

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEL)

Associação ampla entre UFSJ e CEFET-MG



**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO RELÉ DE
DISTÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM
COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA POR TIRISTOR**

por

Mateus Andrade Ferreira

Belo Horizonte

2018

Mateus Andrade Ferreira

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO RELÉ DE
DISTÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM
COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA POR TIRISTOR**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla entre CEFET-MG e UFSJ, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Elétricos – SE. Linha de Pesquisa: Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos de Potência – POSEP.

Orientador: Rafael Silva Alípio

Coorientador: Eduardo Gonzaga da Silveira

Belo Horizonte

2018

- F383a Ferreira, Mateus Andrade
Avaliação do desempenho do relé de distância em linhas de transmissão com compensação série controlada por tiristor / Mateus Andrade Ferreira. – 2018.
xv, 137 f.: il., gráfs, tabs., fotos.
- Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o CEFET-MG.
- Orientador: Rafael Silva Alipio.
Coorientador: Eduardo Gonzaga da Silveira.
Banca examinadora: Rafael Silva Alipio, Eduardo Gonzaga da Silveira, Alex-Sander Amável Luiz, Márcio Matias Afonso e Clever Sebastião Pereira Filho.
- Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
1. Relés elétricos – Teses. 2. Energia elétrica – Transmissão – Teses. 3. Capacitores – Teses. 4. Controle por tiristores – Teses. 5. Aparelhos – Proteção – Teses. I. Alipio, Rafael Silva. II. Silveira, Eduardo Gonzaga da. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Universidade Federal de São João del-Rei. V. Título.

CDD 621.317

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO RELÉ DE DISTÂNCIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA POR TIRISTOR

Mateus Andrade Ferreira

Texto da Dissertação de Mestrado submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rafael Silva Alípio (orientador)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Eduardo Gonzaga da Silveira (Coorientador)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Alex Sander Amável Luiz

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Márcio Matias Afonso

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho

Universidade Federal de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao prof. Eduardo Gonzaga, pela orientação durante essa jornada, e ao prof. Alex-Sander pelo suporte no desenvolvimento do sistema de aquisição de dados do trabalho.

Agradeço também aos demais professores do PPGEL pelo conhecimento que compartilharam comigo em todas as disciplinas, em especial à professora Úrsula e ao professor Rafael Alípio, pois são exemplos de profissionais nos quais me inspiro ao atuar como professor no ensino técnico.

Agradeço aos técnicos responsáveis pelo LEACOPI, Márcio, Henrique e Élton, pelo suporte prestado, sempre com muita boa vontade.

Ao engenheiro João Marcos da TRANCIL que colaborou com a doação de parte dos indutores utilizados na abordagem prática do trabalho.

Aos meus amigos Bernardo, William e Laisla que sempre se dispuseram a me ajudar não só com soluções técnicas, mas ouvindo minhas angústias e incertezas.

Aos meus pais José Nicodemos e Rosilda, pelo apoio incondicional por toda a minha vida.

RESUMO

Este trabalho tem como propósito apresentar a avaliação do desempenho da função de distância do relé de proteção quando aplicado em linhas de transmissão com compensação série fixa e controlada por TCSC (*Thyristor-Controlled Series Capacitor*). Este tipo de proteção tem seu funcionamento baseado na impedância da linha, portanto é afetada por problemas relacionados a compensação série. São apresentadas as principais características de funcionamento deste tipo de compensação com maior ênfase no sistema controlado. Também são apontados os efeitos mais comuns da compensação série no funcionamento da proteção de distância. A maioria destes efeitos estão relacionados com a mudança na impedância da linha protegida, no entanto também tem relação com outros fenômenos, como transitórios e pela atuação de sistemas de proteção dos capacitores. Para a avaliação proposta foi desenvolvida uma montagem prática de linha de transmissão com tensão reduzida, assim como um módulo de TCSC trifásico que permite compensar a linha em até 40%. Estão descritos ensaios em que foram simulados diferentes tipos de faltas com diversas características de compensação em um ponto específico do sistema proposto. Durante os testes as tensões e correntes do sistema são amostrados por meio de uma placa de aquisição de dados e posteriormente processados em um algoritmo, desenvolvido no software Matlab, que simula a função de proteção de distância de característica MHO de um relé. Uma simulação computacional com características semelhantes à da abordagem prática foi desenvolvida no software Simulink para validação dos resultados. Por fim, são apresentadas as conclusões da análise.

Palavras chave: Relé de distância, compensação série, TCSC.

ABSTRACT

The purpose of this dissertation is to present a performance evaluation of the protection relay distance function when applied in series compensated transmission lines. This type of protection has its operation based on line impedance, so it is affected by problems related to series compensation. The main operating characteristics of this type of compensation are presented with greater emphasis on the controlled system (TCSC). It's also mentioned the most common effects of series compensation in the operation of the distance protection. These effects are not only related to the change in impedance of the protected line, but also with other phenomena, such as transients and the operation of capacitor protection systems. For the proposed evaluation a practical transmission line assembly was developed with reduced voltage, as well as a three-phase TCSC module that allows to compensate the line by up to 40%. There are described tests in which different types of faults with different compensation characteristics were simulated at a specific point in the proposed system. During the tests, the voltages and currents of the system are sampled by means of a data acquisition board and later processed in an algorithm, developed in Matlab software, which simulates the MHO characteristic distance protection function of a relay. A simulation with similar characteristics to the practical approach was developed in Simulink software to validate the results. Finally, the conclusions of the analysis are presented.

Key words: Distance relay, series compensation, TCSC.

SUMÁRIO

RESUMO	VI
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XVI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DO TEXTO	2
2. A COMPENSAÇÃO SÉRIE	4
2.1 COMPENSAÇÃO SÉRIE FIXA	4
2.1.1 <i>Grau de compensação</i>	5
2.1.2 <i>Fluxo de potência em uma linha de transmissão com compensação Série fixa</i>	7
2.1.3 <i>Estabilidade de sistemas com compensação fixa</i>	8
2.1.4 <i>Arranjo físico e sistema de proteção</i>	10
2.1.4.1 Proteção com centelhadores	11
2.1.4.2 Proteção com centelhador duplo	12
2.1.4.3 Proteção com varistores	13
2.1.5 <i>Localização da compensação série</i>	14
2.1.6 <i>Ressonância subsíncrona</i>	15
2.1.6.1 Auto-excitação	16
2.1.6.2 Conjugados transitórios	17
2.2 COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA POR TIRISTORES (TCSC)	17
2.2.1 <i>Vantagens do TCSC</i>	19
2.2.2 <i>Conceitos básicos do TCSC</i>	20
2.2.3 <i>Modos de operação do TCSC</i>	21
2.2.4 <i>Análise do funcionamento do TCSC</i>	23
2.2.5 <i>Reatância do TCSC</i>	28
2.2.6 <i>Limitações do TCSC</i>	31
2.2.6.1 Módulo simples de TCSC	32
2.2.6.2 Múltiplos módulos de TCSC	34
2.2.7 <i>Controle do TCSC</i>	35
2.2.8 <i>Amortecimento de oscilações eletromecânicas</i>	36
2.2.9 <i>Mitigação de ressonância subsíncrona</i>	37
3. INFLUÊNCIA DA COMPENSAÇÃO SÉRIE NA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA	39
3.1 INFLUÊNCIA NA IMPEDÂNCIA EFETIVA	39
3.1.1 <i>Bypass por centelhador</i>	40
3.1.2 <i>Bypass por Varistor</i>	41
3.2 TRANSITÓRIOS DE ALTA FREQUÊNCIA	49
3.3 TRANSITÓRIOS SUB-HARMÔNICOS	50
3.4 IMPEDÂNCIA DE FASE DESBALANCEADA	54
3.5 INVERSÃO DE TENSÃO E DE CORRENTE	54
3.5.1 <i>Inversão de corrente</i>	55
3.5.2 <i>Inversão de tensão</i>	56
3.6 IMPACTO DO TCSC	57
3.7 ESQUEMAS DE PROTEÇÃO UTILIZADOS EM LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE	58
3.7.1 <i>Esquemas de teleproteção</i>	58
3.7.1.1 Comparação direcional de bloqueio – DCB	59
3.7.1.2 Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance – POTT	60
4. SISTEMA PROPOSTO	62
4.1 LINHA DE TRANSMISSÃO	62
4.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO	64

4.2.1	<i>Medição de corrente</i>	64
4.2.2	<i>Medição de tensão</i>	66
4.3	RELÉ DE DISTÂNCIA	66
4.4	TCSC	68
4.4.1	<i>Seleção do capacitor</i>	68
4.4.2	<i>Seleção do indutor</i>	69
4.4.3	<i>Circuito de disparo</i>	71
4.4.4	<i>Sistema de Bypass dos capacitores</i>	73
4.4.5	<i>Simulação</i>	73
5.	RESULTADOS OBTIDOS	75
5.1	SISTEMA SEM COMPENSAÇÃO	76
5.1.1	<i>Funcionamento normal</i>	76
5.1.2	<i>Falta AT</i>	78
5.1.3	<i>Falta CA</i>	81
5.1.4	<i>Falta ABCT</i>	83
5.2	SISTEMA COM COMPENSAÇÃO FIXA.....	84
5.2.1	<i>Falta AT</i>	85
5.2.2	<i>Falta CA</i>	90
5.2.3	<i>Falta ABCT</i>	95
5.3	SISTEMA COM COMPENSAÇÃO SÉRIE CONTROLADA POR TCSC	101
5.3.1	<i>Falta AT</i>	102
5.3.1.1	<i>Falta AT bypass 2,3 pu</i>	104
5.3.1.2	<i>Falta AT bypass 3 pu</i>	107
5.3.2	<i>Falta CA</i>	109
5.3.2.1	<i>Falta CA bypass 2,3 pu</i>	112
5.3.2.2	<i>Falta CA bypass 3 pu</i>	114
5.3.3	<i>Falta ABCT</i>	117
5.3.3.1	<i>Falta ABCT bypass 2,3 pu</i>	120
5.3.3.2	<i>Falta ABCT bypass 3 pu</i>	122
5.4	VISÃO GERAL DOS RESULTADOS.....	125
6.	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	126
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
	ANEXO 1 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PCI-6221	131
	ANEXO 2 – DATASHEET SENSOR DE CORRENTE LA55-P/SP1	132
	ANEXO 3 – ESPECIFICAÇÕES TRIAC BTA06-600B.....	134
	ANEXO 4 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO MICROCONTROLADOR PIC18F4550.....	135
	ANEXO 5 – CARACTERÍSTICAS DOS DIODOS SUPRESSORES DE SURTO	136

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Influência do grau de compensação na potência transmitida por uma linha de transmissão. Fonte: adaptado de (MATELE, 1999).	6
Figura 2.2 - Representação do fluxo de potência em uma linha de transmissão. Fonte: Adaptado de (FONTINI e ET AL., 2013) e (OLIVEIRA, 2007).	7
Figura 2.3 - Exemplo de estabilidade em sistema com compensação série. Fonte: (FONTINI e ET AL., 2013).	9
Figura 2.4 - Oscilação da potência no sistema da Figura 2.3. Fonte: (FONTINI e ET AL., 2013), (D'AJUZ e ET AL., 1985).	10
Figura 2.5 - Capacitor série protegido por centelhador. Fonte: (FONTINI e ET AL., 2013). .	12
Figura 2.6 - Banco de capacitores protegido por centelhador duplo. Fonte (FONTINI e ET AL., 2013).	13
Figura 2.7 - Circuito de proteção com varistor. Fonte: (FONTINI e ET AL., 2013).	14
Figura 2.8 - Configuração básica de um TCSC. Fonte: (PADIYAR, 2007).	20
Figura 2.9 - Módulo prático típico de um TCSC. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).	20
Figura 2.10 - Sistema típico de TCSC dividido em módulos. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).	21
Figura 2.11 - Diferentes modos de operação do TCSC: (a) modo de bypass dos tiristores; (b) modo com tiristores bloqueados; (c) modo com tiristores conduzindo parcialmente (reatância capacitiva); e (d) tiristores conduzindo parcialmente (reatância indutiva) Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).	22
Figura 2.12 - Circuito de um TCSC. Fonte: (PADIYAR, 2007).	24
Figura 2.13 - Formas de onda de $i_s(t)$, $I_T(t)$ e $V_C(t)$. Fonte (PADIYAR, 2007):	25
Figura 2.14 - Impedância característica x ângulo de disparo do TCSC. Fonte: (PADIYAR, 2007) (MATHUR e VARMA, 2002) (HINGORANI e GYUGYI, 2000).	30
Figura 2.15 - Características de impedância do TCSC em função do ângulo de disparo para relações X_L/X_C iguais a 0.075 e 0.025 respectivamente, faixa de valores onde ocorrem múltiplas zonas de ressonância. Fonte: Autor.	31
Figura 2.16 - Curva de capacidade de um TCSC típico. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).	32
Figura 2.17 - Curva X_{TCSC} x corrente de um TCSC típico. Fonte: Adaptado de (MATHUR e VARMA, 2002).	33
Figura 2.18 - Curva de capacidade de $V \times I$ de um TCSC de dois módulos. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).	34
Figura 2.19 - Curvas de capacidade de $V \times I$ para um TCSC com múltiplos módulos. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).	35
Figura 2.20 - Curvas de capacidade de $X_{TCSC} \times I$ para um TCSC com múltiplos módulos. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).	35
Figura 2.21 – Formas de onda que exemplificam o amortecimento de oscilações de potência por meio do controle da compensação série. (a) ângulo do gerador, (b) potência transmitida e (c) grau de compensação. Fonte: Adaptado de (HINGORANI e GYUGYI, 2000).	37
Figura 3.1 - Esquema típico de proteção contra sobretensão de capacitores utilizados na compensação série. Fonte: adaptado de (ANDERSON, 1999).	40
Figura 3.2 - Tensão e corrente nos terminais de um capacitor protegido por MOV em uma situação de sobrecarga leve, na qual não ocorreu condução do MOV. Fonte: (SANTOS, 2006).	41
Figura 3.3 - Tensão e corrente nos terminais de um capacitor protegido por MOV em uma situação de sobrecarga severa, na qual ocorreu condução do MOV. Fonte: (SANTOS, 2006).	42

Figura 3.4 - Modelo linearizado da impedância de um varistor. Fonte: (JUSAN, 2007).....	42
Figura 3.5 - Resistência e reatância efetivas de um banco de capacitores protegido por varistor em função da corrente. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).	43
Figura 3.6 - Resistência e reatância efetivas do circuito equivalente formado por um capacitor e um varistor em paralelo. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999) (SANTOS, 2006) (MARTTILA, 1992).....	43
Figura 3.7 - Mudança na impedância vista pelo relé de distância quando a compensação se encontra dentro do "loop" de falta. Fonte: Adaptado de (KASZTENNY, 2001).....	44
Figura 3.8 - Exemplo de sistema elétrico com compensação série e sistema de bypass dos capacitores por MOV. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).	45
Figura 3.9 - Intensidade da corrente vista pelo relé da barra R em função da localização da falta para diferentes graus de compensação. (a) com sistema de bypass dos capacitores. (b) sem bypass. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999)	46
Figura 3.10 - Condução do varistor em função da localização da falta e ao nível de compensação. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).	47
Figura 3.11 - Tensão vista pelo relé instalado na barra R em função da localização da falta para diversos graus de compensação. (a) com varistor de proteção para os capacitores. (b) sem proteção dos capacitores. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).	47
Figura 3.12 - Característica de impedância da proteção de distância estudada no exemplo. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).	48
Figura 3.13 - Linha de transmissão com compensação séria no terminal remoto. Fonte: Adaptado de (MILLER, WATSON, <i>et al.</i> , 2014).	50
Figura 3.14 - Sobrealcance do relé de proteção devido a transitórios subsíncronos. Fonte: (MILLER, WATSON, <i>et al.</i> , 2014).	51
Figura 3.15 - Formas de onda de tensão em uma linha com compensação série em falta (lado da barra). Fonte: Adaptado de (KASZTENNY, 2001).	52
Figura 3.16 - Formas de onda de corrente em uma linha com compensação série em falta. Fonte: Adaptado de (KASZTENNY, 2001).	52
Figura 3.17 - Fator de tensão de uma linha de transmissão compensada em falta. Fonte: Adaptado de (KASZTENNY, 2001).	53
Figura 3.18 - Fator de corrente de uma linha de transmissão compensada em falta. Fonte: Adaptado de (KASZTENNY, 2001).	53
Figura 3.19 - Fasores de tensão em uma linha de transmissão não compensada sob falta franca. Fonte: (SANTOS, 2006).	55
Figura 3.20 - Diagramas fasoriais das correntes em uma linha com compensação série em falta franca com inversão de corrente no terminal R. Fonte: (SANTOS, 2006).....	56
Figura 3.21 - Diagramas fasoriais de uma linha em falta franca com inversão de tensão no terminal R. Fonte: (SANTOS, 2006).....	57
Figura 3.22 - Linha de transmissão protegida por relé de distância. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).	59
Figura 3.23 - Sistema elétrico que utiliza relés de distância aliados ao esquema de proteção DCB. Fonte: Adaptado de (SIDHU e KHEDERZADEH, 2006).	60
Figura 3.24 - Sistema elétrico que utiliza relés de distância aliados ao esquema de proteção DCB. Fonte: Adaptado de (RUIZ, 2012).....	60
Figura 4.1 - Montagem prática do sistema proposto.	62
Figura 4.2 - Representação do sistema elétrico proposto.	63
Figura 4.3 - Indutor L1 - 50 mH.	63
Figura 4.4 - indutor L2 - 25 mH.	63
Figura 4.5 - Representação do sistema de amostragem dos sinais de corrente.	64
Figura 4.6 - Diagrama de conexão do sensor de efeito hall LA 55-P/SP1I.	65
Figura 4.7 - Características do filtro anti-aliasing do circuito de amostragem de corrente. ...	65

Figura 4.8 - Placa de medição de corrente.	66
Figura 4.9 - Representação do sistema de amostragem dos sinais de tensão.....	66
Figura 4.10 - Etapas do processamento de dados do relé de distância implementado.	67
Figura 4.11 - Banco de capacitores utilizado em uma das fases do TCSC. Fonte: Autor.....	69
Figura 4.12 - Curva de reatância do TCSC projetado em função do ângulo de disparo.	70
Figura 4.13 - Curva de reatância com múltiplas zonas de ressonância devido ao valor de λ superior à 3.....	70
Figura 4.14 - Indutor utilizado no TCR.	71
Figura 4.15 - Representação do circuito de disparo.	71
Figura 4.16 - Diagrama de conexões do sensor LV25-P-SP2.....	72
Figura 4.17 – Placa contendo os TRIAC's do sistema de chaveamento do TCSC. Fonte: Autor.....	73
Figura 4.18 - Sistema simulado no SIMULINK.....	74
Figura 5.1 - Formas de onda de tensões e correntes obtidas por simulação durante funcionamento normal do sistema.	77
Figura 5.2 - Formas de onda de tensões e correntes obtidas por medições durante funcionamento normal do sistema.	77
Figura 5.3 - Tensões e correntes obtidas por simulação durante falta entre fase e terra no sistema estudado.....	78
Figura 5.4 - Distâncias vistas por todas as unidade de proteção do relé durante falta entre fase e terra (dados simulados).....	78
Figura 5.5 – Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta entre fase e terra (dados simulados).	79
Figura 5.6 - Tensões e correntes obtidas por medições durante falta entre fase e terra no sistema estudado.....	80
Figura 5.7 - Distâncias vistas por todas as unidade de proteção do relé durante falta entre fase e terra (dados medidos).	80
Figura 5.8 – Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta entre fase e terra (dados medidos).....	81
Figura 5.9– Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta entre duas fases - CA (dados simulados).	82
Figura 5.10 - Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta entre duas fases - CA (dados medidos).....	82
Figura 5.11 - Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta trifásica - ABCT (dados simulados).	83
Figura 5.12 - Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta trifásica - ABCT (dados medidos).....	84
Figura 5.13 - Formas de onda de tensão no capacitor de uma das fases do sistema com compensação fixa em operação normal.....	85
Figura 5.14 – Correntes no sistema com compensação fixa de 20% durante falta AT. Dados simulados e medidos.	86
Figura 5.15 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema com compensação série fixa de 20% (dados simulados).	87
Figura 5.16 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema com compensação série fixa de 20% (dados medidos).	87
Figura 5.17 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT. Dados de simulação e medidos.....	88
Figura 5.18 - Correntes durante falta AT com sistema de bypass em funcionamento. Dados de simulação e medidos.	89

Figura 5.19 - Tensão nos terminais do capacitor da fase A durante falta AT com sistema de bypass em funcionamento. Dados de simulação e medidos.	89
Figura 5.20 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema com compensação série fixa de 20% com sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (simulação).	90
Figura 5.21 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema com compensação série fixa de 20% com sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (dados medidos).	90
Figura 5.22 - Correntes no sistema com compensação fixa de 20% durante falta CA. Dados simulados e medidos.	91
Figura 5.23 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema com compensação série fixa de 20% (dados simulados).	92
Figura 5.24 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema com compensação série fixa de 20% (dados medidos).	92
Figura 5.25 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta CA. Dados de simulação e medidos.	93
Figura 5.26 - Correntes no sistema com compensação fixa de 20% durante falta CA com sistema de bypass em funcionamento. Dados simulados e medidos.	94
Figura 5.27 - Tensão nos terminais do capacitor da fase A durante falta CA com sistema de bypass em funcionamento. Dados de simulação e medidos.	94
Figura 5.28 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema com compensação série fixa de 20% e sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (dados simulados).	95
Figura 5.29 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema com compensação série fixa de 20% e sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (dados Medidos).	95
Figura 5.30 - Correntes no sistema com compensação fixa de 20% durante falta ABCT. Dados simulados e medidos.	96
Figura 5.31 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema com compensação série fixa de 20% (dados simulados).	97
Figura 5.32 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema com compensação série fixa de 20% (dados medidos).	97
Figura 5.33 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta ABCT. Dados de simulação e medidos.	98
Figura 5.34 - Correntes no sistema com compensação fixa de 20% durante falta ABCT com sistema de bypass em funcionamento. Dados simulados e medidos.	99
Figura 5.35 - Tensão nos terminais do capacitor da fase A durante falta ABCT com sistema de bypass em funcionamento. Dados de simulação e medidos.	99
Figura 5.36 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema com compensação série fixa de 20% e sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (dados simulados).	100
Figura 5.37 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema com compensação série fixa de 20% e sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (dados medidos).	100
Figura 5.38 - Formas de onda de tensão no TCSC de uma das fases do sistema em operação normal. Dados simulados e medidos.	101
Figura 5.39 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta AT. Dados simulados e medidos.	102
Figura 5.40 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT. Dados de simulação e medidos.	103

Figura 5.41 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados simulados).....	103
Figura 5.42 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados medidos).	104
Figura 5.43 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados simulados e medidos.	105
Figura 5.44 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados de simulação e medidos.	105
Figura 5.45 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu (dados simulados).	106
Figura 5.46 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu (dados medidos).	106
Figura 5.47 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu. Dados simulados e medidos.	107
Figura 5.48 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 32 V. Dados de simulação e medidos.	108
Figura 5.49 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados simulados).	108
Figura 5.50 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados medidos).	109
Figura 5.51 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta CA. Dados simulados e medidos.	110
Figura 5.52 – Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta CA. Dados de simulação e medidos.	110
Figura 5.53 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados simulados).....	111
Figura 5.54 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados medidos).	111
Figura 5.55 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta CA com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados simulados e medidos.	112
Figura 5.56 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados de simulação e medidos.	112
Figura 5.57 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC CA com sistema de bypass dos capacitores fixado 2,3 pu (dados de simulação)	113
Figura 5.58 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu (dados medidos).	114
Figura 5.59 – Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta CA com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu. Dados simulados e medidos.	115

Figura 5.60 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu. Dados de simulação e medidos.	115
Figura 5.61 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC CA com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados simulados).	116
Figura 5.62 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados medidos).	116
Figura 5.63 – Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta ABCT. Dados simulados e medidos.	117
Figura 5.64 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta ABCT. Dados de simulação e medidos.	118
Figura 5.65 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados simulados).	119
Figura 5.66 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados Medidos).	119
Figura 5.67 – Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados simulados e medidos.	120
Figura 5.68 – Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados de simulação e medidos.	121
Figura 5.69 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu (dados simulados).	121
Figura 5.70 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu (dados medidos).	122
Figura 5.71 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu. Dados simulados e medidos.	123
Figura 5.72 – Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu. Dados de simulação e medidos.	123
Figura 5.73 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados simulados)	124
Figura 5.74 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados medidos).	124

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Alcance do relé para vários graus de compensação. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).	48
Tabela 4.1 - Características dos indutores utilizados no sistema elétrico proposto. .	64
Tabela 4.2 - Critérios para determinação do tipo de falta segundo atuação das unidades de proteção.....	68
Tabela 5.1 - Relação de todos os ensaios executados no sistema estudado.....	75
Tabela 5.2 - Correntes na linha de transmissão para cada grau de compensação analisado.	76
Tabela 5.3 - Comparação dos resultados obtidos a partir de dados medidos e simulados para falta CA.....	81
Tabela 5.4 - Comparação dos resultados obtidos a partir de dados medidos e simulados para falta ABCT.	83
Tabela 5.5 - Localização da falta indicada pelas unidades CAT e CA durante falta CA em sistema compensado em 20% com bypass em funcionamento.	93
Tabela 5.6 - Relação dos resultados obtidos: Fonte: Autor.	125

1. INTRODUÇÃO

1.1 Relevância

Em linhas de transmissão longas, é comum a reatância longitudinal atingir valores que restringem o fluxo de potência do sistema a valores inferiores aos limites térmicos dos condutores. Neste cenário a utilização da compensação série promove grandes benefícios, pois além de aumentar a capacidade de transferência de potência, evita ou adia investimentos na construção de novas linhas de transmissão.

A compensação série, quando aplicada de forma variável, controlada por meio do TCSC (*Thyristor-Controlled Series Capacitor*) oferece algumas vantagens extras em relação à compensação fixa, como a possibilidade da mitigação do problema de ressonância subsíncrona e controle do fluxo de potência em linhas de transmissão.

Apesar das vantagens que apresenta, a compensação série também causa problemas. Um dos principais é a ocorrência da ressonância subsíncrona devido à interação entre o sistema de compensação, a linha de transmissão e as máquinas geradoras de usinas térmicas (TENÓRIO, 1999). Outros problemas são observados nos sistemas de proteção, dentre os quais destacam-se fenômenos como inversão de tensão, inversão de corrente e frequências sub-harmônicas. Na compensação com TCSC os problemas nos sistemas de proteção podem ser até mais pronunciados devido à variação dinâmica da reatância da linha.

De todas as funções de proteção de linhas de transmissão, a de distância é a que apresenta mais problemas relacionados à compensação série, principalmente no que diz respeito à determinação da direcionalidade e variação do alcance dos relés. A forma como esses problemas se manifestam depende de fatores como, a localização dos relés, a localização da falta, o grau de compensação, o tipo de polarização utilizada, a localização da compensação na linha em relação ao local da falta e a intensidade da corrente. Nem sempre os problemas citados impedem os relés de atuarem, mas no caso de sobrealcance, por exemplo, o relé pode enxergar uma falta que ocorreu fora da zona protegida, ou ainda, no caso das inversões o relé pode atuar indevidamente para faltas reversas. Também são verificados erros graves na determinação da localização da falta.

Esta dissertação apresenta uma análise da atuação do relé de distância em linhas de transmissão com compensação série, fixa e controlada, em um sistema elétrico com tensão reduzida. Em seus trabalhos, autores como, (SHOUYUAN, XIAOXIN e YAJIAN, 1998), (PATEL, 2017), (JOHNSON., 2006) e (NYATI, WEGNER, *et al.*, 1993), também apresentaram o desenvolvimento de sistemas de compensação série controlada (TCSC) em escala reduzida.

No entanto, seus objetivos eram diferentes do presente trabalho, e em alguns casos não foram apresentados resultados de testes práticos no sistema desenvolvido.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal investigar os principais efeitos da compensação série de linhas de transmissão no desempenho do relé de distância.

Para realizar a pesquisa foi desenvolvido um projeto de linha de transmissão com tensão reduzida e um módulo trifásico de compensação série controlada, um TCSC que também pode atuar com valor fixo. Nesse sistema são simuladas faltas com diferentes características e os dados de tensão e corrente são processados por um algoritmo de relé de distância de característica MHO. O sistema estudado também foi modelado no software Simulink para dar suporte aos resultados.

Como objetivos específicos pode-se destacar:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação e funcionamento da compensação série e dos seus efeitos no desempenho do relé de distância;
- Desenvolver um módulo de TCSC trifásico controlado em malha aberta por meio de um microcontrolador.

1.3 Estrutura do Texto

No capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a compensação série. São mostrados os principais conceitos sobre o princípio de operação dessa tecnologia. Também são detalhados os benefícios da compensação, bem como os efeitos negativos no sistema elétrico. Em seguida é dada atenção especial à compensação série controlada, apresentando seu princípio de funcionamento e características construtivas e operativas.

O capítulo 3 também é de revisão bibliográfica. Trata da influência dos sistemas de compensação série na proteção de distância. Inicialmente é dado destaque especial as alterações provocadas pela compensação na impedância efetiva da linha, principalmente durante faltas, quando há possibilidade de atuação dos sistemas de proteção contra sobretensão dos capacitores, retirando-os de operação. Por fim, são citados os demais fenômenos mais recorrentes, como as inversões de tensão e de corrente, e o possível efeito da dinâmica do TCSC.

O capítulo 4 é dedicado à apresentação do sistema elétrico estudado. Inicialmente são descritas as características elétricas da linha de transmissão, como sua impedância e tensão

de operação. Em seguida é apresentado o sistema de medição cuja função é adequar os sinais de tensão e corrente do circuito para serem amostrados por uma placa de aquisição de dados. Também é apresentado o princípio de funcionamento do algoritmo que simula a operação de um relé de distância. Nesse capítulo também são retratados os critérios para especificação de cada um dos elementos que compõe o TCSC, como capacitor, reator, circuito de disparo e sistema de proteção contra sobretensão. Por fim, destaca-se o modelamento do sistema estudado no software Simulink.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos por meio de ensaios, práticos e simulados, de faltas no sistema proposto. Cada ensaio envolve características específicas quanto ao tipo de falta, tipo de compensação (série ou controlada) e presença ou não de sistema de proteção contra sobretensão dos capacitores. Ao final os resultados são analisados e comparados entre si.

Finalmente, no capítulo 6, a conclusão dos resultados e dos estudos é apresentada, assim como a sugestão para trabalhos futuros.

2. A COMPENSAÇÃO SÉRIE

Com o constante aumento do consumo de energia elétrica e a necessidade de ampliar a confiabilidade do sistema elétrico interligando a maior quantidade de áreas geradoras possível, muitas vezes é necessário expandir a capacidade do sistema de transmissão de energia elétrica.

Uma solução possível é elevar a tensão nominal do sistema, dessa forma a potência transmitida também seria elevada. No entanto, esta alternativa é limitada devido a princípios construtivos dos equipamentos envolvidos e também pelos limites impostos pelas agências reguladoras do setor energético. Outra forma de solucionar o problema é a construção de novas linhas em paralelo, mas isso pode demandar elevados investimentos financeiros e impactos ambientais.

Portanto, neste cenário, torna-se interessante a compensação série da linha por meio da instalação de capacitores em série de forma a anular parcialmente os valores de reatâncias indutivas longitudinais, aumentando a capacidade de transmissão.

No Brasil, as primeiras instalações em operação são de 1989, no sistema de 765 kV projetado para a transmissão da energia da usina de Itaipu. A partir de 1999, com a crescente interligação dos sistemas das regiões Sudeste, Norte e Nordeste, houve muitas aplicações em linhas de 500 kV. Atualmente, o sistema interligado possui 64 linhas com capacitores série instalados, sendo a maioria deles no sistema de 500 kV (44 instalações) (FONTINI e ET AL., 2013).

Avanços tecnológicos recentes tornaram possível o emprego de elementos de eletrônica de potência nos sistemas elétricos. Tais sistemas, chamados de FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*), podem ser ligados ao sistema elétrico de potência (SEP) em série, como TCSC, ou em paralelo, a depender do tipo de dispositivo.

Nas seções seguintes são dados mais detalhes do funcionamento e de aspectos construtivos da compensação série fixa e controlada a tiristores.

2.1 Compensação Série Fixa

A compensação série fixa consiste na instalação de bancos de capacitores de valores fixos em série com a linha de transmissão para anular parcialmente a reatância indutiva da linha, funcionando como uma fonte de reativos conectados em série (GAMA, 1995). Sua concepção se deu na década de 1950 com o intuito de possibilitar a transmissão de energia em corrente alternada para longas distâncias e seu uso comercial começou a partir de 1960 (MATELE, 1999).

A utilização da compensação série proporciona: (FONTINI e ET AL., 2013) (MATELE, 1999):

- Aumento da capacidade de transmissão de potência na linha;
- Aumento da estabilidade do sistema;
- Diminuição das necessidades de equipamentos de controle da tensão, como capacitores em derivação, pois propicia menor queda de tensão ao longo da linha;
- Melhor divisão de potência entre linhas, reduzindo as perdas globais do sistema;
- Economia nos custos, quando comparados a outras alternativas tecnicamente possíveis;

Apesar das vantagens citadas, a compensação série também gera problemas, principalmente para a proteção de linhas de transmissão por relés de distância, pois estes são altamente dependentes da impedância da linha. Os principais problemas causados pela compensação série são (MOURA, MOREIRA e SILVA, 2007):

- Variação no alcance do relé de distância;
- Inversão de corrente;
- Inversão de tensão;
- Ressonância subsíncrona.

Mesmo considerando as desvantagens citadas, ainda assim a compensação série é um método viável para aumentar a capacidade de transmissão de energia, pois conforme dito anteriormente, a instalação de compensação série em linhas existentes pode protelar e até mesmo evitar a construção de novas linhas.

Os custos para construção de uma nova linha de transmissão são muito superiores ao da instalação de uma compensação série fixa, além do impacto ambiental devido à compensação ser instalada em área bem menor. Diante das dificuldades ambientais e econômicas da construção de novas linhas de transmissão de energia elétrica, a utilização da compensação série fixa se tornou um recurso comumente utilizado pelas empresas transmissoras do sistema elétrico brasileiro (OLIVEIRA, 2007).

2.1.1 Grau de compensação

O grau de compensação é uma forma de relacionar o valor da reatância do capacitor utilizado na compensação com a reatância indutiva da linha na qual este está instalado (MATELE, 1999). Ele é dado em valor percentual, k , e pode ser definido conforme equação (2.1):

$$k = \frac{X_C}{X_L} \times 100\% \quad (2.1)$$

Onde:

k é o grau de compensação da linha [%];

X_C é a reatância do capacitor série [Ω];

X_L é a reatância longitudinal da linha de transmissão compensada [Ω].

Em geral, o grau de compensação série varia entre 20% e 75%, a depender de fatores técnicos e econômicos. O limite inferior é dado por limitações econômicas, pois compensar uma linha em menos de 20% é inviável, pois o custo é relativamente alto. Já compensações acima de 75% costumam alcançar os limites térmicos dos condutores (MATELE, 1999).

O efeito do grau de compensação na capacidade de transmissão de uma linha pode ser visto da Figura 2.1. A quantidade k equivale ao grau de compensação série de uma linha, enquanto δ é a diferença angular entre as tensões nos dois terminais da mesma linha.

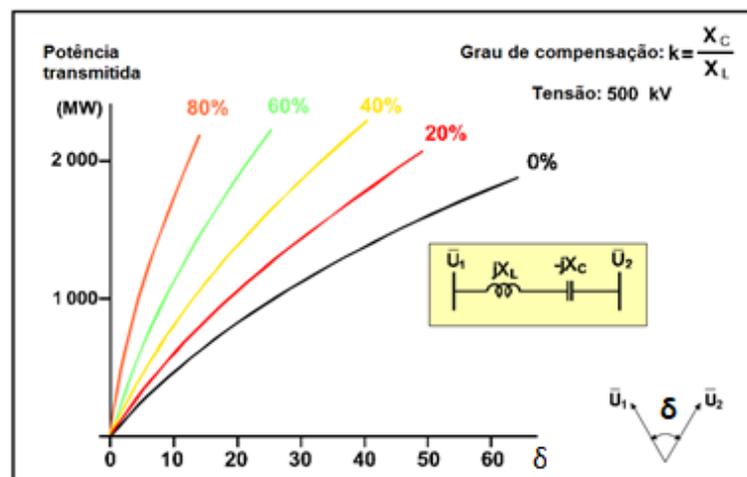


Figura 2.1 - Influência do grau de compensação na potência transmitida por uma linha de transmissão.
Fonte: adaptado de (MATELE, 1999).

A Figura 2.1 mostra que para uma diferença angular fixa entre as tensões nos terminais da linha de transmissão, a capacidade de transmissão de energia da linha aumenta com o aumento do grau de compensação. Verifica-se também que para um mesmo valor de potência transmitida a diferença angular diminui com o aumento no nível de compensação, isso é uma indicação que a estabilidade dinâmica do sistema aumenta devido à compensação (MATELE, 1999).

2.1.2 Fluxo de potência em uma linha de transmissão com compensação Série fixa

Em uma linha de transmissão de energia elétrica, o fluxo de potência entre dois terminais pode ser compreendido conforme apresentado na Figura 2.2.

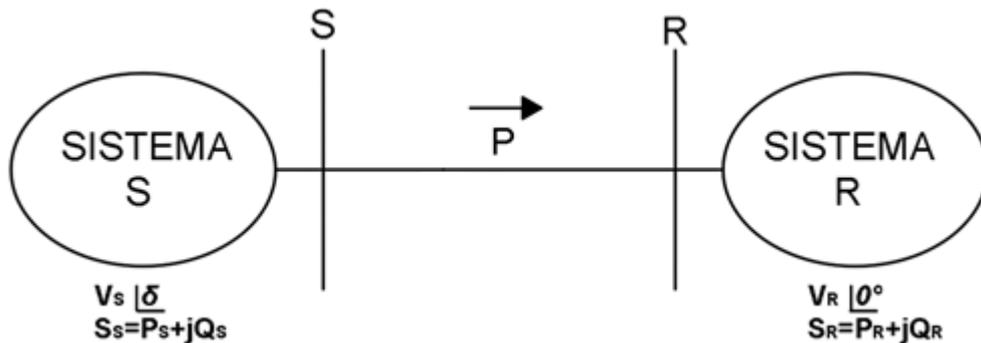


Figura 2.2 - Representação do fluxo de potência em uma linha de transmissão. Fonte: Adaptado de (FONTINI e ET AL., 2013) e (OLIVEIRA, 2007).

Considerando as constantes generalizadas da linha de transmissão (A, B, C e D) tem-se que a potência ativa transmitida entre os terminais S e R é:

$$P_{SR} = \frac{|V_R| \cdot |V_S|}{|B|} \cos(\tau - \delta) - \frac{|A| \cdot |V_R|^2}{|B|} \cos(\tau - \Phi) \quad (2.2)$$

Onde τ é o argumento de B e Φ é o argumento de A.

A generalização da equação (2.2) para uma linha de transmissão sem perdas conduz a equação (2.3) a seguir.

$$P_{SR} = \frac{|V_S| \cdot |V_R|}{X_{SR}} \cdot \text{sen } \delta \quad (2.3)$$

Onde:

P_{SR} é a potência ativa transmitida da barra S para a barra R;

V_S, V_R são os módulos das tensões nas barras S e R respectivamente;

δ equivale a $\delta_S - \delta_R$, ângulos entre as tensões das barras S e R.

A equação (2.3) permite chegar as seguintes considerações:

- A elevação de V_S e V_R proporciona o aumento de P;

- O uso de compensação em paralelo também seria um caminho para essa elevação, no entanto a potência reativa gerada por essa solução é proporcional ao quadrado da tensão, enquanto na compensação série essa proporção se dá com o quadrado da corrente, sendo mais efetiva (D'AJUZ e ET AL., 1985);
- Aumento de δ até 90° proporcionaria um aumento de P mais significativo que as propostas acima. No entanto, quando ocorre um defeito no sistema, para uma mesma potência transmitida, quanto menor δ , maior a margem de estabilidade para o período "pós-defeito";
- A redução da reatância da linha também proporciona aumento da potência. A reatância negativa do capacitor série permite que a reatância entre S e R seja bastante reduzida. Há casos em que se chegou à compensação de 90%.

2.1.3 Estabilidade de sistemas com compensação fixa

Durante todo o tempo de operação os sistemas elétricos estão sujeitos a distúrbios que colocam em risco seu equilíbrio. Estes distúrbios podem ser, por exemplo, a variação brusca de carga, perda de geração, ocorrência de um curto-circuito ou ainda o desligamento de uma linha de transmissão. Como consequência ocorrem flutuações de potência ativa e reativa, que são seguidas de oscilações eletromecânicas nos geradores. Tais perturbações têm seus efeitos amplificados quanto mais próximo estiver o sistema do seu carregamento máximo.

As máquinas síncronas em um sistema se mantêm em sincronismo por meio de forças restauradoras, pois, a cada instante, uma ou mais unidades tendem a acelerar ou desacelerar em relação às outras unidades ligadas à mesma rede (MELLO, 1983). Quando o sistema elétrico está operando em regime normal, existe equilíbrio entre a potência mecânica dos rotores das máquinas e a potência elétrica na saída destas, desta forma, mantendo a velocidade do rotor constante. Ao ocorrer uma perturbação no sistema, esse equilíbrio desaparece, os rotores das máquinas aceleram ou desaceleram, fato que altera o fluxo de potência entre barramentos.

Quando um distúrbio provoca um desequilíbrio, pode fazer com que o rotor de uma máquina síncrona perca o sincronismo com o campo girante produzido pela corrente do estator. Assim, o rotor gira em relação a esse campo, ocorrendo um escorregamento, a cada vez que o rotor passa pela região angular em que funcionamento seria estável, surgem forças que tendem a levar o rotor para o sincronismo, e assim, estabelecer um novo ponto de operação (PAIXÃO, 2006). O período de tempo necessário para que ocorra esse reajuste é caracterizado por oscilações eletromecânicas inerentes ao sistema de potência. Uma dada oscilação do rotor é acompanhada de um conjugado elétrico de mesma frequência e

proporcional à amplitude da oscilação. Esse conjugado elétrico pode ser decomposto em duas componentes ortogonais, denominadas de conjugado sincronizante e conjugado de amortecimento. O primeiro está relacionado à região de estabilidade e, portanto, à capacidade de uma máquina de se manter em sincronismo diante de um distúrbio, enquanto o segundo está relacionado ao tempo gasto para o estabelecimento do novo ponto de operação (GONÇALVES, 2007).

A utilização da compensação série melhora a estabilidade de um sistema, pois fornece parte da potência reativa consumida pela reatância série da linha de transmissão. Assim, o sistema passa a ter uma maior reserva de potência reativa para utilizar na ocorrência de um distúrbio. Além disso, a potência reativa fornecida por um capacitor série aumenta em proporção ao quadrado da corrente. Portanto, quando há um aumento na corrente elétrica, a reatância série da linha consome mais potência reativa, e o capacitor série atua sobre o fluxo de potência fornecendo mais potência reativa ao sistema e conseqüentemente aumentando seu limite de estabilidade (GONÇALVES, 2007).

Para ilustrar o efeito da compensação série dentro do problema de estabilidade de um sistema elétrico composto por duas linhas de transmissão em paralelo, está apresentada a seguir a análise da ocorrência de uma falta no ponto C em uma das linhas entre as barras A e B da Figura 2.3.

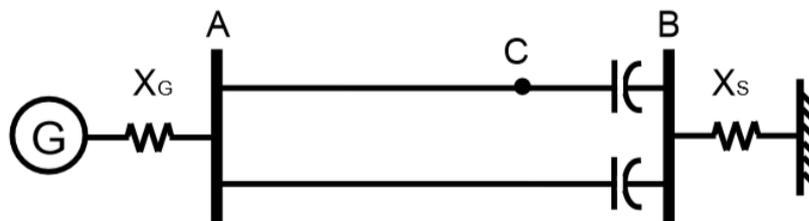


Figura 2.3 - Exemplo de estabilidade em sistema com compensação série. Fonte: (FONTINI e ET AL., 2013).

Para auxiliar na análise, a Figura 2.4, mostra a relação da oscilação da potência elétrica com o ângulo do gerador durante o período de instabilidade causado pela falta. Considera-se, de forma simplificada, a não atuação dos reguladores de tensão e velocidade (D'AJUZ e ET AL., 1985).

Inicialmente o sistema encontra-se em regime de operação normal, a potência elétrica do gerador P_{E1} é constante e igual a potência mecânica no eixo da turbina P_M e o ângulo de operação do gerador é δ_1 .

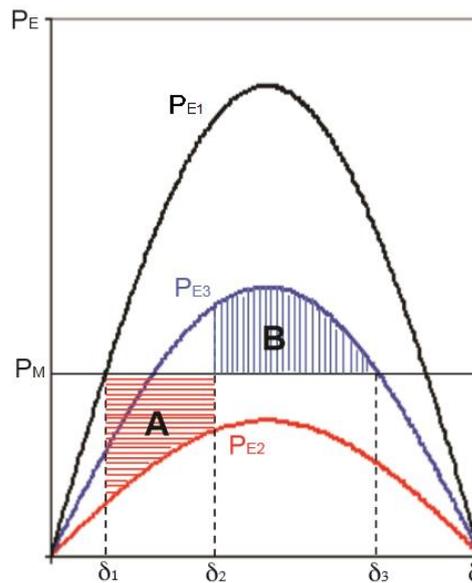


Figura 2.4 - Oscilação da potência no sistema da Figura 2.3. Fonte: (FONTINI e ET AL., 2013), (D'AJUZ e ET AL., 1985).

Quando ocorre o defeito, a potência elétrica cai para a curva P_{E2} , pois a impedância equivalente do sistema aumenta e, como foi mostrado anteriormente na equação (2.3), a potência transmitida é inversamente proporcional a reatância entre as barras A e B. Como a potência mecânica no eixo do gerador é maior que a potência elétrica de saída ($P_M > P_{E2}$), a máquina começa a acelerar, aumentando o ângulo para δ_2 .

Com a extinção da falta, a potência elétrica passa a ser dada pela curva P_{E3} . Como esta curva é superior a P_M , há o efeito de frenagem da máquina, até o ângulo de operação chegar a δ_3 . Se nesse ponto a área B for maior que a área A, o sistema será estável. No sistema com compensação série, a área B, de desaceleração é aumentada, o que é um ponto positivo para que o sistema tenha mais condições de retornar a um ponto de operação estável após uma perturbação.

Neste cenário a compensação série fixa contribui apenas sobre o conjugado de sincronismo, pois não é capaz de responder de forma dinâmica no amortecimento de oscilações. A utilização de compensadores controláveis, que será apresentada em seções adiante, permite a identificação da frequência de oscilação e a resposta à anormalidade verificada.

2.1.4 Arranjo físico e sistema de proteção

As sobretensões transitórias durante um curto-circuito na rede impõem a necessidade do sistema de proteção às unidades capacitivas que compõem o capacitor série. Quando ocorre uma falta no sistema, dependendo da sua localização, do grau de compensação série

e das características da rede elétrica, a corrente de curto-circuito pode atingir valores elevadíssimos, até da ordem de uma condição de ressonância à frequência industrial.

Como a tensão através do capacitor é definida como a integral da corrente dividida pela capacitância, para valores elevados de corrente, como os verificados durante faltas, podem ocorrer valores muito elevados de tensão nos terminais do capacitor, o que inviabilizaria economicamente o projeto do capacitor série.

Para que isso não ocorra, são instalados equipamentos de proteção com resposta imediata, para o desvio da corrente e a proteção contra sobretensões. Até os anos 80, esquemas com centelhadores eram utilizados para o desvio da corrente, mas desde os anos 90 os varistores a óxido metálico (*Metal Oxide Varistor - MOV*) foram adicionados ao esquema de proteção.

2.1.4.1 Proteção com centelhadores

A compensação série fixa não é composta apenas pelo banco de capacitores instalado em série com a linha de transmissão. Para operar de forma segura, este tipo de sistema requer controle, proteção e supervisão para funcionar como parte integrante do sistema elétrico de potência. Além disso, como o capacitor funciona no mesmo nível de tensão da linha, esse deve estar devidamente isolado da terra.

Quando os primeiros bancos de capacitores foram instalados, a tecnologia mais confiável para proteção era o centelhador, mostrado no esquema simplificado da Figura 2.5.

Esse sistema funciona da seguinte forma:

- O centelhador G dispara e desvia a corrente do capacitor tão logo o nível de tensão, entre seus terminais, atinja o seu ajuste;
 - Após o disparo, o disjuntor D é fechado, desviando a corrente do centelhador para permitir seu resfriamento e condições dielétricas adequadas à proteção do capacitor;
 - Algum tempo após a eliminação do defeito, o disjuntor é aberto, restabelecendo o capacitor à operação.
-

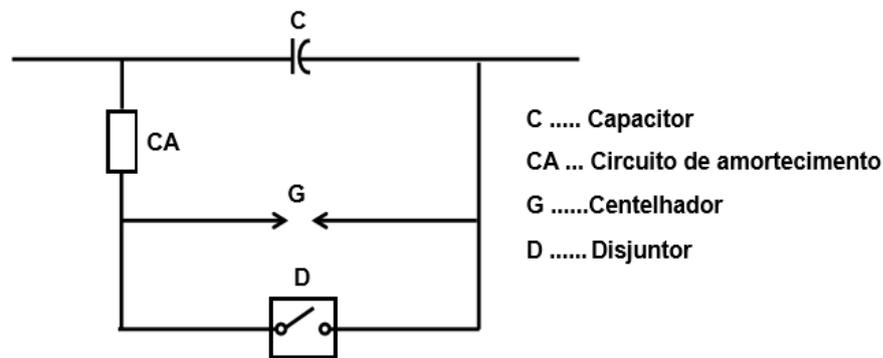


Figura 2.5 - Capacitor série protegido por centelhador. Fonte: (FONTINI e ET AL., 2013).

A operação de retorno do capacitor ao sistema é chamado de reinserção e depende do projeto do centelhador e do disjuntor. Quando há alguma falha interna ao banco série, o disjuntor (D) é acionado para desviar a corrente e a retirada do capacitor para manutenção é feita mediante a abertura de chaves seccionadoras associadas para total desenergização. Esse esquema foi o primeiro utilizado no mundo, e era utilizado para reinserção lenta, isto é, na faixa de 300 a 400 milissegundos após a eliminação do defeito, com centelhadores ventilados a ar natural. Existem sistemas onde os centelhadores são encapsulados e resfriados a ar comprimido (FONTINI e ET AL., 2013).

Quanto ao circuito de amortecimento, sua função é dissipar a energia do capacitor quando a corrente é desviada pelo centelhador. Por isso, ele é constituído de um resistor (ou varistores) em paralelo com um indutor. Na Figura 2.5, esse circuito está em paralelo com o capacitor, mas em muitas instalações fica em série. A decisão fica por conta do fabricante que compensa a pequena reatância do reator de amortecimento com um pequeno aumento da reatância do capacitor série.

2.1.4.2 Proteção com centelhador duplo

Os centelhadores também são aplicados em conjuntos, como por exemplo, no circuito da Figura 2.6, onde o banco de capacitores é protegido por dois centelhadores.

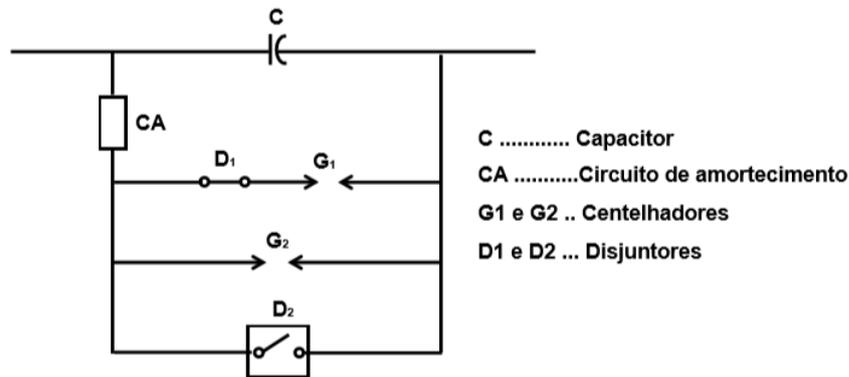


Figura 2.6 - Banco de capacitores protegido por centelhador duplo. Fonte (FONTINI e ET AL., 2013).

Neste esquema, o centelhador de desvio da corrente, G_1 , tem seu ajuste da tensão de disparo da ordem de 20% inferior ao do centelhador de reinserção, G_2 . Após a ocorrência de falta próxima ao capacitor:

- O centelhador G_1 dispara e desvia a corrente do capacitor tão logo o nível de tensão atinja o valor ajustado;
- Eliminada a falta, o disjuntor D_1 abre e, quando a linha é religada, o capacitor passa a ser protegido pelo centelhador G_2 e, durante o tempo de recuperação de G_1 , tudo funciona como no sistema com centelhador simples.
- Passado esse tempo, D_1 é fechado e o esquema restaurado;

2.1.4.3 Proteção com varistores

Com o desenvolvimento da tecnologia passou-se a utilizar varistores a óxido metálico em esquemas de proteção de capacitores. Esses elementos são resistores não lineares como os para-raios das subestações e têm como característica básica uma alta não linearidade, funcionando praticamente como um circuito aberto até atingir a tensão de condução. A Figura 2.7 mostra esta configuração.

Após a ocorrência de uma falta próxima ao capacitor os seguintes eventos se sucedem:

- Com a sobretensão através do capacitor igual ou superior ao nível de disparo, o varistor passa a conduzir, desviando a corrente do capacitor;
- Após a eliminação do defeito, o varistor para de conduzir e restabelece o capacitor para operação.

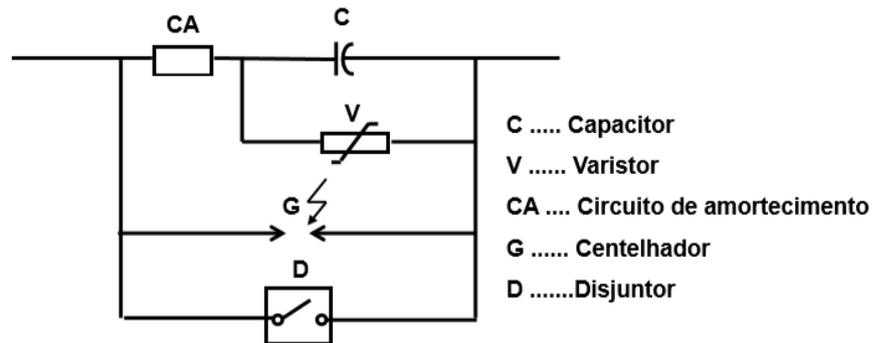


Figura 2.7 - Circuito de proteção com varistor. Fonte: (FONTINI e ET AL., 2013).

O varistor pode ser dimensionado para dissipar toda a energia para qualquer defeito no sistema, mas considerável economia pode ser feita, permitindo-se que haja disparo do centelhador para as faltas na própria barra onde está instalado (comumente chamada falta interna). Nesse caso, o funcionamento do esquema, para faltas internas, seria:

- O centelhador G é disparado quando a proteção do varistor detecta sobrecarga;
- O disjuntor D é fechado para proteger o centelhador, como no esquema de centelhador simples.

Como nos outros esquemas, o disjuntor (D) permite a inserção e retirada do sistema de compensação quando for necessário. Por exemplo, para promover a extinção do arco elétrico no centelhador, ou em casos de manutenção.

2.1.5 Localização da compensação série

A compensação série pode ser instalada tanto no centro quanto nas extremidades da linha de transmissão. Considerando a representação da linha compensada a partir de suas constantes generalizadas (constantes complexas ABCD) o ponto mais indicado para a instalação da compensação é no centro da linha, pois permite a maior transmissão de potência (PALANICHAMY e BABU, 2005).

Uma linha compensada em seu centro necessita de um quantidade menor de potência reativa do que aquela compensada em uma das extremidades para transmitir uma mesma quantidade de potência. Por outro lado, a redução do efeito Ferranti causado pela compensação é máximo quando esta se encontra localizada no terminal transmissor. Tal redução é diminuída na medida em que a compensação é deslocada para o terminal receptor, onde nada contribui para a atenuação do deste efeito (GONÇALVES, 2007).

Sobretudo, a determinação do local de instalação da compensação série é feita de acordo com análises técnicas e financeiras. De forma geral a instalação nas extremidades da linha demanda menores custos e esquemas de proteção de menor complexidade. Nesta

situação, entretanto, os relés de distância das linhas adjacentes à linha compensada podem ser afetados por inversão de tensão, fenômeno a ser tratado em seções adiante. Quando a compensação série é feita no meio da linha, a inversão de tensão é evitada, mas obriga a utilização de sistemas adicionais de transmissões de dados a distância, o que pode causar atrasos inconvenientes na eliminação de faltas, redução da confiabilidade ou aumento de custos (SAIA, 2005). Além disso é necessária a construção de uma nova subestação intermediária o que pode inviabilizar o projeto da compensação.

2.1.6 Ressonância subsíncrona

Conforme apresentado, a instalação da compensação série em linhas de transmissão proporciona grandes benefícios ao sistema elétrico, no entanto também ocorrem efeitos indesejados que podem limitar sua aplicação. A ressonância subsíncrona (RSS), detalhada a seguir, ocorre devido à interação do sistema compensado com as unidades geradoras. Efeitos indesejados também são verificados no funcionamento de dispositivos de proteção de distância. Estes serão analisados no Capítulo 3.

A ressonância subsíncrona é definida como uma condição em que o sistema elétrico composto pela linha de transmissão e capacitores da compensação série trocam energia com o sistema mecânico do conjunto de geração (gerador e turbina) em uma ou mais de suas frequências naturais, abaixo da frequência síncrona do sistema elétrico (PADIYAR, 1999).

Um sistema elétrico com compensação série forma um circuito RLC série, cuja frequência natural de oscilação é dada pela equação (2.4) a seguir:

$$f_e = f_0 \cdot \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.4)$$

Onde

f_0 é a frequência de sincronismo do sistema de potência;

X_L é a reatância indutiva total do sistema;

X_C é a reatância capacitiva da compensação série.

Da equação (2.4), verifica-se que a frequência natural de oscilação (f_e) será sempre inferior a frequência de sincronismo (por isso, o nome de ressonância subsíncrona), dado que o capacitor compensa apenas parte da reatância indutiva do sistema.

Quando o sistema de potência compensado é afetado por perturbações, correntes na frequência elétrica f_e são geradas no estator das unidades geradoras devido à troca de energia entre as indutâncias do sistema e a capacitância da compensação série. Estas induzem

correntes de frequências subsíncronas ($f_0 - f_e$) e supersíncronas ($f_0 + f_e$) no rotor (TENÓRIO, 1998).

Este problema se manifesta de duas formas, sendo elas a auto-excitação e os conjugados transitórios.

2.1.6.1 Auto-excitação

Correntes de frequências subsíncronas que circulam nos terminais do gerador produzem componentes de tensão de mesma frequência. Essas componentes de tensão podem sustentar as correntes para produzir o efeito que é denominado como auto-excitação. Existem dois tipos de auto-excitação, um envolvendo apenas a dinâmica elétrica do rotor e o outro envolvendo a dinâmica elétrica e mecânica do rotor. O primeiro é denominado como efeito gerador de indução, enquanto o segundo é chamado de interação torcional (PADIYAR, 1999).

- **Efeito gerador de indução:**

Uma vez que os circuitos do rotor girem mais rápido que o campo magnético girante produzido pelas correntes subsíncronas na armadura, surge um escorregamento negativo e a resistência do rotor vista pela armadura para tais correntes fica negativa, característica semelhante à operação de uma máquina de indução funcionando como gerador (JUSAN, 2007). Quando o valor da resistência vista pelo estator supera, em módulo, o somatório da resistência do estator com a resistência do sistema de potência, o sistema se comporta como um circuito RLC com resistência negativa. Sob esta condição, o sistema elétrico torna-se auto excitado, provocando oscilações de tensão e de corrente cujas amplitudes são crescentes no tempo (TENÓRIO, 1998) (JUSAN, 2007) (IEEE SUBSYNCHRONOUS RESONANCE WORKING GROUP, 1985).

- **Interação Torcional:**

O sistema mecânico das máquinas geradoras é composto de massas girantes acopladas entre si por eixos. Esses sistemas têm frequências naturais de oscilação situadas entre 5 e 45 Hz para as centrais térmicas e menos que 10 Hz para as hidráulicas, que modulam a tensão do gerador (TENÓRIO, 1998). Caso uma destas frequências seja próxima a alguma das frequências naturais da rede, as correntes percorridas na armadura da máquina induzem conjugados eletromagnéticos que amplificam as oscilações originais. Se estes conjugados superam os conjugados de amortecimento relacionados ao próprio sistema mecânico, o sistema se torna auto-excitado. Em geral, fenômenos desta natureza costumam

atuar de forma destrutiva para o eixo do turbo gerador. Mesmo que o sistema não seja instável, pequenas perturbações podem resultar em esforços torcionais de grande magnitude, causando perda de vida útil do eixo por fadiga contínua (TENÓRIO, 1998) (IEEE SUBSYNCHRONOUS RESONANCE WORKING GROUP, 1985).

2.1.6.2 Conjugados transitórios

Os distúrbios do sistema podem excitar os conjugados oscilatórios no rotor do gerador. O conjugado elétrico transitório, em geral, tem muitos componentes, incluindo componentes unidirecionais, de decaimento exponencial e conjugados oscilatórios de diversas frequências, desde subsíncronas até múltiplas da frequência fundamental da rede. Devido ao fenômeno RSS, os componentes de frequência subsíncrona do torque podem ter grandes amplitudes imediatamente após a perturbação, embora possam decair eventualmente. Cada ocorrência desses torques transitórios de alta amplitude pode resultar em redução da vida útil do eixo devido a danos por fadiga. Fadiga é definida como o processo de mudança estrutural permanente localizada e progressiva que ocorre em um material sujeito a condições que produzem tensões e deformações e que podem culminar em rachaduras (PADIYAR, 1999).

É um processo cumulativo, se houver um número suficiente de eventos causando altos conjugados transitórios, a fadiga acumulada pode atingir um limiar onde a probabilidade de início de trincas por fadiga em áreas de alta concentração de tensão será significativa. Uma vez iniciada, as rachaduras podem se propagar para tamanhos que resultam em danos irreversíveis ao eixo e eventual quebra.

A ressonância subsíncrona pode ser evitada ou minimizada por meio de controle de excitação, filtros, sistemas específicos baseados chaves semicondutoras (TCSC e NGH), ou por condições operativas como bypass do capacitor série (TENÓRIO, 1999).

2.2 Compensação Série Controlada por Tiristores (TCSC)

A compensação série fixa vem sendo usada como melhor solução econômica para aumento de fluxo de potência em linhas de transmissão longas em extra alta tensão. No entanto, o problema da ressonância subsíncrona tem sido uma grande limitação para seu uso (PADIYAR, 2007). Enquanto os capacitores conectados em paralelo com a linha não enfrentam o problema da ressonância subsíncrona, sua eficácia na compensação de energia reativa é fortemente dependente do ponto de conexão com a linha, sendo normalmente, o centro da linha o melhor ponto para instalação.

Por outro lado, a potência reativa gerada por capacitores conectados em série é proporcional ao quadrado da corrente do sistema, enquanto que nos capacitores conectados em paralelo essa potência é proporcional ao quadrado da tensão. Por esse motivo, capacitores ligados em paralelo devem ter capacitância entre três e seis vezes superior aos conectados em série para proporcionar a mesma energia reativa (MATHUR e VARMA, 2002).

A equação (2.5) mostra a diferença na geração de potência reativa entre capacitores conectados em série e em paralelo (PADIYAR, 2007) (MATHUR e VARMA, 2002).

$$\frac{Q_{se}}{Q_{pa}} = \tan^2 \left(\frac{\delta_{max}}{2} \right) \quad (2.5)$$

Onde:

Q_{se} e Q_{pa} são as potências reativas de capacitores conectados em série e em paralelo, respectivamente, para proporcionar o mesmo nível de transferência de potência em uma linha que tem diferença angular máxima de δ_{max} entre seus terminais.

Por exemplo, para δ_{max} de 35° , Q_{se} será aproximadamente 10% de Q_{pa} . Mesmo capacitores para conexão série custando normalmente quase duas vezes mais que os conectados em paralelo (por unidade de VAR), o preço total da compensação série ainda é menor que o da compensação em paralelo. Além disso, a quantidade de reativo gerado com a instalação de capacitores em série sofre pouca influência da localização da instalação (PADIYAR, 2007) (MATHUR e VARMA, 2002).

A compensação série também pode ser feita de forma controlada, com o uso de tiristores. Esta alternativa permite significativa redução do problema de ressonância subsíncrona e também a aplicação de estratégias de controle para melhorar a estabilidade do sistema e amortecer oscilações de potência. Este tipo de sistema, conhecido como TCSC, faz parte de um grupo de dispositivos que utilizam chaves semicondutoras, entre outros elementos de eletrônica de potência, para aumentar e controlar o fluxo de potência em linhas de transmissão. Esses dispositivos são comumente chamados de FACTS e podem ser conectados ao sistema elétrico tanto em paralelo quanto em série.

A primeira demonstração de projeto de TCSC foi feita em 1991, na subestação Kayenta River de 345 kV em Virgínia, EUA. Esta foi uma instalação de teste com tiristores controlando uma fase com compensação série. Nesta mesma subestação, em outubro de 1992, foi feita a primeira instalação trifásica de 230 kV.

Em 1993 um protótipo de TCSC trifásico de 500 kV foi instalado na subestação de Slatt no estado de Oregon, EUA. Seis módulos de TCSC foram conectados em série para proporcionar o controle de reatância.

Na Suécia, uma linha de transmissão de 400 kV com compensação série, conectada a uma usina nuclear, foi escolhida para a instalação de um TCSC dividindo a compensação fixa existente em duas partes, uma fixa e outra controlada. Isso foi necessário devido a um problema de ressonância subsíncrona que frequentemente disparava as proteções da subestação.

No Brasil, a primeira instalação de compensação série com TCSC ocorreu na subestação de Serra da Mesa, em 1993. Neste sistema, uma linha de transmissão em 500 kV com 1020 km de extensão liga as subestações de Imperatriz, no estado do Maranhão, e de Serra da Mesa, em Goiás.

2.2.1 Vantagens do TCSC

O uso do TCSC oferece as seguintes vantagens (MATHUR e VARMA, 2002):

- Controle do grau de compensação série da linha de transmissão de forma rápida e dinâmica;
 - Controle dinâmico do fluxo de potência;
 - Amortecimento de oscilações de potência;
 - Mitigação da ressonância subsíncrona. Nas frequências subsíncronas, o TCSC apresenta impedância com característica resistiva e indutiva, dessa forma as oscilações subsíncronas não se sustentam;
 - Redução rápida da componente CC decorrente da inserção de capacitores no sistema a partir de estratégias de controle do disparo dos tiristores;
 - Melhora na proteção dos capacitores série. Por meio do controle dos tiristores é possível se obter um rápido bypass do banco de capacitores na ocorrência de sobretensões. Da mesma forma, os capacitores podem ser reinseridos de forma rápida após perturbações;
 - O TCSC colabora para regulação de tensão, pois gera potência reativa que cresce com o aumento do carregamento da linha;
 - Redução da corrente de curto-circuito. Durante eventos com elevadas correntes de curto-circuito o TCSC pode alterar seu modo de operação de capacitância controlável para indutância controlada, restringindo as correntes de curto-circuito.
-

2.2.2 Conceitos básicos do TCSC

A configuração básica de um TCSC consiste em um capacitor conectado em paralelo com o reator controlado a tiristores (*Thyristor Controlled Reactor – TCR*) como mostra a Figura 2.8.

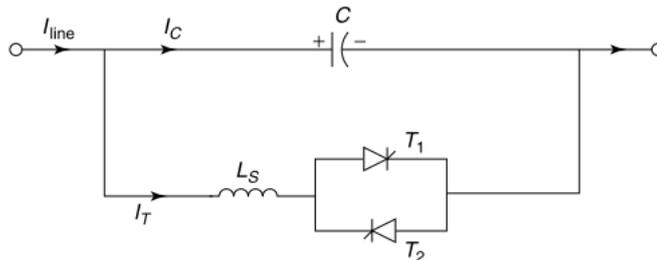


Figura 2.8 - Configuração básica de um TCSC. Fonte: (PADIYAR, 2007).

Conforme apresentado na Figura 2.9, um módulo prático de um TCSC também inclui dispositivos de proteção como os apresentados para a compensação série fixa. Um varistor de óxido metálico (MOV) é conectado paralelo ao capacitor para limitar sobretensões e permitir que o capacitor continue no circuito mesmo durante faltas (MATHUR e VARMA, 2002).

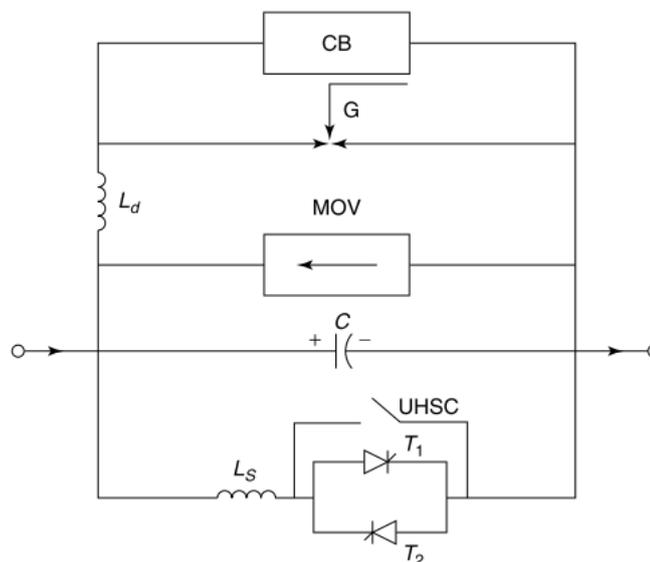


Figura 2.9 - Módulo prático típico de um TCSC. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).

Também conectado em paralelo ao conjunto existe um disjuntor (CB) cujas funções são: controlar a inserção de todo o módulo no sistema e promover o bypass do capacitor em situações de faltas severas, mau funcionamento e manutenção. Há também um indutor limitador de corrente (L_d) para restringir a magnitude da frequência e da corrente no caso da operação em bypass.

Se for necessário que os tiristores permaneçam em condução total por longos períodos de tempo, as perdas por chaveamento podem ser reduzidas instalando-se paralelo à eles uma chave ultra rápida (UHSC) que oferece um caminho idealmente sem perdas, similar a um disjuntor. Durante uma sobrecarga repentina essa chave também pode ser utilizada para reduzir o estresse nos tiristores.

Um sistema real de TCSC usualmente consiste de uma cascata de módulos conectados em série juntamente com um capacitor fixo (C_F), como mostra a Figura 2.10. O capacitor fixo é utilizado para garantir um mínimo de compensação e reduzir os custos da instalação. Nesse arranjo, capacitores têm valores diferentes de forma a permitir uma ampla faixa de controle de reatância. O indutor do reator controlado é dividido em duas partes para proteger os tiristores contra curtos-circuitos no próprio indutor.

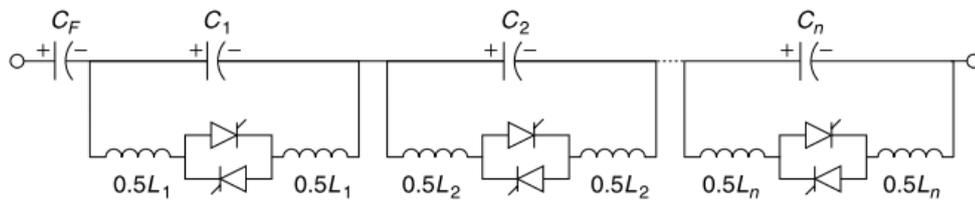


Figura 2.10 - Sistema típico de TCSC dividido em módulos. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).

2.2.3 Modos de operação do TCSC

Existem, essencialmente, três modos de operação para o TCSC (PADIYAR, 2007) (MATHUR e VARMA, 2002) (HINGORANI e GYUGYI, 2000). Estes estão apresentados na Figura 2.11, e são detalhados a seguir.

- Operação com bypass dos tiristores: Neste modo os tiristores tem ângulo de condução de 180° em cada semiciclo. O pulso de disparo é dado imediatamente após a passagem por zero da tensão nos terminais dos tiristores em cada semiciclo, resultado em um fluxo de corrente senoidal contínuo pelos tiristores. Operando desta forma o TCSC se comporta como um circuito LC paralelo, sendo sua reatância equivalente indutiva, igual à do indutor do TCR. Por isso, praticamente toda a corrente flui pelo reator. Esse modo de operação é comumente utilizado para proteger o capacitor contra sobretensões durante perturbações no sistema.
- Operação com tiristores bloqueados: já neste modo de operação os tiristores não são disparados, portanto nenhuma corrente flui pelo reator. Assim, a reatância do TCSC é a mesma do capacitor fixo utilizado no módulo, funcionando como na compensação série fixa. Este modo também é chamado de modo de espera, pois só é utilizado em

casos de transição entre modos de operação ou no caso de ocorrência de algum defeito.

- Operação normal: Neste modo os tiristores conduzem parcialmente, e o controle do ângulo de disparo permite variar a reatância do TCSC, que pode ser capacitiva ou indutiva. No entanto não é possível se fazer uma transição suave entre os modos indutivo e capacitivo, pois há uma região de ressonância na qual o módulo da reatância do TCSC se torna muito elevado e pode causar danos ao sistema devido à sobretensões.

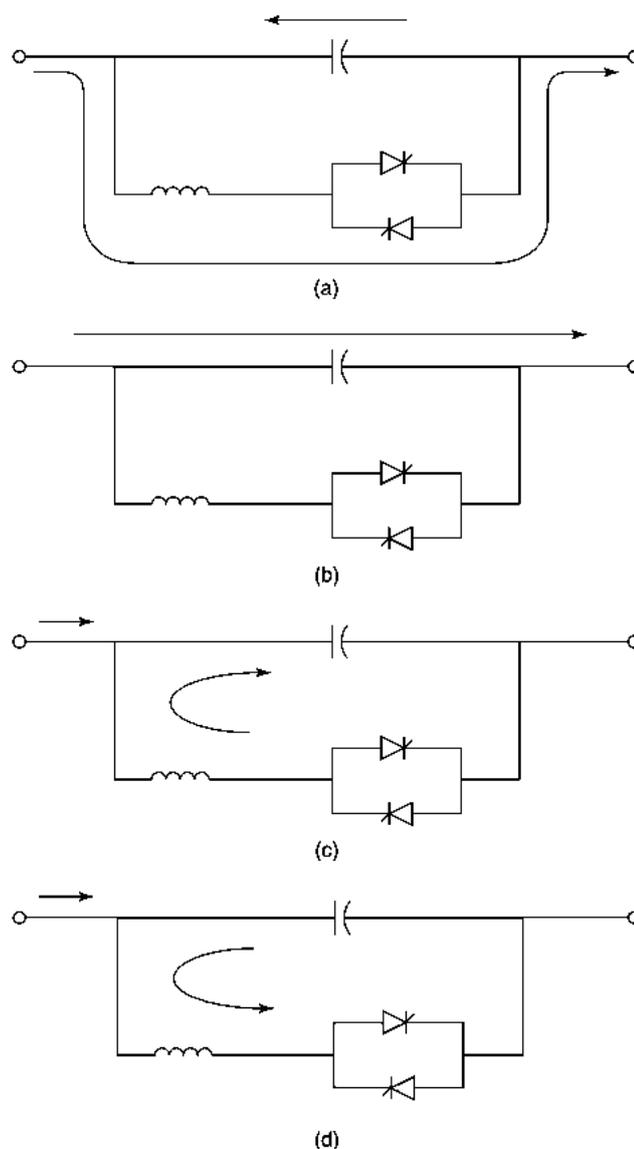


Figura 2.11 - Diferentes modos de operação do TCSC: (a) modo de bypass dos tiristores; (b) modo com tiristores bloqueados; (c) modo com tiristores conduzindo parcialmente (reatância capacitiva); e (d) tiristores conduzindo parcialmente (reatância indutiva) Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).

Quando o sistema opera na faixa de ângulos de disparo com reatância capacitiva, os tiristores são disparados durante o período em que a corrente e a tensão no capacitor tem polaridades opostas. Este fato causa uma sobretensão nos terminais do capacitor, fazendo com que o sistema enxergue o TCSC como uma reatância capacitiva de valor superior à do capacitor fixo, aumentando o nível de compensação série do sistema.

Já na operação com reatância indutiva a corrente no reator tem o mesmo sentido da corrente no capacitor. Geralmente este modo não é utilizado.

A operação normal tanto com reatância capacitiva quanto indutiva também é conhecida como modos *Vernier* ou modos contínuos de operação (MATHUR e VARMA, 2002) (PADIYAR, 2007) (HINGORANI e GYUGYI, 2000).

2.2.4 Análise do funcionamento do TCSC

Considerando, de forma simplificada, que o circuito equivalente do TCSC consiste em um circuito LC paralelo, sendo o indutor variável, a impedância do módulo (Z_{TCSC}) pode ser calculada pela equação (2.6) a seguir.

$$Z_{TCSC} = \frac{-jX_C \cdot jX_{TCR}}{j(X_{TCR} - X_C)} = \frac{-jX_C}{\left(1 - \frac{X_C}{X_{TCR}}\right)} \quad (2.6)$$

E a corrente no indutor variável (I_{TCR}) é dada por (2.7),

$$I_{TCR} = \frac{-jX_C}{j(X_{TCR} - X_C)} I_L = \frac{I_L}{\left(1 - \frac{X_{TCR}}{X_C}\right)} \quad (2.7)$$

Portanto, se as perdas forem ignoradas, a impedância do TCSC é puramente reativa, dada pela equação (2.8).

$$X_{TCSC} = \frac{-jX_C}{\left(1 - \frac{X_C}{X_{TCR}}\right)} \quad (2.8)$$

A equação acima permite verificar que X_{TCSC} é capacitiva desde que X_C seja menor, em módulo, que X_{TCR} . Se X_C for maior que X_{TCR} , X_{TCSC} assume característica indutiva. Como exemplo da influência dos valores de X_C e X_{TCR} no valor de X_{TCSC} abaixo estão apresentados dois exemplos numéricos.

(a) Para $X_{TCR} = 1,5X_C$, substituindo valores nas equações 2.7 e 2.8:

$$\frac{X_{TCSC}}{X_C} = \frac{1}{1 - \frac{2}{3}} = -j3$$

$$\frac{I_{TCR}}{I_L} = \frac{1}{1,5 - 1} = 2$$

(b) Para $X_{TCR} = 0,75X_C$,

$$\frac{X_{TCSC}}{X_C} = \frac{1}{1 - \frac{4}{3}} = j3$$

$$\frac{I_{TCR}}{I_L} = \frac{1}{1 - 0,75} = 4$$

Os exemplos apresentados mostram que a mudança da reatância do indutor variável tem grande impacto no valor da reatância total do TCSC. Também é interessante notar que a corrente no indutor é duas vezes maior no caso do funcionamento indutivo do TCSC com mesma reatância (em módulo), este fato conduz à conclusão que a capacidade de condução de corrente dos tiristores determinam o limite de X_{TCSC} na operação indutiva.

Para analisar o funcionamento do TCSC no modo normal de operação é utilizado o circuito da Figura 2.12, o qual apresenta um módulo de TCSC simplificado. Nele a corrente da linha de transmissão é modelada como uma fonte de corrente independente $i_s(t)$ e os tiristores são representados pela chave S.

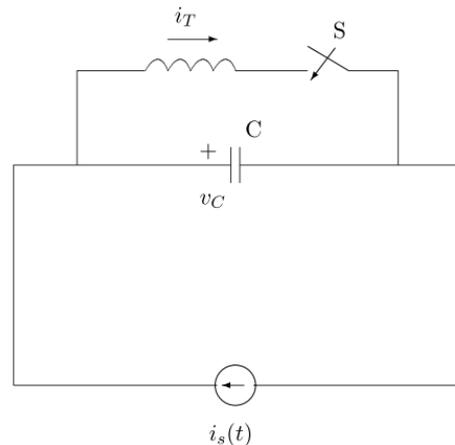


Figura 2.12 - Circuito de um TCSC. Fonte: (PADIYAR, 2007).

A partir das premissas anteriores é possível escrever as equações (2.9) e (2.10), que representam a corrente no capacitor e a tensão no indutor respectivamente.

$$C \frac{dvc}{dt} = i_s(t) - i_T \quad (2.9)$$

$$L \frac{di_T}{dt} = vc \cdot u \quad (2.10)$$

Onde $u = 1$ quando algum dos tiristores está conduzindo (chave S fechada) e $u = 0$ quando a chave está aberta. A corrente nos tiristores e no reator (i_T) é zero no instante em que a chave é aberta. A corrente da linha é definida conforme equação (2.11).

$$i_s(t) = I_m \cos(\omega t) \quad (2.11)$$

Considerando que o ângulo de disparo tenha referência na passagem por zero da corrente da linha, a faixa de valores possíveis de ângulo de disparo (α) está entre 0° e 90° e corresponde a variação do ângulo de condução (σ) de 180° a 0° . O ângulo de avanço de fase (β), que também varia entre 0 e 90° é definido conforme equação (2.12).

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (2.12)$$

A Figura 2.13 mostra as formas de onda de $i_s(t)$, $i_T(t)$ e $V_c(t)$, além dos ângulos de disparo, de avanço de fase e de condução.

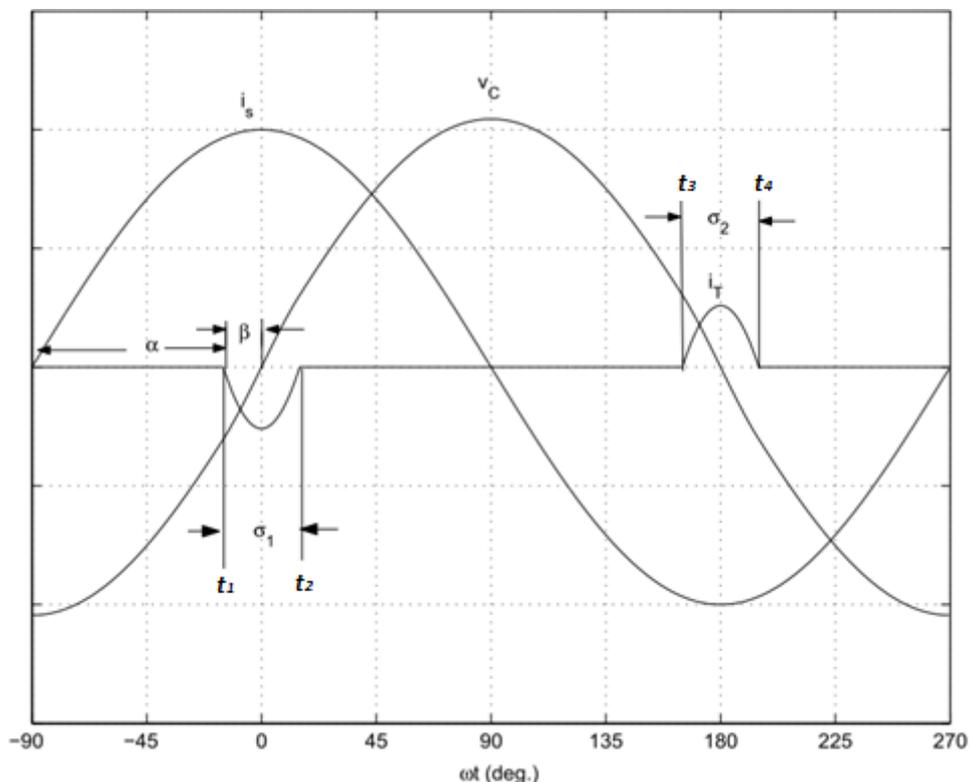


Figura 2.13 - Formas de onda de $i_s(t)$, $i_T(t)$ e $V_c(t)$. Fonte (PADIYAR, 2007):.

As equações (2.9) e (2.10) podem ser solucionadas se os instantes de chaveamento forem conhecidos. A chave S é fechada duas vezes por ciclo da corrente da linha, considerando pulsos simétricos em cada semiciclo, nos instantes,

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{-\beta}{\omega} \\ t_3 &= \frac{\pi - \beta}{\omega} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Onde $0 < \beta < \beta_{\max}$. Os tiristores param de conduzir nos instantes t_2 e t_4 dados por,

$$\begin{aligned} t_2 &= t_1 + \frac{\sigma_1}{\omega} \\ t_4 &= t_3 + \frac{\sigma_2}{\omega} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Onde σ_1 e σ_2 são os ângulos de condução em cada semiciclo, em regime permanente $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ e

$$\sigma = 2\beta \quad (2.15)$$

A seguir são apresentadas as soluções das equações 2.9 e 2.10 durante cada intervalo apresentado na Figura 2.13.

- **Solução para o intervalo $(-\beta \leq \omega t \leq \beta)$**

Durante este intervalo, $u = 1$, e das equações (2.9) e (2.10) obtêm-se:

$$LC \frac{di_T^2}{dt^2} + i_T = i_s(t) \quad (2.16)$$

A solução desta equação diferencial é

$$i_T(t) = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} I_m \cos(\omega t) + A \cos(\omega_r t) + B \sin(\omega_r t) \quad (2.17)$$

Onde:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad \lambda = \frac{\omega_r}{\omega} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad X_L = \omega L \quad (2.18)$$

As constantes A e B são determinadas pelas condições de fronteira. Das equações (2.10) e (2.18) são obtidos,

$$v_c(t) = L \frac{di_T}{dt} = -\frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} I_m X_L \text{sen}(\omega t) + A \lambda X_L \text{sen}(\omega_r t) + B \lambda X_L \text{cos}(\omega_r t) \quad (2.19)$$

Em regime permanente, devido à simetria da forma de onda senoidal da corrente da linha,

$$v_c(\omega t = -\beta) = -v_c(\omega t = \beta) \quad (2.20)$$

As equações anteriores conduzem a conclusão de que a constante B tem valor zero e que, desde que $i_T(t) = 0$ em $\omega t = -\beta$, tem-se

$$A = -\frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} I_m \frac{\text{cos}(\beta)}{\text{cos}(\lambda\beta)} \quad (2.21)$$

Assim, $i_T(t)$ e $v_c(t)$ podem ser expressos como

$$i_T(t) = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} I_m \left[\text{cos}(\omega t) - \frac{\text{cos}(\beta)}{\text{cos}(\lambda\beta)} \text{cos}(\omega_r t) \right] \quad (2.22)$$

$$v_c(t) = \frac{I_m X_C}{\lambda^2 - 1} \left[-\text{sen}(\omega t) + \frac{\lambda \text{cos}(\beta)}{\text{cos}(\lambda\beta)} \text{sen}(\omega_r t) \right] \quad (2.23)$$

Portanto, pode-se concluir que

$$i_T(\omega t = \beta) = 0 \quad (2.24)$$

E que

$$v_{c1} = -v_{c2} \quad (2.25)$$

Onde

$$v_{c1} = v_c(\omega t = -\beta), \quad v_{c2} = v_c(\omega t = \beta)$$

A expressão para v_{c2} é dada por (2.26),

$$v_{c2} = \frac{I_m X_C}{\lambda^2 - 1} [-\text{sen}(\beta) + \lambda \cos(\beta) \cdot \tan(\lambda\beta)] \quad (2.26)$$

- **Solução para o intervalo ($\beta < \omega t < \pi - \beta$)**

Para este intervalo $u = 0$ e $i_T = 0$, ou seja, os tiristores estão bloqueados. A tensão nos terminais do capacitor pode ser calculada conforme equação (2.27).

$$\begin{aligned} v_{c(t)} &= v_{c2} + \frac{1}{C} \int_{\beta}^{\omega t} i_s(t) d\omega t \\ &= v_{c2} + I_m X_C [\text{sen}(\omega t) - \text{sen}(\beta)] \end{aligned} \quad (2.27)$$

Onde a corrente no capacitor é a mesma da linha, dada por $i_c(t) = I_s(t) - i_T(t)$, e no intervalo considerado $i_T(t)$ é zero.

As formas de onda de $i_s(t)$, $i_T(t)$ e $v_c(t)$ mostradas na Figura 2.13 têm $\lambda = 2,5$, e $\beta = 15^\circ$.

2.2.5 Reatância do TCSC

A reatância do TCSC correspondente a frequência do sistema é obtida por meio da razão do pico do valor da componente fundamental da tensão nos terminais do capacitor (V_{C1}) pelo pico da corrente da linha. Pela análise de Fourier, V_{C1} é calculada conforme equação (2.28) (PADIYAR, 2007).

$$V_{C1} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} v_c(t) \text{sen}(\omega t) d\omega t \quad (2.28)$$

Substituindo as equações (2.23) e (2.27) na equação (2.28) obtêm-se,

$$V_{C1} = \frac{4}{\pi} \left[\int_0^{\beta} v_c(t) \text{sen}(\omega t) d\omega t + \int_{\beta}^{\pi/2} v_c(t) \text{sen}(\omega t) d\omega t \right] \quad (2.29)$$

Onde

$${}^1v_c(t) = \frac{I_m X_C}{\lambda^2 - 1} \left[-\text{sen}(\omega t) + \frac{\lambda \cos(\beta)}{\cos(\lambda\beta)} \cdot \text{sen}(\omega_r t) \right] \quad (2.30)$$

$${}^2v_c(t) = v_{c2} + I_m X_C (\text{sen}(\omega t) - \text{sen}(\beta)) \quad (2.31)$$

A reatância X_{TCSC} é normalmente dada em múltiplos de X_C , conforme definido anteriormente,

$$X_{TCSC} = \frac{V_{c1}}{I_m} \quad (2.32)$$

Então a relação X_{TCSC}/X_C é dada por:

$$\frac{X_{TCSC}}{X_C} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)} \left[\frac{2\cos^2\beta}{\lambda^2 - 1} (\lambda \tan(\lambda\beta) - \tan(\beta)) - \beta - \frac{\text{sen}(2\beta)}{2} \right] \quad (2.33)$$

A equação (2.33) pode ser simplificada como,

$$\frac{X_{TCSC}}{X_C} = 1 + \frac{2}{\pi} \frac{\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)} \left[-\frac{(\lambda^2 + 1) \text{sen}(2\beta)}{(\lambda^2 - 1) 2} - \beta + \frac{2\cos^2(\beta) \cdot \lambda \cdot \tan(\lambda\beta)}{\lambda^2 - 1} \right] \quad (2.34)$$

As equações de cálculo da impedância do TCSC propostas acima tomam como referência a corrente da linha para determinação do ângulo de disparo, desta forma os tiristores devem ser disparados entre 0° e 90° , quando a tensão no capacitor e a corrente na linha tem polaridades opostas. Alguns autores, como (MATHUR e VARMA, 2002), utilizam a tensão nos terminais do capacitor como referência para o disparo, nesse caso a faixa de ângulos de disparo possíveis é de 90° a 180° .

A impedância do TCSC, calculada segundo equação (2.34) varia de um valor mínimo, capacitivo, equivalente ao capacitor fixo, quando os tiristores estão bloqueados (ângulo de disparo de 90°), e na medida que o ângulo de disparo diminui partindo de 90° (referência na corrente), X_{TCSC} chega ao seu valor máximo capacitivo, que se dá no ponto de ressonância onde $X_C = X_{TCR}$, com reatância teoricamente infinita. Reduzindo ainda mais α , X_{TCSC} se torna indutiva, alcançando seu menor valor em $\alpha = 0^\circ$, onde o capacitor sofre bypass pelo TCR. A Figura 2.14 apresenta um gráfico com a variação da impedância do TCSC em função do ângulo de disparo, nela são identificadas regiões indutiva, capacitiva e de ressonância.

Em um esquema típico de TCSC a reatância do TCR é menor que a do capacitor, comumente a relação de X_L/X_C tem valor 0,133, mas valores entre 0,1 e 0,3 são aceitáveis (HINGORANI e GYUGYI, 2000). Para valores superiores a 0,3 a frequência de ressonância

do TCSC se torna bastante próxima da frequência de sincronismo do sistema. E com valores inferiores a 0,1 verifica-se que há mais de uma zona de ressonância na faixa útil de ângulos de disparo, entre 0 e 90°, o que restringe o controle de impedância. De forma geral é interessante que a frequência de ressonância do TCSC seja entre duas e três vezes o valor da frequência fundamental (MATHUR e VARMA, 2002) (HINGORANI e GYUGYI, 2000).

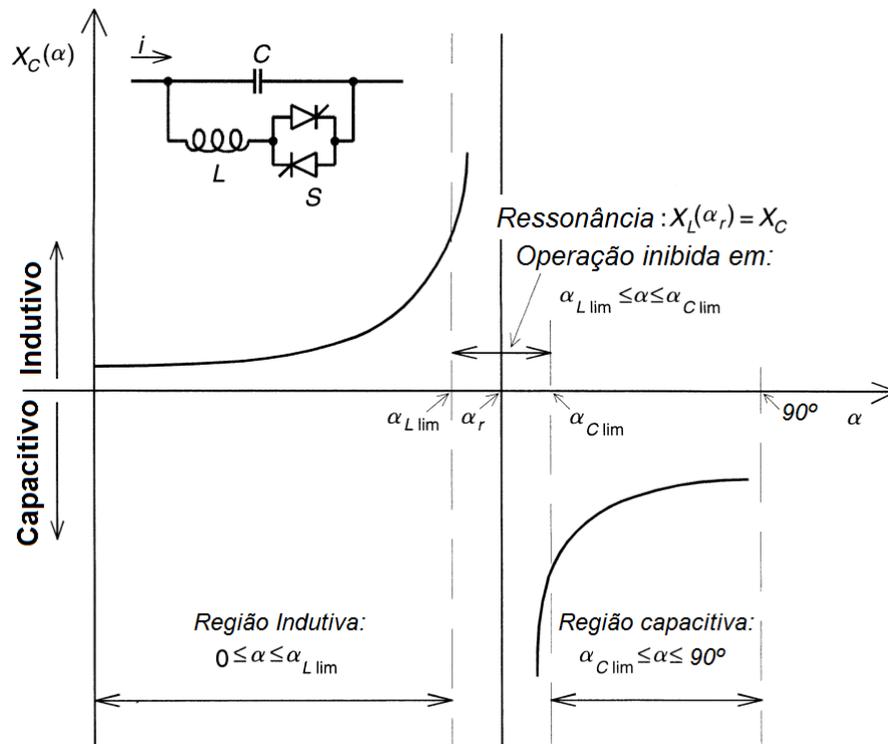


Figura 2.14 - Impedância característica x ângulo de disparo do TCSC. Fonte: (PADIYAR, 2007) (MATHUR e VARMA, 2002) (HINGORANI e GYUGYI, 2000).

A Figura 2.15 mostra dois gráficos de impedância característica de um TCSC com relação X_L/X_C iguais a 0.075 e 0.025 respectivamente. É possível verificar o surgimento de múltiplas regiões de ressonância, o que provoca restrições no controle de reatância da compensação.

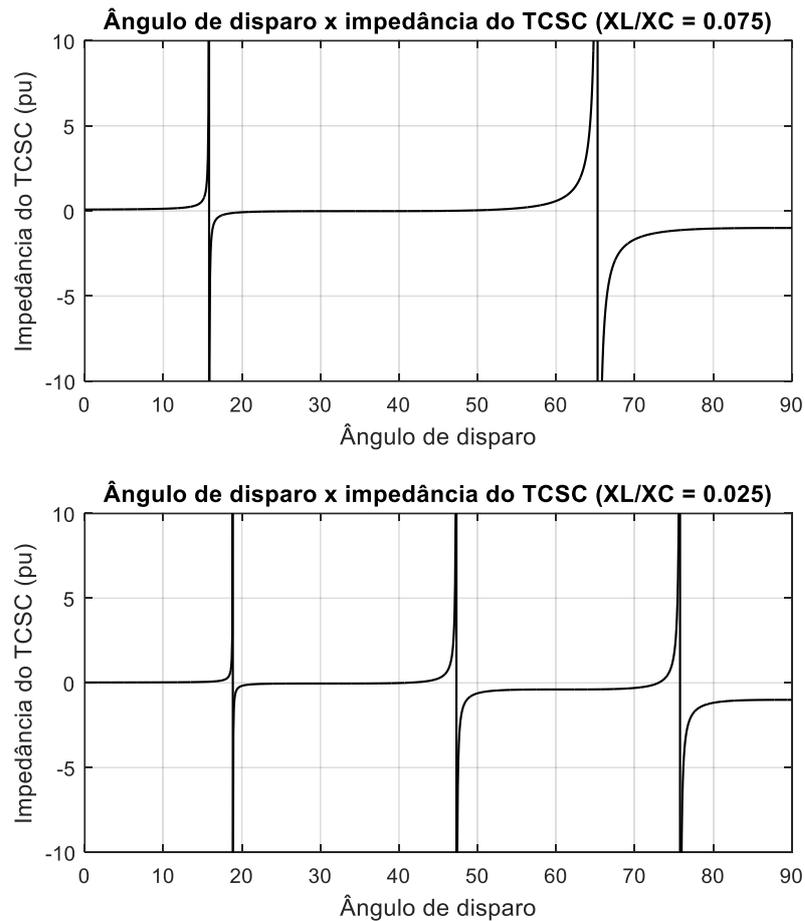


Figura 2.15 - Características de impedância do TCSC em função do ângulo de disparo para relações XL/XC iguais a 0.075 e 0.025 respectivamente, faixa de valores onde ocorrem múltiplas zonas de ressonância. Fonte: Autor.

2.2.6 Limitações do TCSC

Embora o projeto do TCSC seja baseado nas necessidades do sistema a ser compensado, os limites de operação são determinados pelas características dos diferentes componentes presentes no módulo. Os principais limites são apresentados a seguir (PADIYAR, 2007) (MATHUR e VARMA, 2002).

- a) Limites de tensão: são determinados pela máxima tensão suportada por todos os dispositivos presentes no TCSC (inclusive o capacitor). As limitações de tensão podem variar pelo tempo de duração. Para aplicações curtas (menos de 2 segundos), o limite de sobretensão sobre o MOV é mais crítico que sobre o capacitor.
- b) Limites de corrente: São impostos principalmente pelos tiristores, capacitor fixo e indutor de amortecimento de forma a evitar sobreaquecimento. Componentes harmônicas de corrente também causam aquecimento e portanto podem causar limitações de operação do TCSC.

- c) Ângulo de disparo dos tiristores: Deve ser determinado cuidadosamente para que o TCSC não opere na zona de ressonância (nem de forma temporária). A determinação da zona de ressonância é feita baseada principalmente na tensão máxima sobre o capacitor, assim, a reatância máxima do TCSC não deve exceder 4 vezes a reatância do capacitor fixo.

2.2.6.1 Módulo simples de TCSC

As características de capacidade de um módulo de TCSC são mostrados em um gráfico de tensão versus corrente de linha na Figura 2.16. Estas características são divididas em: regime permanente, curta duração (até 30 minutos) e entre 1 e 10 segundos. Tanto na zona capacitiva quanto indutiva a operação é geralmente limitada entre os valores mínimo e máximo de reatância. Limites relacionados à harmônicas também são apresentados.

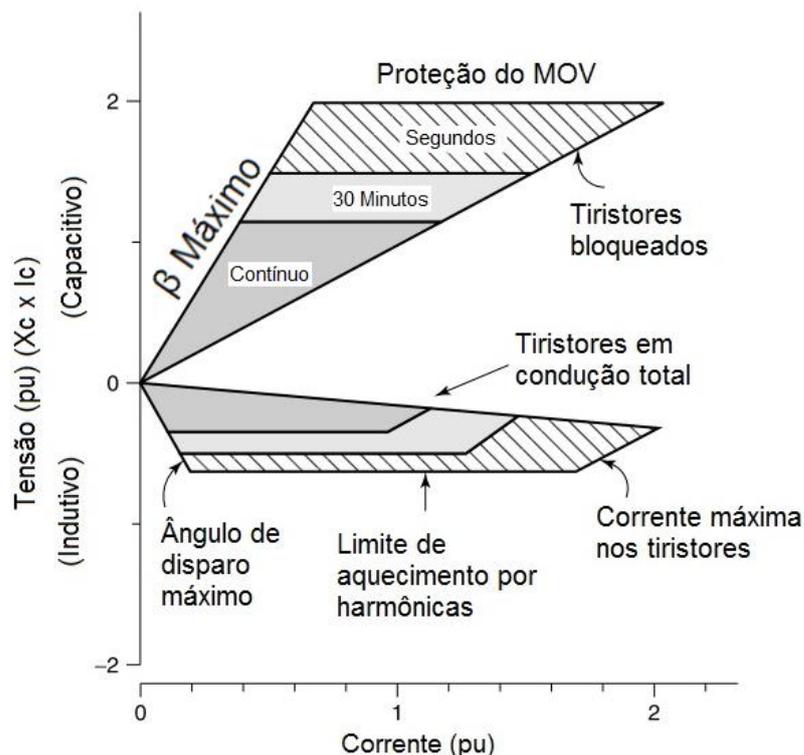


Figura 2.16 - Curva de capacidade de um TCSC típico. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).

Na região capacitiva, o valor máximo de reatância permitido é escolhido de forma a impedir que o TCSC opere próximo à região de ressonância. O máximo de X_{TCSC} é normalmente entre 2 e 3 vezes o valor do capacitor fixo (MATHUR e VARMA, 2002). Já a menor reatância capacitiva corresponde ao valor do capacitor fixo e é obtida com os tiristores bloqueados ($\alpha = 90^\circ$). Com o aumento da corrente da linha ocorre o aumento da tensão nos

terminais do TCSC até o valor máximo permitido, que depende das características dos componentes e pode variar com a duração da aplicação.

Na zona indutiva a máxima reatância também é obtida próxima da região de ressonância. A reatância indutiva mínima é obtida com os tiristores em condução total ($\alpha = 0^\circ$). Com o aumento da corrente da linha, são geradas harmônicas que além de causarem aquecimentos indesejados, também elevam o pico da tensão no capacitor e no sistema de proteção para valores próximos dos limites de operação (MATHUR e VARMA, 2002).

De forma alternativa, a capacidade operativa do TCSC pode ser expressa em uma curva que relaciona sua reatância à corrente da linha. A faixa de reatâncias possíveis para a operação do TCSC diminui na medida em que a corrente aumenta. Conforme discutido anteriormente, devido à região de ressonância, não é possível a transição suave entre as zonas capacitiva e indutiva. A Figura 2.17 apresenta uma curva típica da reatância de um TCSC em função da corrente. As áreas destacadas podem ser identificadas da seguinte forma (GONÇALVES, 2007) (MATHUR e VARMA, 2002) (HINGORANI e GYUGYI, 2000):

- A – Limite mínimo do ângulo de disparo na região de operação capacitiva (limite para a região de ressonância).
- B – Tiristores bloqueados (toda a corrente flui pelo capacitor).
- C – Limite de tensão máxima no capacitor.
- D – Tiristores em condução total.
- E – Limite máximo do ângulo de disparo na região de operação indutiva.
- F – Limite de aquecimento devido à distorção harmônica.
- G – Limite de corrente máxima do TCSC.

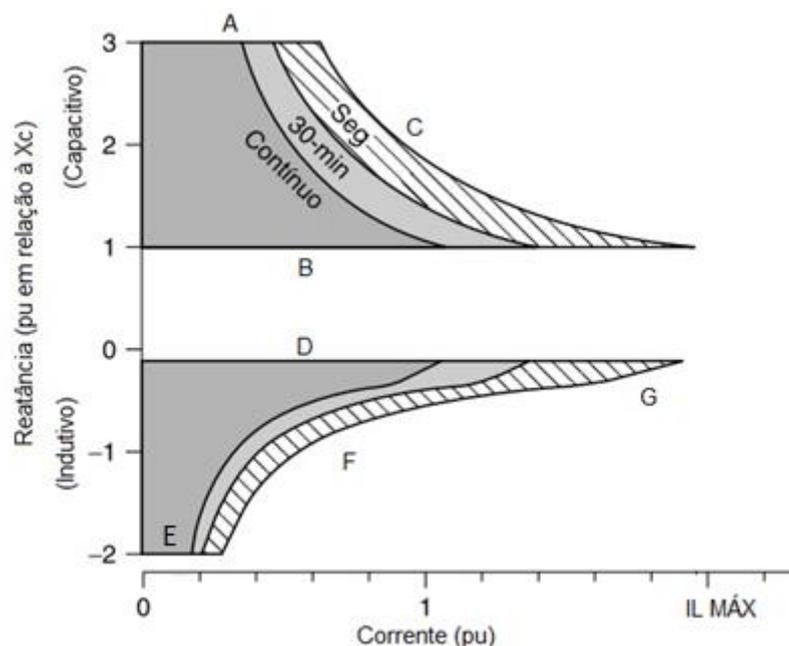


Figura 2.17 - Curva XTCS x corrente de um TCSC típico. Fonte: Adaptado de (MATHUR e VARMA, 2002).

2.2.6.2 Múltiplos módulos de TCSC

Em muitas aplicações de TCSC, como para controle de fluxo de potência e melhora no amortecimento de oscilações de potência, é necessário que se obtenha uma variação suave na reatância controlada, e muitas vezes isso só é possível com a utilização de múltiplos módulos de TCSC operados de forma independente.

Dividindo um TCSC em dois módulos, cada um com metade da potência reativa necessária ao sistema compensado, obtêm-se curvas de capacidade de $V \times I$ semelhantes as mostradas na Figura 2.18, onde os limites de operação da compensação variam de acordo com o modo de operação de cada módulo.

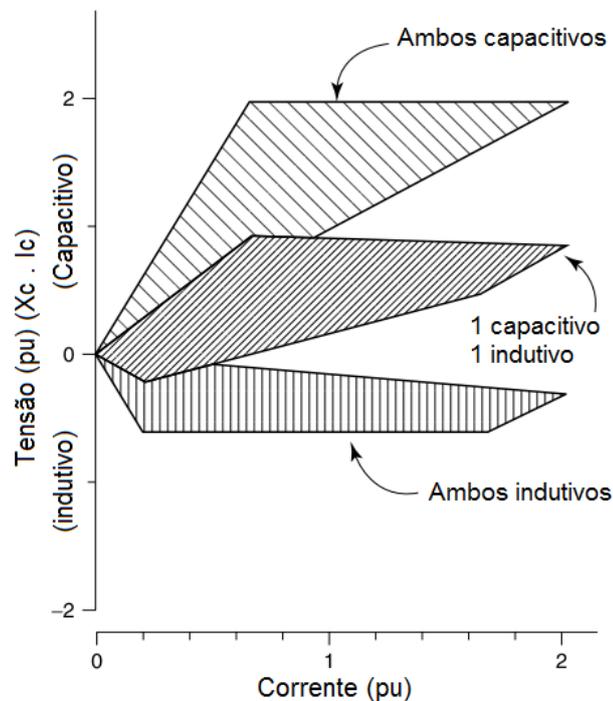


Figura 2.18 - Curva de capacidade de $V \times I$ de um TCSC de dois módulos. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).

As curvas de capacidade de tensão e reatância em função da corrente de TCSC's de múltiplos módulos são mostrados na Figura 2.19 e na Figura 2.20 respectivamente. É evidente que este tipo de aplicação torna o sistema mais caro se comparado a um único módulo, no entanto há grande melhora no controle da reatância.

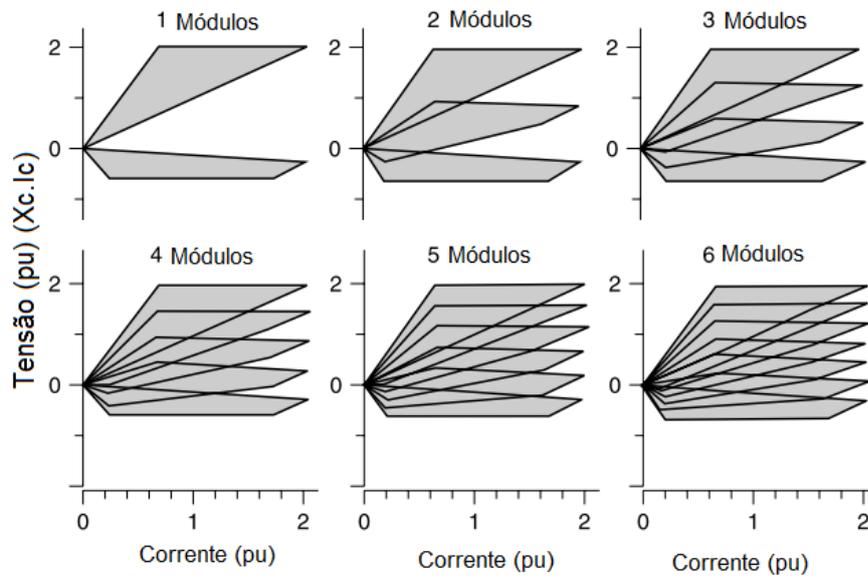


Figura 2.19 - Curvas de capacidade de $V \times I$ para um TCSC com múltiplos módulos. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).

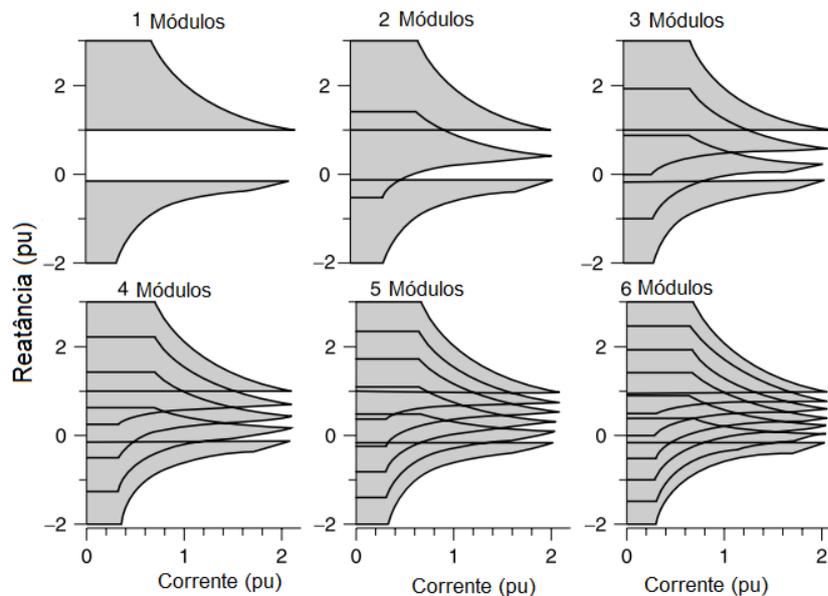


Figura 2.20 - Curvas de capacidade de $X_{TCSC} \times I$ para um TCSC com múltiplos módulos. Fonte: (MATHUR e VARMA, 2002).

2.2.7 Controle do TCSC

O controle do TCSC consiste em controlar o disparo dos tiristores de forma a alterar a impedância da linha de transmissão compensada e suprir as necessidades do sistema. Normalmente o controle busca atender, basicamente, a três funções: proteção, controle da reatância do TCSC (de forma a se obter o controle de fluxo de potência e estabilidade frente a oscilações eletromecânicas) e mitigação de ressonância subsíncrona (RSS). No entanto

muitos autores propõem outras funções para o TCSC, como por exemplo (TENÓRIO e JENKINS, 1997), que estuda sua aplicação como limitador de corrente de falta.

A função de proteção tem por objetivo fazer o bypass dos capacitores em três situações: sobrecorrente na linha, sobrecorrente nos varistores e excesso de dissipação de energia dos varistores.

No caso de sobrecorrente na linha devido à uma falta em que a corrente conduzida pelo MOV atinge seu limite, o sistema de controle rapidamente implementa, nas três fases, o bypass do capacitor e do MOV por meio dos tiristores, para reduzir as correntes sobre estes. Se a corrente volta para seu valor natural e permanece por determinado tempo, o bypass é removido.

A proteção para excesso de energia no varistor inicia o bypass quando a energia dissipada atinge seu limite. Nesse caso o bypass não é removido automaticamente devido as longas constantes de tempo associadas a recuperação térmica do varistor.

O controle de reatância permite, entre outras coisas, o controle do fluxo de potência e o amortecimento de oscilações eletromecânicas. Para isso, o sistema de controle recebe informações do TCSC, como tensão e corrente de operação, para que essas grandezas sejam comparadas com os valores ajustados de acordo com a estratégia de controle.

2.2.8 Amortecimento de oscilações eletromecânicas

A compensação série controlada pode ser aplicada de forma efetiva para amortecer oscilações de potência. Para que isso aconteça é necessário variar o grau de compensação aplicado de forma a contrariar as acelerações e desacelerações das máquinas que passam por perturbações. Ou seja, quando o gerador acelera e o ângulo δ aumenta, a potência elétrica transmitida deve ser aumentada para compensar o excesso de potência mecânica na entrada. E de forma inversa, quando o gerador desacelera e o ângulo δ diminui, a potência elétrica deve ser reduzida para equilibrar a potência mecânica insuficiente na entrada.

Na Figura 2.21 são apresentados gráficos que relacionam as variações, do ângulo δ do gerador (a), da potência transmitida (b) e do grau de compensação (c) de forma a ilustrar o amortecimento da oscilação de potência pela compensação série controlada (HINGORANI e GYUGYI, 2000).

As formas de onda da Figura 2.21 (a) mostram a oscilação não amortecida e amortecida do ângulo δ em torno do valor em regime permanente δ_0 . Já as formas de onda da Figura 2.21 (b) mostram as correspondentes formas de onda não amortecida e amortecida da oscilação de potência elétrica com base no valor nominal P_0 , considerando que uma falta causou uma repentina queda da potência P e iniciou a oscilação. Por fim, a forma de onda (c) apresenta a

variação do grau de compensação série capacitiva, K , aplicada. Como pode ser visto, K é máxima quando $d\delta/dt$ é positivo, e zero quando $d\delta/dt$ é negativo. Com K máximo a impedância da linha é mínima e conseqüentemente, a potência elétrica transmitida pela linha é máxima. Com K igual a zero, a impedância da linha é máxima, e a potência transmitida é mínima. Este tipo de controle, conhecido como “bang-bang”, é o mais efetivo para grandes oscilações de potência (HINGORANI e GYUGYI, 2000).

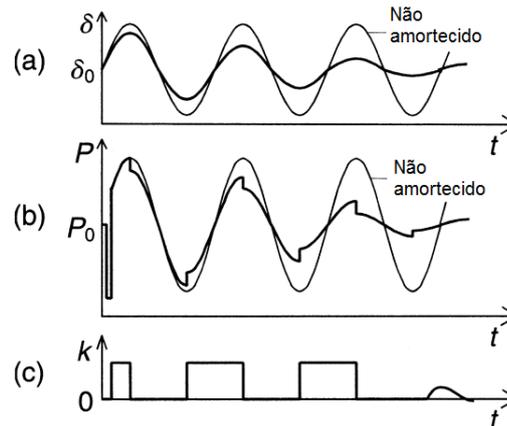


Figura 2.21 – Formas de onda que exemplificam o amortecimento de oscilações de potência por meio do controle da compensação série. (a) ângulo do gerador, (b) potência transmitida e (c) grau de compensação. Fonte: Adaptado de (HINGORANI e GYUGYI, 2000)

2.2.9 Mitigação de ressonância subsíncrona

Conforme citado em seções anteriores, a ressonância subsíncrona é um problema inerente a sistemas de geração de energia que possuem linhas de transmissão com compensação série, que pode causar sérios danos aos geradores. Ao contrário da compensação série fixa, o TCSC pode ser utilizado como forma de mitigar o problema. A seguir estão listadas algumas das estratégias de controle utilizadas para este fim (TENÓRIO, 1999).

- Mudança da reatância do TCSC de forma a dessintonizar a ressonância, desde que normalmente os sistemas de transmissão apresentam altos fatores de qualidades (Q) para frequências subsíncronas. Assim uma pequena variação na impedância da linha pode surtir o efeito de dessintonização;
- Modulação ativa de sua reatância de forma a combater as oscilações subsíncronas, mantendo esta modulação com a fase controlada para se obter o máximo efeito de supressão das correntes subsíncronas;
- Levando o TCSC a operar num ponto capacitivo a 60 Hz, mas que tem um comportamento indutivo-resistivo em determinadas faixas de frequências subsíncronas;

- Estratégia especial de controle usando um malha de realimentação baseada na derivada da corrente de linha.

3. INFLUÊNCIA DA COMPENSAÇÃO SÉRIE NA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

Como apresentado em seções prévias, a compensação série proporciona diversos benefícios quando instalada principalmente em linhas de transmissão longas. Por isso, seu uso tornou-se bastante comum em todo o mundo. Mesmo que a compensação série seja conhecida por criar de problemas ressonância subsíncrona e nos sistemas proteção, o retorno é geralmente considerado digno do esforço de engenharia extra, necessário para projetar e operar corretamente essas linhas de transmissão compensadas.

Dentre todas as funções de proteção, a de distância é a mais afetada por sistemas de compensação série. Um bom exemplo disso é que se uma grande parte da reatância indutiva de uma linha é cancelada pelo capacitor série, a impedância vista pelo relé é diretamente afetada. Em muitos casos, os capacitores em série estão localizados nas extremidades da linha de transmissão, pois é a alternativa que demanda menor investimento financeiro, já que não é necessária a construção de uma nova subestação. No entanto, uma falta próxima à subestação, pode fazer com que um relé enxergue uma distância negativa, assim, o elemento de distância interpreta como sendo uma falta “atrás” do relé e deixa de proteger a linha.

A escolha da estratégia de proteção dos bancos de capacitores tem grande influência na atuação do relé de distância, pois quando ocorre o bypass dos capacitores durante uma falta, a impedância vista pelos relés de proteção muda consideravelmente, a depender da estratégia de proteção utilizada.

Este capítulo apresenta os principais fatores que implicam na má operação do relé de distância quando instalado em sistemas com compensação série.

3.1 Influência na Impedância Efetiva

Em linhas de transmissão com compensação série os ajustes das zonas de proteção dos relés de distância são fortemente influenciados pelo tipo de bypass utilizado como proteção de sobretensão do capacitor. Das primeiras instalações de compensação série até o fim da década de 1970 essa proteção era feita normalmente por centelhadores e em instalações mais modernas por varistores à óxido metálico (ALEXANDER, ROWE, *et al.*, 2002). Como mostrado no capítulo anterior, também são possíveis arranjos que utilizam as duas tecnologias simultaneamente. A seguir é apresentado a forma como o bypass do capacitor pode influenciar a impedância vista pelo relé de distância.

3.1.1 Bypass por centelhador

O tipo mais simples de bypass de capacitores é com o uso de centelhadores, conforme esquema típico mostrado na Figura 3.1, a seguir. Este tipo de proteção normalmente é projetado para disparar automaticamente sempre que a tensão nos terminais do capacitor atingir o valor de ajuste, que normalmente fica entre 2 e 3.5 pu com relação à tensão observada em regime nominal (ALEXANDER, ROWE, *et al.*, 2002).

Assim que ocorre uma falta o centelhador começa a conduzir em alguns microssegundos, fazendo o bypass completo do capacitor. Se a falta for interna, a condução do centelhador é interrompida quando o disjuntor de bypass é fechado, já para faltas externas alguma providência deve ser tomada para permitir a extinção do arco.

A influência do bypass por centelhador na proteção de distância depende da estratégia de proteção escolhida. Por exemplo, ao se considerar a atuação do centelhador no ajuste das zonas de proteção, e a mesma não ocorrer na ocasião da falta, poderá ocorrer sobrealcance das zonas de atuação. Por outro lado, se a atuação do gap não for contemplada no ajuste e ocorrer durante a falta, poderá ser observado o subalcance dessas zonas (NOVOSEL, PHADKE, *et al.*, 1997).

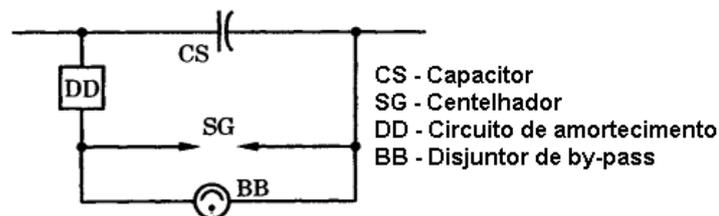


Figura 3.1 - Esquema típico de proteção contra sobretensão de capacitores utilizados na compensação série. Fonte: adaptado de (ANDERSON, 1999).

Outro problema que pode ocorrer no instante em que acontece a atuação do centelhador é que como a corrente é desviada do capacitor, este se descarrega em um reator de amortecimento, produzindo um transitório de alta frequência pelo capacitor. A depender da existência de linhas adjacentes e da localização do relé, esse transitório pode ter grande influência nos valores de tensão e corrente vistos pelo relé, sendo necessária a filtragem adequada das grandezas medidas de forma a garantir a correta detecção da falta (ALEXANDER, ROWE, *et al.*, 2002).

3.1.2 Bypass por Varistor

A utilização de varistores a óxido metálico (MOV) para proteção contra sobretensão de bancos de capacitores em sistemas compensados a partir da década de 1980 gerou a necessidade de se modelar estes dispositivos, pois no momento em que ocorre o bypass do banco de capacitores, estes não podem ser considerados estando completamente em operação nem completamente fora de operação.

O que ocorre, na verdade, é que o varistor desvia apenas uma parte da corrente do capacitor em cada semiciclo, a partir do momento em que a tensão nos terminais do capacitor atinge o limite operacional determinado em projeto. Isto resulta em um grau de compensação reduzido à medida em que a sobrecorrente no capacitor aumenta, tornando-o menos efetivo. A Figura 3.2 ilustra uma situação de baixo carregamento, na qual o varistor não entra em condução, enquanto que a Figura 3.3 apresenta uma situação de carregamento elevado, com o bypass efetivo do capacitor.

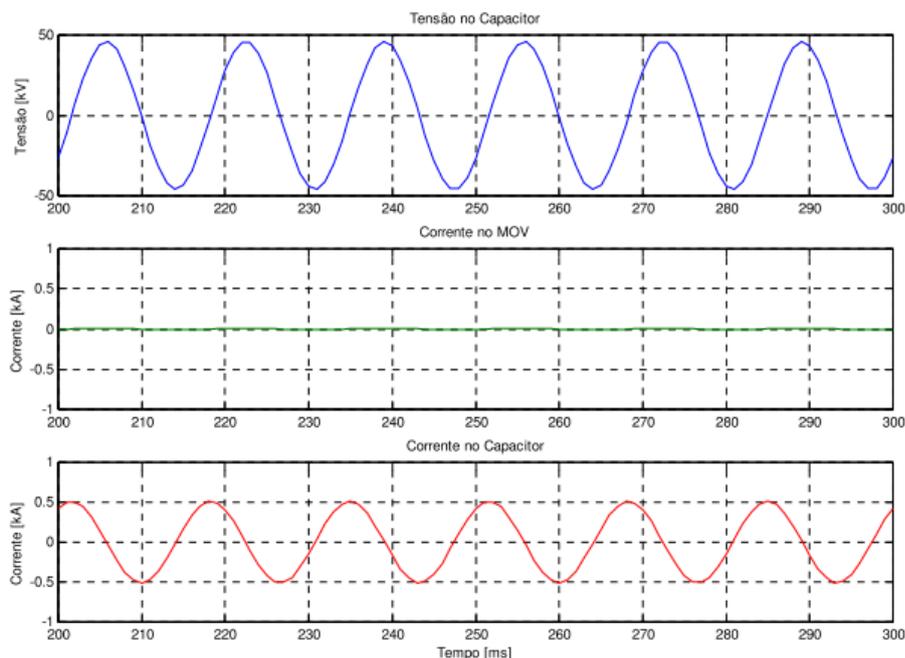


Figura 3.2 - Tensão e corrente nos terminais de um capacitor protegido por MOV em uma situação de sobrecarga leve, na qual não ocorreu condução do MOV. Fonte: (SANTOS, 2006).

Verifica-se que não há corrente circulando pelo capacitor e pelo varistor simultaneamente, isso pode ser visto com clareza na Figura 3.3, que mostra que a sobreposição das duas correntes equivalem a corrente de falta da linha (ANDERSON, 1999) (SANTOS, 2006).

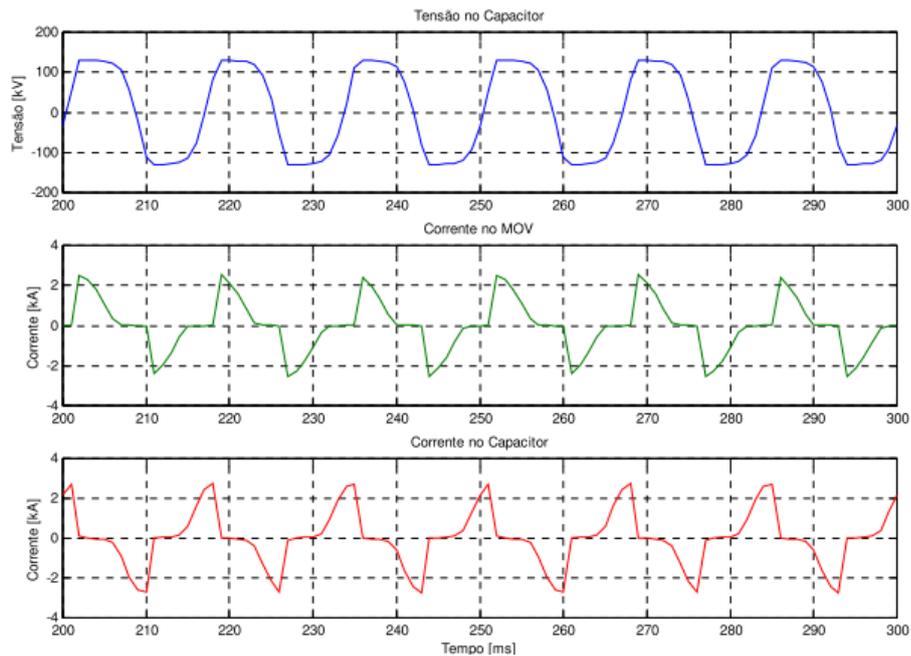


Figura 3.3 - Tensão e corrente nos terminais de um capacitor protegido por MOV em uma situação de sobrecarga severa, na qual ocorreu condução do MOV. Fonte: (SANTOS, 2006).

Em 1987 (GOLDSWORTHY, 1987) propôs expressões analíticas que descrevem a impedância efetiva do conjunto composto por um capacitor e pelo seu respectivo varistor de proteção. A Figura 3.4 mostra o modelo proposto, que consiste em um circuito série com um capacitor e um resistor variáveis, onde R_c e X_c são funções da corrente da linha.

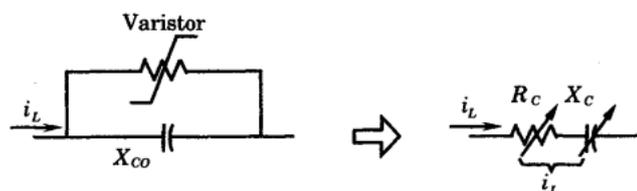


Figura 3.4 - Modelo linearizado da impedância de um varistor. Fonte: (JUSAN, 2007).

Os gráficos apresentados na Figura 3.5 deixam claro que tanto a resistência quanto a capacitância do modelo proposto são não lineares e são funções da corrente no capacitor. O eixo horizontal representa a corrente em pu, onde 1 pu representa a corrente máxima permitível no capacitor sem condução do varistor, ou seja, para valores inferiores a este, o modelo equivale a reatância do capacitor fixo da compensação.

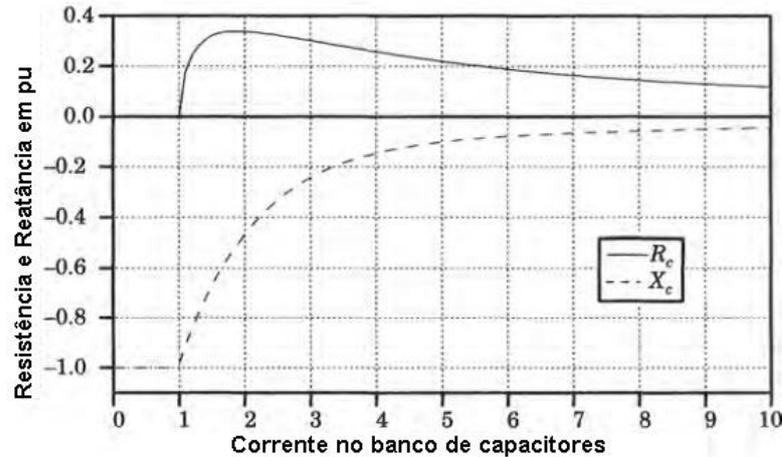


Figura 3.5 - Resistência e reatância efetivas de um banco de capacitores protegido por varistor em função da corrente. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).

Para valores de corrente superiores a 1 pu, o varistor entra em condução, e é possível verificar que na medida em que a corrente aumenta, a reatância capacitiva do modelo cai, enquanto que o valor da resistência sobe, demonstrando que quanto maior a corrente, maior o tempo de condução do varistor e menor a impedância efetiva do sistema (SANTOS, 2006). Observa-se que quando a corrente atinge valores muito elevados, o sistema se torna praticamente resistivo, restando apenas cerca de 5% do valor normal de reatância capacitiva (ANDERSON, 1999).

Outra forma bastante clara de visualizar a característica de impedância apresentada na Figura 3.5 é por meio do gráfico R-X mostrado no plano complexo da Figura 3.6 a seguir, onde os valores de R_c e X_c estão ambos em pu, com base na reatância do capacitor na frequência fundamental do sistema, em ohms. Na situação apresentada a corrente igual a 1 pu é definida como valor para o início da condução do varistor.

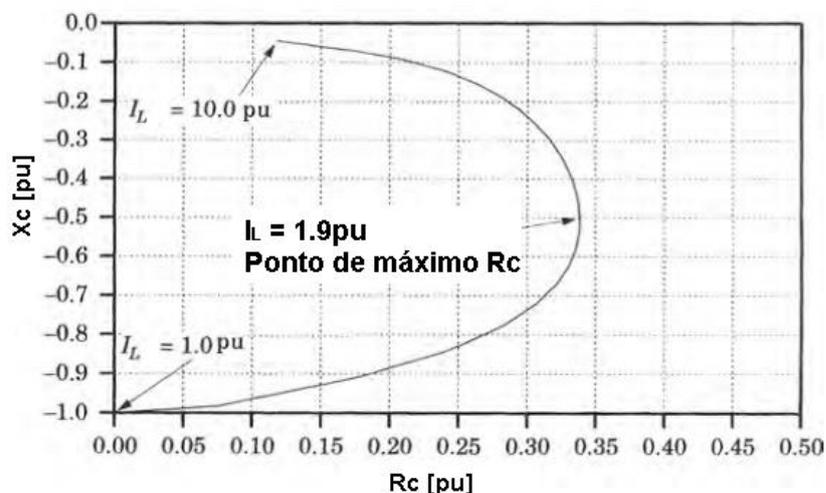


Figura 3.6 - Resistência e reatância efetivas do circuito equivalente formado por um capacitor e um varistor em paralelo. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999) (SANTOS, 2006) (MARTTILA, 1992).

Com relação à atuação do relé de distância, se a compensação está instalada entre o relé e o ponto de falta, a impedância vista pelo relé, mostrada na Figura 3.7, contém a impedância da linha, a resistência de falta (se existir) e o circuito equivalente composto pelo capacitor e pelo varistor. Sendo que as características do último variam conforme discutido anteriormente (KASZTENNY, 2001).

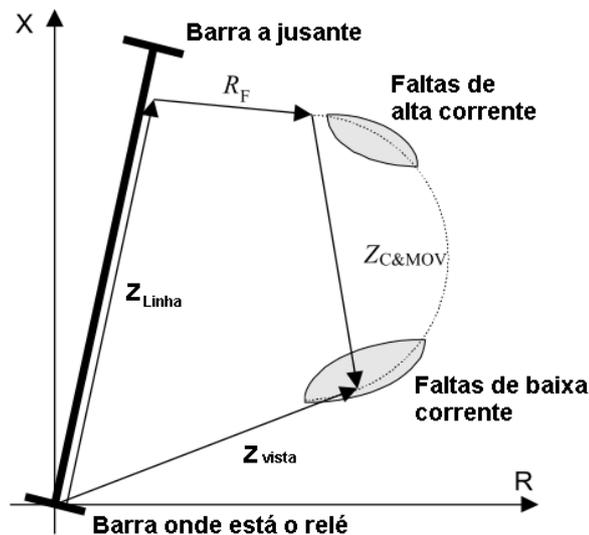


Figura 3.7 - Mudança na impedância vista pelo relé de distância quando a compensação se encontra dentro do "loop" de falta. Fonte: Adaptado de (KASZTENNY, 2001).

O sobrealcance do relé de distância é a primeira consequência da situação descrita acima. No pior caso, para faltas de baixa corrente para as quais o varistor não conduz, a impedância equivalente do capacitor e varistor equivale a reatância capacitiva do capacitor, que muda consideravelmente a impedância vista pelo relé. Como as linhas são tipicamente compensadas entre 50 e 70%, o sobrealcance normalmente alcança esse mesmo percentual.

Já para faltas de correntes elevadas, embora a impedância vista pelo relé seja alterada pela resistência da falta, não há risco de sobrealcance, já que a reatância capacitiva da compensação é reduzida a quase zero pelo bypass feito pelo varistor.

Durante faltas em que a corrente tem intensidade suficiente apenas para condução parcial do MOV, a impedância vista pelo relé conterá parte da compensação acrescida das resistências do MOV e da falta, se houver

A associação do capacitor com o varistor atua como um estabilizador de corrente de falta, pois para correntes mais altas a reatância capacitiva é menor e a resistência maior, o que reduz a corrente se comparada a um sistema sem bypass. Já para correntes menores a reatância capacitiva é maior, reduzindo a impedância do trecho da linha em falta e aumentando a corrente se comparado com um circuito sem compensação. Como resultado, a característica de corrente de falta versus localização da falta é mais linear para linhas compensadas comparadas as não compensadas (KASZTENNY, 2001).

Para avaliar o efeito do bypass dos capacitores na tensão e na corrente vistas pelo relé de proteção, será apresentada a seguir uma breve análise do sistema da Figura 3.8. Considera-se que neste sistema haviam duas linhas de transmissão paralelas e que uma saiu de serviço devido a uma falta e que a linha remanescente deve transmitir toda a potência, resultando em uma corrente de 2300 A, sendo o bypass dos capacitores feito a partir de 2500 amperes. Outras características deste sistema são:

- Tensão de linha de 500 KV.
- 500 km de extensão.
- Compensação série instalada nos dois terminais.
- Potência transmitida de 2000 MW.

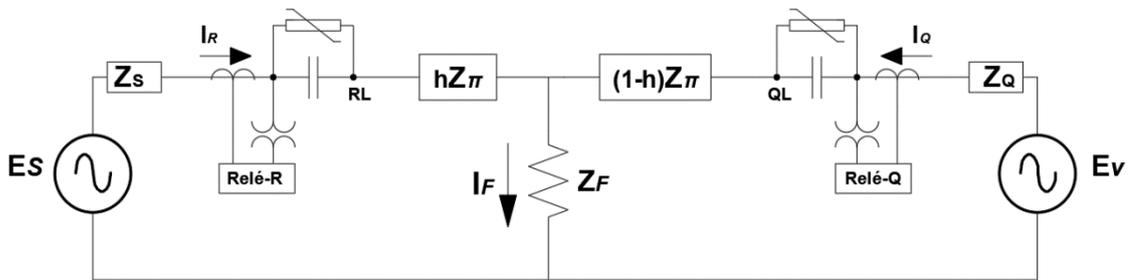


Figura 3.8 - Exemplo de sistema elétrico com compensação série e sistema de bypass dos capacitores por MOV. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).

A Figura 3.9 mostra a intensidade da corrente vista pelo relé da barra R devido a faltas ao longo da linha para diversos graus de compensação. São apresentadas duas situações distintas, (a) sem bypass dos capacitores, (b) com bypass. Verifica-se que os pontos de ressonância são eliminados pela presença dos varistores de proteção, tornando as correntes de falta semelhantes àquela equivalente à linha sem compensação, mas um pouco maior, devido à capacitância do próprio sistema de bypass e pelo desvio apenas parcial da corrente para certas localizações de falta. Em todas as situações é considerada uma resistência de falta de 0,01 pu.

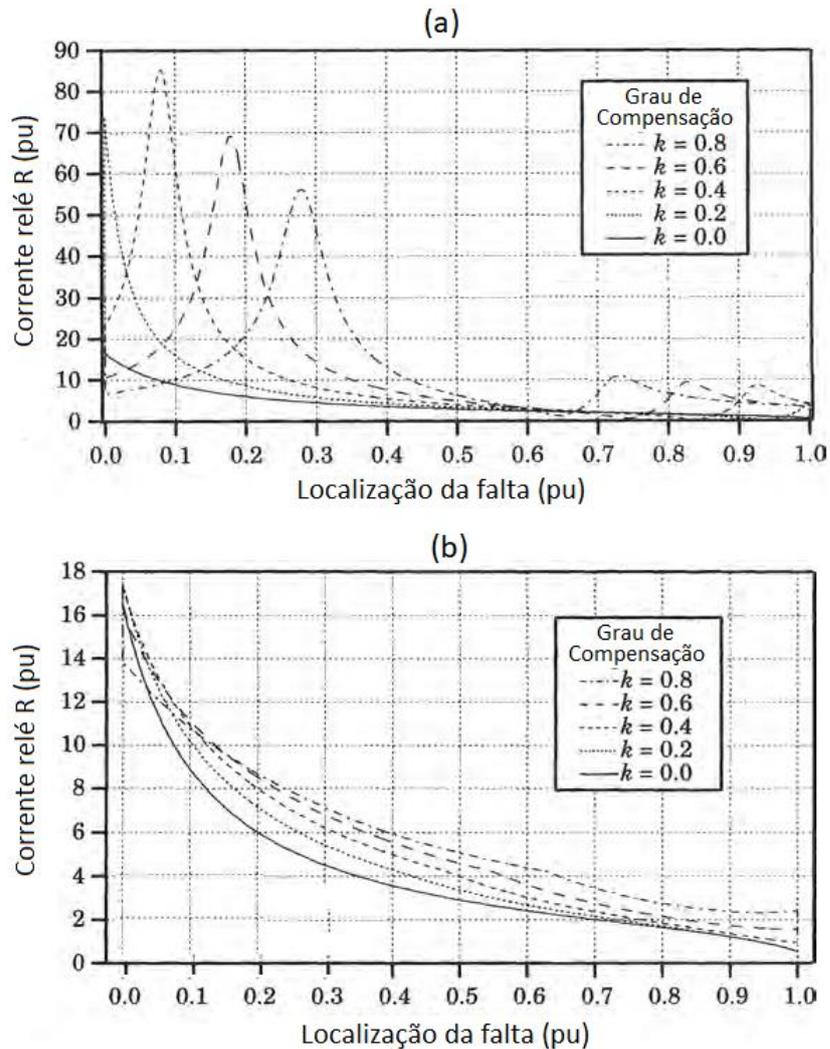


Figura 3.9 - Intensidade da corrente vista pelo relé da barra R em função da localização da falta para diferentes graus de compensação. (a) com sistema de bypass dos capacitores. (b) sem bypass. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999)

Os pontos de ocorrência de falta que provocam o bypass dos capacitores em cada barra são mostrados na Figura 3.10 para diferentes graus de compensação. Nessa figura, a linha mais alta indica a condução do varistor e a linha baixa indica não condução. É possível observar que para pequenos valores de compensação há regiões próximas ao centro da linha onde nenhum dos capacitores sofre bypass. No entanto para graus de compensação altos, há situações onde os dois capacitores estão em bypass.



Figura 3.10 - Condução do varistor em função da localização da falta e ao nível de compensação. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).

Já a Figura 3.11 apresenta o perfil de tensão vista pelo relé em função da localização da falta para o sistema sem bypass (a) e com bypass por varistores (b). Nota-se que assim como visto para a corrente, o sistema de proteção dos capacitores eliminam as ressonâncias existentes para faltas próximas aos terminais da linha.

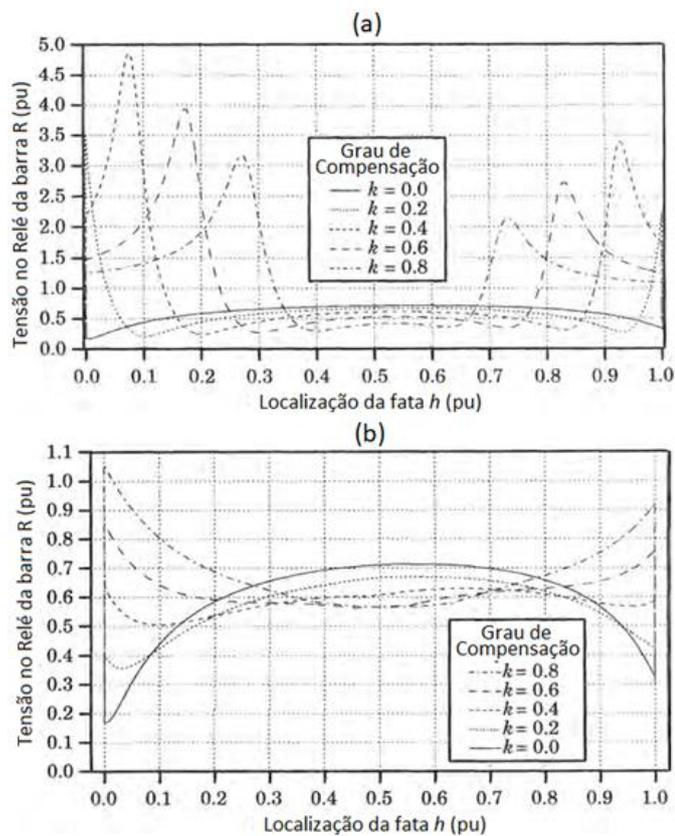


Figura 3.11 - Tensão vista pelo relé instalado na barra R em função da localização da falta para diversos graus de compensação. (a) com varistor de proteção para os capacitores. (b) sem proteção dos capacitores. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).

Por fim, a impedância vista pelo relé da barra R em função do deslocamento da falta desde após o relé da barra R (ponto RL da Figura 3.8) para o terminal Q é mostrada na Figura 3.12. É possível verificar que há descontinuidades nas curvas nos pontos em que o varistor entra e sai de operação. Isto fica claro quando as curvas têm mudanças de direção abruptas. No terminal Q, a impedância dá um salto, indicando que a localização da falta mudou de um lado do capacitor para o outro. Também se nota que há problemas para detecção de faltas internas à barra R, já que a impedância vista atinge o 4º quadrante

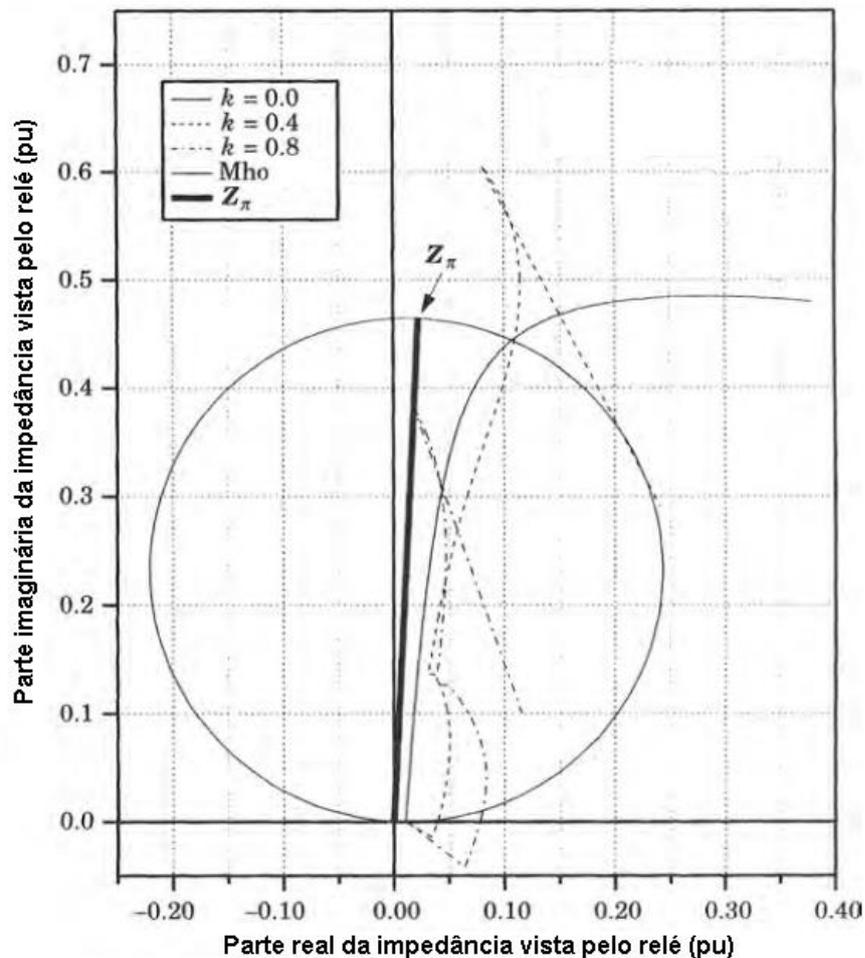


Figura 3.12 - Característica de impedância da proteção de distância estudada no exemplo. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).

Na situação apresentada pelo exemplo, a impedância característica MHO (diâmetro do círculo) está definida como o total da impedância longitudinal da linha de transmissão, ou seja 100% da linha está protegida em 1ª zona. Nesta circunstância verifica-se que há uma tendência de sobrealcance do relé na detecção da falta que diminui com o aumento do grau de compensação. Para mostrar isso, os estão relacionadas abaixo, na Tabela 3.1, o alcance verificado do relé R para diversos graus de compensação.

Tabela 3.1 - Alcance do relé para vários graus de compensação. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).

Grau de compensação	20%	40%	60%	80%	0%
Alcance do relé (pu)	0.892	0.906	0.924	0.984	1

No exemplo apresentado, o sobrealcance do relé diminui com aumento da compensação. Isso acontece porque com o aumento do grau de compensação as correntes de falta normalmente têm seu valor aumentado, e assim é mais provável de ocorrer o bypass pelo varistor, que praticamente remove a compensação do sistema. Portanto, conclui-se que a impedância equivalente de uma linha de transmissão com compensação série pode variar fortemente, a depender do tipo de proteção contra sobretensões utilizado, da configuração do sistema, do valor da corrente de falta e do grau de compensação.

3.2 Transitórios de Alta Frequência

Quando ocorre uma falta em uma linha de transmissão, as grandezas elétricas relacionadas a esta sofrem mudanças muito rápidas. Em seguida, transitórios de alta frequência (100 a 1000 Hz) são excitados como resposta das indutâncias e capacitâncias do sistema. Por isso, quando o bypass do capacitor opera, considerando que a corrente de falta é alta o suficiente, o relé enxerga tensões e correntes bastante diferentes. Por esta razão, os relés devem ser projetados de forma que sejam capazes de verificar a ocorrência de uma falta mesmo sob tais instabilidades, que incluem condições de ressonância e de transitórios de altas e baixas frequências (ANDERSON, 1999).

Os transitórios de alta frequência ocorrem devido à frequência natural de oscilação das indutâncias e capacitâncias do sistema. Qualquer mudança de tensão ou de corrente na linha de transmissão, como uma falta, bypass ou inserção de capacitores requer um reajuste da energia armazenada entre estas capacitâncias e indutâncias, o que provoca a circulação de correntes elevadas (SOUILLARD, 1978).

Normalmente as correntes de alta frequência são amortecidas rapidamente, no entanto, esses transitórios podem durar alguns ciclos, tempo superior ao tempo de tomada de decisão dos sistemas de proteção modernos, que são projetados para interpretar as grandezas medidas em termos da componente fundamental. Para isso utilizam filtros passa-baixa digitais robustos (IEEE COMMITTEE REPORT, 1981).

Em linhas de transmissão longas, os transitórios de alta frequência podem ser diferentes em cada extremo de uma linha. Assim, relés idênticos podem enxergar tensões e correntes totalmente diferentes onde estão instalados (IEEE COMMITTEE REPORT, 1981).

3.3 Transitórios Sub-harmônicos

A aplicação de compensação série em linhas de transmissão introduz no sistema condições de ressonância de valores de frequência inferiores à fundamental, por isso, são chamadas de subsíncronas.

Muitos dos problemas que influenciam relés em linhas compensadas são causadas por oscilações subsíncronas. Quando capacitores instalados em série não sofrem bypass durante uma falta, o loop de falta pode conter resistência e reatâncias indutiva e capacitiva. Esse circuito possui sua própria frequência de ressonância, que é tipicamente inferior à frequência fundamental. O valor exato da frequência de ressonância e a intensidade do transitório depende diretamente do local da falta e dos demais parâmetros do circuito (KASZTENNY, 2001) (MILLER, WATSON, *et al.*, 2014).

A Figura 3.13 mostra uma linha de transmissão compensada no terminal remoto. Para uma falta no mesmo terminal, após o capacitor, será formado um circuito RLC que produzirá um transitório sub-harmônico. Devido à frequência do transitório ser inferior à do sistema a reatância indutiva da linha parecerá menor enquanto a capacitiva aumentará. Como resultado haverá uma maior queda de tensão transitória nos terminais do capacitor e momentaneamente a linha terá seu grau de compensação aumentado. Isso pode causar má operação do sistema de proteção de distância (MILLER, WATSON, *et al.*, 2014).

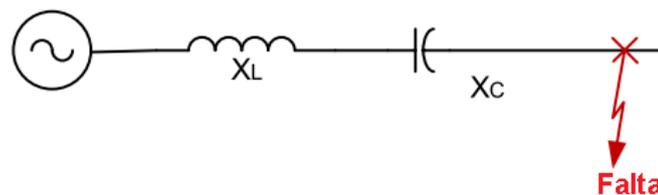


Figura 3.13 - Linha de transmissão com compensação série no terminal remoto. Fonte: Adaptado de (MILLER, WATSON, *et al.*, 2014).

A impedância vista pelo relé de distância instalado na barra emissora do exemplo acima está mostrada na Figura 3.14, a seguir, onde o círculo é a característica MHO da zona 1 do relé.

A impedância vista pelo relé muda diversas vezes em espiral devido à resposta transitória do sistema superposta à linha em falta. Nesse caso foi considerada que há alguma resistência no sistema, que amortece o transitório. Inicialmente, durante a resposta transitória, a impedância medida aparenta ser inferior ao limite da primeira zona, portanto o relé pode sinalizar a ocorrência de uma falta erroneamente, já que a falta ocorreu fora dos limites da primeira zona.

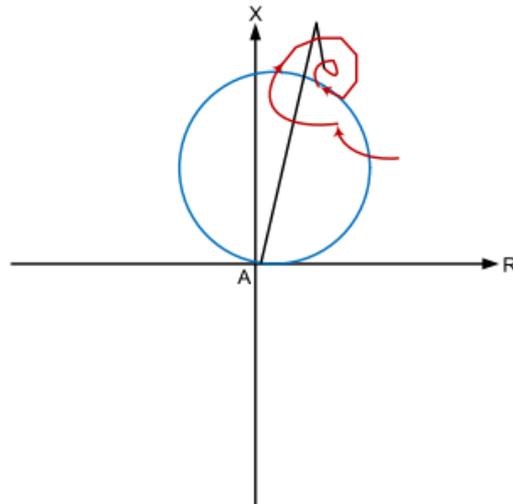


Figura 3.14 - Sobrealcançe do relé de proteção devido a transitórios subsíncronos. Fonte: (MILLER, WATSON, *et al.*, 2014).

É possível reduzir esse problema reduzindo o alcance da primeira zona ou introduzindo um atraso proposital nesta, de forma a permitir que a atuação do relé só ocorra depois do transiente. Nessa situação as consequências para coordenação com outros sistemas de proteção deve ser estudada criteriosamente (MILLER, WATSON, *et al.*, 2014).

Transitórios sub-harmônicos também podem ocorrer após uma falta severa em que o varistor promove o bypass do capacitor. Nessa situação, após a extinção da falta o capacitor é reinsertido no sistema, o que causa grandes oscilações pós falta devido à grande quantidade de energia armazenada na indutância da linha durante a falta (KASZTENNY, 2001). A Figura 3.15 e a Figura 3.16, a seguir, mostram exemplos de formas de onda de tensão e corrente em uma linha de transmissão compensada que passa por uma falta de baixa corrente envolvendo uma fase e terra. Nestas imagens fica claro que há grandes oscilações de tensão e de corrente.

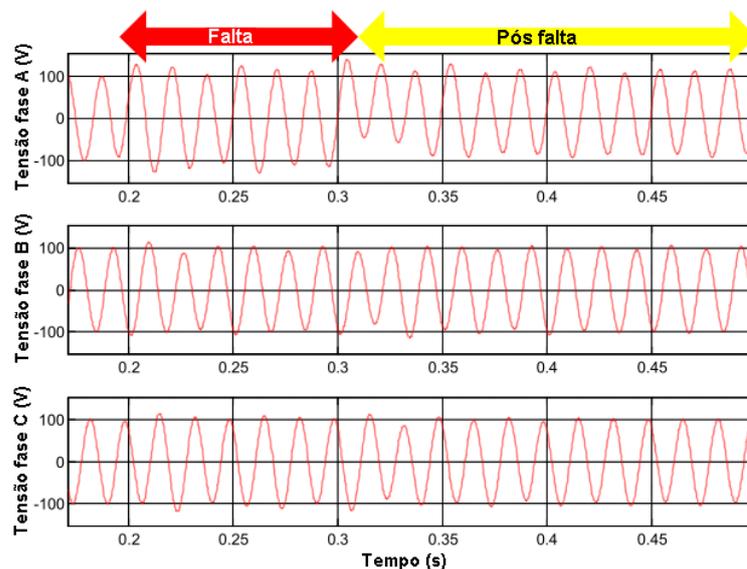


Figura 3.15 - Formas de onda de tensão em uma linha com compensação série em falta (lado da barra).
Fonte: Adaptado de (KASZTENNY, 2001).

Devido tais oscilações, o instante em que ocorre a passagem por zero de todos os sinais varia com o tempo, isso pode causar problemas se o relé utiliza a passagem por zero para promover o monitoramento da frequência das grandezas medidas. Já se o relé utiliza fasores para monitoramento da frequência, ainda assim não estará livre de erros, pois até mesmo esses terão seu comportamento influenciado pelas oscilações subsíncronas. Portanto devem ser previstos filtros nos algoritmos dos relés para que esses sejam imunes a essas oscilações.

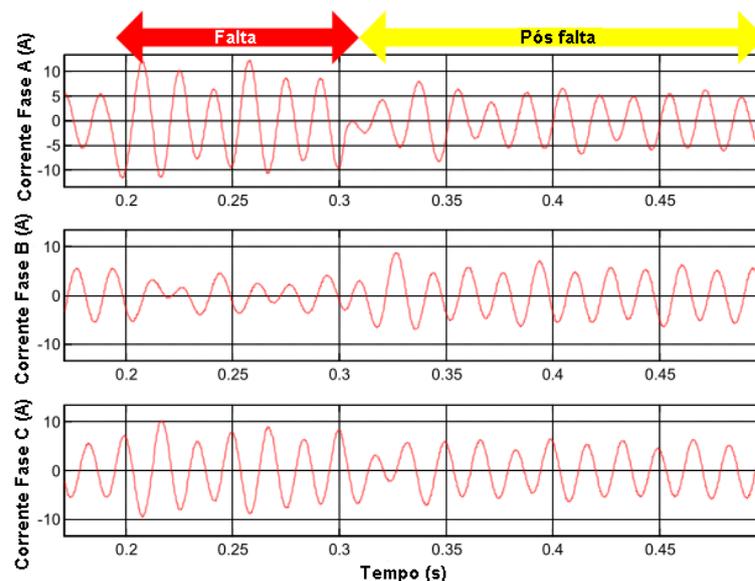


Figura 3.16 - Formas de onda de corrente em uma linha com compensação série em falta. Fonte:
Adaptado de (KASZTENNY, 2001).

A Figura 3.17 e a Figura 3.18 apresentam os fasores de tensão e corrente calculados por uma variação do algoritmo de Fourier com janela de dados de um ciclo, considerando a falta citada anteriormente.

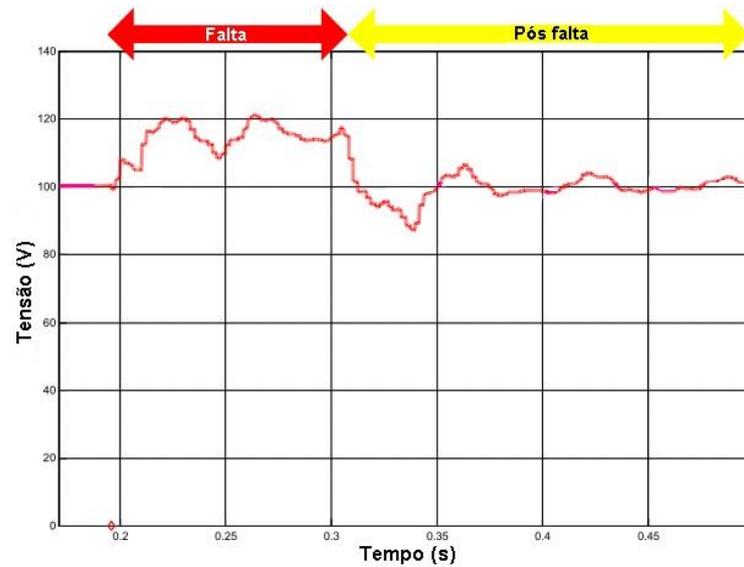


Figura 3.17 - Fasor de tensão de uma linha de transmissão compensada em falta. Fonte: Adaptado de (KASZTENNY, 2001).

Levando em consideração todas as fontes de erro para a função de proteção de distância (até 80% de sobrealcance em regime permanente senoidal devido ao grau de compensação, 10 a 20% devido a erros de impedância em TPs e TCs e 10 a 30% de sobrealcance devido à transitórios), pode ser impraticável a utilização de proteção em primeira zona (KASZTENNY, 2001).

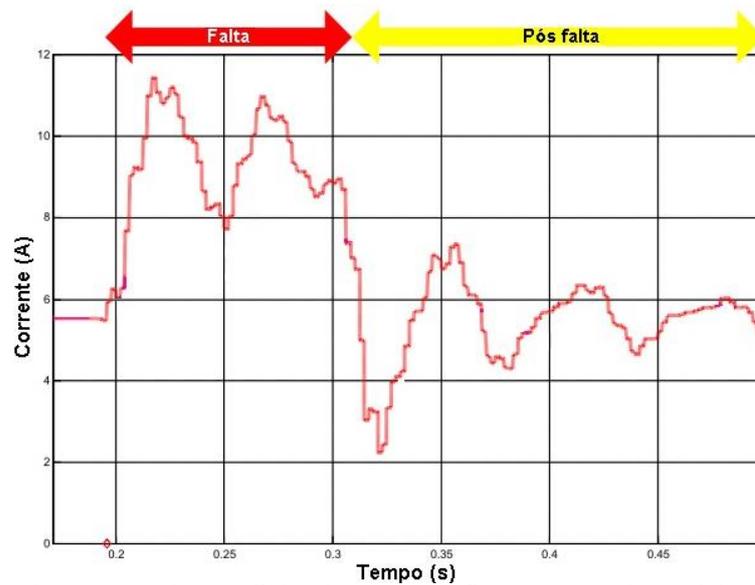


Figura 3.18 - Fasor de corrente de uma linha de transmissão compensada em falta. Fonte: Adaptado de (KASZTENNY, 2001).

3.4 Impedância de Fase Desbalanceada

Este efeito ocorre como resultado da atuação do sistema de bypass do capacitor operando para proteger e reinserir os capacitores de forma assimétrica entre as fases. Este problema ocorre tanto em sistemas protegidos por centelhadores quanto por varistores.

Os centelhadores iniciam a condução quando a tensão nos terminais do capacitor, em qualquer uma das fases, alcança o valor de ajuste, removendo completamente o capacitor do sistema. Como isso ocorre em instantes diferentes para cada fase, resulta em um grande desequilíbrio. Já os varistores conduzem por partes de cada semiciclo sendo o capacitor responsável pela condução da corrente no restante do tempo. Em ambos os casos, os relés veem a linha de transmissão sob rápidas mudanças, entre condições de funcionamento normal, de falta e de grande desequilíbrio. Essas mudanças ocorrem ao mesmo tempo em que o sistema de proteção está tomando a decisão sobre a necessidade da abertura da linha (GONÇALVES, 2007) (ANDERSON, 1999).

Diversas abordagens têm sido utilizadas para superar o problema da impedância de fases desbalanceada. Uma solução simples é que o relé só avalie a possibilidade de abertura da linha após o funcionamento do sistema de bypass do capacitor. Isso causa atraso na extinção da falta e pode não ser aceitável em alguns casos (ANDERSON, 1999).

3.5 Inversão de Tensão e de Corrente

As linhas de transmissão são predominantemente indutivas, portanto para faltas internas à linha, a corrente que flui entre um terminal e o ponto de falta estará sempre atrasada em relação à tensão da fonte. A Figura 3.19 apresenta essa situação com os diagramas fasoriais da tensão em alguns pontos de uma linha não compensada sob falta.

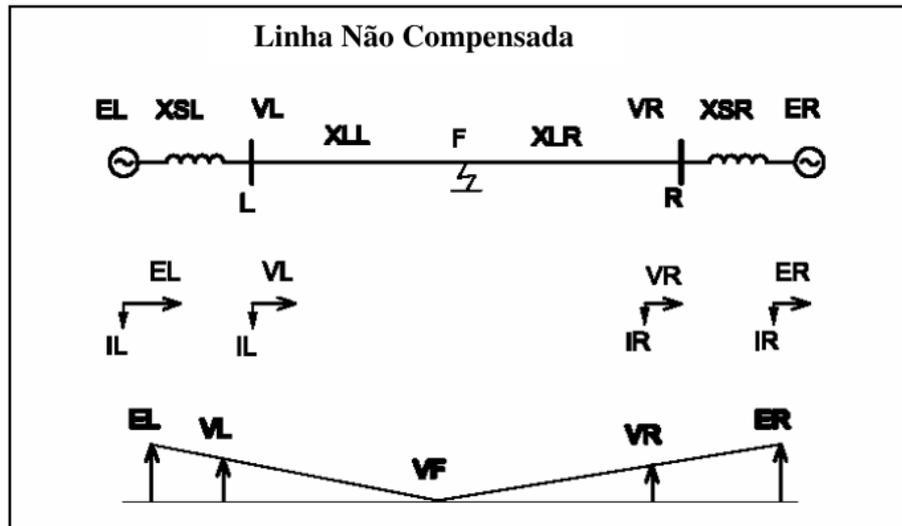


Figura 3.19 - Fasores de tensão em uma linha de transmissão não compensada sob falta franca. Fonte: (SANTOS, 2006).

O funcionamento dos relés de distância é totalmente dependente do comportamento descrito acima, já que sua atuação depende da impedância vista entre seu local de instalação e o ponto de ocorrência da falta, e essa é considerada indutiva. Portanto, a introdução de capacitores em série, especialmente em pontos próximos das extremidades da linha, pode acarretar na mudança da característica básica da impedância destes trechos, de indutiva para capacitiva. Com isso, podem ocorrer dois fenômenos, chamados de inversão de tensão e inversão de corrente, que afetam diretamente a capacidade do relé de distância de detectar a ocorrência de uma falta. Esses fenômenos são descritos nas seções seguintes.

3.5.1 Inversão de corrente

A inversão de corrente ocorre quando a corrente de falta vista pelo relé é capacitiva. Para que isso aconteça é necessário que o capacitor da compensação série esteja localizado entre o relé e o ponto da falta, e que o módulo de sua reatância seja superior a reatância indutiva da fonte somada a do trecho da linha em falta, tornando a corrente capacitiva, como mostra a Figura 3.20 (SANTOS, 2006).

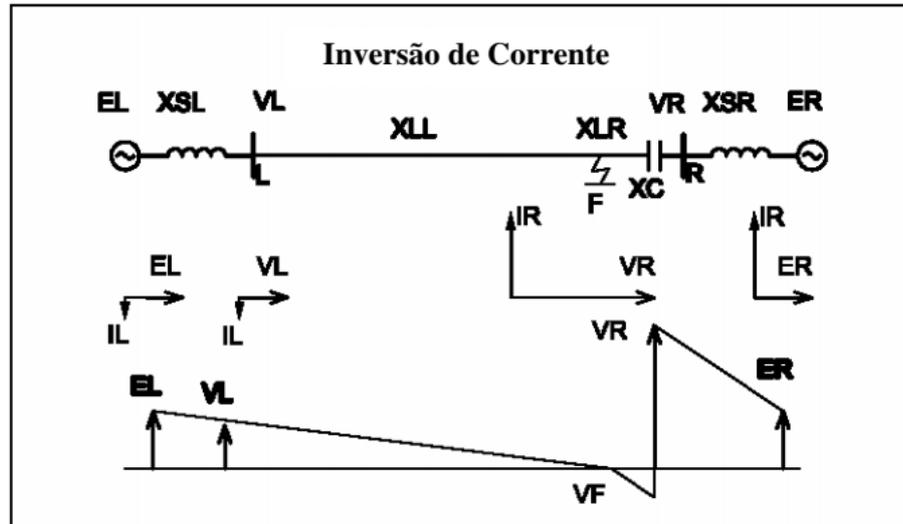


Figura 3.20 - Diagramas fasoriais das correntes em uma linha com compensação série em falta franca com inversão de corrente no terminal R. Fonte: (SANTOS, 2006).

No terminal L, a corrente que flui da fonte E_L para a falta é indutiva, enquanto que no terminal R, uma corrente capacitiva flui da fonte E_R para a falta, já que neste trecho encontra-se instalada a compensação série e sua reatância é superior a do trecho em falta, formado pela linha e pelo sistema. Com isso, as correntes nos terminais da linha são consideradas estando no mesmo sentido, o que caracteriza uma falta interna para o relé da barra L e falta externa para o relé da barra R.

É possível evitar a inversão de corrente instalando os capacitores distantes de fontes fortes. No entanto, no SIN (Sistema Interligado Nacional), dos 41 bancos de capacitores instalados entre compensação fixa e controlada, computados em 2009, em 18 deles a reatância indutiva equivalente da fonte era menor do que a reatância capacitiva do banco. Nestes casos, a inversão da corrente irá ocorrer durante curtos-circuitos próximos aos bancos de capacitores (SOUZA e TUMA, 2009). Outro aspecto relacionado a este fenômeno, é que em curtos-circuitos próximos ao banco de capacitores, os centelhadores e varistores que protegem o banco de capacitores podem atuar, retirando o banco de operação. Mas a atuação das proteções do banco pode não ocorrer para faltas de alta impedância.

3.5.2 Inversão de tensão

O fenômeno de inversão de tensão, mostrado na Figura 3.21, ocorre quando o valor da reatância da compensação série supera o valor da reatância da linha entre o relé e o ponto de falta (ORDACGI, MORAES e SOLLERO, 2005). Ao contrário do que ocorre na inversão de corrente, neste caso a corrente em toda a linha permanece indutiva.

Como pode ser observado, a reatância entre o terminal R e o ponto da falta é capacitiva, e desta forma a tensão no nesse terminal está atrasada em relação à corrente de falta. Isto pode ser facilmente verificado por meio da comparação do vetor da tensão VR apresentado na Figura 3.19 e na Figura 3.21.

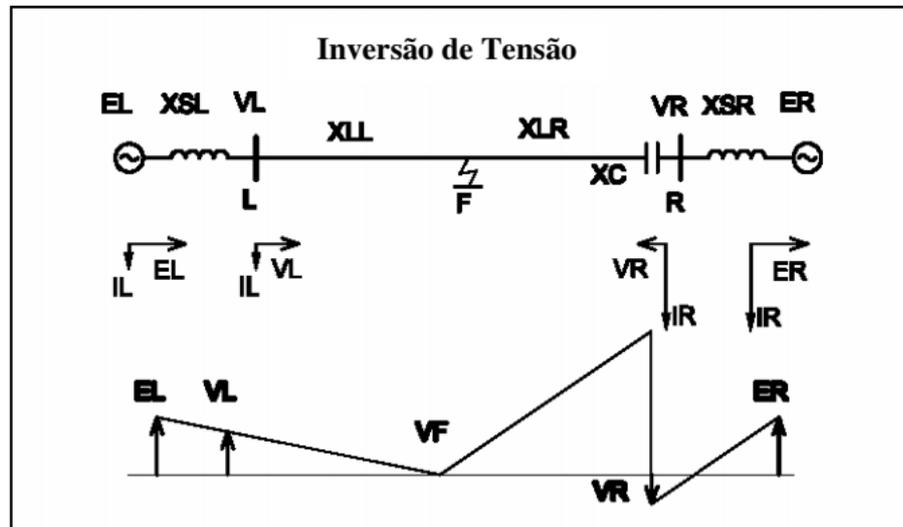


Figura 3.21 - Diagramas fasoriais de uma linha em falta franca com inversão de tensão no terminal R.
Fonte: (SANTOS, 2006)

A inversão de tensão, pode causar graves problemas para a proteção de distância e para os elementos direcionais de proteção da linha. Uma falta interna pode ser vista, pelo relé, como falta externa. E ainda, o relé de uma linha adjacente pode enxergar a mesma falta como interna, o que causaria um desligamento incorreto (CARDOSO JR., DUTRA e SANTOS, 2005).

3.6 Impacto do TCSC

Os efeitos da compensação série por TCSC no desempenho do relé de distância podem ser diferentes dos observados na aplicação da compensação fixa. Principalmente devido à variação dinâmica da impedância e pela possibilidade de transição entre modos de operação em virtude da estratégia de controle empregada.

Conforme seções anteriores, o TCSC pode operar em diferentes modos. A transição entre estes modos, que proporciona a mudança da impedância, não ocorre instantaneamente e pode ocorrer em operação normal ou em falta. Por exemplo, o sistema de controle pode ser configurado para que na ocorrência de uma falta em que o nível máximo de dissipação de energia do MOV seja atingido, o modo de operação deva ser transferido do modo capacitivo para o indutivo, reduzindo a corrente de falta. Com isso, a impedância vista pelo relé de

distância seria modificada, podendo interferir nas tomadas de decisão do sistema de proteção da linha em falta e das adjacentes (WEIGUO, XIANGGEN, *et al.*, 1998).

Sob condições normais, as formas de onda de corrente no indutor e tensão no capacitor do TCSC são simétricas em relação à zero, e as distorções harmônicas de tensão e corrente na linha são de baixa intensidade, não influenciando as leituras do relé. No entanto, quando ocorre uma falta surgem correntes e tensões não simétricas que causam mau funcionamento do sistema de controle, e por consequência do sistema de disparo dos tiristores. Com isso, os níveis de distorção harmônica são elevados causando erros nos sistemas de medição.

3.7 Esquemas de Proteção Utilizados em Linhas Com Compensação Série

O problema de sobrealcance do relé de distância em linhas com compensação série muitas vezes impede a utilização da proteção em primeira zona. Isso ocorre porque se for considerada a atuação total da proteção dos capacitores a compensação é praticamente removida da linha em falta, não sendo necessário considerá-la no ajuste do relé. Já se o sistema não atuar, ou atuar apenas parcialmente, o alcance da primeira zona deve ser reduzido. Além disso, existe a possibilidade de ocorrerem inversões de tensão e de corrente. Por isso, a primeira zona pode ser bloqueada e serem utilizadas apenas a segunda e terceira zonas, de forma que a atuação do relé só ocorra após o bypass da compensação. Essa solução pode ser impraticável devido as características das linhas adjacentes (KASZTENNY, 2001).

Os problemas citados podem ser solucionados com a aplicação de esquemas de proteção nos quais utilizam-se sistemas de comunicação entre os relés para determinação da direcionalidade da falta em linhas compensadas. Esta solução aplicada ao relé de distância está apresentada de forma resumida a seguir.

3.7.1 Esquemas de teleproteção

A teleproteção consiste na utilização de canais de comunicação que permitem que relés instalados em terminais diferentes de uma linha de transmissão troquem informações. Este conceito possibilita que as decisões tomadas pelos relés sejam mais assertivas, já que são utilizadas informações de ambos os terminais da linha (ANDERSON, 1999). A Figura 3.22 apresenta uma visão genérica de um sistema com proteção de distância.

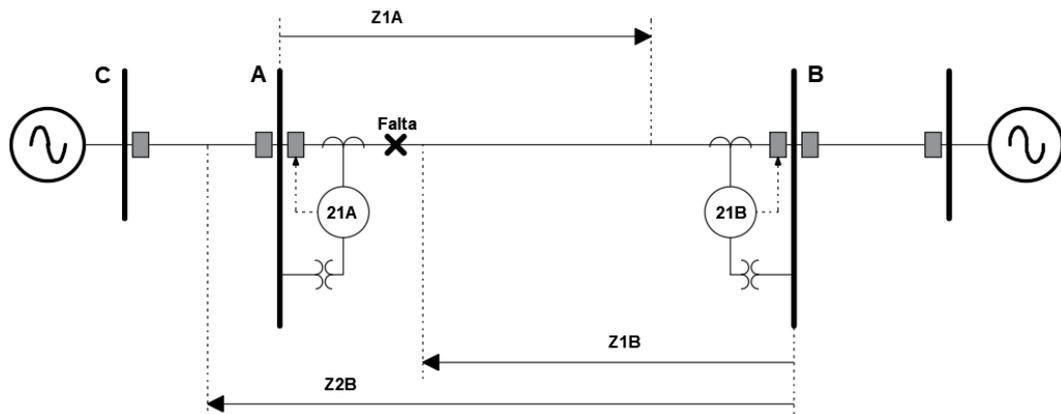


Figura 3.22 - Linha de transmissão protegida por relé de distância. Fonte: Adaptado de (ANDERSON, 1999).

Na linha de transmissão acima ocorre uma falta próxima à barra A, fora do alcance da zona 1 da barra remota (B). Nesta situação é esperada a atuação da zona 1 do relé da 21A e da zona 2 do relé 21B. Assim, a falta só será totalmente eliminada após o tempo de atuação ajustado no relé que atua em segunda zona. Se houvesse um canal de comunicação entre os relés seria possível a extinção da falta sem atraso proposital, uma vez que o relé 21A compartilharia a informação de ocorrência de falta em primeira zona com o relé 21B, e este atuaria imediatamente, uma vez que não haveria dúvidas que a falta está entre as barras A e B.

Este tipo de solução pode ser aplicada aos relés de distância para mitigar os problemas deste na proteção de linhas com compensação série. Dentre os esquemas mais comuns para este fim, destacam-se (SIDHU e KHEDERZADEH, 2006):

- Comparação direcional de bloqueio (*Directional Comparison Blocking – DCB*);
- Transferência de Disparo Permissiva por Sobrealcance (*Permissive Overreach Transfer Trip – POTT*);

3.7.1.1 Comparação direcional de bloqueio – DCB

A Figura 3.23 apresenta um exemplo simples de linha de transmissão com proteção baseada em DCB. Nesse tipo de esquema uma falta no ponto F1 é vista como interna pelos relés que comandam os disjuntores DJ1 e DJ2, que atuam em primeira zona, sem qualquer atraso proposital, isolando a falta. Já uma falta no ponto F2, é externa para DJ1 e DJ2, mas interna para DJ3. Como nesta situação a zona 2 de DJ1 pode atuar, esta deve ser bloqueada, pois a intenção é desligar a menor parte possível do circuito. Assim, enquanto DJ3 não elimina a falta, a zona 3 de DJ2, que “olha” para trás, detecta a falta como externa e envia um sinal de bloqueio de trip para DJ1.

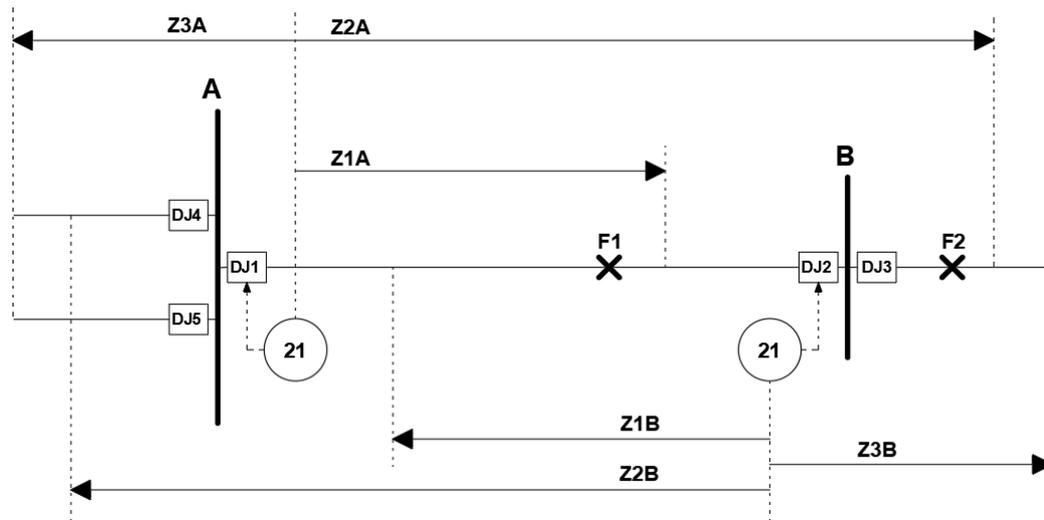


Figura 3.23 - Sistema elétrico que utiliza relés de distância aliados ao esquema de proteção DCB. Fonte: Adaptado de (SIDHU e KHEDERZADEH, 2006).

3.7.1.2 Transferência Permissiva de Disparo por Sobrealcance – POTT

Este esquema utiliza a segunda zona dos relés para envio de sinais, por isso é definido como de sobrealcance. Já sua característica de permissividade se deve ao fato que um sinal de trip para um disjuntor em um terminal da linha depender de um sinal de permissão do terminal remoto. Também são empregadas unidades de sobrecorrente direcionais

A Figura 3.24 apresenta de forma simplificada um sistema elétrico protegido com o esquema POTT. Para uma falta entre as barras A e B ocorre a atuação da segunda zona de cada um dos relés 21A e 21B, isso inicia a transmissão de um sinal de trip para o terminal remoto. Uma vez que há indicação de trip de ambos os relés, a falta é eliminada (RUIZ, 2012).

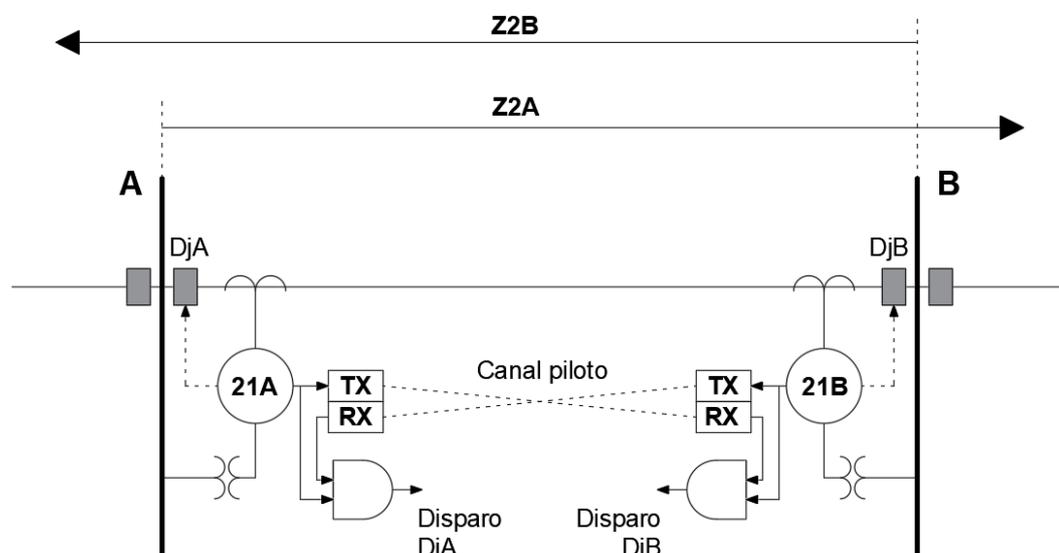


Figura 3.24 - Sistema elétrico que utiliza relés de distância aliados ao esquema de proteção DCB. Fonte: Adaptado de (RUIZ, 2012).

Para uma falta externa, em um dos terminais não ocorrerá a atuação da segunda zona, portanto o sinal permissivo não será enviado ao terminal remoto.

Como principais desvantagens desse esquema destacam-se (GONÇALVES, 2007):

- Atuação incorreta quando da eliminação sequencial de falta em linha paralela;
 - Aplicação problemática em linhas multiterminais na presença de *outfeeds*;
 - Pode não operar para faltas próximas ao terminal associado a uma fonte forte, pois depende da atuação do terminal fraco, que pode ser lenta ou não ocorrer.
-

4. SISTEMA PROPOSTO

Para a analisar o desempenho do relé de distância, este trabalho utiliza uma representação prática de sistema elétrico com tensão reduzida e um módulo trifásico de TCSC para compensação série. A Figura 4.1 apresenta a montagem realizada. Cada um dos dispositivos utilizados será descrito em detalhes ao longo deste capítulo.

Um dos objetivos da abordagem prática é analisar o comportamento dinâmico das grandezas, como tensão e corrente, em virtude das características não ideais dos circuitos de medição e chaveamento. Além disso, também foi desenvolvida uma simulação deste sistema no software Simulink para validação dos resultados.

Este capítulo apresenta as características e todo o processo de desenvolvimento do sistema estudado.

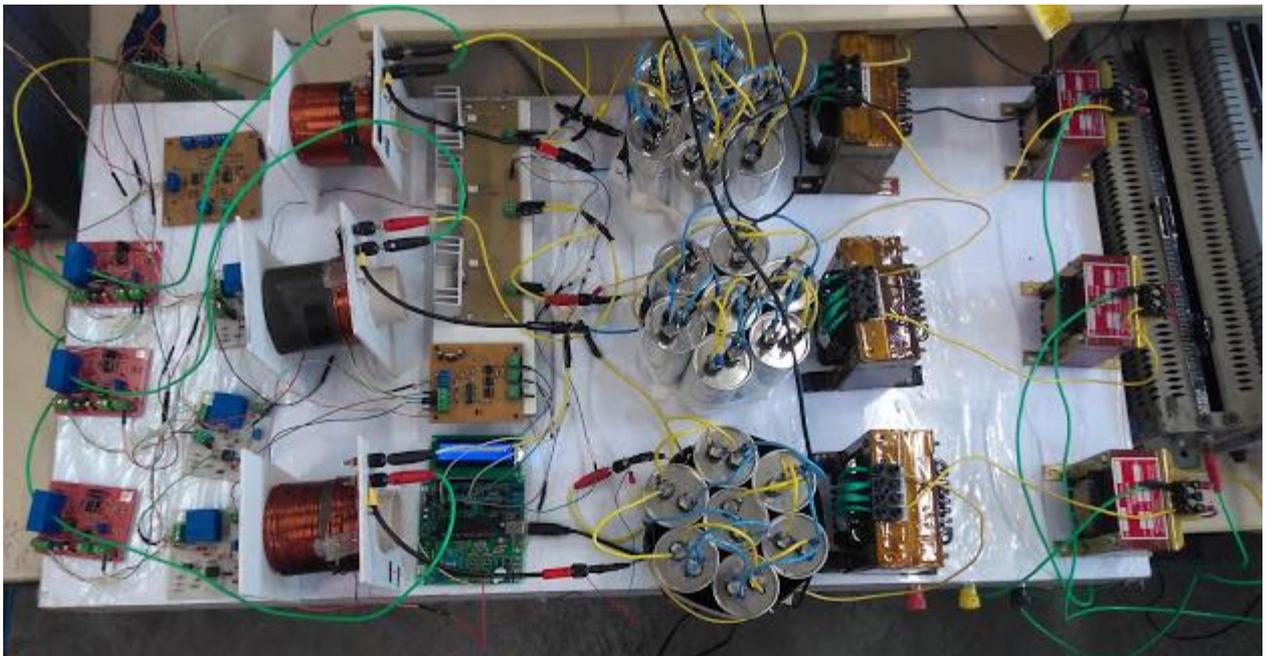


Figura 4.1 - Montagem prática do sistema proposto.

4.1 Linha de Transmissão

O modelo desenvolvido, apresentado na Figura 4.2, é radial e a fonte utilizada consiste de uma fonte trifásica variável que tem função de reduzir a tensão da rede de 220 V 60 Hz, para aproximadamente 52 V. Cada fase da linha de transmissão é composta por dois indutores núcleo ferromagnético, L1 e L2, mostrados na Figura 4.3 e na Figura 4.4 respectivamente. Suas características estão apresentadas na Tabela 4.1. Estas características estão apresentadas em valores médios, uma vez que há pequenas variações

nos valores de resistência e reatância apresentadas pelos indutores. No terminal da linha está ligada uma resistência trifásica de 15Ω representando uma carga.

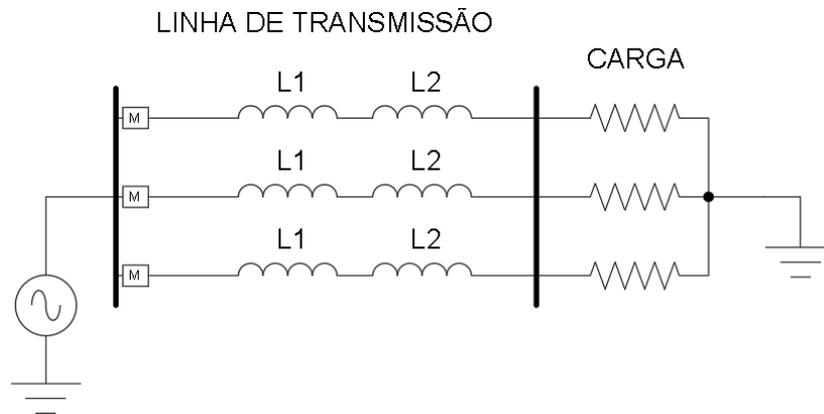


Figura 4.2 - Representação do sistema elétrico proposto.



Figura 4.3 - Indutor L1 - 50 mH.



Figura 4.4 - indutor L2 - 25 mH.

Neste sistema é possível provocar faltas envolvendo a terra ou quaisquer das fases no ponto entre os dois indutores por meio de uma ligação com contatores. Este ponto representa 66% ou 33% da linha de transmissão dependendo do lado em que se encontra o relé.

Tabela 4.1 - Características dos indutores utilizados no sistema elétrico proposto.

Elemento	Indutância	Reatância	Resistência
L1	50 mH	18.85 Ω	0,34 Ω
L2	25 mH	9,43 Ω	0,51 Ω
Total	75 mH	28.28 Ω	0,85 Ω

4.2 Sistema de Medição

O objetivo das medições é fornecer dados para um relé de distância, portanto são monitoradas as tensões de fase e as correntes de linha do sistema. As medições acontecem próximas à fonte, no ponto indicado pela letra M na Figura 4.2. O dispositivo utilizado para amostragem dos sinais é uma placa de aquisição de dados modelo PCI-6221, fabricada pela National Instruments, que é conectada ao barramento PCI da placa mãe de um computador. As principais características do hardware dessa placa de aquisição de dados estão apresentadas no Anexo 1 deste trabalho.

4.2.1 Medição de corrente

A Figura 4.5 apresenta por meio de um diagrama o processo de aquisição dos dados de corrente da linha. A medição de corrente é feita por meio de um sensor de efeito hall LA 55-P/SP1, cujo datasheet é apresentado no Anexo 2. Este sensor é de janela e funciona como um transformador de corrente de relação 2000:1. A corrente de saída deve passar por um resistor de medição, gerando uma tensão que é utilizada para amostragem. A corrente máxima nominal possível para medição é de 50 A, gerando uma corrente secundária de 25 mA. O resistor de medição deve ter seu valor escolhido segundo o datasheet. Há pequenas variações quanto a temperatura ambiente, mas o valor máximo não deve ultrapassar 340 Ω . Neste trabalho foi utilizado um resistor de 330 Ω .

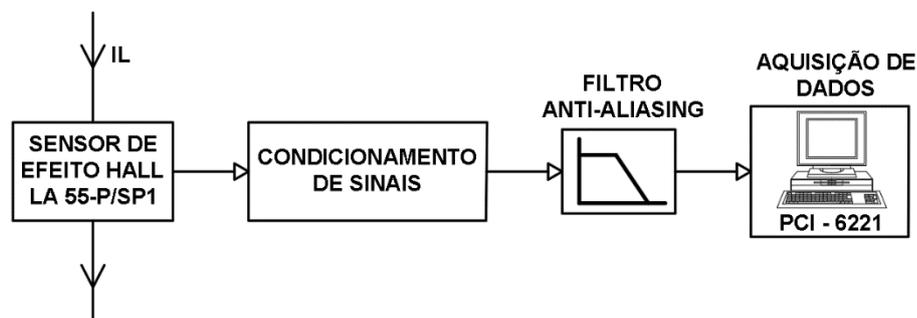


Figura 4.5 - Representação do sistema de amostragem dos sinais de corrente.

A Figura 4.6 apresenta o diagrama de conexão do sensor de corrente. Onde I_P é a corrente medida, I_S é a corrente de saída e R_M é a resistência utilizada para medição, que deve ser aterrada no circuito digital da alimentação do sensor, que é simétrica 15/-15 Vcc.

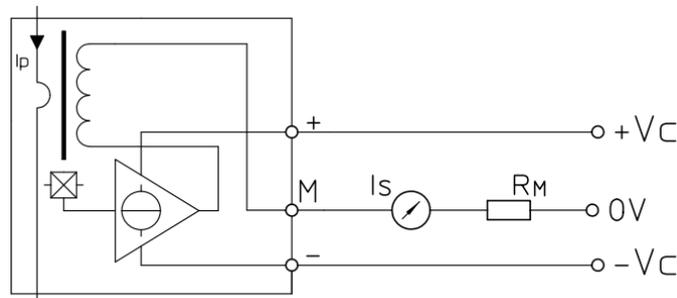
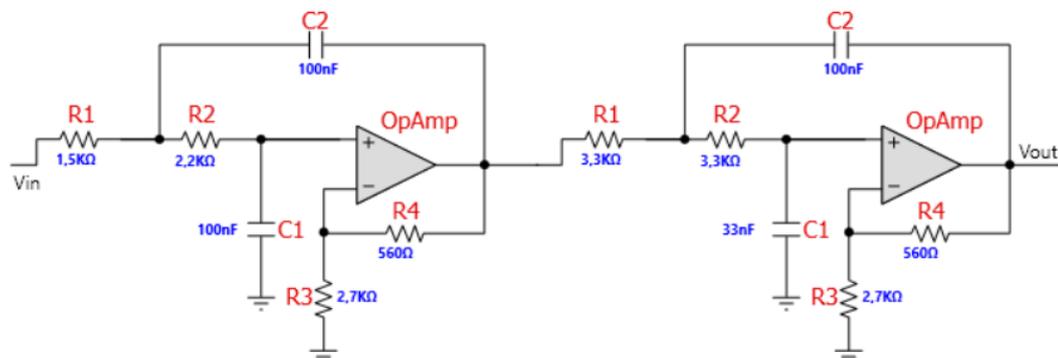


Figura 4.6 - Diagrama de conexão do sensor de efeito hall LA 55-P/SP11.

A tensão de saída do sensor de corrente passa por um circuito de condicionamento e filtragem anti-aliasing antes de ser amostrado. Este circuito, mostrado na Figura 4.7, consiste de um filtro ativo passa baixas de quarta ordem com resposta Butterworth e topologia Sallen Key, cuja frequência e corte é de 900 Hz. Este filtro também aplica um ganho de 1,5 à saída do sinal filtrado. O projeto do filtro foi realizado por meio do software FilterPro Desktop.



Filter Stage:	1
Passband Gain(Ao) :	1,225
Cutoff Frequency (fn):	900 Hz
QualityFactor (Q):	0,54
Filter Response:	Butterworth
Circuit Topology:	SallenKey

Filter Stage:	2
Passband Gain(Ao) :	1,225
Cutoff Frequency (fn):	900 Hz
QualityFactor (Q):	1,31
Filter Response:	Butterworth
Circuit Topology:	SallenKey

Figura 4.7 - Características do filtro anti-aliasing do circuito de amostragem de corrente.

O sinal de saída do filtro é ligado à placa de aquisição de dados no modo diferencial, ou seja, a placa amostra a diferença de potencial existente entre os dois terminais de saída do filtro. A frequência de amostragem utilizada é de 4 kHz. A Figura 4.8 apresenta umas das placas construídas para medição de corrente.

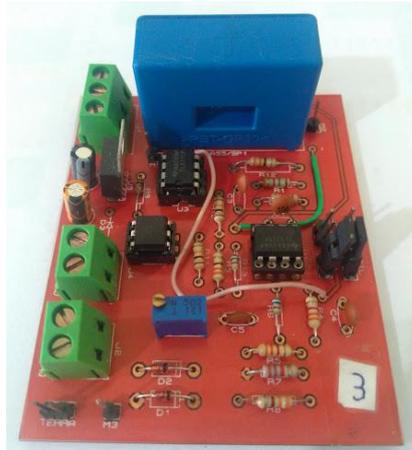


Figura 4.8 - Placa de medição de corrente.

4.2.2 Medição de tensão

O processo para amostragem dos sinais de tensão do sistema é bastante semelhante ao apresentado para a corrente, no entanto, como mostra a Figura 4.9, o sinal de tensão de cada fase tem seu valor reduzido por um transformador, que também tem função de isolar o circuito controle, antes de ser filtrado e amostrado.

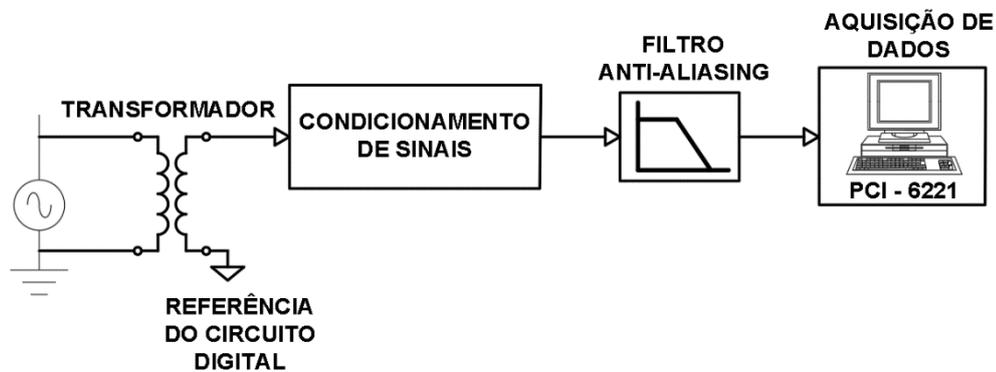


Figura 4.9 - Representação do sistema de amostragem dos sinais de tensão.

Tanto o filtro quanto a frequência de amostragem utilizados para os sinais de tensão são iguais aos apresentados anteriormente para a corrente.

4.3 Relé de Distância

A análise da condição de operação da linha ocorre após a etapa de amostragem dos dados de tensão e corrente, ou seja, não é feita em tempo real. Foi implementado no software Matlab um algoritmo que simula a função distância de característica MHO de um relé de

proteção. Este programa tem função de detectar, identificar e fazer a localização de faltas decorridas durante o período de aquisição dos dados.

De forma a reproduzir o funcionamento de um relé numérico, os dados passam por etapas de pré-processamento antes da execução da função de proteção. Estas etapas estão mostradas na Figura 4.10.

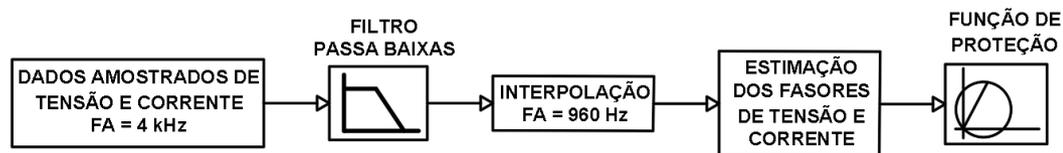


Figura 4.10 - Etapas do processamento de dados do relé de distância implementado.

Na primeira etapa do pré-processamento dos dados de tensão e corrente amostrados da linha, é aplicado um filtro digital passa baixas de topologia butterworth de segunda ordem. Em seguida, por meio de interpolação linear, a frequência de amostragem é reduzida de 4 kHz para 960 Hz, equivalente a utilizada por relés comerciais. Por fim, são feitas as estimações de fasores de tensão e corrente pelo método de mínimos quadrados (SACHDEV e BARIBEAU, 1979) antes da execução da função de proteção.

A função de proteção avalia a impedância vista pelo relé nas suas seis unidades, três fase-terra (AT, BT e CT) e três fase-fase (AB, BC e CA). Se durante pelo menos um ciclo a impedância de qualquer uma das unidades se torna menor do que o valor referente à extensão da linha protegida em primeira zona, é dado o sinal de abertura do disjuntor. Entre o começo da falta e sua extinção são analisados cerca de 5 ciclos.

Para identificação do tipo de falta considera-se que sofreu falta qualquer unidade cujo valor de impedância tenha permanecido, por pelo menos dois ciclos, inferior ao valor estabelecido para proteção em primeira zona. Após o processamento dos dados, avalia-se quais unidades apontaram ocorrência de falta para determinação do seu tipo em função da relação entre as unidades, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Critérios para determinação do tipo de falta segundo atuação das unidades de proteção.

Unidades atuadas	Tipo de falta considerada
AT	AT
BT	BT
CT	CT
AB	AB
BC	BC
CA	CA
AT - CT	CAT
AT - CT - CA	CAT
AT - BT	ABT
AT - BT - AB	ABT
BT - CT	BCT
BT - CT - BC	BCT
AT - BT - CT	ABCT
AT - BT - CT - AB - BC - CA	ABCT
AB - BC - CA	ABC

4.4 TCSC

A escolha dos parâmetros construtivos do TCSC é baseada principalmente em relações entre as grandezas físicas dos elementos que o compõe, pois se estas não respeitarem as relações adequadas, o sistema não funciona corretamente e apresenta uma série de problemas que serão descritos a seguir. A escolha dos parâmetros do TCSC projetado foi baseada em diversas referências, como (JOHNSON., 2006), (HINGORANI e GYUGYI, 2000), (PADDIYAR, 2007). Também foram considerados aspectos relacionados à disponibilidade técnica de recursos.

4.4.1 Seleção do capacitor

A escolha do valor de capacitância foi feita baseada no mínimo de compensação desejada, que ocorre quando os tiristores estão bloqueados e o TCSC opera como um sistema de compensação fixa. Como a linha tem reatância de aproximadamente 28Ω , foi definido o valor de $420 \mu\text{F}$, sendo obtido a compensação mínima de aproximadamente 20%. Cada banco de capacitores utilizado é composto de 7 capacitores de $60 \mu\text{F}$ conectados em paralelo, como mostra a Figura 4.11.

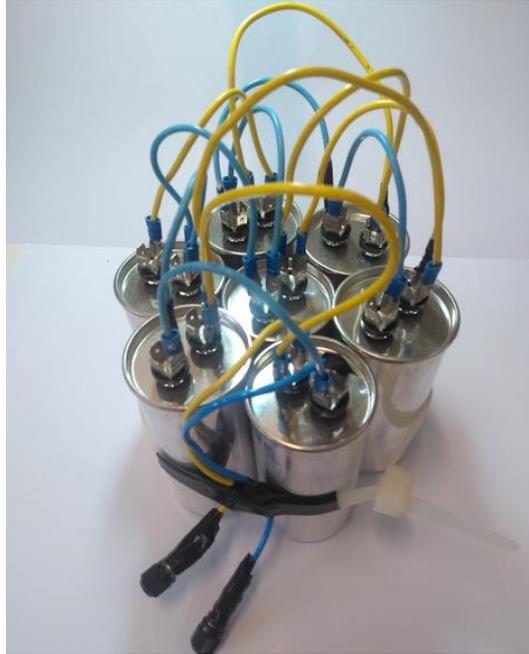


Figura 4.11 - Banco de capacitores utilizado em uma das fases do TCSC. Fonte: Autor.

4.4.2 Seleção do indutor

A determinação do valor de indutância utilizado no TCR deve ser feita de forma bastante criteriosa, pois tem grande influência na curva de reatância do TCSC.

Normalmente este valor é definido seguindo duas premissas. Que a frequência de ressonância do TCSC não coincida com frequências existentes no sistema e que o fator de ressonância (λ), definido na equação (4.1) a seguir, não seja superior à 3.

$$\lambda = \frac{\omega_0}{\omega_N} = \frac{1}{\omega_N \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{(\omega_N \cdot L)(\omega_N \cdot C)} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (4.1)$$

Onde ω_0 e ω_N são respectivamente, a velocidades angular de ressonância do circuito paralelo formado pelo capacitor e indutor do TCSC e a velocidade angular nominal do sistema elétrico.

Assim, os indutores do TCR foram construídos com 2,15 mH, o que produz uma frequência de ressonância de aproximadamente 167,5 Hz e fator de ressonância λ igual a 2,8. A Figura 4.12 apresenta a curva de reatância do TCSC projetado em função do ângulo de disparo, onde todos os componentes são considerados ideais. É possível notar que há apenas uma zona de ressonância.

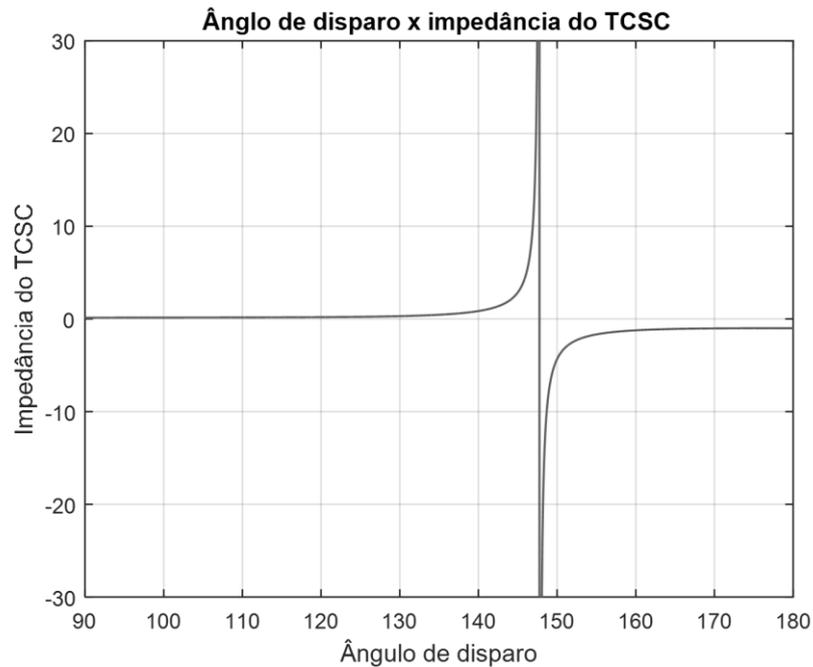


Figura 4.12 - Curva de reatância do TCSC projetado em função do ângulo de disparo.

Valores de λ superiores a 3 conduzem para sistemas com múltiplas zonas de ressonância (HINGORANI e GYUGYI, 2000). Este tipo de situação torna a implementação do TCSC mais difícil, pois restringe a faixa de ângulos de disparo utilizáveis dificultando o controle. Tipicamente os valores de λ são escolhidos entre 1 e 3 (JOHNSON., 2006). A Figura 4.13 apresenta a curva de reatância de um TCSC cujo λ é de 3,4. É possível notar que na faixa de valores possíveis para disparo dos tiristores há duas zonas de ressonância

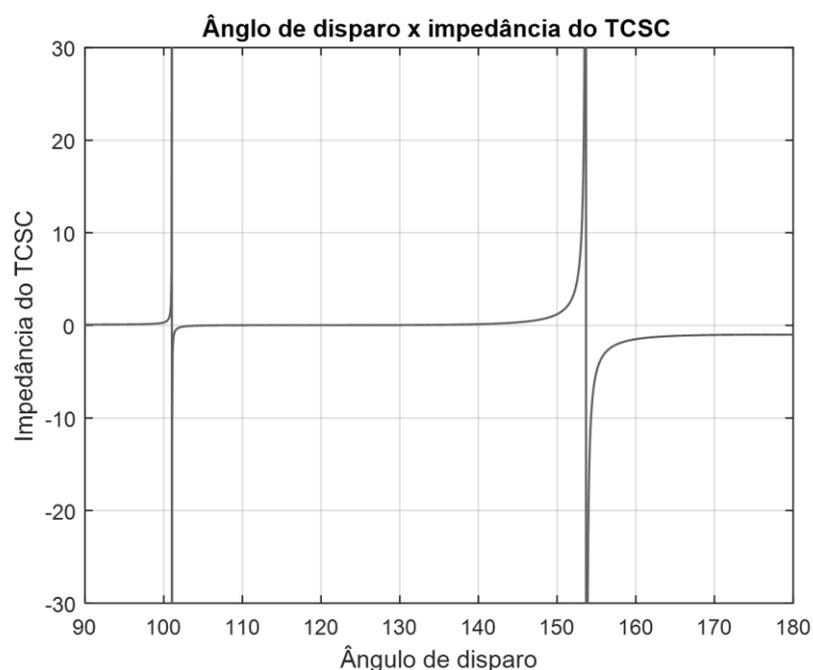


Figura 4.13 - Curva de reatância com múltiplas zonas de ressonância devido ao valor de λ superior à 3.

Os indutores foram construídos de forma manual especialmente para esta aplicação. A Figura 4.14 apresenta um dos indutores.

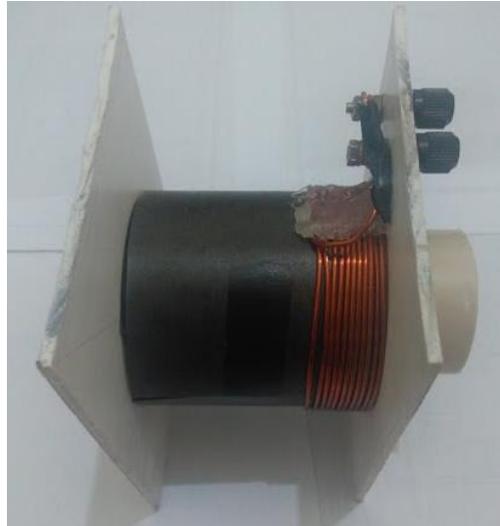


Figura 4.14 - Indutor utilizado no TCR.

4.4.3 Circuito de disparo

A Figura 4.15 apresenta o diagrama esquemático do circuito de disparo utilizado. Este utiliza como referência as tensões nos capacitores, portanto o disparo acontece na faixa entre 90° e 180° , quando a tensão e a corrente no capacitor têm polaridades opostas.

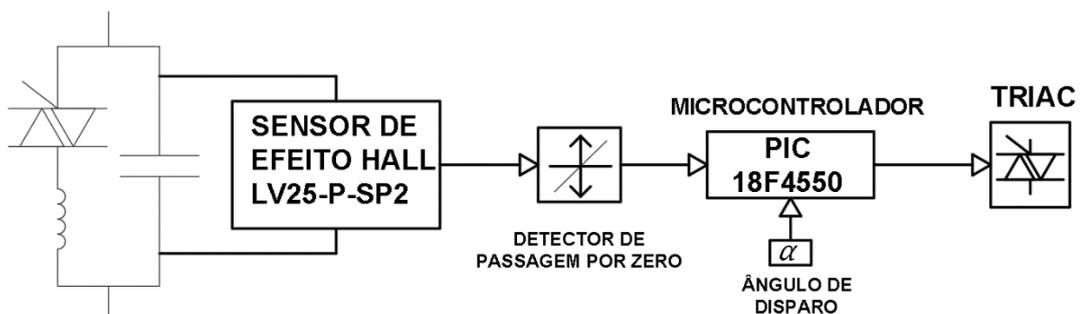


Figura 4.15 - Representação do circuito de disparo.

Como as tensões nos capacitores variam dependendo do valor da corrente na linha é necessário tornar o circuito digital imune a estas variações. Portanto, para proteger o circuito de disparo as tensões são reduzidas através de sensores de efeito hall LV25-P-SP2. Este sensor funciona como um transformador de corrente de relação 10:25. O sensor deve ser ligado em paralelo com a tensão medida, no entanto, para limitar a corrente no sensor a 10 mA, deve ser ligado um resistor em série com este. A saída é dada inicialmente como uma fonte de corrente, cujo valor máximo é de 25 mA, mantendo a relação com a corrente de

entrada. A corrente de saída deve passar por um resistor de medição, criando assim uma tensão de saída. O valor da resistência de medição pode variar entre 100 e 343 Ω . Neste trabalho o valor escolhido foi de 220 Ω .

A Figura 4.16 apresenta as conexões do sensor LV25-P-SP2. Os terminais \pm HT são conectados aos pontos de medição. O resistor R1 limita a corrente no sensor. Os terminais “+” e “-” são para alimentação simétrica em 15/-15 Vcc respectivamente. O terminal M é a saída da fonte de corrente I_s , que passa pelo resistor de medição R_M , aterrado com o sistema digital.

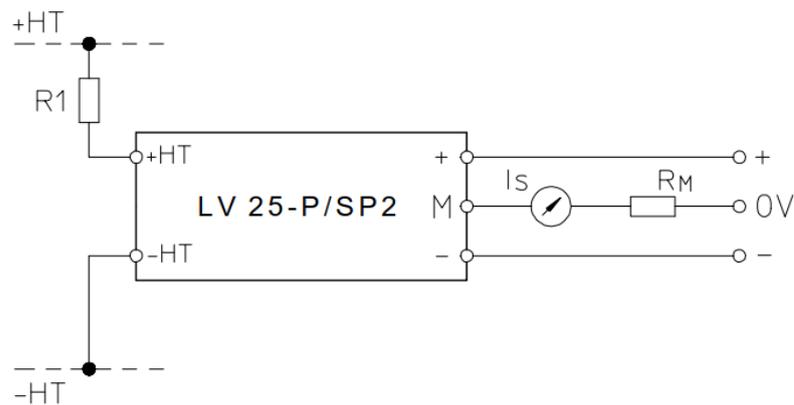


Figura 4.16 - Diagrama de conexões do sensor LV25-P-SP2.

Em cada fase a tensão sobre o resistor de saída passa por comparadores, gerando assim três formas de onda quadradas que servem como referências para um microcontrolador PIC18F4550, cujas principais características então apresentadas no Anexo 4. As bordas das formas de onda quadradas representam as passagens por zero dos sinais de tensão nos capacitores. Cada uma das bordas de subida ativa uma interrupção externa do microcontrolador, que utiliza timers para geração dos pulsos de disparo de acordo com os valores definidos por meio de um teclado externo. Cada fase tem seu próprio controle de disparo individual, com uma interrupção externa e um timer exclusivos.

Em cada fase os pulsos dos semiciclos positivos são gerados com base nas passagens por zero das tensões de referência, enquanto os pulsos dos semiciclos negativos, são gerados por simetria com 180° de atraso. Também foram implementados os modos de operação com os tiristores bloqueados e em bypass

A Figura 4.17 mostra a placa com os elementos de chaveamento que recebem os sinais de disparo do microcontrolador. Como os valores de corrente são muito inferiores aos verificados em linhas de transmissão, em substituição aos tiristores são utilizados TRIAC's BTA08-600B, cujas especificações estão apresentadas no Anexo 3. Verifica-se que são utilizados também circuitos integrados MOC3020, um tipo de opto acoplador comumente empregado em circuitos para disparo de TRIAC's.



Figura 4.17 – Placa contendo os TRIAC's do sistema de chaveamento do TCSC. Fonte: Autor.

4.4.4 Sistema de Bypass dos capacitores

No sistema proposto não há risco de danos ao capacitor seja por sobretensão ou por sobrecorrente, já que essas grandezas são rigorosamente controladas. No entanto, para representar de forma mais fiel os sistemas reais e diante da dificuldade de se encontrar varistores com valores comerciais de tensões de disparo adequadas para o sistema proposto, são utilizados diodos supressores de surto bidirecionais em paralelo aos capacitores. Estes diodos têm propósito muito semelhante ao dos varistores, que é de oferecer um caminho alternativo para a corrente quando a tensão em seus terminais atinge determinado valor, definido pela sua característica de condução, atuando como um resistor não linear. Foram utilizados os diodos 1.5KE15CA, 1.5KE24CA e 5KP33CA, cujas características estão descritas no Anexo 5.

Os resultados obtidos com essa adaptação estão apresentados no capítulo 5.

4.4.5 Simulação

Para validar os resultados da montagem prática também foi desenvolvida uma simulação no software SIMULINK. O sistema simulado é praticamente igual ao prático com pequenas variações no sistema de disparo devido à impossibilidade da representação de todos os elementos utilizados na prática, como por exemplo, o microcontrolador.

A Figura 4.18 apresenta um diagrama esquemático do sistema simulado, no qual a linha de transmissão é representada por um circuito RL série com parâmetros concentrados, assim como a carga resistiva, semelhantes ao modelo prático. O bloco com nome de TCSC contém, além da compensação, os sistemas de controle e proteção, que nesse caso foi feita com MOVs.

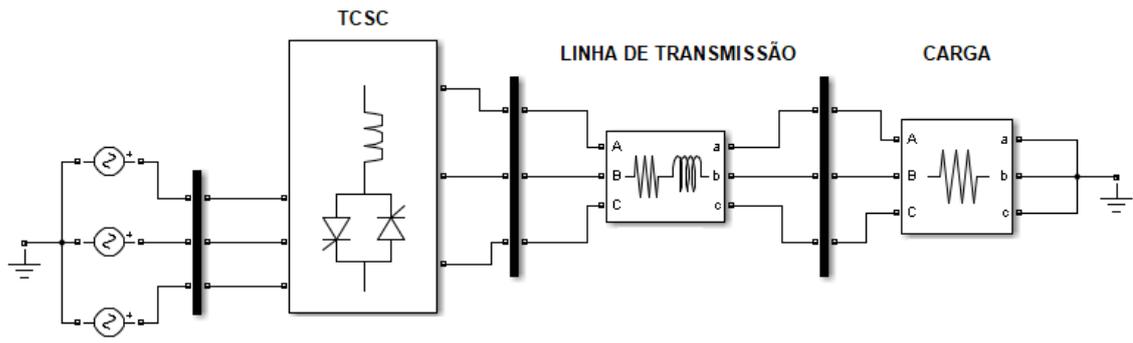


Figura 4.18 - Sistema simulado no SIMULINK.

5. RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo apresenta os resultados de diversos ensaios de faltas realizados no sistema descrito no capítulo 4. Cada ensaio possui características específicas quanto ao tipo de compensação série utilizada, presença ou não de bypass dos capacitores e tipo de falta. Todos os ensaios foram realizados tanto no sistema físico quanto em simulação para validação dos resultados. A Tabela 5.1, a seguir, mostra a relação de todos os ensaios e suas características.

Tabela 5.1 - Relação de todos os ensaios executados no sistema estudado.

Tipo de Compensação	Grau de Compensação	Tipos de faltas	Bypass capacitores
-	0%	AT	-
		CA	
		ABCT	
Fixa	20%	AT	Não
		CA	
		ABCT	
Fixa	20%	AT	Sim
		CA	
		ABCT	
TCSC	40%	AT	Não
		CA	
		ABCT	
TCSC	40%	AT	Sim
		CA	
		ABCT	

O sistema projetado não suporta faltas de alta intensidade, principalmente devido à fonte utilizada, que é protegida por fusíveis contra correntes superiores a 15 A, e aos indutores da linha de transmissão que foram fabricados para correntes nominais de 5 A. Por isso, os valores de corrente encontrados no funcionamento normal do sistema são baixos e estão apresentados na Tabela 5.2 a seguir.

Tabela 5.2 - Correntes na linha de transmissão para cada grau de compensação analisado.

Tipo de Compensação	Grau de Compensação	Corrente Simulada	Corrente Medida
-	0%	0,94 A	0,83 A
Fixa	20%	1,11 A	0,99 A
TCSC	40%	1,27 A	1,10 A

É possível verificar que os valores medidos são ligeiramente inferiores aos simulados. Isso ocorre em virtude da característica de parâmetros concentrados da linha de transmissão, que faz com que a indutância da linha varie em função da corrente devido a dispersão do fluxo magnético e à saturação do núcleo. Os valores de indutância mostrados no capítulo 4 só são verificados para correntes de 5 A, valor utilizado para calibrar os indutores no momento da fabricação. Desta forma, valores de corrente inferiores a esse resultam em indutâncias até 5 mH superiores, assim como correntes mais elevadas causam redução da indutância.

Todas as faltas analisadas são francas, ou seja, não há resistência de falta. Além disso, as faltas são realizadas no ponto da linha entre os dois indutores que a compõe, equivalente a 2/3 da extensão total. Como critério para análise dos resultados a extensão da linha é tratada em percentual, portanto as faltas ocorrem em 66,67% da linha.

O relé implementado, descrito no capítulo anterior, é parametrizado desconsiderando qualquer tipo de acoplamento entre as fases da linha, ou seja, não há indutâncias mútuas no sistema. Desta forma, as impedâncias das sequências positiva, negativa e zero são iguais. Sua parametrização também considera que apenas 70% da linha é protegida em primeira zona.

As seções a seguir detalham os resultados obtidos em cada situação apresentada acima.

5.1 Sistema sem Compensação

Os primeiros resultados a serem analisados apresentam o sistema sem compensação. A análise deste ensaio é importante para avaliar o correto funcionamento do relé implementado.

5.1.1 Funcionamento normal

A Figura 5.1 apresenta as formas de onda de tensão e corrente no sistema originadas pela simulação. Estes dados passaram por todas as etapas de pré-processamento descritas

no capítulo 4 e são utilizados para estimação dos fasores aplicados na função de proteção de distância. Nesta situação, conforme esperado, nenhuma das unidades do relé acusou falta.

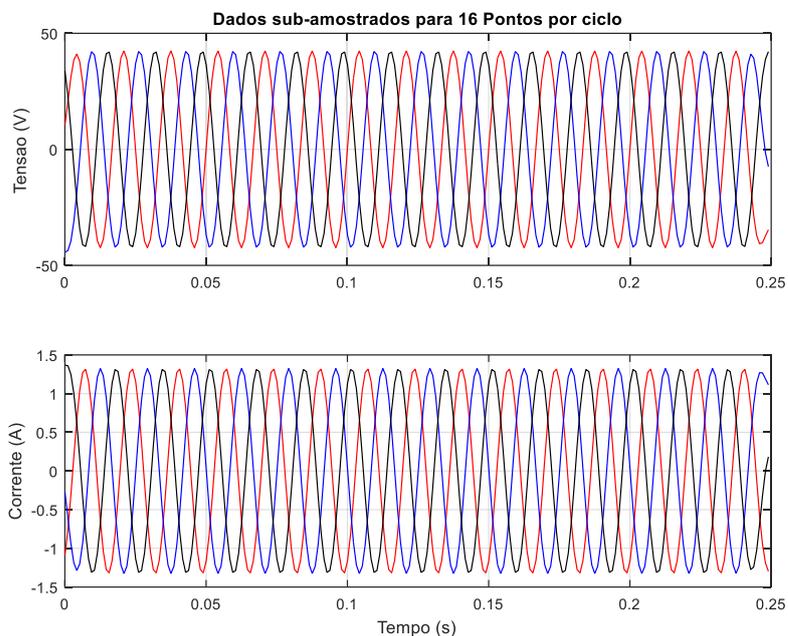


Figura 5.1 - Formas de onda de tensões e correntes obtidas por simulação durante funcionamento normal do sistema.

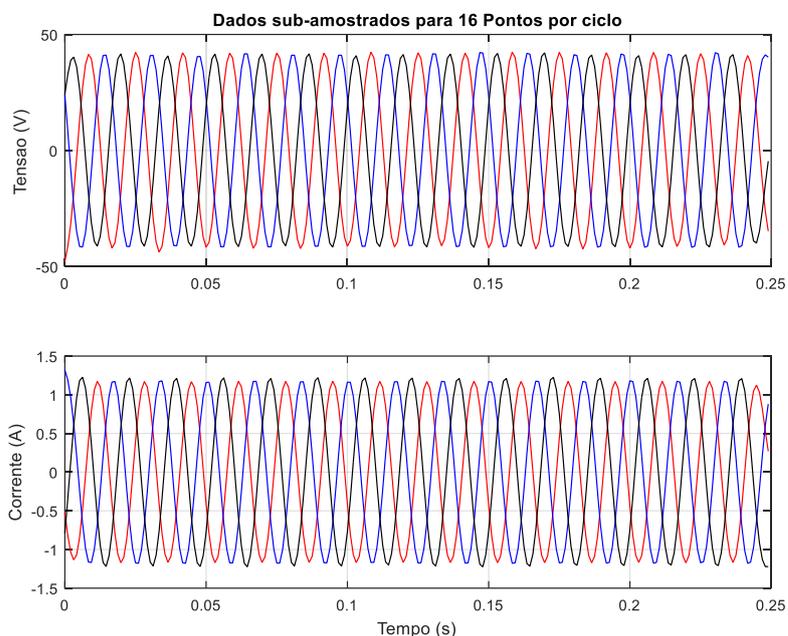


Figura 5.2 - Formas de onda de tensões e correntes obtidas por medições durante funcionamento normal do sistema.

A Figura 5.2 apresenta as formas de onda de tensões e correntes obtidas por meio dos dados medidos no sistema físico. A comparação entre os resultados simulados e medidos deixa claro que a montagem prática representou com fidelidade o sistema simulado.

5.1.2 Falta AT

Na simulação de falta entre fase e terra o relé foi capaz de identificar o tipo de falta e fazer sua localização corretamente (66,67%). A Figura 5.3 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do sistema durante a falta enquanto as distâncias vistas por cada unidade do relé estão apresentadas na Figura 5.4.

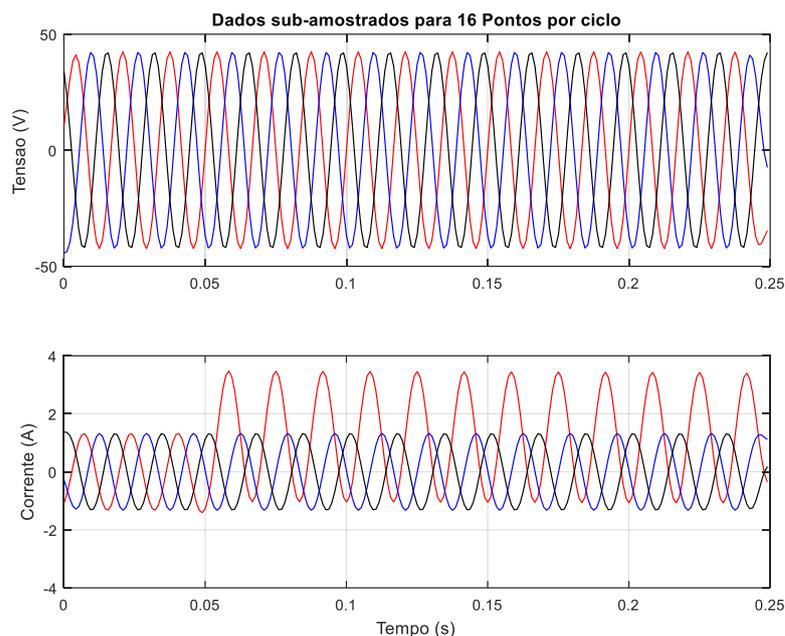


Figura 5.3 - Tensões e correntes obtidas por simulação durante falta entre fase e terra no sistema estudado.

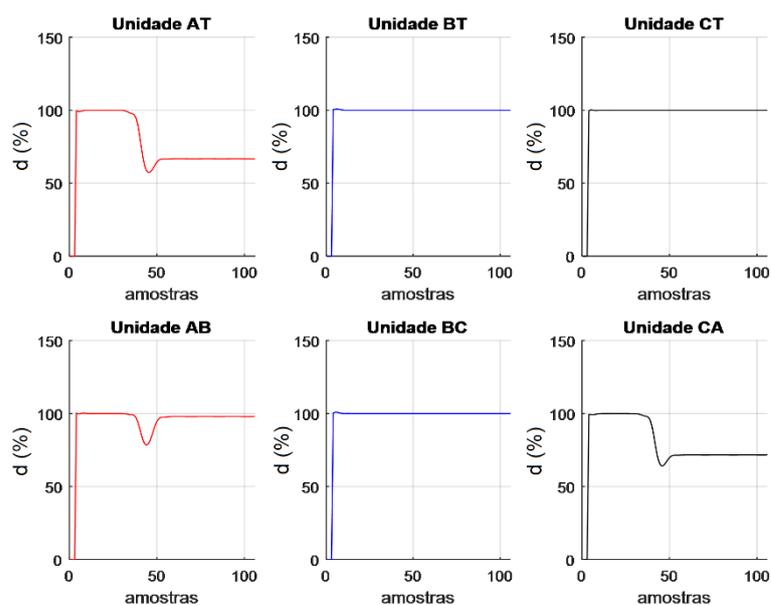


Figura 5.4 - Distâncias vistas por todas as unidade de proteção do relé durante falta entre fase e terra (dados simulados).

Durante o período de operação normal, todas as unidades enxergaram exatamente a distância total da linha. Isso ocorreu porque a distância é estimada com base na reatância do sistema e a carga tem característica puramente resistiva.

A Figura 5.5 apresenta as impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante a falta entre fase e terra no sistema simulado. Nessa figura, o círculo indica a extensão da linha protegida em primeira zona. É possível verificar que apenas a impedância da unidade AT entra na zona protegida, no entanto todas as unidades relacionadas à fase A sofrem alterações na impedância durante o período.

Os resultados obtidos por meio do processamento dos dados medidos no sistema físico foram bastante semelhantes aos simulados. O relé foi capaz de determinar corretamente o tipo de falta, enquanto a localização foi verificada em 67,21%. A Figura 5.6 e a Figura 5.7 apresentam as formas de onda de tensões e de correntes no sistema e as distâncias medidas pelas unidades de proteção do relé durante a falta respectivamente. Na segunda figura a linha aparenta ter pouco mais que os 100% definidos anteriormente, isso ocorre devido ao maior valor de indutância apresentado pela linha de transmissão devido aos valores baixos de corrente descritos na introdução deste capítulo.

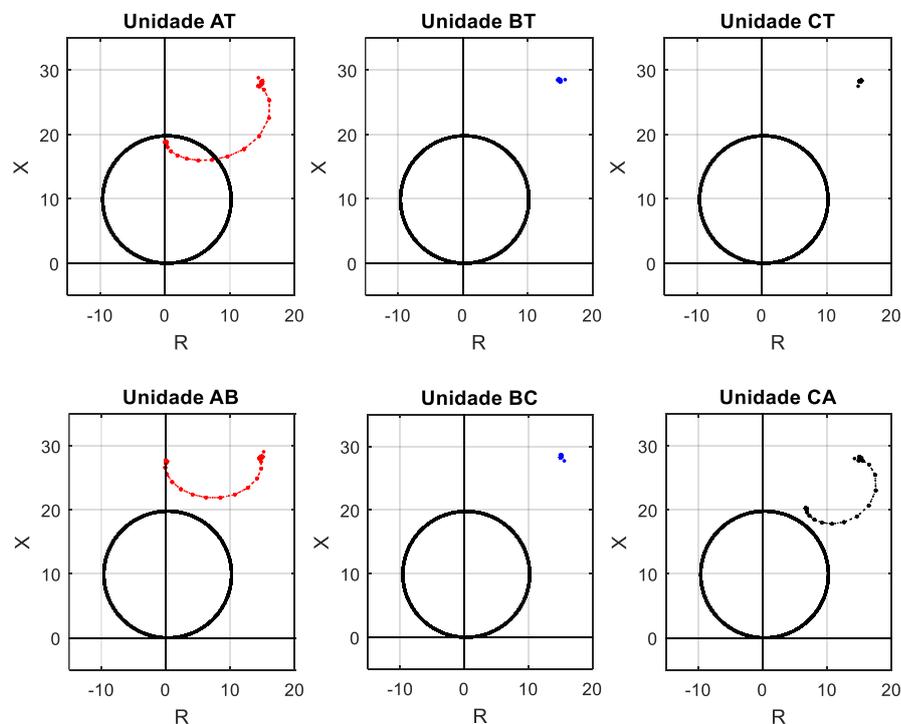


Figura 5.5 – Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta entre fase e terra (dados simulados).

Os gráficos de impedância vista por cada unidade de proteção gerados com os dados medidos, mostrados na Figura 5.8, também apresentaram resultados bastante semelhantes à simulação.

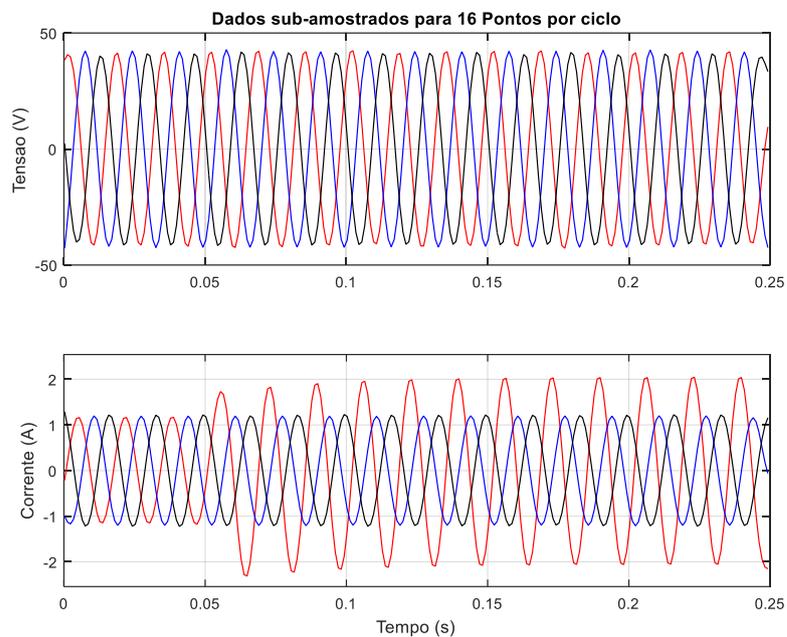


Figura 5.6 - Tensões e correntes obtidas por medições durante falta entre fase e terra no sistema estudado.

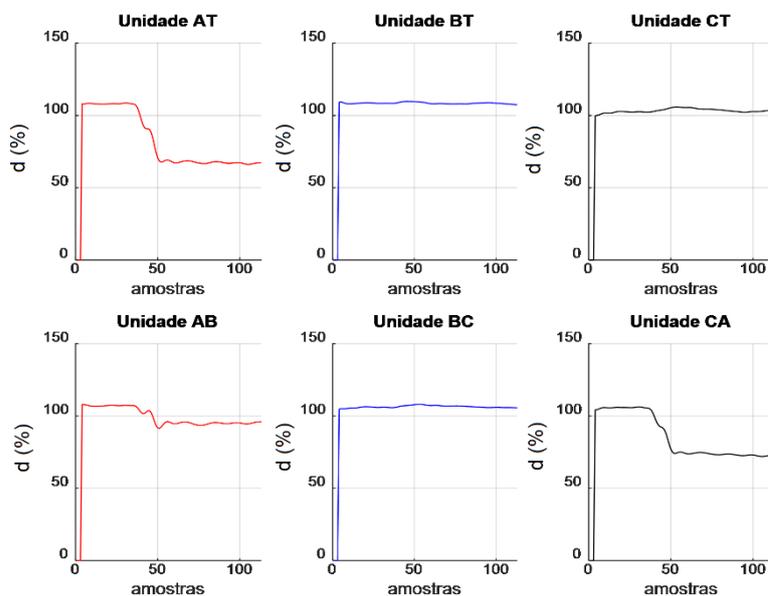


Figura 5.7 - Distâncias vistas por todas as unidade de proteção do relé durante falta entre fase e terra (dados medidos).

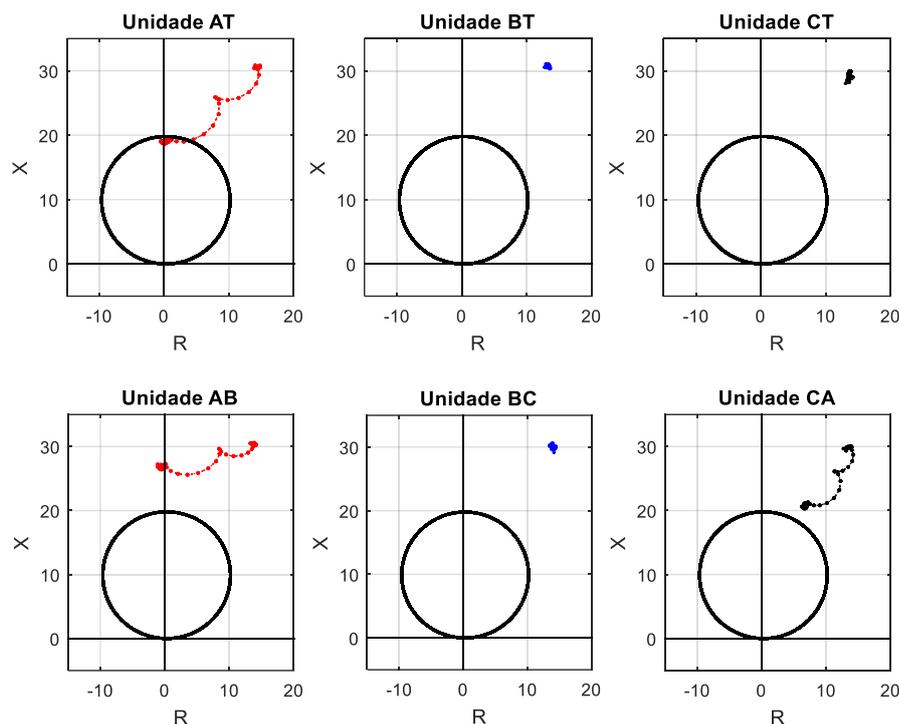


Figura 5.8 – Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta entre fase e terra (dados medidos).

5.1.3 Falta CA

Para faltas entre fases o relé também operou da forma esperada tanto para simulação quanto na avaliação prática. Novamente ocorreram apenas pequenos erros na localização da falta quando utilizados dados medidos no sistema. A Tabela 5.3 apresenta a comparação dos resultados obtidos.

Tabela 5.3 - Comparação dos resultados obtidos a partir de dados medidos e simulados para falta CA.

Falta: CA	Simulação	Medição
Tipo de falta identificada pelo relé	CA	CA
Localização estimada pelo relé	66,67%	65,91%

A Figura 5.9 e a Figura 5.10 apresentam as impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé considerando dados simulados e medidos respectivamente. Em ambas as figuras se nota que a impedância da unidade CT ficou dentro da zona protegida, no entanto o tempo de permanência neste estado não foi suficiente para sensibilizar o relé.

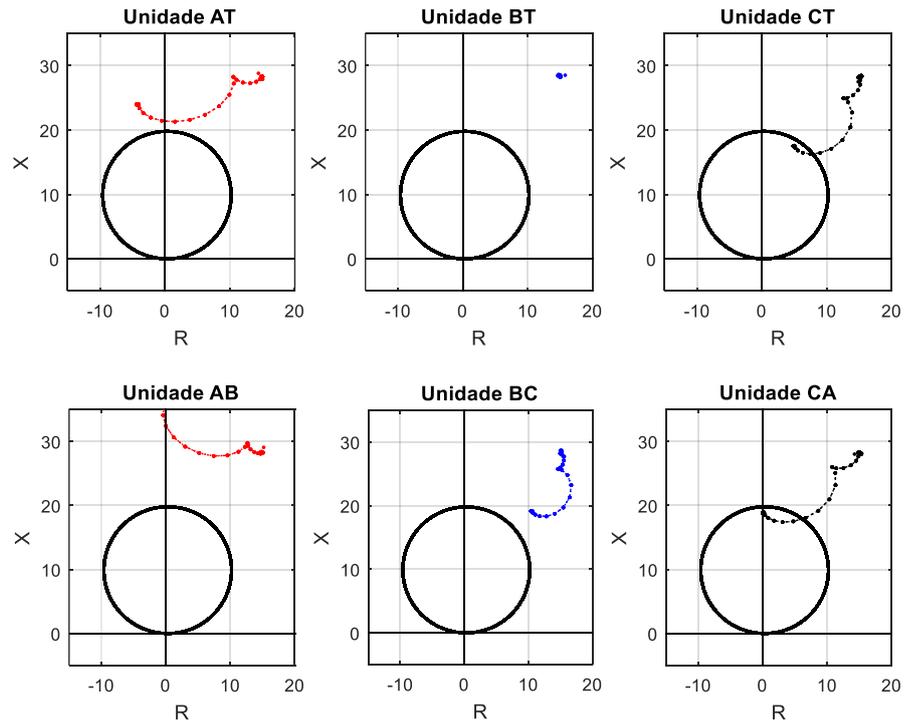


Figura 5.9– Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta entre duas fases - CA (dados simulados).

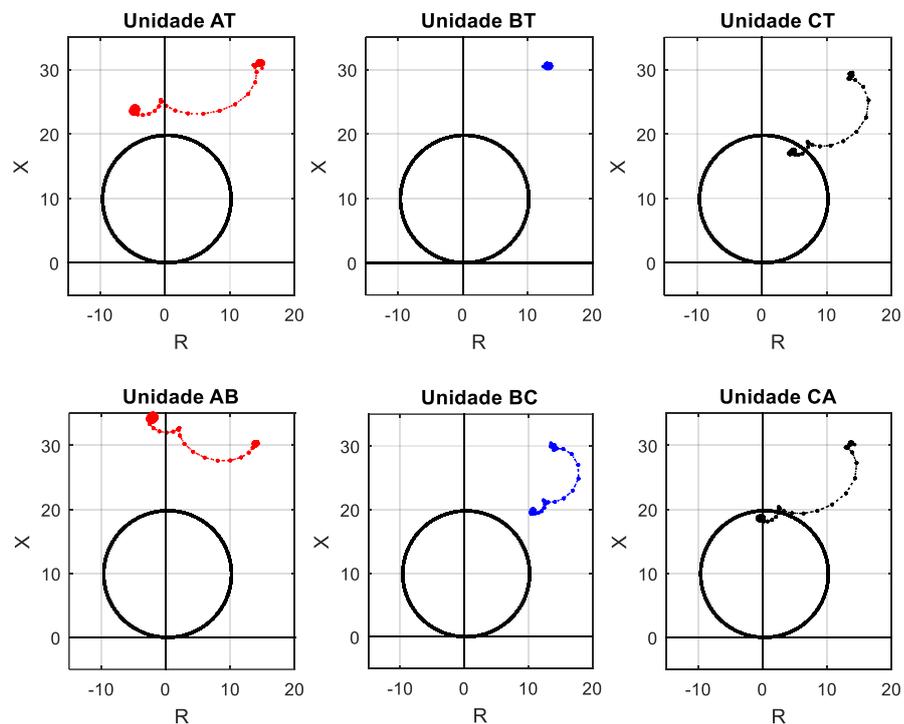


Figura 5.10 - Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta entre duas fases - CA (dados medidos).

5.1.4 Falta ABCT

Para faltas ABCT o relé também operou corretamente, tanto para simulação quando na avaliação prática. Mais uma vez verificou-se apenas pequeno erro na localização da falta quando utilizados dados medidos no sistema. A Tabela 5.4 apresenta a comparação dos resultados obtidos.

Tabela 5.4 - Comparação dos resultados obtidos a partir de dados medidos e simulados para falta ABCT.

Falta: ABCT	Simulação	Medição
Tipo de falta identificada pelo relé	ABCT	ABCT
Localização estimada pelo relé	66,67 %	64,26%

A Figura 5.11 e a Figura 5.12 apresentam as impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé considerando dados simulados e medidos respectivamente. Em ambas as figuras se observa que as impedâncias de todas as unidades entram na zona protegida.

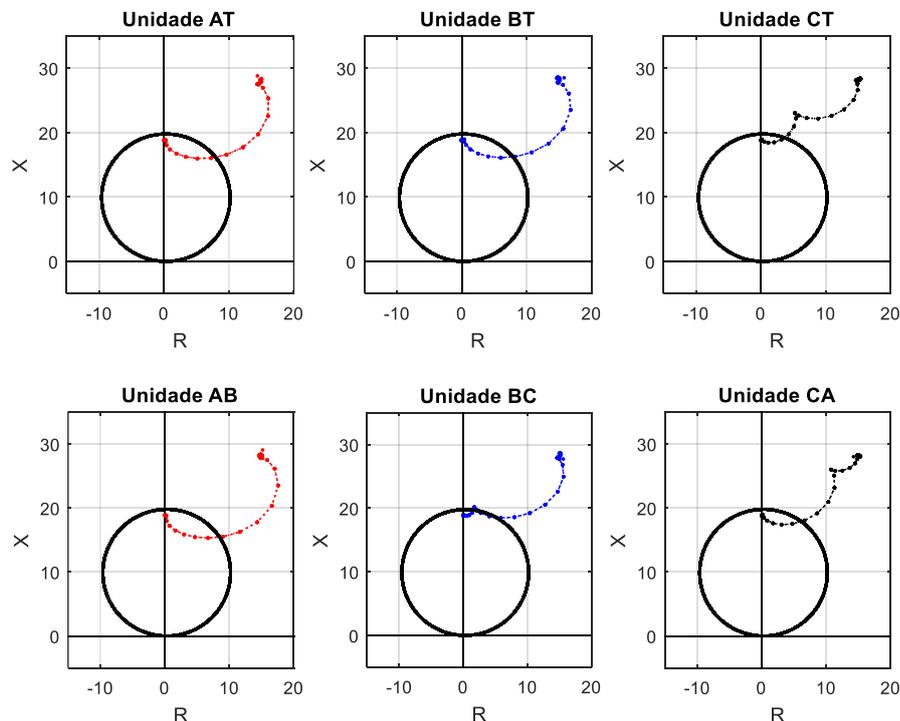


Figura 5.11 - Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta trifásica - ABCT (dados simulados).

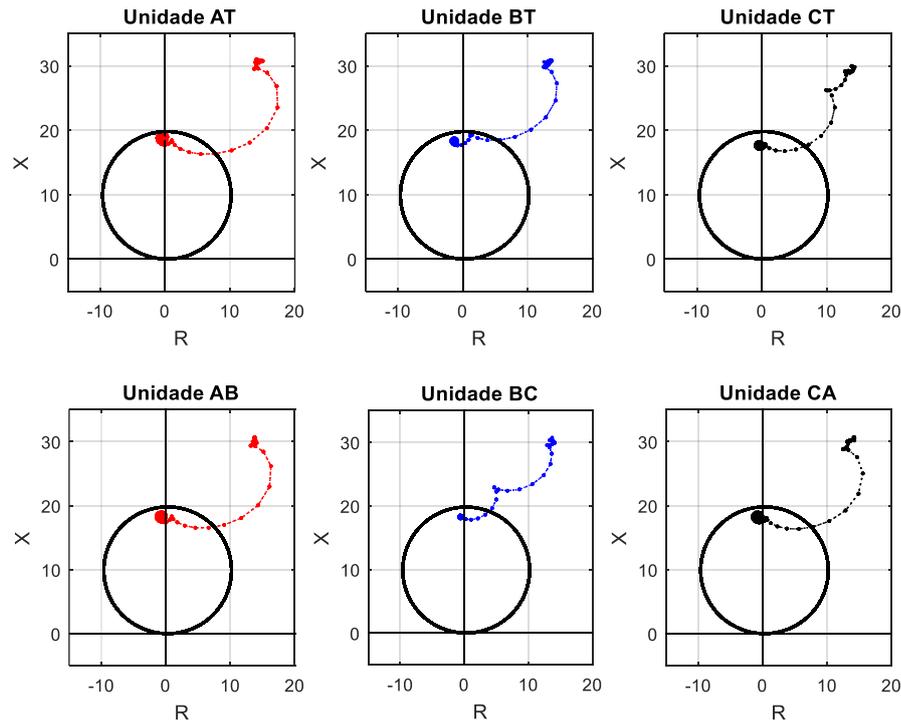


Figura 5.12 - Impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante falta trifásica - ABCT (dados medidos).

5.2 Sistema com Compensação Fixa

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes realizados no relé de proteção de distância para a linha compensada em 20%. Conforme mencionado anteriormente estes ensaios combinam cenários com ausência e presença de sistema de bypass dos capacitores.

Em regime nominal a tensão nos terminais dos capacitores de cada fase é de 6,9 V no sistema simulado e 6,3 V no experimento prático. A diferença apresentada está relacionada ao valor reduzindo de corrente da segunda situação, conforme explicado na introdução deste capítulo. A Figura 5.13 mostra as formas de onda de tensão no capacitor em uma das fases do sistema em operação normal com dados obtidos por simulação e medição.

Nos ensaios realizados com proteção contra sobretensão nos capacitores o valor de referência para proteção foi de 20 V, aproximadamente 3 pu em relação ao regime nominal.

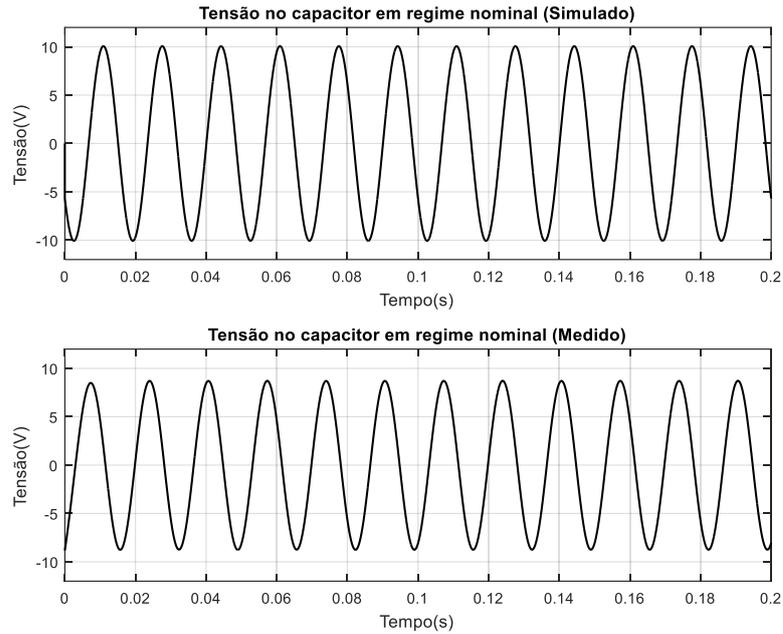


Figura 5.13 - Formas de onda de tensão no capacitor de uma das fases do sistema com compensação fixa em operação normal.

5.2.1 Falta AT

Conforme citado no capítulo 3, quando ocorre uma falta em um sistema com compensação série há o início de um transitório sub-harmônico devido a mudança abrupta da indutância e da corrente em um circuito RLC série inicialmente em equilíbrio. Esta situação fica evidente na Figura 5.14, na qual são apresentadas as formas de onda de corrente, com dados simulados e medidos, de uma falta AT no sistema estudado com compensação fixa de 20%. Verifica-se que o transitório é mais longo na simulação. Isso é explicado pela ausência de resistências em alguns componentes considerados ideais, como os capacitores e as conexões entre todos os elementos do sistema. Por isso, o transitório é dissipado mais rapidamente na montagem prática.

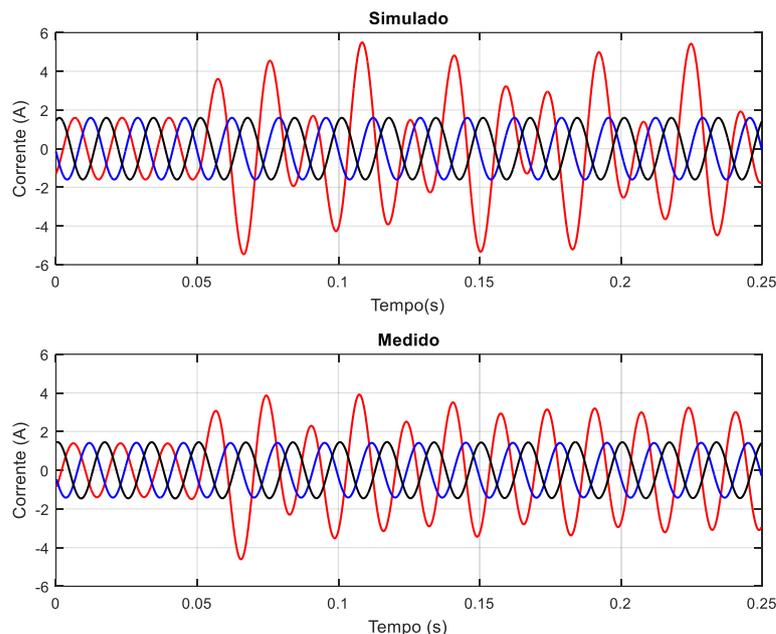


Figura 5.14 – Correntes no sistema com compensação fixa de 20% durante falta AT. Dados simulados e medidos.

Neste cenário, tanto na simulação quanto na medição, o relé foi capaz de operar normalmente em relação à detecção da falta, no entanto falhou na identificação das fases envolvidas, já que as unidades AT, AB e CA atuaram. A má operação se deu em função do sobrealcance do relé devido à compensação e a grande oscilação da impedância da linha causada pelo transitório iniciado com a falta.

Considerando apenas a unidade AT conclui-se que o relé localizou a falta de forma semelhante na simulação e na medição com 44,33% e 45,95% respectivamente.

A Figura 5.15 e a Figura 5.16 apresentam as impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante a falta considerando dados simulados e medidos respectivamente. Nota-se que apenas as unidades que envolvem a fase A foram afetadas, e que o transitório causou grandes oscilações nas impedâncias, principalmente nos dados originados na simulação.

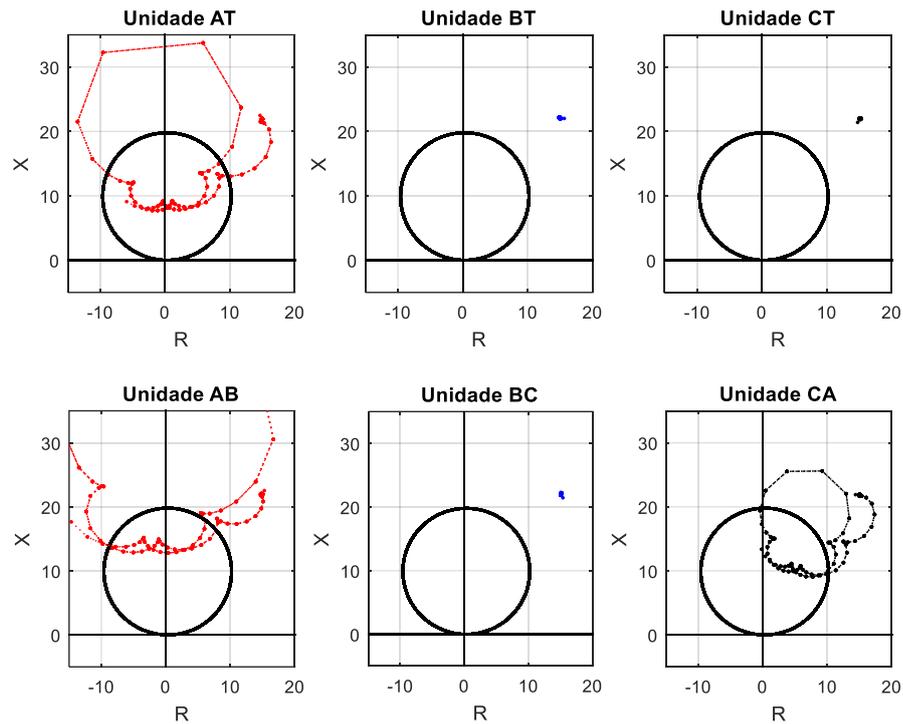


Figura 5.15 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema com compensação série fixa de 20% (dados simulados).

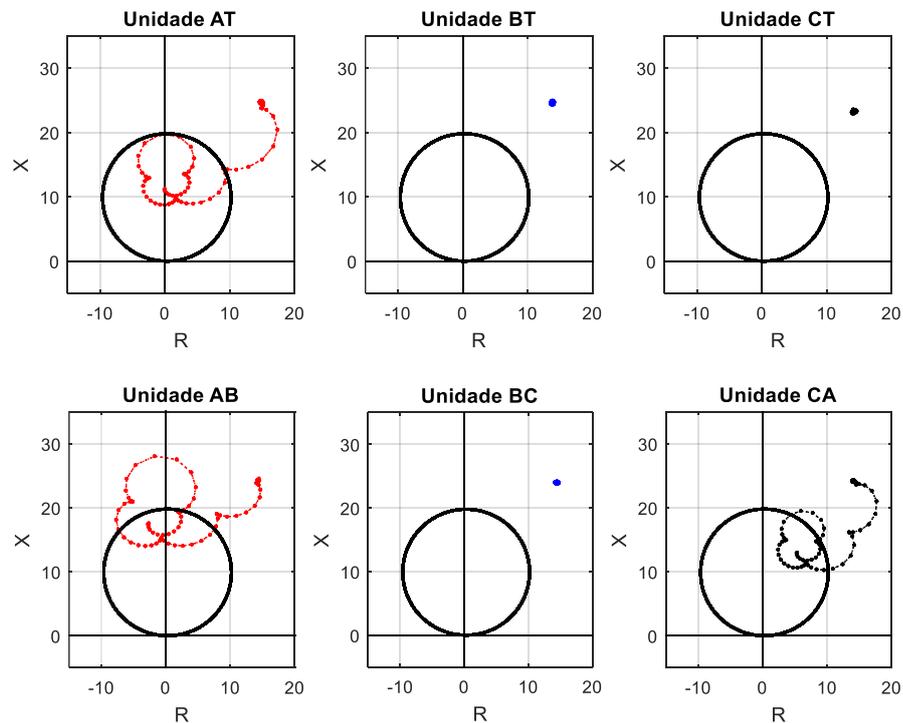


Figura 5.16 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema com compensação série fixa de 20% (dados medidos).

A forma de onda nos terminais do capacitor, apresentada na Figura 5.17, a seguir, mostra que a tensão em seus terminais ultrapassa o valor limite de 3 pu. Na simulação a

sobretensão é mais severa devido à maior duração do transitório causado pela falta. Já na medição é possível verificar que o transitório é dissipado mais rapidamente.

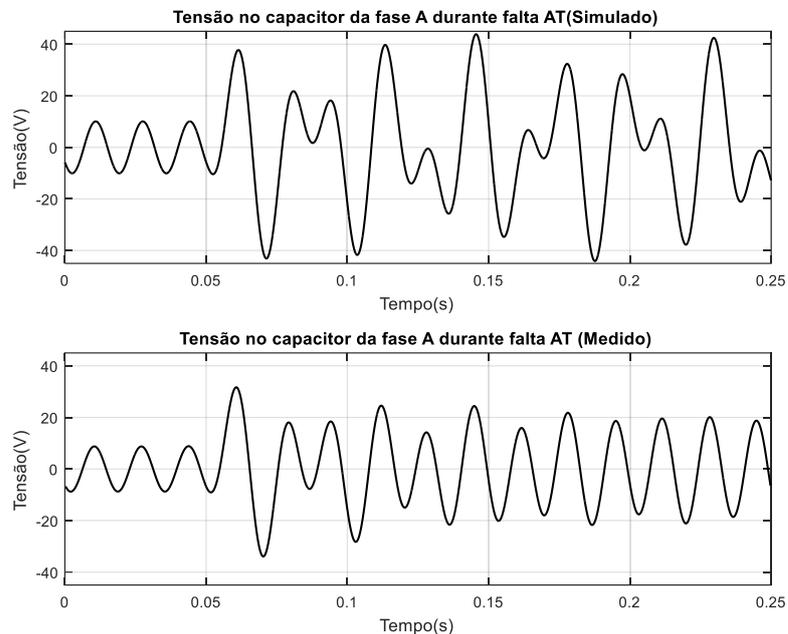


Figura 5.17 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT. Dados de simulação e medidos.

Os ensaios da falta AT com sistema de bypass dos capacitores configurado para disparar em 20 V mostraram que o desvio da corrente reduz o grau de compensação da linha durante a falta, conseqüentemente reduzindo também a corrente nessa circunstância, como mostra a Figura 5.18. Obviamente a tensão nos terminais do capacitor da fase A, apresentadas na Figura 5.19, também foram bastante reduzidas, principalmente nos primeiros instantes após a falta, durante o período transitório. Passado esse período a atuação do bypass praticamente inexiste.

Devido ao curto período de condução do sistema de bypass a melhora nos resultados da localização da falta foram sutis. Para a simulação a localização da falta se deu a 46,36% enquanto para dados medidos esse valor foi 47,44%. Na simulação também foi constatado que as unidades AT e CA atuaram, ainda assim impedindo a correta identificação da falta.

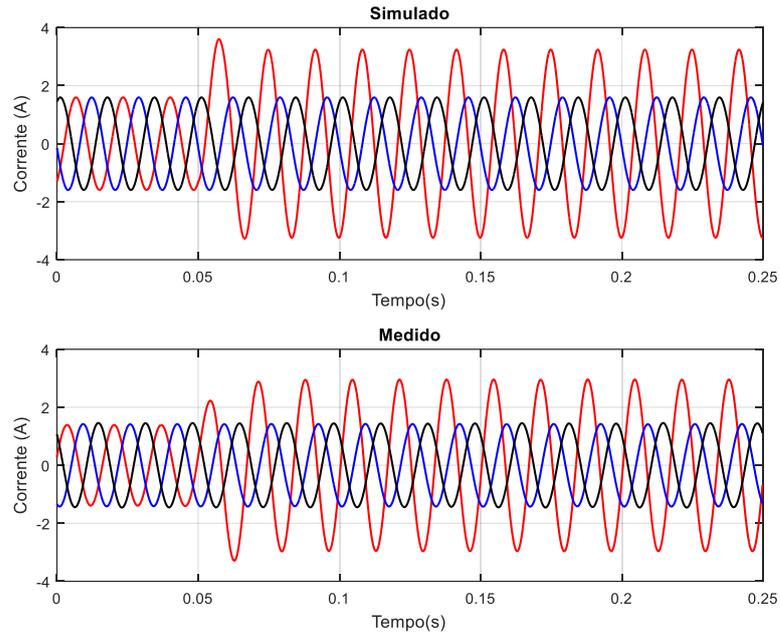


Figura 5.18 - Correntes durante falta AT com sistema de bypass em funcionamento. Dados de simulação e medidos.

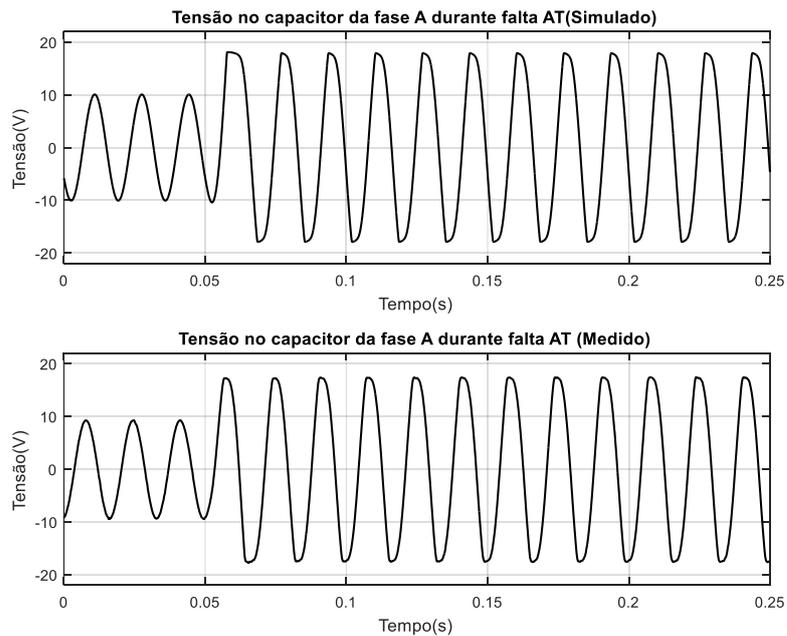


Figura 5.19 - Tensão nos terminais do capacitor da fase A durante falta AT com sistema de bypass em funcionamento. Dados de simulação e medidos.

Devido à estabilização do período transitório observado anteriormente, as impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante a falta oscilaram menos, como mostram a Figura 5.20 e a Figura 5.21, com dados de simulação e medidos respectivamente.

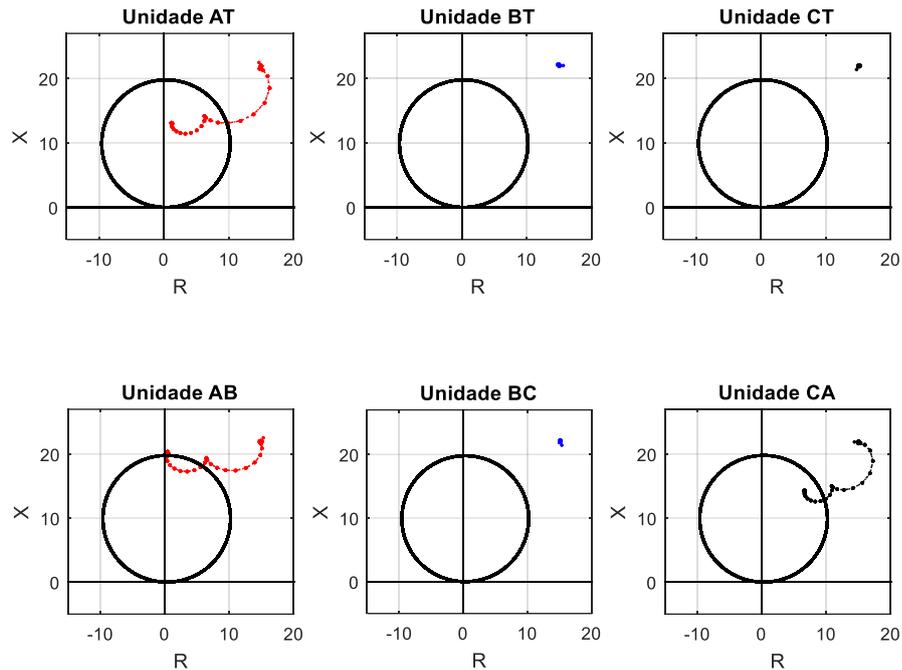


Figura 5.20 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema com compensação série fixa de 20% com sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (simulação).

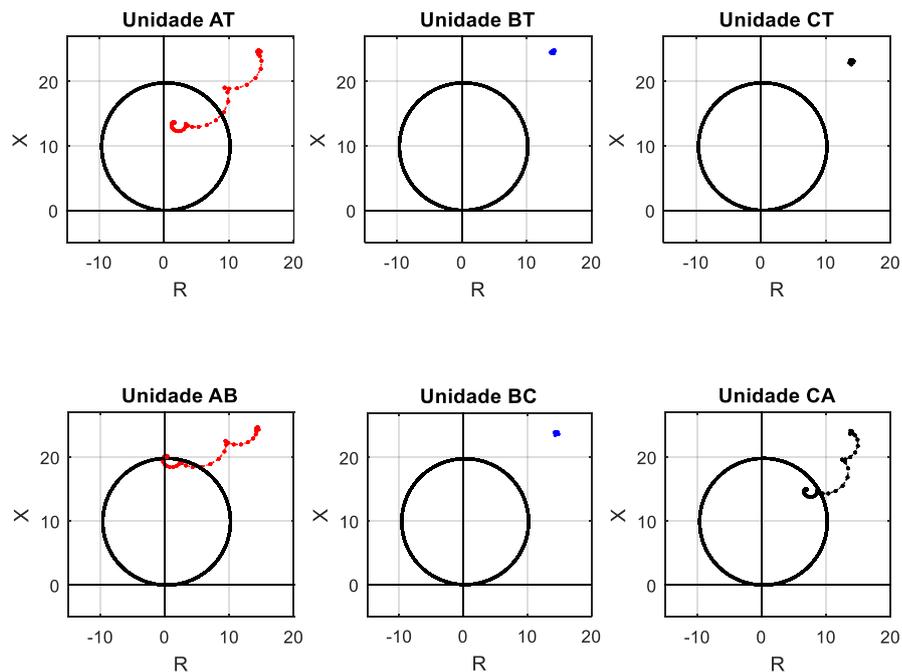


Figura 5.21 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema com compensação série fixa de 20% com sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (dados medidos).

5.2.2 Falta CA

Na falta CA, como mostra a Figura 5.22, novamente verificou-se a presença do transitório sub-harmônico com as mesmas características observadas anteriormente. E da mesma forma, o relé foi capaz de determinar corretamente a ocorrência da falta, mas falhou

na determinação do seu tipo, uma vez que as unidades AT, CT, BC e CA atuaram. Considerando apenas a unidade CA, na simulação o relé localizou a falta em 44,19%, enquanto na medição este valor foi de 43,59%.

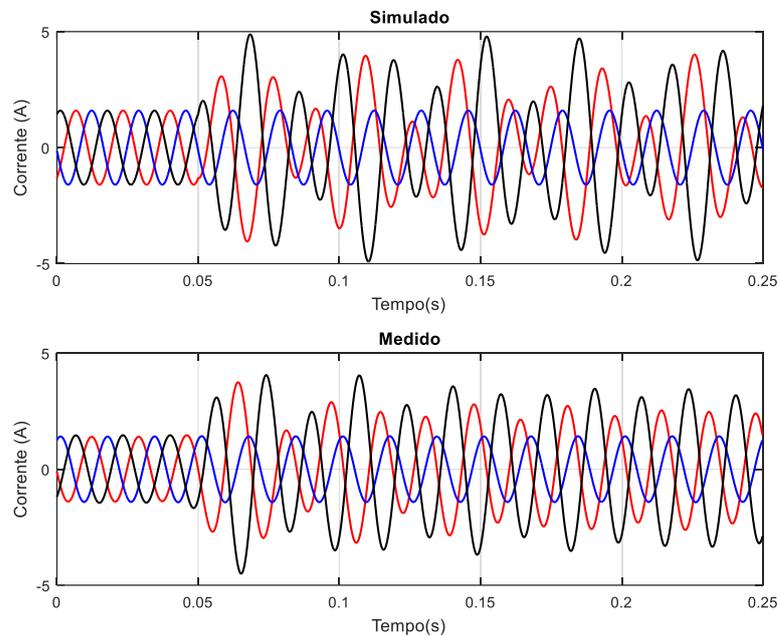


Figura 5.22 - Correntes no sistema com compensação fixa de 20% durante falta CA. Dados simulados e medidos.

A Figura 5.23 e a Figura 5.24 apresentam as impedâncias vistas pelas unidades de proteção do relé durante a falta CA considerando dados simulados e medidos respectivamente. Nota-se que durante o período transitório, iniciado após a falta, as unidades de proteção do relé relacionadas com as fases envolvidas na falta enxergam impedâncias que sofrem oscilações de grande amplitude.

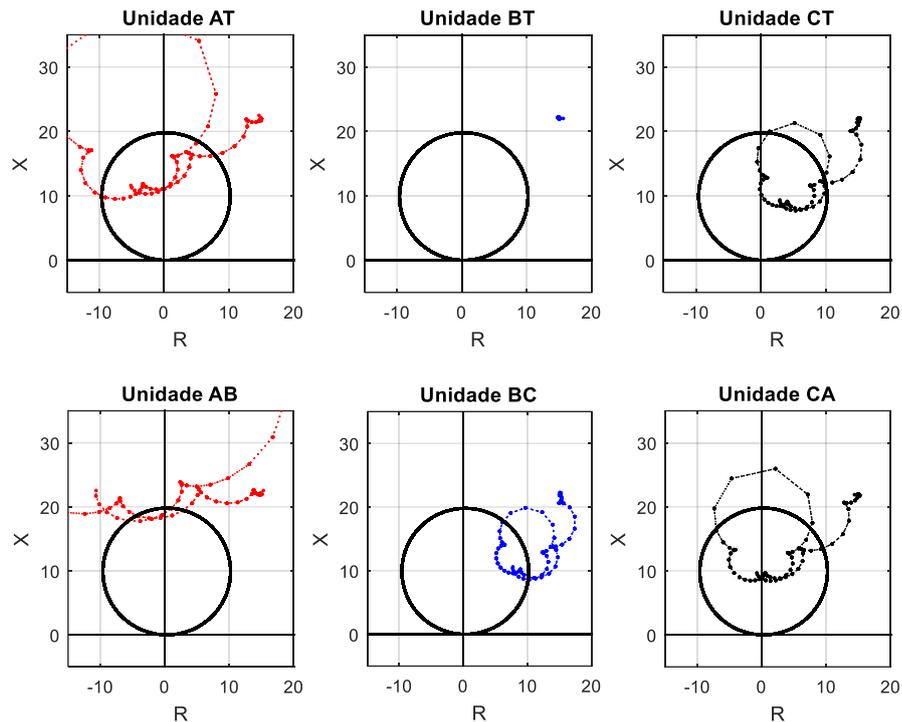


Figura 5.23 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema com compensação série fixa de 20% (dados simulados).

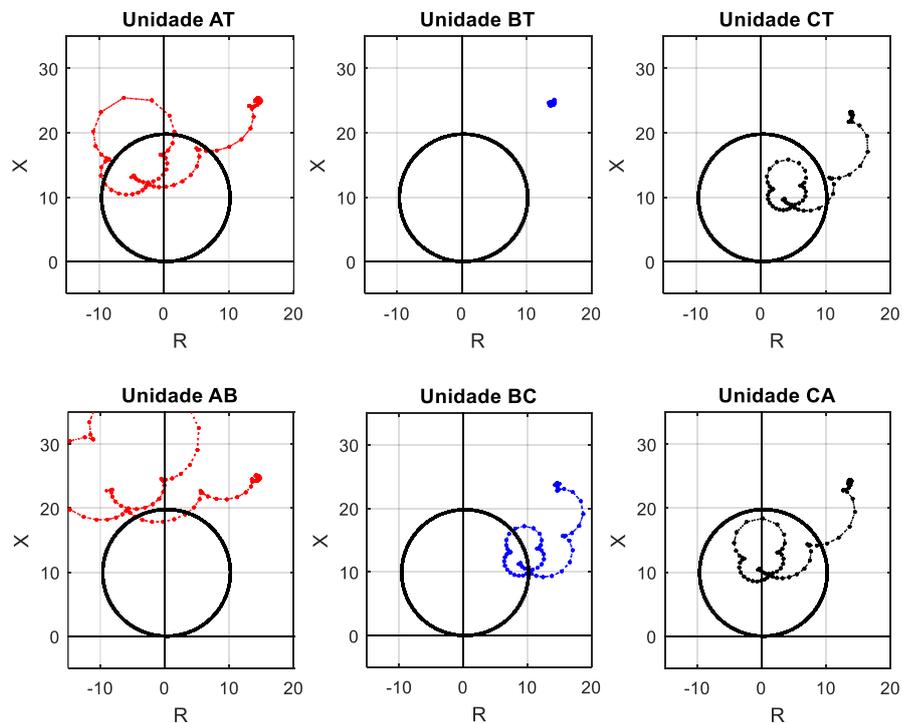


Figura 5.24 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema com compensação série fixa de 20% (dados medidos).

Durante a falta CA a tensão sobre os capacitores apresentou comportamento semelhante ao apresentado na falta AT. A Figura 5.25 apresenta a forma de onda da tensão no capacitor da fase A durante a falta CA. Como a placa de aquisição de dados utilizada para

as medições no sistema pratico não tinha canais suficientes para amostrar todas as tensões das fases, correntes de linha e tensões nos capacitores, apenas a tensão no capacitor da fase A foi medida.

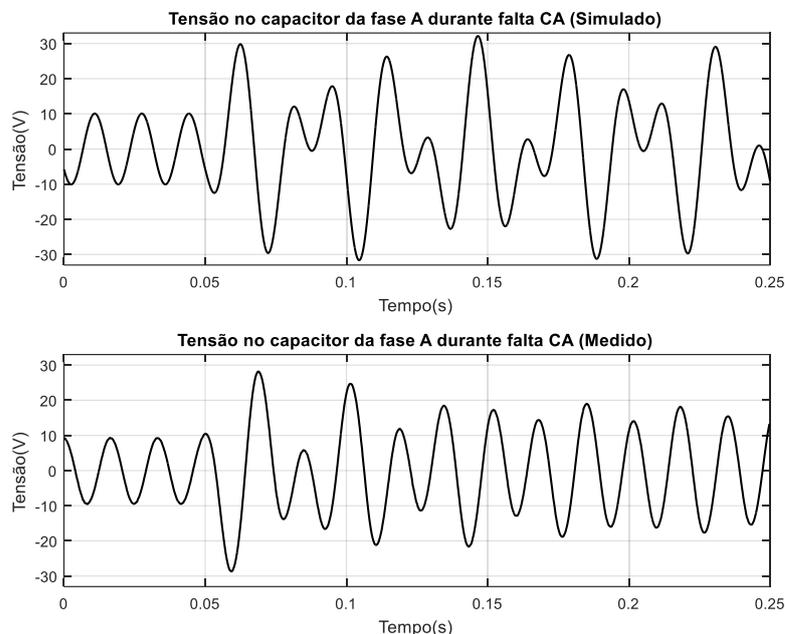


Figura 5.25 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta CA. Dados de simulação e medidos.

Como mostram a Figura 5.26 e a Figura 5.27, a inserção do sistema de proteção dos capacitores reduziu a corrente de curto e também a tensão nos capacitores durante a falta CA. No entanto, nessas circunstâncias verificou-se que o relé não conseguiu identificar corretamente o tipo de falta ocorrida, pois tanto para a simulação quanto para a medição as unidades AT, CT e CA atuaram. Dessa forma, a falta foi considerada do tipo CAT. A Tabela 5.5 apresenta a distância da falta determinada pelo relé considerando a falta CAT e também apenas a unidade CA. Verifica-se que houve pequena melhora em relação ao sistema sem bypass.

Tabela 5.5 - Localização da falta indicada pelas unidades CAT e CA durante falta CA em sistema compensado em 20% com bypass em funcionamento.

Unidade	Simulação	Medição
CAT	45,2%	44,06%
CA	45,2%	44,46%

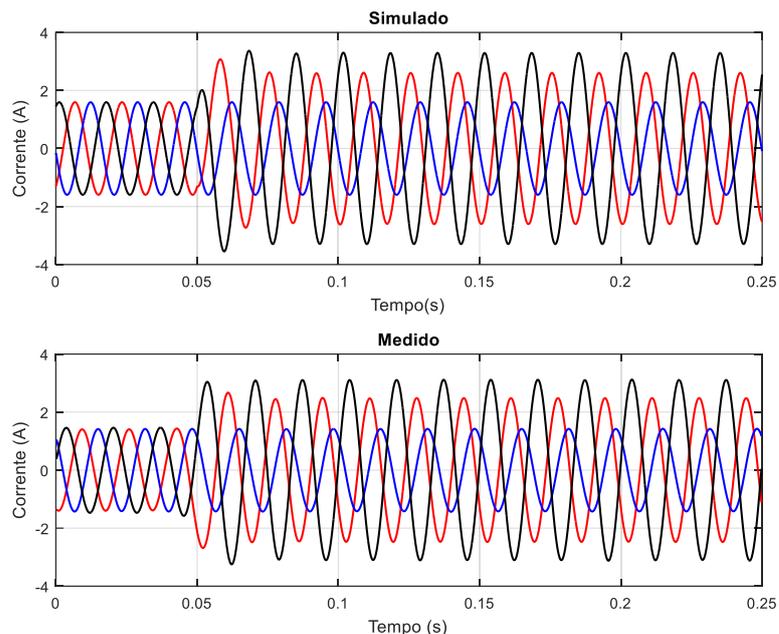


Figura 5.26 - Correntes no sistema com compensação fixa de 20% durante falta CA com sistema de bypass em funcionamento. Dados simulados e medidos.

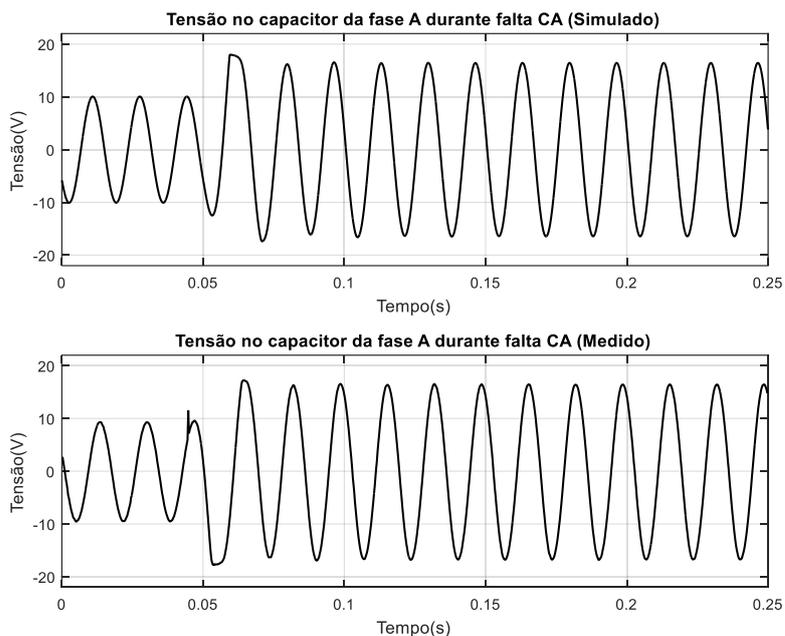


Figura 5.27 - Tensão nos terminais do capacitor da fase A durante falta CA com sistema de bypass em funcionamento. Dados de simulação e medidos.

A Figura 5.28 e a Figura 5.29 mostram também que houve redução da oscilação da impedância vista pelas unidades do relé de distância, assim como ocorrido na falta AT.

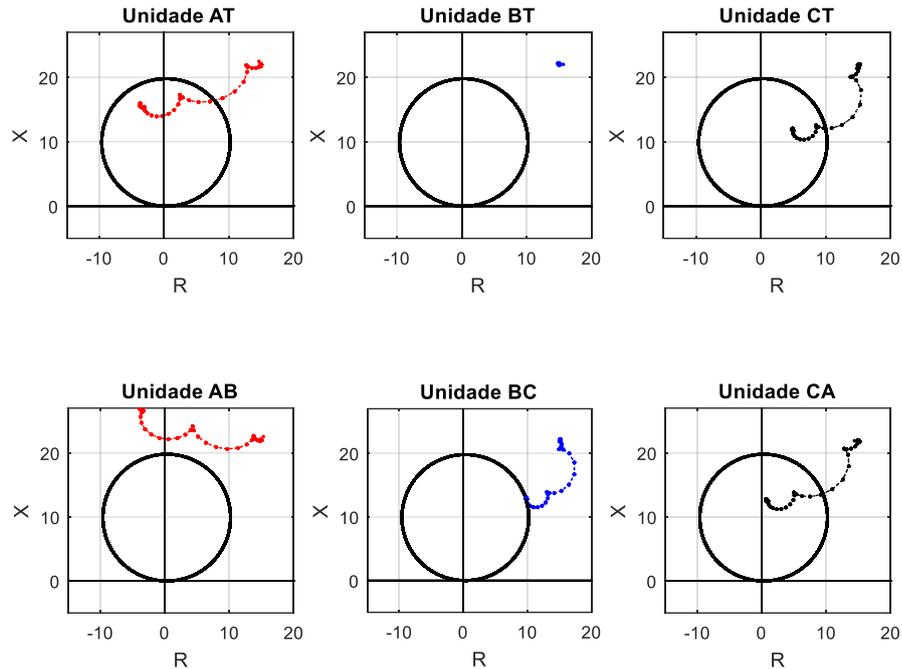


Figura 5.28 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema com compensação série fixa de 20% e sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (dados simulados).

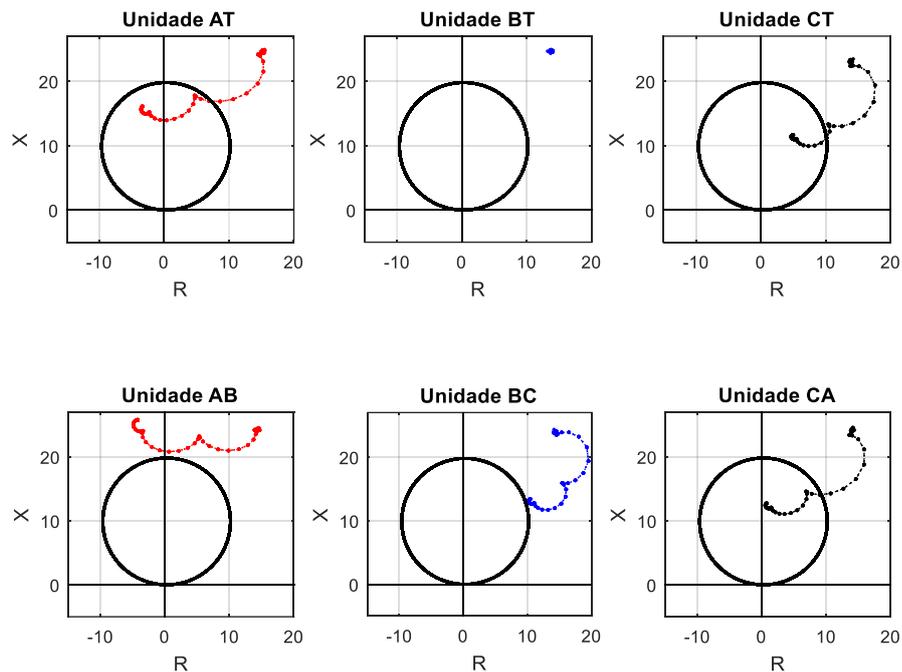


Figura 5.29 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema com compensação série fixa de 20% e sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (dados Medidos).

5.2.3 Falta ABCT

Na falta ABCT sem sistema de bypass dos capacitores, verificou-se a presença do transitório sub-harmônico com as mesmas características observadas nas faltas analisadas anteriormente, como mostra a Figura 5.30. No entanto, desta vez o relé foi capaz de

determinar corretamente a ocorrência e o tipo da falta, já que todas as unidades atuaram. Na simulação, o relé localizou a falta em 45,26%, enquanto na medição este valor foi de 42,9%.

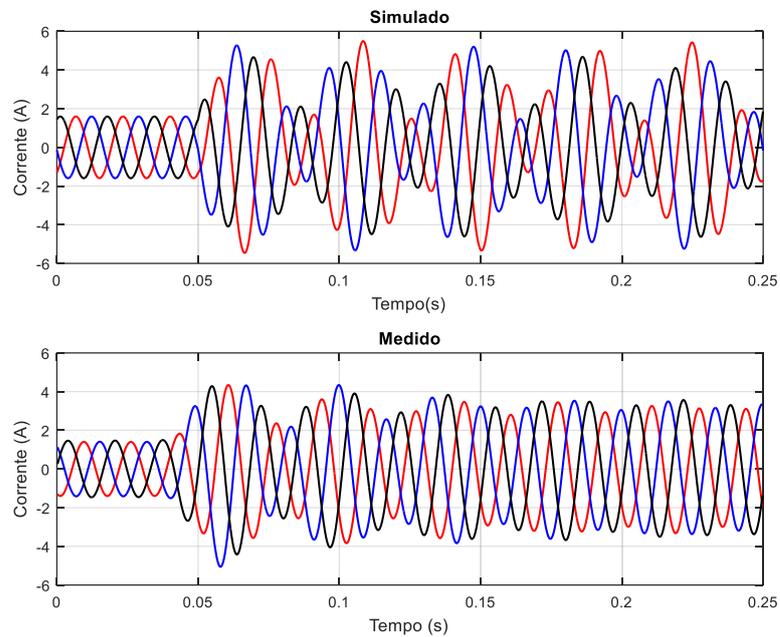


Figura 5.30 - Correntes no sistema com compensação fixa de 20% durante falta ABCT. Dados simulados e medidos.

Na Figura 5.31 e na Figura 5.32 verifica-se novamente que, devido ao transitório causado pela falta, as impedâncias vistas por todas as unidades do relé passaram por grandes oscilações durante este período. Assim como dos demais casos, os dados obtidos por simulação apresentam maior variação.

A forma de onda de tensão no capacitor da fase A apresentou distorção semelhante as demais situações em que não há bypass do capacitor durante a falta. A Figura 5.33 apresenta esta forma de onda obtida por meio de dados simulados e medidos.

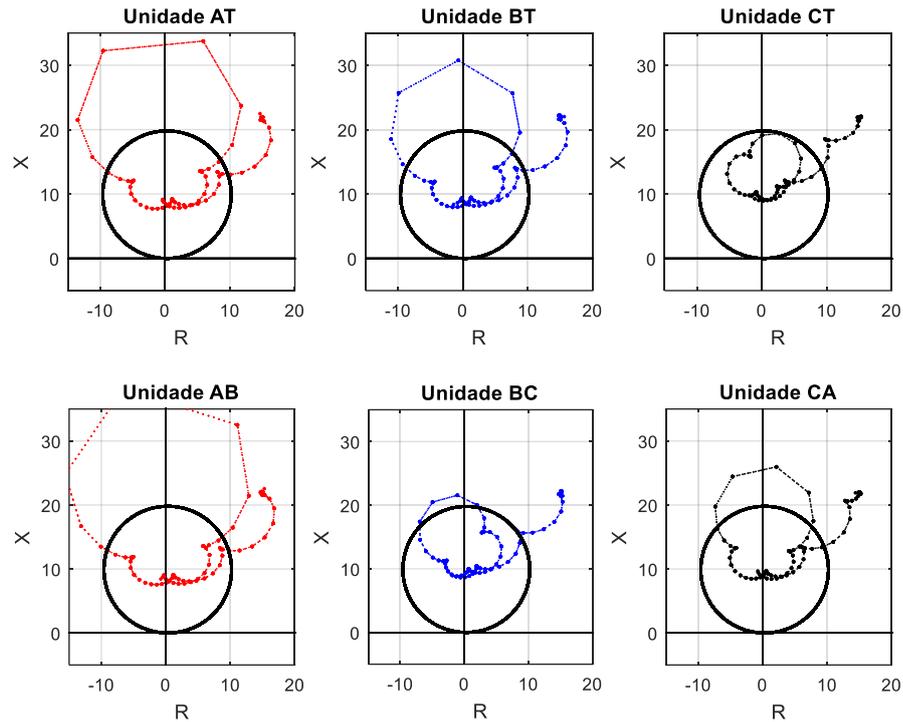


Figura 5.31 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema com compensação série fixa de 20% (dados simulados).

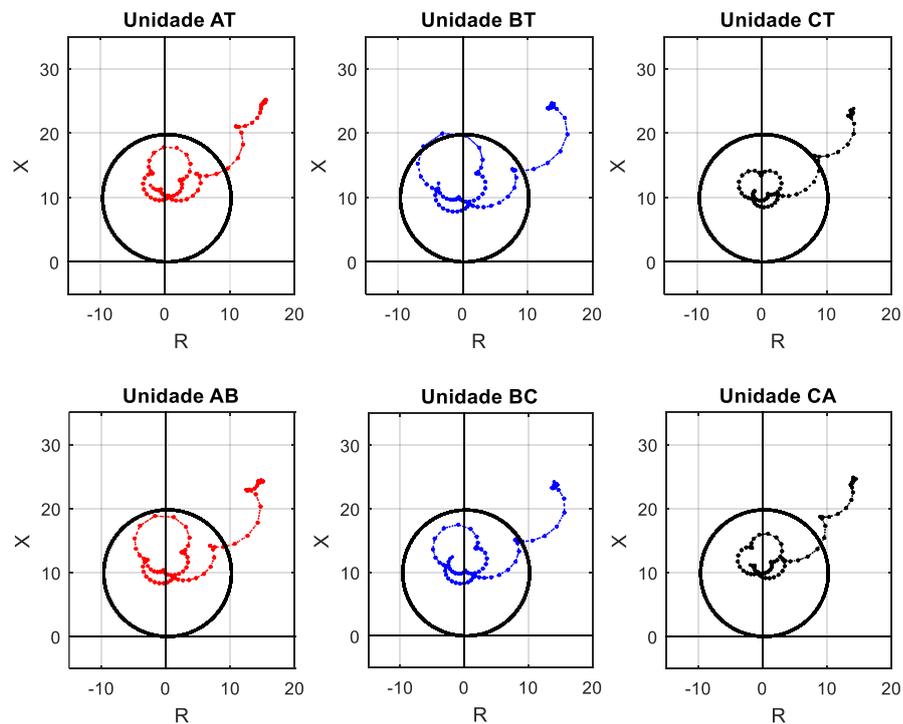


Figura 5.32 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema com compensação série fixa de 20% (dados medidos).

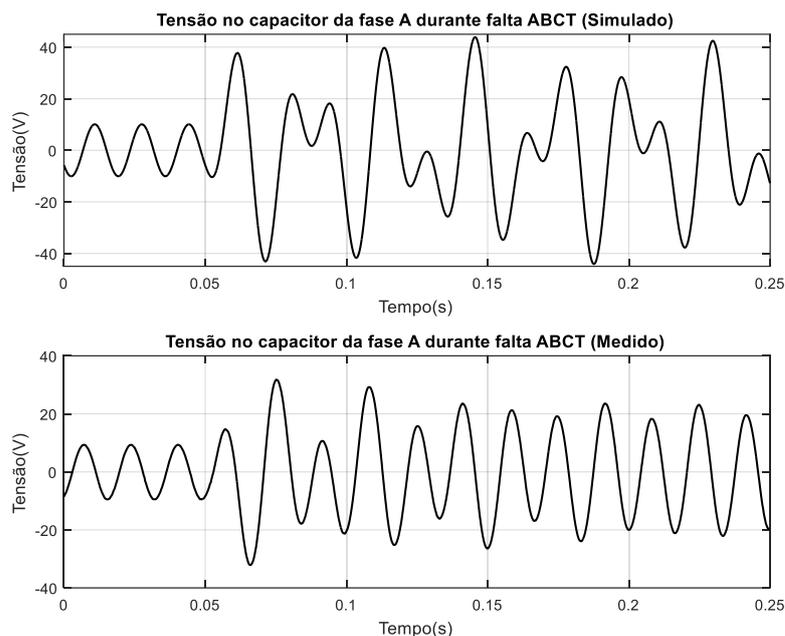


Figura 5.33 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta ABCT. Dados de simulação e medidos.

Com a inserção do sistema de bypass dos capacitores houve melhora nos resultados. Assim como observado para as faltas AT e CA, o transitório iniciado após a falta foi fortemente amortecido, como mostram a Figura 5.34 e a Figura 5.35, com as formas de onda de correntes no sistema e de tensão no capacitor da fase A respectivamente. A grande redução da oscilação da corrente durante a falta também pode ser observada nas impedâncias vistas por cada unidade de proteção do relé, conforme Figura 5.36 e Figura 5.37.

A melhora nos resultados também é evidenciada em função da localização da falta, que desta vez foi situada em 46,35% para a simulação e 44,72% para medição.

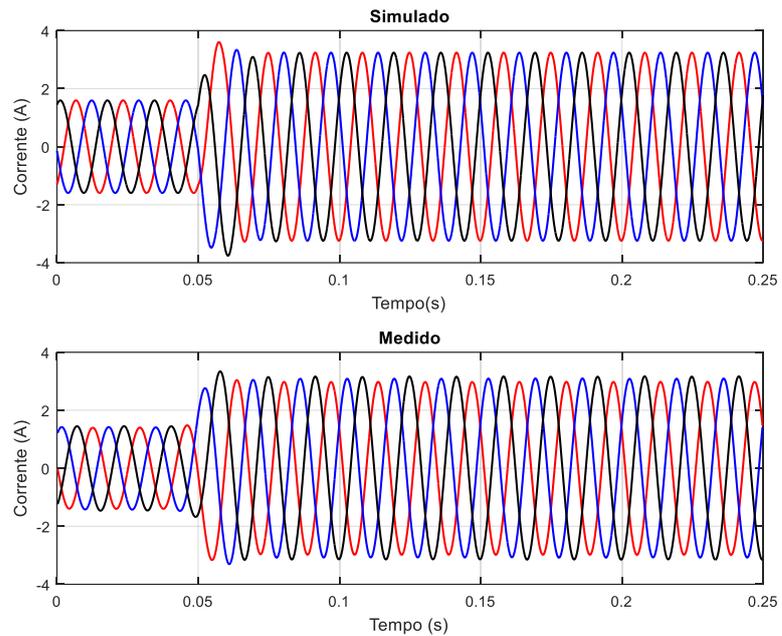


Figura 5.34 - Correntes no sistema com compensação fixa de 20% durante falta ABCT com sistema de bypass em funcionamento. Dados simulados e medidos.

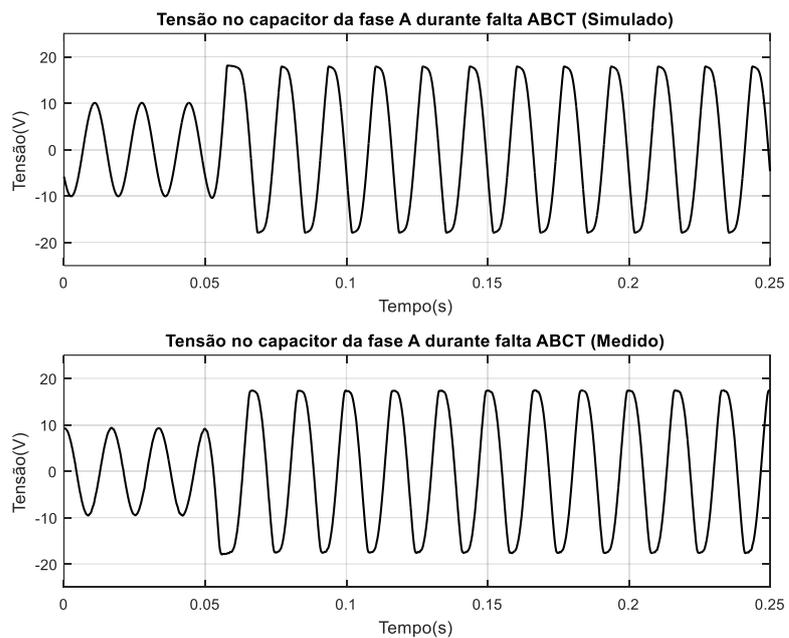


Figura 5.35 - Tensão nos terminais do capacitor da fase A durante falta ABCT com sistema de bypass em funcionamento. Dados de simulação e medidos.

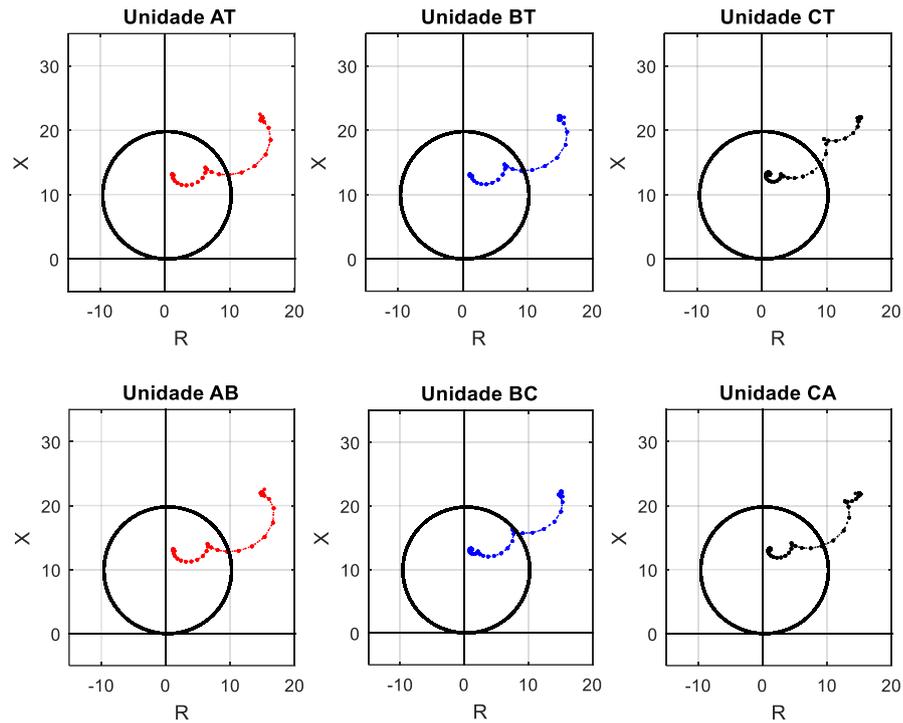


Figura 5.36 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema com compensação série fixa de 20% e sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (dados simulados).

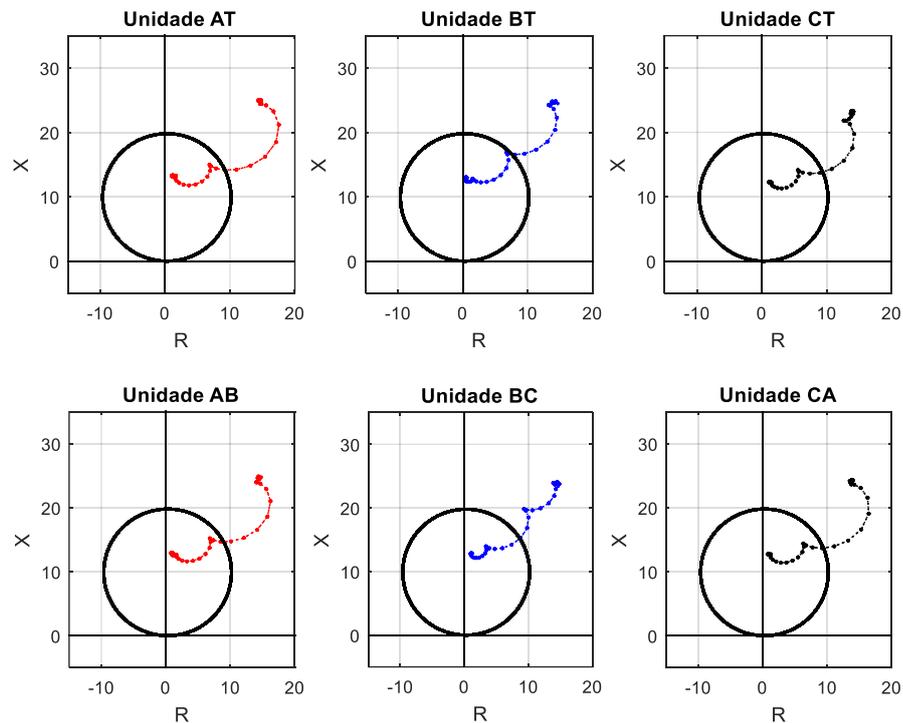


Figura 5.37 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema com compensação série fixa de 20% e sistema de bypass dos capacitores em funcionamento (dados medidos).

5.3 Sistema com Compensação Série Controlada por TCSC

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes realizados no relé de proteção de distância para a linha compensada em cerca de 40% por meio de um módulo de TCSC. Conforme mencionado anteriormente, estes ensaios combinam cenários com ausência e presença de sistema de bypass dos capacitores.

Em regime nominal a tensão eficaz nos terminais dos capacitores de cada fase é de aproximadamente 15 V no sistema simulado e 13,5 V no experimento prático. A diferença apresentada está relacionada ao valor reduzindo de corrente da segunda situação, conforme explicado na introdução deste capítulo.

A Figura 5.38 mostra as formas de onda de tensão em uma das fases do TCSC, obtidas a partir de dados de simulação e medição, com o sistema em operação normal. É possível verificar que as formas de onda são bastante deformadas em relação às mesmas formas de onda observadas no sistema com compensação fixa. Isso se deve à operação do TCSC, que tem por base, provocar sobretensão nos capacitores, resultando em um maior nível de compensação. Formas de onda semelhantes estão apresentadas no Capítulo 2, em seções de descrevem o funcionamento do TCSC.

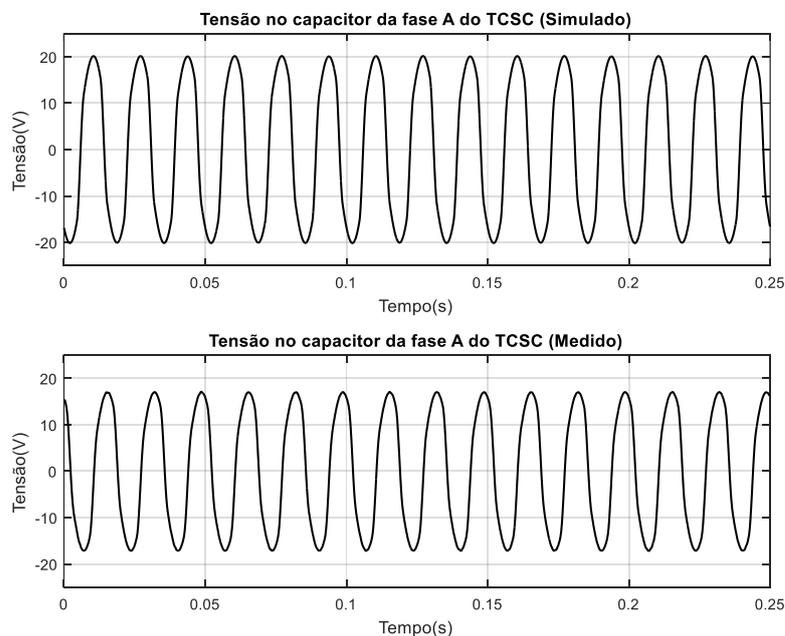


Figura 5.38 - Formas de onda de tensão no TCSC de uma das fases do sistema em operação normal. Dados simulados e medidos.

Para este cenário, com maior tensão nos terminais dos capacitores, havia disponibilidade técnica de maior variedade de diodos supressores de surto, portanto foram feitos ensaios com 2 valores diferentes de tensão para referência da proteção, 32 e 45 V, que

equivalem a aproximadamente 2,3 e 3 pu em relação ao regime de operação normal (em simulação).

5.3.1 Falta AT

O ensaio da falta AT gerou resultados semelhantes aos verificados na mesma situação com compensação fixa. As diferenças são principalmente, a maior intensidade da corrente, que provocou aumento da tensão nos terminais do capacitor, principalmente durante falta, e a forte mudança na frequência do transitório sub-harmônico decorrente da falta, uma vez que a capacitância do circuito RLC composto pelo loop de falta foi aumentada em relação à situação anterior. A Figura 5.39 e a Figura 5.40 mostram as formas de onda de correntes na linha e de tensão sobre o capacitor da fase A durante a falta respectivamente.

Nesse cenário novamente o relé não conseguiu identificar o tipo da falta, já que todas as unidades que envolvem a fase A atuaram (AT, AB e CA). Esse comportamento se deve ao sobrealcançe do relé, que com o aumento da compensação, enxergou a falta ainda mais próxima em comparação com a situação de compensação fixa. Esse resultado foi observado tanto na simulação, onde a localização da falta considerando apenas a unidade AT se deu em 17,14%, quanto na medição, cuja localização da falta foi em 20,97%.

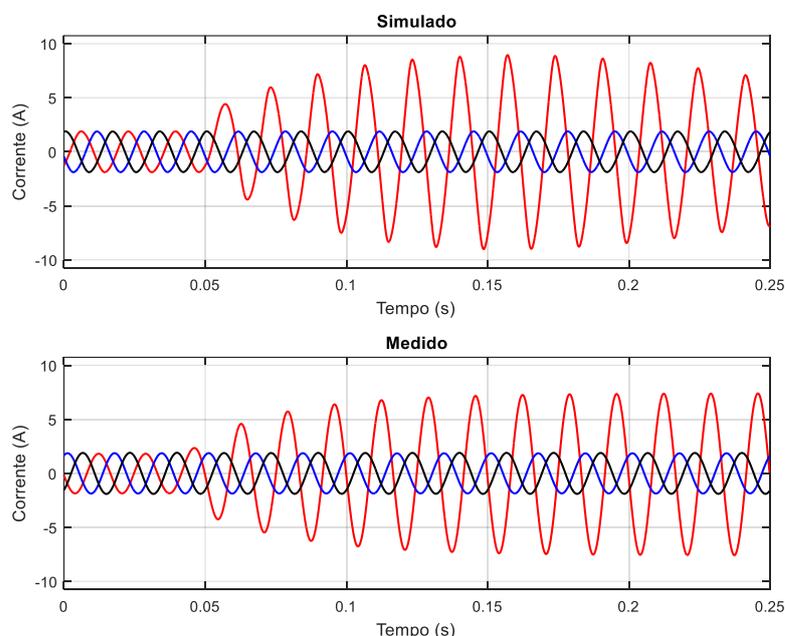


Figura 5.39 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta AT. Dados simulados e medidos.

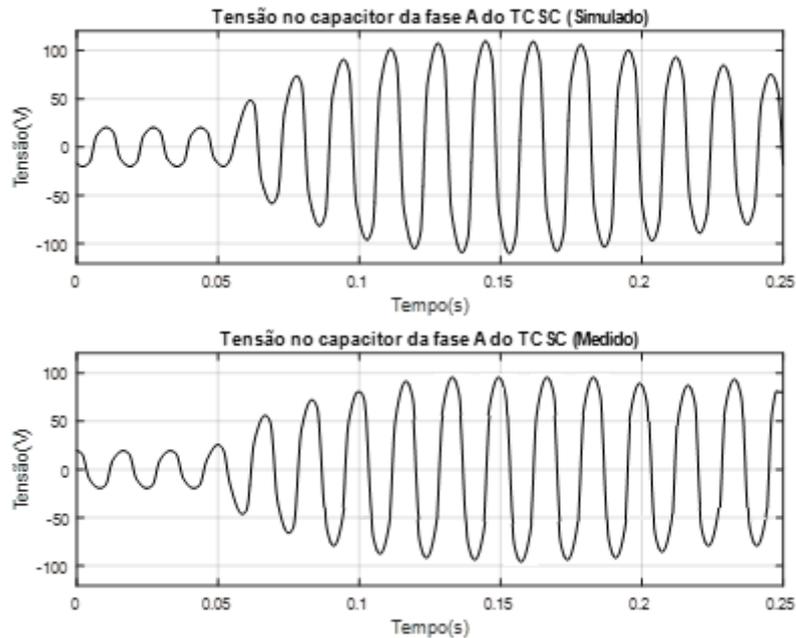


Figura 5.40 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT. Dados de simulação e medidos.

A Figura 5.41 e a Figura 5.42, a seguir, mostram as impedâncias vistas pelas 6 unidades do relé de proteção para dados medidos e simulados respectivamente. É possível verificar o grande sobrealcançe do relé, principalmente na fase A.

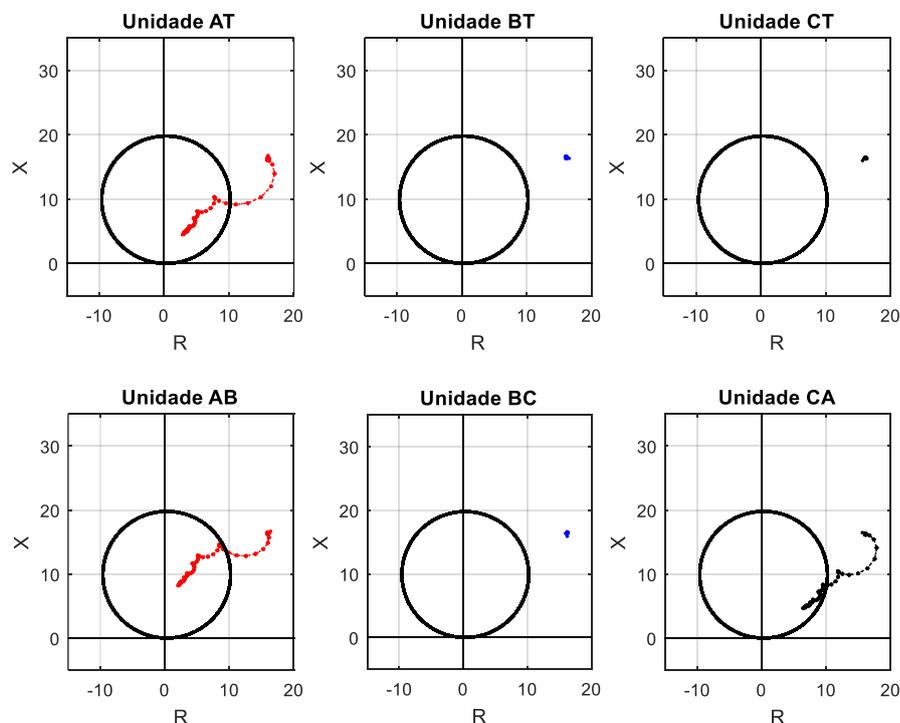


Figura 5.41 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados simulados).

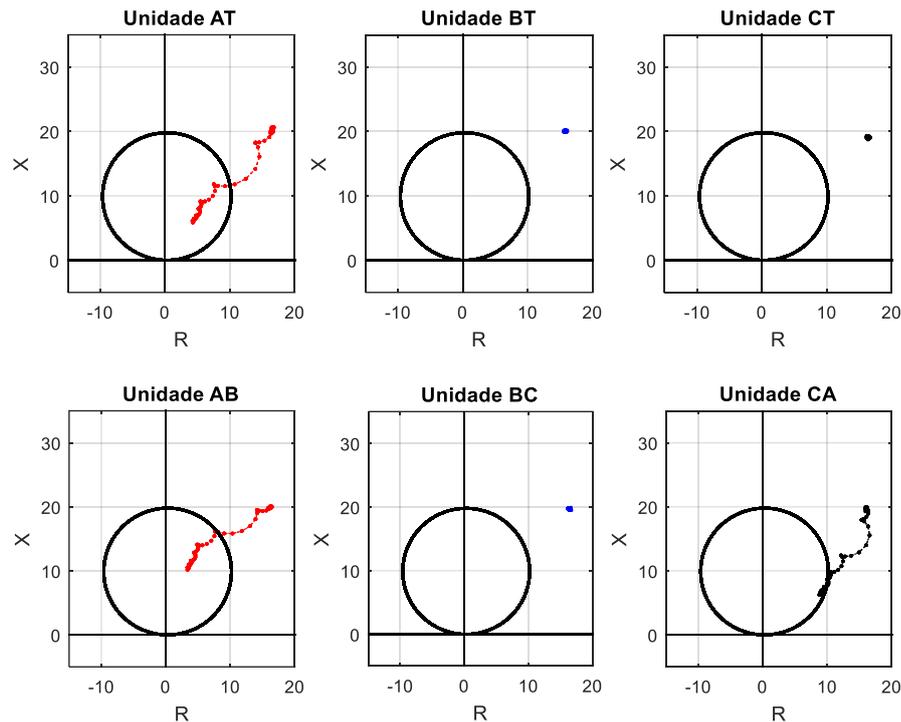


Figura 5.42 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados medidos).

Conforme mencionado anteriormente, foram realizados ensaios com dois níveis de proteção diferentes para o sistema com TCSC, dessa forma é possível verificar o efeito desse parâmetro na resposta do relé. Com o objetivo de melhorar a organização do trabalho, os dados relativos a cada nível de proteção, para cada tipo de falta, estão apresentados em subseções independentes.

5.3.1.1 Falta AT bypass 2,3 pu

Na falta AT com proteção dos capacitores fixada em 2,3 pu há redução da corrente de falta, e fica claro a limitação da tensão sobre os capacitores, como mostram a Figura 5.43 e a Figura 5.44 respectivamente.

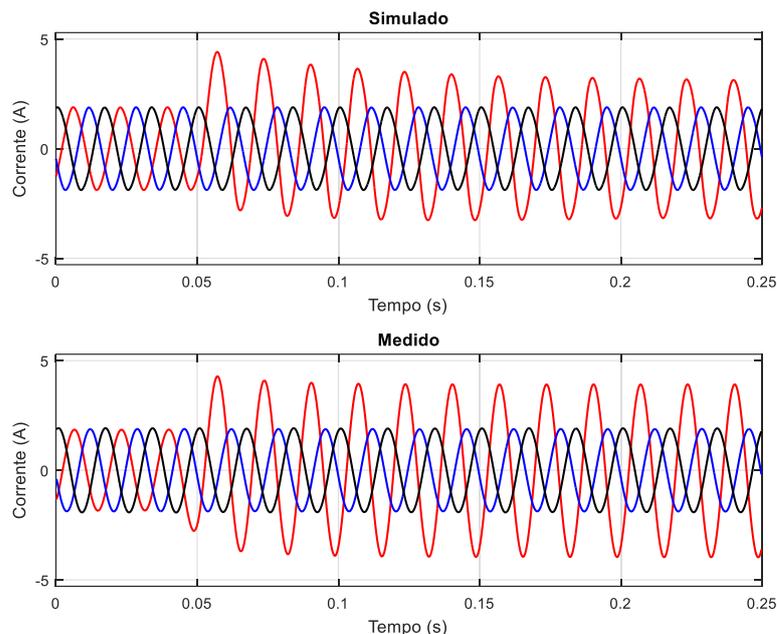


Figura 5.43 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados simulados e medidos.

Não foi obtida melhora em relação à identificação do tipo de falta, já que novamente todas as unidades que envolvem a fase A atuaram. No entanto, considerando apenas a unidade AT, a diminuição do grau de compensação promovida pelo sistema de bypass durante a falta reduziu consideravelmente o sobrealcance do relé. Na simulação a falta foi localizada a 38,40% enquanto na medição o valor obtido foi de 38,63%. Na Figura 5.45 e na Figura 5.46, a seguir, verifica-se a redução do sobrealcance do relé pelas impedâncias vistas por cada unidade com dados simulados e medidos.

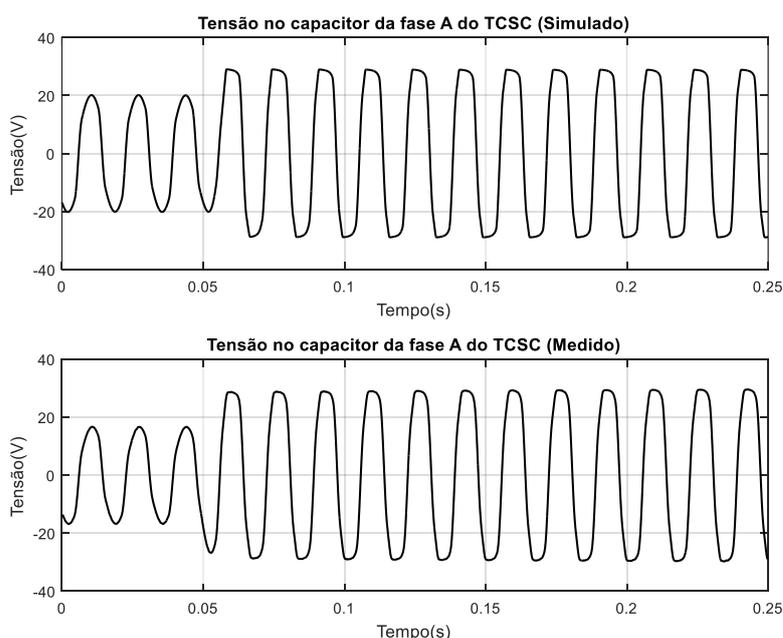


Figura 5.44 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados de simulação e medidos.

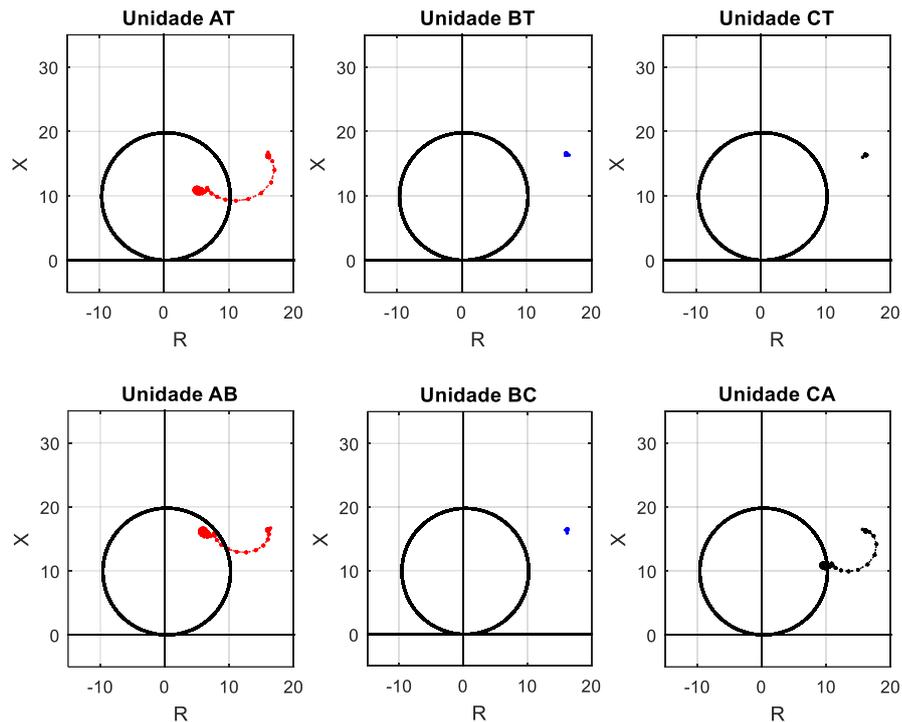


Figura 5.45 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu (dados simulados).

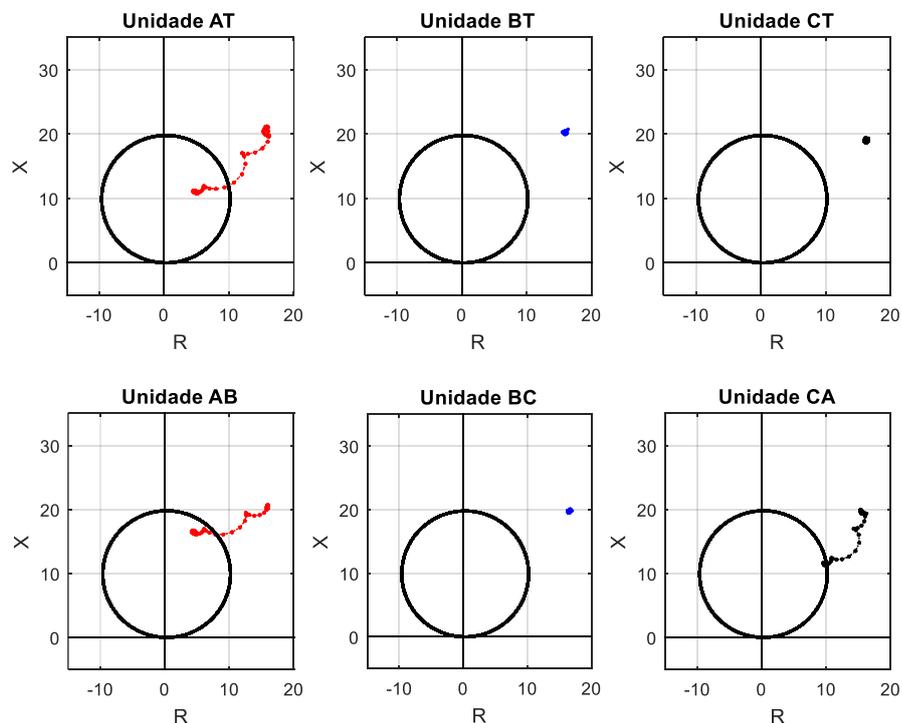


Figura 5.46 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu (dados medidos).

O sistema estudado tem como característica o ponto de operação próximo do limite da zona protegida. É plausível concluir pelos resultados obtidos que se o ponto de operação do

sistema fosse mais distante, em termos de impedância, da zona protegida, o sistema de bypass seria capaz de possibilitar ao relé identificar corretamente o tipo da falta, uma vez que as unidades AB e CA foram sensibilizadas muito próximas aos seus limites

5.3.1.2 Falta AT bypass 3 pu

Com o aumento do limite de tensão para proteção dos capacitores do TCSC os resultados obtidos foram semelhantes aos anteriores. No entanto, na situação atual, com a menor redução da compensação durante a falta, é previsível o aumento da corrente de falta e também de tensão nos terminais dos capacitores, como mostram a Figura 5.47 e a Figura 5.48 respectivamente.

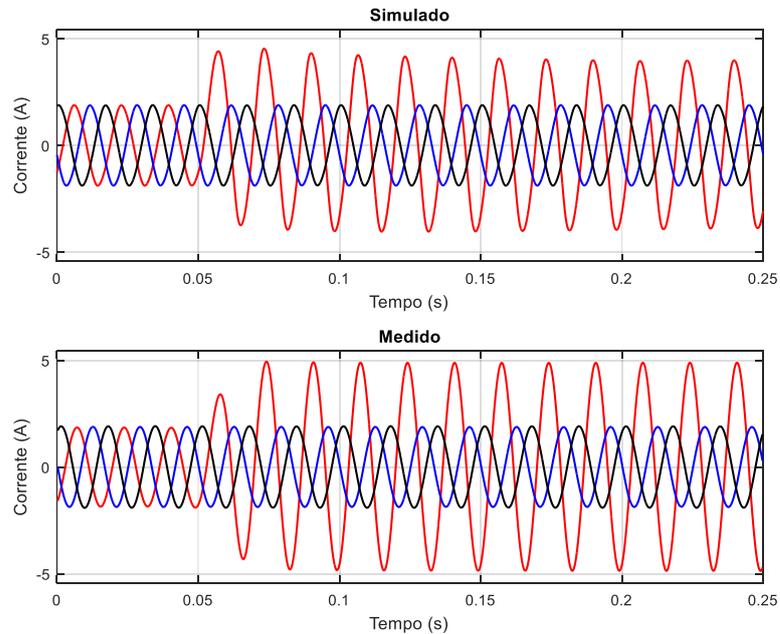


Figura 5.47 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu. Dados simulados e medidos.

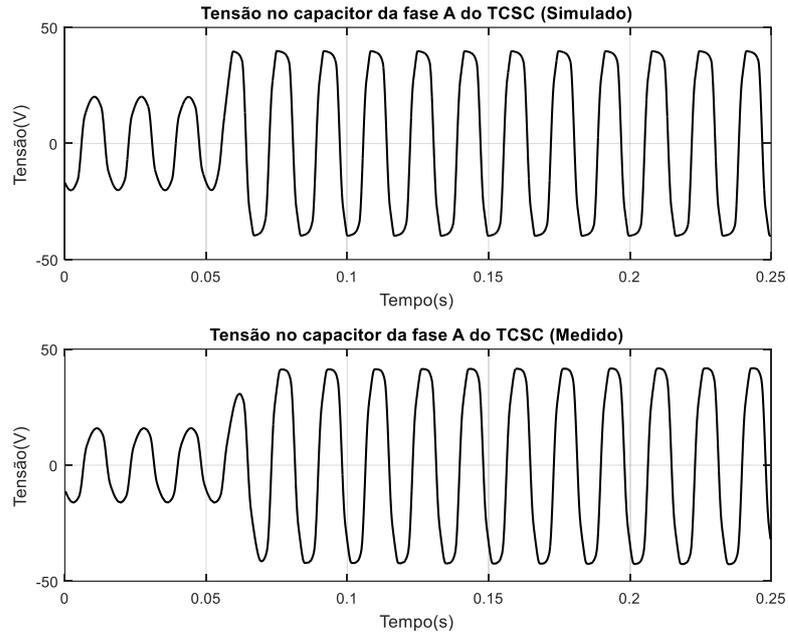


Figura 5.48 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 32 V. Dados de simulação e medidos.

Não houve mudanças significativas em relação à atuação do relé em comparação com a análise anterior. O aumento na tensão de referência da proteção causou apenas um maior sobrealcançe na localização da falta, que considerando apenas a unidade de proteção AT, se deu em 31,59% na simulação e em 29,11% na medição.

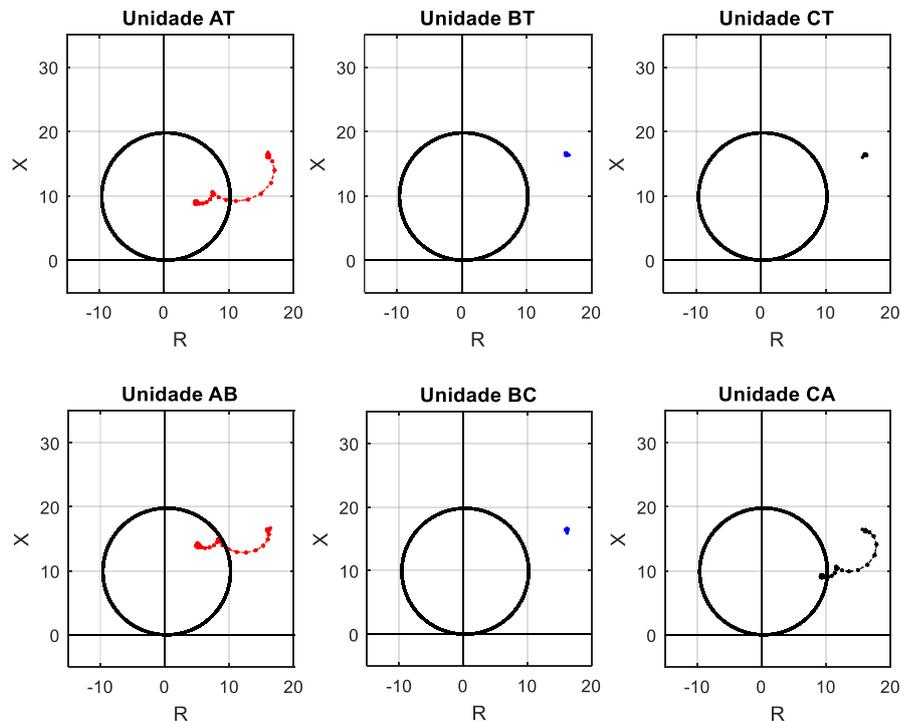


Figura 5.49 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados simulados).

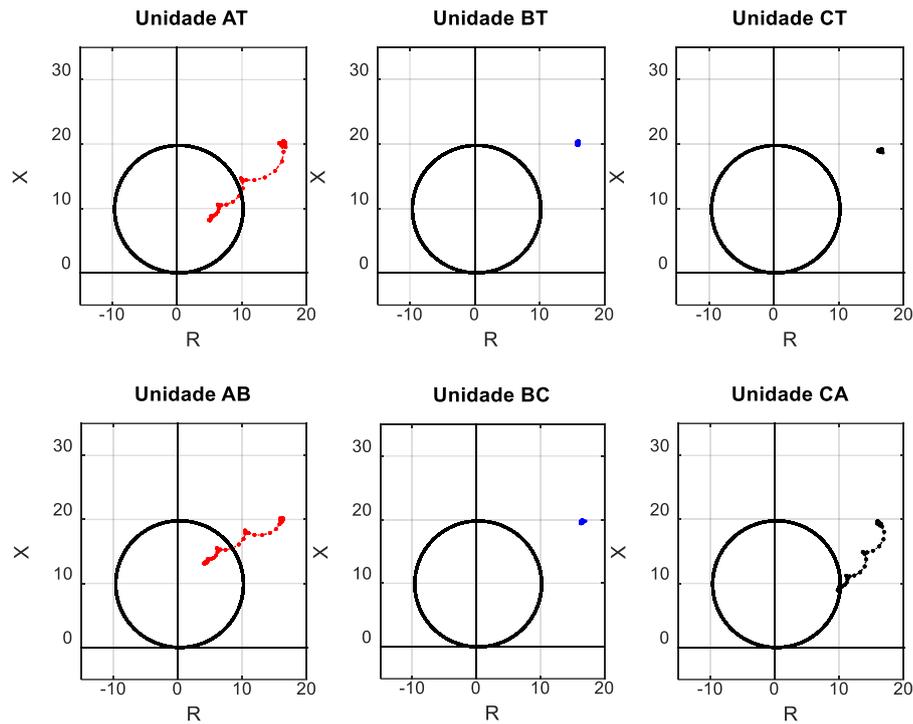


Figura 5.50 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados medidos).

5.3.2 Falta CA

Os resultados obtidos com a falta CA sem sistema de bypass dos capacitores foram semelhantes aos vistos anteriormente para o sistema com compensação fixa, mas com correntes de falta e tensão sobre os capacitores de maior valor, devido ao maior nível de compensação propiciado pelo TCSC, como mostram a Figura 5.51 e a Figura 5.52.

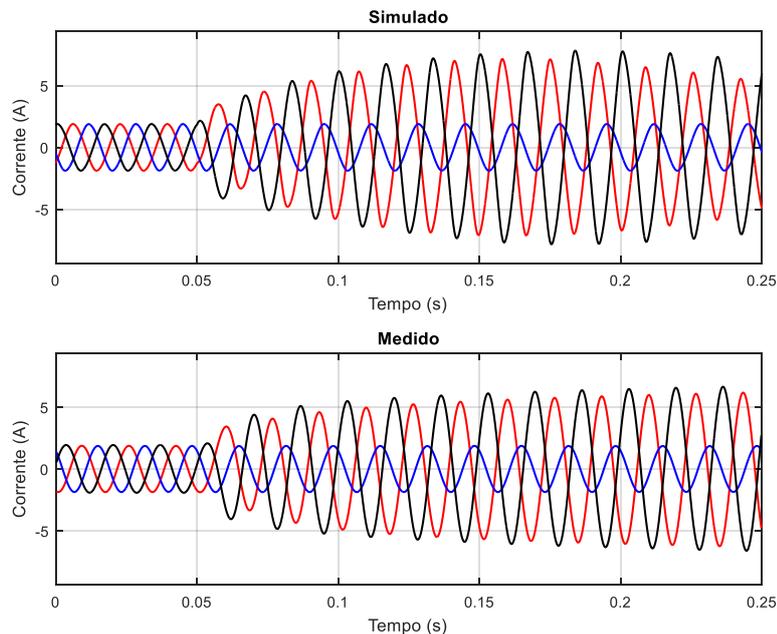


Figura 5.51 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta CA. Dados simulados e medidos

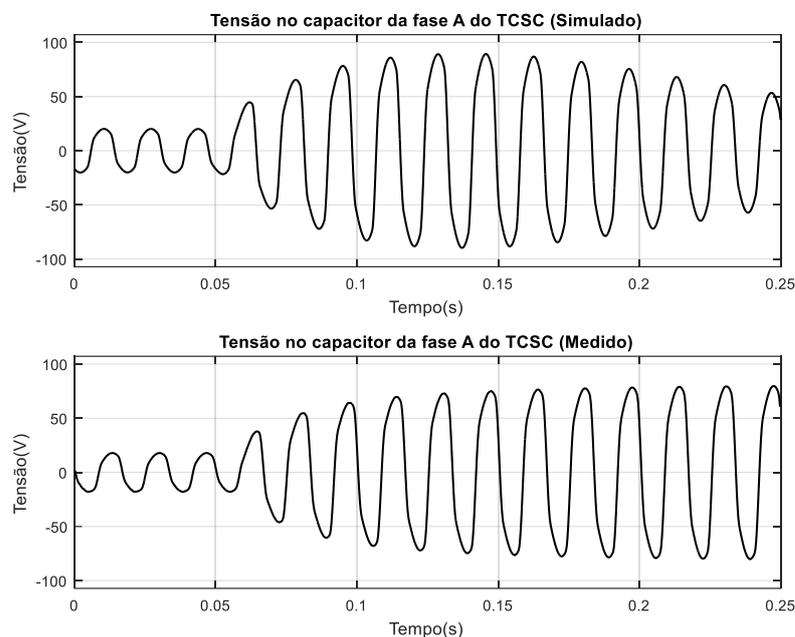


Figura 5.52 – Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta CA. Dados de simulação e medidos.

Nesta falta o relé atuou corretamente, entretanto não foi capaz de detectar o tipo de falta, já que as unidades AT, CT, AB e CA atuaram. Considerando apenas a unidade CA, houve maior sobrelance do relé na localização da falta em relação à compensação fixa, uma vez que foi está foi indicada a 19,29% do relé quando processados os dados simulados e 24,12% com dados medidos.

Por meio da Figura 5.53 e da Figura 5.54, que apresentam as impedâncias vistas por todas as unidades de proteção do relé utilizando dados simulados e medidos respectivamente, é possível verificar o maior sobrelance do relé, provocado pelo aumento da compensação.

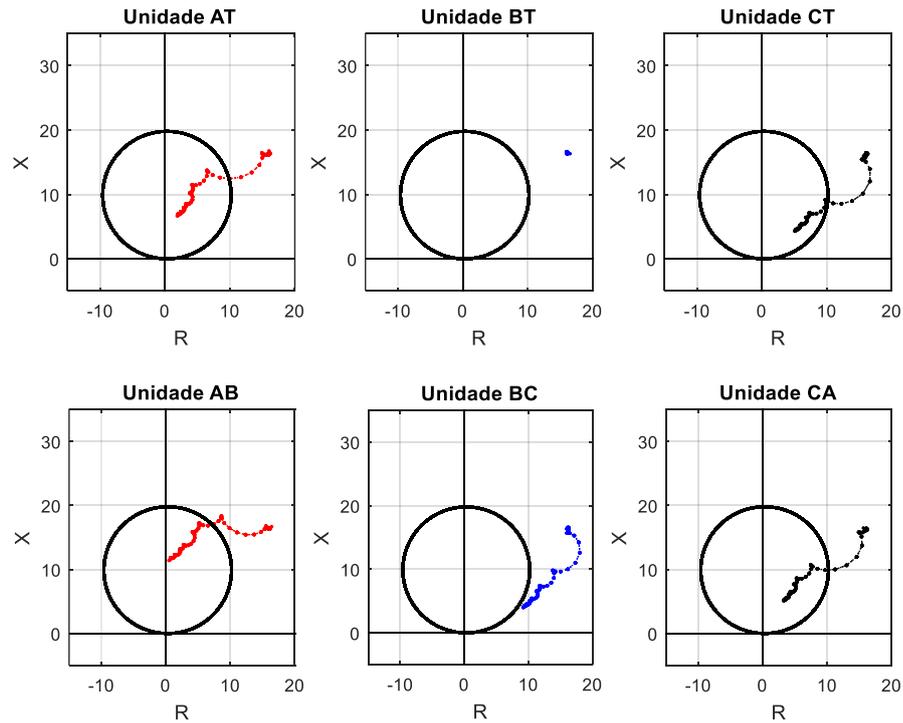


Figura 5.53 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados simulados).

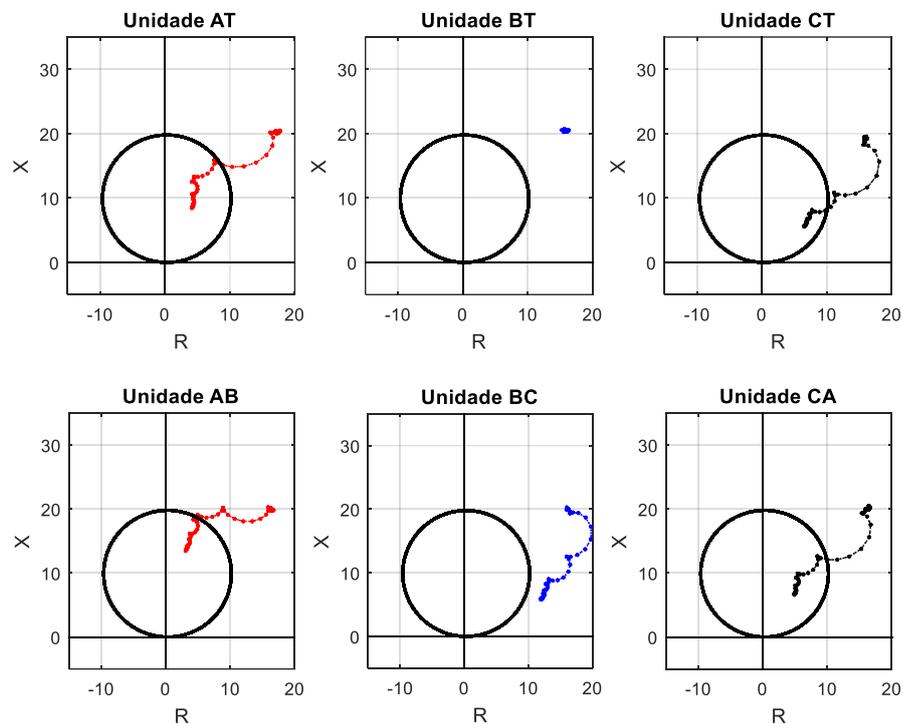


Figura 5.54 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados medidos).

5.3.2.1 Falta CA bypass 2,3 pu

Durante a falta CA com proteção dos capacitores fixada em 2,3 pu há redução corrente de falta e fica clara a limitação da tensão sobre os capacitores. Como mostram a Figura 5.55 e a Figura 5.56 respectivamente.

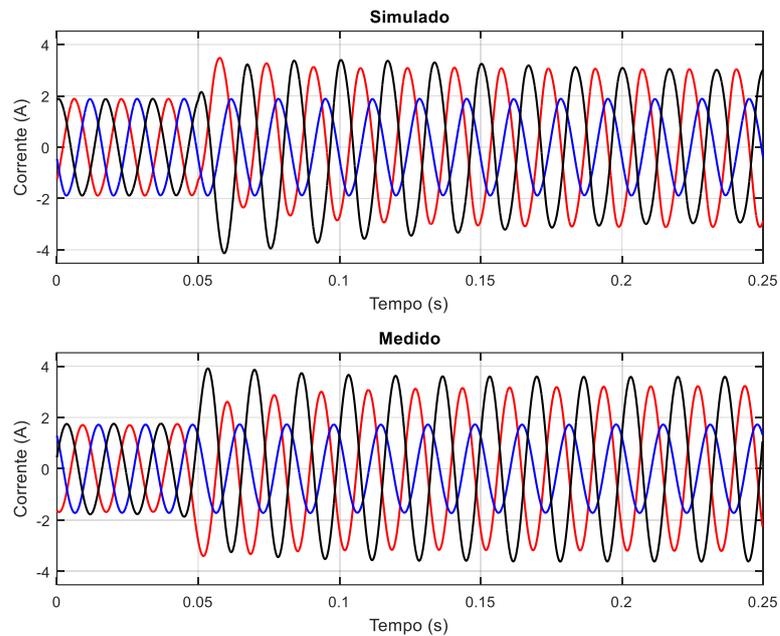


Figura 5.55 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta CA com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados simulados e medidos.

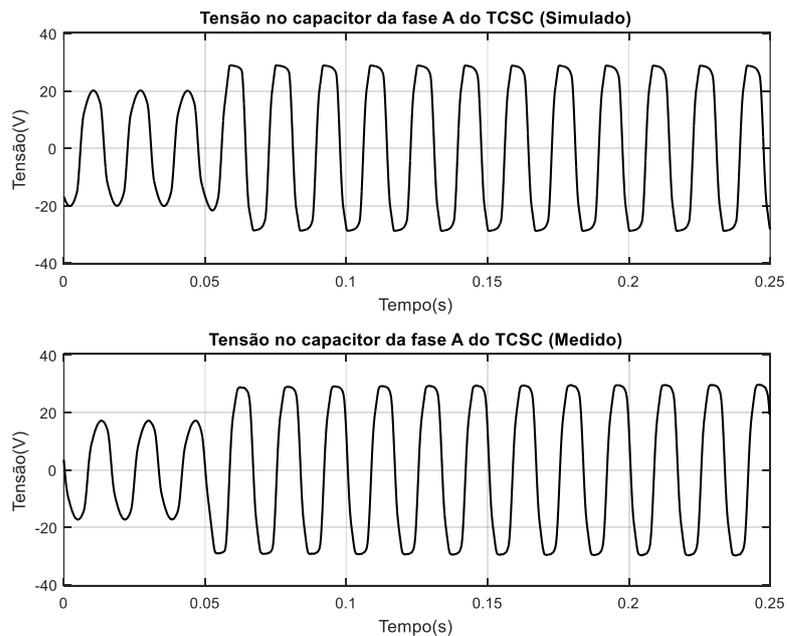


Figura 5.56 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados de simulação e medidos.

Nesta situação o sistema de bypass proporcionou melhora na operação do relé, pois foi possível determinar o tipo da falta como CAT, mesmo não sendo o tipo correto, apenas unidades relacionadas à falta atuaram. Com dados simulados a falta foi localizada em 36,28% e para medição esse valor foi de 36,19%, o que mostra a redução do sobrealcance do relé. A atuação das unidades de proteção pode ser verificada na Figura 5.57 e na Figura 5.58, a seguir, que apresentam a impedância vista por cada unidade durante a falta para dados de simulação e medição respectivamente.

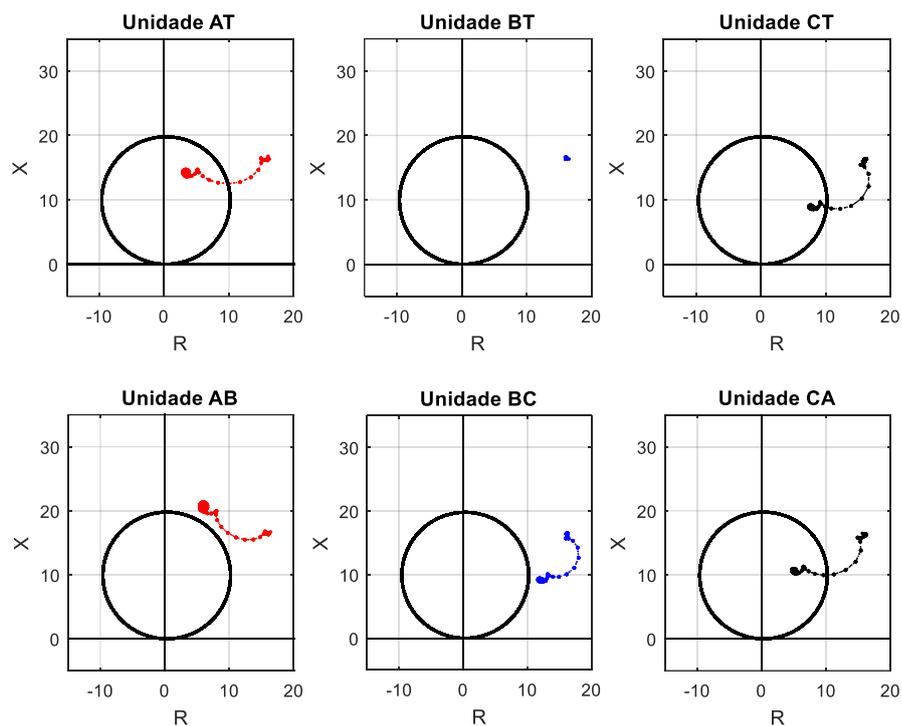


Figura 5.57 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC CA com sistema de bypass dos capacitores fixado 2,3 pu (dados de simulação)

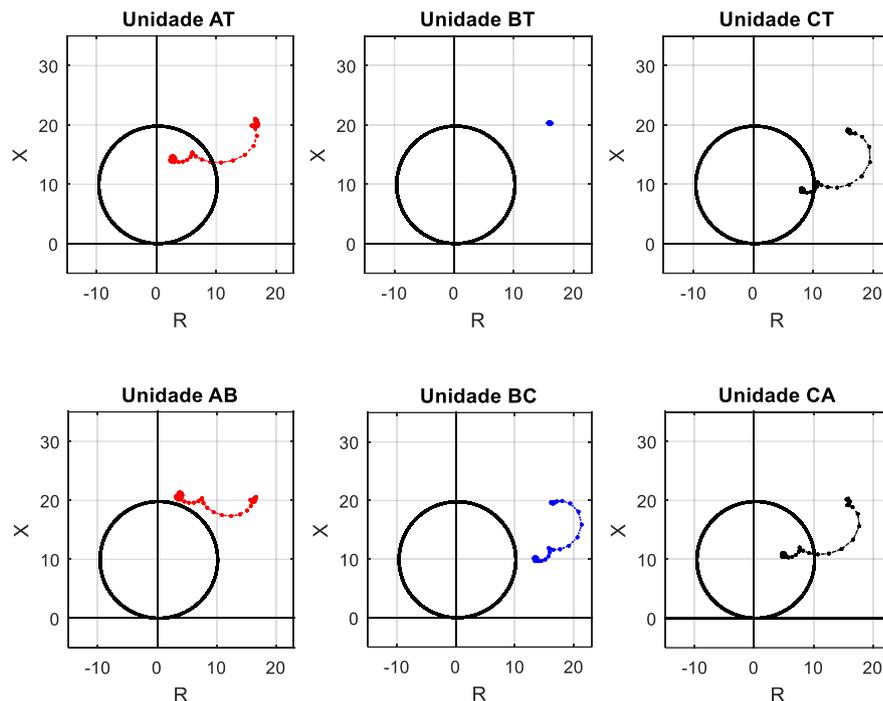


Figura 5.58 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu (dados medidos).

5.3.2.2 Falta CA bypass 3 pu

A elevação do limite de tensão para proteção dos capacitores do TCSC não permitiu que o relé identificasse corretamente o tipo de falta, já que todas as unidades relacionadas as fases A e C atuaram (AT, CT, AB e CA). Também foi verificado níveis mais altos de corrente e tensão nos capacitores devido à menor redução da compensação durante a falta, como mostram a Figura 5.59 e a Figura 5.60 respectivamente.

Quanto localização, conforme esperado, o sobrealcançe do relé aumentou em comparação ao ensaio com menor limite de tensão sobre os capacitores. Na simulação, considerando apenas a unidade CA, a falta foi localizada a 29,92% enquanto o valor para dados medidos foi 32,32%.

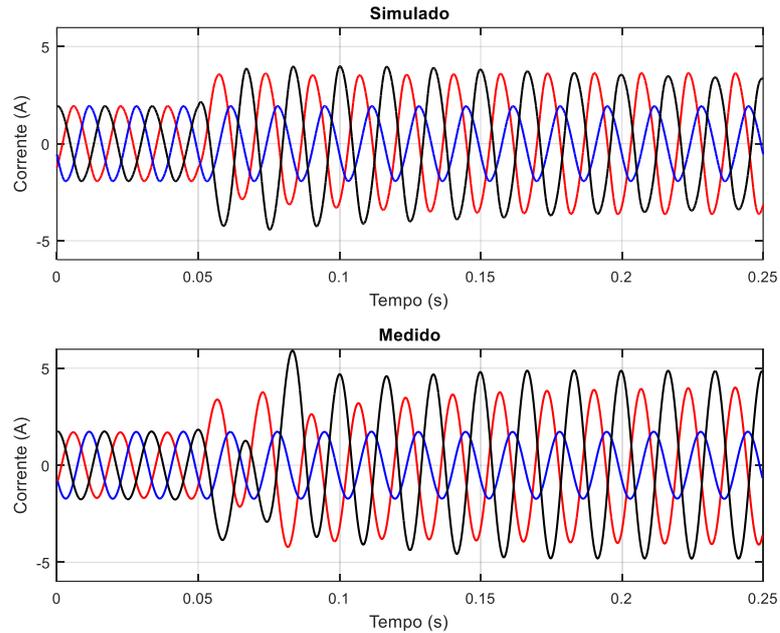


Figura 5.59 – Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta CA com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu. Dados simulados e medidos.

Os diagramas com as impedâncias vistas por cada unidade de proteção do relé para dados simulados e medidos respectivamente estão apresentados na Figura 5.61 e na Figura 5.62, a seguir. É possível constatar a atuação das unidades destacadas acima.

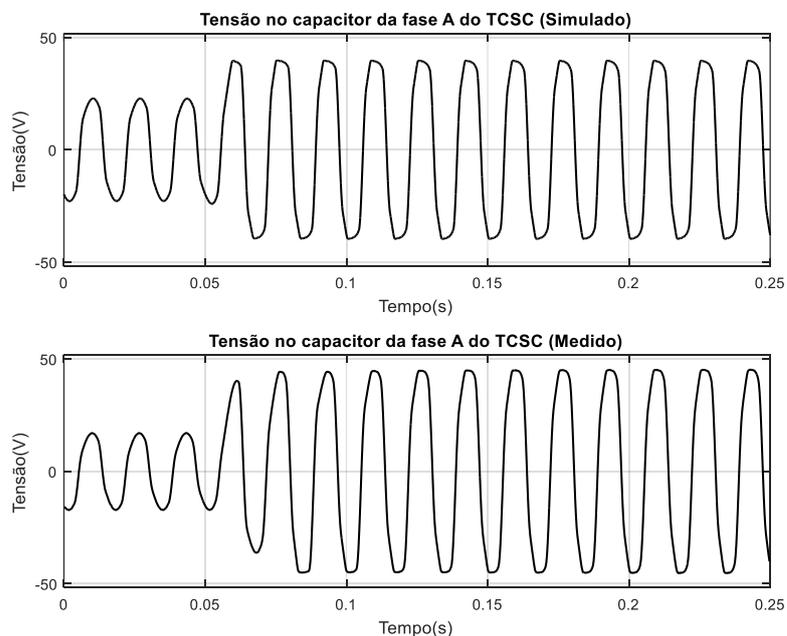


Figura 5.60 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu. Dados de simulação e medidos.

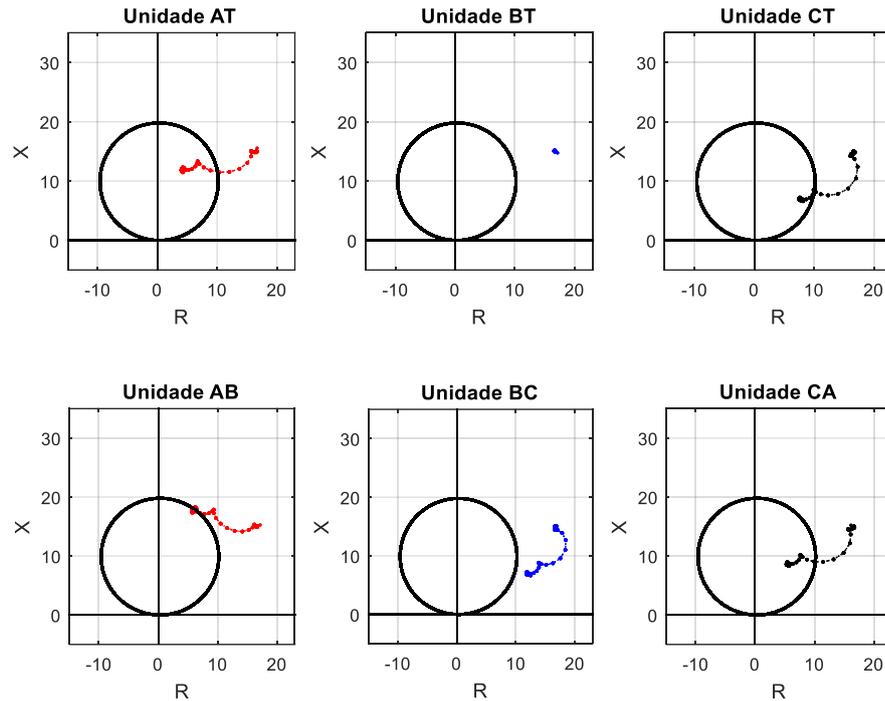


Figura 5.61 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC CA com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados simulados).

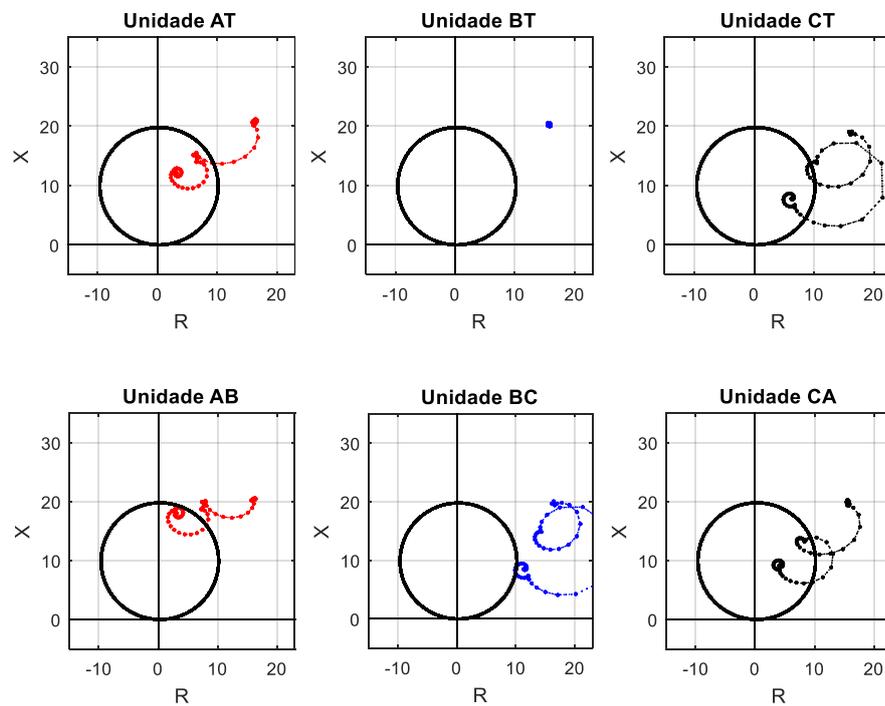


Figura 5.62 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta CA no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC AT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados medidos).

5.3.3 Falta ABCT

Os ensaios realizados com falta ABCT novamente mostram os melhores resultados, pois o relé é sempre capaz de detectar o tipo correto de falta, uma vez que todas as unidades atuam. Na medição, como mostra a Figura 5.63, o sistema de disparo das fases B e C do TCCS perderam momentaneamente o sincronismo durante o transitório da falta. Já a fase A operou normalmente, como também mostra a Figura 5.64, com a forma de onda de tensão no capacitor desta fase durante a falta

Assim como para as outras faltas avaliadas com o mesmo nível de compensação, o relé apresentou grande sobrealcançe na localização da falta. Entretanto este efeito foi um pouco menor para os dados medidos devido à redução da compensação nos primeiros ciclos da falta devido à perda de sincronismo do sistema de disparo. O relé localizou a falta a 17,85% para dados simulados e 23,27% para a medição.

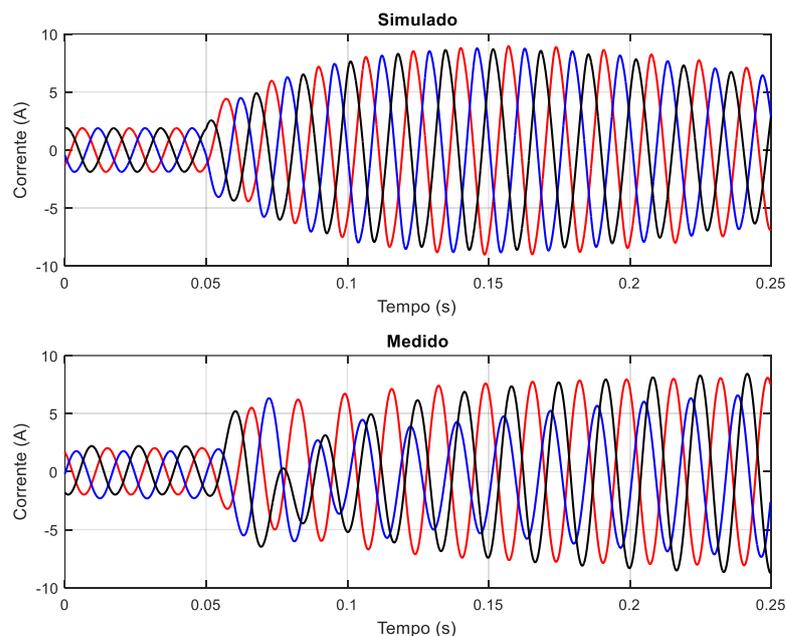


Figura 5.63 – Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta ABCT. Dados simulados e medidos.

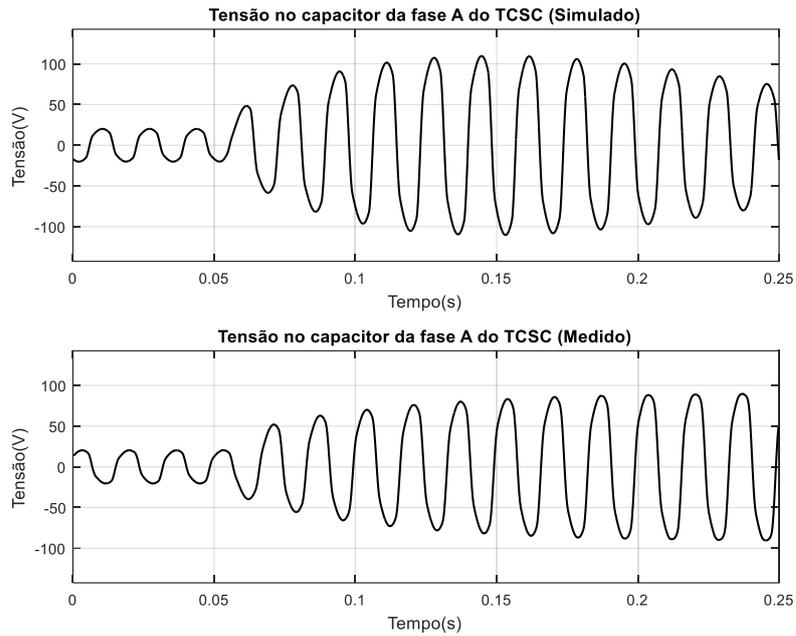


Figura 5.64 - Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta ABCT. Dados de simulação e medidos.

Na Figura 5.65 e na Figura 5.66, a seguir, estão apresentadas as impedâncias vistas por cada unidade de proteção do relé com dados simulados e medidos respectivamente. Na segunda figura verifica-se o efeito das oscilações causadas pela perda de sincronismo do sistema de disparo das fases B e C no momento da ocorrência da falta. Conforme mencionado no capítulo 3, este tipo de fenômeno pode interferir seriamente na capacidade de operação do relé.

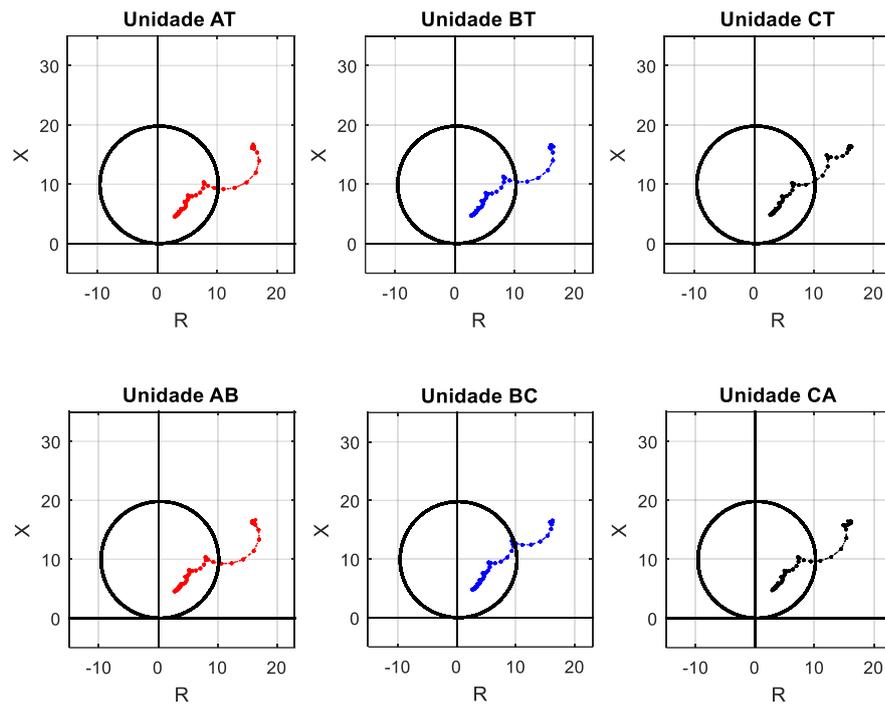


Figura 5.65 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados simulados).

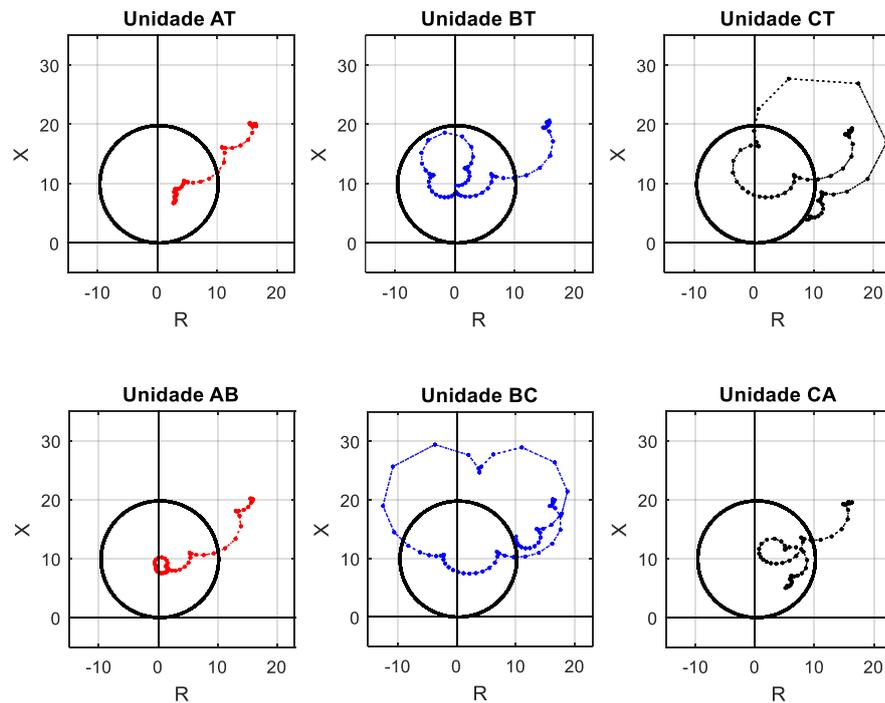


Figura 5.66 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC (dados Medidos).

5.3.3.1 Falta ABCT bypass 2,3 pu

Conforme esperado, a inserção de sistema de proteção para os capacitores reduziu as correntes na linha e a tensão nos terminais dos capacitores durante a falta, como mostrado na Figura 5.67 e na Figura 5.68.

Neste ensaio houve problemas de sincronismo do sistema de disparo apenas da fase C, o que não impediu o relé de detectar a falta corretamente. Este fato causou piora somente na atuação do relé para localização da falta, pois para faltas ABCT o algoritmo do relé utiliza a média das impedâncias vistas por todas as unidades de proteção na determinação da localização. Em consequência da oscilação causada pela perda momentânea de sincronismo, a unidade CT enxergou valores de impedância muito superiores ao do ponto onde ocorreu a falta. Por isso, há maior diferença nas distâncias de localização da falta resultante da análise de dados simulados e medidos, que são respectivamente 38,45% e 47,36%.

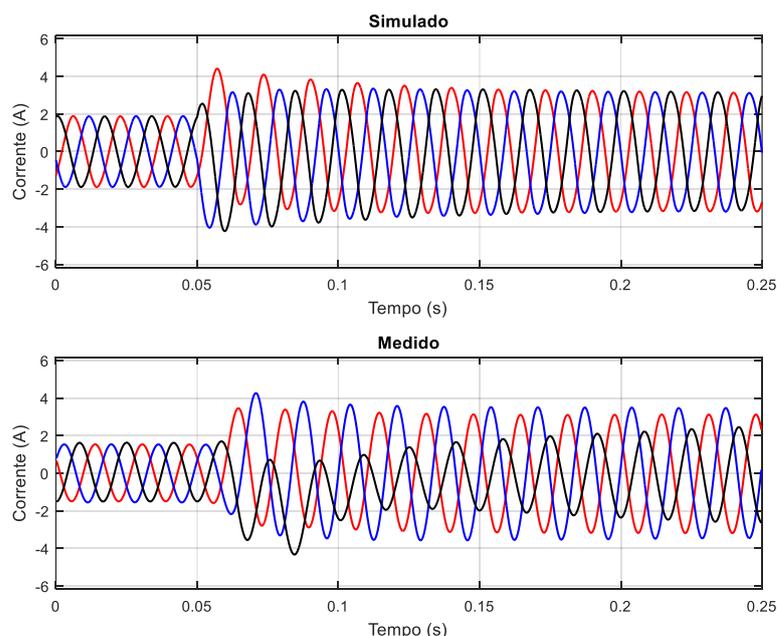


Figura 5.67 – Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados simulados e medidos.

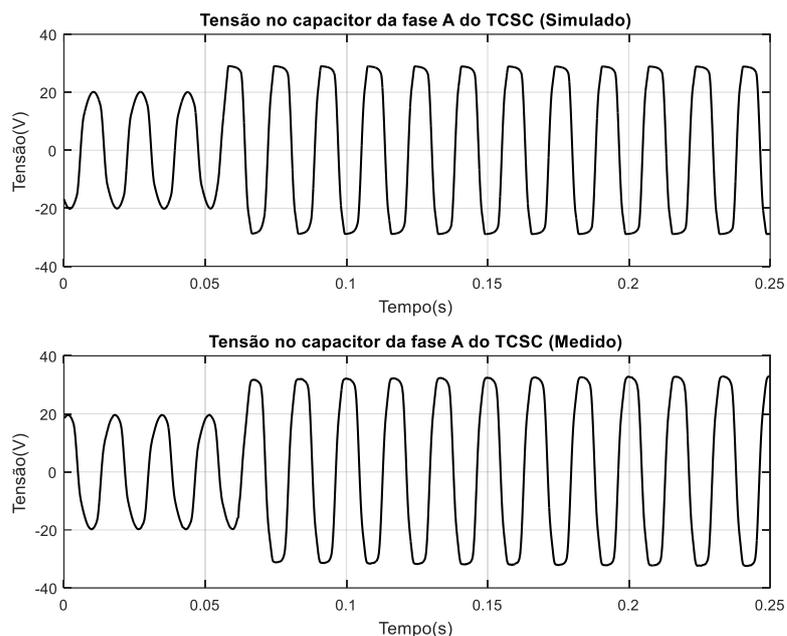


Figura 5.68 – Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu. Dados de simulação e medidos.

A Figura 5.69 e a Figura 5.70, a seguir, apresentam as impedâncias vistas por todas as unidades de proteção do relé durante a falta considerando dados simulados e medidos respectivamente. Na segunda figura é possível verificar a oscilação da impedância nas unidades que envolvem a fase C, com destaque para a unidade CT.

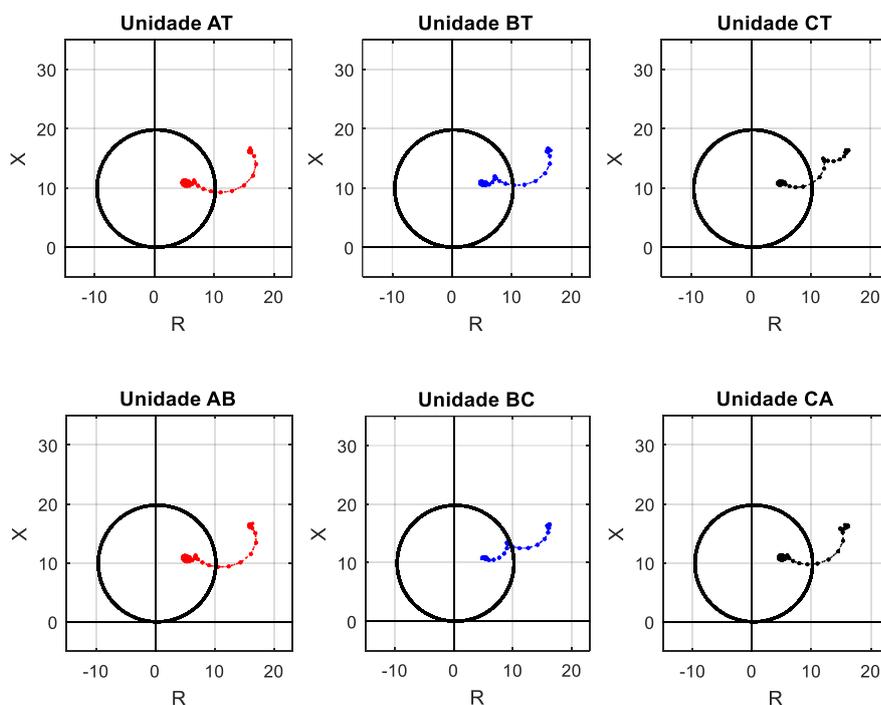


Figura 5.69 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu (dados simulados).

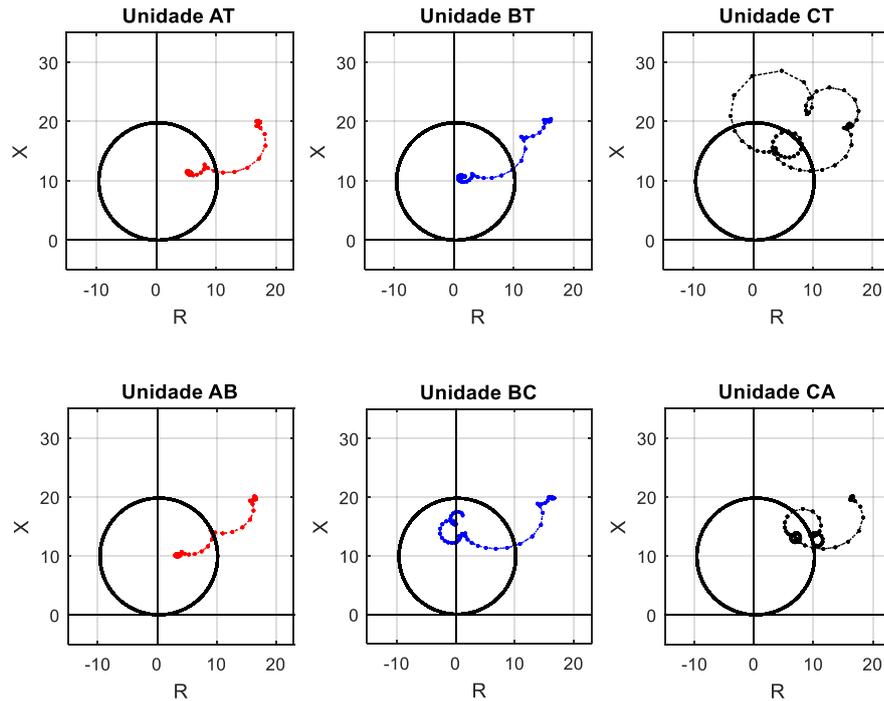


Figura 5.70 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta AT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 2,3 pu (dados medidos).

5.3.3.2 Falta ABCT bypass 3 pu

Em consequência do aumento do limite de tensão sobre os capacitores deste ensaio em relação ao apresentado anteriormente, a redução da corrente da linha e da tensão nos capacitores durante a falta foi menor, como pode ser visto na Figura 5.73 e na Figura 5.74 a seguir.

Neste ensaio, nenhuma das fases perdeu sincronismo do disparo durante a falta, e assim como nos demais casos de falta ABCT o relé foi capaz de detectar e determinar o tipo de falta corretamente. A localização foi calculada em 31,72% com dados da simulação e 27,75% com dados medidos.

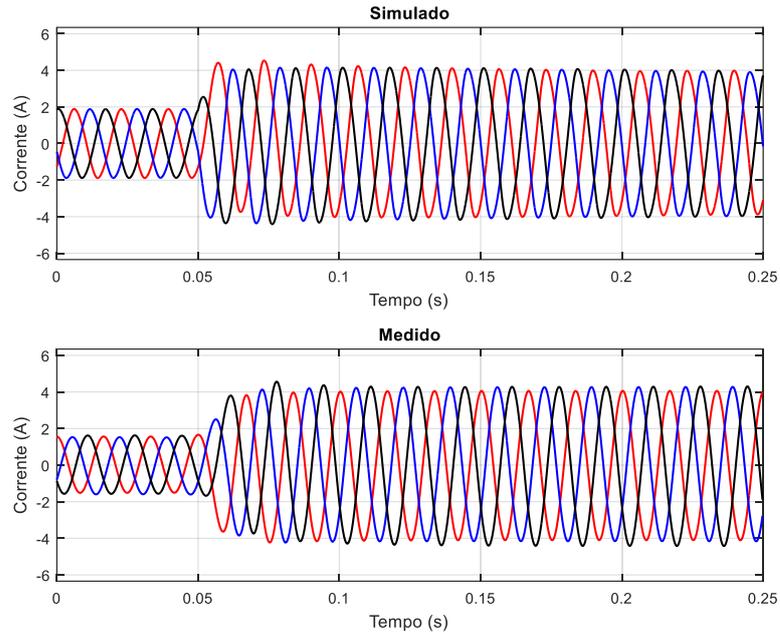


Figura 5.71 - Correntes no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC durante falta ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu. Dados simulados e medidos.

Por meio dos dados mostrados na Figura 5.73 e na Figura 5.74, que apresentam as impedâncias vistas por cada unidade de proteção do relé, verifica-se que o sobrealcançe do relé foi maior do que o observado no ensaio anterior devido ao maior grau de compensação durante a falta.

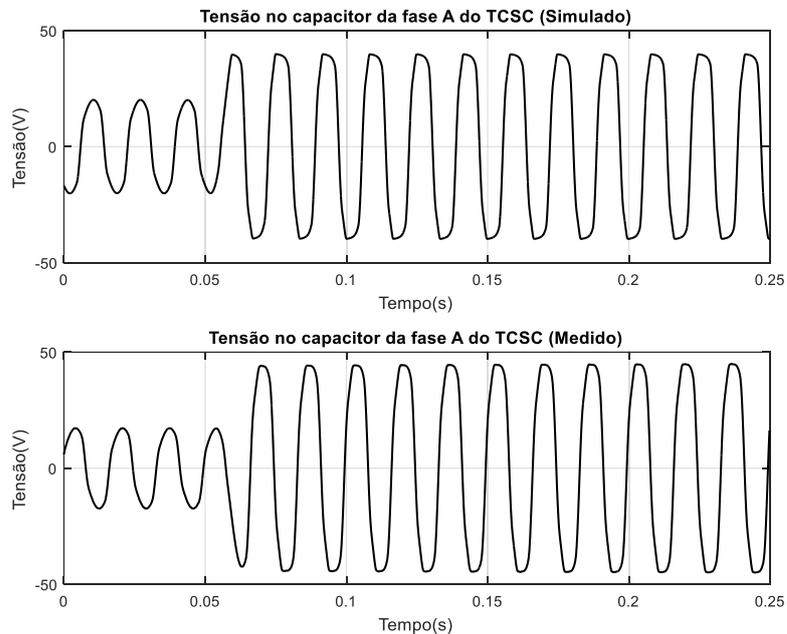


Figura 5.72 – Formas de onda de tensão nos terminais do capacitor da fase a durante falta ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu. Dados de simulação e medidos.

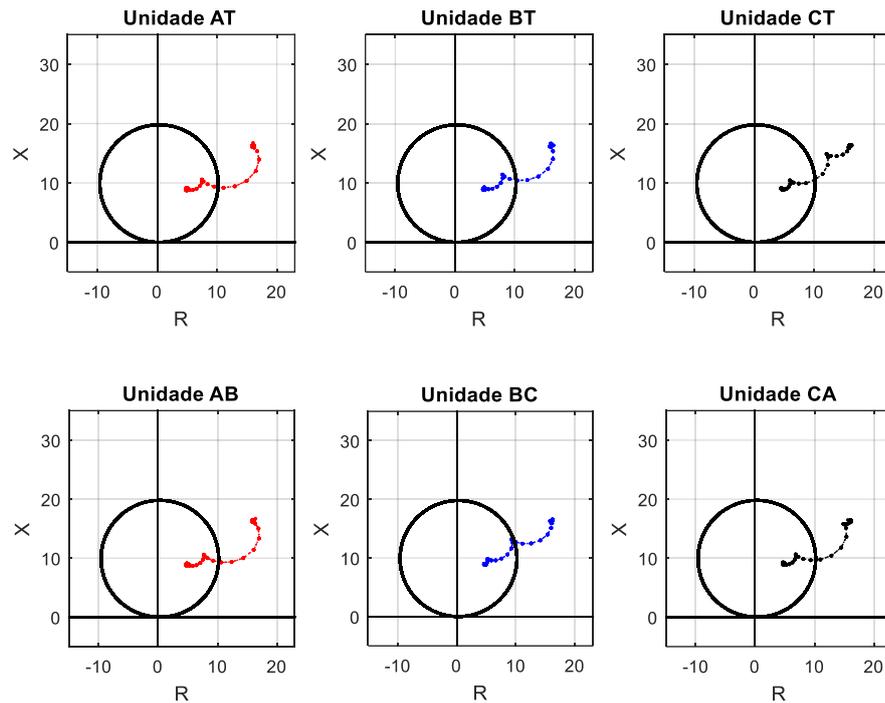


Figura 5.73 – Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados simulados)

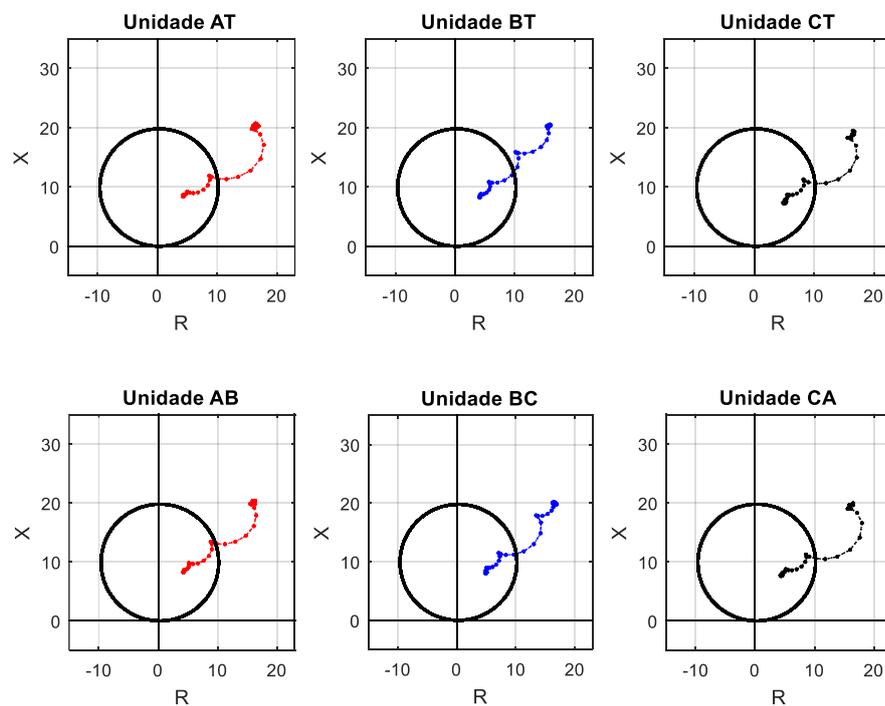


Figura 5.74 - Impedâncias vistas pelo relé de distância durante falta ABCT no sistema compensado em aproximadamente 40% por TCSC ABCT com sistema de bypass dos capacitores fixado em 3 pu (dados medidos).

5.4 Visão Geral dos Resultados

Os resultados apresentados neste capítulo, conforme mostrado na Tabela 5.6, conduzem a conclusão que a abordagem prática utilizada no trabalho permitiu verificar os principais problemas causados pela compensação séria na atuação do relé de distância. O sobrealcançe do relé ocorreu em todas as faltas com compensação, causando erros na localização da falta. Este problema também provocou erros na identificação das faltas, uma vez que, em diversas situações, unidades não envolvidas em faltas atuaram devido ao sobrealcançe.

Tabela 5.6 - Relação dos resultados obtidos: Fonte: Autor.

Compensação	Tipo de falta	SIMULADO		MEDIDO	
		Tipo identificado	Distância indicada pelo relé (%)	Tipo identificado	Distância indicada pelo relé (%)
Sem compensação	AT	AT	66,67	AT	67,21
	CA	CA	66,67	CA	65,91
	ABCT	ABCT	66,67	ABCT	64,26
FIXA – 20%	AT	Falhou	44,33	Falhou	45,95
	CA	Falhou	44,19	Falhou	43,59
	ABCT	ABCT	45,26	ABCT	42,9
FIXA – 20% BYPASS	AT	Falhou	46,36	Falhou	47,44
	CA	CAT	45,2	CAT	44,46
	ABCT	ABCT	46,35	ABCT	44,72
TCSC – 40%	AT	Falhou	17,14	Falhou	20,97
	CA	Falhou	19,29	Falhou	24,12
	ABCT	ABCT	17,85	ABCT	23,27
TCSC – 40% BYPASS 2,3 PU	AT	Falhou	38,4	Falhou	38,63
	CA	CAT	36,28	CAT	36,19
	ABCT	ABCT	38,45	ABCT	47,36
TCSC – 40% BYPASS 3 PU	AT	Falhou	31,59	Falhou	29,11
	CA	Falhou	29,92	Falhou	32,32
	ABCT	ABCT	31,72	ABCT	27,75

Também deve-se destacar o efeito de resistência não linear do sistema de bypass dos capacitores que proporcionou, conforme esperado, a extinção dos transitórios sub-harmônicos durante as faltas, além de provocar redução no sobrealcançe do relé e, com isso, melhora na localização da falta e, em algumas situações, na sua identificação.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

A compensação série apresenta muitas vantagens, como aumento da capacidade de transferência de potência do sistema, melhora na estabilidade, melhor regulação de tensão, dentre outras. No entanto, apesar dos benefícios há também problemas relacionados à essa tecnologia. Dentre os principais destacam-se a ressonância subsíncrona e os impactos na função de proteção de distância, objeto de estudo deste trabalho.

A influência da compensação série no relé de distância depende de diversos fatores, especialmente da localização da compensação em relação ao ponto de instalação do relé, da localização da falta, do grau de compensação, da atuação dos sistemas de proteção contra sobretensão dos capacitores (MOV e centelhadores) e da dinâmica de variação da impedância no caso da compensação controlada.

Neste trabalho, devido as características dos recursos técnicos disponíveis, não foi possível explorar todos os problemas relacionados acima, principalmente porque o sistema estudado é radial. Por exemplo, os problemas relacionados a atuação incorreta das zonas de proteção não puderam ser analisados, assim como os fenômenos de inversão de tensão e inversão de corrente, devido a impossibilidade de aplicar faltas ao longo de toda a linha. Além disso, a impossibilidade de simular faltas severas no sistema construído impediu a representação da situação em que ocorre bypass total dos capacitores, situação na qual seria verificada a inexistência de sobrealcance do relé.

No entanto, foram obtidos bons resultados no trabalho, como:

- A construção do módulo trifásico de TCSC com controle em malha aberta juntamente com o sistema de medição, que apresentaram funcionamento satisfatório.
 - Os diversos cenários de falta analisados permitiram observar a variação do sobrealcance do relé em função do nível de disparo da proteção dos capacitores, mostrando que quanto maior é o bypass, menor é o sobrealcance.
 - Foi possível observar a existência do transitório sub-harmônico, devido a característica de circuito RLC série do sistema em falta. Também verificou-se que o transitório teve durações distintas na simulação e na abordagem prática, principalmente devido à natureza ideal dos elementos utilizados na simulação.
 - Constatou-se a mudança da frequência do transitório sub-harmônico quando houve mudança do grau de compensação e que a presença de sistema de bypass dos capacitores praticamente extingue o transitório durante as faltas.
-

- Os problemas de sincronismo do sistema de disparo causados por algumas faltas mostraram a influência desse tipo de situação no funcionamento do relé. Este tipo de observação só poderia ser realizado em simulações se provocadas propositalmente.

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser citados:

- Adequação do sistema atual com transformadores ou geradores de forma a ter-se uma fonte em cada terminal para investigação dos efeitos relacionados à operação de múltiplas zonas de proteção e também verificar a discriminação da direcionalidade do relé.
 - Seccionar a linha de transmissão em mais partes permitiria simular faltas em mais pontos ao longo da linha. Também seria possível mudar o ponto de instalação da compensação série para investigar a influência da localização desta no sistema de proteção.
 - A utilização de um relé de distância comercial no sistema proposto seria importante para validar os resultados obtidos.
 - Desenvolvimento de um algoritmo de compensação em malha fechada, para analisar os efeitos da dinâmica de controle no relé de distância.
-

Referências Bibliográficas

- ALEXANDER, G. E. et al. Series Compensated Line Protection: Evaluation & Solutions. [S.l.]: GE Power Management, 2002.
- ALTUVE, J.; MOONEY, B.; ALEXANDER, E. Advances in Series-Compensated Line Protection. Schweitzer Engineering Laboratories, 2009.
- ANDERSON, P. M. Power System Protection. [S.l.]: Wiley - IEEE, 1999.
- CARDOSO JR., G.; DUTRA, R. A.; SANTOS, L. F. Soluções de aplicações de sistemas de proteção de distância em linhas com compensação série.. VIII STPC, Julho 2005.
- D'AJUZ, A.; ET AL.. Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão. Rio de Janeiro: Furnas, 1985.
- FONTINI, S. O.; ET AL. Equipamentos de Alta Tensão. Brasília: Goya LTDA, 2013.
- GAMA, C. A. Utilização de Equipamentos com Tecnologia FACTS em Sistemas de Potência. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Dissertação de mestrado, 1995.
- GOLDSWORTHY, L. A Linearized Model for MOV-Protected series capacitor. IEEE Transactions on Power Systems. Vol. PWRS-2, No. 4, Novembro 1987.
- GONÇALVES, D. D. N. Desempenho do Relé de Distância em Linhas de Transmissão Compensadas com TCSC. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado., 2007.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. Understanding FACTS. Nova York: Wiley-IEEE, 2000.
- IEEE COMMITTEE REPORT. EHV Protection Problems. IEEE Trans., PAS-100, Maio 1981. 2399-2406.
- IEEE SUBSYNCHRONOUS RESONANCE WORKING GROUP. Terms, Definitions and symbols for Subsynchronous Oscillations IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, p. 1326-1334, 1985.
- JOHNSON., V. K. Y. A. N. K. Design of TCSC for Classroom and Research. Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE., 20 jun. 2006.
- JUSAN, C. Análise Linear de Oscilações Subsíncronas em Sistemas Elétricos de Potência. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de mestrado., 2007.
- KASZTENNY, B. Distance Protection of Series Compensated Lines – Problems and Solutions. 28º Annual Western Protective Relay Conference. GE Power Management, Outubro 2001.
- M., O. F. J.; MORAES, R. M.; SOLLERO, R. B. Aspectos de discriminação da direcionalidade de proteções de linhas com compensação série. VIII STPC, Julho 2005.
-

MARTTILA, R. J. Performance of Distance Relay Mho Elements on Mov-Protected Series-Compensated Transmission LINES. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7. No. 3. , Julho 1992.

MATELE, M. Enhancing of transmission capability of power corridors by means of series compensation. PowerTech Conference, Outubro 1999.

MATHUR, R. M.; VARMA, R. K. Thyristor-Based Facts Controllers For Electrical Transmission Systems. Kanpur: Wiley, 2002.

MELLO, F. P. D. Dinâmica das Máquinas Elétricas - II, Volume 5. Santa Maria: Eletrobrás/UFSM, 1983.

MILLER, J. et al. Review of Series Compensation for Transmission Lines. Southwest Power Pool, Maio 2014.

MOURA, S.; MOREIRA, A.; SILVA, K. M. Avaliação do Impacto da Compensação Série na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão Usando Estimacão de Fasores. IEEE., 2007.

NOVOSEL, D. et al. Problems and Solutions for Microprocessor Protection of Series Compensated, Developments in Power System Protection. IEE Conference Publication N° 434, Março 1997.

NYATI, S. et al. EFFECTIVENESS OF THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPACITOR IN ENHANCING POWER SYSTEM DYNAMICS AN ANALOG SIMULATOR STUDY. IEEE Transmission and Distribution Committee, Vancouver, 22 Julho 1993.

OLIVEIRA, L. P. D. Avaliação do Comportamento da Proteção de Distância em Linhas de Transmissão com Compensação Série Fixa Através da Simulação Digital em Tempo Real. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá. Dissertação de mestrado, 2007.

ORDACGI, F.; MORAES , J. M.; SOLLERO, R. B. Aspectos da Discriminação da Direcionalidade de Proteções de Linhas com Compensação Série. VIII STPC, Julho 2005.

PADIYAR, K. R. Analysis of Subsynchronous Resonance in Power Systems. Bangalore: LLC, 1999.

PADIYAR, K. R. FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution. New Delhi: New Age International Ltd., 2007.

PAIXÃO, L. D. A compensação série chaveada como solução para o problema do colapso transitório de tensão na interligação norte-nordeste. Brasília: Universidade de Brasília. Dissertação de mestrado, 2006.

PAIXÃO, R. L. D. A Compensação Série Chaveada como Solução para o Problema do Colapso Transitório de Tensão na Interligação Norte-Nordeste. Brasília.: Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília., 2006.

PALANICHAMY, C.; BABU, N. S. A Visual Package for Educating Preparatory Transmission Line Series Compensation. IEEE Transactions on Education, Vol. 48, Nº 1, Fevereiro 2005.

PATEL, N. Hardware Implementation and Simulation of Single Phase TCSC at Laboratory Scale Level. 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), Chennai, 2 Agosto 2017.

RUIZ, J. L. PERFORMANCE COMPARISON OF A PERMISSIVE OVERREACH TRANSFER TRIP (POTT) SCHEME OVER IEC 61850 AND HARD-WIRE. Dissertação de mestrado. ed. Chattanooga: [s.n.], 2012.

SACHDEV, M. S.; BARIBEAU, M. A. A NEW ALGORITHM FOR DIGITAL IMPEDANCE RELAYS. IEEE PES Winter Meeting, Nova York, 8 Fevereiro 1979.

SAIA, N. K. The Importance of Site Selection for Series Compensation. 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, Abril 2005. 201-210.

SANTOS, L. F. D. Avaliação de Algoritmos Numéricos de Proteção Para Linhas com Compensação Série. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá. Dissertação de mestrado., 2006.

SHOUYUAN, W.; XIAOXIN, Z.; YAJIAN, L. Design and Simulation on TCSC Analog Model And Controller. POWERCON '98. 1998 International Conference on Power System Technology. Beijing, 06 Agosto 1998.

SIDHU, T. S.; KHEDERZADEH, M. Series Compensated Line Protection Enhancement by Modified Pilot Relaying Schemes. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, Londres, 3 Julho 2006.

SOUILLARD, M. Protection of EHV Long Distance Transmission Lines-Distance Measurement and Directional Functions; Special Case of Series Condenser Compensated Lines. CIGRE paper 34-09, 1978.

SOUZA, J. R. M. S.; TUMA, R. Proteção de linhas de transmissão com compensação série. Disponível em: <https://www.osestoreletrico.com.br/protacao-de-linhas-de-transmissao-com-compensacao-serie>. Acesso: 05/11/2017., 2009.

TENÓRIO, A. R. M. Comparação entre o TCSC e o Capacitor Série Convencional: O Problema da Ressonância Subsíncrona. Eletroevolução, p. 48-53, 1998.

TENÓRIO, A. R. M. Resolvendo Problemas de Ressonância Subsíncrona através do TCSC e do Dispositivo NGH – Análise de Estratégias de Controle. Foz do Iguaçu: XV SNTPEE, 1999.

TENÓRIO, A. R. M.; JENKINS, N. Investigation of the TCSC as a Fault Current Limiter. International Conference on Power Systems Transients, Seattle, Junho 1997.

WEIGUO, W. et al. The Impact of TCSC on Distance Protection Relay. IEEE International Conference on Power System Technology, Vol 1., Agosto 1998. 382-388.

Anexo 1 – Principais características da placa de aquisição de dados PCI-6221

1) Entradas analógicas

Número de canais	8 diferenciais ou 16 de terminal único
Resolução do conversor AD	16 Bits
Frequência de amostragem	
<ul style="list-style-type: none"> Máxima para 1 canal Multicanal (agregado) 	250 kS/s 250 kS/s
Tensões de entrada	$\pm 0,2 \text{ V} / \pm 1 \text{ V} / \pm 5 \text{ V} / \pm 10 \text{ V}$
Impedância de entrada	
<ul style="list-style-type: none"> Dispositivo em funcionamento Dispositivo desligado 	$>10 \text{ G}\Omega$ em paralelo com 100 pF 820Ω
Corrente de bias de entrada	$\pm 100 \text{ pA}$
Proteção de sobretensão para todos as entradas analógicas	
<ul style="list-style-type: none"> Dispositivo em funcionamento Dispositivo desligado 	$\pm 25 \text{ V}$ para até dois pinos de AI $\pm 15 \text{ V}$ para até dois pinos de AI
Corrente de entrada durante sobretensão	$\pm 20 \text{ mA}$ máximos por pino de AI
Saídas analógicas	2

2) Entradas e saídas digitais

Número de canais	2
Configuração como entrada ou saída	Cada pino tem configuração individual
Resistor de pull-down	Típico 50 k Ω , mínimo 20 k Ω
Proteção de entrada contra sobretensão	$\pm 20 \text{ V}$ para até dois pinos
Condições de operação recomendadas	
<ul style="list-style-type: none"> Tensão de nível lógico alto Tensão de nível lógico baixo 	Mínima: 2,2 V Máxima: 5,25 V Mínima: 0 V Máxima: 0,8 V

Anexo 2 – Datasheet sensor de corrente LA55-P/SP1

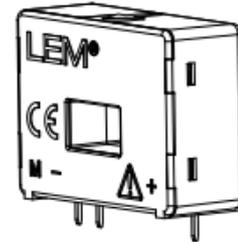
Current Transducer LA 55-P/SP1

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed..., with galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



16024

$I_{PN} = 50 \text{ A}$



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal current rms	50	A			
I_{PM}	Primary current, measuring range	0 .. ± 100	A			
R_M	Measuring resistance	$T_A = 70^\circ\text{C}$				
		$R_{M \min}$	$R_{M \max}$			
		with $\pm 12 \text{ V}$	@ $\pm 50 \text{ A}_{\max}$	0	215	Ω
		@ $\pm 100 \text{ A}_{\max}$	0	35	0	30
with $\pm 15 \text{ V}$	@ $\pm 50 \text{ A}_{\max}$	0	335	30	330	Ω
@ $\pm 100 \text{ A}_{\max}$	0	95	30	90	Ω	
I_{SN}	Secondary nominal current rms	25	mA			
K_N	Conversion ratio	1 : 2000				
V_C	Supply voltage ($\pm 5 \%$)	$\pm 12 \dots 15$	V			
I_C	Current consumption	10 (@ $\pm 15 \text{ V}$) + I_S	mA			

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 15 \text{ V}$ ($\pm 5 \%$)	± 0.65	%	
		@ $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$ ($\pm 5 \%$)	± 0.90	%	
ϵ_L	Linearity error		< 0.15	%	
I_O	Offset current @ $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	Max	mA	
I_{OM}	Magnetic offset current ¹⁾ @ $I_p = 0$ and specified R_{M1} after an overload of $3 \times I_{PN}$		± 0.15	mA	
I_{OT}	Temperature variation of I_O	- $25^\circ\text{C} \dots + 85^\circ\text{C}$	± 0.05	± 0.30	mA
		- $40^\circ\text{C} \dots - 25^\circ\text{C}$	± 0.10	± 0.50	mA
t_{ra}	Reaction time to 10 % of I_{PN} step		< 500	ns	
t_r	Response time ²⁾ to 90 % of I_{PN} step		< 1	μs	
di/dt	di/dt accurately followed		> 200	A/ μs	
BW	Frequency bandwidth (- 1 dB)		DC .. 200	kHz	

General data

T_A	Ambient operating temperature	- 40 .. + 85	$^\circ\text{C}$	
T_S	Ambient storage temperature	- 40 .. + 90	$^\circ\text{C}$	
R_S	Secondary coil resistance	@ $T_A = 70^\circ\text{C}$	145	Ω
		@ $T_A = 85^\circ\text{C}$	150	Ω
m	Mass	18	g	
	Standards	EN 50178: 1997		

Notes: ¹⁾ Result of the coercive field of the magnetic circuit

²⁾ With a di/dt of 100 A/ μs .

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Printed circuit board mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Special features

- $I_{PM} = 0 \dots \pm 100 \text{ A}$
- $K_N = 1 : 2000$.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.

Isolation characteristics

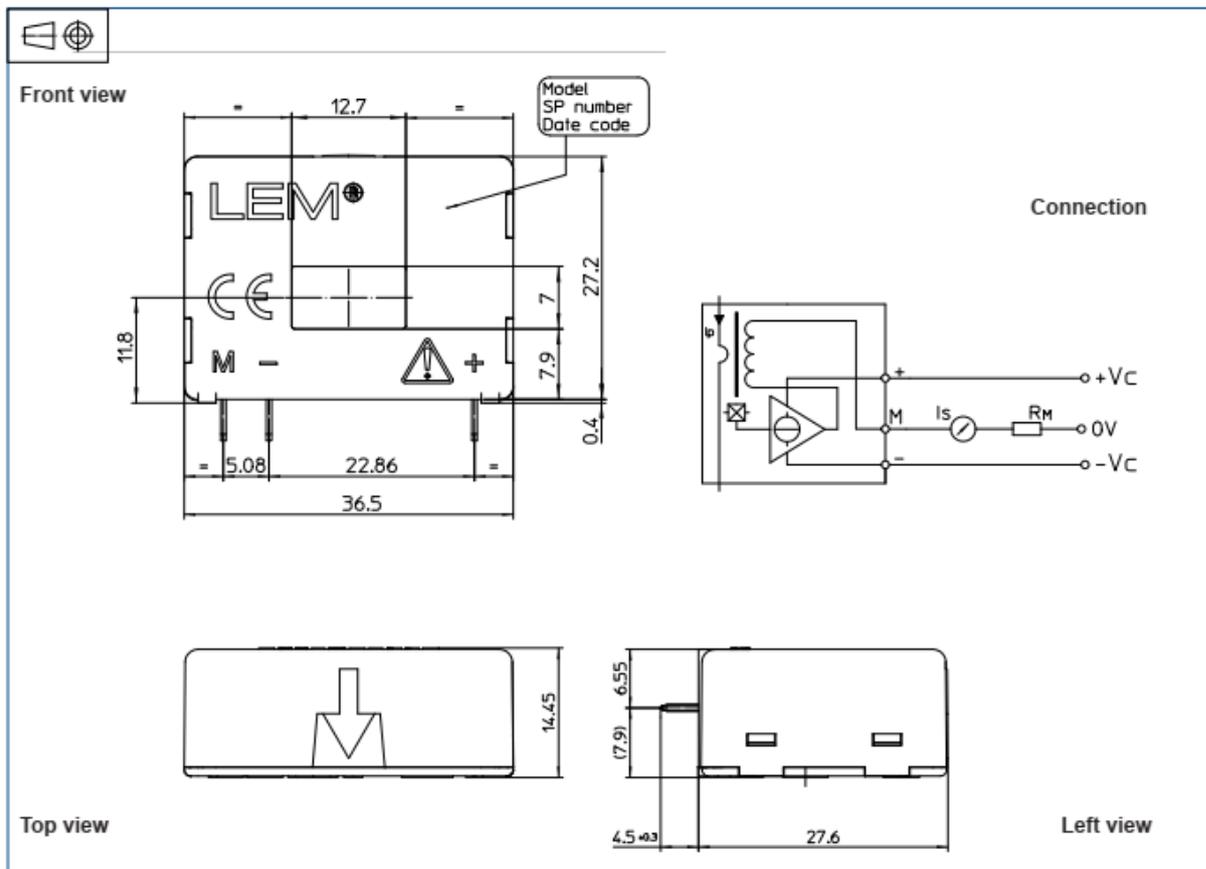
V_d	Rms voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 min	2.5	kV
\hat{V}_w	Impulse withstand voltage 1.2/50 μ s	4.5	kV
		Min	
dCp	Creepage distance	3.8	mm
dCI	Clearance distance	3.8	mm
CTI	Comparative Tracking Index (group IIIa)	175	

Applications examples

According to EN 50178 and IEC 61010-1 standards and following conditions:

- Over voltage category OV 3
- Pollution degree PD2
- Non-uniform field

	EN 50178	IEC 61010-1
dCp, dCI, \hat{V}_w	Rated isolation voltage	Nominal voltage
Single isolation	300 V	300 V
Reinforced isolation	150 V	150 V



Anexo 3 – Especificações TRIAC BTA06-600B

Absolute Maximum Ratings ($T_J = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Condition	Ratings	Units
V_{DRM}	Repetitive Peak Off-State Voltage		600	V
$I_{\text{T(RMS)}}$	R.M.S On-State Current	$T_C = 89^\circ\text{C}$	8.0	A
I_{TSM}	Surge On-State Current	One Cycle, 50Hz/60Hz, Peak, Non-Repetitive	80/88	A
I_t^2	I_t^2		32	A^2s
P_{GM}	Peak Gate Power Dissipation		5.0	W
$P_{\text{G(AV)}}$	Average Gate Power Dissipation		0.5	W
I_{GM}	Peak Gate Current		2.0	A
V_{GM}	Peak Gate Voltage		10	V
V_{ISO}	Isolation Breakdown Voltage(R.M.S.)	A.C. 1 minute	1500	V
T_J	Operating Junction Temperature		- 40 ~ 125	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature		- 40 ~ 150	$^\circ\text{C}$
	Mass		2.0	g

Electrical Characteristics

Symbol	Items		Conditions	Ratings			Unit
				Min.	Typ.	Max.	
I_{DRM}	Repetitive Peak Off-State Current		$V_D = V_{\text{DRM}}$, Single Phase, Half Wave $T_J = 125^\circ\text{C}$	—	—	2.0	mA
V_{TM}	Peak On-State Voltage		$I_T = 12\text{ A}$, Inst. Measurement	—	—	1.4	V
I_{GT1}^+	I	Gate Trigger Current	$V_D = 6\text{ V}$, $R_L = 10\ \Omega$	—	—	30	mA
I_{GT1}^-	II			—	—	30	
I_{GT3}^-	III			—	—	30	
V_{GT1}^+	I	Gate Trigger Voltage	$V_D = 6\text{ V}$, $R_L = 10\ \Omega$	—	—	1.5	V
V_{GT1}	II			—	—	1.5	
V_{GT3}	III			—	—	1.5	
V_{GD}	Non-Trigger Gate Voltage		$T_J = 125^\circ\text{C}$, $V_D = 1/2 V_{\text{DRM}}$	0.2	—	—	V
(dv/dt) _c	Critical Rate of Rise Off-State Voltage at Commutation		$T_J = 125^\circ\text{C}$, $[di/dt]_c = -4.0\text{ A/ms}$, $V_D = 2/3 V_{\text{DRM}}$	10	—	—	$\text{V}/\mu\text{s}$
I_{H}	Holding Current			—	15	—	mA
$R_{\text{th(j-c)}}$	Thermal Impedance		Junction to case	—	—	3.7	$^\circ\text{C/W}$

Anexo 4 – Principais características do microcontrolador PIC18F4550

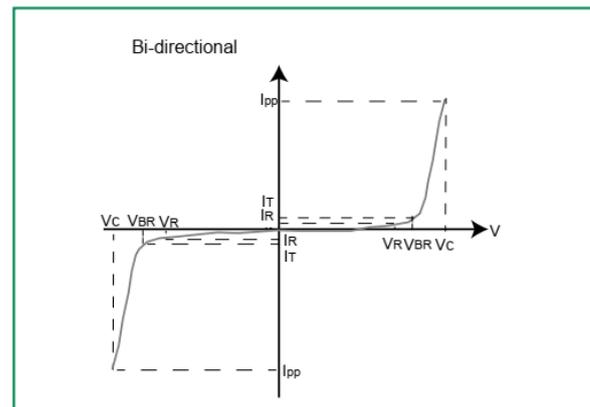
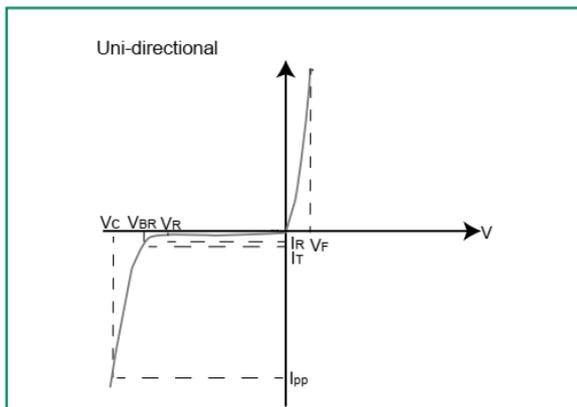
Tipo da memória de programa	Flash
Tamanho da memória de programa	32 kB
Velocidade da CPU (MIPS/DMIPS)	12
Memória SRAM	2048 Bytes
Memória EEPROM	256 Bytes
Periféricos de comunicação digital	1-UART 1-SPI 1-I2C 1-MSSP(SPI/I2C)
Pinos de interrupção externa	3
Periféricos de Captura/comparação/PWM	1 CCP, 1 ECCP
Timers	1 x 8 bits 3 x 16 bits
Conversor AD de entrada	13 canais de 10 bits
Número de comparadores	2
Faixa de tensões	2 até 5,5 V
Pinos I/O	Até 35
Quantidade de pinos	40 (DIP/TQFP)

Anexo 5 – Características dos diodos supressores de surto

Série 5KP

Part Number (Bi)	Reverse Stand off Voltage V_R (Volts)	Breakdown Voltage V_{BR} (Volts) @ I_T		Test Current I_T (mA)	Maximum Clamping Voltage V_C @ I_{PP} (V)	Maximum Peak Pulse Current I_{PP} (A)	Maximum Reverse Leakage I_R @ V_R (μ A)	Agency Recognition
		MIN	MAX					
5KP33CA	33.0	36.70	40.60	5	53.3	95.7	2	X

I-V Curve Characteristics



P_{PPM} Peak Pulse Power Dissipation – Max power dissipation

V_R Stand-off Voltage – Maximum voltage that can be applied to the TVS without operation

V_{BR} Breakdown Voltage – Maximum voltage that flows through the TVS at a specified test current (I_T)

V_C Clamping Voltage – Peak voltage measured across the TVS at a specified I_{ppm} (peak impulse current)

I_R Reverse Leakage Current – Current measured at V_R

V_F Forward Voltage Drop for Uni-directional

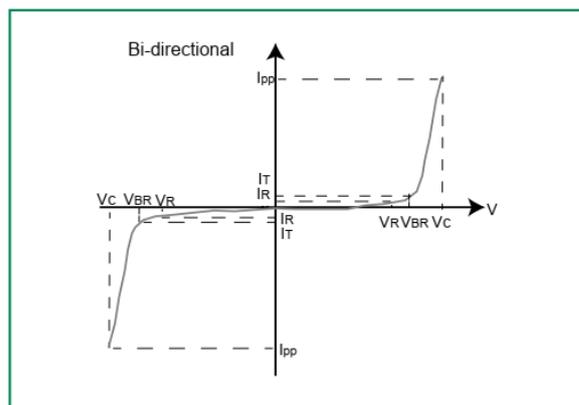
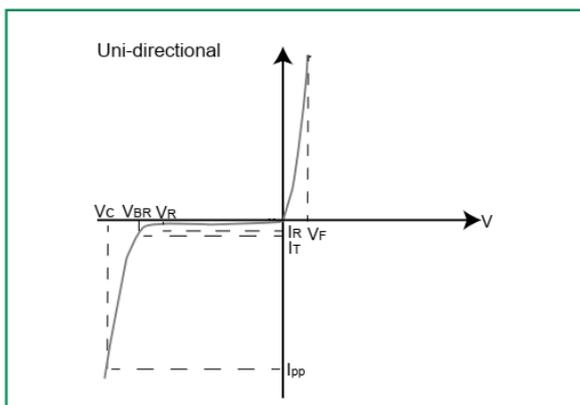
Maximum Ratings and Thermal Characteristics ($T_A=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Peak Pulse Power Dissipation by 10/1000 μ s Test Waveform (Fig.2) (Note 1)	P_{PPM}	5	kW
Steady State Power Dissipation on Infinite Heat Sink at $T_L=75^\circ\text{C}$	P_D	8.0	W
Peak Forward Surge Current, 8.3ms Single Half Sine Wave Unidirectional Only (Note 2)	I_{FSM}	400	A
Maximum Instantaneous Forward Voltage at 100A for Unidirectional Only (Note 3)	V_F	3.5/5.0	V
Operating Junction and Storage Temperature Range	$T_{J'}, T_{STG}$	-55 to 175	$^\circ\text{C}$
Typical Thermal Resistance Junction to Lead	$R_{\theta JL}$	8.0	$^\circ\text{C/W}$
Typical Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	40	$^\circ\text{C/W}$

Série 1.5KE

Part Number (Bi)	Reverse Stand off Voltage V_R (Volts)	Breakdown Voltage V_{BR} (Volts) @ I_T		Test Current I_T (mA)	Maximum Clamping Voltage V_C @ I_{PP} (Volts)	Maximum Peak Pulse Current I_{PP} (A)	Maximum Reverse Leakage I_R @ V_R (μ A)	Agency Approval 
		MIN	MAX					
1.5KE15CA	12.80	14.30	15.80	1	21.2	71.7	1	X
1.5KE24CA	20.50	22.80	25.20	1	33.2	45.8	1	X

I-V Curve Characteristics



P_{PPM} Peak Pulse Power Dissipation – Max power dissipation

V_R Stand-off Voltage – Maximum voltage that can be applied to the TVS without operation

V_{BR} Breakdown Voltage – Maximum voltage that flows through the TVS at a specified test current (I_T)

V_C Clamping Voltage – Peak voltage measured across the TVS at a specified I_{PPM} (peak impulse current)

I_R Reverse Leakage Current – Current measured at V_R

V_F Forward Voltage Drop for Uni-directional

Maximum Ratings and Thermal Characteristics ($T_A=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Peak Pulse Power Dissipation by 10/1000 μ s Test Waveform (Fig.2) (Note 1), (Note 4)	P_{PPM}	1500	W
Steady State Power Dissipation on Infinite Heat Sink at $T_L=75^\circ\text{C}$	P_D	6.5	W
Peak Forward Surge Current, 8.3ms Single Half Sine Wave Unidirectional Only (Note 2)	I_{FSM}	200	A
Maximum Instantaneous Forward Voltage at 100A for Unidirectional Only (Note 3)	V_F	3.5/5.0	V
Operating Junction and Storage Temperature Range	T_J, T_{STG}	-55 to 175	$^\circ\text{C}$
Typical Thermal Resistance Junction to Lead	$R_{\theta JL}$	15	$^\circ\text{C/W}$
Typical Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	75	$^\circ\text{C/W}$