pode ser usada para mostrar um esquema completo do arranjo utilizado na simulação. Esta configuração procura mimetizar as configurações da bancada de testes (como a utilização de um conversor de 3 níveis para o gerador por ser o utilizado na bancada) construída em laboratório e realizar simulações dos testes de bancada antes de fazê-lo com equipamentos e componentes reais. Este tipo de aproximação do problema ajuda na segurança do processo, a

encontrar erros e diferenças nos testes e permite fazer testes mais extremos, como faltas externas, que não é possível no ambiente experimental atualmente.

Os valores nominais dos componentes e equipamentos do sistema podem ser observados na Tabela 1. Usando esses dados os valores dos parâmetros de controle são calculados, como explicado no Capítulo 2, obtendo a Tabela 2.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros do sistema.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
$P_{nom,ger}$ (W)	2000	R_s (Ω)	1,805
$V_{nom,rede}$ (V)	220	R_r (Ω)	1,595
$V_{nom,ger}$ (V)	220	R_{filtro} (Ω)	0,7
$V_{nom,CC}$ (V)	420	L_{ls} (mH)	15,9
$F_{nom,rede}$ (Hz)	60	L_{lr} (mH)	14,3
$F_{nom,PWM}$ (Hz)	10000	L_{filtro} (mH)	33
P	2	L_m (mH)	230,8
J ($kg.m^2$)	0,0220	C_{total} (mF)	2,2

Tabela 2 – Valores dos parâmetros dos controladores.

PI	α	K_P	K_I
$G_{ctrl,rede}$ (S)	4	82,5	23553
$G_{ctrl,Vcc}$ (S)	4	0,745	47,1
$G_{ctrl,SCIG}$ (S)	5	58,83	51563
$G_{ctrl,fluxo}$ (S)	3	211,43	22382
$G_{ctrl,w}$ (S)	3	4,32	457,34

3.3 Simulações no lado da rede

Para facilitar os testes do controle de cada etapa, os mesmos são separados em testes do conversor do lado da rede e conversor do lado da máquina. O conversor do lado da rede tem como função regular a tensão do link CC do sistema, garantindo um valor fixo deste para o conversor do lado do gerador. Este arranjo foi separado em controle interno e externo, onde são isolados os controles de corrente e de tensão CC para verificar seu funcionamento e eficiência.

3.3.1 Controle de corrente

Para isolar o controle interno é substituído o lado do gerador inteiro e os capacitores do link CC por uma fonte de tensão. Isto é feito para manter a tensão do link CC constante

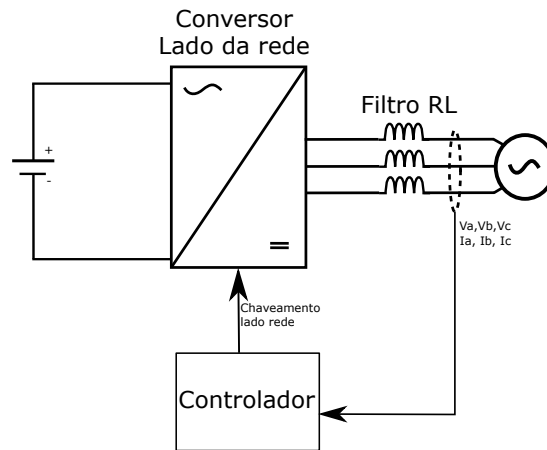


Figura 7 – Modelo simplificado do conjunto rede+conversor usando fonte de tensão no link CC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

e testar isoladamente os controles de corrente I_q e I_d . A Figura 7 mostra como fica a configuração final deste arranjo.

Nesta configuração é aplicado um degrau de 4 A em I_q^* e I_d^* , obtendo os gráficos das Figuras 8 e 9.

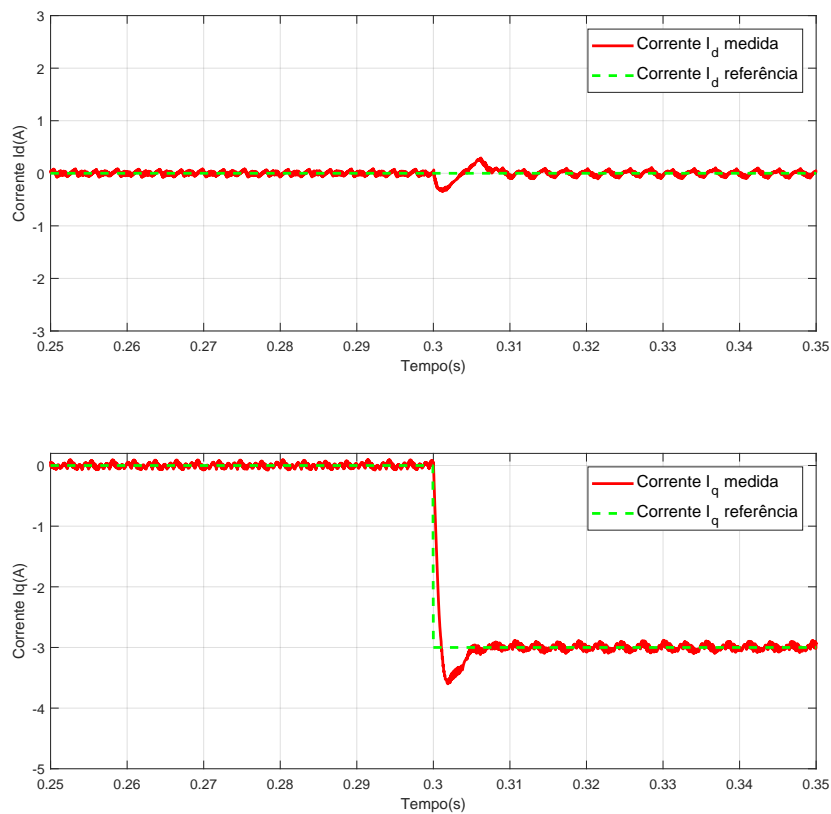


Figura 8 – Degrau no referencial da corrente I_q do conversor do lado da rede.

Fonte: Elaborado pelo autor.

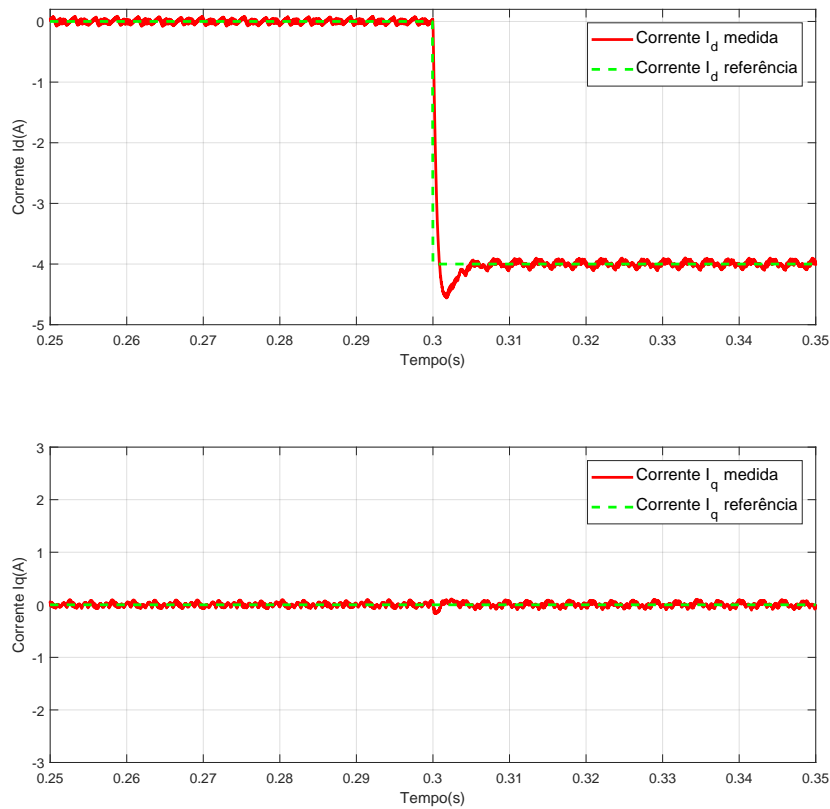


Figura 9 – Degrau no referencial da corrente I_d do conversor do lado da rede.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desses gráficos pode-se obter alguns parâmetros básicos para verificar a eficiência e funcionamento do controle como um tempo de subida ($t_{subida} < 3 \text{ ms}$), sobre-sinal ($I_{max} < 15 \%$ acima do I_d^*) e tempo de acomodação de 10 % ($t_{a,10\%} < 6 \text{ ms}$), mostrando um controle rápido e preciso para este tipo de aplicação, pois os tempos de resposta mostram que o controle irá agir com tempos inferiores ao período de um ciclo de tensão da máquina (60hz ou 16.667 ms). Também pode ser observado que, como explicado no Capítulo 2, as correntes I_q e I_d estão desacopladas (em regime permanente) entre si, ou seja, mudanças nas referências em uma das correntes não são perceptíveis na outra.

3.3.2 Controle de tensão do Link CC

O teste do controle externo é realizado com a inserção de uma carga de 600Ω com uma chave no elo CC. Neste teste a fonte de tensão é substituída pelo capacitor do elo CC, sobre o qual a tensão é controlada. A carga serve como um distúrbio para o sistema. Esta configuração pode ser vista na Figura 10.

Como o controle externo serve como referência para o controle interno, é necessário que este seja um controle mais lento que o interno, permitindo este agir conforme as

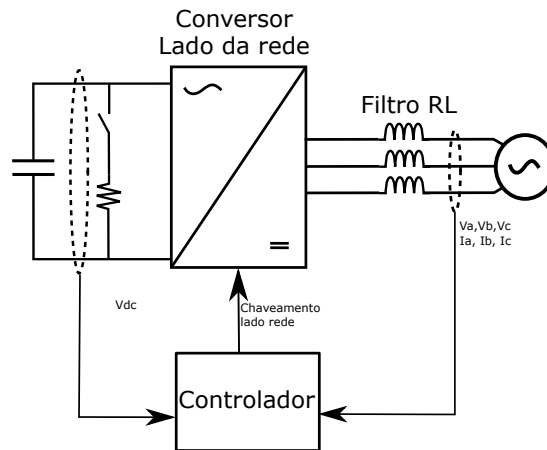


Figura 10 – Modelo simplificado do conversor do lado da rede com a adição do *chopper* e capacitor no lugar da fonte de tensão no elo CC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

mudanças externas e não o contrário. Na Figura 11 pode-se ver a ação de controle com a inserção e retirada da carga, aos 2,5 s e 3,5 s, respectivamente.

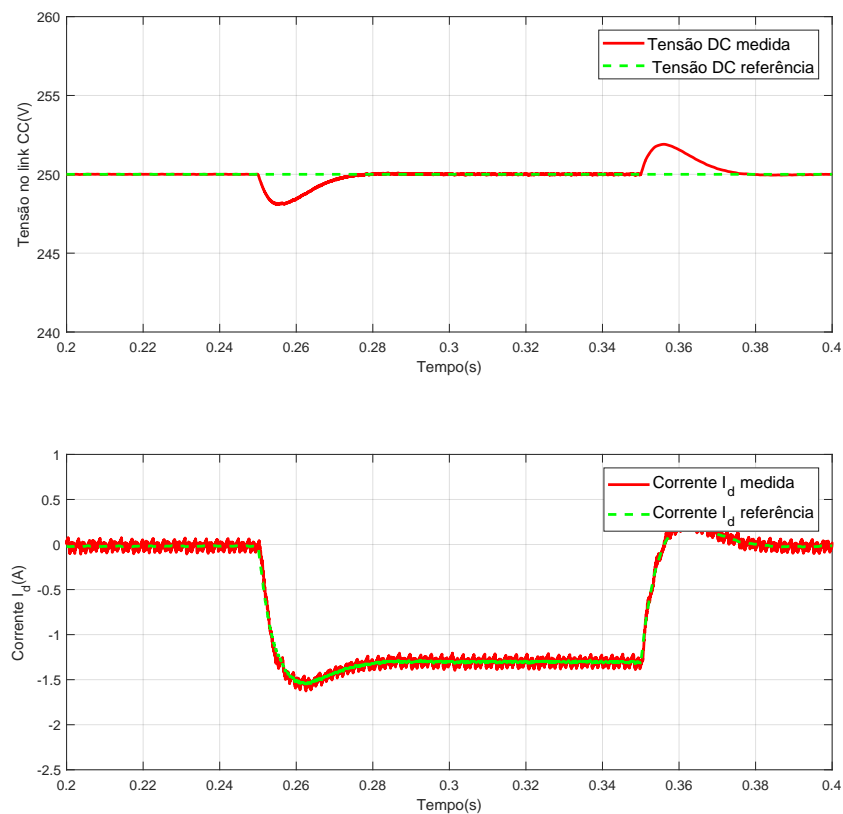


Figura 11 – Controle da tensão do Link CC ao inserir uma carga.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber que o controle rapidamente age para estabilizar o sistema após a

carga entrar. Ele faz isso dando uma referência para o controle de corrente, causando um fluxo de potência que vai utilizar da potência de rede para alimentar a carga e manter a tensão do link CC constante na referência dada. Para demonstrar a eficiência deste controle, a queda de tensão com a carga foi de somente 2 V e o valor volta para a referência em menos de 200 ms. Um comportamento parecido é observado ao retirar a carga, onde a potência em excesso sobrecarrega o capacitor, aumentando a tensão do link CC, mudando a referência de controle buscando escoar essa potência excedente de volta para a rede, mantendo a tensão no valor de referência, com parâmetros de eficiência próximos ao anterior.

3.4 Simulações do lado do gerador

Nesta parte da simulação uma fonte CC no link CC é utilizada ao invés do arranjo do lado da rede para testar o funcionamento do controle do gerador isolado do controle da rede. Este controle visa o ajuste do nível de potência ativa e reativa entre o gerador e o conversor, usando a velocidade como parâmetro para a potência ativa e o fluxo para a potência reativa.

3.4.1 Controle de corrente

Semelhante ao feito no teste do controle interno do lado da rede, a máquina é mantida em modo velocidade e colocamos uma velocidade constante na sua entrada, com o intuito de avaliar somente o controle de corrente I_q e I_d da máquina. A Figura 12 mostra o arranjo usado.

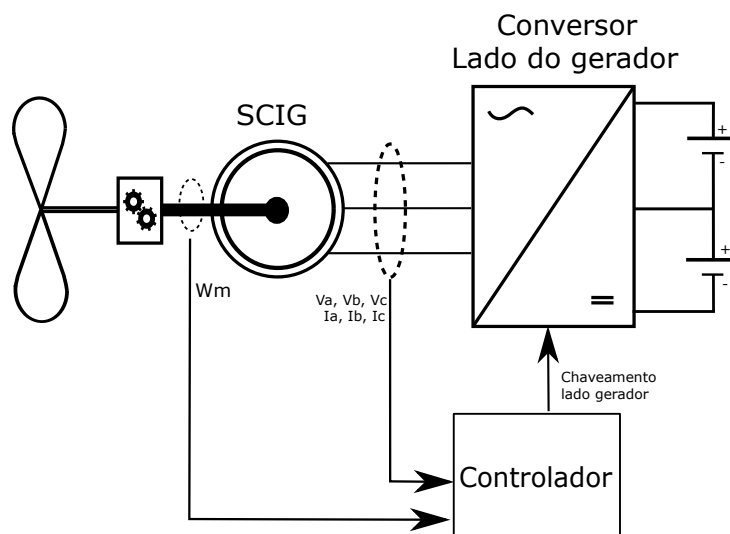


Figura 12 – Modelo simplificado do conjunto gerador+conversor com conjunto de fontes de tensão no link CC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste arranjo é colocado um degrau em I_q e I_d de 4 A, gerando os gráficos das Figuras 14 e 13 .

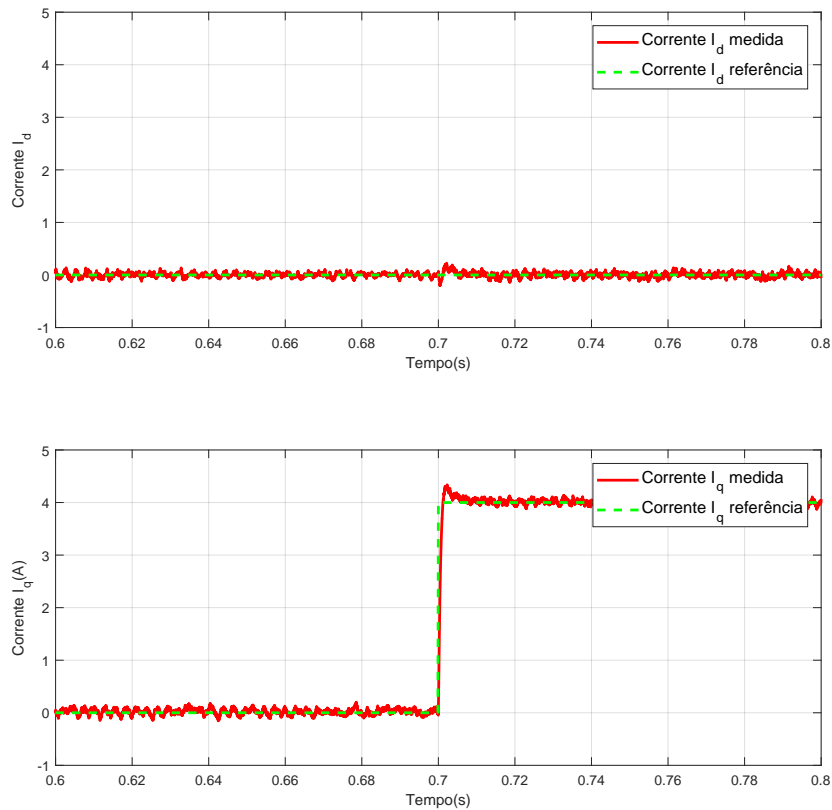


Figura 13 – Degrau no referencial da corrente I_q do conjunto gerador+conversor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando-se do método de controle proposto, chegou-se a uma resposta de alta confiabilidade e eficiência, como se pode observar no seu rápido tempo de subida ($t_{subida} < 5 \text{ ms}$) com pequeno sobre-sinal ($I_{max} < 10 \%$ acima do I_d^*) e um baixo tempo de acomodação de 10% ($t_{a,10\%} < 10 \text{ ms}$). Semelhante ao caso da rede, pode ser observado o desacoplamento entre as correntes dq da máquina. Outro detalhe que pode ser percebido é uma pequena oscilação no sinal das duas correntes, isto se dá devido a ambos os gráficos serem retirados de uma mesma simulação em instantes diferentes (I_d retirado da simulação do instante 0,3 s ao 0,4 s e I_q retirado do instante de 0,7 s a 0,8 s). Pode-se perceber que a oscilação começa quando o degrau de I_q é aplicado, e continua pelo restante da simulação. Porém essa oscilação não é relevante o suficiente para atrapalhar o funcionamento do controle de corrente utilizado.

3.4.2 Controle de fluxo e velocidade

Para o teste de controle externo é necessário trocar o modo da máquina para torque mecânico, para poder ser colocada uma referência de velocidade e fluxo e demonstrar

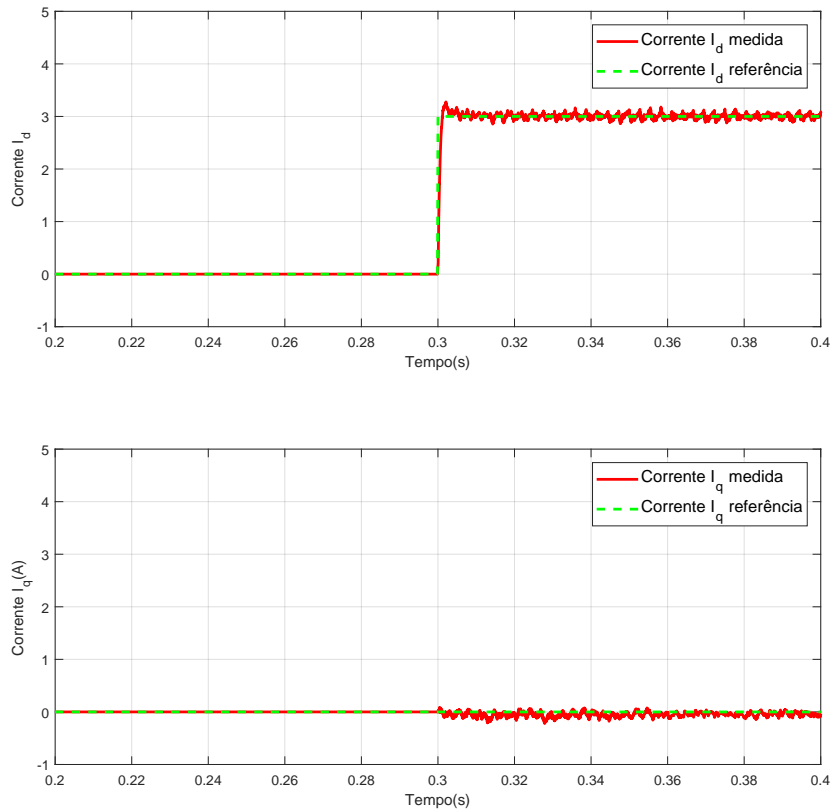


Figura 14 – Degrau no referencial da corrente I_d do conjunto gerador+conversor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

que com a mudança do torque da máquina o controle externo garante a estabilidade do sistema nos valores requeridos.

Como pode ser observado no gráfico da Figura 15, o sistema começa fora do regime permanente com fluxo magnético nulo e sua referência em uma constante. Aos 0,05 s o fluxo magnético da máquina chega no valor nominal e permanece neste valor durante toda a simulação, pode-se ver também a influência do fluxo na corrente I_d , que agora tem uma parcela não nula para manter o fluxo no valor de referência. Não são observadas alterações nos valores de I_d e do fluxo medido quando é inserido um torque no eixo no instante 0,1 s ou durante suas variações nos instantes 0,175 s e 0,25 s.

O comportamento da velocidade nesta mesma simulação pode ser observado no gráfico da Figura 16, mesmo com o sistema ainda instável devido à falta de fluxo durante os primeiros 0,05 s. O controle conseguiu manter a velocidade no valor de referência durante toda a simulação, com sobre-sinal de poucos radianos por segundo frente à grande variações de torque, saindo de 0 o torque nominal no instante 0,1 s, caindo de torque nominal para 0,25 pu no instante 0,175 s e por fim aumentando para 0,8 pu no instante 0,25 s. A influência do controle de velocidade em I_q pode ser observada durante esses instantes, onde o controle externo faz com que o sistema escoe a energia em excesso para fora, evi-

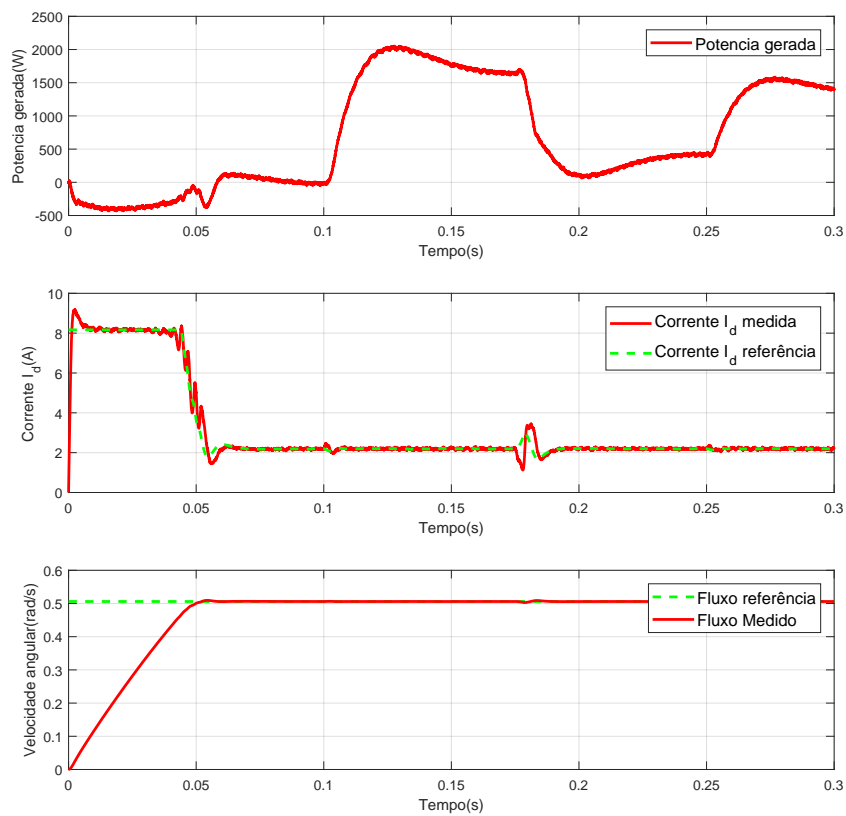


Figura 15 – Controle de fluxo na inicialização do sistema em conjunto com o controle da variável I_d .

Fonte: Elaborado pelo autor.

tando o aumento de velocidade com o aumento do torque, ou diminuir o escoamento de energia para evitar a redução de velocidade.

Para ambos os casos, a eficiência do controle escolhido é visível nos baixos tempos de respostas e sobre-sinais.

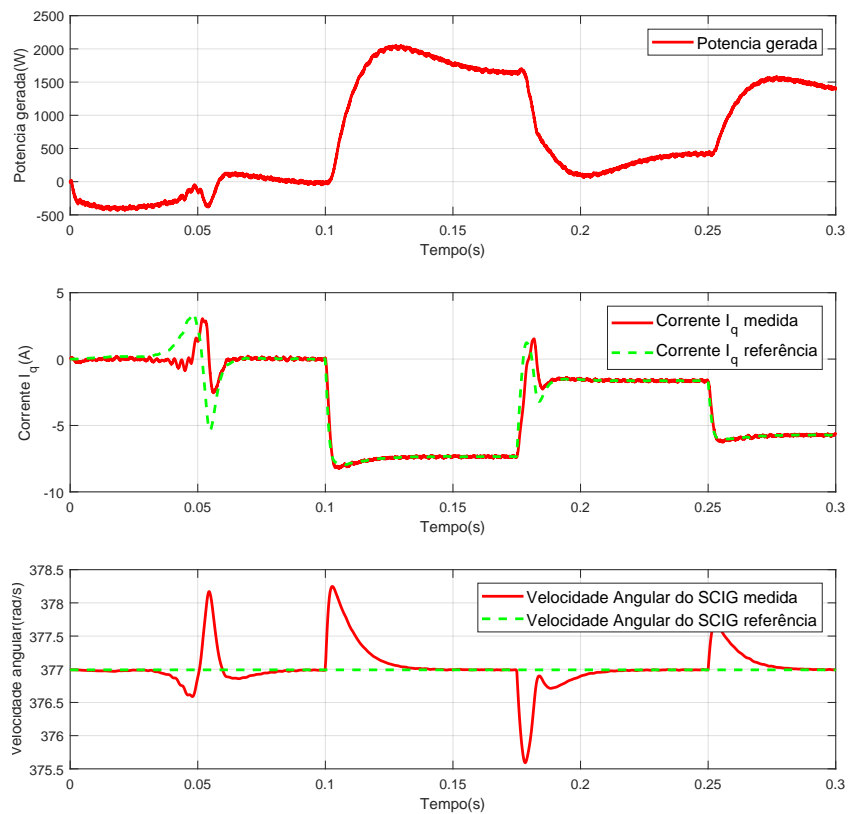


Figura 16 – Controle de velocidade ao colocar torque no sistema em conjunto com o controle da variável I_q .

Fonte: Elaborado pelo autor.

Bancada de testes

Para a construção de uma bancada de testes que atenda aos requisitos para a validação de testes em turbinas eólicas, faz-se necessário o uso de equipamentos específicos, cuja configuração final de montagem pode ser vista na Figura 17 . Cada um desses equipamentos é discutido com mais detalhes ao longo deste capítulo.

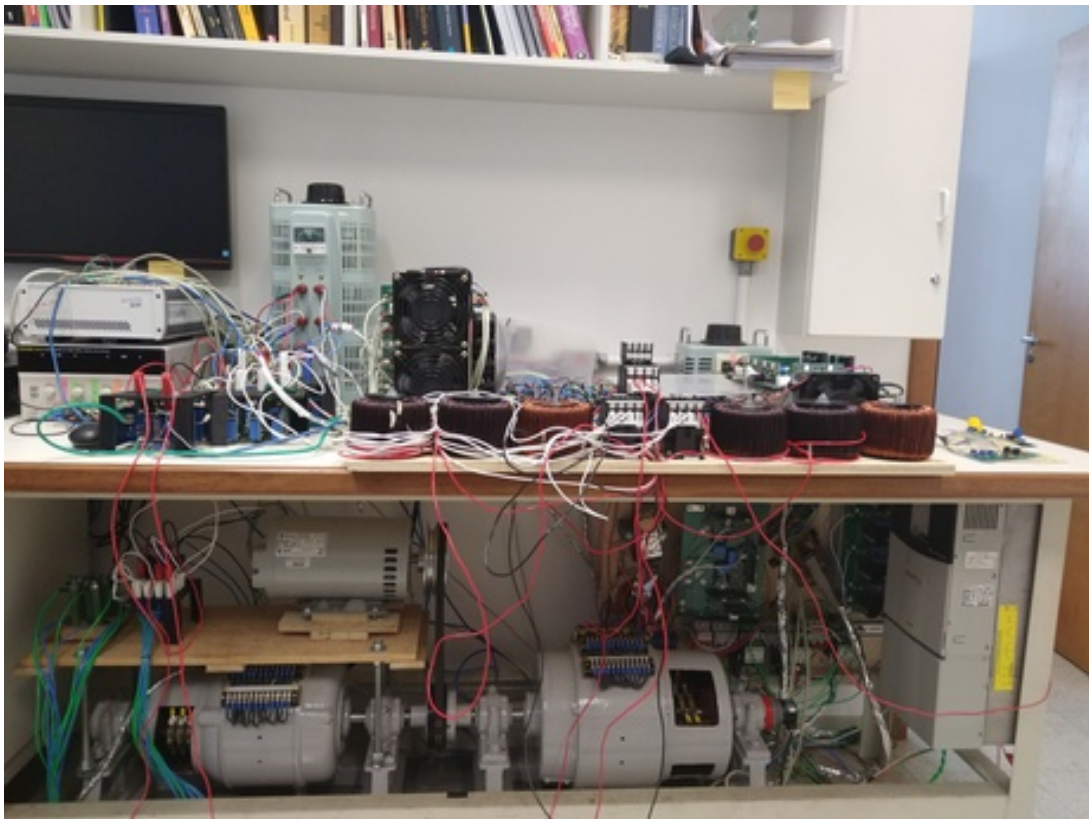


Figura 17 – Bancada de testes completa.

Fonte: Elaborador pelo autor

4.1 Breve Resumo Bibliográfico

Pode-se encontrar na literatura pesquisas nas quais se utilizam ensaios realizados em bancadas de teste para testes e validação de propostas. Esta sessão traz alguns trabalhos que se utilizam de bancadas de testes com motores ou geradores para verificar funcionamento, o controle, análise de faltas e algoritmos de proteção.

Em Megahed e Malik (1998) é proposto um método para simular faltas internas em gerador síncrono quanto este só tem um caminho por fase empregando representação direta por fase, utilizando um modelo onde a fase em falta era dividida no ponto central da bobina. O modelo teórico criado para esse tipo de análise é validado em bancada de teste onde os resultados de simulação e os medidos nos ensaios em geradores reais são comparados para mostrar a precisão do modelo.

Bueno et al. (2008) apresentam um estudo sobre o funcionamento de geração eólica com inversores *back-to-back* com filtro LCL usando tanto simulações com o Simulink® e testes em bancada. Neste estudo é analisado em detalhes o comportamento dos conversores e do sistema em geral quando em operação em regime permanente, sendo calculados os parâmetros de um filtro LCL e dos outros componentes passivos do sistema. Também discorre sobre o comportamento térmico dos componentes ativos (principalmente das chaves dos conversores). Por fim, verifica-se a resiliência do arranjo quanto a limitações da entrega da potência ativa à rede devido à queda na tensão causado por faltas trifásicas ou dupla fase. Ao final esses modelos são postos a prova de forma completa em simulação e de forma parcial em bancada de testes, validando as propostas descritas no texto.

Lee, Lee e Blaabjerg (2015) exploram as interações dos inversores de topologia *neutral point clamped*(NPC) de 3 níveis *back-to-back* em geração eólica, para detectar faltas de circuito aberto nas chaves nestes inversores. A principal proposta deste trabalho é detectar quando a falta ocorre e em qual chave ocorreu esta falta. A proposta de detecção usa somente das correntes já medidas do sistema, facilitando sua implementação em topologias semelhantes por não precisar de equipamentos ou medidas adicionais. Os testes foram feitos em bancada de testes com potência reduzida usando um gerador de ímãs permanentes de 11 kW e um motor de indução para produzir torque mecânico emulando uma turbina eólica. Ao final conclui-se que o método proposto, tirando algumas ressalvas quanto a magnitude da corrente em relação ao *ripple* do chaveamento, é válido e fornece uma alternativa para detecção de faltas de circuito aberto nas chaves dos conversores.

É analisado em Bariša, Sumina e Kutija (2015) um modelo de estimação de fluxo para geradores gaiola de esquilo aplicados em geração eólica. São comparados em simulação computacional e em bancada dois métodos para a estimação do fluxo: o estimador indireto que usa as correntes do estator, o ângulo do rotor e a constante de tempo do rotor; e o estimador direto que usa as correntes e tensões do estator. Para o teste em bancada é utilizado um gerador de indução gaiola de esquilo de 560 kW com conversores de potência em configuração *back-to-back* ligado a rede e para simular o torque no eixo gerado pelo

vento é utilizado um motor síncrono de ímã permanente em conjunto com um conversor de frequência. Chega-se a conclusão que, apesar da dependência da constante de tempo do rotor, o método proposto de estimar o fluxo indiretamente apresentou resultados satisfatórios tanto nas simulações como nos testes em bancada quando comparado ao método de estimação direta do fluxo.

Jlassi e Cardoso (2019) apresentam uma montagem realizada em topologias de geração eólica com conversores *back-to-back* com gerador de ímã permanente. Neste trabalho é enfatizada a tolerância a faltas nos conversores de potência quando há uma falta onde as chaves ficam em aberto. É utilizado o controle de torque direto e *triacs* em conjunto com os conversores para tornar o conjunto tolerante a faltas até certo ponto. Por fim, os esquemas avaliados são postos a teste em simulação no Simulink[®] e em bancada com potência reduzida com o gerador de 2,2 kW. Os resultados apresentados mostram que tanto a detecção de falta quanto a ação de mitigação tomada pelo conjunto tiveram resultados satisfatórios.

Semwal et al. (2019) estudam o comportamento de um motor de indução duplamente alimentado com inversores em configuração *back-to-back* em operação de turbinamento e bombeamento de água em grandes estações de armazenamento de energia quando em estado de faltas simétricas tanto no estator como na rede. Depois é analisado o comportamento do sistema após a inclusão de 2 estágios de proteção. O primeiro estágio consiste da instalação de um *chopper* no barramento do link CC com a sua ativação associada ao aumento dos níveis de tensão neste barramento, o segundo da inclusão de uma proteção *crowbar* no lado do rotor do motor de indução, visando dissipar a energia no rotor quando este está em estado de falta. Os testes foram realizados primeiramente em escala completa, ou seja, com os valores reais do motor e conversores, em simulação no Simulink[®] depois em escala reduzida em bancada de testes. Nestes ensaios são validados os funcionamentos do controle e a robustez da topologia e a eficácia das proteções instaladas mesmo com distúrbios inseridos na rede.

4.2 Descrição geral da bancada de teste

Para a elaboração de uma bancada de testes capaz de produzir resultados relevantes para as análises propostas neste texto, é necessário um conjunto de equipamentos que represente ou simule as diferentes regiões do sistema. Um equipamento para simular o torque gerado pelo vento no eixo do gerador eólico, um gerador para funcionar semelhante ao SCIG presente na turbina eólica, dispositivos para desempenhar a função dos medidores externo necessários para o controle e monitoramento do funcionamento da fazenda eólica. Além disso, há a necessidade de conversores na configuração *back-to-back* com um controlador para fazer a transferência de potência da forma desejada. Também é necessário um conjunto de equipamentos auxiliares que permitem o funcionamento do sistema

e/ou testes específicos, como uma montagem em um estágio intermediário para análise de algum parâmetro que possa estar apresentando divergência do resultado esperado. A Figura 18 mostra o esquema geral do projeto.

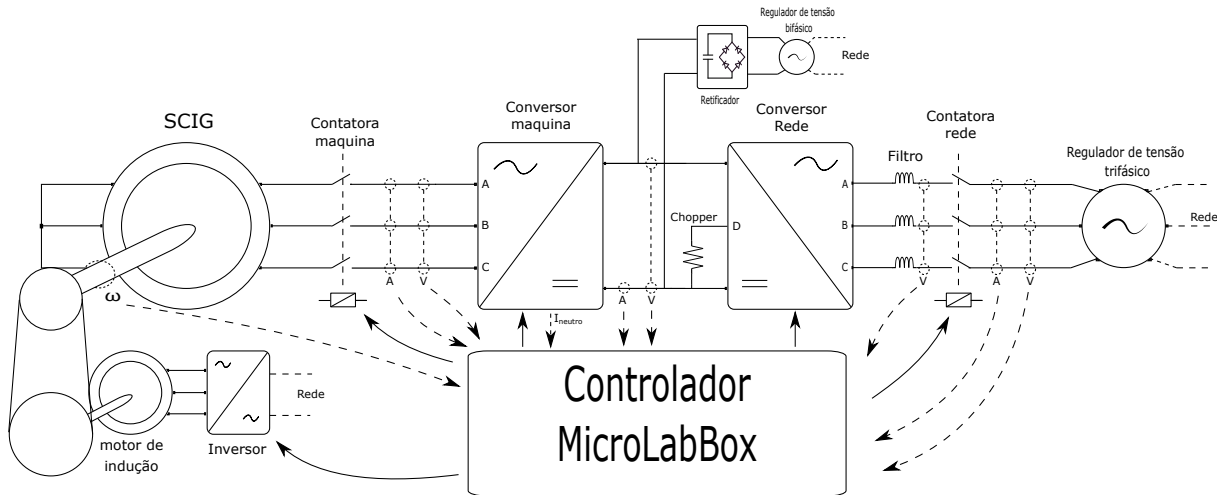


Figura 18 – Modelo completo da bancada de testes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Força motriz, gerador, conversores

Os principais equipamentos de potência são analisados nesta sessão. Detalhes são apresentados quanto a fonte de força motriz utilizada, além das especificações do gerador e dos conversores utilizados na confecção da bancada de testes.

4.2.1.1 Força motriz

Para a força motriz foi usado um conjunto de um motor de indução de gaiola de esquilo e um inversor de potência. Os dois são usados em conjunto a fim de controlar o torque inserido no eixo do gerador. A Figura 19 mostra o motor e o inversor.

A potência e a velocidade fornecida pelo motor de indução são semelhantes aos nominais do gerador usado nos testes, porém um conjunto de pólias é aplicado para ajustar a velocidade dos eixos. A pólia ligada ao eixo do motor de indução é 30 % maior que a pólia ligada ao eixo do gerador, permitindo colocar velocidades acima da nominal nos geradores sem ultrapassar a velocidade nominal do motor de indução, como mostra a Figura 20.

4.2.1.2 Gerador

O gerador utilizado para realizar os testes de bancada pode ser visto na Figura 21, sendo ele a máquina no lado direito inferior da imagem. Trata-se de um gerador de indução com o rotor em curto para simular o funcionamento de um SCIG. Os parâmetros-base do gerador são mostrados na Tabela 3.



a Motor de indução.



b Inversor.

Figura 19 – Força motriz ligada ao gerador, composta por motor de indução e inversor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

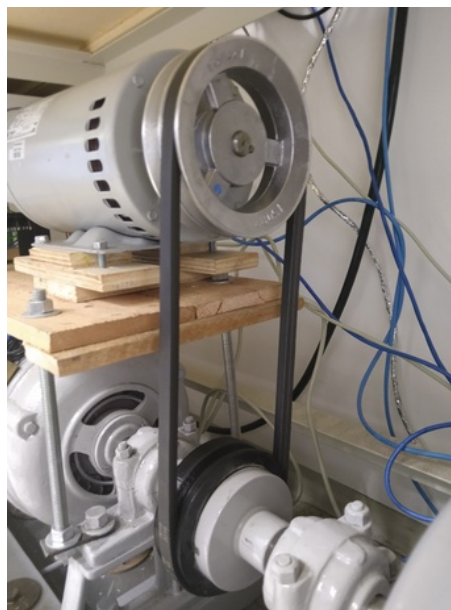


Figura 20 – Conjunto de pólias e correia.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Este gerador tem o eixo conectado com a fonte motriz através de um conjunto de pólias, além disso, ele está ligado a outro gerador que nos testes estará desativado e rodando em vazio. Destaca-se a presença de um *encoder* óptico com resolução de 10 bits acoplados para a medição da velocidade angular da máquina como mostra a Figura 21.

Internamente, cada fase é composta por um conjunto com 2 bobinas. Para a realização das faltas internas, o gerador foi modificado de modo que 24 derivações em diferentes pontos dos enrolamentos dessas bobinas fossem acessíveis externamente, como mostra a

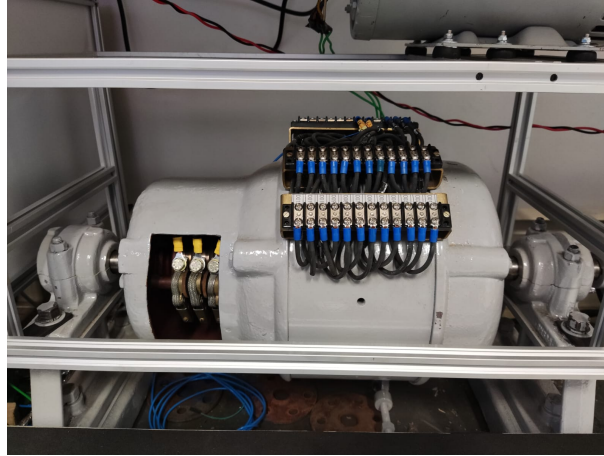


Figura 21 – Gerador de indução com o rotor em curto, emulando um gerador gaiola de esquilo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Parâmetros do gerador utilizado.

Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
S_{nom}	3kVA	P_p	2
P_{nom}	2,2kW	J	0,022kg.m ²
V_{nom}	230V	L_{mag}	230,8mH/f
R_r	0,071 Ω /f	L_{lr}	0,637mH/f
R_s	1,805 Ω /f	L_{ls}	15,94mH/f
R_p	520 Ω /f	L_m	48,69mH/f
a	4,74 N1/N2		

Figura 22.

Essas derivações foram escolhidas devido à semelhança entre os motores e objetivos do experimento segundo o estudo (MONARO et al., 2012), onde foi considerado a simetria elétrica e a posição dos enrolamentos nas ranhuras do gerador para decidir o local das derivações, sendo tal arranjo exibido na Figura 22. Nesta figura, os terminais de saída das bobinas da máquina estão indicados com a letra T e as derivações criadas com o intuito de testes de falta interna começam com a letra D. O número após as letras indicam qual o número do terminal ou derivação, enquanto a porcentagem após as derivações indicam a distância da bobina onde esta presente essa derivação.

4.2.1.3 Conversores

Dois conversores de 10 kW de potência foram usados para confeccionar a ligação entre o gerador e a rede na configuração *back-to-back*, onde o lado CC de cada conversor ligado ao outro e os lados AC estão conectados à rede e ao gerador, como mostra a Figura 23.

O conversor do lado da rede pode ser visto na Figura 24, este possui 4 braços, sendo 3 utilizados para produzir uma tensão trifásica conforme o chaveamento aplicado, enquanto

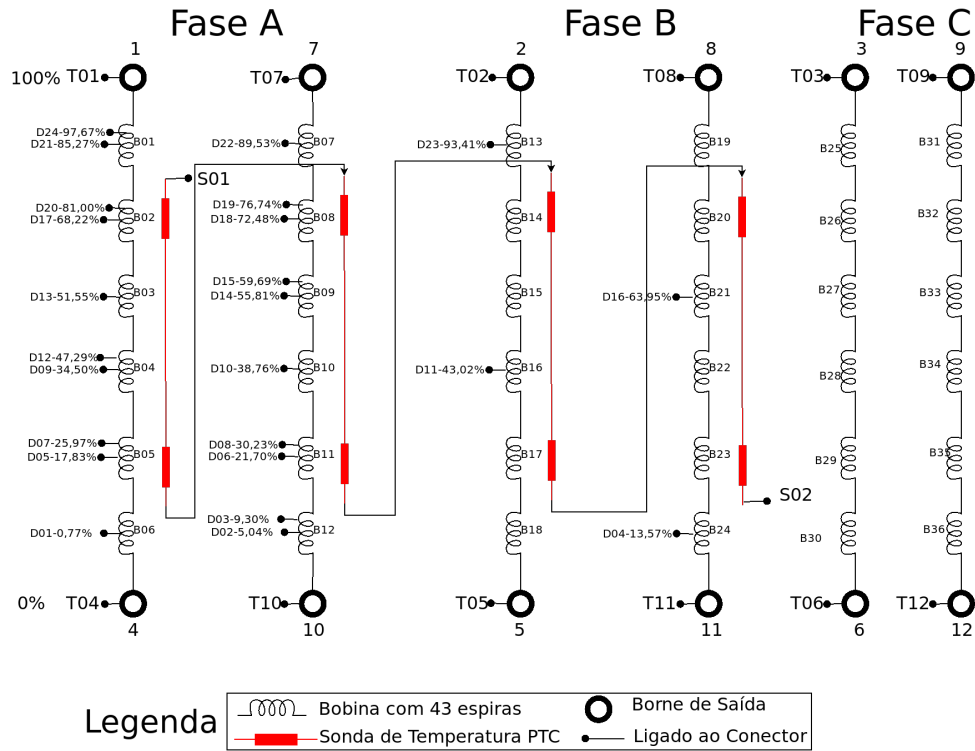


Figura 22 – Configuração das derivações adicionadas nos enrolamentos do estator.

Retirado de: (MONARO et al., 2012).

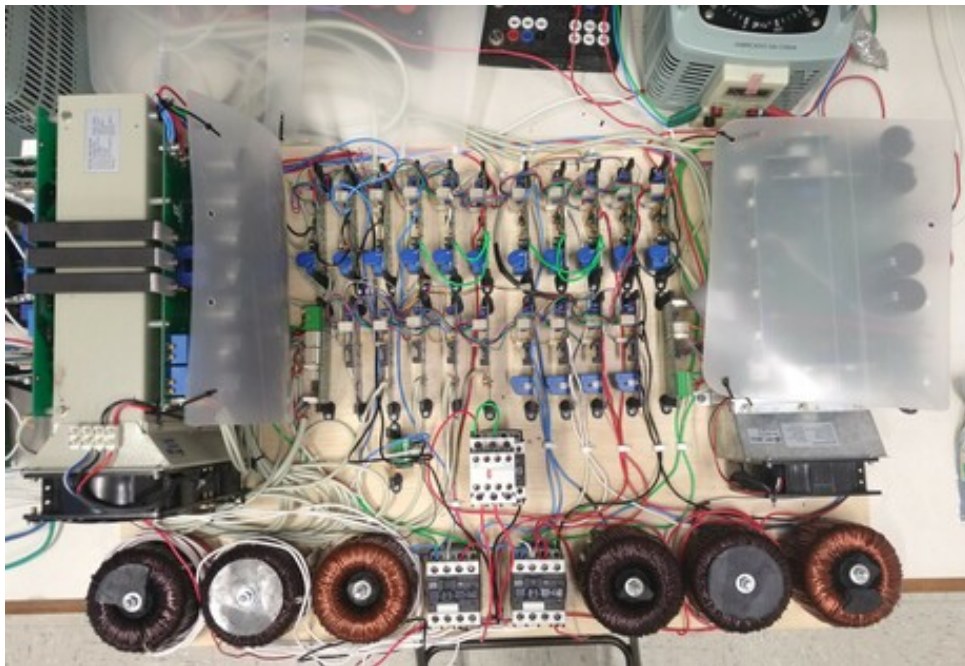
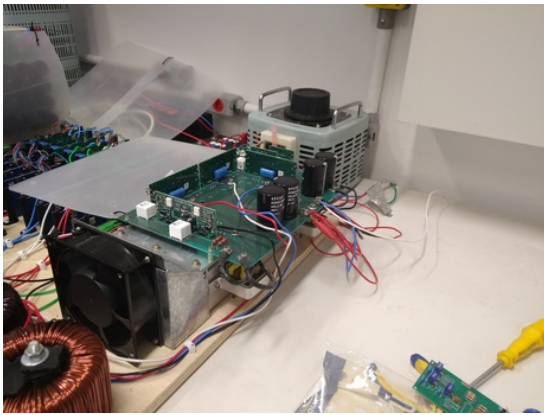


Figura 23 – Vista superior dos conversores, placas de medição e dos filtros.

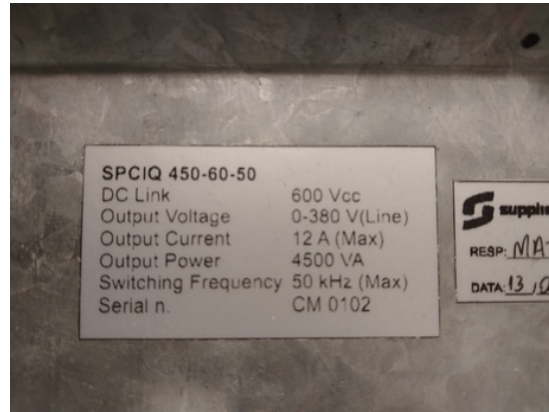
Fonte: Elaborado pelo autor.

o quarto braço é usado em conjunto com uma resistência, como um *chopper* como mostra a Figura 25. Este tem a função de dissipar a potência excedente no Link CC desses conversores quando ocorre algum problema com a distribuição de potência do sistema e

a tensão no Link CC ultrapassa um limite estabelecido. Este conversor opera em 2 níveis de tensão para reproduzir as formas de onda desejada, com a tensão positiva do Link CC sendo um e a tensão negativa do Link CC o outro. Para este caso foi usada uma portadora triangular simples que vai de -1 a 1 para o PWM.



a Conversor



b Especificações do conversor

Figura 24 – Conversor de 2 níveis, com 4 braços usado no lado da rede e suas especificações.

Fonte: Elaborado pelo autor.

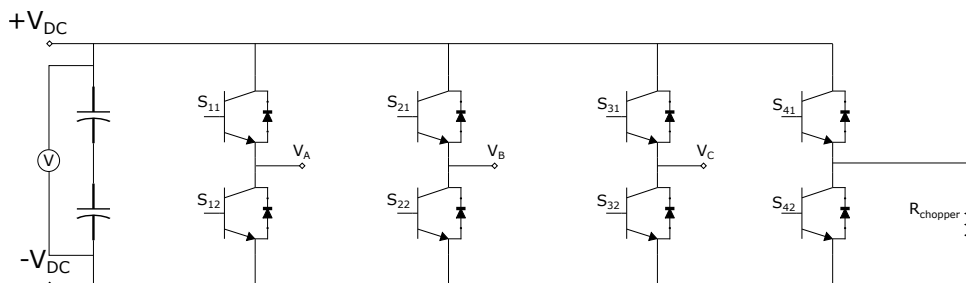
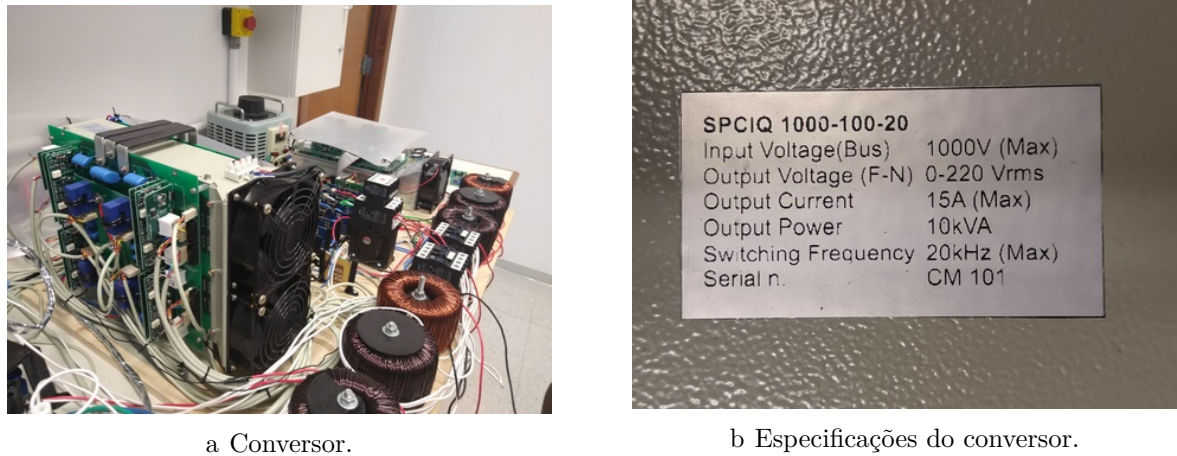


Figura 25 – Esquema interno do Conversor de 2 níveis com o *chopper*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O conversor do lado do gerador pode ser visto na Figura 26, este também possui 4 braços, mas somente 3 deles são utilizados para os testes no SCIG. Os três foram usados para produzir as tensões trifásicas aplicadas no controle da transferência de potência do gerador para o Link CC como mostra o esquema da Figura 27. Este conversor opera em 3 níveis de tensão, o positivo, o negativo e o neutro. Para criar essas tensões, o modelo apresentado em (YAZDANI; IRAVANI, 2010) é utilizado, no qual são aplicados duas modulantes triangulares, uma para o lado positivo de 0 a 1 e outra para o lado negativo de -1 a 0, onde cada modulante controla um par de chaves do conversor, como pode ser visto na Figura 28.



a Conversor.

b Especificações do conversor.

Figura 26 – Conversor de 3 níveis, com 4 braços usado no lado do gerador e suas especificações.

Fonte: Elaborado pelo autor.

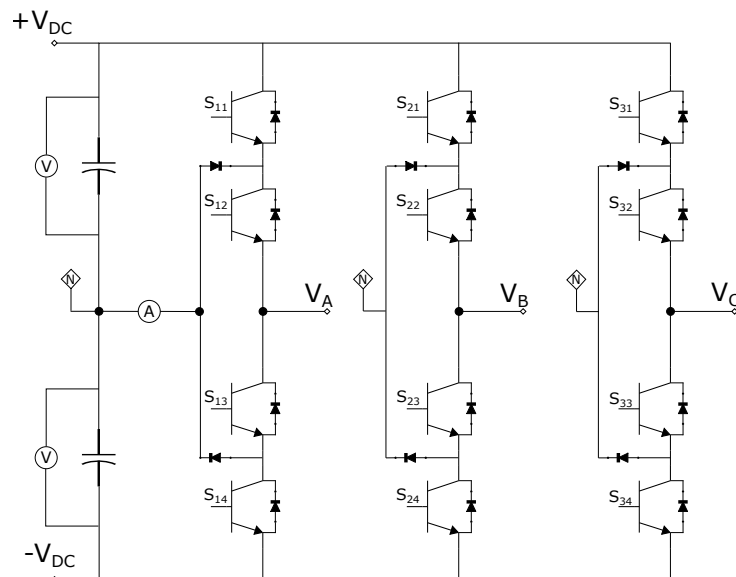


Figura 27 – Esquema interno do Conversor de 3 níveis.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 Equipamentos de medição e tratamento inicial dos sinais

Para o tratamento de sinais foram usados 3 tipos de placas. Uma placa para medição de tensão, uma placa para medição de corrente e uma placa para ajustar os níveis de tensão entre o controlador e os conversores. Em todos os casos foram usados cabos manga blindados para ligar as placas ao controlador para minimizar interferências externas por ruídos e outras fontes. A Figura 29 mostra o conjunto de placas.

1. As placas de aquisição de corrente e tensão foram conceituadas em 4 passos:

□ Aquisição em alta potência e normalização da saída de baixa potência: onde

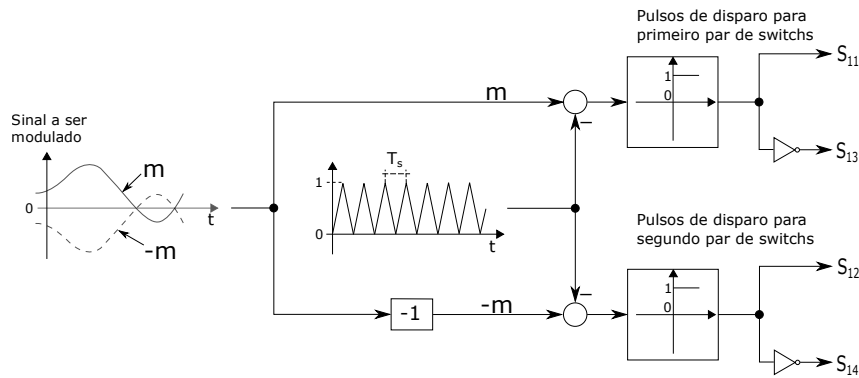


Figura 28 – Processo de produção de pulsos de disparo para o conversor de 3 níveis.

Fonte: Adaptado de (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

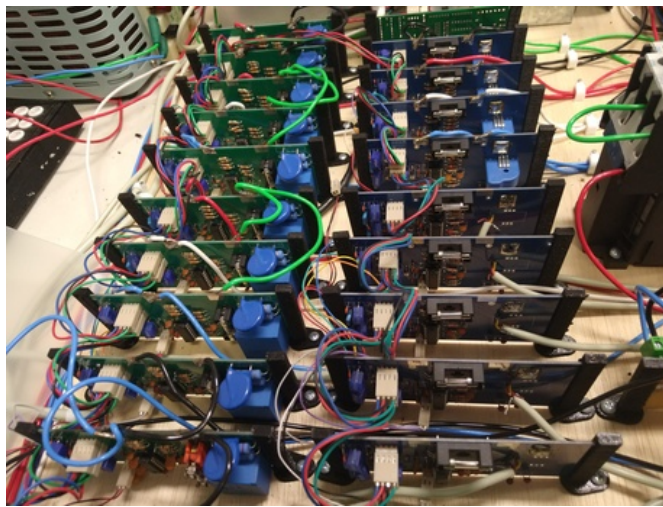


Figura 29 – Placas de medição de tensão (a esquerda), corrente (a direita) e de *shift-level* (primeira placa da direita de cima para baixo)

Fonte: Elaborado pelo autor.

é medido valor de tensão e corrente com o sensor, e a mesma é normalizada como uma saída de tensão. No caso do sensor de corrente, uma corrente é diretamente entregue, mas para o caso da tensão um resistor auxiliar faz-se necessário para a obtenção de uma saída de tensão.

- ❑ Ajuste de parâmetros: neste passo são normalizados os níveis e escalas da saída destas placas de medição, são usados 2 amplificadores operacionais para garantir esse nível de tensão padronizado na saída desta etapa, ajustando tanto o ganho como o *offset* dos sinais recebidos.
- ❑ Filtro: neste passo é aplicado um filtro passa baixa de frequência de corte de 2 kHz, a fim de filtrar principalmente o ruído de chaveamento dos conversores, além de reduzir a influência de outros ruídos presentes no sinal.
- ❑ *Buffer*: no último passo foi colocado um *Buffer* para garantir os níveis de tensão do sistema, além de se realizar uma última filtragem com um capacitor

na saída da placa.

Além desses passos também foi realizada uma filtragem específica para as alimentações dos componentes usados na confecção dos medidores para evitar a presença de ruídos neste processo. O passo a passo do processo pode ser visualizado na Figura 30. No anexo B está disponível o esquema elétrico usado e os valores das propriedades de interesse dos componentes.

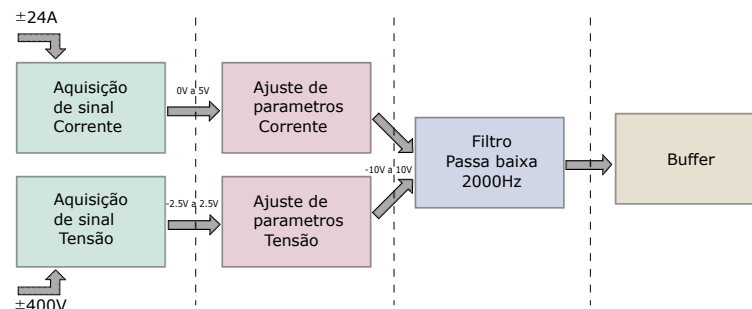


Figura 30 – Diagrama do funcionamento das placas de medição

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já as placas para ajuste de nível tem 2 propósitos distintos, sendo eles o reajuste do nível das tensões entre conversor e controlador, onde o nível de tensão de chaveamento gerada pelo controlador é posto em condições aceitáveis para as *gates* dos conversores, e a proteção dos conversores quando estes mandam um sinal de erro detectado pelo próprio dispositivo. Esta proteção vem de um aviso visual com LEDs presentes na placa e desligamento das contatoras que ligam o conversor à rede e/ou gerador através de um relé. Desta maneira, a reação ao sinal de erro não precisa ser processada pelo controlador antes de uma ação ser tomada.

4.2.3 Controlador - MicrolabBox

O dispositivo escolhido para realizar tratamento de dados, controle do sistema, implementação de algoritmos de proteção e construção de uma interface para os usuários foi o MicrolabBox[®] com o software DSPACE[®] e o MATLAB[®]. As informações técnicas do MicrolabBox[®] podem ser encontradas em DSPACE (2020). A sua abundância de entradas e saídas digitais permite uma melhor gestão das variáveis de controle e proteção, enquanto a abundância de saídas e entradas analógicas permite o monitoramento do sistema através do sistema de medição. Além disso, sua alta taxa de obtenção e tratamento desses dados é o que torna possível a confecção da bancada de testes. A Figura 31 mostra uma imagem do MicrolabBox[®].

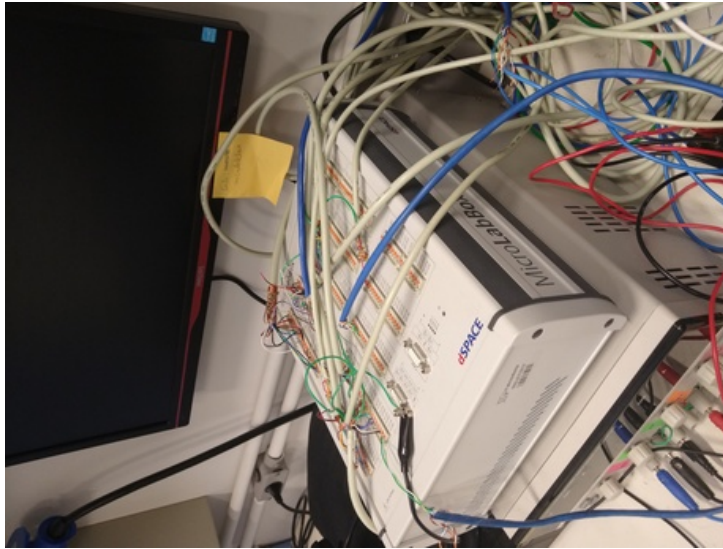


Figura 31 – MicrolabBox[®].

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os sinais analógicos recebidos estão na faixa de -10 V a 10 V, amostrados a cada $1 \mu s$. Cinquenta amostras são selecionadas, guardadas em um *buffer*, sendo feita a média das mesmas para reduzir ainda mais o ruído presente na aquisição de dados. Após isso, o conversor analógico digital recebe esses dados tratados a uma taxa de 4 kHz, sendo posteriormente submetidos a um ganho e *offset* para converter esses dados novamente nos valores reais de tensão e corrente.

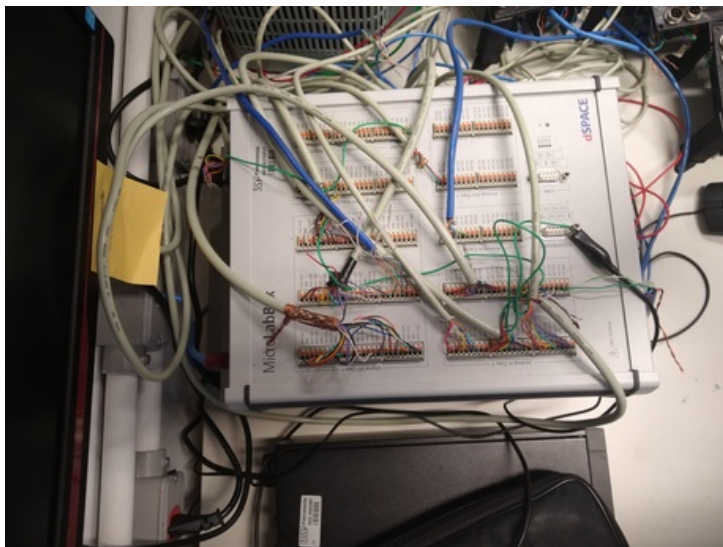


Figura 32 – Entradas e saídas analógicas e digitais do MicrolabBox[®].

Fonte: Elaborado pelo autor.

Códigos foram gerados no MATLAB[®] e no Simulink[®], depois embarcados diretamente no MicrolabBox[®]. Nestes códigos é possível ajustar a taxa de aquisição de dados, confecção de modulantes para geração do sinal de chaveamento das placas, interpretação

de diversos sinais diferentes provenientes dos múltiplos equipamentos necessários para o funcionamento da bancada, como o sinal binário do *encoder*, ou o diferencamento e ajuste de escala de tensões e correntes tanto alternadas como contínuas. Destaca-se que os controles e os algoritmos de proteção executam em tempo real, atualizando constantemente as saídas de comando dos conversores e chaves de conexão.

Todo o processo é acompanhado por uma interface interativa criada no DSPACE[®], onde se pode coletar os dados recebidos e tratados no MicrolabBox[®], e os expor de uma maneira que seja compreensível para o usuário. Nesta mesma interface também é possível definir diretamente as variáveis de comando que o MicrolabBox[®] envia. Este processo pode ser manual, opção geralmente utilizada na inicialização do sistema, ou por *script*, usada principalmente nos testes de controle e nos testes de falta devido à velocidade necessária da ação. Além disso, o sistema permite a gravação dos dados obtidos para uso futuro.

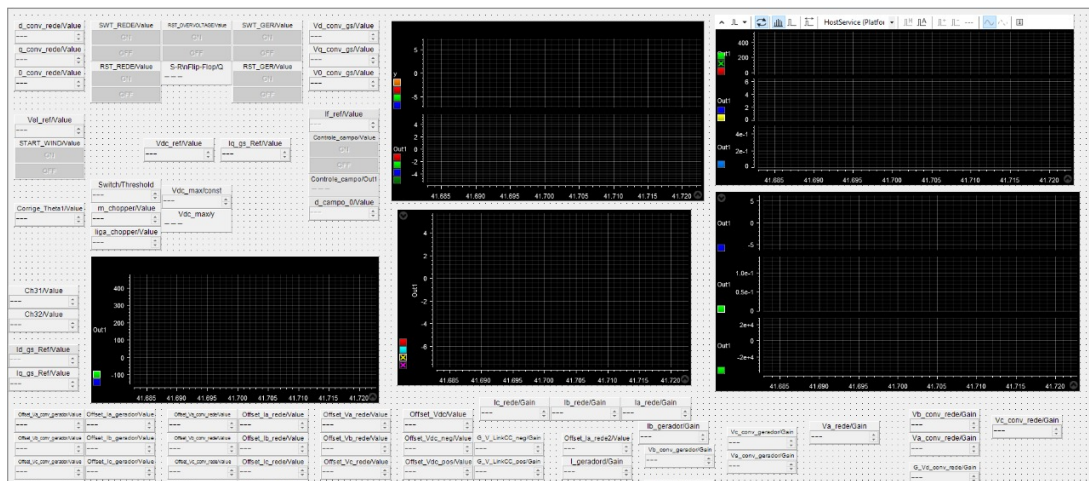


Figura 33 – Interface gráfica criada no DSPACE[®] para monitoramento e controle dos sinais.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Equipamentos auxiliares

Durante o processo de montagem, inicialização ou de testes, são usados diversos outros dispositivos e aparelhos, sendo eles:

- ❑ Um Variac trifásico (9 kVA - 50-60 Hz - entrada com até 380 V e saída de até 430 V - Corrente máxima de 12 A): Colocado entre a rede do laboratório e a bancada, servindo para controlar o nível de tensão.
- ❑ Um Variac bifásico de 250 V e um retificador de 4 kVA que foram usados em conjunto para fornecer uma tensão contínua ajustável para o Link CC do sistema. Este processo foi usado para testar o controle de corrente do lado da rede (onde esse

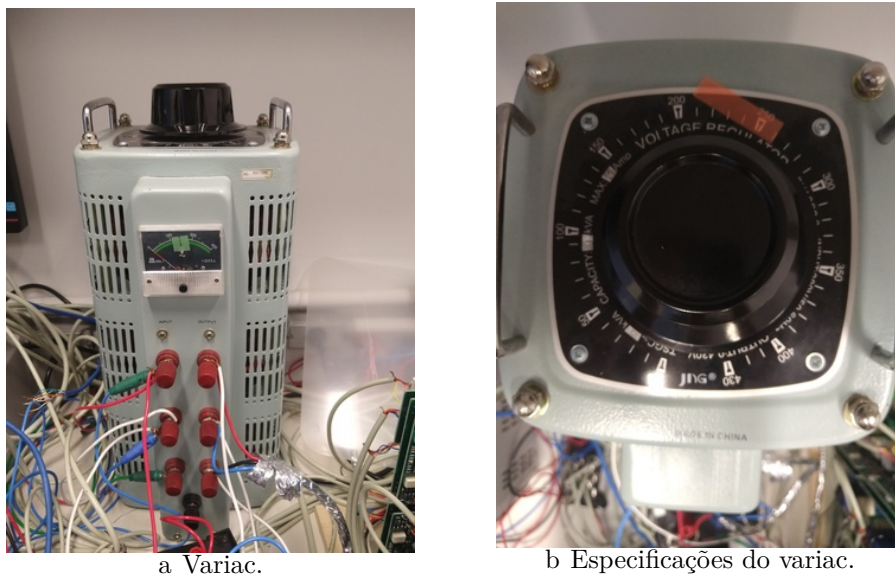


Figura 34 – Variac trifásico usado para controlar o nível de tensão de entrada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

conjunto tinha a função da fonte CC) e é atualmente usado no processo de inicialização da bancada, fornecendo uma tensão suficiente para permitir a sincronização do inversor do lado da rede com a rede em si.

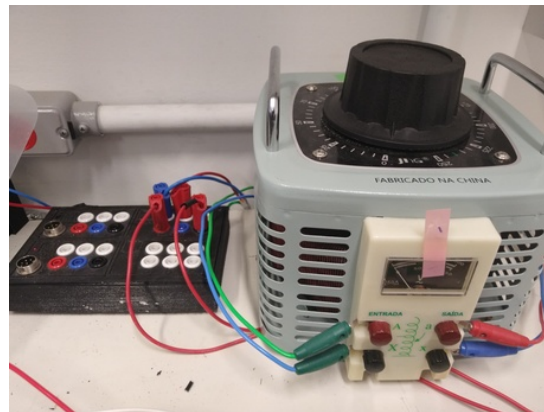


Figura 35 – Variac bifásico usado para controlar o nível de tensão do link CC, em conjunto com o retificador (entrada do retificador ao lado esquerdo do variac).

Fonte: Elaborado pelo autor.

- ❑ Resistência de $42,8 \Omega$ e 1600 W : empregada inicialmente no ajuste dos ganhos nas placas de medição, como carga em alguns testes iniciais (como no teste do controle de tensão CC do lado da rede) e atualmente está sendo usada, juntamente com o 4 braço do inversor do lado da rede, como um *chopper*.
- ❑ Conjunto de 8 resistências de 22Ω 30 W , utilizadas em diversos arranjos de série/paralelo para obter resistências diferentes nos testes de falta interna do gerador.

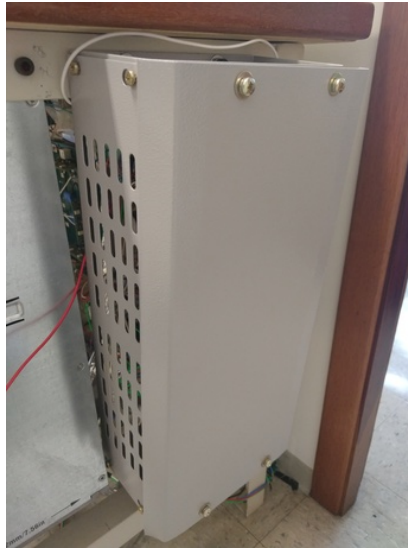


Figura 36 – Resistência de $42,8 \Omega$ usada para ajuste de ganhos e como *chopper*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

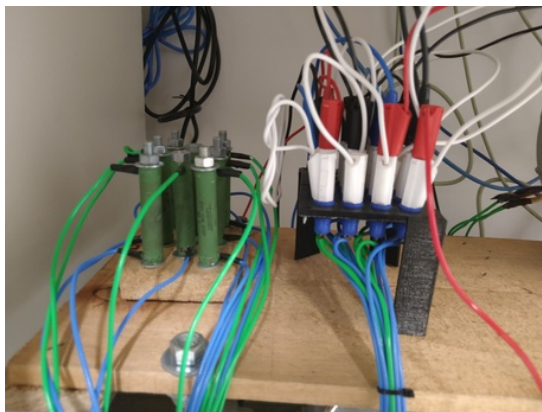


Figura 37 – Conjunto de 8 resistências de 22Ω construída em base de madeira e ligada a borners para facilitar mudança de configuração

Fonte: Elaborado pelo autor.

- Aparelhos de medição externos (multímetros, alicate amperímetro e osciloscópio): tinham a função inicial de ajudar o ajuste do ganho e *offset* das placas de medição e verificar o nível de entrada e saída dos sinais das placas e do MicrolabBox[®]. O osciloscópio também foi usado para averiguar o sinal de chaveamento enviado aos inversores. Atualmente são usados para validar valores medidos pelas placas e medições mais pontuais da bancada.

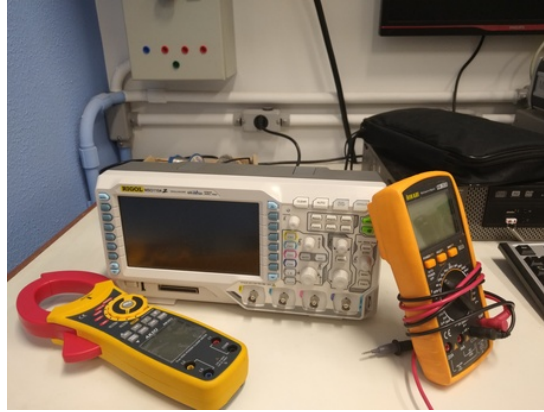


Figura 38 – Multímetro, amperímetro e osciloscópio usados durante a construção e testes da bancada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Testes de controle em bancada

Após a montagem da bancada de testes e embarcar o arranjo de controle, este escolhido e calculado segundo os procedimentos descritos no Capítulo 2.2, o sistema está pronto para o início dos testes. Primeiramente é testada somente parte da bancada construída, da rede até o link CC, semelhante ao processo usado nos testes de simulação. Depois o teste será realizado na bancada toda, utilizando o lado da rede para manter a tensão do link CC constante.

4.3.1 Teste no lado da rede

Para os testes no lado da rede, os parâmetros dos controladores PIs utilizados estão descritos na Tabela 4, obtidos utilizando a metodologia apresentada na seção de controle no Capítulo 2, lembrando que $G_{ctrl,rede}$ é o PI de corrente de rede tanto para I_d quanto para I_q e $G_{ctrl,V_{cc}}$ o PI para o controle da tensão no Link CC.

Tabela 4 – Valores dos parâmetros dos controladores do lado da rede embarcados no MicrolabBox[®].

	K_P	K_I
$G_{ctrl,rede}(S)$	47,143	9621
$G_{ctrl,V_{cc}}(S)$	0,3797	15,1446

4.3.1.1 Procedimento e resultados

Para o funcionamento correto e seguro da bancada de testes é necessário realizar um passo a passo para chegar nas condições corretas para fazer os testes. Nesta sessão

são apresentados os procedimentos executados antes e durante os testes do controle do conversor do lado da rede.

Inicialmente é ligada a fonte da rede à bancada. Esta irá energizar o inversor utilizando o variac trifásico que servirá como “rede” nos testes e o conjunto variac bifásico e retificador que auxilia na sincronização da rede com os conversores. O próximo passo é colocar o variac trifásico na tensão nominal da rede. Para os testes a tensão escolhida é 230 V de linha. Após isso, aumenta-se a tensão do variac bifásico até que a tensão na saída do retificador seja grande o suficiente para os conversores sintetizarem a tensão da rede, neste caso 300 Vcc, lembrando que a saída do retificador está diretamente ligado ao Link CC dos conversores.

Após estar garantido que a tensão entre a rede e a produzida pelos conversores é a mesma, através das medidas obtidas e mostradas na interface gráfica ou com os aparelhos de medida, comanda-se o fechamento da contatora de rede. Com a tensão do elo CC mantida constante pelo retificador é possível testar o controle interno do lado da rede, com os devidos cuidados para evitar que seja transmitida potência para o conjunto retificador+variac, pois estes não operam neste quadrante. Com o controle de corrente estabelecido foi testada a possibilidade de se manter a tensão constante com o controle de tensão de link CC alterando a referência dele para um valor maior que o fornecido pelo retificador.

A partir deste ponto é necessário garantir que a tensão fornecida pelo retificador seja menor que a tensão no link CC em todos os instantes, a fim de se evitar que em casos de queda de tensão no link CC a energia não seja fornecida pelo retificador, mas continue sendo fornecida pelo conversor. Por isso o nível de tensão do variac bifásico é baixado e é ligado o controle de tensão do link CC com um valor maior que o usado na sincronização, sendo neste caso colocada uma tensão nominal calculada do link CC 420 Vcc na referência.

Para testar a velocidade e robustez desse controle utiliza-se um *script* para acionar o 4º braço do conversor do lado da rede que controla o nível de tensão no *chopper* presente na bancada, alterando o seu ciclo de trabalho em dois momentos nestes ensaio, com isso pode-se analisar a reação da tensão do link CC com essa mudança. A Figura 39 apresenta um gráfico com os resultados deste teste.

Observa-se que ao acionar o *chopper* e este começa a utilizar a potência ativa do sistema, vê-se que a energia armazenada nos capacitores do link CC é consumida, baixando o nível de tensão neles, o controle de tensão começa a agir imediatamente aumentando a corrente I_d e por consequência começa a ser usada a potência fornecida pela rede para alimentar a carga e aumentar o nível de tensão do link CC de volta à referência. Nota-se que a ação deste controle é bem rápida, voltando a níveis normais em menos de 100 ms. Afere-se ainda que não há mudança na potência reativa e na corrente I_q pois o fluxo de potência ativa e o nível de tensão no link CC, depende somente da corrente I_d .

Para o teste de controle da corrente I_d e por consequência da potência reativa, desativa-

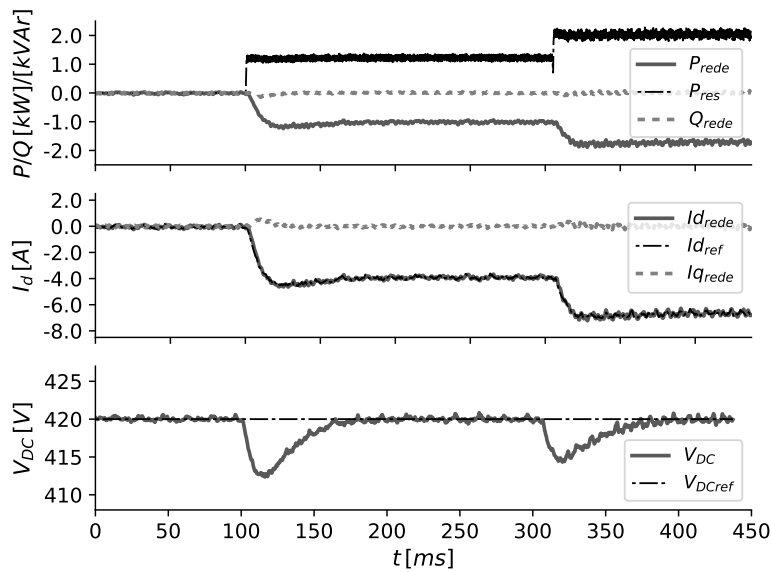


Figura 39 – Teste do controle de tensão do link CC através de ativação do *chopper*.

Fonte: Retirado de (ROCHA, 2021)

se o *chopper* e se troca diretamente o referencial de potência reativa da rede. O resultado pode ser visto na Figura 40.

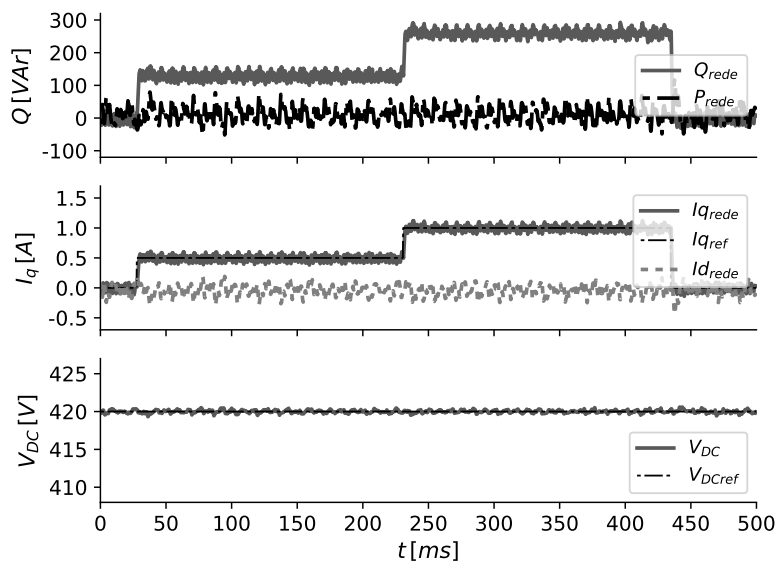


Figura 40 – Teste do controle de reativos através de mudanças no referencial de corrente I_q .

Fonte: Retirado de (ROCHA, 2021).

São dados 2 degraus na corrente I_q , que respondem rapidamente a esse comando, podendo ser visto no gráfico da Figura 40 que ao se mudar o valor de referência da

corrente I_q ocorre um aumento direto na potência reativa. Contudo, para as aplicações futuras da bancada, essa referência será mantida em 0, visto que esse fluxo de potência reativa para a rede é usado geralmente para suporte de reativos e esse não é o objetivo atual deste trabalho. Também pode-se perceber que este aumento não leva a mudanças significativas na tensão do link CC, pois este está relacionado ao fluxo de potência ativa do sistema, que é relacionado à corrente I_d .

4.3.2 Testes no lado da máquina

Após garantir que a tensão do link CC é constante, passa-se aos testes do sistema do lado do SCIG. Para tanto, os valores de PIs usados estão apresentados na Tabela 5, com $G_{ctrl,SCIG}$ sendo o controlador de corrente, $G_{ctrl,fluxo}$ o de fluxo e $G_{ctrl,\omega}$ o de velocidade.

Tabela 5 – Valores dos parâmetros dos controladores do lado do gerador embarcados no MicrolabBox[®].

PI	K_P	K_I
$G_{ctrl,SCIG}(S)$	29,416	11766,5
$G_{ctrl,fluxo}(S)$	211,43	22382
$G_{ctrl,\omega}(S)$	4,8878	-15,1446

4.3.2.1 Procedimento e resultados

O passo a passo desta parte dos ensaios requer que a tensão do link CC já esteja sendo estabelecida pelo conversor do lado da rede e seu controle esteja funcionando, pois é necessário garantir uma tensão estável e que o fluxo de potência possa ocorrer no quadrante carga e geração, podendo tanto mandar como receber potência ativa dos conversores. O conjunto de retificador e variac bifásico não permitiria trabalhar com a máquina em modo gerador por esse mesmo motivo.

Com a tensão estabelecida no link CC, é acionado a força motriz em modo velocidade para girar o eixo do gerador a uma rotação de 188,5 rad/s que chega a uma velocidade angular elétrica de 377 rad/s no estator. O conjunto força motriz + gerador permanece desconectado do conversor e, portanto, está girando em vazio e não produzindo tensão em seus terminais. Com a velocidade estabelecida e constante é acionado, a partir deste ponto, um *script*. Este começa fechando uma conexão entre o conversor e o gerador. Em seguida é estabelecida uma referência para o fluxo de potência, gerando um fluxo de potência reativa para o motor e estabelecendo a tensão nominal nos terminais da máquina e do conversor, pois o gerador está em velocidade nominal e tem estabelecido seu fluxo nominal. Isso só é possível devido ao algoritmo estimador do fluxo apresentado nos capítulos anteriores, pois não há maneira direta de medir o fluxo para isso. Esse passo

também testa o controle de fluxo usado e o controle de corrente I_d responsável por esse fluxo de potência reativa.

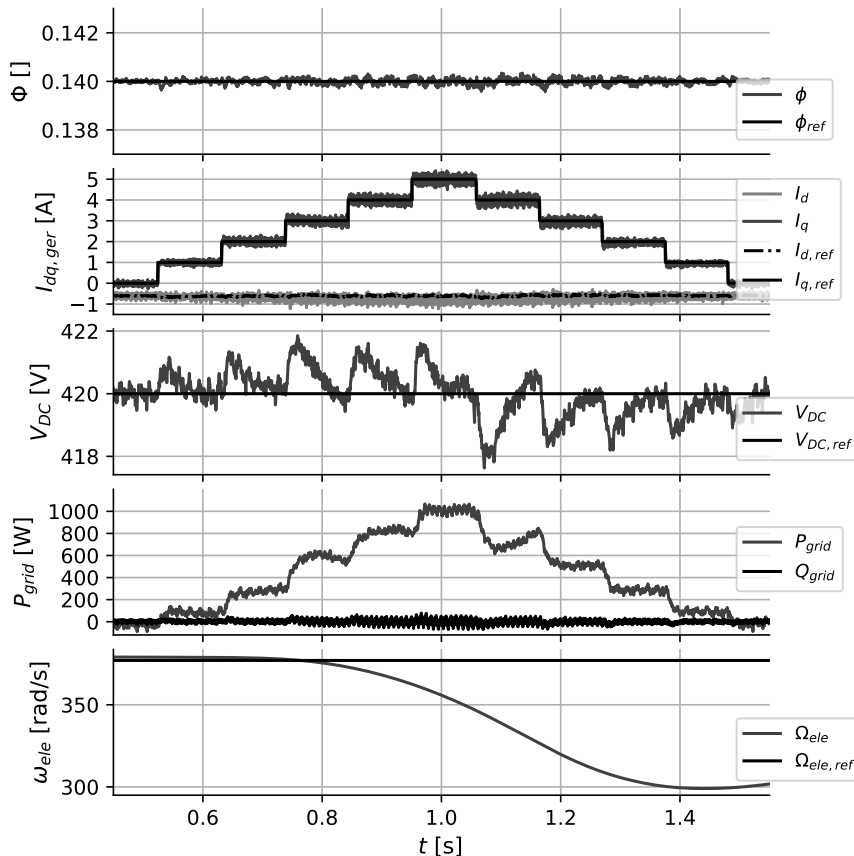


Figura 41 – Testes de controle de fluxo do gerador em conjunto com teste de controle da corrente I_q aumentada em step de 1 A.

Fonte: Retirado de (ROCHA; ANDRADE; MONARO, 2021).

Com o funcionamento normal do gerador estabelecido, pode-se testar o controle de I_q . O *script* faz um aumento gradativo na corrente e depois reduz gradativamente essa corrente a 0. Enquanto isso, a força motriz tenta manter a velocidade constante. A Figura 41 mostra os resultados deste teste.

Olhando o gráfico da Figura 41, percebe-se que o fluxo e a corrente I_d se mantêm constante nos seus respectivos valores de referência, mostrando o funcionamento do controle externo de fluxo e o controle interno da corrente I_q . Percebe-se ainda que o aumento da corrente I_d em cada passo leva a um aumento no fluxo de potência ativa. Esta potência ativa aumenta a tensão no link CC que causa o controle da tensão CC fluir essa potência para a rede reduzindo a tensão de volta para a nominal. Quando é reduzida a corrente I_q o fluxo de potência indo do gerador para o link CC diminui, levando a uma queda de

tensão nele, fazendo o controle de tensão CC reduzir a energia entregue a rede, assim restabelecendo a tensão na referência. A velocidade do conjunto se mantém constante até certo ponto, porém quando o fluxo de potência ativa aumenta mais rápido que o controle de velocidade/potência do inversor da fonte motriz consegue reagir a mudança, ou seja o controle é lento demais para reestabelecer a velocidade nominal no período do teste. Este problema é resolvido quando o controle de velocidade do conversor do lado do gerador é adicionado ao sistema.

Para o teste com o controle de velocidade, é repetido o procedimento do ensaio anterior até o funcionamento do gerador estar estabelecido, feito isso é realizada a avaliação geral do sistema. Para esse teste são inicialmente inseridos degraus de torque no eixo da máquina de forma gradativa até atingir-se o torque nominal. Durante a variação de torque da fonte motriz a referência de velocidade do controle do gerador foi mantida constante. Ao alcançar o torque nominal o valor de referência da velocidade é variada em degraus.

Este ensaio foi pensado para atestar o funcionamento de todos os componentes da bancada tanto quanto os controles e modelos usados no experimento, e seus resultados podem ser vistos na Figura 42.

Destes resultados, pode-se observar que mesmo com uma perturbação, neste caso o aumento no torque fornecido ao eixo pela fonte motriz, o controle de velocidade consegue de maneira rápida retornar ao valor de referência. Como consequência do aumento do torque, constata-se a mudança da potência transferida pelo conversor para o elo CC. Isso pode ser visto com o aumento da corrente I_q do lado do gerador. Constata-se também que o controle do conversor do lado da rede esta funcionando adequadamente, pois a tensão do elo CC quase não se altera durante o processo, mas podemos ver um aumento da potência ativa entregue à rede com cada aumento no valor de torque. O controle de campo mantém o fluxo magnético da máquina constante durante todo o experimento. Também é observado a ação de controle ao mudar a referência de velocidade e a mudança de torque em diferentes velocidades, onde essa ação ocorre de forma esperada e rápida, assim validando o controle geral na bancada de testes neste tipo de modelagem e topologia.

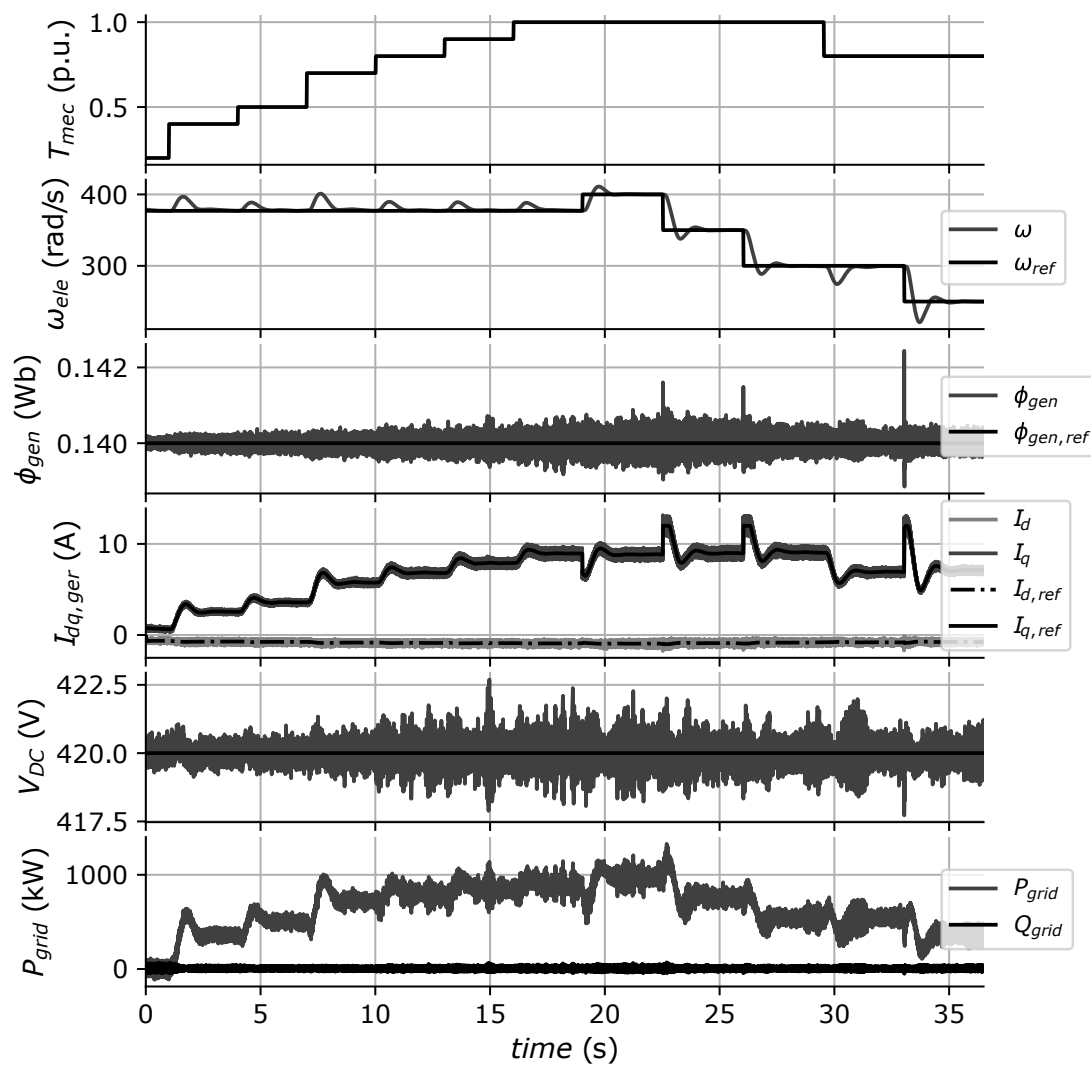


Figura 42 – Testes de controle de velocidade.

Fonte: Retirado de (ROCHA; ANDRADE; MONARO, 2021).

Proteção de geradores de velocidade variável

Todos os elementos que compõem um sistema elétrico estão sujeitos a falhas ou a serem danificados devido a defeitos dos componentes, falta de manutenção, interferências externas, dentre outras causas. Esses defeitos podem causar problemas para o componente em si ou até mesmo para o sistema que está conectado à ele, tornando uma necessidade o uso de sistemas de proteção. Estes que, além de proteger os componentes mais importantes do sistema, ajudam a isolar a região com problemas, e verificar qual foi o tipo de falha que aconteceu de acordo com as proteções ativas, acelerando o processo de identificação do problema e correção do mesmo.

Considerando o Sistema Interligado Nacional (SIN), a maioria dos geradores eólicos utiliza geradores de velocidade variável. Porém, por parte de diretrizes para implementação de proteção, até poucos anos atrás não se fazia distinção entre os geradores de velocidade variável e os de velocidade fixa, utilizados em grandes centrais hidrelétricas, não possuindo diretrizes próprias para este tipo de sistema (Operador Nacional do Sistema, 2007), mesmo possuindo diferenças significativas entre eles. Isto se deve a falta de estudos de proteção especificamente para este tipo de sistema e a grande variedade de algoritmos de controle implementados que diferem de fabricante para fabricante, como pode ser notado quando a ONS fala que os requisitos de proteção deste tipo de gerador deve seguir as recomendações do fabricante ao invés de definir diretrizes específicas para o tipo de sistema (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA(ONS, 2017).

Tendo em conta as particularidades de cada sistema de controle, cada fabricante pode ter diferentes estratégias para a proteção dos seus geradores. Isso ocorre devido à influência do comportamento de um mesmo sistema com diferentes estratégias de controle implementadas por cada fabricante (HINGORANI; GINN; SULLIVAN, 2010).

5.1 Breve Resumo Bibliográfico

O guia C37.102-2006 (IEEE, 2007) fornece diversas diretrizes consolidadas de proteção de geradores de energia de corrente alternada como base, com a maioria do conteúdo apresentado tendo como foco topologias com geradores de velocidade fixa, não apresentando soluções para topologias de geradores de velocidade variável e os componentes auxiliares necessários nesses tipos de montagem.

Em Torres et al. (2014) são analisadas as considerações especiais que se devem tomar quanto às proteções de motores de velocidade variável quando utilizados relés convencionais. Neste trabalho é mostrado que a velocidade variável, a presença maior de harmônicos, a faixa de velocidade, os modos de ligação da máquina, entre outros problemas, dificultam a utilização de relés convencionais para motor fixo nesta topologia. Ao final conclui-se que é necessário considerar essas particularidades quando é ajustada cada uma das funções de proteção a ser instalada se forem utilizados relés convencionais.

Um método inovador para utilizar os dispositivos de proteção específicos para o rotor em um motor de indução duplamente alimentado de velocidade variável com inversores de frequência pode ser visto em An et al. (2014). Este trabalho visa suprir as necessidades especiais que surgem no lado do rotor ao utilizar esse tipo de arranjo, como a mudança dinâmica na frequência no rotor, sua baixa frequência variando no arranjo estudado entre 0,1 Hz até 6 Hz e os efeitos da modulação de tensão causados pelos inversores de potência.

Pode ser visto em Ernst (2015) uma análise de arranjos tradicionais de proteção usados em motores de velocidade fixas quando usado nas topologias com motores em conjunto com conversores de frequência e apresenta algumas alternativas dentro das opções mais normalmente usadas para adaptar as particularidades dos motores de velocidade variável com os arranjos estudados.

No trabalho de D'Aversa, Hughes e Patel (2013) são discutidos os desafios que surgem na utilização de conversores para o ajuste de velocidade dos motores. O trabalho aborda as dificuldades e problemas quando são utilizados equipamentos de proteção sem configurações específicas para esse tipo de topologia. Cita-se como limitante a introdução de harmônicos pelos conversores.

Gardell et al. (2014) faz um estudo com motores de velocidade variável que utilizam conversores. Neste são apresentadas configurações recorrentes desta topologia, e dadas recomendações para a proteção deste tipo de configuração. É proposta a utilização de 3 zonas, separando a região onde os conversores estão ligados a rede (zona 1), a região dos conversores e de tensão CC (zona 2) e a região onde os conversores são conectados ao motor (zona 3). Adicionalmente são descritas as proteções recomendadas a se implementar em cada zona para garantir a proteção da topologia considerando as características únicas trazidas pela inclusão dos conversores. Em particular, as proteções da zona 2 demandam um cuidado especial por ser preciso a inclusão de proteções específicas para o tipo de conversor em uso.

5.2 Proteções e faltas externas - Simulação

Nas simulações computacionais feitas no Simulink[®] do MATLAB[®], foram inseridas algumas técnicas de proteção típicas no sistema. Este sistema foi dividido em 3 zonas para a aplicação destas proteções. A primeira zona é composta pela rede em si e todos os componentes do sistema até antes dos conversores. A zona 2 é constituída pelos 2 conversores e o link CC que os conecta e a zona 3 sendo composta por todos os componentes após o segundo conversor até o gerador.

Para a zona 1 foram implementadas as funções de proteção sobrecorrente (funções 50 e 51); fluxo reverso (função 32); sobretensão (função 59); subtensão (função 27); detecção de presença de sequência negativa(função 46) e zero(função 50N e 51N) e detecção de sobrecorrente no terra (função 50G e 51G), na zona 2 as proteções de subtensão (27) e sobretensão (função 59) foram as únicas implementadas. Na zona 3 foram implementadas as mesmas proteções da zona 1 com a adição da função de sobrevelocidade (função 12). A Figura 43 abaixo demonstra o esquema utilizado.

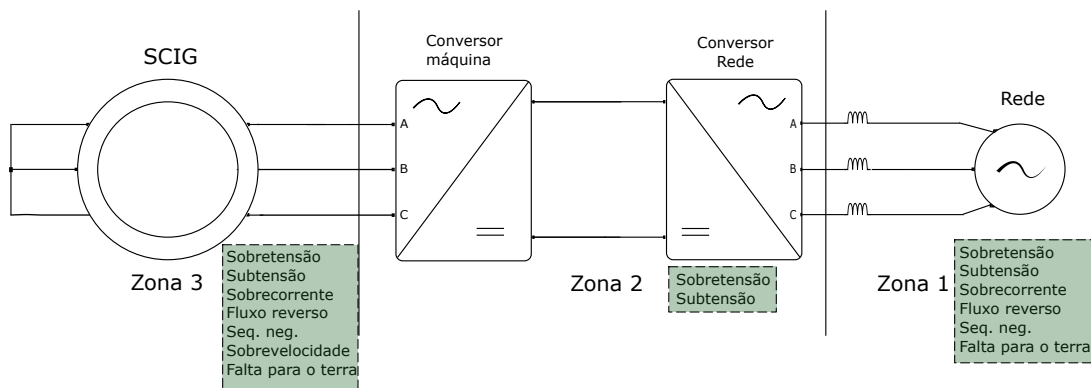


Figura 43 – Sistema estudado dividido em zonas, identificando as proteções utilizadas durante a simulação.

Fonte: Adaptado do (IEEE Standards Association, 2016).

5.2.1 Simulação de faltas

Para a simulação de faltas fixou-se 4 pontos de falta no sistema. Estes pontos foram escolhidos para explorar como a posição das faltas perante os elementos de medição e, portanto, como o sistema de controle enxerga essa falta. A Figura 44 mostra os locais onde serão colocadas as faltas em relação aos demais elementos do sistema.

A faltas realizadas são a fase-terra e a trifásica, para essas faltas as funções de proteção tiveram seus valores de disparo mostrados na Tabela 6.

Foram escolhidos 2 pares de casos onde em uma mesma zona ocorreu a mesma falta, porém uma das faltas foi à esquerda do medidor da zona (medidor de rede no ponto A para a zona 3 ou medidor do gerador no ponto C para a zona 1) e outra à direita do

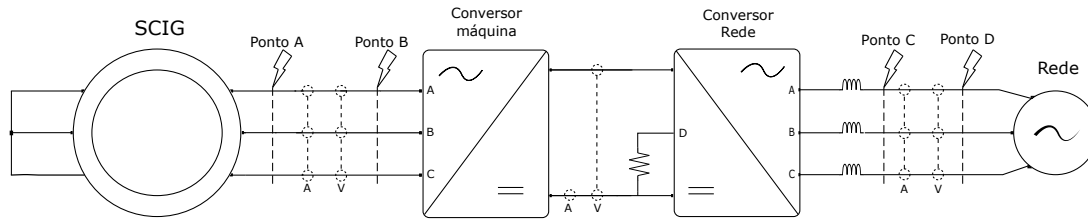


Figura 44 – Modelo simplificado do sistema indicando pontos de falta e local dos medidores.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Valores dos disparos para as proteções usadas

Faltas	Valores de disparo
Sobretensão	$V_{sobretensão} > 1,25 \times V_{nom}$
Subtensão	$V_{subtensão} > 0,75 \times V_{nom}$
Sobrecorrente	$I_{sobrecorrente} > 1,25 \times I_{nom}$
Fluxo reverso	$P_{reverso} > 0$
Seq. Negativa	$I_{seq.neg} > 0,05 \times I_{nom}$
Sobretensão CC	$V_{CCsobretensão} > 1,2 \times V_{CCnom}$
Sobrevelocidade	$\omega_{sobrevelocidade} > 1,3 \times \omega_{nom}$

medidor da zona (medidor de rede no ponto B para a zona 3 ou medidor do gerador no ponto D para a zona 1), trocando como o controle vê essa falta. Pode-se assim realizar uma análise da influência do controle na reação do sistema à falta.

Iniciou-se a análise com a zona 3, ou seja, as faltas no lado do gerador. Foi verificado como esse par de faltas se difere um do outro e a influência de uma falta nessa zona quanto as outras zonas do sistema. A falta ocorre no instante 0,6 s da simulação. Os gráficos das Figuras 45, 46, 47 e 48 mostram os resultados da simulação para essas faltas.

Analisando as Figuras 45 e 46 é perceptível uma reação do controle nas tensões e correntes do sistema. Para o caso da tensão, a mudança na direção do fluxo de potência em uma das fases além da perda de equilíbrio causam falhas no algoritmo de controle, como, por exemplo, a corrente de controle I_q tem uma queda inicial do seu valor de operação de aproximadamente -6 A para o torque imposto nele para um valor de quase 3 A, porém como o gerador não transfere toda a potência recebida pelo seu eixo, a sua velocidade começa a aumentar acima do referencial estabelecido. Este aumento de velocidade leva ao aumento da corrente I_q de referência. A redução da potência convertida pelo gerador é visível nos 2 primeiros gráficos da Figura 53, onde a média da potência de saída de potência do gerador é de aproximadamente 500 W, quando antes era perto de 1600 W. Outro fator a se considerar são as distorções na tensão e na corrente que o controle faz devido à falta, ainda mais quando considerada a posição da mesma. Essas distorções causam problemas na tensão do link CC e o fluxo de potência pelo terra muda a corrente

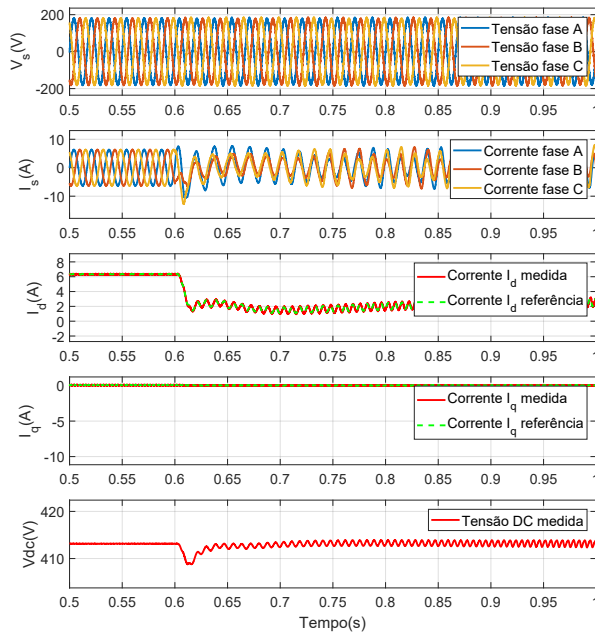


Figura 45 – Resposta do lado da rede à falta fase terra no Ponto A - Zona 3

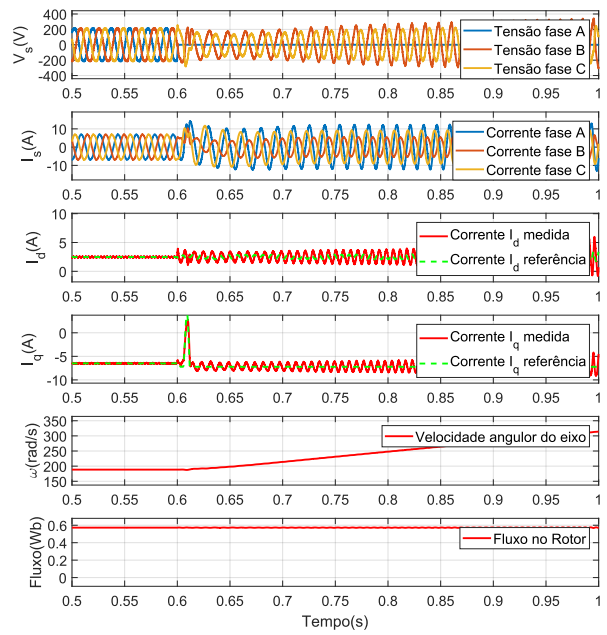


Figura 46 – Resposta do lado do gerador à falta fase terra no Ponto A - Zona 3

Fonte: Elaborado pelo autor.

que vem da rede.

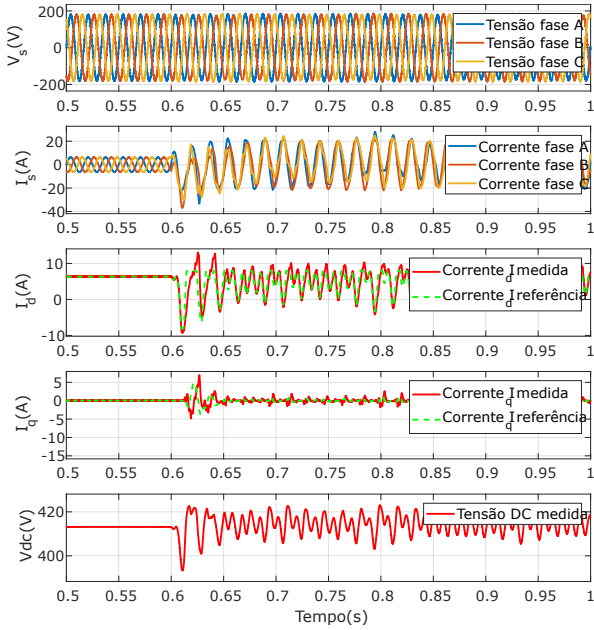


Figura 47 – Resposta do lado da rede à falta fase terra no Ponto B - Zona 3.

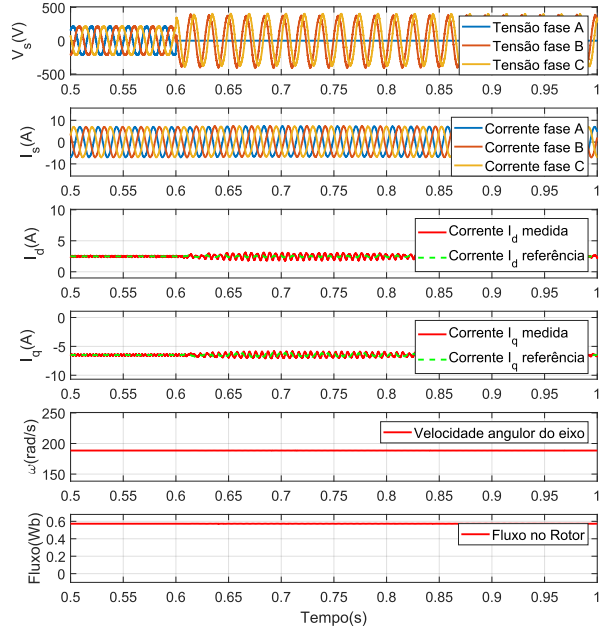


Figura 48 – Resposta do lado do gerador à falta fase terra no Ponto B - Zona 3.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o ponto B tem-se uma reação “menos agressiva” do controle. Como o fluxo de potência e a direção das correntes do lado do gerador permanece a mesma que o funcionamento normal, o controle consegue manter o fluxo de potência neste lado do sistema, mantendo a velocidade do gerador sob controle. Presume-se que a ausência da fase A e a diferença da chegada de potência no conversor devido à falta sejam as causas da mudança na tensão do link CC.

A Figura 53 mostra que a potência entregue pelo gerador se manteve quase constante durante a falta, e a média da potência entregue à rede se manteve perto do valor anterior de 1600 W. As oscilações nela seguem quase que perfeitamente as oscilações da tensão do link CC.

A diferença de comportamento do sistema quanto a posição da falta, mesmo quando esta ocorre em uma mesma zona, é evidente nesta comparação. As formas de tensão e corrente, bem como a potência entregue, são bem distintas umas das outras, até mesmo o comportamento do gerador difere, apresentando problemas de sobrevelocidade em um caso enquanto mantém um funcionamento normal no outro.

O próximo teste é feito no par de pontos da zona 1, ou seja, no lado da rede. A falta também ocorre no instante 0,6 s nestes casos. Os gráficos das Figuras 49, 50, e 51 e 52 apresentam os resultados para as faltas nos pontos C e D.

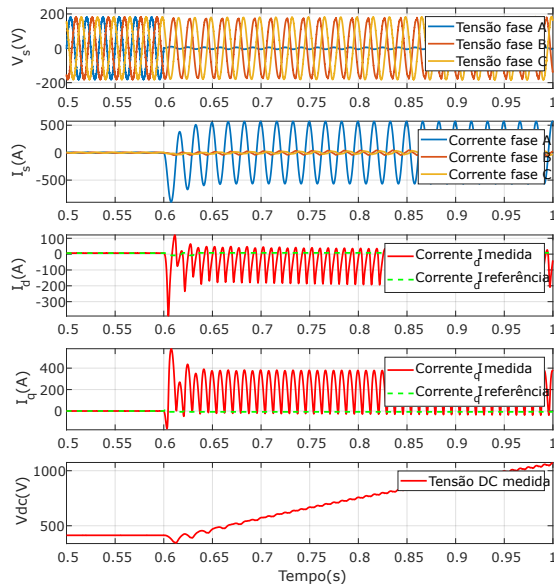


Figura 49 – Resposta do lado da rede à falta fase terra no Ponto C - Zona 1.

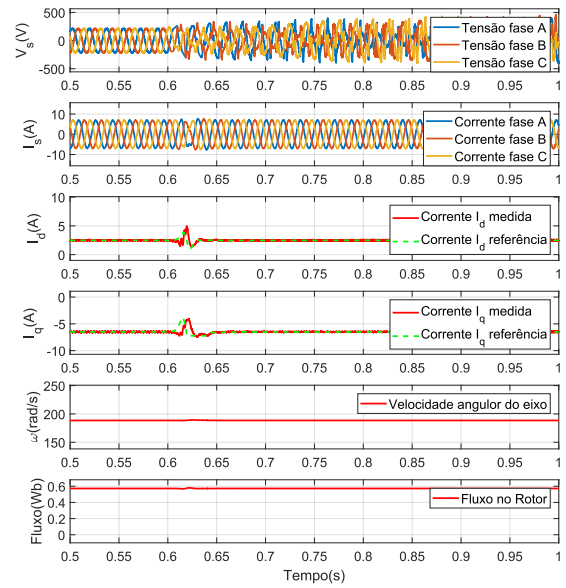


Figura 50 – Resposta do lado do gerador à falta fase terra no Ponto C - Zona 1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a falta no ponto C percebe-se a corrente de rede em valores muito acima dos valores de referência dos controladores, mostrando uma perda deste controle nesta falta. Outro indicativo desta ocorrência é a tensão no link CC aumentando quase que linearmente com o tempo, indicando que grande parte da potência entregue pelo lado do gerador não está sendo entregue para a rede e sim sendo usada para aumentar a tensão no link CC. Este aumento na tensão do link CC interfere diretamente no funcionamento do lado do gerador, como pode ser observado com a tensão crescente e distorcida presente no SCIG. As correntes no lado da rede estão todas bem acima do valor nominal, mas a corrente de falta está quase 50x maior que em funcionamento normal. Na Figura 53 nota-se que a potência entregue para a rede tem seu fluxo totalmente revertido, e não é mais mantido no valor de referência anterior de 1600 W, mas sim em um valor oscilante e decrescente. Com isso, percebe-se que o controle, devido a motivos semelhantes ao visto no ponto A, não consegue atuar como esperado.

Diferente do anterior, na falta no ponto D os parâmetros se comportam de maneira muito menos agressiva. É possível que a grande corrente de falta não esteja sendo vista pelos medidores, visto que ela vai ser alimentada em sua maioria pela rede, implementada como um barramento forte, assim o controle sofre muito menos com a influência desta, além de não apresentar problemas com o fluxo de corrente, pois, para o mesmo, a corrente continua na mesma direção que estava antes da falta. O controle ainda distorce bastante as correntes neste caso devido à perda de uma das tensões e ao desequilíbrio consequentemente causado. Em decorrência, parte da potência que deveria ser entregue a rede acaba ficando no link CC, aumentando a tensão nele. Porém, como o controle ainda consegue

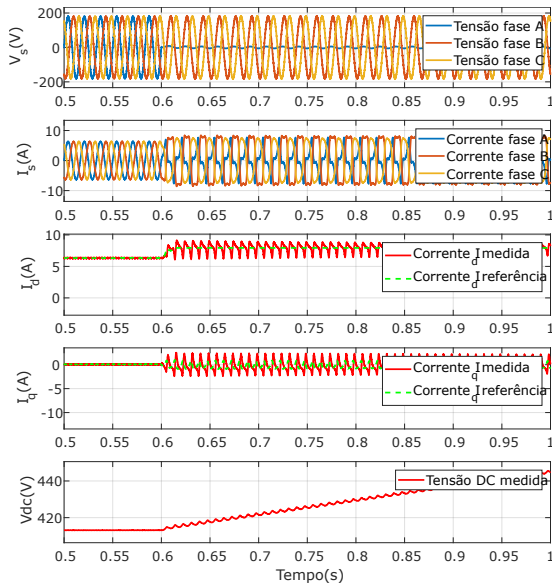


Figura 51 – Resposta do lado da rede à falta fase terra no Ponto D - Zona 1.

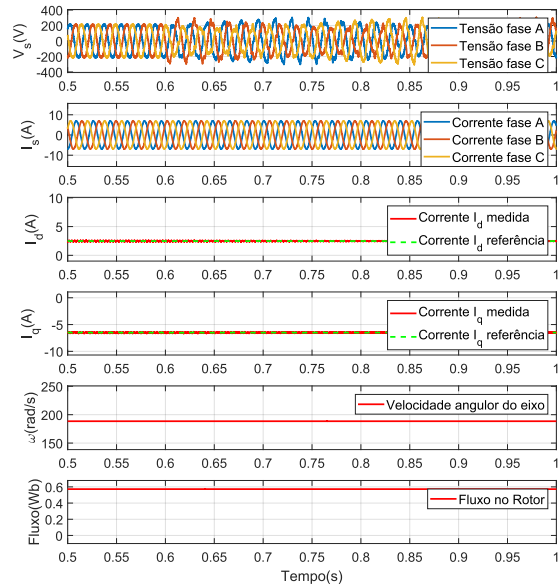


Figura 52 – Resposta do lado do gerador à falta fase terra no Ponto D - Zona 1.

Fonte: Elaborado pelo autor.

passar grande parte da potência, o aumento na tensão do link CC é menos acentuado comparado ao caso anterior. Para o lado da rede, salvo a distorção na tensão causada pelo aumento na tensão do lado CC, o comportamento do sistema permanece o mesmo, não apresentando alteração na potência entregue para a rede até o final desta simulação.

A Tabela 7 mostra qual foi o tempo de ativação dos algoritmos implementados. Excetuando-se a sobretensão no link CC que é uma falta na zona 2 e a sobrevelocidade que é exclusiva do gerador, o remanescente foi separado na tabela entre a rede e o SCIG.

É perceptível, olhando para a Tabela 7, que alguns tempos de ativação são semelhantes, com valores entre 7 e 13 ms, sendo possível inferir que eles estejam ligados ao tempo de cálculo de alguns blocos no MATLAB[®], como os valores RMS usados nas sobretensões AC, sobrecorrentes AC e subtensões AC, que devem ser por volta de 7 ms ao se avaliar a menor ativação destes casos. Noutros casos, é observado um atraso grande entre a falta e a ativação de alguma proteção, como é a condição de sobrevelocidade no ponto B, por exemplo, onde a energia acumulada no gerador por conta da falta faz a velocidade crescer linearmente. O tempo relativamente alto para se ter esse aumento da velocidade tem como possível origem a inércia do motor, que precisaria de uma energia muito maior que a presente para apresentar um aumento suficientemente rápido para uma detecção quase instantânea da ocorrência da falta. Outro caso onde é verificada essa limitação na energia entregue discernir os tempos de falta é na diferença de aumento de tensão do link CC no ponto C e D. Enquanto um deles recebe energia rápido o suficiente para aumentar sua tensão a níveis de detecção de falta em poucos milissegundos, o outro ainda não foi

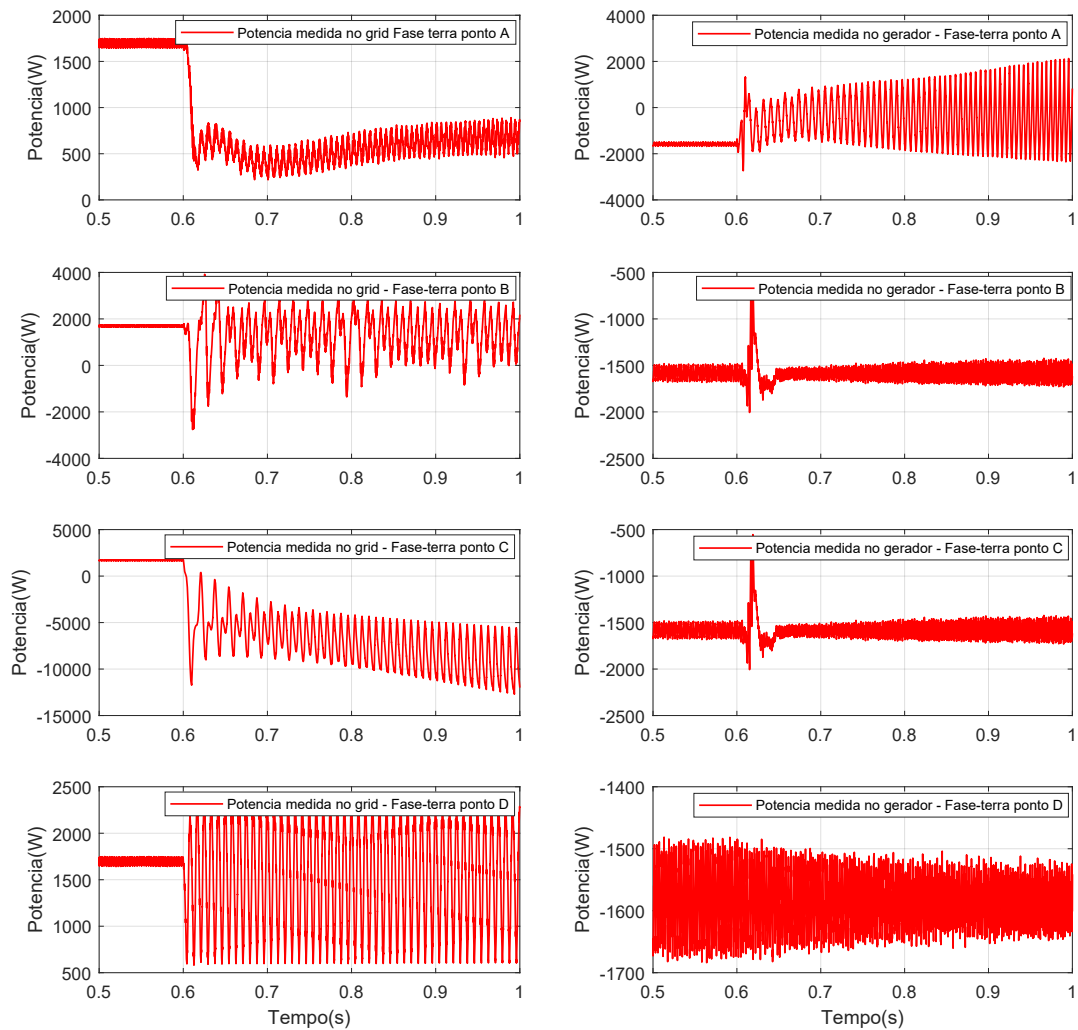


Figura 53 – Potência do sistema durante falta fase terra - gráficos a esquerda são referentes a rede e gráficos a direita ao gerador, são eles de cima pra baixo no ponto A, B, C e D.

Fonte: Elaborado pelo autor.

ativado durante a simulação.

A diferença que o controle exerce sobre os resultados quanto a posição da falta também fica evidente na Tabela 7. Os tempos de disparo são alterados, e se a fase em falta parece dentro dos padrões normais, obedecendo aos limites estabelecidos na Tabela 6, para o algoritmo de proteção também muda com a posição da falta.

No Anexo A são apresentados os gráficos referentes a falta trifásica para uma comparação visual quanto à falta fase terra apresentada neste capítulo.

Tabela 7 – Tempo de ativações dos gatilhos de proteção implementados

Faltas		Tempo de resposta do algoritmo de proteção (ms)							
		Ponto A		Ponto B		Ponto C		Ponto D	
		Rede	Gerador	Rede	Gerador	Rede	Gerador	Rede	Gerador
Sobretensão	A	-	-	-	-	-	-	-	-
	B	-	280	-	7	-	44	-	-
	C	-	280	-	7	-	217	-	-
Subtensão	A	-	13	-	13	9	-	9	-
	B	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	-	-	-	-	-	-	-	-
Sobrecorrente	A	9	9	9	-	2	-	3	-
	B	-	-	9	-	6	-	7	-
	C	11	11	9	-	7	-	6	-
Seq. Negativa		13	13	13	-	1	24	3	-
Fluxo reverso		-	10	-	-	3	-	-	-
Sobretensão CC		-		-		60		-	
Sobrevelocidade		200		-		-		-	

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Proteções e faltas internas - Bancada

As análises realizadas com o conjunto de proteções listadas acima indicaram que nenhuma das proteções discutidas nas seções anteriores é sensibilizada no caso das faltas internas realizadas experimentalmente.

Para a bancada de testes, foram implementados somente os algoritmos das proteções de sobretensão no link CC e de sobrevelocidade no eixo do gerador. Essas duas proteções em específico foram escolhidas devido à sensibilidade dos capacitores do link CC ao nível de tensão e a das pólias à velocidade do eixo do motor. Essas proteções procuram garantir a integridade dos equipamentos da bancada e a segurança dos operadores. Quando alguma destas faltas é detectada, o processo é interrompido mantendo a integridade do sistema.

5.3.1 Faltas internas

Os casos de falta interna apresentados neste capítulo foram obtidos com a máquina apresentada no Capítulo 4, onde o processo de inicialização de todo o conjunto está descrito. Nos experimentos realizados é aplicado torque nominal ao eixo e a velocidade de rotação é regulada em 1800 rpm. Foi escolhido realizar os testes em velocidade e torque constantes para melhor isolar a influência da falta nas demais grandezas analisadas nos experimentos. Outra ferramenta importante utilizada neste capítulo para a análise da influência da falta interna no funcionamento do conjunto é a Transformada de Fourier, por meio da qual pode-se observar as distorções harmônicas do sistema. O principal foco desta seção é a análise destas influências e das mudanças causadas pelas faltas.

A Figura 54 mostra as duas principais configurações usadas para realizar as faltas

internas, onde 1 é uma falta na fase A em uma de suas bobinas e 2 é uma falta realizada entre duas bobinas da fase A. Esses dois tipos de falta são possíveis devido aos enrolamentos destas bobinas da máquina estudada compartilharem ranhuras, sendo assim possível o curto-circuito destes enrolamentos entre si.

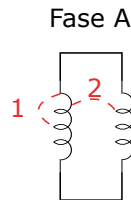


Figura 54 – Possíveis faltas a realizar nos enrolamentos da máquina.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para realizar essas faltas, foram utilizadas as derivações presentes na máquina estudada, mencionadas no Capítulo 4, como acesso aos enrolamentos internos. Isto é feito conforme o esquema apresentado na Figura 55, onde D_{xx} e D_{yy} representam essas derivações e elas estão ligadas com um amperímetro, uma chave e uma resistência R_{falt} .

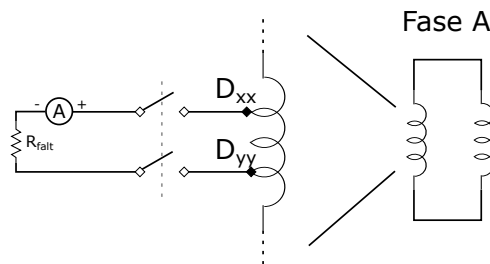


Figura 55 – Diagrama usado para realizar as faltas nos enrolamentos da máquina.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para aplicar a falta é necessário que as derivações dos enrolamentos escolhidas compartilhem a mesma ranhura. A determinação da posição da falta, a bobina em que é aplicada e a fase utilizada para os testes é realizada com o auxílio da Tabela 8. A Tabela 9 mostra quais pares de derivações pertencem às bobinas que compartilham uma mesma ranhura.

5.3.1.1 Falta entre bobinas - Fase A

Nesta sessão iremos analisar faltas internas entre bobinas na fase A utilizando as derivações D_{05} D_{08} variando a resistência R_{falt} entre aproximadamente $2,75 \Omega$ e falta franca. Outros possíveis pares de derivações onde são possíveis realizar esse tipo de falta interna podem ser vistos na Tabela 9. Essa falta é realizada a uma diferença de 12,4 % de tamanho dos enrolamentos da bobina (tirados da Tabela 8 $D_{05} = 17,83 \%$ da bobina 1 da fase A e $D_{08} = 30,23 \%$ da bobina 2 da fase A).

Tabela 8 – Tabela contendo as posições das derivações presentes na máquina.

Derivação	%	Localização	Derivação	%	Localização
D01	0,77	Fase A - Bobina 1	D02	5,04	Fase A - Bobina 2
D05	17,83	Fase A - Bobina 1	D03	9,3	Fase A - Bobina 2
D07	25,97	Fase A - Bobina 1	D06	21,7	Fase A - Bobina 2
D09	34,5	Fase A - Bobina 1	D08	30,23	Fase A - Bobina 2
D12	47,29	Fase A - Bobina 1	D10	38,76	Fase A - Bobina 2
D13	51,55	Fase A - Bobina 1	D14	55,81	Fase A - Bobina 2
D17	68,22	Fase A - Bobina 1	D15	59,69	Fase A - Bobina 2
D20	81	Fase A - Bobina 1	D18	72,48	Fase A - Bobina 2
D21	85,27	Fase A - Bobina 1	D19	76,74	Fase A - Bobina 2
D24	97,67	Fase A - Bobina 1	D22	89,53	Fase A - Bobina 2
D11	43,02	Fase B - Bobina 1	D04	13,57	Fase B - Bobina 2
D23	93,41	Fase B - Bobina 1	D16	63,95	Fase B - Bobina 2

Tabela 9 – Pares de derivações de diferentes bobinas de uma mesma fase que compartilham da mesma ranhura, possibilitando a existência de curto entre elas.

Fase-A					
Derivações		Derivações		Derivações	
D01	D10	D09	D14	D20	D06
D01	D22	D09	D15	D20	D08
D05	D06	D12	D02	D20	D18
D05	D08	D12	D03	D20	D19
D05	D18	D12	D14	D21	D02
D05	D19	D12	D15	D21	D03
D07	D06	D13	D10	D21	D14
D07	D08	D13	D22	D21	D15
D07	D18	D17	D06	D24	D02
D07	D19	D17	D08	D24	D03
D09	D02	D17	D18	D24	D14
D09	D03	D17	D19	D24	D15
Fase-B					
D11	D04	D11	D16	D23	D04
D23	D16				

Falta em D_{05} D_{08} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$

Os gráficos da Figura 56 mostram o caso de falta com resistência de $R_{fault} = 2,75 \Omega$. Nestes gráficos o valor de I_q do gerador, a corrente de falta e as tensões V_A , V_B e V_C do gerador e suas correntes I_A , I_B e I_C são apresentados.

A falta neste caso ocorre aos $T_{fault}=20,6012$ s, onde foi conectada a R_{fault} entre as derivações dos enrolamentos escolhidos. Nota-se que em I_q e na corrente de falta a uma oscilação com a frequência maior que a fundamental, percebe-se ainda que essa oscilação está presente mesmo antes de ocorrer a falha. Segundo Kindl et al. (2020) esses efeitos harmônicos são observados devido às ranhuras presentes no estator da máquina. Também é observado que a falta tem um pequeno *offset* no começo da falta devido a uma componente de decaimento de corrente contínua presente normalmente quando à falta em circuitos com indutores. Para essa derivação com esses valores de resistência a corrente de falta tem um pico de 2 A e a oscilação no módulo da harmônica presente na corrente de falta se deve provavelmente devido à posição e alinhamento das ranhuras do rotor e

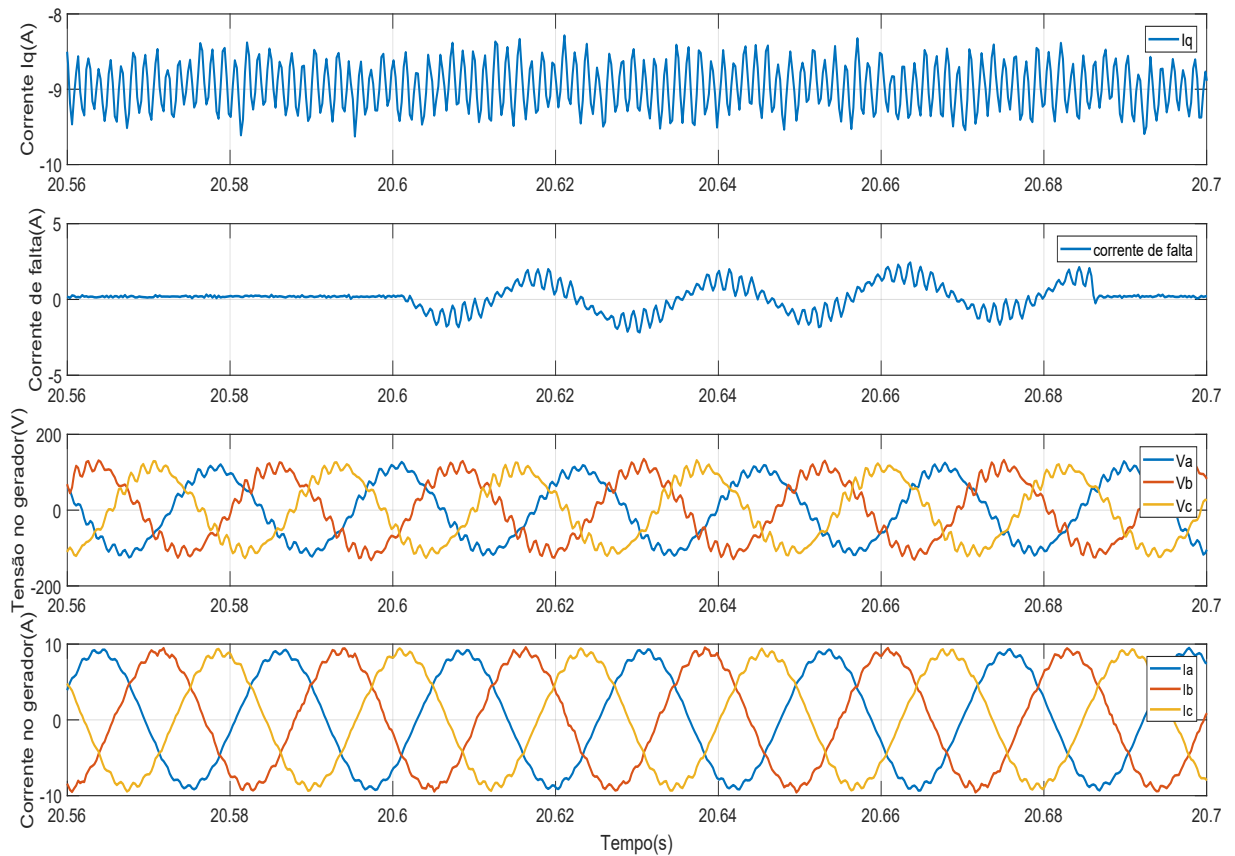


Figura 56 – Influência da falta interna nas derivações D_{05} D_{08} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$ nos parâmetros da máquina.

Fonte: Elaborado pelo autor.

estator.

A Figura 57 mostra uma sobreposição entre um trecho da tensão onde o gerador está em funcionamento normal e no instante de falta. Neste gráfico pode-se perceber que a falta realizada não altera significativamente os valores da tensão, dificultando a detecção deste tipo de falta usando esse parâmetro.

A Figura 58 mostra o espectro das magnitudes das componentes harmônicas da tensão antes e após a falta. Esse espectro foi obtido após realizar a Transformada de Fourier em 1 ciclo do sinal de tensão em funcionamento normal e 1 ciclo em funcionamento em falta. Nota-se em ambos a presença da 15^a e 17^a harmônicas com valores relevantes. Esses valores em específico devem ser consequências do número de ranhuras existente na máquina. Já a diferença entre os módulos das componentes harmônicas em funcionamento normal e em falta são pequenos, dificultando ainda mais a detecção deste tipo de falta mesmo usando ferramentas mais avançadas como a Transformada de Fourier.

A Figura 59 mostra a sobreposição da corrente em funcionamento normal e da corrente no momento de falta, obtendo resultados parecidos com as análises usando a tensão, com uma baixa divergência nas formas e valores dos sinais obtidos.

A Figura 60 mostra os módulos das componentes harmônicas das correntes em fun-

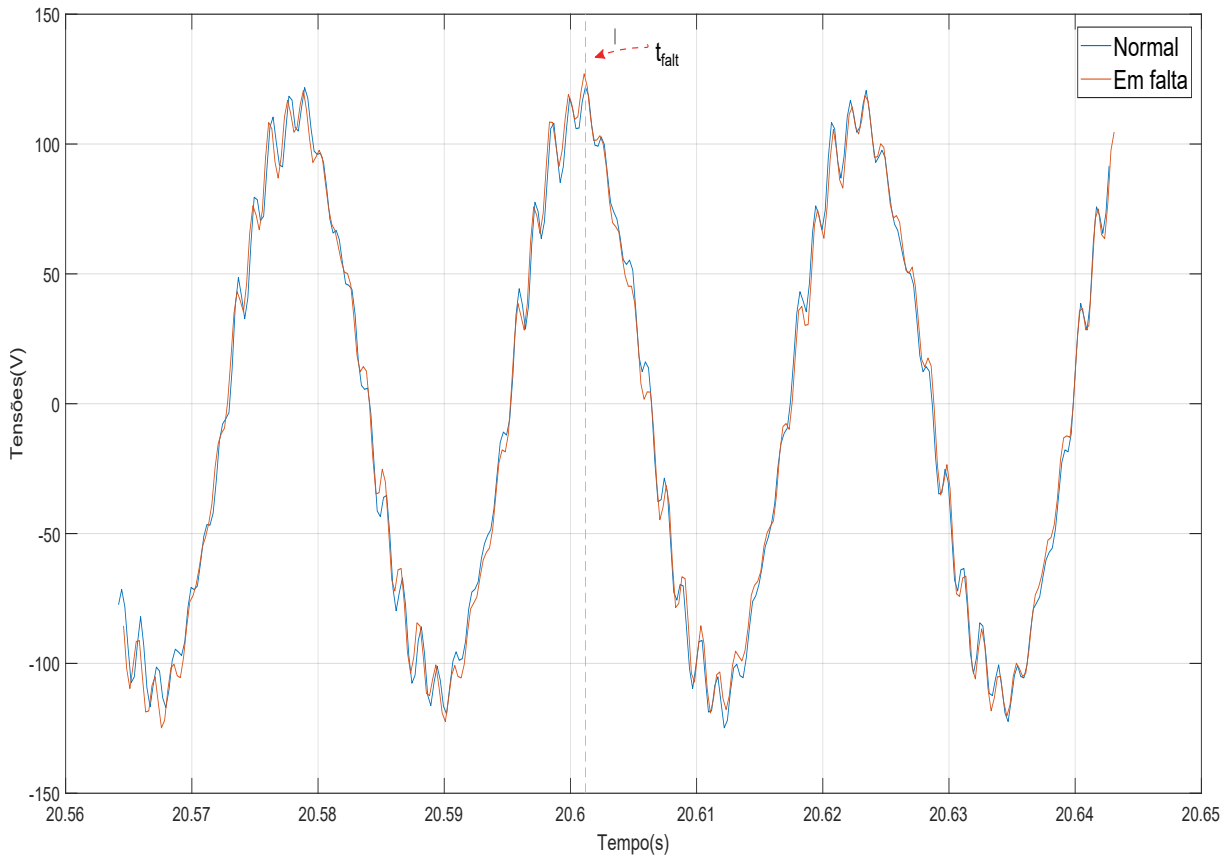


Figura 57 – Sobreposição da tensão antes da falta e durante ela, para a falta nas derivações D_{05} D_{08} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$.

Fonte: Elaborado pelo autor.

cionamento normal e em falta devido à grande diferença entre o valor do módulo da fundamental e das harmônicas medidas. O gráfico foi escalonado para mostrar melhor a influência dos harmônicos na corrente. Percebe-se novamente a presença maior de distorção entre a 15^a e 17^a harmônica com módulos chegando a quase 0,2 A. Destaca-se uma pequena diferença entre as harmônicas em falta e em funcionamento normal, mas essas diferenças nos módulos das harmônicas, para o funcionamento do conjunto e para detecção de falta, são insignificantes.

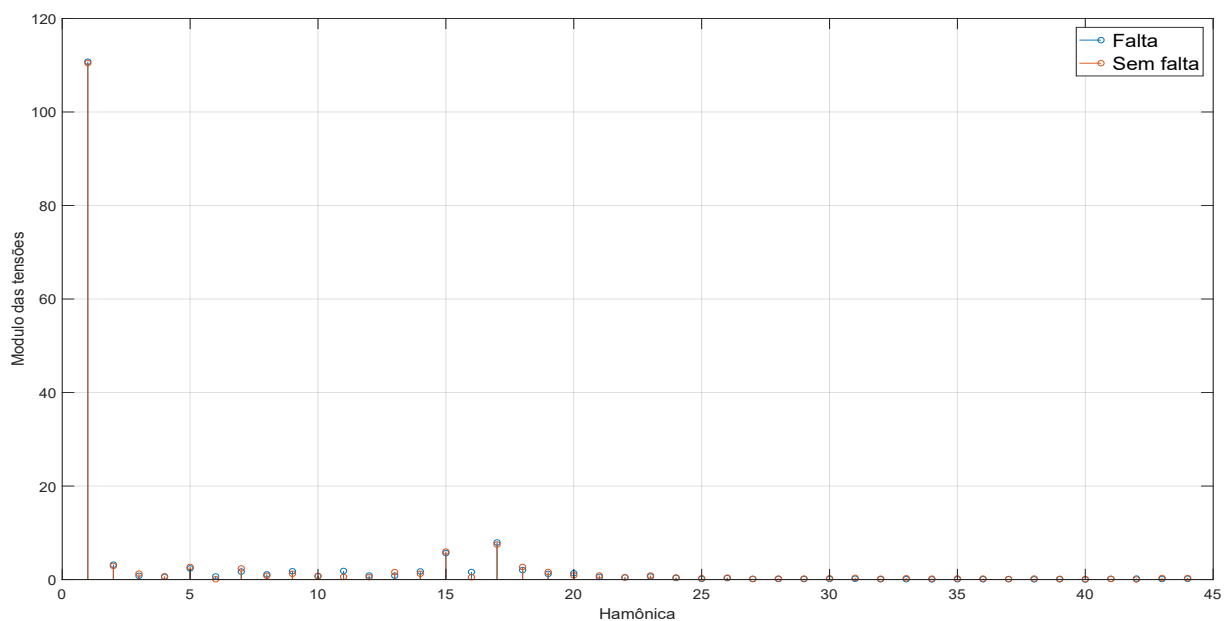
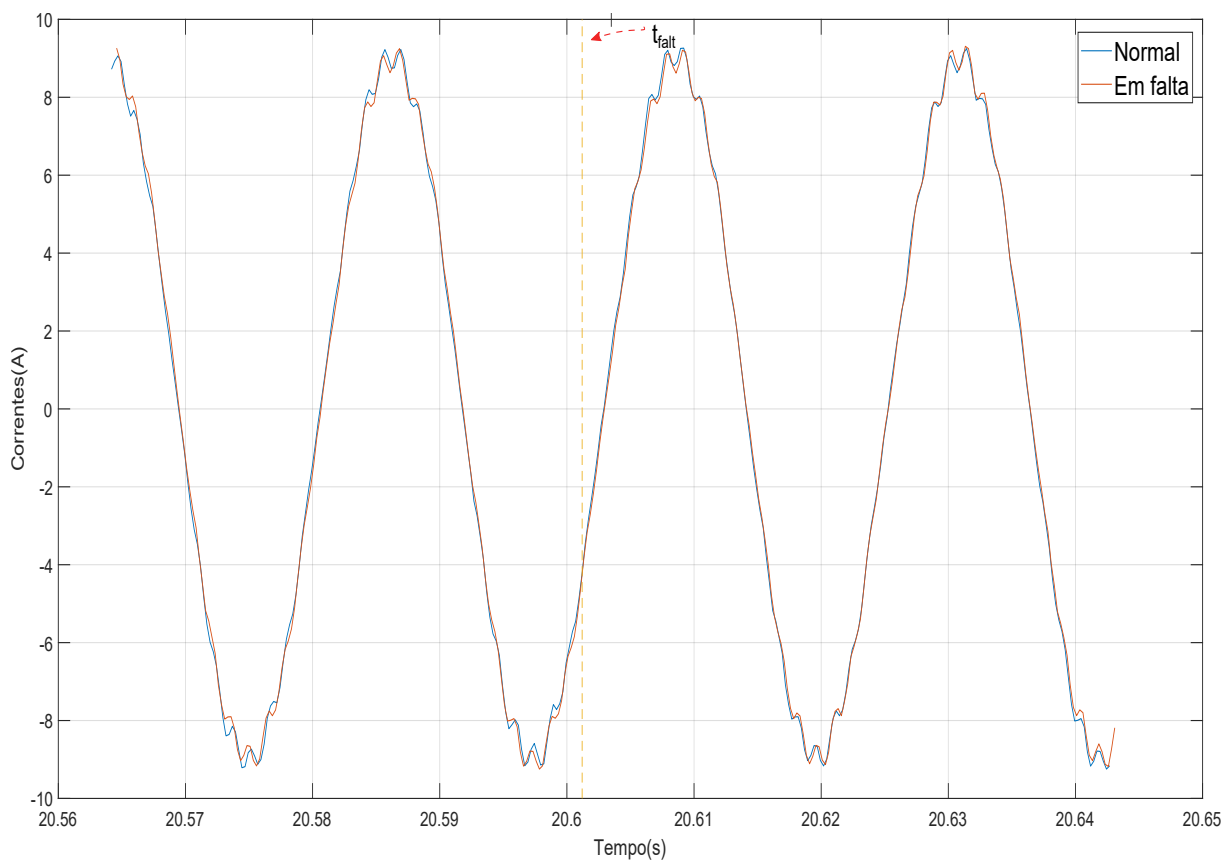


Figura 58 – Componentes harmônicas da tensão do gerador antes e durante a falta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59 – Sobreposição da corrente antes e durante a falta, para a falta nas derivações D_{05} D_{08} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$.

Fonte: Elaborado pelo autor.

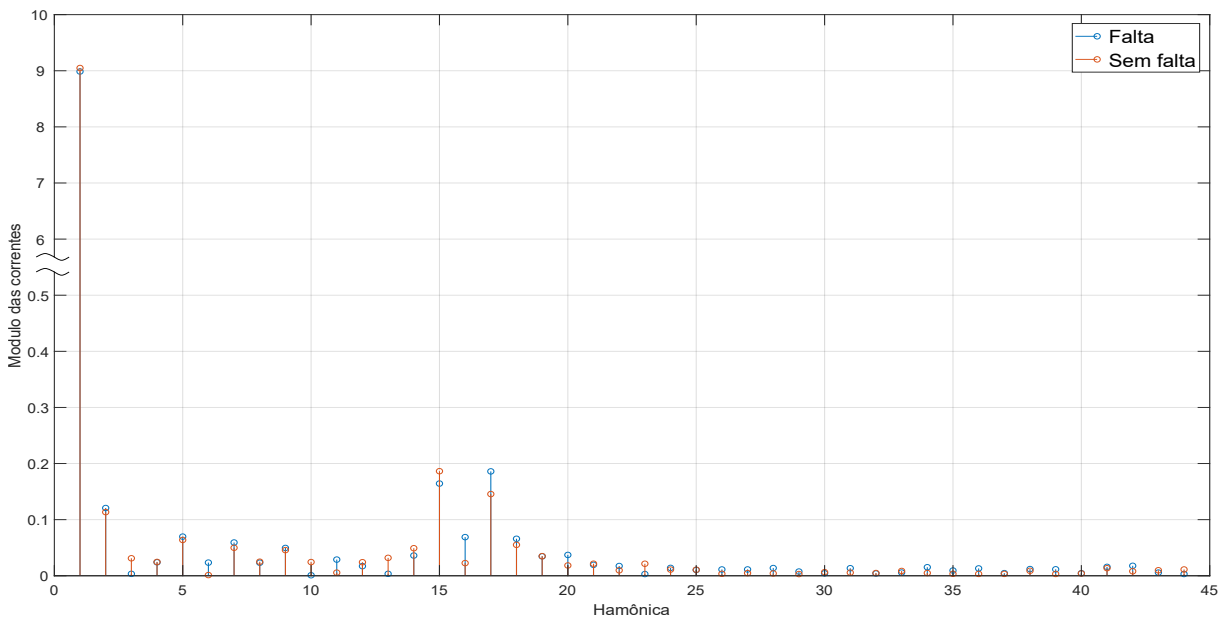


Figura 60 – Componentes harmônicas da tensão do gerador antes e durante a falta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Falta franca entre D_{05} D_{08}

O gráfico da Figura 61 mostra o comportamento do sistema quando submetido a uma falta interna franca entre os pontos D_{05} D_{08} . O gráfico apresenta a corrente de controle do gerador I_q , a corrente de falta e as tensões V_A , V_B e V_C do gerador e suas correntes I_A , I_B e I_C .

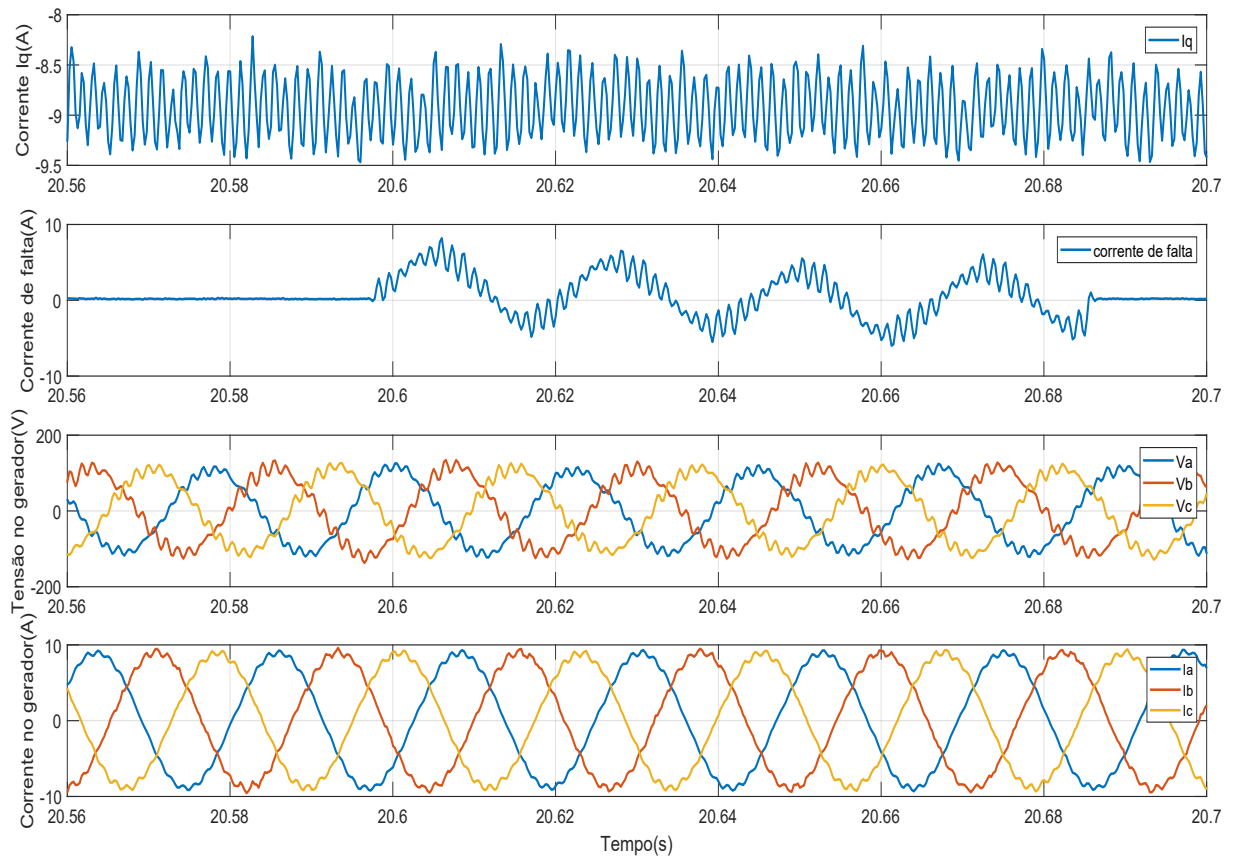


Figura 61 – Influência da falta interna nas derivações D_{05} D_{08} com falta franca nos parâmetros da máquina.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A falta acontece aos $T_{fault}=20,5971$ s onde são conectados diretamente os terminais das derivações estudadas. A mesma oscilação em I_q antes e depois da falta também é observada neste teste, tal como no teste com a resistência. Isso mostra que este não depende do tipo de falta. É mais visível neste caso a presença de um *offset* em decaimento na corrente de falta, devido a maior corrente de falta, chegando a ser até 2 A maior no primeiro ciclo (com pico de 8 A) comparado ao último ciclo após o decaimento (com pico de 6 A). É presente também uma pequena oscilação no nível de tensão do gerador que ocorre independente da falta, pois ela ocorre de maneira semelhante antes, durante e após a falta e em todas as fases, não somente na fase onde a falta ocorre, variando o pico de tensão entre 100 V e 120 V. Essas oscilações nas tensões do gerador se devem possivelmente às medidas terem sido feitas com o sistema não estando totalmente estabilizado neste caso.

A Figura 62 mostra a sobreposição da fase A da tensão do gerador em funcionamento normal e em falta. Pode-se observar a influência da oscilação citada anteriormente, pois os instantes onde são retirados essas tensões diferem. Suas maiores diferenças são em seus módulos, pois, conforme observado no gráfico, a forma da onda se mantém bastante parecida, indicando que não houve uma mudança muito alta nas componentes harmônicas além da fundamental quem compõem a tensão. Desta mesma observação pode-se concluir que a falta não alterou de forma significativa a tensão do gerador, pois a forma antes e depois da falta se mantém.

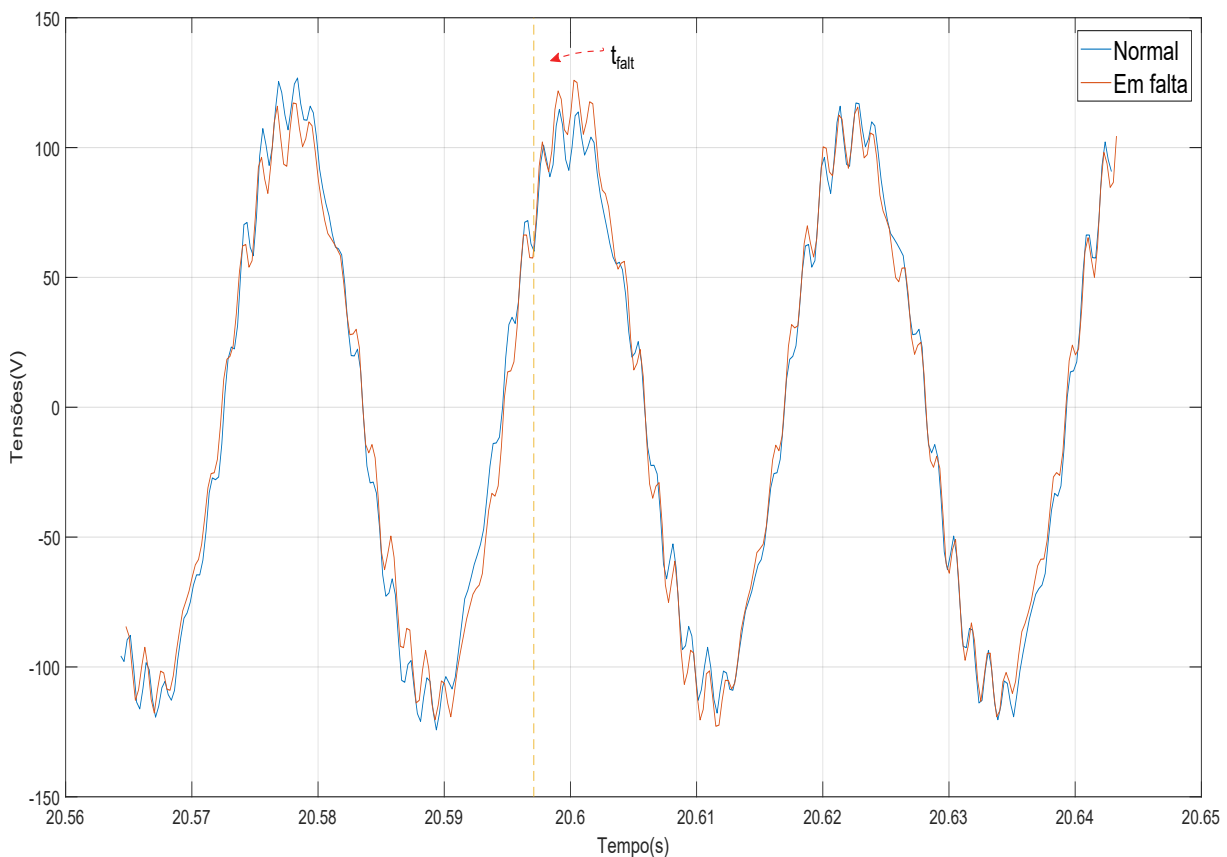


Figura 62 – Sobreposição da tensão antes da falta e durante ela, para a falta nas derivações D_{05} D_{08} com falta franca.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 63 mostra os módulos das componentes harmônicas da tensão na fase A com e sem a presença de uma falta nas derivações. Há uma contribuição das harmônicas entre 15^a e 17^a novamente, porém sem uma mudança significativa entre o espectro com e sem a falta para auxiliar em uma identificação ou detecção desta falta. Pode-se observar novamente a influência da oscilação citada anteriormente no módulo da fundamental da tensão. Como esses espectros foram obtidos em instantes diferentes, foram calculados com uma diferente contribuição desta oscilação, levando à diferença observada.

A Figura 64 mostra a sobreposição da corrente com e sem a presença da falta. Neste caso podemos ver que a oscilação observada na tensão não ocorre na corrente, pois sua

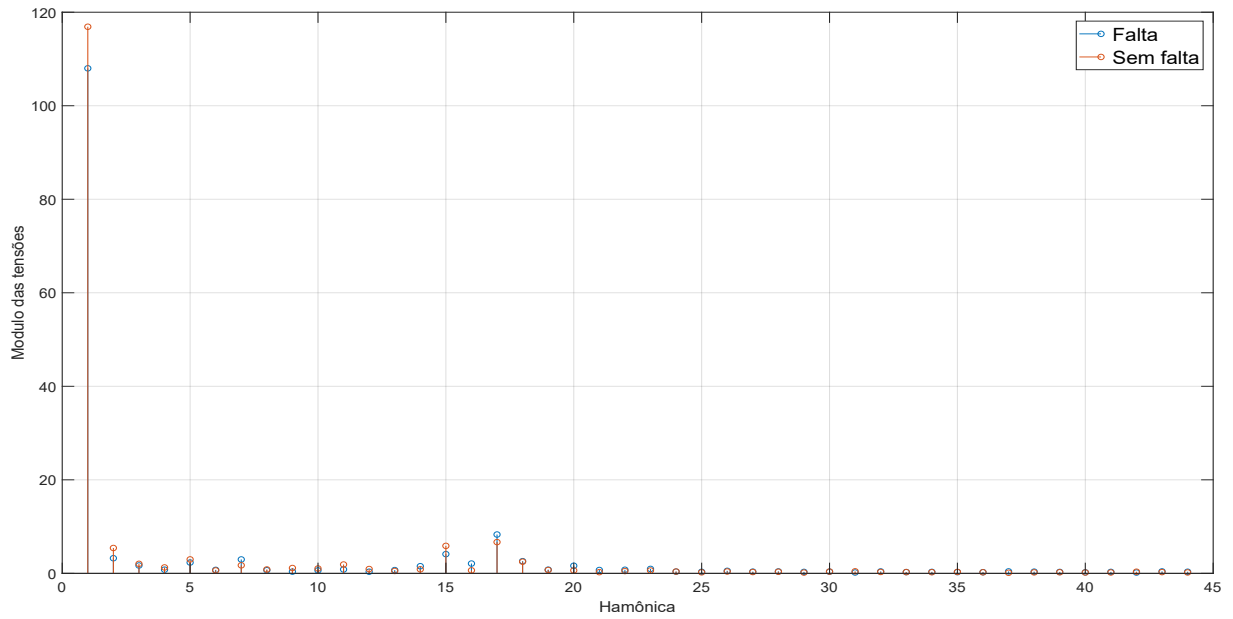


Figura 63 – Componentes harmônicas da tensão do gerador antes e durante a falta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

forma e módulo são praticamente iguais. Desta mesma análise é percebido que a falta não traz mudanças significativas na corrente.

A Figura 65 mostra o módulo das harmônicas presentes na corrente do gerador com e sem a presença da falta interna. Com o uso deste gráfico pode-se ver que a falta causou uma maior influência da 17ª harmônica e reduziu a influência da 15ª harmônica, mas as diferenças ainda são muito baixas, com um aumento de apenas 0,05 A (de 0,15 A a 0,2 A).

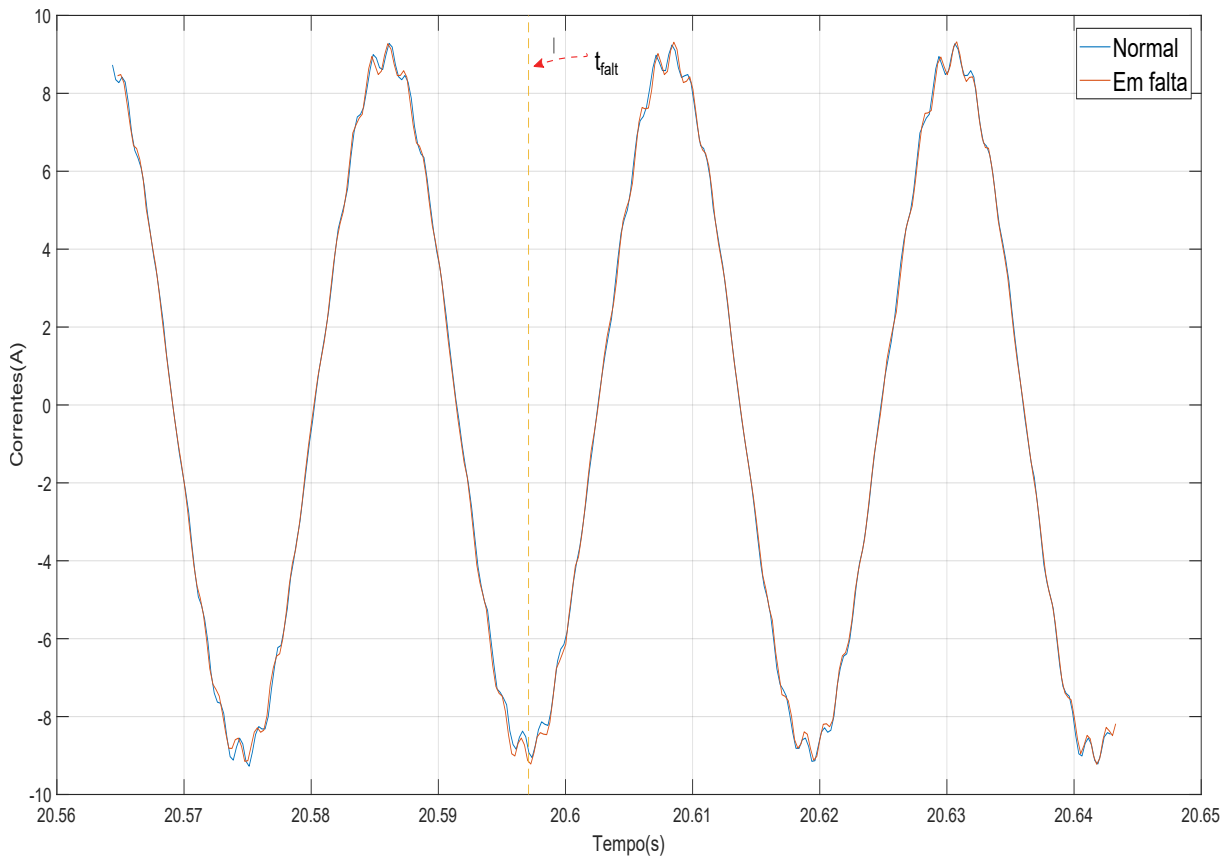


Figura 64 – Sobreposição da corrente antes da falta e durante ela, para a falta nas derivações D_{05} D_{08} com falta franca.

Fonte: Elaborado pelo autor.

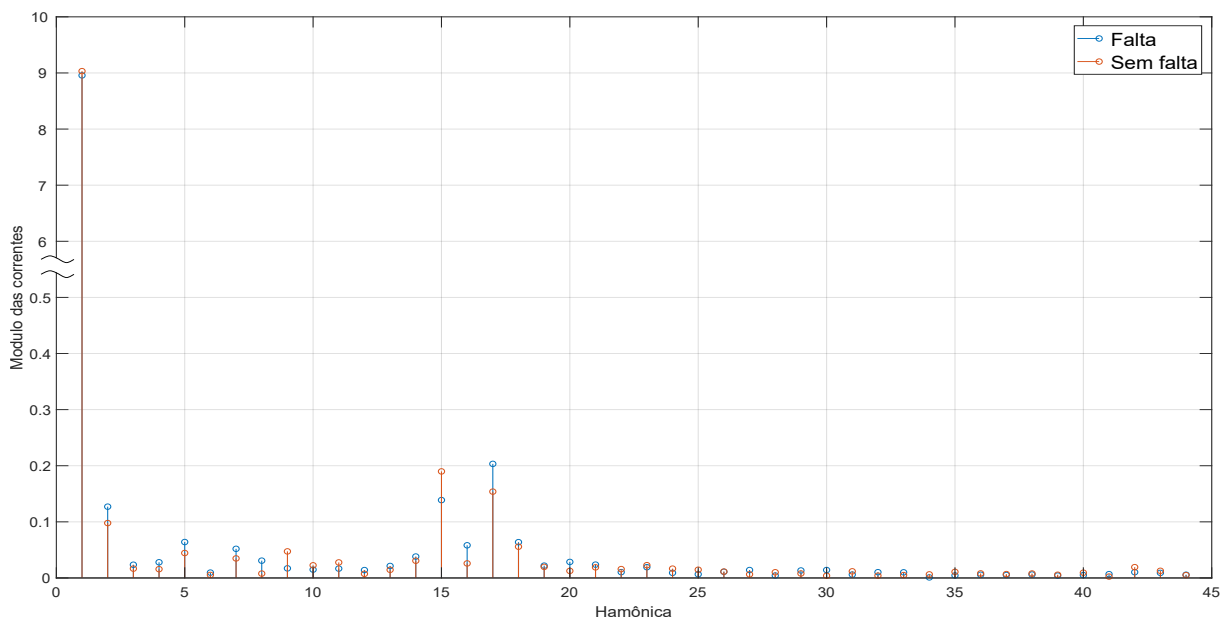


Figura 65 – Componentes harmônicas da corrente do gerador antes e durante a falta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.1.2 Falta em uma mesma bobina - Fase A

Nesta sessão são apresentadas as análises de faltas internas na bobina 2 da fase A utilizando as derivações D_{02} D_{03} variando a resistência R_{fault} entre aproximadamente $2,75 \Omega$ e 0Ω . Outros possíveis pares de derivações onde são possíveis realizar esse tipo de falta interna podem ser vistos na Tabela 10. Essa falta é realizada a uma diferença de $4,26 \%$ de tamanho dos enrolamentos da bobina.

Tabela 10 – Pares de derivações de uma mesma bobina que compartilham da mesma ranhura, possibilitando a existência de curto entre elas.

Bobina 1			
Derivações		Derivações	
D05	D07	D17	D20
D09	D12	D21	D24
Bobina 2			
Derivações		Derivações	
D02	D03	D14	D15
D06	D08	D18	D19

Falta em D_{02} D_{03} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$

Os gráficos da Figura 66 mostram o caso de falta interna nas derivações de uma única bobina com resistência de $R_{fault} = 2,75 \Omega$. Está incluso nos gráficos o valor de I_q do gerador, a corrente de falta e as tensões V_A , V_B e V_C do gerador e suas correntes I_A , I_B e I_C .

A falta acontece aos $T_{fault}=20,5918$ s. A mesma oscilação originária das ranhuras da máquina é presente neste caso. Pode-se observar que essa oscilação é maior que a fundamental da corrente de falta no gráfico, pois a oscilação causa a corrente de falta trocar de sinal múltiplas vezes durante um ciclo da fundamental. Nenhuma mudança significativa pode ser observada nos valores de tensão e corrente do gerador e na corrente de controle.

A Figura 67 sobrepõe as tensões em instantes diferentes, um em estado normal e o outro durante a falta. As formas e os módulos da tensão neste gráfico apresentam leves mudanças após o instante da falta.

A Figura 68 apresenta os módulos das harmônicas presentes no sinal de tensão antes e durante a falta. Pode-se observar que as mudanças na forma e módulo da tensão durante a falta se devem a uma pequena queda no módulo da tensão e um sutil aumento nas componentes harmônicas, principalmente nas harmônicas de 2^a, 15^a, 16^a e 17^a ordem.

Para a sobreposição das correntes antes e durante a falta, a Figura 69 mostra que há uma alteração sutil na forma das correntes durante a falta.

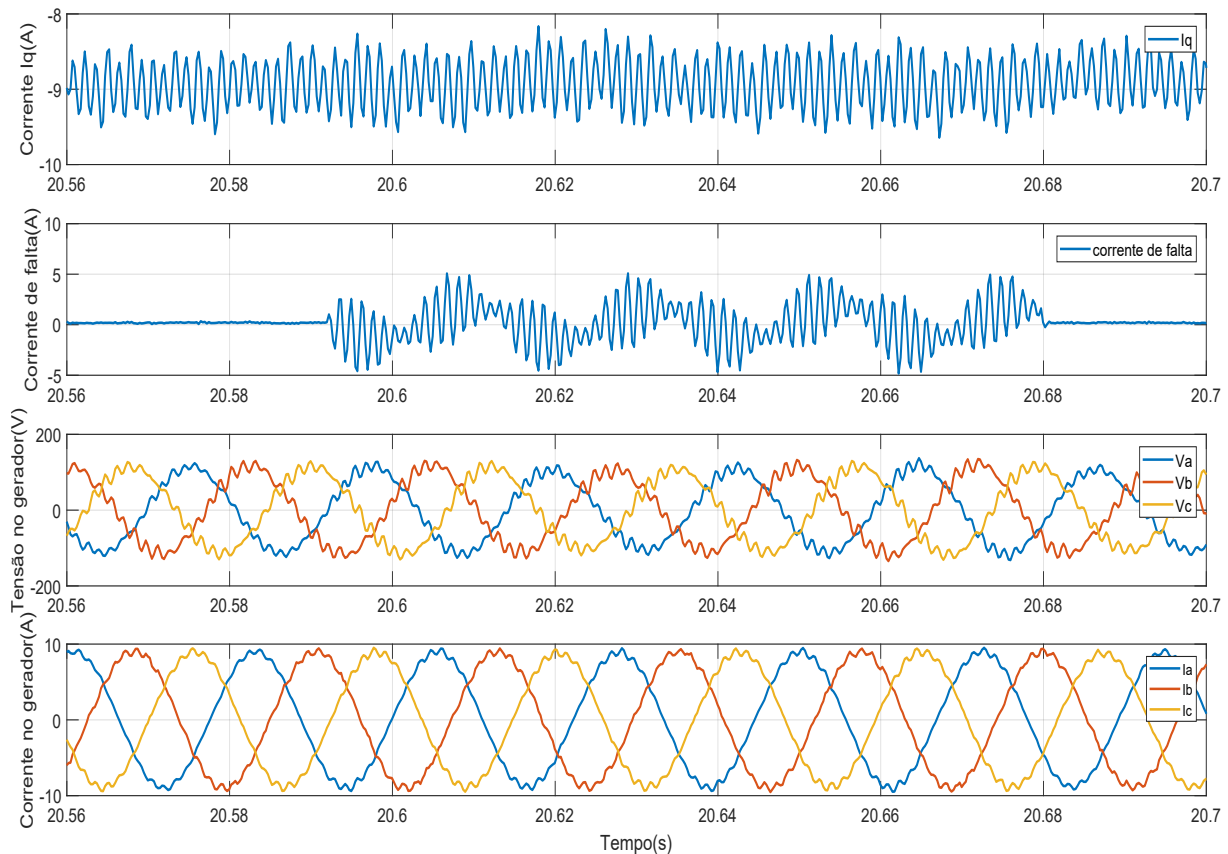


Figura 66 – Influência da falta interna nas derivações D_{02} D_{03} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$ nos parâmetros da máquina.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O espectro das correntes antes e durante a falta apresentado na Figura 70 mostra que essas mudanças sutis são devido a um aumento no conteúdo harmônico, principalmente nos módulos da 2^a, 16^a e 17^a harmônica. Vendo a influência que as oscilações por conta das ranhuras (as harmônicas entre a 15^a a 17^a) tem na corrente de falta, pode-se compreender o aumento destas harmônicas na corrente do gerador em situação de falta, chegando até a 0,26 A no caso da 17^a harmônica, e o aumento do desequilíbrio gerado pela falta afeta, o módulo da harmônica 2^a, passando de 0,075 A antes da falta para 0,165 A durante ela.

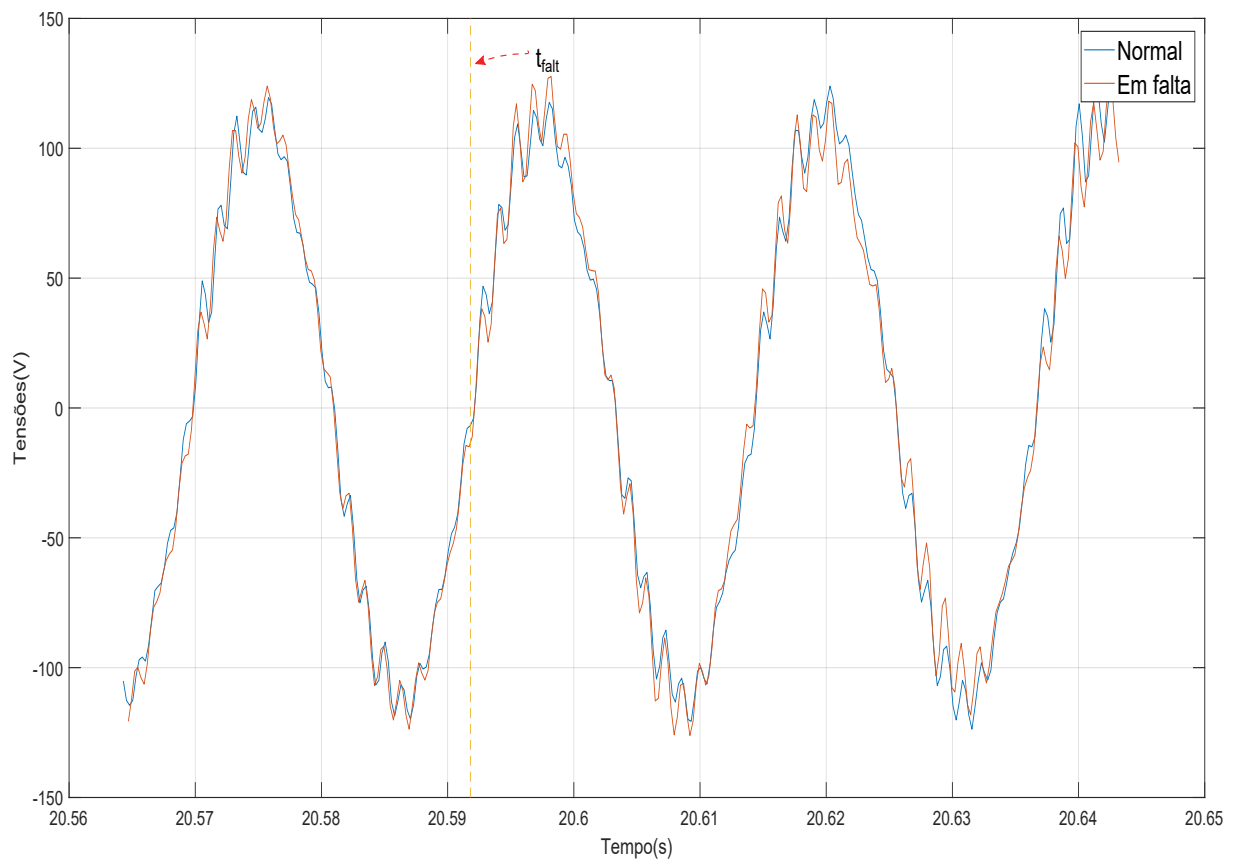


Figura 67 – Sobreposição da tensão antes da falha e durante ela, para a falha nas derivações D_{02} D_{03} com $R_{fault} = 2,75 \Omega$.

Fonte: Elaborado pelo autor.

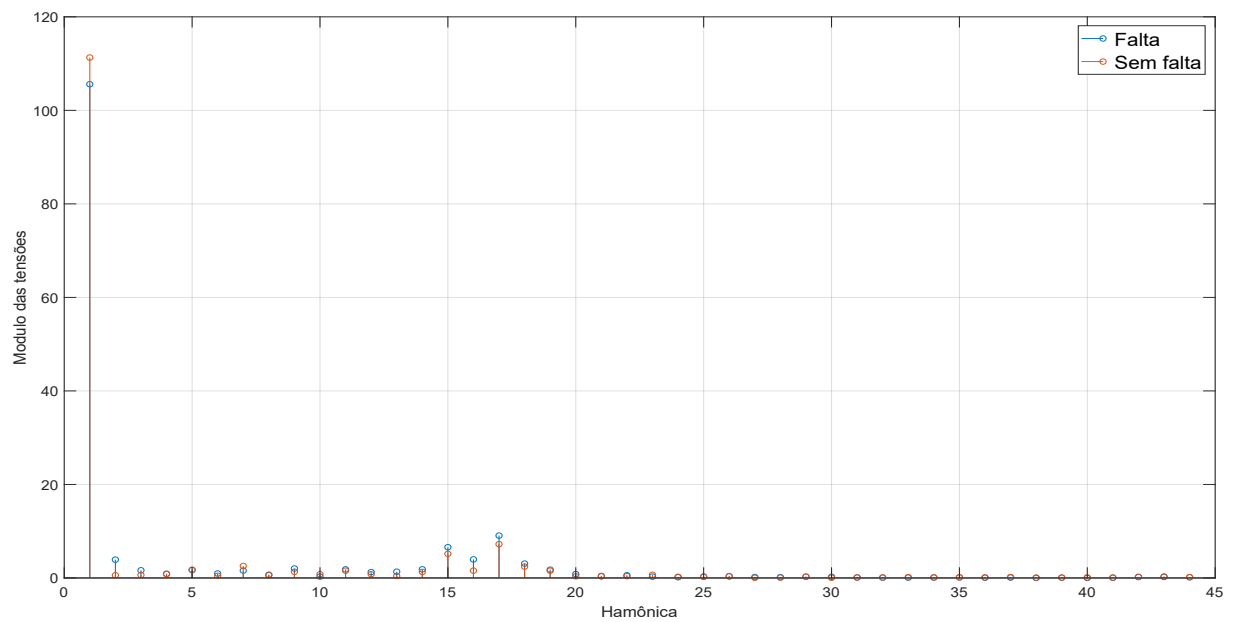


Figura 68 – Componentes harmônicas da tensão do gerador antes e durante a falha.

Fonte: Elaborado pelo autor.

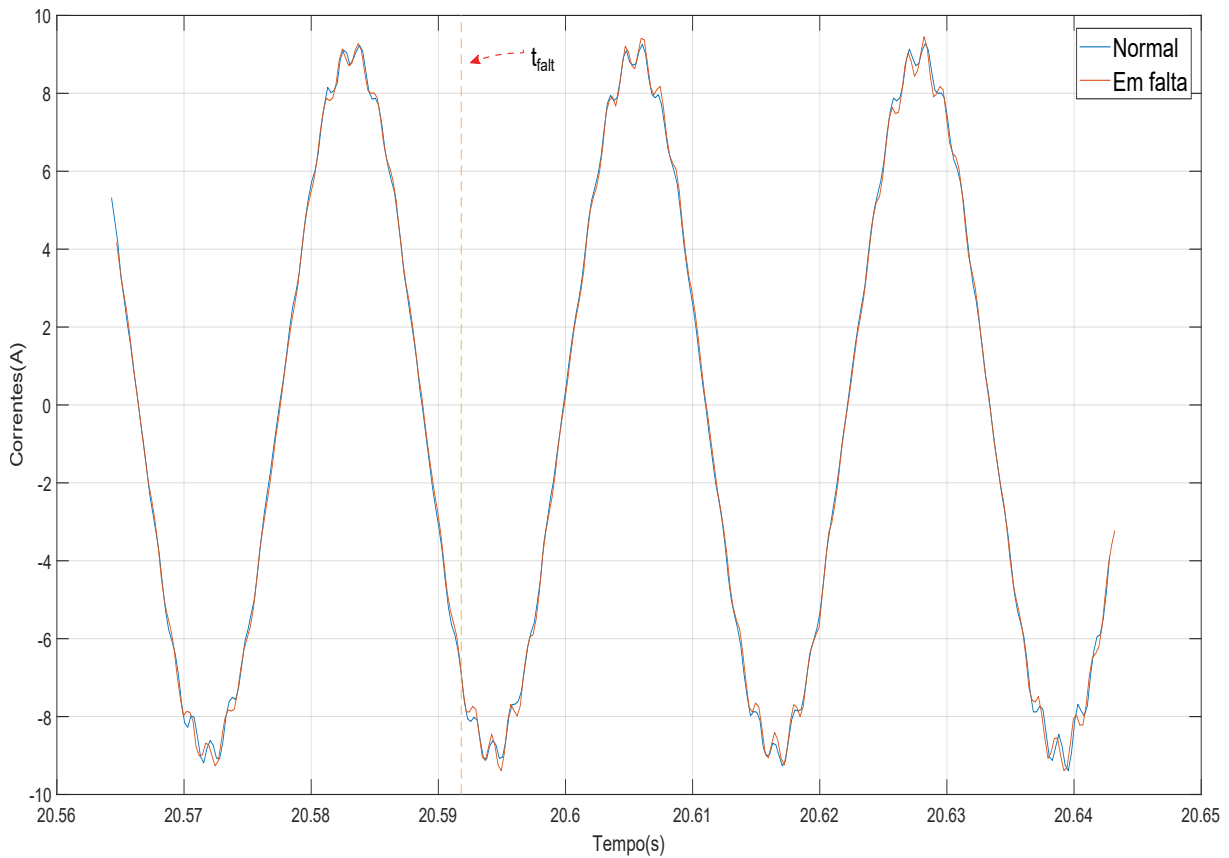


Figura 69 – Sobreposição da corrente antes da falha e durante ela, para a falha nas derivações D_{02} D_{03} com $R_{fault} = 2.75 \Omega$.

Fonte: Elaborado pelo autor.

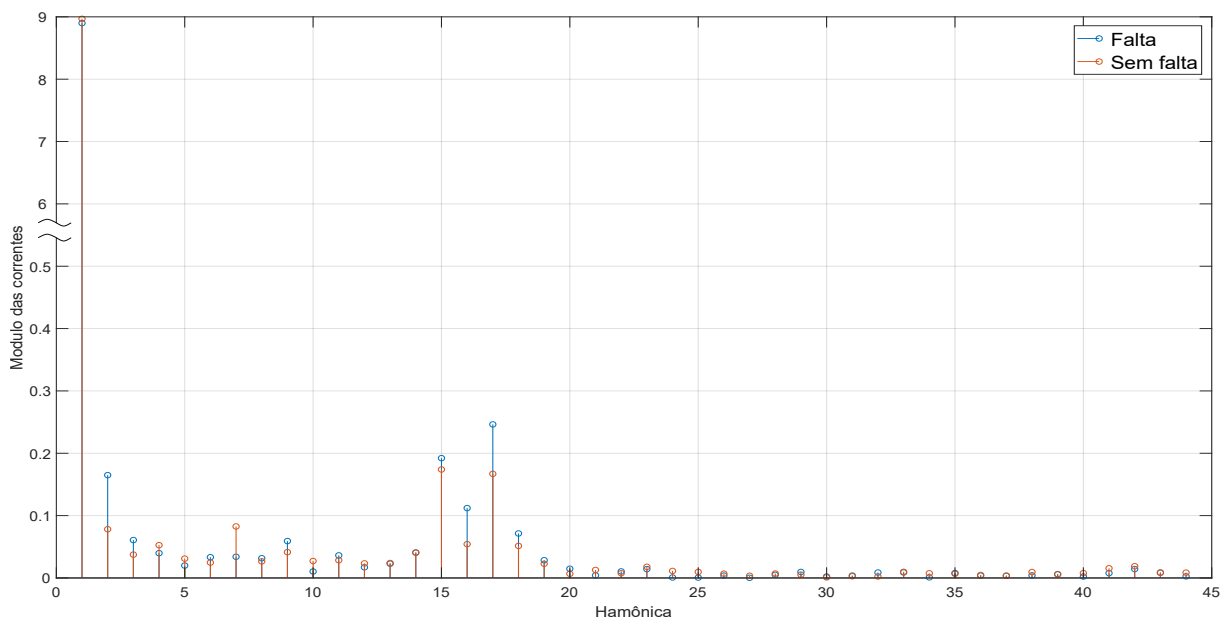


Figura 70 – Componentes harmônicas da corrente do gerador antes e durante a falha.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Falta Franca entre D_{02} e D_{03}

Os gráficos contendo o valor da corrente de controle do gerador I_q , a corrente de falta e as tensões V_A , V_B e V_C do gerador e suas correntes I_A , I_B e I_C para a falta franca entre as derivações escolhidas na bobina 2 da fase A podem ser visto na Figura 71.

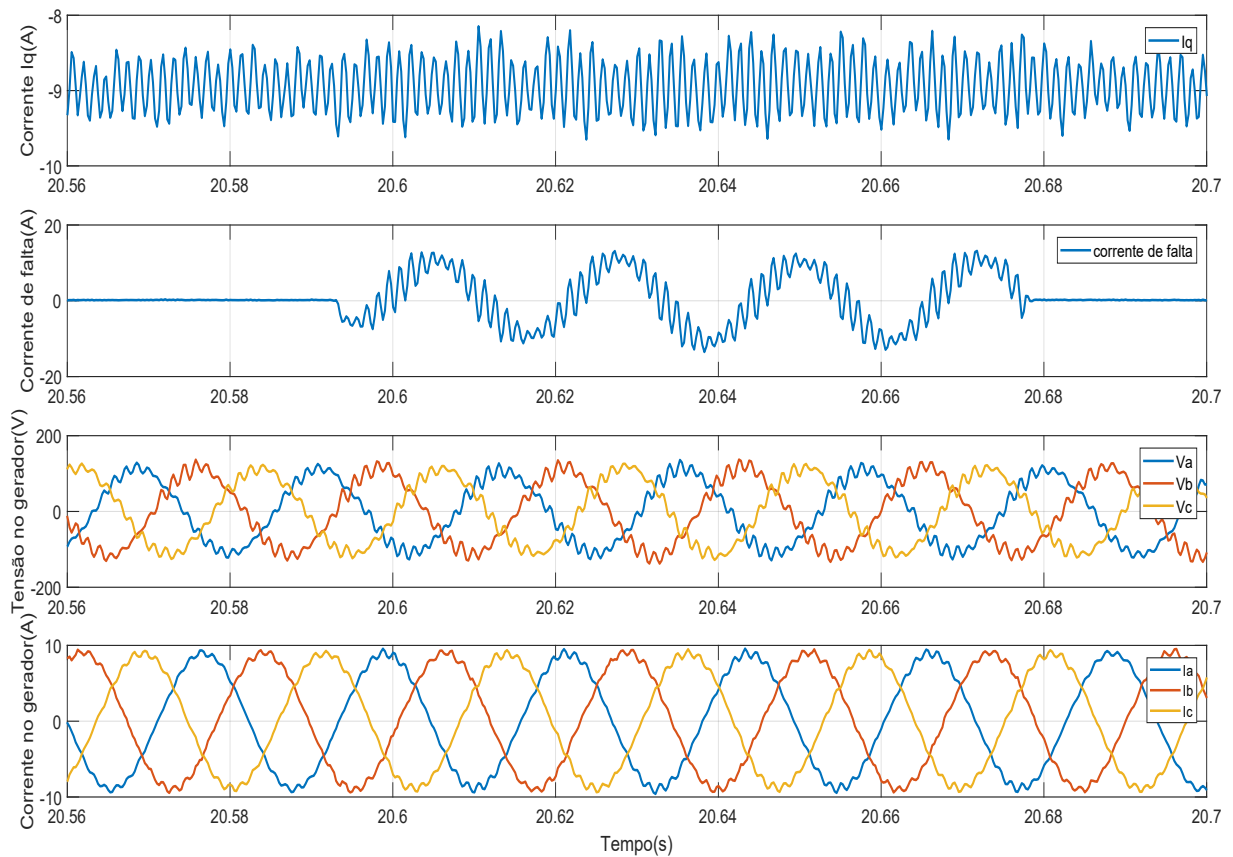


Figura 71 – Influência da falta interna nas derivações D_{02} D_{03} com falta franca nos parâmetros da máquina.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A falta acontece aos $T_{fault}=20,5931$ s. O *offset* e a influência das ranhuras observado nas outras faltas estudadas estão presentes novamente neste ensaio. Tem-se a maior corrente de falta até agora, com o módulo da harmônica fundamental da falta chegando a aproximadamente 12 A, pode-se observar agora uma distorção mais proeminente na fase A tanto na tensão como na corrente.

Pode-se observar uma importante diferença no funcionamento da máquina de indução para a máquina síncrona neste teste. Pois ao se comparar os testes usando as derivações D_{05} D_{08} onde se pega uma diferença nos enrolamentos de 12,4 % com as das derivações de D_{02} D_{03} que possuem somente 4,2 %, ambas com uma falta franca, vemos uma corrente de falta maior no segundo caso. Uma possível explicação para esse fenômeno considera que o fluxo da máquina de indução é gerado pelos seus próprios enrolamentos, portanto

ao realizar a falta entre as derivações destes enrolamentos, é alterado o fluxo que flui pelo segmento em falta, modificando a sua tensão.

A Figura 72 apresenta a sobreposição das tensões durante funcionamento normal e com as derivações em curto. Pode-se observar neste gráfico que há uma alteração visível na forma de onda da tensão logo após dar a falta, onde o aumento na distorção fica aparente.

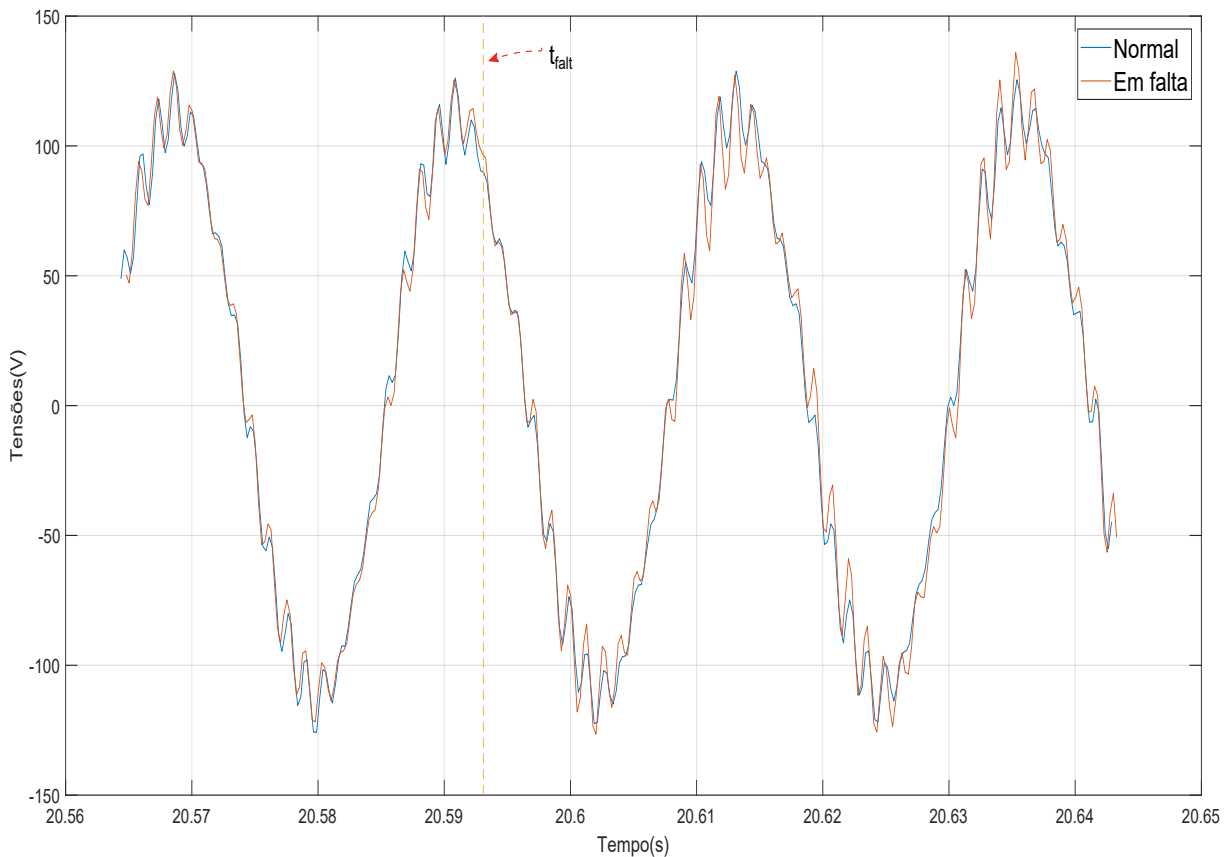


Figura 72 – Sobreposição da tensão antes da falta e durante ela, para a falta nas derivações D_{02} D_{03} com falta franca.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A saída da Transformada Rápida de Fourier(FFT) realizada no sinal da tensão de fase antes e durante o ensaio de falta franca pode ser visto na Figura 73. Os valores do módulo da fundamental da tensão antes e durante a falta são praticamente iguais, mostrando que a distorção na forma de onda observada na Figura 72 é causada pelas harmônicas geradas na falta. Também é constatado um aumento no módulo da 2^a e 15^a harmônica, assim como nos casos anteriores. No entanto, a componente harmônica mais afetada e que exerce maior influência nas distorções observadas no sinal é a distorção na 17^a harmônica, chegando a um módulo de 14 V, bem acima do valor antes da falta de 7 V.

Para a corrente, usa-se a Figura 74 para comparar a forma da corrente antes e durante o ensaio de falta. Há um sutil aumento nas distorções existentes no sinal de corrente,

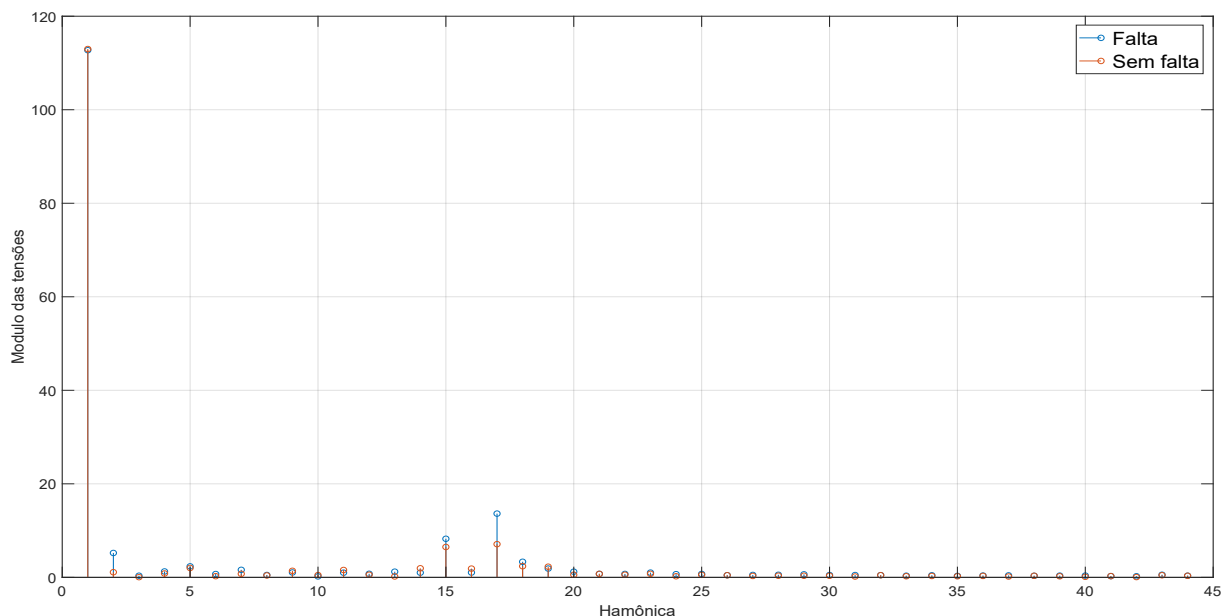


Figura 73 – Componentes harmônicas da tensão do gerador antes e durante a falta.

Fonte: Elaborado pelo autor.

principalmente visto perto dos picos de corrente.

Para melhor visualizar essas mudanças, foi realizado uma FFT nos sinais de corrente antes e durante a falta, como mostra a Figura 75. Neste gráfico vemos o aumento significativo no módulo da 17^a harmônica, saindo de 0,15 A para 0,33 A, tem-se um aumento relevante no módulo da 15^a harmônica saindo de 0,2 A a 0,26 A. Porém os valores de distorção ainda são baixos ao comparar eles com o módulo da fundamental, este sendo 9 A, por isso vê-se uma baixa distorção no sinal da corrente comparada a tensão.

Essa baixa influência da falta nos valores e formas da tensão e corrente do gerador torna um desafio isolar e identificar esse tipo de falta, dificultando sua detecção e a criação de formas de proteger o sistema de forma eficiente. O que leva a conclusão que para poder se prevenir faltas internas e suas consequências é necessário o estudo de diferentes técnicas de detecção de falhas que podem se aproveitar das pequenas mudanças, como as observadas nos gráficos acima. A bancada de teste criada e testada nesta dissertação está pronta para receber esse tipo de estudos, auxiliando na descoberta, maturação e desenvolvimento das técnicas necessárias para identificar, remediar e até mesmo prevenir esse tipo de falha.

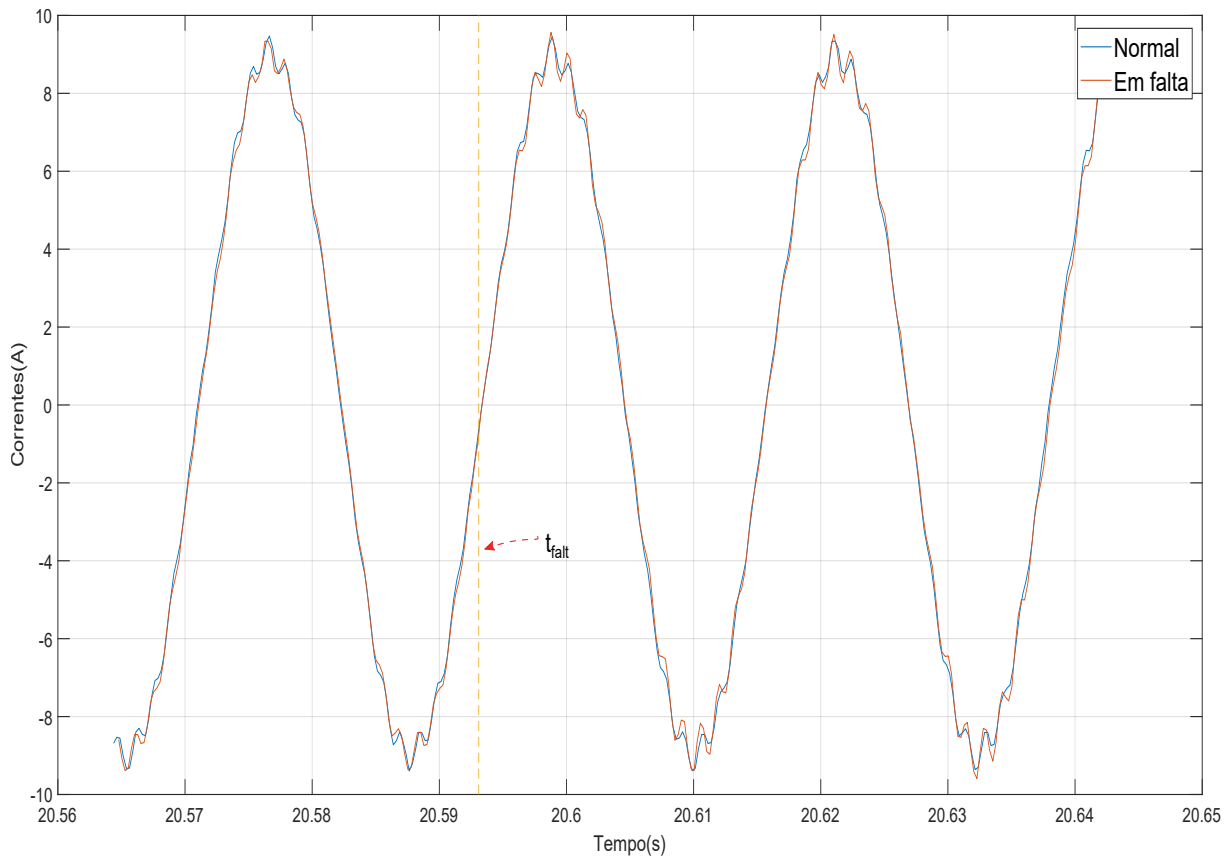


Figura 74 – Sobreposição da corrente antes da falha e durante ela, para a falha nas derivações D_{02} D_{03} com falha franca.

Fonte: Elaborado pelo autor.

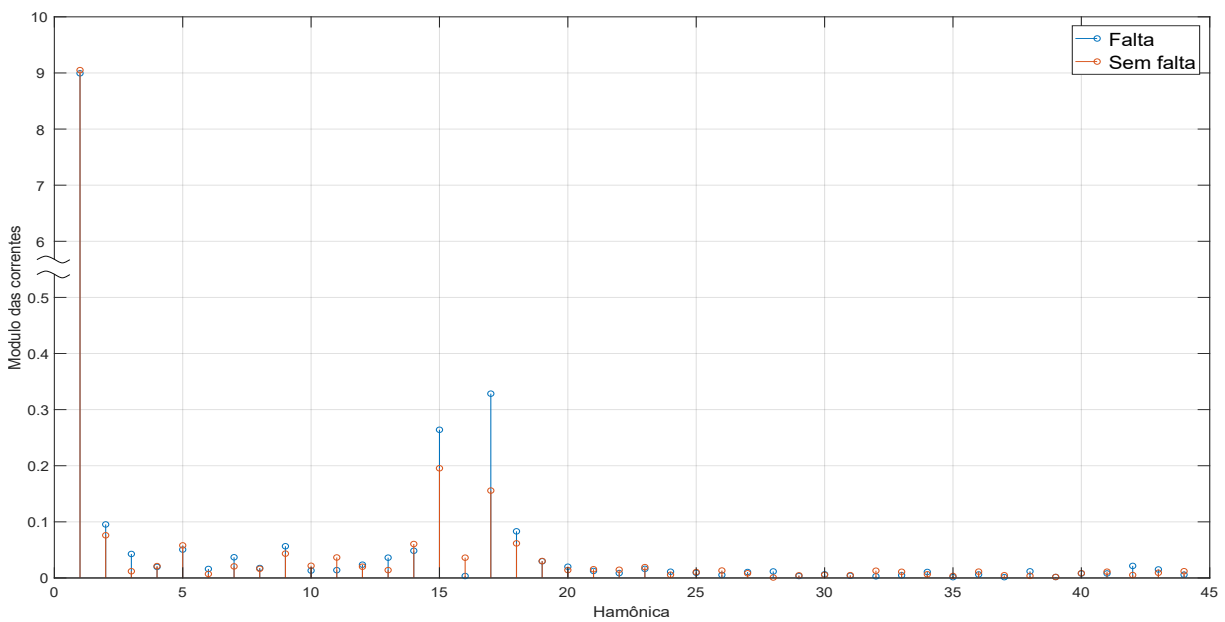


Figura 75 – Componentes harmônicas da corrente do gerador antes e durante a falha.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conclusão

Esta dissertação analisou como a adição de uma nova técnica utilizando-se de conversores *back-to-back* em conjunto com geradores pode mudar a dinâmica usual entre o gerador e a rede, principalmente quando estratégias de controle são implementadas neste sistema. Estudos nesta interação entre os conversores e a máquina são necessários para melhorar a eficiência desse processo e descobrir maneiras de usar esta dinâmica para melhorar a geração de energia, as opções de proteção, auxílio a rede, dentre outras coisas.

No Capítulo 2 foi discutido a escolha dos modelos e a metodologia usada para representar o sistema estudado. A aproximação abordada nesta dissertação permite um entendimento mais aprofundado da modelagem do SCIG com a inclusão dos conversores e do controle vetorial requerido para o funcionamento de todo o conjunto.

O Capítulo 3 apresentou as simulações em funcionamento. Nestes ensaios é possível observar como as estratégias de controle funcionam e a sua influência ao serem implementadas no sistema com o SCIG e os conversores, conseguindo manter eles nas condições desejadas pelo usuário durante seu funcionamento. Mesmo quando usada uma estratégia de controle se aproveitando das particularidades do SCIG, controlar através de um fluxo estimado e não medido. A liberdade permitida ao serem implementadas tais estratégias abre uma gama de possibilidades interessante para o uso e estudos deste tipo de topologia.

A montagem da bancada de testes para a implementação do modelo e da estratégia de controle mostra as diferentes interações entre os componentes que não pode ser observada facilmente em simulação, como a interferência externa de ruído no cabeamento, ou a necessidade de um filtro nas medidas devido ao chaveamento, entre outros. O controle do sistema na totalidade funcionou como previsto e se mostrou rápido e eficaz, com resultados parecidos com àqueles obtidos em simulação, validando a modelagem e controle escolhidos.

A proteção deste tipo de topologia ainda está em processo de entendimento, necessitando de mais estudos nesta parte devido às mudanças inseridas pelos conversores a uma topologia já conhecida e estudada. Pode-se ver as mudanças ao aplicar esquemas de proteção conhecidos e testados nesta nova topologia, mas ver o comportamento destas proteções e do sistema todo mudar ao trocar a posição da falta mostra a sensibilidade

trazida ao incluir os conversores. Além disso, o próprio controle estabelecido muda o comportamento do conjunto quando em falta em relação às topologias sem os conversores. Porém, essas diferenças também podem ser uma oportunidade de usar tais particularidades para melhorar a eficácia da proteção dessa nova topologia, que passa cada vez mais a ser usada na geração de energia, principalmente nas renováveis.

A maior contribuição desta dissertação é a construção de uma bancada de testes que permite o estudo de falhas internas nos geradores, seu desempenho quando usada para testes com falta interna se provaram satisfatórios, permitindo a análise de importantes sinais quando em estado de falta. A flexibilidade criada ao se utilizar os conversores na montagem permite o estudo de diferentes técnicas de controle e/ou detecção, não limitadas às apresentadas nesta dissertação, característica de ampla importância quando se consideram os tipos de estudo para a qual a bancada foi construída.

Os resultados obtidos mostram a dificuldade de se detectar esse tipo de falta com métodos padrões para detecção de falta, devido à pequena influência da falta nas medidas normalmente coletadas. Porém, as mudanças estão presentes nos sinais, conforme evidente nos últimos testes, mas necessitam de uma maior maturidade nos métodos de detecção das mesmas. A necessidade de maiores estudos em faltas internas neste tipo de topologia se mostra evidente neste trabalho, principalmente analisando diferentes aproximações para a detecção de faltas. A bancada de testes construída traz essa oportunidade permitindo o avanço deste tipo de estudo devido à gama de parâmetros que é possível se analisar nela e as derivações presentes na máquina.

Referências

- ABAD, G. et al. *Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 85.
- ACKERMANN, T. *Wind power in power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005.
- AN, C. et al. Design and testing of a new protection relay for variable speed dfi motor generators. *IET Conference Proceedings*, Institution of Engineering and Technology, p. 5.1.2–5.1.2(1), January 2014. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2014.0031>>.
- ANDERS, M. L. *Análise transitória de faltas em geradores síncronos no contexto da energia eólica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018.
- BARIŠA, T.; SUMINA, D.; KUTIJA, M. Control of generator- and grid-side converter for the interior permanent magnet synchronous generator. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGY RESEARCH AND APPLICATIONS (ICRERA), Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2015. p. 1015–1020.
- BATAGLIOLI, R. P. *Proteção digital de geradores eólicos com conversores de potência de escala completa no contexto das smart grids*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018.
- BATAGLIOLI, R. P.; MONARO, R. M.; COURY, D. V. Differential protection for stator ground faults in a full-converter wind turbine generator. *Electric Power Systems Research*, v. 169, p. 195–205, 2019. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779618304152>>.
- BOLDEA, I. Electric generators and motors: An overview. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, v. 1, n. 1, p. 3–14, 2017.
- BUENO, E. J. et al. Design of a back-to-back npc converter interface for wind turbines with squirrel-cage induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 23, n. 3, p. 932–945, 2008.
- COUNCIL, G. W. E. Gwec| global wind report 2021. *Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium*, 2021.
- D'AVERSA, A.; HUGHES, B.; PATEL, S. Challenges and solutions of protecting variable speed drive motors. In: *66TH ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS, Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2013. p. 250–256.

- DSPACE. *MicroLabBox*. 2020. 1–12 p.
- ERNST, T. Application of multi-function motor protection relays to variable frequency drive connected motors. In: *61ST IEEE PULP AND PAPER INDUSTRY CONFERENCE (PPIC), Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.
- FRANCO, F. A. L. Estudo das proteções de geradores eólicos duplamente alimentados em ambiente de co simulação embarcado. In: *PROCEEDINGS AND BOOK OF ABSTRACTS OF THE 12TH LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, Proceedings...* [S.l.]: CLAGTEE, 2017. p. 178–184. ISBN 978-85-61065-03-4.
- FRANCO, F. A. L. *Estudo de controle e proteção de geradores duplamente alimentados em sistemas eólicos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017.
- GARDELL, J. D. et al. Adjustable-speed drive motor protection applications and issues. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 50, n. 2, p. 1364–1372, 2014.
- HINGORANI, N.; GINN, H.; SULLIVAN, J. Control/protection architecture for power electronic converters. In: IEEE. *RECORD OF CONFERENCE PAPERS INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY 57TH ANNUAL PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY CONFERENCE (PCIC), Proceedings...* [S.l.], 2010. p. 1–8.
- IEEE. *IEEE Guide for AC Generator Protection*. [S.l.: s.n.], 2007. v. 1. i p. ISBN 1559377119.
- IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters. *ANSI/IEEE Std 519-1981*, p. 1–54, 1981.
- IEEE Standards Association. *IEEE Std 3004.8: IEEE Recommended Practice for Motor Protection in Industrial and Commercial Power Systems*. [S.l.: s.n.], 2016. ISBN 9781504436083.
- JLASSI, I.; CARDOSO, A. J. M. Fault-tolerant back-to-back converter for direct-drive pmsg wind turbines using direct torque and power control techniques. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 34, n. 11, p. 11215–11227, 2019.
- KESSLER, C. Das symmetrische optimum, teil i. *at-Automatisierungstechnik*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, v. 6, n. 1-12, p. 395–400, 1958.
- KINDL, V. et al. Review of time and space harmonics in multi-phase induction machine. *Energies*, v. 13, n. 2, 2020. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/2/496>>.
- LEE, J.-S.; LEE, K.-B.; BLAABJERG, F. Open-switch fault detection method of a back-to-back converter using npc topology for wind turbine systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 51, n. 1, p. 325–335, 2015.
- LETCHER, T. M. *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*. [S.l.: s.n.], 2017. 1–600 p. ISBN 9780128094297.
- MEGAHED, A.; MALIK, O. Synchronous generator internal fault computation and experimental verification. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, IET, v. 145, n. 5, p. 604–610, 1998.

- MONARO, R. M. et al. Experimental platform for controlled faults on synchronous generator armature windings. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, IEEE, v. 27, n. 4, p. 948–957, 2012.
- MUÑOZ-JADÁN, Y. et al. Hardware-in-the-loop for wind energy conversion with resonant current control and active damping. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 17, n. 07, p. 1146–1154, 2019.
- NI, K. et al. Highly reliable back-to-back power converter without redundant bridge arm for doubly fed induction generator-based wind turbine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 55, n. 3, p. 3024–3036, 2019.
- Operador Nacional do Sistema. Submódulo 3.6: requisitos técnicos mínimos para a conexão à rede básica. p. 1–35, 2007.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA(ONS. Submódulo 3.6: requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. 2017.
- PREITL, S.; PRECUP, R.-E. An extension of tuning relations after symmetrical optimum method for pi and pid controllers. *Automatica*, Elsevier, v. 35, n. 10, p. 1731–1736, 1999.
- QUÉVAL, L.; OHSAKI, H. Back-to-back converter design and control for synchronous generator-based wind turbines. In: IEEE. *INTERNATIONAL CONFERENCE ONRENEWABLE ENERGY RESEARCH AND APPLICATIONS (ICRERA)*, *Proceedings...* [S.l.], 2012. p. 1–6.
- ROCHA, R. V. *Análise de Falhas Internas em Geradores Síncronos de Velocidade Variável Conectados a Conversores NPC de Três Níveis*. 155 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2021.
- ROCHA, R. V.; ANDRADE, L.; MONARO, R. Description of a Test Bench for Evaluation of Type 3 and 4 Wind Generators Under Internal Faults in Generator Stator Winding. *A ser publicado*, p. 8, 2021.
- SEMWAL, R. R. et al. Two-stage protection circuit for a multichanneled power electronic converter fed large asynchronous hydrogenerating unit. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 55, n. 6, p. 5947–5959, 2019.
- SILVA, B. H. P. *Análise transitória de faltas em geradores de indução duplamente alimentados no contexto da energia eólica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018.
- TORRES, R. et al. Adjustable speed drives and motor protection. In: IEEE *PETROLEUM AND CHEMICAL INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE (PCIC)*, *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2014. p. 119–128.
- WU, B. et al. *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 9780470593653.
- YAZDANI, A.; IRAVANI, R. *VOLTAGE-SOURCED CONVERTERS IN POWER SYSTEMS - Modeling, Control, and Applications*. [S.l.]: Willey, 2010. 473 p. ISBN 9780470521564.

Anexos/Simulação de falta trifásica

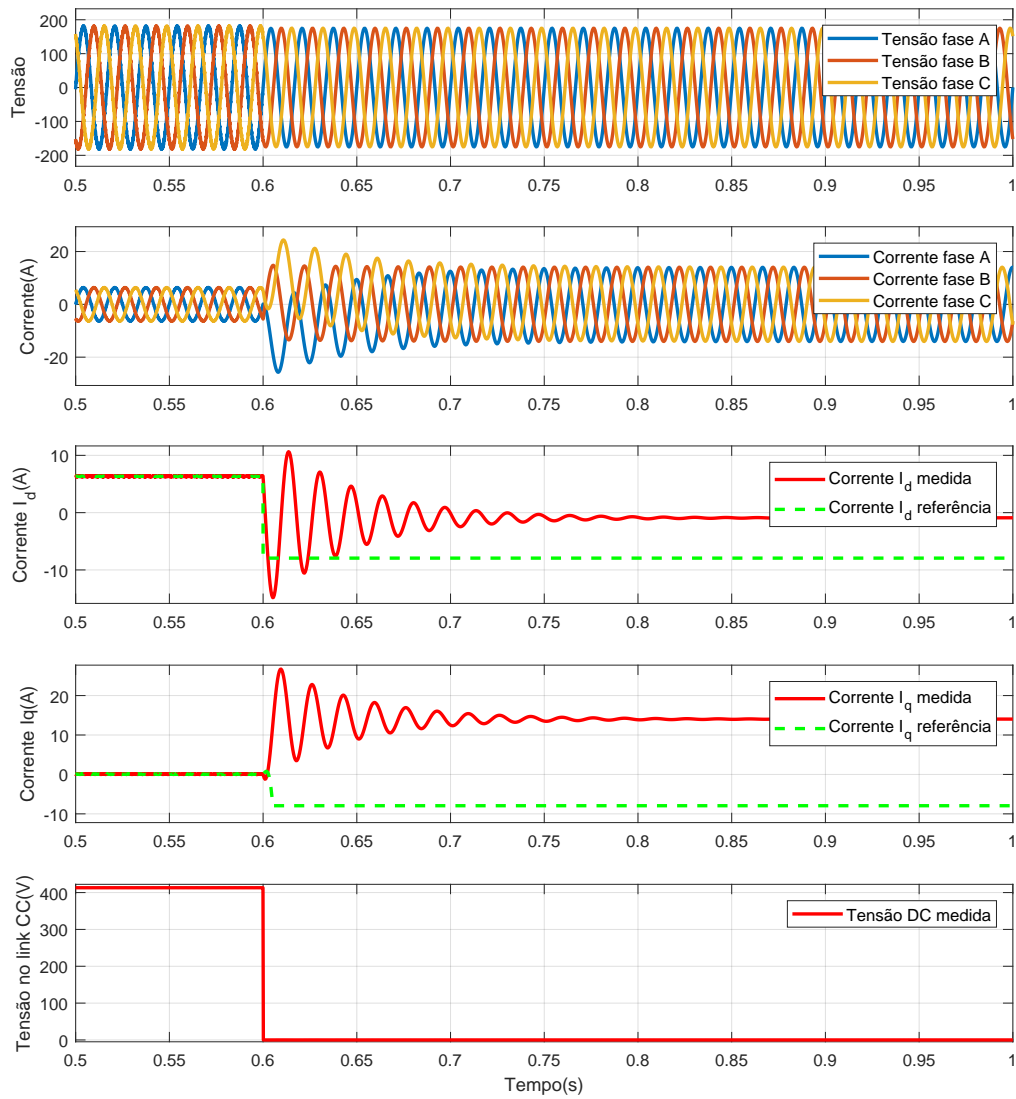


Figura 76 – Resposta do lado da rede à falta trifásica no Ponto A - Zona 3, a esquerda do medidor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

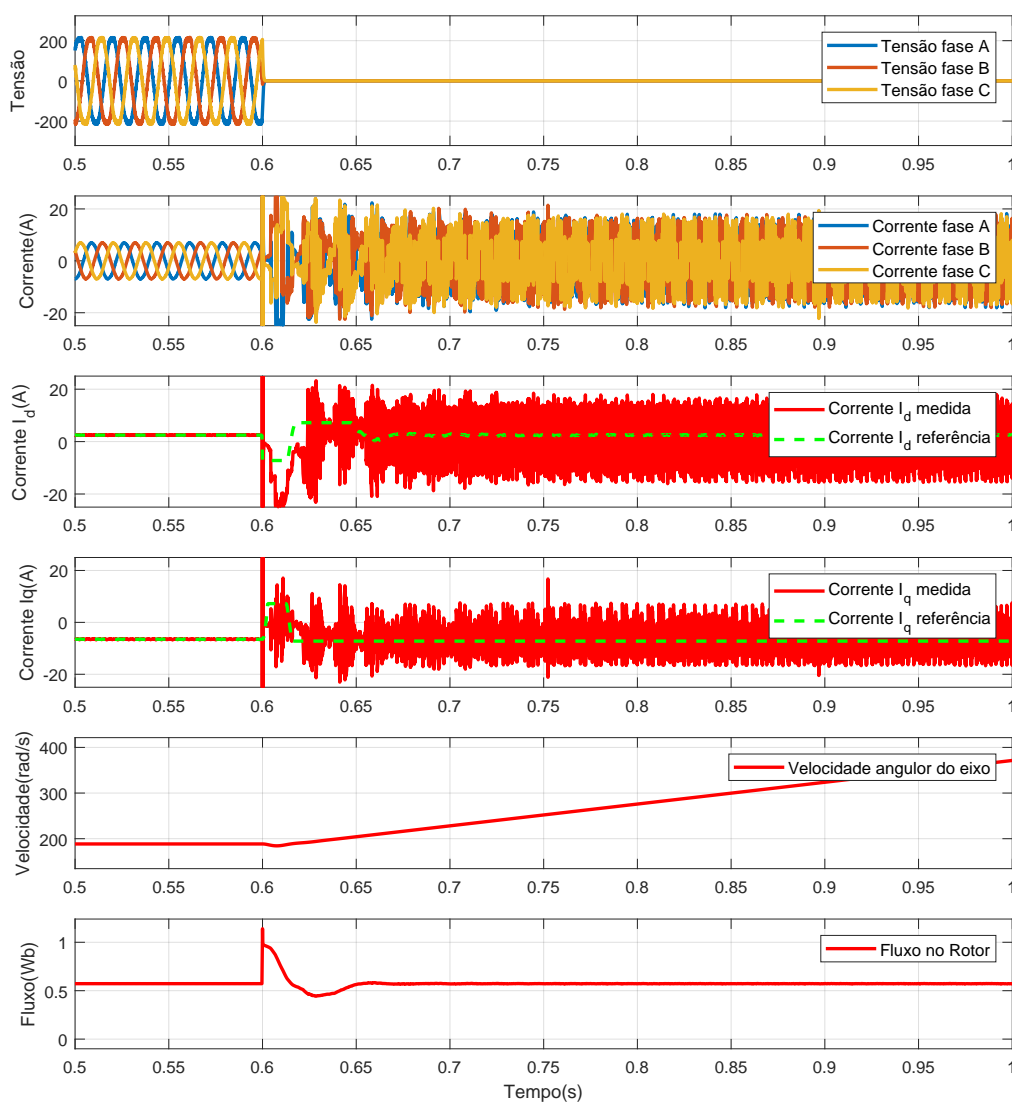


Figura 77 – Resposta do lado do gerador à falta trifásica no Ponto A - Zona 3, a esquerda do medidor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

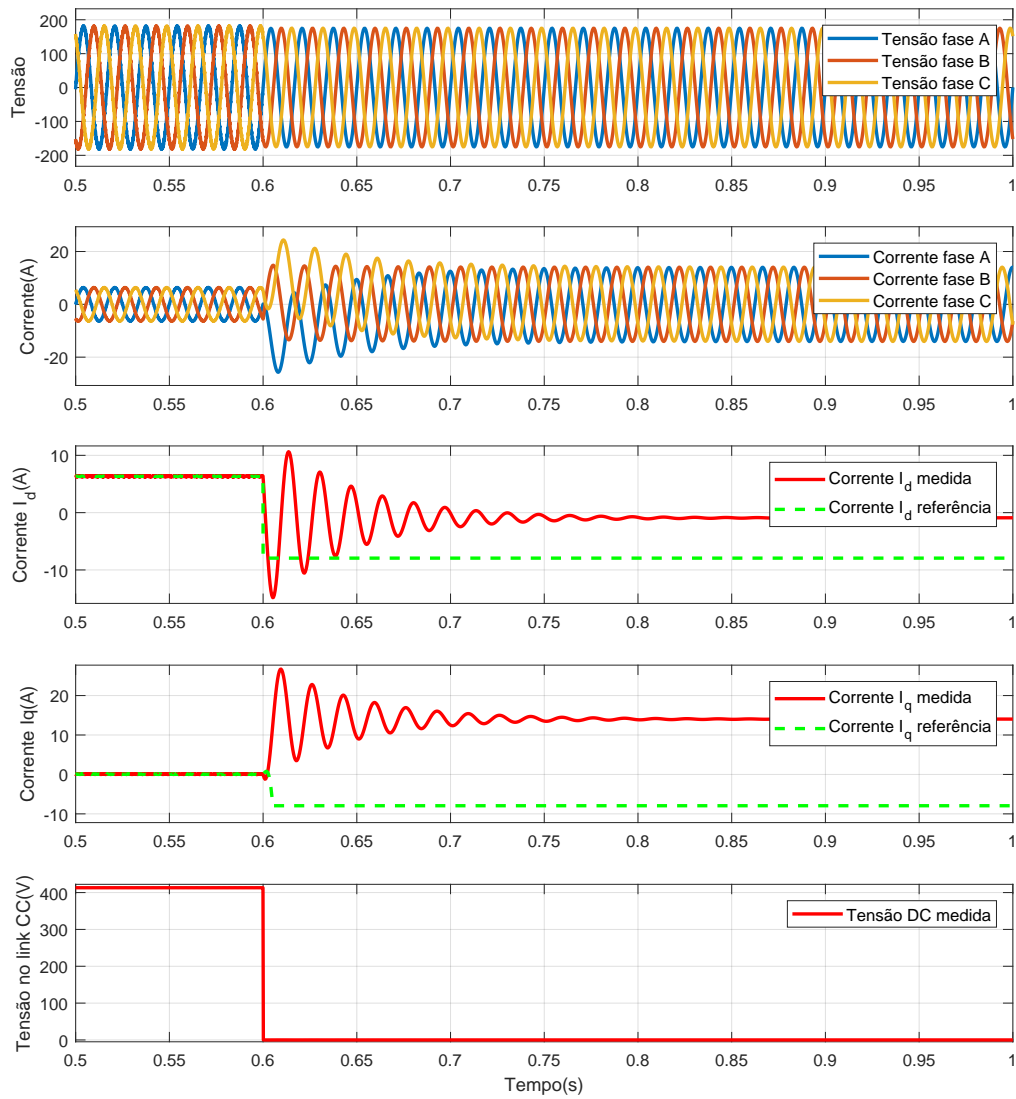


Figura 78 – Resposta do lado da rede à falta trifásica no Ponto B - Zona 3, à direita do medidor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

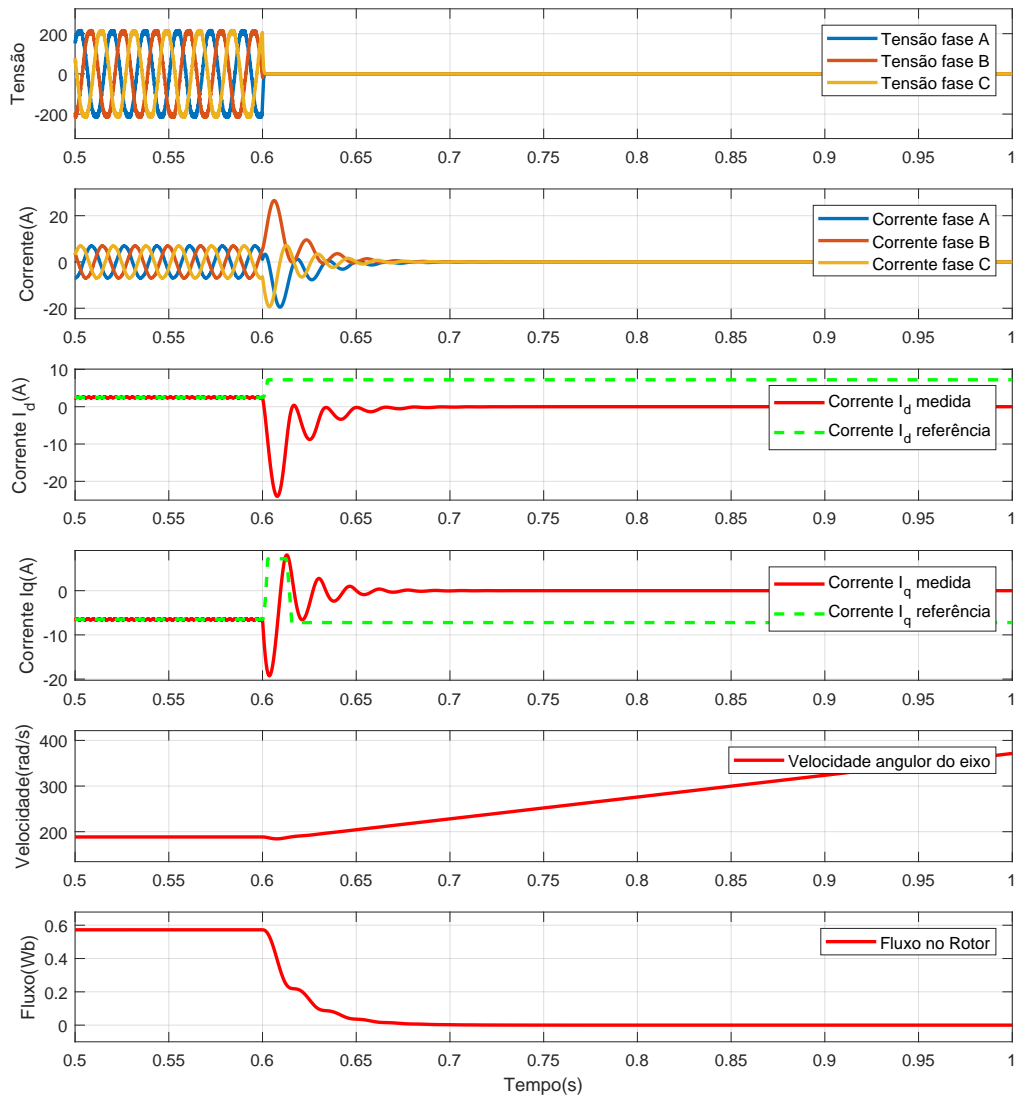


Figura 79 – Resposta do lado do gerador à falta trifásica no Ponto B - Zona 3, à direita do medidor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

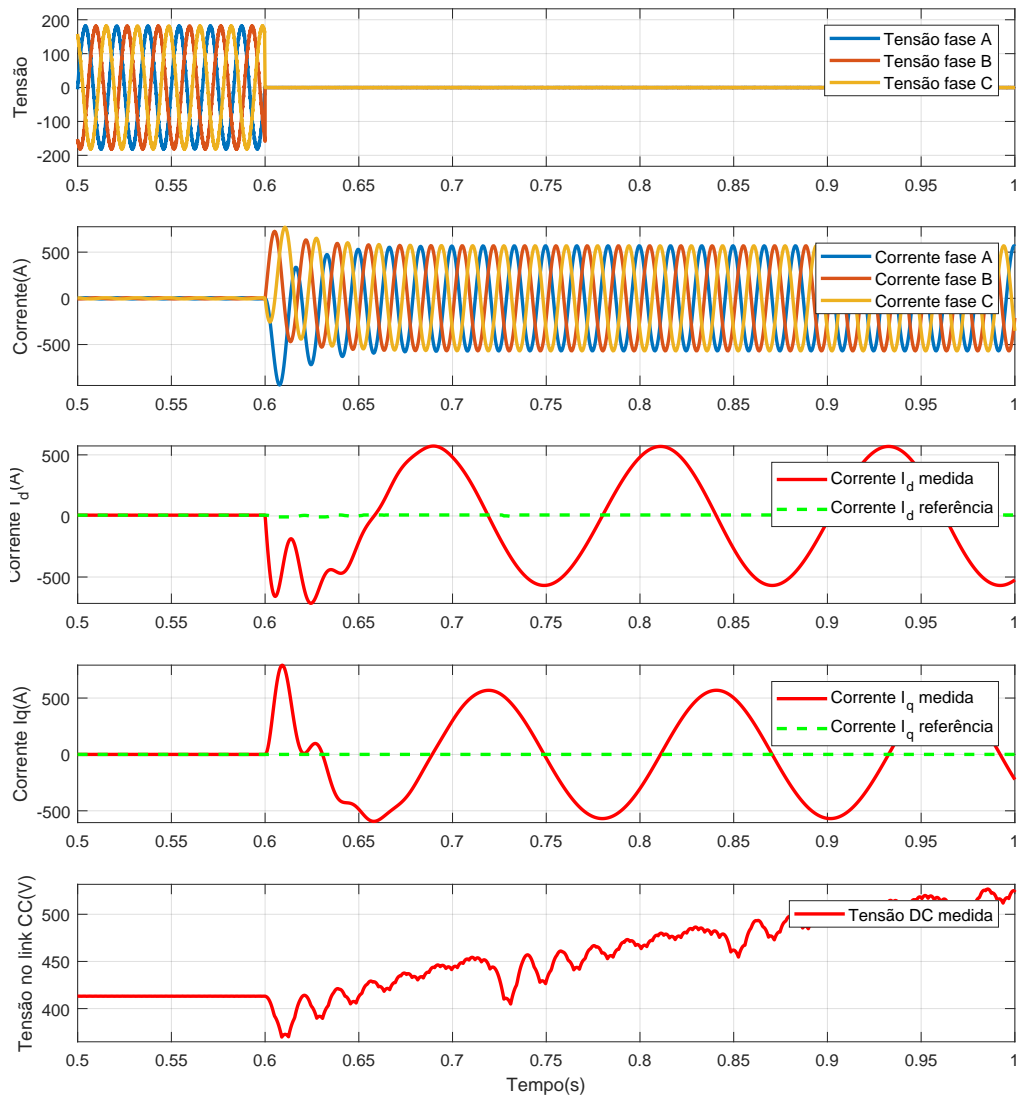


Figura 80 – Resposta do lado da rede à falta trifásica no Ponto C - Zona 1, à esquerda do medidor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

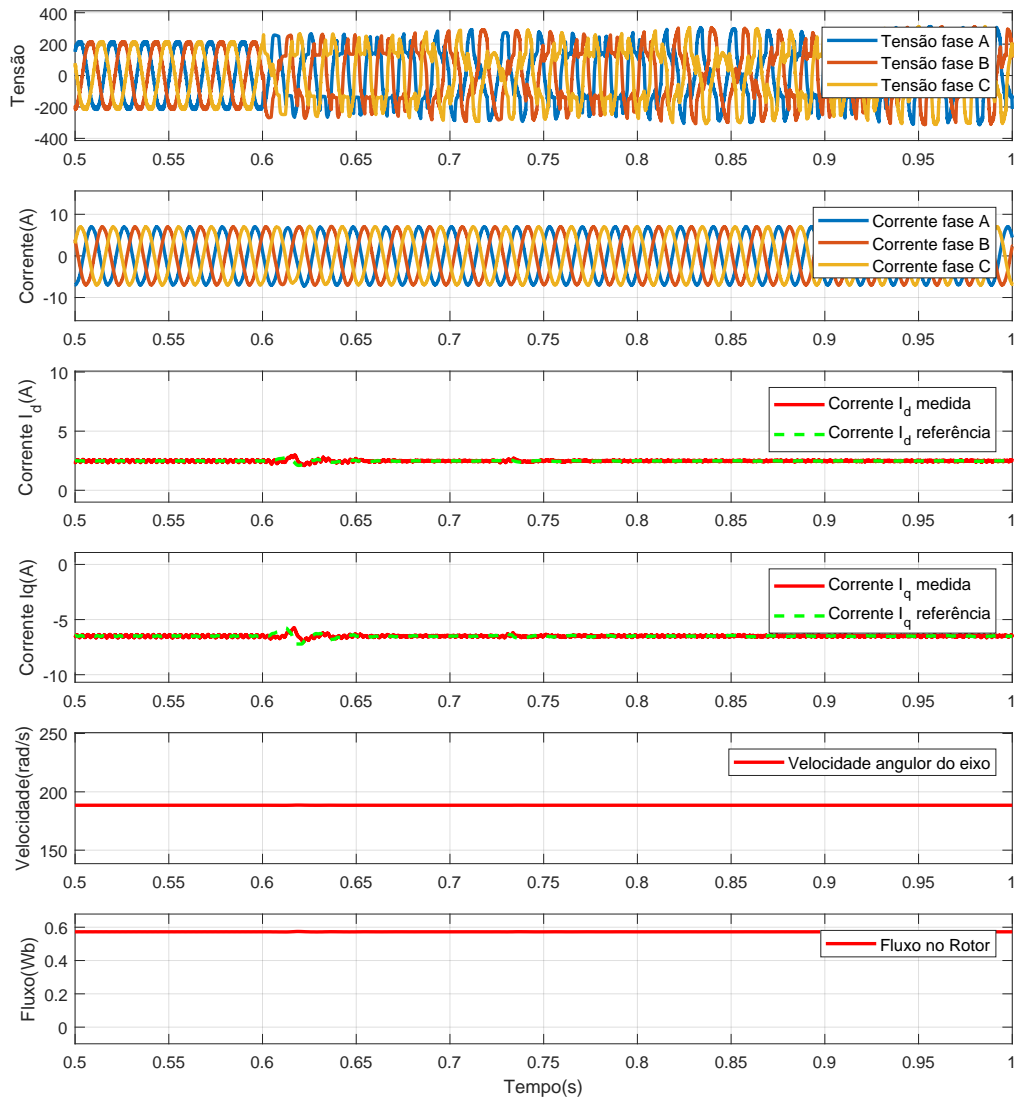


Figura 81 – Resposta do lado do gerador à falta trifásica no Ponto C - Zona 1, à esquerda do medidor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

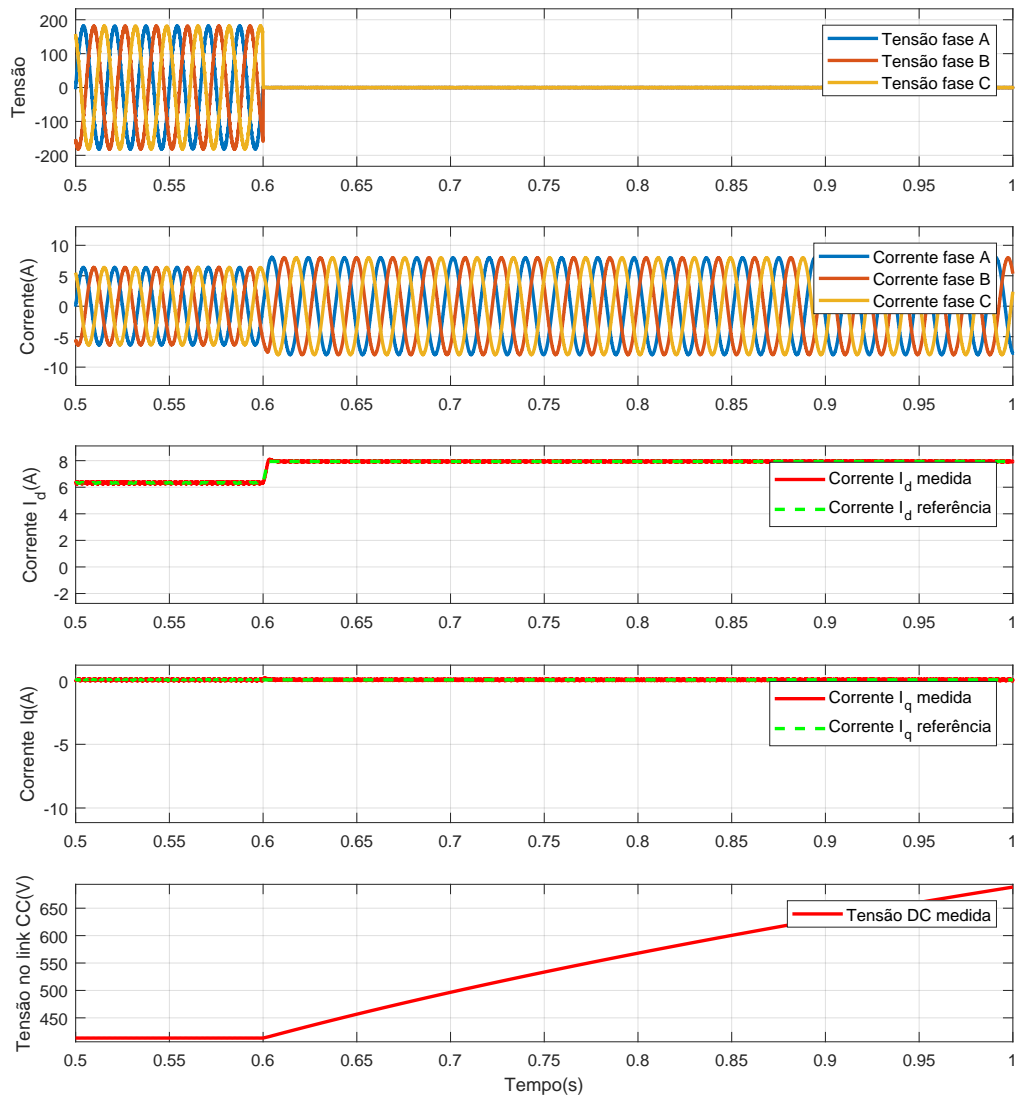


Figura 82 – Resposta do lado da rede à falta trifásica no Ponto D - Zona 1, à direita do medidor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

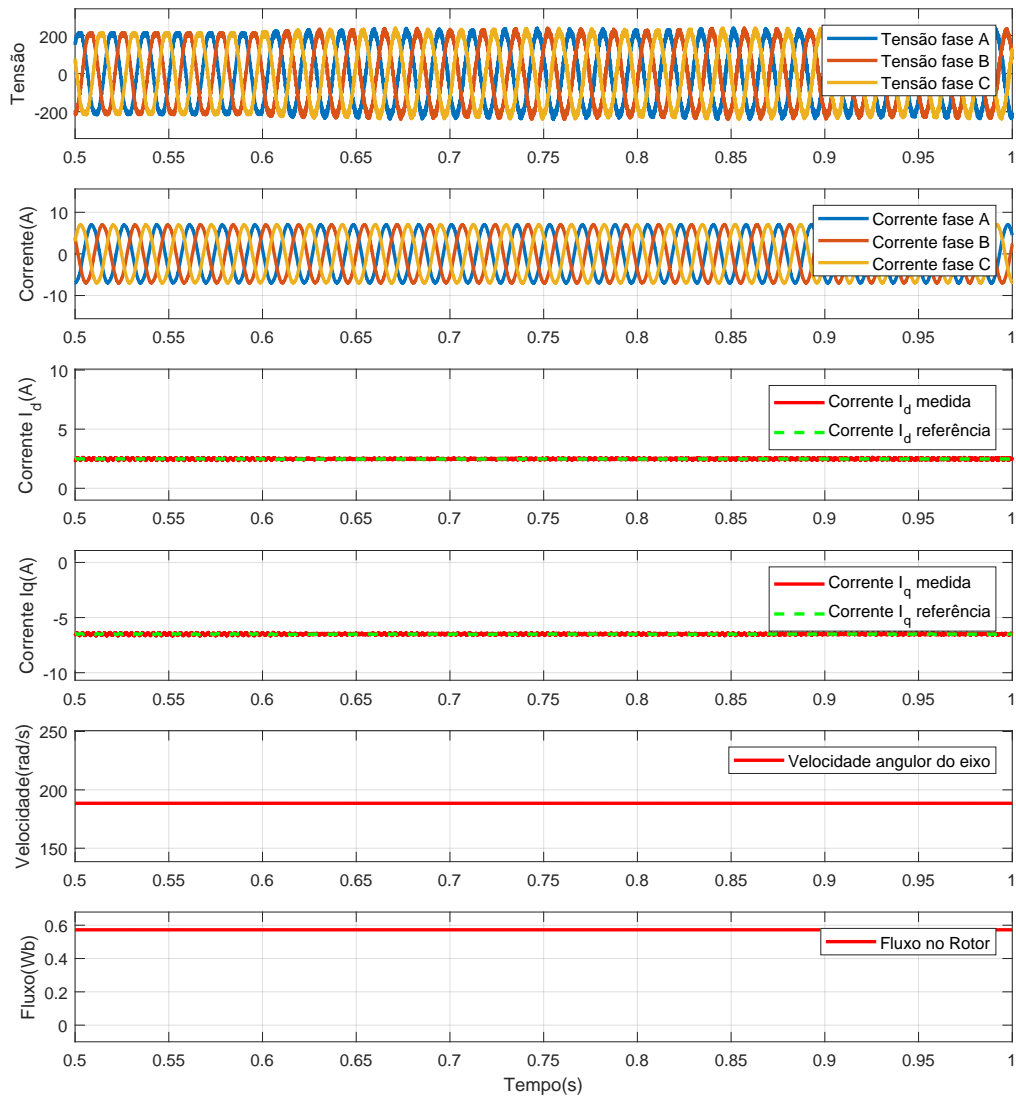


Figura 83 – Resposta do lado do gerador à falta trifásica no Ponto D - Zona 1, à direita do medidor.

Fonte: Elaborado pelo autor.

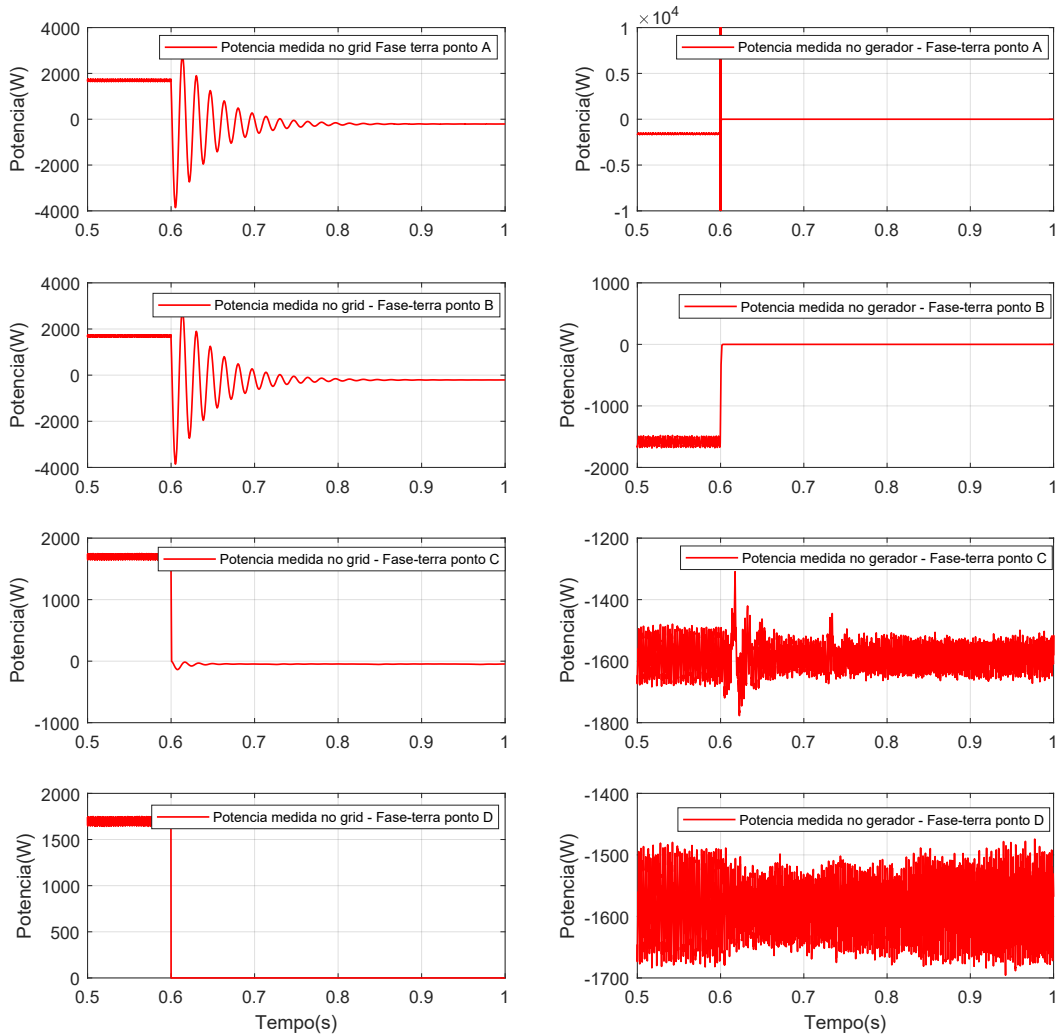


Figura 84 – Circuito equivalente do lado da rede do sistema.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexos/Esquemas elétricos das placas de medição

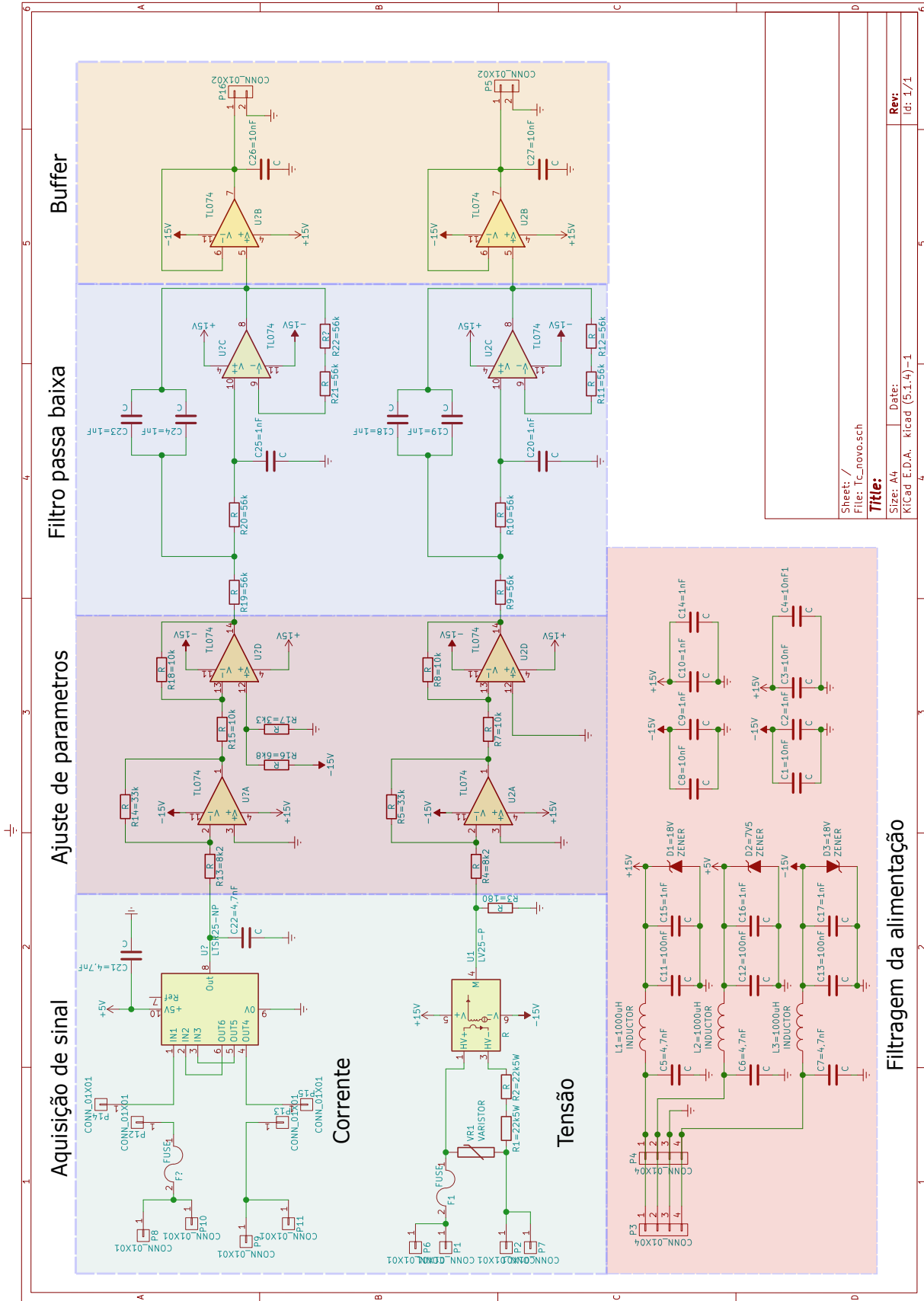


Figura 85 – Esquema elétrico das placas de corrente e tensão.

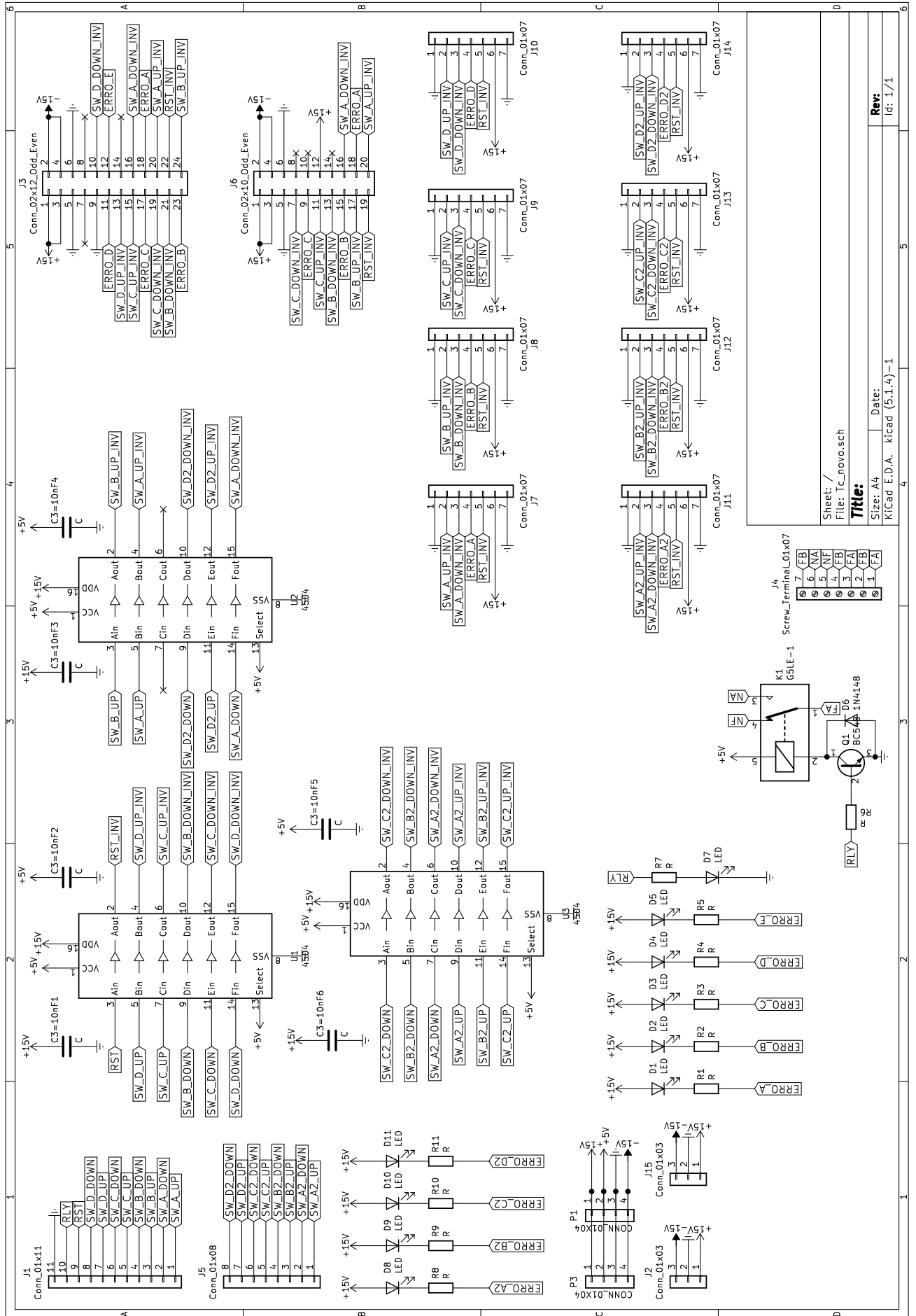


Figura 86 – Esquema elétrico das placas de ajuste de nível de tensão.