



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THALITA FAHEINA CHAVES

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO FASORIAL PARA USO NA
PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

MOSSORÓ

2019

THALITA FAHEINA CHAVES

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO FASORIAL PARA USO NA
PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Dissertação apresentada ao Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Orientadora: Alana Kelly Xavier Santos,
Profa. Dra.

MOSSORÓ

2019

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C512a Chaves, Thalita Faheina.
Avaliação de métodos de estimação fasorial para uso na proteção de distância em linhas com compensação série / Thalita Faheina Chaves. - 2019.
117 f. : il.

Orientadora: Alana Kelly Xavier Santos.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

1. Linhas de transmissão. 2. Métodos de estimação fasorial. 3. Compensação série. 4. ATP. 5. MATLAB®. I. Santos, Alana Kelly Xavier, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

THALITA FAHEINA CHAVES

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO FASORIAL PARA USO NA
PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA EM LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Dissertação apresentada ao Mestrado em
Engenharia Elétrica do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal Rural do Semi-
Árido como requisito para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

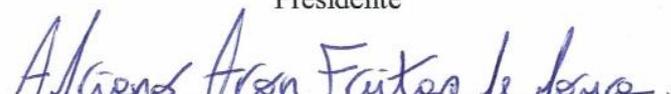
Linha de Pesquisa: Sistemas Elétricos

Defendida em: 22 / 02 / 2019.

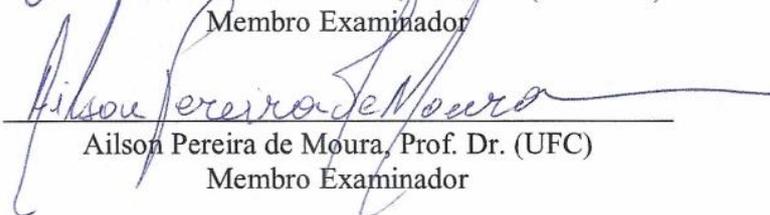
BANCA EXAMINADORA



Alana Kelly Xavier Santos, Profa. Dra. (UFERSA)
Presidente



Adriano Aron Freitas de Moura, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Ailson Pereira de Moura, Prof. Dr. (UFC)
Membro Examinador

As minhas avós Lili e Santa (*in memoriam*), por todo carinho, amor e amizade que me deram durante os anos que estavam presentes.

Aos meus pais, Jacqueline e Iran.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por me iluminar e dar forças nos momentos difíceis.

A Alana Kelly Xavier Santos, pela orientação, pelos conhecimentos compartilhados e, principalmente, pela paciência. Por ter confiado em mim e por ter dedicado tanto tempo a mim. Por exigir muito mais do que eu pensava ser capaz de fazer e por ter me dado todas as ferramentas para que eu buscasse o conhecimento e construísse este trabalho.

A minha mãe, Jacqueline Faheina, e ao meu pai, Iran Chaves, pelo carinho e amor incondicional! Amo vocês!

A meu irmão e minha cunhada, Thiago Faheina e Diana Sousa, pelo apoio, conselhos e torcida. Vocês são minha inspiração!

Ao meu namorado, Rhaony Holanda, por toda paciência, compreensão, carinho e amor, por ter compartilhado minhas alegrias e conquista, e também minhas tristezas e desesperos, principalmente nos últimos meses. Obrigada pelo apoio de sempre.

A Raíssa Alencar, Sérgio Gomes e Luana Saraiva, por estarem sempre comigo, hoje mais do que nunca. Vocês são os melhores amigos que alguém poderia ter.

A Rony Nicodemos e Arthur Vieira, os melhores presentes que Mossoró me deu. Obrigada por tudo, de verdade.

A Samanta Holanda, Luann Georgy, Amanda Fernandes e Ana Luiza Figueiredo, que compartilharam as alegrias e os desesperos, as saídas e os estudos, e fizeram a vida no CITED bem mais fácil, leve e divertida.

A todos os familiares e amigos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

“São as nossas escolhas que revelam o que realmente somos, muito mais do que as nossas qualidades.”

(Albus Dumbledore)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar métodos de estimação fasorial aplicados em linhas de transmissão com compensação série, utilizados em relés numéricos para proteção de distância em linhas de transmissão. Foram feitas comparações entre cinco algoritmos de estimação de fasores: método Fourier de Um Ciclo (FDFT), Cosseno Modificado, Mímico com Fourier de Um Ciclo, algoritmo de Guo e o algoritmo desenvolvido por CAMPOS (2016). Na primeira parte do trabalho, foram gerados sinais analíticos contendo componentes de frequência não fundamentais, utilizando o *software MATrix LABoratory* (MATLAB®). Os métodos foram avaliados usando índices de desempenho. Para um dos sinais, contendo componentes sub-harmônicas e DC de decaimento exponencial, o método de Campos apresentou melhor resultado, com menores valores em 78% dos casos para o índice que quantifica a oscilação da resposta no tempo e em 100% dos casos para o índice que quantifica o percentual de *overshoot*, enquanto o método FDFT foi o que teve o pior resultado e se mostrou mais susceptível às frequências sub-harmônicas. Já em relação ao índice que quantifica a velocidade de convergência na estimação fasorial, a combinação do filtro mímico com o método de Fourier de um ciclo apresentou menores valores de médias. Em seguida, foi criado um banco de dados, obtido através da modelagem de uma linha de transmissão com compensação série e simulação de faltas via *software Alternative Transients Program* (ATP). Foram variadas a localização dos bancos de capacitores série, o grau de compensação, localização, ângulo de incidência e tipo de falta, totalizando 288 casos. Os resultados obtidos no ATP foram usados como sinais de entrada para o MATLAB®, onde foi modelado o relé de distância tipo MHO autopolarizado e onde os algoritmos de estimação de fasores extraíram as componentes fundamentais de tensão e corrente. Na análise dos resultados, o desempenho dos algoritmos foi comparado através da trajetória da impedância aparente, do número de ciclos requeridos para estimação da distância de falta e do *tripping time*. Como conclusão dessa comparação, tem-se que todos os algoritmos são afetados pelas componentes indesejadas introduzidas pela presença de compensação série na linha, visto que há uma redução no valor da impedância aparente que pode provocar um mau funcionamento da proteção.

Palavras-Chave: Linhas de transmissão. Métodos de estimação fasorial. Compensação série. ATP. MATLAB®.

ABSTRACT

This work aims to evaluate phasor estimation methods applied in transmission lines with series compensation, used in numerical relays for distance protection in transmission lines. Comparisons were made between five phasor estimation algorithms: Full Cycle Discrete Fourier Transform (FDFT), Modified Cosine, Digital Mimic Filter with FDFT, Guo Algorithm and the algorithm developed by CAMPOS (2016). In the first part of this work, analytical signals containing undesirable components were generated, using MATrix LABoratory software (MATLAB[®]). The phasor estimation methods were evaluated using performance indexes. For one of the signals, containing subharmonic and decaying DC components, the Campos method presented better results, with lower values in 78% of the cases for the index that quantifies the oscillation of the response in time and in 100% of the cases for the index that quantifies the percentage of overshoot, while the FDFT method was the one that had the worst result and was more susceptible to the subharmonic frequencies. Regarding the index that quantifies the speed of convergence in the phasor estimation, the combination of the mimic filter with FDFT method presented lower mean values. Then, a database was created, obtained through the modeling of a transmission line with series compensation and fault simulation using Alternative Transients Program (ATP) software. The location of the series capacitor banks, the degree of compensation, incidence angle and fault type location were varied, totaling 288 cases. The results obtained in the ATP were used as input signals for the MATLAB[®], where the autopolarized MHO type distance relay was modeled and where the phasor estimation algorithms extracted the fundamental voltage and current components. In the analysis of the results, the performance of the algorithms was compared through the apparent impedance trajectory, number of cycles required for fault distance estimation and tripping time. In conclusion of this comparison, it is observed that all algorithms are affected by the unwanted components introduced by the presence of series compensation in the line, since there is a reduction in the value of the apparent impedance that can cause a protection malfunction.

Keywords: Transmission lines. Phasor estimation methods. Series compensation. ATP. MATLAB[®].

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação paramétrica de uma linha de transmissão.	26
Figura 2 – Capacidade de transferência de potência da linha, em unidades de SIL.....	30
Figura 3 – Representação da localização da compensação série.....	32
Figura 4 – Fluxo de potência em linhas de transmissão.....	33
Figura 5 – Fluxo de potência em linhas de transmissão com compensação série.....	34
Figura 6 – Circuito equivalente de uma linha de transmissão com uma falta para a terra.	35
Figura 7 – Tarefas básicas de um relé de distância.	40
Figura 8 – Diagrama $R-X$	41
Figura 9 – Características de operação das proteções de distância: (a) Impedância, (b) MHO, .	43
Figura 10 – Trajetória da impedância vista pelo relé.	47
Figura 11 – Configuração normal do sistema.	48
Figura 12 – Inversão de corrente.....	49
Figura 13 – Inversão de tensão.....	50
Figura 14 – Esquema representativo do método de Campos (2016).....	58
Figura 15 – Modelo base do sistema elétrico.	66
Figura 16 – Esquema da linha de transmissão com compensação série no meio.....	67
Figura 17 – Esquema da linha de transmissão com compensação série nas extremidades.	67
Figura 18 – Esquema representativo do relé modelado.	69
Figura 19 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s1[n]$ e $B = 5$	73
Figura 20 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s1[n]$ e $B = 10$	74
Figura 21 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s1[n]$ e $B = 20$	74
Figura 22 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s2[n]$, para $B = 5$ e $\tau = 5$	78
Figura 23 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s2[n]$, para $B = 10$ e $\tau = 5$	78
Figura 24 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s2[n]$, para $B = 20$ e $\tau = 5$	79
Figura 25 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AT, a 75 km.	80
Figura 26 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AT, a 75 km.	81
Figura 27 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância.	81
Figura 28 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AT, a 75 km, GC 40%.	82
Figura 29 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AT, a 75 km, GC 40%.	83
Figura 30 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 40%.....	83
Figura 31 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AT, a 75 km, GC 60%.	84
Figura 32 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AT, a 75 km, GC 60%.	84
Figura 33 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 60%.....	85
Figura 34 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AT, a 225 km, GC 40%	86
Figura 35 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AT, a 225 km, GC 40%.	86
Figura 36 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 40%.....	87
Figura 37 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AT, a 225 km, GC 60%.	88
Figura 38 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AT, a 225 km, GC 60%.	88
Figura 39 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 60%.....	88
Figura 40 – Número de ciclos requeridos para estimação da distância de falta <i>versus</i> distância de falta – falta monofásica.	91
Figura 41 – Número de ciclos requeridos para estimação da distância de falta <i>versus</i> distância de falta – falta bifásica.	92
Figura 42 – Número de ciclos requeridos para estimação da distância de falta <i>versus</i> distância de falta – falta bifásica-terra.....	93

Figura 43 – Número de ciclos requeridos para estimação da distância de falta <i>versus</i> distância de falta – falta trifásica.....	94
Figura 44 – <i>Tripping time</i> para compensação série instalada no centro – falta monofásica.	96
Figura 45 – <i>Tripping time</i> para compensação série instalada no centro – falta bifásica.	97
Figura 46 – <i>Tripping time</i> para compensação série instalada no centro – falta bifásica-terra. ...	98
Figura 47 – <i>Tripping time</i> para compensação série instalada no centro – falta trifásica.....	99
Figura 48 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AB, a 75 km, GC 40%.....	101
Figura 49 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AB, a 75 km, GC 40%.....	102
Figura 50 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AB} do relé de distância, GC 40%.	102
Figura 51 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AB, a 75 km, GC 60%.....	103
Figura 52 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AB, a 75 km, GC 60%.....	103
Figura 53 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 60%.....	103
Figura 54 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AB, a 225 km, GC 40%.....	104
Figura 55 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AB, a 225 km, GC 40%.....	105
Figura 56 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 40%.....	105
Figura 57 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AB, a 225 km, GC 60%.....	106
Figura 58 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AB, a 225 km, GC 60%.....	106
Figura 59 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 60%.....	106
Figura 60 – <i>Tripping time</i> para compensação série instalada nas extremidades – falta monofásica.	108
Figura 61 – <i>Tripping time</i> para compensação série instalada nas extremidades – falta bifásica.	109
Figura 62 – <i>Tripping time</i> para compensação série instalada nas extremidades – falta bifásica-terra.	110
Figura 63 – <i>Tripping time</i> para compensação série instalada nas extremidades – falta trifásica.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre os trabalhos.....	24
Tabela 2 – Coeficientes de $Hbp(z)$	60
Tabela 3 – Dados do sistema elétrico simulado.	66
Tabela 4 – Combinações de faltas realizadas nas linhas com compensação série.	67
Tabela 5 – Combinações de faltas realizadas para as linhas com compensação série.	68
Tabela 6 – Resultados obtidos para o índice $ID1$ com entrada $s_1[n]$	72
Tabela 7 – Resultados obtidos para o índice $ID2$ com entrada $s_1[n]$	72
Tabela 8 – Resultados obtidos para o índice $ID3$ com entrada $s_1[n]$	73
Tabela 9 – Resultados obtidos para o índice $ID1$ com entrada $s_2[n]$	75
Tabela 10 – Resultados obtidos para o índice $ID2$ com entrada $s_2[n]$	76
Tabela 11 – Resultados obtidos para o índice $ID3$ com entrada $s_2[n]$	77

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	14
1.1 MOTIVAÇÕES DA DISSERTAÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	17
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	17
CAPITULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 ESTIMAÇÃO FASORIAL EM LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE	19
2.1.1 YU <i>et al.</i> (2002)	19
2.1.2 YU (2006)	19
2.1.3 VIANELLO <i>et al.</i> (2010).....	20
2.1.4 MOURA <i>et al.</i> (2012).....	20
2.1.5 RUBEENA <i>et al.</i> (2014).....	21
2.1.6 BAINS & ZADEH (2015)	22
2.1.7 BAINS & ZADEH (2016)	23
2.1.8 Síntese Bibliográfica.....	23
CAPITULO 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1 COMPENSAÇÃO SÉRIE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	25
3.1.1 Representação de uma Linha de Transmissão sem Compensação	26
3.1.2 Linhas de Transmissão com Compensação Série	31
3.1.2.1 Grau de Compensação (GC).....	31
3.1.2.2 Localização da Compensação Série	31
3.1.2.3 Fluxo de Potência em uma Linha de Transmissão com Compensação Série.....	33
3.1.3 Efeitos do Sistema de Compensação Série	34
3.2 PROTEÇÃO DE LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE.....	36
3.2.1 Relés de Proteção.....	36
3.2.2 Proteção de Distância.....	38
3.2.2.1 Diagrama <i>R-X</i>	40
3.2.2.1 Características de Operação	41
3.2.3 Característica MHO.....	42
3.2.2 Proteção do Banco de Capacitores.....	44
3.2.2.1 Varistor de óxido metálico (MOV)	44
3.2.2.2 Centelhador (<i>Spark Gap</i>).....	45
3.2.2.3 Chave de <i>by-pass</i>	45
3.3 FENÔMENOS QUE INFLUENCIAM NA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA	45

3.3.1 Ressonância Subsíncrona e Transitórios Sub-harmônicos.....	46
3.3.2 Desequilíbrio de impedância de fase.....	48
3.3.3 Inversão de Corrente	48
3.3.4 Inversão de Tensão.....	49
3.4 ESTIMAÇÃO FASORIAL	50
3.4.1 Algoritmo de Fourier de Um Ciclo	51
3.4.2 Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo.....	53
3.4.3 Cosseno Modificado	53
3.4.4 Mímico + Fourier de Um Ciclo	54
3.4.5 Algoritmo baseado nos Mínimos Quadrados.....	55
3.4.6 Algoritmo baseado na Transformada Wavelet.....	56
3.4.7 Algoritmo de Guo	57
3.4.8 Algoritmo de Campos	57
CAPÍTULO 4 METODOLOGIA PARA AS SIMULAÇÕES	63
4.1 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO UTILIZANDO SINAIS ANALÍTICOS	63
4.2 SIMULAÇÕES DE FALTAS EM LINHA DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE.....	65
4.2.1 Caso Base	65
4.2.2 Linha com Compensação Série	66
4.2.3 Criação do Banco de Dados.....	67
4.2.4. Modelagem do Relé de Distância	68
CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	70
5.1 SIMULAÇÕES COM SINAIS ANALÍTICOS ATRAVÉS DO <i>SOFTWARE</i> MATLAB®	70
5.1.1 Sinais Analíticos.....	70
5.1.2 Índices de Desempenho	72
5.2 SIMULAÇÕES DE FALTAS EM LINHA DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE.....	79
5.2.1 Linha sem Compensação	80
5.2.2 Linha com Compensação no Centro.....	81
5.2.2.1 Trajetória da Impedância Aparente	82
Faltas na primeira metade da linha.....	82
Faltas na segunda metade da linha	85
5.2.2.2. Número de Ciclos Requeridos para a Estimação da Distância de Falta.....	89
Faltas na primeira metade da linha.....	90
Faltas na segunda metade da linha	95

5.2.2.3 <i>Tripping Time</i>	95
5.2.3 Linha com Compensação nas Extremidades	100
5.2.3.1 Trajetória da Impedância Aparente	100
Faltas na primeira metade da linha.....	100
Faltas na segunda metade da linha	104
5.2.3.2 Número de Ciclos Requeridos para a Estimação da Distância de Falta.....	107
5.2.2.3 <i>Tripping Time</i>	107
CAPÍTULO 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
REFERÊNCIAS	115

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

A eletricidade está presente em várias atividades humanas. Com a industrialização da sociedade, foram desenvolvidos novos produtos e serviços, resultando em um aumento na demanda de energia elétrica que não havia sido previsto. Com isso, fez-se necessário procurar soluções para ampliar a capacidade dos sistemas elétricos existentes (ROJAS, 2016).

Uma das considerações mais importantes em qualquer sistema de engenharia é o custo das instalações. Sistemas de energia são notados por apresentarem um investimento muito alto, que se deve principalmente ao alto custo original dos sistemas de geração e distribuição de energia. Esse fato levou as concessionárias a comprar e instalar unidades geradoras muito maiores que seu sistema poderia razoavelmente usar, obtendo assim uma capacidade muito maior por unidade de investimento. Além disso, a localização da geração é ditada por muitos fatores, como a disponibilidade de combustível, a disponibilidade de água, instalações de transporte de combustível e outros fatores que podem ditar a localização de geradores, como a grande distância das cargas, o que aumenta a necessidade de linhas de transmissão e tende a tornar as linhas mais longas e, geralmente, de maior tensão (ANDERSON; FARMER, 1996).

O sistema de transmissão também é caro, especialmente em tensões mais elevadas. Com longas linhas de transmissão, a estabilidade ou outras considerações podem apresentar requisitos conflitantes em relação à impedância permitida desses sistemas de transmissão. Em alguns casos, a estabilidade determina a impedância efetiva e a capacidade de transferência entre os nós. Assim, uma alternativa para resolver essa questão é a instalação de unidades de compensação série em linhas de transmissão, tendo em vista que estas são capazes de aumentar a capacidade de transporte de energia.

De acordo com ANDERSON & FARMER (1996), os primeiros capacitores série foram instalados na década de 1920 e seu uso cresceu ao longo dos anos, com um rápido crescimento nas tensões mais elevadas, desde o projeto do sistema sueco na década de 1950. Os primeiros bancos de capacitores em série eram difíceis de construir e proteger e os primeiros sistemas eram primitivos pelos padrões modernos. Porém, desenvolvimentos recentes em materiais proporcionaram avanços importantes no estado da arte, provaram a viabilidade da compensação série como uma alternativa ou

complemento à compensação indireta. Assim, medida que a tecnologia cresceu, o mesmo aconteceu com o número de instalações de capacitores em série.

Apesar de, em muitos casos, o sistema de transmissão compensado ser muito mais econômico do que a construção de novas linhas de transmissão, existem efeitos indesejados resultantes da instalação de compensação série que precisam ser minimizados.

A proteção de sistemas elétricos de potência é uma tarefa necessária para garantir a estabilidade e a disponibilidade de energia elétrica aos consumidores. Perturbações nos sistemas elétricos podem ocasionar desvios severos na sua operação sob regime permanente, provocando interrupções no suprimento da energia.

Durante faltas e manobras no sistema, são introduzidas componentes transitórias aos sinais de tensão e corrente, sob a forma de componentes de frequência diferentes da fundamental. Caso estas componentes indesejáveis aos sinais não sejam filtradas corretamente, uma estimação fasorial incorreta dos sinais pode vir a prejudicar o desempenho dos dispositivos de proteção e controle (CAMPOS, 2016).

Assim, é de fundamental importância que os algoritmos de estimação fasorial filtrem os sinais monitorados e forneçam de forma fidedigna as componentes fundamentais dos sinais, tanto no regime permanente, como no regime transitório do sistema.

A utilização da compensação série, apesar de trazer benefícios, traz também desafios em relação à proteção dos sistemas elétricos que são empregadas atualmente, no que diz respeito principalmente a uma correta estimação fasorial dos sinais do sistema, visto que podem surgir componentes de frequência não fundamentais nos sinais, tais como componentes sub-harmônicas.

Os avanços na tecnologia digital têm possibilitado a criação de ferramentas para proteger e acelerar a restauração do sistema elétrico em situações de falta. Considerando que, ao longo dos anos, a utilização de sistemas com compensação série tende a aumentar, deve-se assegurar a alta precisão das grandezas a serem estimadas pelos relés de proteção, que atuam nessas linhas de transmissão. Por isso, o interesse em extrair corretamente os fasores das grandezas monitoradas em linhas de transmissão, principalmente em linhas que possuem esta configuração.

1.1 MOTIVAÇÕES DA DISSERTAÇÃO

A inclusão da compensação série em linhas de transmissão resulta em aspectos positivos para o sistema elétrico, como o aumento da capacidade de transporte de energia e da margem de estabilidade. Entretanto, inclui uma série de efeitos danosos que podem alterar o funcionamento dos sistemas de proteção (MOURA, 2012).

O grande aumento da utilização de compensação série nos sistemas de transmissão e os efeitos acarretados pela sua utilização são motivos para o desenvolvimento dessa dissertação, fazendo-se necessária uma análise aprofundada do funcionamento dos sistemas de proteção, em particular, a proteção de distância, que é utilizada em linhas de transmissão.

A função de distância, presente em dispositivos de proteção chamados de relés digitais, tem como objetivo detectar qual é o ponto onde a falta ocorreu ao longo da linha de transmissão, em relação ao ponto onde o relé está instalado. Para isso, os relés digitais utilizam as impedâncias calculadas a partir das grandezas entre fase e terra, e entre fases, para cada unidade de impedância.

A maioria dos relés de proteção toma suas decisões a partir da componente fundamental dos sinais de tensão e de corrente durante faltas e manobras. Conforme foi citado anteriormente, é neste momento que os sinais de tensão e de corrente são corrompidos por componentes transitórias, sob a forma de componentes de frequência diferentes da fundamental, que dificultam a estimação correta dos fasores.

No caso de linhas com compensação série, a impedância equivalente total da linha de transmissão é alterada, considerando o conjunto formado pela impedância original da linha e as impedâncias dos equivalentes dos equipamentos utilizados para realização da compensação na linha. Isso causa uma série de fenômenos que dificultam ainda mais a atuação das funções de proteção. Entre esses fenômenos, podem ser destacados a inversão de corrente, a inversão de tensão e a frequência sub-harmônica, também chamada de frequência subsíncrona, sendo que esta última causa uma variação não linear no tempo da impedância vista pela função de distância, o que pode aumentar o tempo de atuação do relé ou implicar em perda de seletividade.

Com base nisso, os algoritmos de estimação de fasores devem ser testados em condições adversas de atuação e em diferentes configurações de sistema para definir como estes algoritmos irão atuar nestas condições. Assim, o desempenho do algoritmo proposto por CAMPOS (2016) pode ser testado em linhas com compensação série, bem

como o desempenho de algoritmos clássicos de estimação fasorial: Fourier de Um Ciclo, Cosseno Modificado e Mímico com Fourier de Um Ciclo e Algoritmo de Guo.

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Constam como principais objetivos deste trabalho:

- Avaliar o estado da arte sobre técnicas de estimação fasorial aplicadas a sistemas com compensação série;
- Analisar o impacto, por meio de simulações, da compensação série na proteção de sistemas elétricos de potência;
- Implementar a função de distância de um relé de proteção, reproduzindo as principais partes que compõem a arquitetura de um relé real;
- Comparar o desempenho do algoritmo de CAMPOS (2016) em relação a quatro algoritmos clássicos (Fourier de Um Ciclo, Cosseno Modificado, Mímico com Fourier de Um Ciclo e Algoritmo de Guo), utilizados na função de distância em linhas de transmissão com compensação série, por meio de sinais analíticos, utilizando índices de desempenho, a partir de uma rotina desenvolvida no *software Matrix Laboratory* (MATLAB®);
- Comparar o desempenho dos métodos avaliados através de simulações de faltas realizadas utilizando o *software Alternative Transients Program* (ATP).

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este texto está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

- No Capítulo 1 é feita uma introdução ao tema, apresentando também a motivação e os objetivos do trabalho;
- No Capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, onde se pode encontrar os principais trabalhos relacionados ao assunto;
- No Capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica, abordando conceitos sobre compensação série em linhas de transmissão e os principais fenômenos associados a sua utilização, proteção de distância, estimação de fasores e os principais algoritmos utilizados;

- No Capítulo 4, é descrita a metodologia do trabalho, apresentando o sistema modelado via *software* ATP;
- No Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais.

CAPITULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, é feito um levantamento sobre o estado da arte dos métodos existentes utilizados para a estimação fasorial, no contexto de proteção de distância em linhas com compensação série.

2.1 ESTIMAÇÃO FASORIAL EM LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Entre os principais métodos de estimação fasorial já conhecidos, podem ser destacados os algoritmos que são baseados na Transformada Discreta de Fourier, nos Mínimos Quadrados e na Transformada Wavelet. Os principais trabalhos que abordaram o assunto, aplicados a linhas com compensação série, serão apresentados a seguir.

2.1.1 YU *et al.* (2002)

No trabalho de YU *et al.* (2002) é apresentado um novo algoritmo baseado no filtro de Fourier para linhas de transmissão com compensação série. Foi criado um banco de dados via *Electromagnetic Transients Program* (EMTP), usando uma linha de 300 km de comprimento, de 345 kV e com compensação série. Os casos testados incluíram vários tipos e localizações de falta, além de diferentes resistências e ângulos de incidência.

De acordo com o autor, os resultados da simulação indicam que o algoritmo proposto pode alcançar até 99,95% de precisão para a maioria dos casos testados. O autor comenta que são necessários de 2 a 3,5 ciclos para a convergência do algoritmo, mas a modelagem considera apenas a presença de uma componente, ou seja, é capaz de lidar ou com a componente DC de decaimento exponencial ou oscilações subsíncronas.

2.1.2 YU (2006)

Em seu trabalho, YU (2006) apresenta um algoritmo de transformada de Fourier discreta (DFT) iterativo para filtragem de corrente de falta, com o objetivo de filtrar as componentes DC de decaimento exponencial e sub-harmônicas. Primeiro, a combinação

dos filtros mímico e Fourier de um ciclo de janela curta é utilizada para filtrar a medição. Em seguida, a partir do fasor estimado, o sinal é reconstruído utilizando um esquema iterativo e reintroduzido no processo de filtragem, para uma filtragem adicional. De acordo com o autor, o algoritmo proposto pode amortecer suficientemente a componente DC de decaimento exponencial, bem como as componentes sub-harmônicas, sendo apropriado para o projeto de filtragem tanto em linhas de transmissão convencionais quanto em linhas com compensação série.

O desempenho do método foi avaliado por dois sinais de teste específicos e um exemplo de sistema de potência, uma linha de transmissão de 100 km de comprimento e 345 kV, com grau de compensação de 70%. Os resultados da simulação mostram que o algoritmo reduz significativamente o tempo para obter o fasor fundamental preciso e que ele tem um desempenho melhor que o algoritmo DFT convencional.

2.1.3 VIANELLO *et al.* (2010)

VIANELLO *et al.* (2010) propõem o uso de redes neurais (RNA) para estimar a magnitude e a fase da componente fundamental dos sinais na presença de harmônicos, sub-harmônicos e componente DC de decaimento exponencial. Primeiramente, é utilizado um sinal que apresenta a componente fundamental e as componentes sub-harmônicas e DC de decaimento exponencial. Este sinal é usado como entrada de RNA, para então estimar o valor real do fasor do componente fundamental.

Para validar o método, dois casos de simulações serão apresentados. O primeiro é composto por um sinal definido como a soma da componente fundamental, harmônicos, componente DC de decaimento e apenas uma sub-harmônica. O segundo é semelhante ao primeiro, mas tem duas sub-harmônicas diferentes. O método proposto nesse trabalho foi comparado com o método dos mínimos quadrados e os algoritmos de Fourier de um ciclo e de meio ciclo. Segundo os autores, os resultados mostraram que o método é rápido e preciso.

2.1.4 MOURA *et al.* (2012)

O trabalho de MOURA *et al.* (2012) apresenta o comportamento da proteção de distância em linhas de transmissão (LTs) com compensação série utilizando diferentes

algoritmos de estimação de fasores. Foi analisada uma LT de 230 kV e comprimento de 300 km em três casos (sem compensação, com capacitores instalados nas extremidades da linha, com capacitores instalados no meio da linha).

O sistema foi simulado no ATP, realizando diversos tipos de falta em locais diferentes da linha, para graus de compensação distintos. Os resultados obtidos através das simulações no ATP são utilizados para estimar os fasores no MATLAB[®], onde são implementados os métodos de Mínimos Quadrados, Fourier de Um Ciclo combinado com Filtro Mímico, Fourier de Meio Ciclo combinado com o Filtro Mímico e Transformada Wavelet.

Como contribuição do trabalho, foi observado que o efeito das componentes de frequências sub-harmônicas é ampliado com a instalação de compensação nas extremidades da LT, o que leva a trajetória do diagrama R-X a ter uma forma de espiral, podendo levar o relé a um subalcançe da zona de proteção. O aumento excessivo do grau de compensação provoca a inversão de corrente, levando os algoritmos a estabilizarem em um ponto no terceiro quadrante no diagrama R-X, fazendo com que o relé não identifique a falta em nenhuma das suas zonas de atuação.

2.1.5 RUBEENA *et al.* (2014)

No trabalho de RUBEENA *et al.* (2014) é proposto um algoritmo que filtra de forma eficaz os componentes de frequência indesejados e o ruído, para realizar uma estimativa precisa do fasor para localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série. Para isso, seu algoritmo utiliza uma janela de dados mais longa, que inclui todos os dados de falta desde o início da falta até a interrupção do disjuntor, para identificar completamente as características dos componentes transitórios do sinal de falta. Em seguida, é realizada a compensação das componentes do sinal indesejadas, para estimar com precisão os fasores de corrente e tensão de falta.

A transformada discreta de Fourier (DFT) é um dos algoritmos mais utilizados para estimar os fasores dos sinais de tensão e de corrente. Para reduzir o efeito adverso da presença de componentes de frequências sub-harmônicas que são inseridas com a utilização da compensação série, é realizada uma pré-filtragem dos sinais antes da estimação fasorial utilizando o Método de Prony.

Na nova técnica proposta, chamada Prony-DFT, é utilizado um filtro média móvel, que é um filtro de resposta de impulso finito de fase linear, que pode atuar como um filtro passa baixa ideal. Esse filtro é utilizado para eliminar as componentes harmônicas e atenuar o ruído do sinal. Após isso, os parâmetros do sinal são então estimados usando a Análise de Prony. Um conjunto de equações é derivado para reconstruir e compensar as componentes de frequência transitória. Finalmente, a Transformada Discreta de Fourier (DFT) é aplicada ao sinal compensado para estimar a magnitude e o ângulo do fasor.

Foi avaliado o desempenho do método proposto, comparando com a Análise de Prony Direta e com o algoritmo de DFT de quatro ciclos. Uma linha de transmissão compensada em série de 500 kV foi modelada utilizando o *software Power Systems Computer Aided Design/Electromagnetic Transients including DC (PSCAD/EMTDC)* e foram realizadas simulações de faltas em vários pontos da linha de transmissão, para avaliar de forma abrangente o desempenho da técnica proposta.

A partir das simulações realizadas, mostrou-se que a técnica proposta reduz significativamente o erro de localização de falta devido à estimativa de fasor mais precisa comparada com a DFT de quatro ciclos. Porém, a técnica proposta é adequada apenas para aplicações off-line, como localização de faltas, e não para a proteção em alta velocidade.

2.1.6 BAINS & ZADEH (2015)

O trabalho de BAINS & ZADEH (2015) apresenta uma abordagem melhorada da proposta que foi apresentada por RUBEENA *et al.* (2014), na qual o filtro média móvel foi representado no domínio de tempo contínuo. O objetivo do trabalho é semelhante ao proposto em RUBEENA *et al.* (2014), que consiste em filtrar de forma eficaz os componentes de frequência indesejados e o ruído, para realizar uma estimativa precisa do fasor para localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série. Porém, será utilizado um filtro média móvel no domínio do tempo discreto, ao invés de um filtro média móvel no domínio do tempo contínuo.

A avaliação da técnica foi realizada usando PSCAD e MATLAB[®], usando o sistema e o método abordados em RUBEENA *et al.* (2014), e foram realizadas simulações de diferentes tipos de faltas. Foram comparados os resultados do método

melhorado de Prony-DFT com os resultados obtidos a partir da técnica de Prony-DFT proposta em RUBEENA *et al.* (2014) e da técnica DFT de quatro ciclos. Como contribuição, foi mostrado que o método melhorado de Prony-DFT fornece parâmetros exatos do sinal de média no domínio de tempo discreto para qualquer frequência de amostragem. Uma desvantagem do método apresentado é que, assim como o trabalho anterior, só é possível extrair os fasores *off-line*.

2.1.7 BAINS & ZADEH (2016)

O trabalho de BAINS & ZADEH (2016) propõe um novo algoritmo de localização de faltas suplementar baseado em impedância para linhas de transmissão compensadas por capacitores em série, o que melhora a precisão dos algoritmos de localização de faltas existentes.

O algoritmo proposto foi testado para vários cenários de faltas em um sistema elétrico de potência de 500 kV simulado no PSCAD, e comparado com o algoritmo de localização de faltas proposto por IZYKOWSKI *et al.* (2011), que é baseado em impedância para linhas com compensação série.

Como contribuição, foi mostrado no trabalho de BAINS & ZADEH (2016) que os erros no local da falta podem ser minimizados conhecendo a sequência de operação dos elementos de proteção do banco de capacitores instalado em série. Também foi observado que os algoritmos de localização de faltas em sistemas com compensação série são mais suscetíveis a erros na estimativa fasorial, sendo que esses erros são maiores quando a compensação está localizada perto das extremidades da linha.

2.1.8 Síntese Bibliográfica

O foco dos trabalhos apresentados é a estimação de fasores em linhas com compensação série. Na Tabela 1, mostra-se um comparativo entre eles.

Tabela 1 – Comparativo entre os trabalhos.

MÉTODOS	YU <i>et al.</i> (2002)	YU (2006)	VIANELLO <i>et al.</i> (2010)	MOURA <i>et al.</i> (2012)	RUBEENA <i>et al.</i> (2014)	BAINS & ZADEH (2015)	BAINS & ZADEH (2016)
Propõe novo algoritmo de estimação fasorial	✓	✓	✓	–	✓	✓	–
Aplicação <i>on-line</i>	–	–	–	✓*	–	–	–
Modela sistema com diferentes graus de compensação	✓	–	–	✓	–	–	–
Modela sistema com diferentes locais de instalação da compensação	✓	–	–	✓	–	–	✓
Remove componente DC de decaimento exponencial	✓**	–***	✓	–	✓	✓	–
Remove componentes sub-harmônicas	✓**	–***	✓	✓*	✓	✓	–
Aplicação na localização de faltas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autoria própria.

*Apenas alguns algoritmos abordados no trabalho podem ser utilizados para essa aplicação.

**Não remove simultaneamente as componentes DC de decaimento e sub-harmônicas.

***Atenua, não elimina as componentes.

CAPITULO 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os principais fundamentos teóricos contidos no presente capítulo estão relacionados à compensação série em linhas de transmissão, à proteção de sistemas elétricos de potência, aos fenômenos que influenciam a proteção e à estimação de fasores.

3.1 COMPENSAÇÃO SÉRIE EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

De acordo com MAMEDE FILHO (2013), o capacitor é um dispositivo capaz de armazenar uma quantidade de energia em um campo elétrico. Em sistemas elétricos, os capacitores podem trazer benefícios, no que diz respeito à correção de fator de potência e à regulação de tensão, nos sistemas de transmissão e de distribuição, bem como à liberação da capacidade de transformação dos transformadores e de geração dos geradores, entre outros benefícios.

Os sistemas de energia são projetados para suprir os requisitos de uma ampla variedade de cargas elétricas. A energia ativa geralmente recebe a maior atenção, porque é o uso de energia ativa, integrada ao longo do tempo, que é faturada para o usuário, e as linhas de transmissão são construídas para transmitir energia ativa. Por outro lado, a carga elétrica também tem requisitos de energia reativa que devem ser fornecidos pelo sistema de energia.

De acordo com ANDERSON & FARMER (1996), alguns problemas no sistema de potência são causados por altos valores de reatância indutiva da impedância equivalente da linha de transmissão, o que pode levar à queda de tensão, instabilidade de máquinas síncronas e variações de tensão ou instabilidade. A correção desses problemas sempre pode ser resolvida pela adição de novos circuitos, o que é muito caro. Em muitos casos, os problemas podem ser resolvidos com a inserção de compensação em derivação. No entanto, a compensação em derivação nem sempre aborda a fonte do problema e a solução pode ser temporária ou inadequada. Em muitos casos, uma solução melhor pode ser adicionar compensação série, que corrige a deficiência básica nos circuitos não compensados.

A compensação série é muito eficaz em certas situações. Os capacitores em série reduzem a reatância total da linha de transmissão, que geralmente é o principal motivo

da sua aplicação. Isso melhora a estabilidade do sistema de potência e ajuda a controlar a queda de tensão na linha de transmissão. Como o capacitor em série é passivo, ele executa sua função sem a necessidade de controles externos ou ação do operador (ANDERSON; FARMER, 1996).

Os bancos de capacitores mais modernos empregam tecnologias avançadas que tornam as instalações mais flexíveis e confiáveis. Os modernos bancos de capacitores em série são projetados para suportar as solicitações transitórias que os equipamentos elétricos de alta tensão invariavelmente são submetidos no sistema elétrico. Esses avanços na tecnologia tornam as instalações mais simples do que alguns dos projetos mais antigos, proporcionando confiabilidade superior e facilidade de manutenção (ANDERSON; FARMER, 1996).

3.1.1 Representação de uma Linha de Transmissão sem Compensação

Como foi falado anteriormente, a finalidade da utilização da compensação série é alterar as características elétricas da linha. Para compreender melhor o seu efeito, será analisado o comportamento de uma linha de transmissão sem compensação. Neste trabalho, a linha de transmissão é representada pelo modelo π .

Uma linha de transmissão não compensada é representada na Figura 1. Ela é definida pelos parâmetros distribuídos por unidade de comprimento de resistência (R , em Ω/km), indutância (L , em H/km), condutância (G , em S/km) e capacitância (C , em F/km). As variáveis \hat{V}_L e \hat{V}_R indicam a tensão no terminal local e a tensão no terminal remoto, respectivamente.

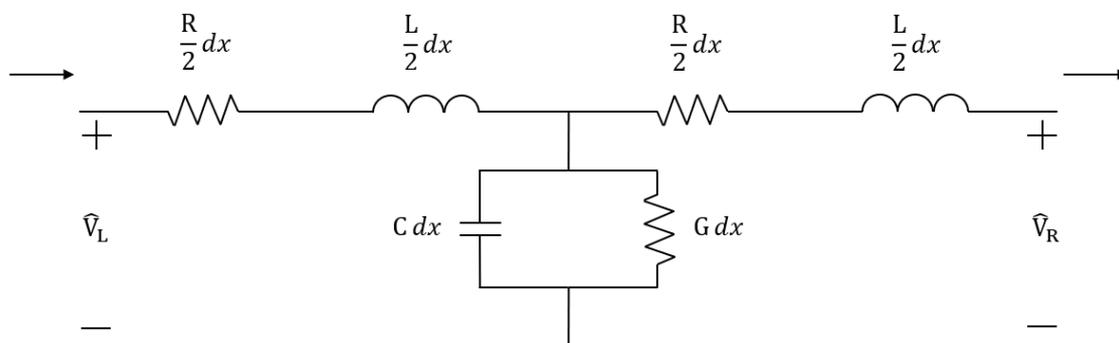


Figura 1 – Representação paramétrica de uma linha de transmissão.

Fonte: Adaptado de CONCEIÇÃO (2016).

Utilizando esses parâmetros, pode ser definida a impedância característica da linha de transmissão Z_C , estabelecida pela razão entre a onda de tensão e a onda de corrente que se propagam em qualquer ponto da linha (SADIKU, 2004), conforme a Equação (1):

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \rightarrow R_C + jX_C, \quad (1)$$

em que ω denota a frequência angular nominal da rede.

Também podem ser definidas as constantes de propagação (γ , em 1/km), de atenuação (α , em Np/km) e de fase (β , em rad/km):

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta. \quad (2)$$

Através de Z_C , pode ser definida a admitância, utilizando a Equação (3):

$$Y_C = \frac{1}{Z_C} \quad (3)$$

A partir das equações diferenciais de tensão e corrente por comprimento incremental, é possível referenciar as formas de tensão e corrente do terminal remoto, indicadas pelo subíndice R , às de um ponto qualquer da linha, conforme as Equações (4) e (5):

$$V(s) = \frac{1}{2}(V_R + Z_C I_R)e^{\gamma s} + \frac{1}{2}(V_R - Z_C I_R)e^{-\gamma s} \quad (4)$$

$$I(s) = \frac{1}{2}(I_R + Y_C V_R)e^{\gamma s} + \frac{1}{2}(I_R - Y_C V_R)e^{-\gamma s}, \quad (5)$$

em que s representa a distância do ponto ao terminal remoto da linha (CONCEIÇÃO, 2016).

Matricialmente, as Equações (3) e (4) são escritas como:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix},$$

em que

$$A = \cosh \gamma \ell$$

$$B = Z_C \sinh \gamma \ell$$

$$C = \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma \ell = \frac{B}{Z_C^2}$$

$$D = \cosh \gamma \ell$$

Todos os parâmetros **ABCD** são valores complexos, pois a constante de propagação e a impedância característica também são valores complexos. Os parâmetros **A** e **D** são adimensionais, enquanto **B** e **C** tem dimensões em ohms e siemens, respectivamente.

De acordo com ANDERSON & FARMER (1996), a maioria das linhas de alta tensão com condutores agrupados têm razões X/R maiores ou iguais a 20. Para essas linhas, a resistência por unidade de comprimento é muito pequena em comparação à indutância, de modo que aproximações razoáveis podem ser feitas desconsiderando a resistência, sem prejudicar a validade do modelo matemático. Além disso, tem-se que a condutância é praticamente nula para redes aéreas. Tendo em vista tais considerações, torna-se viável a aproximação por uma linha sem perdas, simplificando as Equações (1), (2), (4) e (5) para:

$$Z_C = \sqrt{\frac{L}{C}} = R_C \quad (6)$$

$$\gamma = \sqrt{(j\omega L)(j\omega C)} = j\omega\sqrt{LC} \quad (7)$$

$$\hat{V}(s) = \hat{V}_R \cos \beta s + jR_C \hat{I}_R \sin \beta s \quad (8)$$

$$\hat{I}(s) = \hat{I}_R \cos \beta s + j \frac{\hat{V}_R}{R_C} \sin \beta s \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}, \quad (10)$$

em que

$$A = \cos \beta s$$

$$B = R_C \sin \beta s$$

$$C = \frac{1}{R_C} \sin \beta$$

$$D = \cos \beta s$$

Ainda segundo ANDERSON & FARMER (1996), a linha de transmissão também pode ser descrita em função de sua capacidade nominal de transferência de potência, a potência natural de uma linha (em inglês *Surge Impedance Loading* – SIL). O SIL é descrito pela Equação (11):

$$SIL = P_n = \frac{V^2}{Z_C^*} = \frac{V^2(R_C + jX_C)}{|Z_C|^2}. \quad (11)$$

Nessa condição, ocorre um equilíbrio entre a potência reativa produzida pela capacitância *shunt* e a potência reativa absorvida pela indutância série em todos os pontos da linha, ou seja, o SIL corresponde a potência, em MW, na situação em que a potência reativa absorvida é igual à potência reativa produzida. Assim:

$$I^2 X_L = \frac{V^2}{X_C} \rightarrow X_L X_C = \frac{V^2}{I^2} \rightarrow \frac{\omega L}{\omega C} = \left(\frac{V}{I}\right)^2, \quad (12)$$

o que resulta na impedância de surto.

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_C. \quad (13)$$

Substituindo a Equação (6), com um pequeno erro, o SIL pode ser aproximado por:

$$P_n = \frac{V^2}{R_C}, \quad (14)$$

em que P_n se refere à potência natural trifásica, em Watts e V , à tensão de linha da rede, em Volts, e R é a impedância característica real da linha, em ohms.

A maioria dos problemas em Sistemas Elétricos de Potência ocorrem quando a linha de transmissão não opera com seu carregamento natural, ou seja, em condições não-ideais, quando não se tem perfis de tensão e corrente constantes ao longo de toda sua extensão. Para carregamentos superiores ao SIL, é necessário fornecer potência reativa capacitiva ao sistema, enquanto para carregamentos inferiores, há potência reativa capacitiva em excesso. Em ambos os casos, o funcionamento da rede pode ser prejudicado (CONCEIÇÃO, 2016).

Através do SIL, as limitações de transferência de potência de uma linha de transmissão podem ser representadas. Na Figura 2, é mostrada a capacidade de transferência de potência de uma linha não compensada, em unidades de SIL, *versus* sua extensão (ANDERSON; FARMER, 1996).

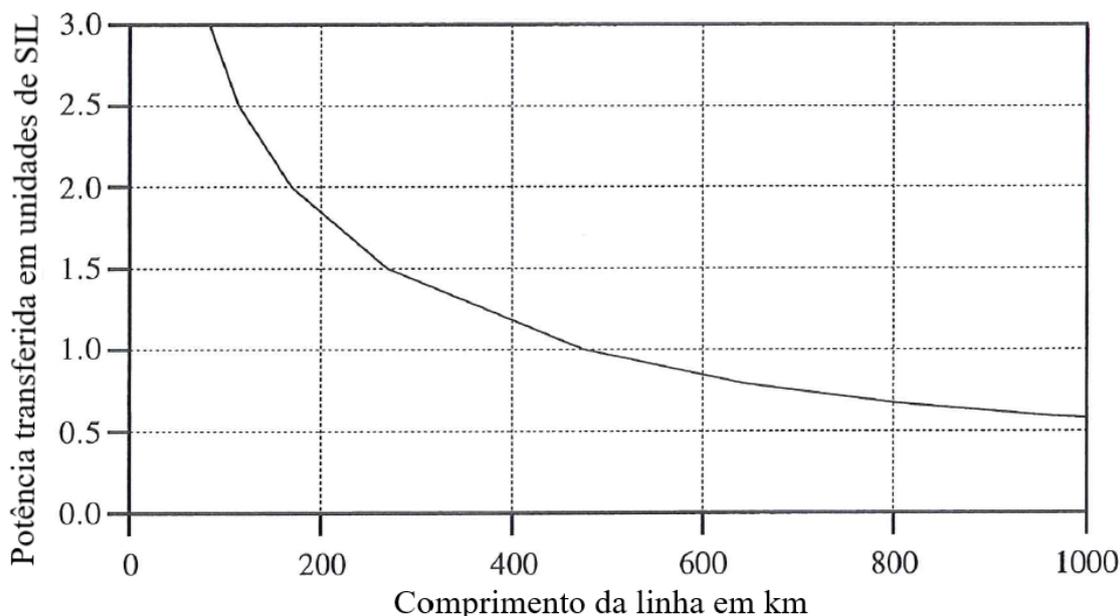


Figura 2 – Capacidade de transferência de potência para uma linha sem compensação série, em unidades de SIL.

Fonte: Adaptado de ANDERSON & FARMER (1996).

Apesar de configurar somente uma estimativa e variar para sistemas distintos, o comportamento ilustrado na Figura 2 evidencia que a potência transferida é limitada e que, para linhas extensas, ela se restringe a valores inferiores ao SIL da rede. A aplicação da compensação série, por conseguinte, faz-se indispensável para melhorar o aproveitamento da linha de transmissão, ao passo que eleva a potência natural da linha.

3.1.2 Linhas de Transmissão com Compensação Série

3.1.2.1 Grau de Compensação (GC)

Para análise dos efeitos dos bancos de capacitores na rede, introduz-se, primeiramente, o conceito de grau de compensação. O grau de compensação (GC), denotada pela letra k , é o valor que corresponde a relação entre a reatância capacitiva da compensação série inserida no sistema e a reatância da linha de transmissão, de acordo com a Equação (15):

$$GC[\%] = k = \frac{X_C}{X_{LT}} \cdot 100. \quad (15)$$

O valor do grau de compensação está definido entre 25 a 70% da indutância da linha de transmissão a ser compensada, pois valores acima dos 70% podem produzir oscilações entre a rede elétrica e os eixos dos geradores, e valores abaixo de 25% tornam a instalação da compensação inviável (OLIVEIRA, 2007).

A modificação dos parâmetros elétricos da linha está associada ao local de instalação dos bancos de capacitores. Em função disso, a localização da compensação série é fator determinante para os seguintes aspectos (ANDERSON; FARMER, 1996):

- Eficiência da compensação (denotada pela letra k);
- Perfil de tensão da linha compensada;
- Dimensionamento e configuração dos esquemas de proteção do banco de capacitores e da linha de transmissão; e
- Manutenção das instalações do banco.

3.1.2.2 Localização da Compensação Série

A compensação série é utilizada majoritariamente em duas configurações: um banco de capacitores instalado na linha de transmissão ou dois bancos idênticos em cada um de seus terminais. De acordo com ANDERSON & FARMER (1996), o primeiro arranjo é aplicado, por exemplo, em grande parte dos sistemas elétricos do Canadá, da

África do Sul e da Turquia, enquanto o segundo predomina nas redes do Brasil e dos Estados Unidos. Na Figura 3, está representada compensação série nas duas situações.



Figura 3 – Representação da localização da compensação série.

Fonte: Adaptado de MOURA (2012).

A seguir, serão apresentadas vantagens e desvantagens de ambas as configurações. Mas o que determina a localização da compensação série é, sobretudo, o custo e a complexidade do projeto de proteção e controle, bem como os benefícios e inconvenientes da instalação em cada local.

Compensação nos Terminais da Linha

Em geral, a instalação nas extremidades da linha implica em menor complexidade de esquemas de proteção e controle. Além disso, a capacidade do compensador em diminuir o efeito *Ferranti* é máxima quando a compensação é utilizada nessa configuração. Entretanto, neste caso, os relés das linhas adjacentes à linha compensada podem ser afetados por inversão de tensão.

Compensação ao Longo da Linha

De acordo com GONÇALVES (2007), a compensação é mais efetiva quando situada no centro da linha, uma vez que neste caso é obtida a máxima transferência de potência. Assim, para uma mesma transferência de potência, quando a compensação é instalada no centro da linha, é necessário um montante menor de potência reativa do que quando é instalada em uma das extremidades. Outra vantagem é que, nessa configuração, a inversão de tensão é evitada.

Como desvantagem, pode ser destacada a necessidade de utilização de sistemas adicionais de transmissão de dados a distância, o que pode causar aumento do tempo de eliminação de faltas, redução da confiabilidade ou aumento de custos. Além disso, é

necessária a construção de uma nova subestação, o que também torna o uso da compensação no meio da linha mais caro (GONÇALVES, 2007).

3.1.2.3 Fluxo de Potência em uma Linha de Transmissão com Compensação Série

Uma linha de transmissão de energia elétrica pode ser representada através da Figura 4.

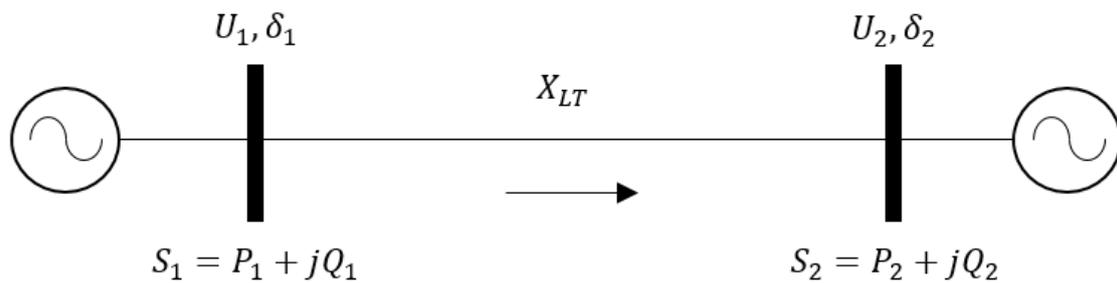


Figura 4 – Fluxo de potência em linhas de transmissão.

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2007).

A partir da Figura 4, podem ser apresentadas as equações que se referem as potências ativas e reativas na linha de transmissão (OLIVEIRA, 2007):

$$P_{12} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{LT}} \cdot \sin \delta_{12} \quad (16)$$

$$Q_{12} = \frac{U_1^2}{X_{LT}} \cdot \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{LT}} \cdot \cos \delta_{12}, \quad (17)$$

sendo P_{12} e Q_{12} as potências ativa e reativa transmitidas da Barra 1 para a Barra 2, respectivamente; U_1 e U_2 as tensões nas Barras 1 e 2; X_{LT} a reatância indutiva da linha de transmissão; e δ_{12} o ângulo entre as tensões das Barras 1 e 2.

Analisando a Equação (16), observa-se que a potência ativa transmitida é inversamente proporcional a reatância da linha de transmissão. Assim, quanto menor o valor da reatância, maior a capacidade de transmissão. Ao inserir a compensação série, o valor da reatância capacitiva é diminuído do valor da reatância da linha de transmissão, reduzindo assim a reatância do sistema. Uma linha de transmissão com compensação série está representada na Figura 5.

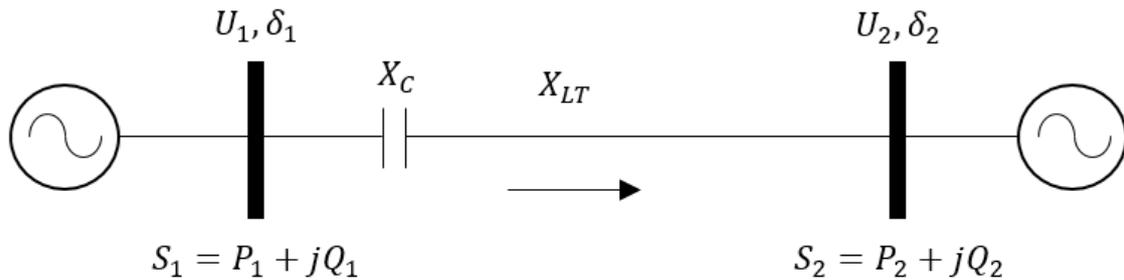


Figura 5 – Fluxo de potência em linhas de transmissão com compensação série.

Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2007).

A partir da Figura 5, as Equações (18) e (19) podem ser extraídas, referentes ao fluxo de potência na linha compensada:

$$P_{12c} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{LT} - X_C} \cdot \text{sen } \delta_{12} \quad (18)$$

$$Q_{12c} = \frac{U_1^2}{X_{LT} - X_C} \cdot \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{LT} - X_C} \cdot \text{cos } \delta_{12}, \quad (19)$$

sendo P_{12c} e Q_{12c} a potência ativa e a potência reativa transmitidas da Barra 1 para a Barra 2 com compensação, respectivamente; e X_C a reatância capacitiva inserida na linha de transmissão.

A compensação série inserida em uma linha permite uma maior transmissão de potência através da redução do valor da reatância indutiva da linha de transmissão a qual foi incorporada. Isto é, para uma linha de transmissão não compensada, sua impedância apresenta-se predominantemente indutiva. Ao acrescentar bancos de capacitores em série com esta impedância indutiva, tem-se a redução de seu valor visto que a impedância capacitiva do banco compensa parte da impedância indutiva da linha, tornando a impedância total menos indutiva e com menos perdas na transmissão de energia.

3.1.3 Efeitos do Sistema de Compensação Série

Os fasores de tensão e corrente contêm informações que podem ser usadas para identificar locais de faltas com precisão razoável. Esses fasores são prontamente medidos por meio de transdutores e instrumentos de sinal apropriados.

O capacitor em série altera a tensão e a corrente na localização do relé, dependendo da localização do capacitor e do grau de compensação. Ao analisar uma falta em particular, a localização da falta também é importante, porque a corrente e a tensão são funções da impedância total da falta, incluindo a impedância da linha e a impedância do capacitor em série.

Uma maneira de visualizar os problemas de proteção de uma linha compensada em série é examinar a tensão de frequência fundamental, a corrente e a impedância aparente para diferentes condições de sistema e falta. A impedância aparente pode ser descrita como a relação tensão-corrente vista pelo relé para as diferentes condições, e é convenientemente traçada no diagrama $R-X$, um método de visualizar a condição do sistema a partir do local do relé.

Para realizar este tipo de comparação, é necessário calcular as tensões e correntes do sistema para as diferentes condições de falta e sistema de interesse. Para este propósito, é utilizado um circuito equivalente de uma linha de transmissão com uma falta para a terra, similar ao da Figura 6. Esse é um método que pode ser generalizado para estudar o sistema de proteção de qualquer sistema, sob qualquer condição de falta de derivação. Como o sistema equivalente é muito pequeno, é prontamente resolvido para as correntes e tensões sob qualquer condição de falta. A solução depende da localização do capacitor (ANDERSON; FARMER, 1996).

Na Figura 6, Z_E , Z_S , Z_U , Z_L e Z_F são, respectivamente, as impedâncias equivalentes, da fonte S, da fonte U, da linha de transmissão e de falta.

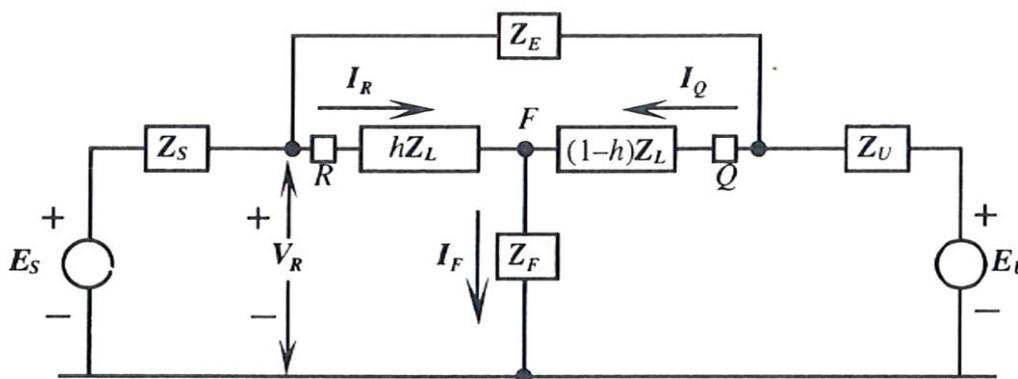


Figura 6 – Circuito equivalente de uma linha de transmissão com uma falta para a terra.

Fonte: ANDERSON & FARMER (1996)

3.2 PROTEÇÃO DE LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

De acordo com MAMEDE FILHO e MAMEDE (2011), a principal função de um sistema de proteção é garantir que o sistema elétrico que está com algum tipo de anormalidade seja desconectado, evitando que o mesmo opere fora dos limites previstos. Além disso, o sistema de proteção tem a função de monitorar o sistema, fornecendo as informações necessárias aos responsáveis por sua operação, de modo a facilitar a identificação dos defeitos e a sua consequente recuperação.

Dentre as faltas em sistema de potência, o curto-circuito é a mais comum e a mais severa. Além dele, podem ocorrer também a sobrecarga e as subtensões e sobretensões com diferentes origens, de descargas atmosféricas e manobras, entre outras. Esses fenômenos podem ocasionar danos irreparáveis ao sistema e às instalações das unidades consumidoras, mesmo que as normas mais severas sejam seguidas e apesar de todos os cuidados que são tomados na elaboração do projeto e na execução da instalação, pois são inerentes ao funcionamento dos sistemas de potência. Essas anormalidades poderão ter consequências irrelevantes ou desastrosas, dependendo do sistema de proteção preparado para aquela instalação em particular (MAMEDE FILHO e MAMEDE, 2011).

Os curtos-circuitos podem ocorrer entre as três fases, entre duas fases quaisquer, envolvendo ou não a terra, e entre uma fase qualquer e a terra. As sobrecargas são caracterizadas pela elevação moderada da corrente, acima dos valores admitidos no projeto.

Segundo MAMEDE FILHO e MAMEDE (2011), ao contrário dos curtos-circuitos, as sobrecargas não constituem uma falha de instalação, mas sim um procedimento muitas vezes incorreto de sua operação. Enquanto os curtos-circuitos são de curta duração, em geral as sobrecargas são prolongadas.

3.2.1 Relés de Proteção

A detecção de defeitos em Sistemas Elétricos de Potência é feita pelos relés. Os relés são sensores instalados estrategicamente no sistema, com o objetivo de monitorar perturbações e, quando necessário, atuar com seletividade e rapidez na extinção dos curtos-circuitos, sub/sobretensões, sub/sobrefrequência, etc. Para isso, o relé envia

comandos de abertura (*trip*) aos disjuntores associados aos componentes do sistema elétrico de potência a serem protegidos, que se encontram submetido à condição de defeito, sendo desenergizados para isolar o defeito do restante do sistema (DIAS FILHO, 2015).

Os relés de proteção podem ser agrupados basicamente em três tipos: eletromecânicos, estáticos e digitais. Os relés eletromecânicos têm sua operação baseada em forças produzidas pela interação eletromagnética entre correntes e fluxos.

No caso dos estáticos, não são necessárias de partes móveis para sintetizar características de operação. De fato, eles são constituídos de circuitos integrados, que podem implementar todas as funções e características disponíveis nos relés eletromecânicos.

Já os relés digitais, também chamados de dispositivos eletrônicos inteligentes, diferem dos eletromecânicos e estáticos por apresentar vantagens como: flexibilidade na implementação de algoritmos, flexibilidade funcional, integração digital, rotinas de auto-monitoramento, aquisição e armazenamento de dados e implementação de rotinas de detecção, classificação e localização de faltas (SILVA, 2009).

Para garantir atuação rápida e seletiva, sem comprometimento da precisão, é importante que os relés de proteção sejam capazes de, apenas através do processamento das tensões e correntes medidas, discernir se o objeto protegido opera sob condição defeituosa ou se passa por apenas um transitório de manobra (DIAS FILHO, 2015).

Os relés digitais constituem uma ampla gama de dispositivos que oferecem proteção aos sistemas elétricos nas mais diversas formas: sobrecarga, curto-circuito, sobretensão, subtensão, sobrecorrente, etc. Segundo MAMEDE FILHO e MAMEDE (2011), cada relé de proteção possui uma ou mais características técnicas que o definem para exercer as funções básicas, dentro dos limites exigidos pelos esquemas de proteção e coordenação, para cada sistema elétrico em particular.

Os primeiros relés de proteção foram os relés de sobrecorrente, dispositivos que podem ser coordenados no tempo para fornecer proteção gradual nas linhas radiais. No entanto, a maioria dos sistemas de transmissão não é radial, mas consiste em uma rede de linhas de transmissão e transformadores.

Em casos especiais, os relés de sobrecorrente com capacidade de detecção direcional são adequados para a aplicação em rede, mas esse raramente é o caso. Os elementos em rede fornecem correntes de falta de muitas fontes diferentes, e a magnitude e a direção da corrente não são medidas adequadas para determinar a

localização de uma falta e especificar a operação ideal dos disjuntores. Portanto, proteção de sobrecorrente raramente é usada na proteção de transmissão para faltas de fase, embora existam aplicações de proteção de falta à terra onde dispositivos de sobrecorrente são adequados e podem ser um método de proteção favorecido (ANDERSON; FARMER, 1996).

De acordo com ANDERSON & FARMER (1996), outro tipo de proteção utilizada em linhas de transmissão é a proteção piloto, que é um termo usado para indicar o uso de canais de telecomunicação "piloto" entre os relés nas extremidades de uma linha de transmissão. Essa forma de comunicação permite que os relés do terminal de linha compartilhem informações de medições feitas em diferentes pontos da rede. Isso pode facilitar e tornar mais rápida a correção de faltas na zona de proteção e, além isolar faltas que ficam fora da zona de proteção da linha. Uma das razões para usar a proteção do piloto é a velocidade aprimorada de limpeza para todas as faltas de linha, independentemente da localização da falta.

Outro tipo de proteção utilizado é a proteção de distância, que recebe essa denominação por operar baseada na medição da distância até o local da falta, obtida indiretamente a partir da medição da impedância de sequência positiva do trecho da linha entre o relé e o local da falta. No que diz respeito à proteção de linhas de transmissão, a proteção de distância é notoriamente a mais utilizada (ZIEGLER, 2006).

3.2.2 Proteção de Distância

De acordo com ZIEGLER (2011), em 1920, a proteção de distância foi introduzida nos sistemas de proteção e, desde então, sofreu um desenvolvimento contínuo. O tempo de *trip* também foi melhorado por um fator dez.

Um grande passo no desenvolvimento da proteção de distância foi dado em torno de 1985, quando a tecnologia do microprocessador foi introduzida. Os relés numéricos podem armazenar informações e se comunicar com outros dispositivos, recursos que contribuem para a melhoria da qualidade de proteção. Com o aumento da complexidade das redes de transmissão e distribuição, há uma maior exigência dos sistemas de proteção e das pesquisas envolvendo os relés numéricos (ZIEGLER, 2011).

A "função de distância", denominada pelo número 21, é um tipo de proteção comumente encontrada em relés digitais, através da qual é possível detectar o ponto

onde a falta ocorre ao longo da linha de transmissão em relação ao ponto onde o relé está instalado. Para isso, os relés de distância utilizam uma combinação de tensão e corrente na localização do relé, determinando assim a impedância aparente vista pelo relé sob todas as condições. Assim, a impedância aparente vista pelo relé pode ser definida como a razão entre o fasor de tensão dividido pelo fasor de corrente vistos pelo equipamento, onde ambas as grandezas são por unidade e são medidas na localização do relé (ANDERSON & FARMER, 1996).

Quando não houver nenhuma falta presente, serão medidas pelo relé valores de tensões e correntes em regime permanente, resultando em valores altos de magnitude de impedância aparente, com um ângulo de impedância correspondente ao fator de potência da carga.

Sob condições de falta, a impedância vista pelo relé muda drasticamente. Nesse caso, a tensão diminui até certo ponto e a corrente é muito maior do que a condição em regime permanente, que resulta em uma impedância aparente muito menor. Isso significa que valores baixos de impedância podem ser interpretados como uma condição de falta, com a direção da falta sendo conhecida, bem como o valor de resistência aproximado, que pode ser interpretado como uma distância até a falta (ANDERSON & FARMER, 1996).

Na Figura 7, estão apresentadas as tarefas básicas de um relé digital de distância, que podem ser divididas em: detecção da falta, classificação da falta, cálculo da impedância aparente, verificação da zona de proteção e, caso necessário, envio de sinal para abertura dos disjuntores para isolamento elétrica da falta envolvida (COURY *et al.*, 2011 apud CAMPOS, 2016). O foco deste trabalho está na estimação fasorial.

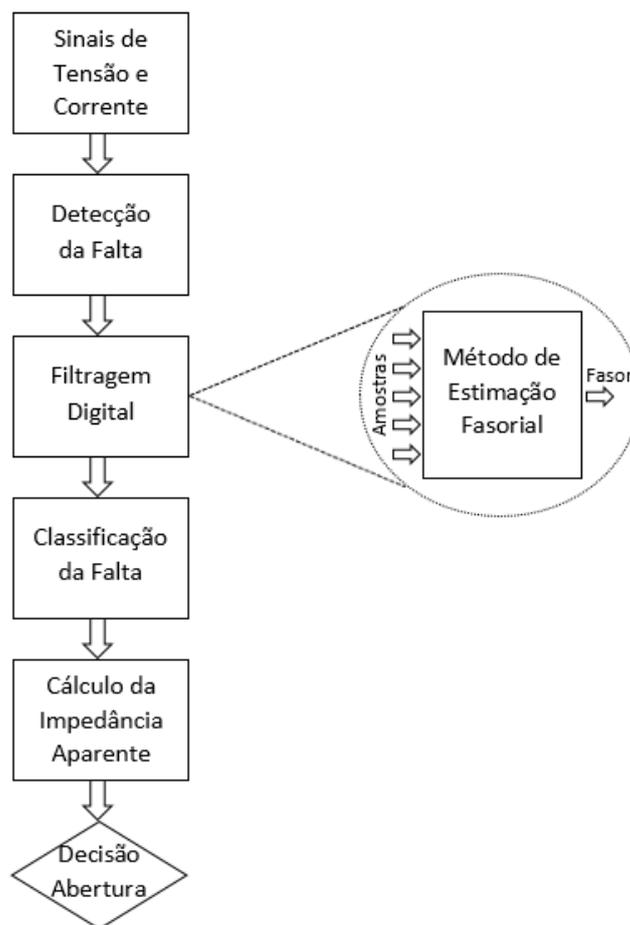


Figura 7 – Tarefas básicas de um relé de distância.

Fonte: Adaptado de CAMPOS (2016).

3.2.2.1 Diagrama R - X

O diagrama R - X é um diagrama de impedâncias no qual as características de um relé de distância são apresentadas, cujo eixo das abcissas representa a resistência R e o eixo das ordenadas representa a reatância X . A partir da razão entre os fasores medidos pelo relé, referentes a tensão \hat{V}_R e a corrente \hat{I}_R , é obtida a impedância aparente Z_R vista pelo relé, como pode ser visto na Figura 8. As coordenadas de Z_R são $r_R = |Z_R| \cdot \cos \theta_R$ e $x_R = |Z_R| \cdot \sin \theta_R$ (SILVA, 2009).

De acordo com SILVA (2009), a escolha por medir a impedância de sequência positiva se deve ao fato de que ela é distribuída e considerada constante com relação à distância. De fato, seu valor depende apenas das características dos condutores e de suas disposições geométricas. Além disso, ela é comum a todos os tipos de falta e não é função da resistividade do solo, como é o caso da impedância de sequência zero.

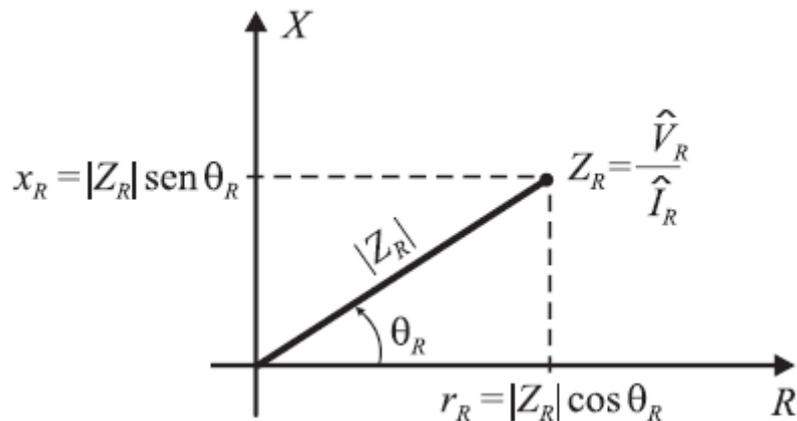


Figura 8 – Diagrama R-X.

Fonte: SILVA (2009).

Os relés de distância são projetados de tal forma que uma configuração máxima de impedância pode ser ajustada para formar um limite para o disparo. Esses limites são definidos no diagrama R-X e podem assumir a forma de linhas retas, arcos circulares ou círculos completos. O ponto de alcance do relé de distância é o ponto onde a impedância da linha é interceptada pelo limite característico do relé (RUSH, 2011).

3.2.2.1 Características de Operação

Por meio de alterações na unidade de operação e restrição obtêm-se tipos básicos de relés de distância com características peculiares que os tornam adequados a aplicações definidas em linhas de transmissão. Esses relés levam as seguintes denominações (IEEE, 2015):

- Impedância: A característica de impedância, mostrada na Figura 9(a), não leva em conta o ângulo de fase entre a tensão e a corrente aplicada a ela. Por esse motivo, a característica de impedância no diagrama R-X é um círculo com seu centro na origem. O relé opera quando a impedância medida é menor que a configuração (isto é, dentro do círculo). Esta unidade, quando usada para *trip*, deve ser supervisionada por uma unidade direcional ou ser atrasada.
- Admitância ou MHO: A característica de um relé MHO autopolarizado, mostrado na Figura 9(b), é um círculo cuja circunferência passa pela origem. O relé opera se a impedância medida cair dentro do círculo.

- Offset MHO: A característica de um relé offset MHO no diagrama $R-X$, mostrado na Figura 9(c), é um círculo que é deslocado e inclui a origem, proporcionando assim uma melhor proteção para falhas de fechamento no sentido de avanço como direções inversas. Esta unidade, quando usada para *trip*, pode ser supervisionada por uma unidade direcional ou pode ser temporizada se não for destinada a operar durante faltas na direção reversa.
- Reatância: Esta característica, mostrada na Figura 9(d), mede apenas o componente reativo da impedância. A característica de um relé de reatância no diagrama $R-X$ é uma linha reta paralela ao eixo R. O relé de reatância deve ser supervisionado por outra função para garantir a direcionalidade e evitar o *trip* sob carga.

Segundo MAMEDE FILHO e MAMEDE (2011), os relés de reatância são mais indicados para aplicação em linhas de transmissão consideradas curtas, em que a resistência de arco pode atingir um valor significativo quando comparado com a impedância da linha de transmissão. Já os relés de admitância ou MHO são mais indicados para aplicação em linhas de transmissão consideradas longas, já que sua característica operacional ocupa um espaço menor no diagrama $R-X$, o que os torna menos sensíveis às oscilações indesejáveis de potência. Não há restrição quanto à sua aplicação em linhas de transmissão longa, pois sua impedância é muito superior à resistência de arco.

No caso dos relés de impedância, eles são mais indicados para aplicação em linhas de transmissão consideradas médias, devido à sua característica operacional ser mais afetada pela resistência de arco do que o relé de admitância. Com base nisso, neste trabalho, será utilizado um relé de distância com característica MHO.

3.2.3 Característica MHO

A característica MHO é obtida através de um comparador de fase do tipo cosseno. Esse comparador mede o ângulo de fase entre os sinais de operação, que produz torque favorável ao fechamento dos contatos do relé, e de restrição, o qual produz torque contrário ao fechamento dos contatos do relé. A característica é circular no diagrama $R-X$, e seus limites se encontram entre os ângulos -90° e 90° (ROBERTS *et al.*, 1993).

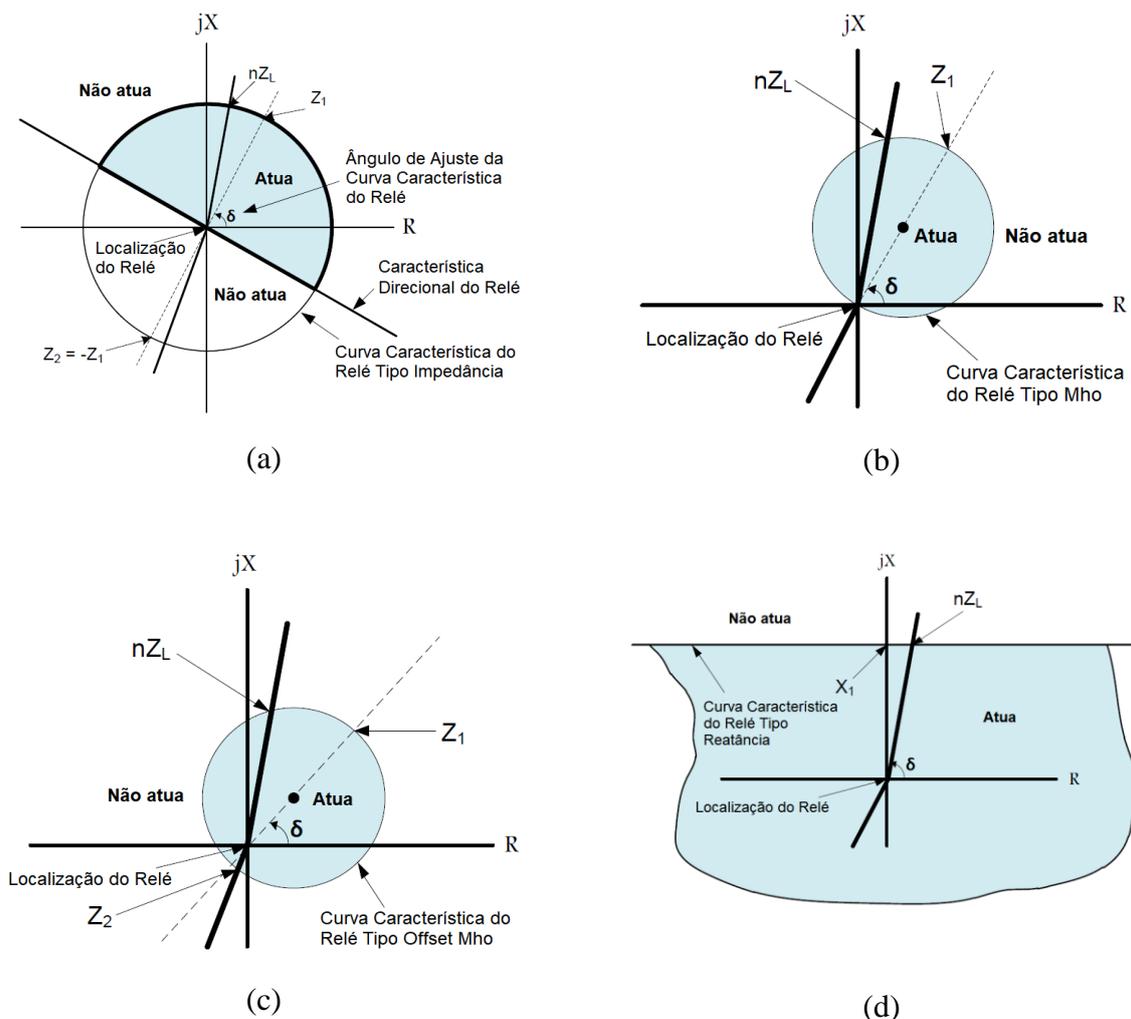


Figura 9 – Características de operação das proteções de distância: (a) Impedância, (b) MHO, (c) Offset MHO e (d) Reatância.

Fonte: Adaptado de IEEE (2015).

Relés do tipo MHO autopolarizados utilizam a tensão de fase como grandeza de restrição e a corrente de fase como grandeza de operação, e são ideais para proteção contra faltas bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas.

Segundo FENTIE (2016), a maior desvantagem de usar relés do tipo MHO autopolarizados é que esse tipo de polarização coloca em risco a segurança e confiabilidade do elemento de proteção durante faltas próximas ao terminal do relé, pois a tensão é muito pequena para ser precisamente medida. Em ROBERTS *et al.* (1993), é afirmado que esse tipo de polarização não é seguro em faltas de tensão zero (resistência de falta nula), pois o sinal de polarização não tem um ângulo de fase definido. Assim, o sinal de polarização ideal deve estar disponível permanentemente e não desaparecer com a falta. É sabido que, se o sistema está energizado antes da falta, a tensão pré-falta

está disponível. Esta tensão pré-falta deve ser memorizada e empregada como sinal de polarização.

De acordo com ROBERTS *et al.* (1993), a polarização por memória de tensão positiva é geralmente o método de polarização mais seguro e confiável para características MHO. Nesse caso, a grandeza de restrição é a tensão de sequência positiva.

Os relés mais modernos possuem polarização com tensão da fase e/ou memória da polarização da tensão. A finalidade principal da polarização da tensão do relé é assegurar uma resposta correta direcional do relé, para frente ou para trás, quando de uma falta próxima do relé onde a tensão de falta vista por ele pode ser muito pequena.

A medição de distância na localização do relé é grandemente afetada pela presença de capacitores em série, devido à mudança brusca na impedância vista pelo relé para faltas em ambos os lados do capacitor.

3.2.2 Proteção do Banco de Capacitores

As grandezas elétricas vistas pelo relé de distância são significativamente afetadas pelos capacitores em série localizados ao longo da linha. O sistema de compensação série é composto não só pelo banco de capacitores, mas também por um conjunto de equipamentos e dispositivos necessários para a proteção dos mesmos. Esses dispositivos são projetados para restringir as correntes que passam por eles para valores que não excedam a suportabilidade dos capacitores e serão apresentados a seguir.

3.2.2.1 Varistor de óxido metálico (MOV)

Os capacitores série são instalados em cada fase da linha de transmissão. Para evitar que correntes maiores fluam e prevenir as sobretensões, eles são protegidos por um equipamento especialmente projetado, o varistor de óxido metálico, também conhecido pela abreviação do termo inglês MOV. Conforme há uma elevação da tensão nos terminais do MOV, normalmente quando a corrente no capacitor atinge duas a três vezes o valor nominal, ele passa a conduzir, reduzindo efetivamente a sua resistência não linear e grampeando a tensão nos terminais do banco correspondente. Assim, quando a corrente que passa pelos bancos atinge valores pré-estabelecidos, ela é

parcialmente desviada, com o objetivo de manter constante a tensão nos terminais dos bancos de capacitores (XUE *et al.*, 2013).

3.2.2.2 Centelhador (*Spark Gap*)

O centelhador, conhecido também como *spark gap* ou simplesmente GAP, foi a proteção principal contra sobretensões no banco de capacitores até a década de 70 (GUIMARÃES, 2016). Atualmente, tem a função de proteger o MOV, evitando seu aquecimento devido à passagem prolongada de corrente. Este equipamento consiste em dois eletrodos separados fisicamente, que podem estabelecer um arco elétrico, para desviar o fluxo de corrente. Seu disparo é controlado por meio de valores pré-definidos de energia e corrente acumulados pelo MOV. Assim que algum desses valores é atingido, corrente e/ou energia, o *spark gap* tem seu disparo acionado. Com o disparo do *spark gap*, é enviado um comando de fechamento para o disjuntor de desvio, ou *by-pass*, que está em paralelo ao circuito de cada banco monofásico de capacitores série (DINIZ, 2016).

3.2.2.3 Chave de *by-pass*

Consiste em uma chave mecânica que é conectada em paralelo com os bancos de capacitores série. Este dispositivo opera quando é necessário realizar manutenção nos bancos de capacitores, no MOV e/ou no GAP. No fechamento, esse equipamento necessita extinguir o arco ao realizar a operação de curto-circuito do *gap* principal para um defeito no sistema ou ainda de operar na condição de fechamento quando necessitar curto-circuitar o banco de capacitores série, no caso de falha no *gap* principal (MAMEDE FILHO, 2013).

3.3 FENÔMENOS QUE INFLUENCIAM NA PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

Apesar de todos os benefícios já citados, a utilização da compensação série apresenta alguns aspectos técnicos desfavoráveis. De acordo com GONÇALVES

(2007), de todas as funções de proteção de linhas de transmissão, a de distância é a mais afetada pela compensação série.

Devido à impedância capacitiva inserida na linha, e dependendo de seu valor, sua localização e da localização da falta, problemas como inversões de tensão e de corrente podem ocorrer, criando desafios extras para os métodos de proteção baseados em apenas um terminal, tais como a proteção de distância, direcional ou sobrecorrente. Além desses problemas, outros fenômenos podem ocorrer e interferir na proteção de distância, quando esta é aplicada a linhas de transmissão com compensação série.

3.3.1 Ressonância Subsíncrona e Transitórios Sub-harmônicos

Quando há uma falta na linha de transmissão, ocorre uma alteração no sistema de potência e essa alteração é acompanhada por uma resposta transitória. Imediatamente após a aplicação da falta, transitórios de alta frequência (100-1000 Hz) podem surgir à medida que as indutâncias e capacitâncias do sistema respondem à mudança na rede.

Posteriormente, quando o sistema de *by-pass* do capacitor opera, assumindo que a corrente de falta é grande o suficiente para causar a operação de *by-pass*, diferentes correntes e tensões são vistas pelo relé, decorrentes das rápidas mudanças transitórias que o sistema sofre. O relé deve tomar a decisão correta sob condições que mudam rapidamente, e deve fazê-lo de forma rápida e confiável (ANDERSON & FARMER, 1996).

Para uma linha de transmissão não compensada, os transitórios relacionados à falta têm decaimento em função de uma componente CC. Já em linhas compensadas, os transitórios são sinais CA com frequência não fundamental, determinada pela associação da capacitância série inserida, que introduz um valor de reatância capacitiva, e a reatância indutiva da linha de transmissão (WILKINSON, 1988 apud GONÇALVES, 2007).

O circuito ressonante série, resultado dessa associação, tem frequência dada pela Equação 20.

$$f_r = f \sqrt{\frac{X_F + X_{LT}}{X_C}} \quad (20)$$

em que

f_r é a frequência de ressonância do circuito de transmissão;

f é a frequência fundamental do sistema;

X_C é a reatância capacitiva da compensação por fase;

X_F é a reatância indutiva da fonte por fase;

X_{LT} é a reatância indutiva da linha por fase.

Considerando que o valor da reatância capacitiva inserida em geral é menor do que a reatância indutiva do sistema, a frequência dos sinais transitórios normalmente é de ordem menor do que a frequência fundamental. Assim, esses transitórios são denominados sub-harmônicos (ou subsíncronos).

De acordo com GONÇALVES (2007), o transitório sub-harmônico causa uma variação não linear no tempo da impedância “vista” pelo relé. Conforme a Figura 10, a impedância segue um percurso espiral, no diagrama R - X , desde o ponto de carga até sua posição final. Dependendo do valor da compensação, o tempo desse percurso pode aumentar o tempo de atuação do relé, aumentando assim o tempo de eliminação da falta, ou implicar em perda de seletividade. Além disso, os transitórios sub-harmônicos podem causar problemas na proteção de distância provocando subalcance.

Além dos transitórios sub-harmônicos, há os de altas frequências, causados pela operação do *gap* do compensador, que também podem afetar o desempenho do relé.

De acordo com MOURA (2012), uma maneira de diminuir o efeito das frequências sub-harmônicas é aumentar a janela de dados, o que torna o filtro mais seletivo e, conseqüentemente, diminui o efeito das frequências sub-harmônicas no resultado. Por outro lado, aumentar a janela de dados pode comprometer a velocidade de detecção da falta.

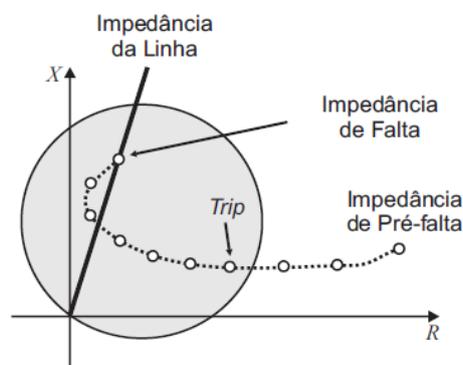


Figura 10 – Trajetória da impedância vista pelo relé.

Fonte: SILVA (2009).

3.3.2 Desequilíbrio de impedância de fase

A discordância de fases, durante a operação de *by-pass* ou a reinserção dos bancos de capacitores, pode também afetar o valor da impedância “vista” pelo relé de distância. Tal discordância é chamada de efeito de desequilíbrio de impedância de fase. Durante a atuação do *gap* ou do MOV, as três fases não abrem ao mesmo tempo, o que implica em um fenômeno desequilibrado.

3.3.3 Inversão de Corrente

Durante uma falta que não ocorre a atuação do *gap* ou do MOV, a reatância capacitiva pode fazer parte da impedância do circuito equivalente da falta, dependendo da localização da compensação e da falta. Caso esteja, se a reatância capacitiva for maior do que a soma entre a reatância da fonte e a reatância da própria linha de transmissão até o ponto de falta, o fenômeno de inversão de corrente acontece. O que ocorre é que a impedância série equivalente da rede é negativa. O comportamento predominantemente capacitivo dessa configuração promove aumento nos níveis de tensão, de modo que a tensão sobre o relé é superior à tensão da fonte e o sentido da direção de corrente é invertido.

As Figuras 11 e 12 ilustram o comportamento da rede quanto às tensões e correntes em condições normais de operação, ou seja, quando não há inversão de tensão nem de corrente, e o comportamento da rede no caso da inversão de corrente (CONCEIÇÃO, 2016).

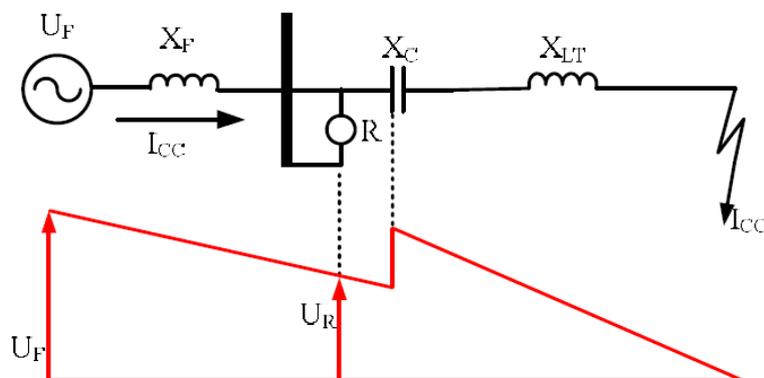


Figura 11 – Configuração normal do sistema.

Fonte: MOURA (2012).

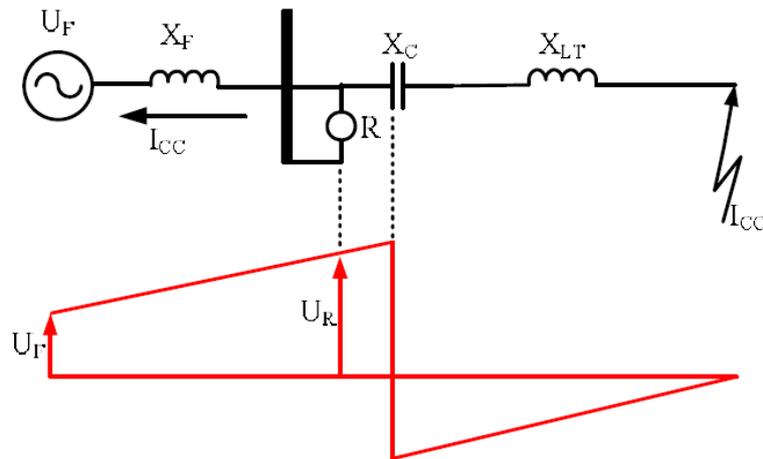


Figura 12 – Inversão de corrente.

Fonte: MOURA (2012).

As chances desse fenômeno acontecer podem variar de acordo com a localização da falta, o posicionamento e o grau da compensação série. Nas situações em que a falta acontece a montante do capacitor, para o caso da compensação instalada no meio da linha de transmissão, não ocorre a inversão de corrente, ou seja, quando o TP que informa a tensão do relé está de um lado do capacitor série e a falta do outro lado.

A inversão de corrente é um fenômeno que compromete a discriminação de direcionalidade do relé, assim como a inversão de tensão.

3.3.4 Inversão de Tensão

A inversão de tensão ocorre quando a reatância da compensação série é superior a reatância indutiva da linha de transmissão até o ponto de falta. Nessas condições, a reatância entre o relé e o ponto de falta tem característica capacitiva, de modo que a tensão no local de falta é superior à tensão sobre o relé, fazendo com que a tensão vista pelo relé seja negativa. Esse fenômeno faz com que faltas internas sejam identificadas pelo relé como faltas que não estão na sua zona de atuação (CONCEIÇÃO, 2016).

A Figura 13 ilustra o comportamento da rede no caso em que ocorre a inversão de tensão.

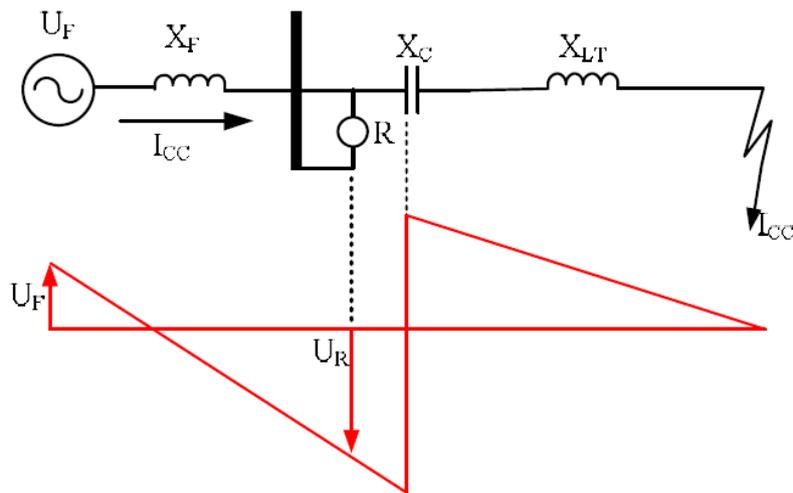


Figura 13 – Inversão de tensão.

Fonte: MOURA (2012).

3.4 ESTIMAÇÃO FASORIAL

De acordo com OLIVEIRA (2015), a estimação de fasores é uma técnica de processamento de sinais necessária para aplicações relacionadas à proteção de sistemas de potência, controle, qualidade da energia, análises de segurança, monitoramento e diagnósticos. O objetivo dela é eliminar componentes indesejáveis dos sinais do sistema que foram captados, através de processamento estatístico ou por filtragem, ou seja, estimar a amplitude e a fase da componente fundamental na presença de componentes harmônicos e inter-harmônicos, componente DC de decaimento exponencial e ruídos. O desafio da estimação é que estes componentes podem afetar significativamente a qualidade dos resultados desejados.

De forma geral, os algoritmos de estimação devem ser capazes de estimar os fasores mesmo na presença dessas componentes indesejáveis ou de eliminá-las, dependendo do sinal monitorando. Por isso, muitos algoritmos de estimação ou técnicas complementares têm sido propostos nos últimos anos.

A DFT é o algoritmo mais básico e difundido de estimação do componente fundamental, principalmente devido à sua eficiência computacional ao ser implementada pela Transformada Rápida de Fourier (FFT). Os filtros Seno e Cosseno obtidos a partir da DFT, que servem como base para o desenvolvimento de outros algoritmos de estimação fasorial, são utilizados para estimar as partes real e imaginária dos fasores (OLIVEIRA, 2015).

Um sinal periódico $x(t)$ pode ser decomposto usando a série de Fourier da seguinte forma:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sen(n\omega_0 t). \quad (21)$$

Os coeficientes da série de Fourier podem ser obtidos através das equações (22) e (23):

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (22)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \sen(n\omega_0 t) dt, \quad (23)$$

nas quais T representa o período do sinal e ω é a frequência angular (MOURA, 2012).

3.4.1 Algoritmo de Fourier de Um Ciclo

O método FDFT, sigla que vem de *Full Cycle Discrete Fourier Transform*, consiste em extrair a componente fundamental da forma de onda medida, a partir do produto de um ciclo de amostras dessa forma de onda com as funções seno e cosseno. Para isso, recorre-se às Equações (24) e (25):

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \cos(\omega_0 t) dt \quad (24)$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \sen(\omega_0 t) dt, \quad (25)$$

sendo t_0 o instante inicial para o cálculo das componentes.

As Equações (24) e (25) podem ser resolvidas utilizando o método de integração retangular, resultando nas Equações (26) e (27):

$$a_1 \approx \frac{2}{N\Delta t} [x(t_0) \cos(\omega_0 t_0) + x(t_1) \cos(\omega_0 t_1) + \dots + x(t_{N-1}) \cos(\omega_0 t_{N-1})] \Delta t \quad (26)$$

$$b_1 \approx \frac{2}{N\Delta t} [x(t_0) \sen(\omega_0 t_0) + x(t_1) \sen(\omega_0 t_1) + \dots + x(t_{N-1}) \sen(\omega_0 t_{N-1})] \Delta t. \quad (27)$$

Reescrevendo as Equações (26) e (27), obtém-se:

$$a_1 \approx \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} h_x x_k \quad (28)$$

$$b_1 \approx \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \sen\left(\frac{2\pi k}{N}\right) = \sum_{k=0}^{N-1} h_y x_k, \quad (29)$$

sendo $x_k = x(t_k)$ a k -ésima amostra da forma de onda de tensão e as funções h_x e h_y os coeficientes dos filtros de Fourier de um ciclo:

$$h_x = \frac{2}{N} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N} k_0\right) \cos\left(\frac{2\pi}{N} k_1\right) \cos\left(\frac{2\pi}{N} k_2\right) \dots \cos\left(\frac{2\pi}{N} k_{N-1}\right) \right] \quad (30)$$

$$h_y = \frac{2}{N} \left[\sen\left(\frac{2\pi}{N} k_0\right) \sen\left(\frac{2\pi}{N} k_1\right) \sen\left(\frac{2\pi}{N} k_2\right) \dots \sen\left(\frac{2\pi}{N} k_{N-1}\right) \right]. \quad (31)$$

A partir das Equações (28) e (29), podem ser obtidas as componentes real X_x e imaginária X_y do fasor do sinal:

$$X_x = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (32)$$

$$X_y = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \sen\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (33)$$

O módulo $|\hat{X}|$ e a fase $\angle X$ de um fasor podem ser calculados por:

$$|\hat{X}| = \sqrt{(X_x)^2 + (X_y)^2} \quad (34)$$

$$\angle X = \arctg\left(\frac{X_y}{X_x}\right). \quad (35)$$

3.4.2 Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo

Este algoritmo de assemelha muito com o método FDFT, sendo que a diferença entre eles é que o de meio ciclo utiliza metade das amostras do método FDFT do sinal periódico $x(t)$.

$$X_x = \frac{4}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (36)$$

$$X_y = \frac{4}{N} \sum_{k=0}^{N/2-1} x(k) \sen\left(\frac{2\pi k}{N}\right). \quad (37)$$

As funções h_x e h_y são os coeficientes dos filtros de Fourier de meio ciclo:

$$h_x = \frac{4}{N} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N} k_0\right) \cos\left(\frac{2\pi}{N} k_1\right) \cos\left(\frac{2\pi}{N} k_2\right) \dots \cos\left(\frac{2\pi}{N} k_{N-1}\right) \right] \quad (38)$$

$$h_y = \frac{4}{N} \left[\sen\left(\frac{2\pi}{N} k_0\right) \sen\left(\frac{2\pi}{N} k_1\right) \sen\left(\frac{2\pi}{N} k_2\right) \dots \sen\left(\frac{2\pi}{N} k_{N-1}\right) \right]. \quad (39)$$

Os algoritmos de Fourier de um ciclo e de Fourier de meio ciclo são os mais comumente utilizados para filtragem de harmônicas de sinais, visto que realizam isso através de cálculos simples. Porém, a componente DC de decaimento exponencial que está presente não é facilmente eliminada, devido ao seu comportamento aperiódico com um espectro de frequências relativamente amplo (CAMPOS, 2016).

A seguir, serão apresentados outros algoritmos de estimação fasorial desenvolvidos com o objetivo de eliminar esses componentes.

3.4.3 Cosseno Modificado

O Filtro Cosseno se baseia na ortogonalidade do filtro de Fourier para as janelas de dados atual e um quarto de ciclo atrasada. A componente fundamental do sinal $x(t)$ pode ser filtrada a partir da determinação das componentes real e imaginária do fasor, dadas pelas Equações (40) e (41):

$$X_x = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (40)$$

$$X_y = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x\left(k + \frac{N}{4}\right) \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right). \quad (41)$$

CAMPOS (2016) explica que, apesar de o Filtro Cosseno apresentar um bom desempenho na filtragem de componentes DC de decaimento exponencial para a corrente, ele causa o atraso de um quarto de ciclo na estimação do fasor. Esse fato motivou o desenvolvimento de outro filtro, chamado de Filtro Cosseno Modificado, que é mostrado através das Equações (42) e (43):

$$X_x(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (42)$$

$$X_y(n) = \frac{X_x(n-1) \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) - X_x(n)}{\text{sen}\left(\frac{2\pi}{N}\right)}, \quad (43)$$

em que $X_x(n)$ e $X_y(n)$ representam a n -ésima amostra para componentes real e imaginária do fasor.

3.4.4 Mímico + Fourier de Um Ciclo

O Filtro Mímico Digital é um algoritmo de filtragem que tem como objetivo minimizar a componente DC de decaimento exponencial em relés digitais. Foi proposto por BENMOUYAL (1995), que o desenvolveu utilizando princípios que eram empregados por relés eletromecânicos e estáticos. O Filtro implementa a resposta de um circuito RL, projetado para minimizar o impacto da corrente DC de decaimento exponencial na operação do relé. A Equação (44) mostra o sinal y_f obtido a partir do sinal y no domínio do tempo discreto:

$$y_f(k) = K[(1 + \tau_d)y(k) - \tau_d y(k-1)], \quad (44)$$

sendo $y_f(k)$ a amostra do sinal filtrado no instante k , $y(k)$ e $y(k-1)$ são, respectivamente, as amostras do sinal original nos instantes k e $k-1$; K é o ganho do filtro; e τ_d é a constante de tempo de projeto do filtro.

A Equação (45) apresenta o ganho, que deve ser unitário na frequência fundamental (BENMOUYAL, 1995):

$$K = \frac{1}{\sqrt{\left[(1 + \tau_d) - \tau_d \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) \right]^2 + \left[\tau_d \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \right]^2}} \quad (45)$$

Segundo BENMOUYAL (1995), o valor da constante de tempo τ_d deve ser escolhido de modo a mitigar o efeito da componente DC de decaimento exponencial no sinal. Caso τ_d seja igual à constante de tempo τ do sinal a ser filtrado, a componente DC de decaimento exponencial é totalmente eliminada.

De acordo com CAMPOS (2016), uma deficiência desse método seria a necessidade do conhecimento prévio da constante de tempo do sinal. Outro problema é que, apesar de o filtro Mímico Digital eliminar as componentes de baixa frequência, visto que é um filtro passa-altas, ele amplifica as componentes de frequência maiores que a componente fundamental.

Em seu trabalho, BENMOUYAL (1995) combina o filtro Mímico Digital com um método de estimação fasorial, o método FDFT, com o objetivo de diminuir a influência da componente DC de decaimento exponencial e estimar o fasor da componente fundamental do sinal.

3.4.5 Algoritmo baseado nos Mínimos Quadrados

O algoritmo dos Mínimos Quadrados tem como fundamento a minimização de uma função de concordância entre os pontos reais do sinal e os pontos obtidos a partir da função que descreve o modelo do sinal. Neste algoritmo, é utilizado o modelo matemático do sinal contendo componente fundamental, harmônicas e componente DC de decaimento exponencial. A aproximação da componente DC de decaimento exponencial é obtida a partir do truncamento da série de Taylor. O modelo do sinal é expresso pela Equação (46):

$$y_m = K_1 e^{-\tau t} + \sum_{n=1}^m [K_{2n} \sin(n\omega t) + K_{2n+1} \cos(n\omega t)], \quad (46)$$

em que $K_1, K_2, \dots, K_{2n+1}$ são os parâmetros incógnitos, m é o número de harmônicas a serem consideradas, τ é a constante de decaimento e ω é a frequência angular do sinal.

3.4.6 Algoritmo baseado na Transformada Wavelet

Segundo MAGNAGO e ABUR (1998), a Transformada Wavelet é uma transformação linear muito parecida com a transformada de Fourier, porém com uma diferença importante: permite a localização temporal de diferentes componentes de frequência de um determinado sinal.

No caso da Transformada Wavelet, as funções de análise, que são chamadas de *wavelets*, ajustarão suas larguras de tempo para a sua frequência, de modo que as ondas de frequência mais altas serão muito estreitas e as mais baixas serão mais amplas. Esta propriedade de multi-resolução é particularmente útil para analisar transitórios de faltas que contêm componentes de alta frequência localizados superpostos em sinais de frequência de energia. Assim, a Transformada Wavelet é mais adequada para a análise de sinais que contêm distúrbios de alta frequência de curta duração superpostos em formas de onda contínuas de baixa frequência em virtude desta capacidade de zoom.

A implementação real da Transformada Discreta de Wavelet envolve pares sucessivos de filtros passa-alta e passa-baixa em cada etapa de escala da Transformada Wavelet. Isso pode ser pensado como aproximações sucessivas da mesma função, cada aproximação fornecendo a informação incremental relacionada a uma escala específica (faixa de frequência), a primeira escala cobrindo uma ampla faixa de frequência na extremidade de alta frequência do espectro e as escalas mais altas cobrindo a extremidade inferior do espectro de frequência, mas com bandas de banda progressivamente mais curtas (MAGNAGO e ABUR, 1998).

3.4.7 Algoritmo de Guo

No trabalho de GUO *et al.* (2003) foi proposto um algoritmo para eliminar a componente DC de decaimento exponencial, através de uma estratégia recursiva de estimação dos fasores.

$$x_{x_{atual}}(n) = X_x(n) \quad (47)$$

$$X_{y_{atual}}(n) = X_y(n) + \frac{2}{N} \operatorname{cotgh}\left(\frac{\pi}{N}\right) (PS_2 - PS_1), \quad (48)$$

em que

$$PS_1 = \sum_{k=1}^{N/2} x(2k - 1) \quad (49)$$

$$PS_2 = \sum_{k=1}^{N/2} x(2k), \quad (50)$$

e

$$X_x(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (51)$$

$$X_y(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right). \quad (52)$$

$X_x(n)$ e $X_y(n)$ correspondem as componentes real e imaginária do fasor, e através delas é realizada a estimação do mesmo.

3.4.8 Algoritmo de Campos

O trabalho de CAMPOS (2016) propõe um novo método de estimação fasorial a ser usado em relé de distância e o compara com outras técnicas de estimação já conhecidas para avaliar se o novo algoritmo é capaz de atenuar as componentes de

frequências não fundamental (harmônicas e componente DC de decaimento exponencial), sem comprometer o desempenho e a rapidez da resposta. Em seu trabalho, os métodos comparados foram o método de Fourier de um ciclo (FDFT), Cosseno Modificado, Filtro Mímico combinado com FDFT e o Algoritmo de Guo. O desempenho dos métodos foi avaliado através de sinais analíticos contendo componentes fundamental, harmônicas e DC de decaimento exponencial e através de simulações de falta através do *software* ATP. O método de CAMPOS (2016) foi o que se mostrou menos sensível aos componentes de frequência não fundamental.

No método de CAMPOS (2016), são utilizadas duas cascatas de subfiltros de segunda ordem, conforme mostrado na Figura 14. Estas cascatas, quando combinadas, preservam a componente fundamental, tendo um ganho unitário nesta componente e atenuam as componentes não fundamentais dos sinais. As principais características destas cascatas de subfiltros são descritas a seguir.

O objetivo de inserir um filtro passa-faixa, denominado na Figura 14 de subfiltro H_{bp} , é melhorar o processo de filtragem dos sinais, tornando a resposta em frequência do método mais seletiva, com banda de passagem mais estreita em torno da componente fundamental.

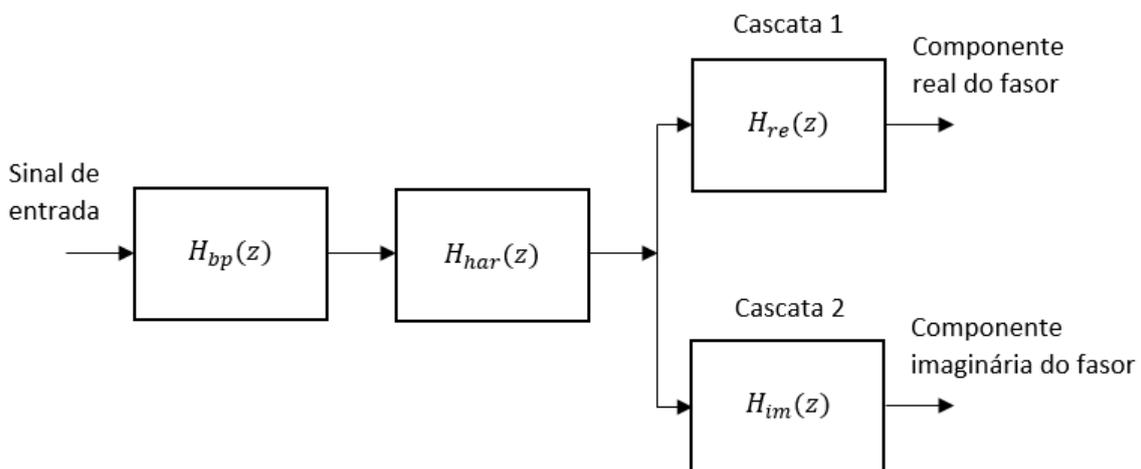


Figura 14 – Esquema representativo do método de Campos (2016).

Fonte: Adaptado de CAMPOS (2016).

A função de transferência de um filtro passa-faixa de segunda ordem é dada por:

$$H_{bp}(s) = \frac{(\omega_0/Q)s}{s^2 + (\omega_0/Q)s + \omega_0^2} \quad (52)$$

em que ω_o é a frequência central em rad/s; Q é o fator de qualidade do filtro, dado por $Q = f_o/\Delta f$, onde Δf é a banda de passagem do filtro em Hz, e f_o é a frequência central em Hz.

A resposta ao degrau deste filtro é dada por:

$$F(s) = \frac{(\omega_o/Q)}{s^2 + (\omega_o/Q)s + \omega_o^2} \quad (53)$$

cuja transformada inversa de Laplace é dada por:

$$f(t) = \frac{2}{\sqrt{(4Q^2 - 1)}} \left[\text{sen} \left(\frac{\omega_o}{2Q} \sqrt{(4Q^2 - 1)} t \right) e^{-(\omega_o/2Q)t} \right]. \quad (54)$$

O *setting time* (t_s) ou tempo de acomodação é o tempo requerido para a resposta a um degrau unitário atingir e permanecer com uma porcentagem específica, igual a 2% do valor final. Este valor é utilizado como parâmetro para o projeto do subfiltro passa-faixa H_{bp} .

Considerando que o máximo valor da função seno é “1”, e que a função descrita tem valor de 0,02 para $t = t_s$ ($f(t_s) = 0,02$), pode-se escrever uma equação que relaciona o tempo de acomodação (t_s) a banda de passagem do filtro, dada por:

$$t_s = -\frac{1}{\pi \Delta f} \ln \left[0,01 \sqrt{4 \left(\frac{f_o^2}{\Delta f} \right)^2 - 1} \right]. \quad (55)$$

Para uma frequência central de 60 Hz e tempo de acomodação (t_s) igual a 16,67 ms, a banda de passagem (Δf) encontrada foi de 90,69 Hz, utilizando o Método de Gauss com 19 iterações, com uma estimativa inicial de 60 Hz.

Aplicando a transformada bilinear a função de transferência do filtro passa-faixa, a função de transferência no domínio z é igual a:

$$H_{bp}(z) = \frac{a_1 + a_2 z^{-1} + a_3 z^{-2}}{1 + a_4 z^{-1} + a_5 z^{-2}}, \quad (56)$$

os coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e a_5 do subfiltro são mostrados na Tabela 2. Estes coeficientes são calculados com frequência de amostragem igual a 960 Hz.

Tabela 2 – Coeficientes de $H_{bp}(z)$

Coeficientes	Valores
a1	$2,22 \cdot 10^{-1}$
a2	0
a3	$2,22 \cdot 10^{-1}$
a4	-1,44
a5	$5,55 \cdot 10^{-1}$

Fonte: Adaptado de CAMPOS (2016).

Com uma banda de passagem de 90,69 Hz não é possível obter um ganho igual a zero para as componentes harmônicas do sinal a ser filtrado. Por isso, para obter este efeito é necessário associar outros subfiltros. Logo, no método proposto, o subfiltro $H_{bp}(z)$ é associado a outros subfiltros, descritos a seguir.

Os subfiltros de componentes harmônicas $H_k(z)$ apresentam ganho unitário na componente fundamental (ω_1) e ganho zero nas harmônicas múltiplas da fundamental de ordem $\omega_k = k\omega_1$, em que k é um número inteiro. A função de transferência desses subfiltros é dada pela Equação (57) (KUŠLJEVIĆ, 2008):

$$H_k(z) = \frac{1 - 2 \cos(\omega_k \Delta s) z^{-1} + z^{-2}}{|1 - 2 \cos(\omega_k \Delta s) z_1^{-1} + z_1^{-2}|} \quad (57)$$

em que $z^{-1} = e^{-j2\pi f/f_s}$, $z_1^{-1} = e^{-j2\pi f_1/f_s}$, f é o vetor de frequências em Hz, e f_1 é a frequência fundamental, f_s é a frequência de amostragem em Hz, e $\Delta s = 1/f_s$ é a taxa de amostragem.

Na Equação (58) é mostrada a função de transferência $H_{har}(z)$, que corresponde ao produto dos subfiltros $H_k(z)$ de componentes harmônicas de segunda até a sétima ordem.

$$H_{har}(z) = \prod_{k=2}^7 \frac{1 - 2 \cos(\omega_k \Delta t) z^{-1} + z^{-2}}{|1 - 2 \cos(\omega_k \Delta s) z_1^{-1} + z_1^{-2}|} \quad (58)$$

O subfiltro $H_{im}(z)$ na Figura 14 apresenta ganho zero na componente DC e na frequência “ $\omega_s/2$ ”, sendo ω_s sua frequência de amostragem em rad/s. Este subfiltro possui ganho unitário na frequência fundamental e função de transferência dada por (KUŠLJEVIĆ, 2008):

$$H_{im}(z) = \frac{1 - z^{-2}}{|1 - z_1^{-2}|}. \quad (59)$$

Como no processo de estimação fasorial é necessário ter duas componentes ortogonais do sinal para encontrar seu módulo e fase, é primordial utilizar dois filtros ortogonais que possam possibilitar esse cálculo. O subfiltro $H_{re}(z)$ é ortogonal ao subfiltro $H_{im}(z)$ (CAMPOS *et al.*, 2017) e possui ganho unitário na frequência fundamental. Sua equação de transferência é dada por:

$$H_{re}(z) = \frac{1 - 2 \operatorname{tg}(2\omega_1 \Delta s) z^{-1} + z^{-2}}{|1 - 2 \operatorname{tg}(2\omega_1 \Delta s) z_1^{-1} + z_1^{-2}|}. \quad (60)$$

Além da característica de ortogonalidade do filtro $H_{re}(z)$ em relação à $H_{im}(z)$, ele possui a vantagem de atenuar componentes de baixas frequências do sinal, contribuindo para reduzir o efeito da componente DC de decaimento exponencial no processo de estimação de fasores.

Na Figura 14 são mostradas duas cascatas de subfiltros que são utilizadas para calcular o fasor dos sinais. A cascata de subfiltros 1 é composta pelos subfiltros $H_{bp}(z)$, $H_{har}(z)$ e $H_{re}(z)$, cuja função de transferência é dada por:

$$H_{c1}(z) = H_{bp}(z)H_{har}(z)H_{re}(z). \quad (61)$$

A cascata de subfiltros 2 é composta pelos subfiltros $H_{bp}(z)$, $H_{bp}(z)$ e $H_{im}(z)$, cuja função de transferência é dada por:

$$H_{c2}(z) = H_{bp}(z)H_{har}(z)H_{im}(z). \quad (62)$$

A resposta do filtro $H_{c1}(z)$ a uma entrada $x(n)$ é dada por:

$$X_x(n) = x(n)H_{c1}(z). \quad (63)$$

A resposta do filtro $H_{c2}(z)$ a uma entrada $x(n)$ é dada por:

$$X_y(n) = x(n)H_{c2}(z). \quad (64)$$

Pode-se mostrar que as componentes real X_x e imaginária X_y são ortogonais (CAMPOS *et al.*, 2017). Então, o módulo $|\hat{X}|$ e fase $\angle X$ do fasor de um sinal $x(n)$ podem ser calculados por:

$$|\hat{X}| = \sqrt{X_x^2 + X_y^2} \quad (65)$$

$$\angle X = \arctg(X_y/X_x). \quad (66)$$

CAPÍTULO 4 METODOLOGIA PARA AS SIMULAÇÕES

Com o desenvolvimento dos sistemas computacionais, tornou-se comum utilizar simulações como ferramenta para analisar o comportamento de sistemas elétricos de potência frente às perturbações, pois a complexidade, o tamanho dos sistemas e os níveis de tensão e corrente tornam a análise prática impossível. A simulação é uma ferramenta de extrema importância na análise de sistemas elétricos, principalmente para os sistemas de proteção de linhas de transmissão (MOURA, 2012).

Os programas mais utilizados para a análise de transitórios em sistemas elétricos de potência são os da família *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) como o *Alternative Transients Program* (ATP). O *software* ATP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatoração triangular otimizada de matrizes (MOURA, 2012).

4.1 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO UTILIZANDO SINAIS ANALÍTICOS

Na primeira parte deste trabalho, sinais analíticos foram gerados no *software* MATLAB[®]. Sinais analíticos são úteis para inserir componentes de frequência não-fundamental, a exemplo de componentes DC de decaimento exponencial com diferentes constantes de tempo.

Os algoritmos utilizados na estimação fasorial desses sinais foram o algoritmo proposto por CAMPOS (2016) e quatro algoritmos clássicos de estimação de fasores: o algoritmo de Fourier, cosseno modificado, mímico digital e algoritmo de Guo.

Para melhor avaliar a resposta no tempo e comparar o desempenho dos algoritmos em estudo, foram utilizados os índices de desempenho apresentados nos trabalhos de BENMOUYAL (1995) e MACHADO *et al.* (2011).

Em seu trabalho, BENMOUYAL (1995) utilizou um índice que quantifica a oscilação da resposta no tempo do método avaliado em torno do valor correto para

determinação de um determinado fasor. A Equação (67) apresenta o índice definido em BENMOUYAL (1995):

$$ID_1 = \sum_{k=k_0}^{N_T} |amp - \alpha(k)|, \quad (67)$$

em que “*amp*” é o parâmetro a ser estimado, α a sua estimativa dada pelo módulo da resposta no tempo do método avaliado, k_0 é a amostra em que α atinge ou excede o valor de “*amp*”. A variável N_T representa o número de amostras utilizadas na avaliação do algoritmo a partir do instante em que α atinge ou excede o valor de “*amp*”. Nesse trabalho, a resposta no tempo dos métodos foi avaliada durante 192 amostras, que corresponde a 12 ciclos de amostras, considerando que os métodos utilizam 16 amostras por ciclo no processo de estimação fasorial.

Em seu trabalho, BENMOUYAL (1995) utilizou outro índice, que quantifica o percentual de *overshoot* na resposta no tempo dos métodos avaliados. O *overshoot* corresponde quantitativamente ao valor que a respectiva variável ultrapassa o valor final, expresso como uma porcentagem do valor final. Esse índice é definido pela Equação (68) e quanto menor o valor de ID_2 , menor será o percentual de *overshoot* da resposta do método.

$$ID_2 = \max(\alpha(k) - amp) * 100 (\%). \quad (68)$$

O terceiro índice, mostrado na Equação (69), é definido no trabalho de MACHADO *et al.* (2011). Este índice corresponde a velocidade de convergência na estimação fasorial:

$$ID_3 = \frac{N_{conv} - N_{amos}}{N_{amos}}, \quad (69)$$

em que N_{amos} é o número de amostras por ciclo utilizadas pelo método avaliado e N_{conv} é o número de amostras que são necessárias para que a resposta convergir. Neste trabalho, a tolerância estabelecida para esse índice é de $\pm 5\%$ do valor de “*amp*”.

4.2 SIMULAÇÕES DE FALTAS EM LINHA DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Na segunda parte deste trabalho, simulações de faltas foram realizadas no ATP. Os sinais de tensão e corrente foram armazenados em arquivos, criando um banco de dados dos diversos casos analisados em linhas de transmissão com e sem compensação série. Nas linhas com compensação série, foram simuladas diversas configurações, considerando três graus de compensação e diferentes tipos de falta (monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas). Além disso, as faltas foram simuladas em diversos locais e com ângulos de incidência diferentes, totalizando 288 casos.

Estes arquivos foram ajustados para que pudessem ser utilizados como dados de entrada para o relé de distância autopolarizado implementado no MATLAB[®], baseado na arquitetura básica de um relé de distância real.

Os algoritmos clássicos de estimação de fasores (algoritmo de Fourier, cosseno modificado, filtro mímico digital combinado com Fourier e algoritmo de Guo), bem como o algoritmo de CAMPOS (2016), foram implementados, com o objetivo de testar a influência dos métodos na atuação de um relé digital de distância. Esses algoritmos têm como objetivo filtrar os dados de saída das simulações no ATP, calculando os fasores de tensão e corrente de sequência positiva e consequentemente a impedância de sequência positiva.

4.2.1 Caso Base

O sistema base escolhido, tomando como referência o trabalho de MOURA (2012), é um sistema simplificado de duas barras com tensão nominal de 230 kV, e uma linha de transmissão de 300 km de comprimento, conectando os equivalentes de rede em cada barra em suas extremidades, como mostrado na Figura 7. O Transformador de Potencial Capacitivo (TPC), com tensão secundária de 115 V, e o Transformador de Corrente (TC), com razão de transformação de 2000:5, foram instalados na Barra 1, e serão representados nas simulações pelo modelo proposto pelo IEEE Power System Relaying Committee de 2004.

Apesar de terem sido utilizados TC e TPC no sistema, estes foram considerados ideais, visto que podem ter influência na estimação fasorial (CAMPOS, 2016). Assim,

os sinais de entrada avaliados são referentes às tensões e correntes obtidas no primário dos modelos de transformadores de instrumentos e respectivamente referenciadas ao secundário.

As impedâncias entre as Fontes e as Barras Z_S e Z_R são as respectivas impedâncias das Fontes S e R. Os valores dos parâmetros mostrados na Figura 15 são apresentados na Tabela 3.

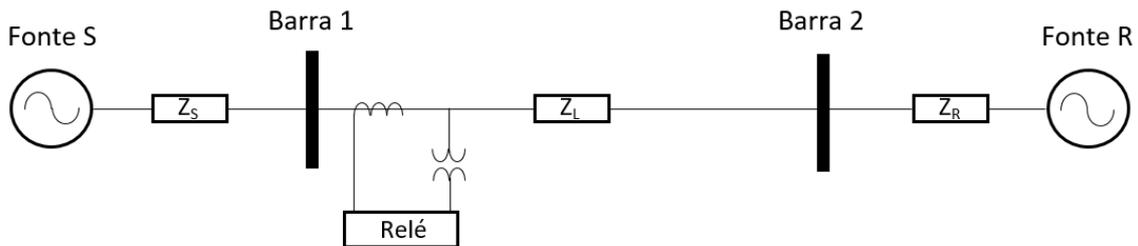


Figura 15 – Modelo base do sistema elétrico.

Fonte: Adaptado de MOURA (2012).

Tabela 3 – Dados do sistema elétrico simulado.

Linha de Transmissão	Fonte S	Fonte R
$Z_{L,0} = 0,532 + j1,541\Omega/\text{km}$	$V_S = 1,02\angle 0^\circ \text{ pu}$	$V_R = 0,98\angle 10^\circ \text{ pu}$
$Y_{L,0} = j2,293\text{U}/\text{km}$	$Z_{S,0} = 1,014 + j18,754\Omega$	$Z_{R,0} = 1,127 + j20,838\Omega$
$Z_{L,1} = 0,098 + j0,510\Omega/\text{km}$	$Z_{S,1} = 0,871 + j25,661\Omega$	$Z_{R,1} = 0,968 + j28,513\Omega$
$Y_{L,0} = j3,252\text{U}/\text{km}$		

Fonte: MOURA (2012).

4.2.2 Linha com Compensação Série

As análises do sistema com compensação série foram realizadas com o banco de capacitores instalado de duas formas diferentes: com todo o grau de compensação localizado no meio da linha e com o grau de compensação distribuído igualmente nas extremidades da linha. As Figuras 16 e 17 apresentam os esquemas das linhas de transmissão analisadas, com a compensação série localizada no meio e com a compensação série localizada nas extremidades, respectivamente.

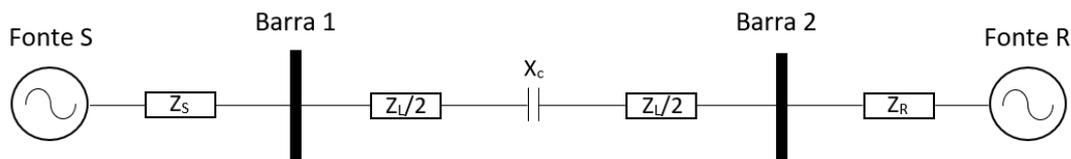


Figura 16 – Esquema da linha de transmissão com compensação série no meio.

Fonte: Adaptado de MOURA (2012).

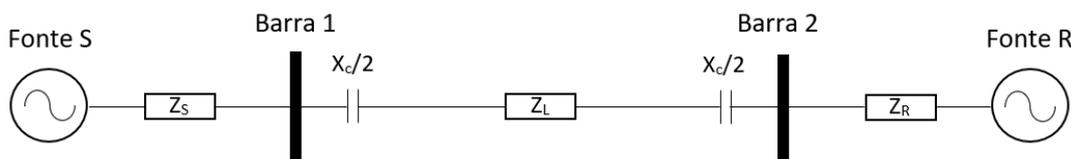


Figura 17 – Esquema da linha de transmissão com compensação série nas extremidades.

Fonte: Adaptado de MOURA (2012).

4.2.3 Criação do Banco de Dados

Nas simulações realizadas utilizando o *software* ATP, foi considerado um passo de cálculo de 10,416 μ s, correspondente à uma taxa de amostragem de 1600 amostras por ciclo. Os sinais são convertidos, utilizando um processo de descarte de amostras, para uma taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo, quantidade esta comumente presente nos relés digitais de distância, tomando como referência o trabalho de MOURA (2012).

Para a criação do banco de dados, em ambos os casos da linha com compensação série, foram considerados diferentes graus de compensação, tipos de falta e distâncias de falta. Para cada caso, foram ainda considerados três ângulos de incidência distintos (0° , 45° e 90°), com referência na tensão da fase A, resultando em um banco de dados com 288 casos. A resistência para a terra e entre fases foi de 0,00001 Ω . Os valores dos sinais analisados são valores de pico. A Tabela 4 apresenta as variáveis de simulação.

Tabela 4 – Combinações de faltas realizadas nas linhas com compensação série.

Variáveis de Simulação	Valores Escolhidos
Grau de Compensação (%)	40; 60; 80
Tipos de Falta	AT; AB; ABT; ABC
Localização da Falta (km)	10; 75; 150; 225;
Ângulos de Incidência ($^\circ$)	0; 45; 90

Fonte: Autoria própria (2018).

De acordo com ANDERSON & FARMER (1996), aplicam-se majoritariamente sistemas de compensação com graus entre 40 a 70%. Bancos de capacitores fora dessa faixa também são possíveis, mas a compensação é limitada para no máximo 80% (MILLER,1982) e no mínimo 25%, ponto em que se torna economicamente inviável (OLIVEIRA, 2007). Tendo em vista tais considerações, os valores de 40%, 60% e 80% foram escolhidos por se mostrarem mais interessantes para esta análise.

A Tabela 5 mostra a combinação de faltas realizadas para a criação do banco de dados das simulações.

Tabela 5 – Combinações de faltas realizadas para as linhas com compensação série.

Grau de Compensação	CS nas Extremidades				CS no Centro				Localização das Faltas
	<i>at</i>	<i>ab</i>	<i>abt</i>	<i>abc</i>	<i>at</i>	<i>ab</i>	<i>abt</i>	<i>Abc</i>	
40%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	10 km
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	75 km
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	150 km
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	225 km
60%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	10 km
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	75 km
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	150 km
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	225 km
80%	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	10 km
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	75 km
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	150 km
	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	225 km

Fonte: Autoria própria (2018).

4.2.4. Modelagem do Relé de Distância

Após a criação do banco de dados, um relé de distância foi implementado no MATLAB®, baseado na arquitetura básica de um relé de distância real. A Figura 18 mostra o esquema do relé implementado.

Como dito anteriormente, os sinais de entrada do relé (tensões e correntes trifásicas) provenientes do ATP foram obtidos no primário do TC e do TPC. No MATLAB®, inicialmente, utilizando as relações de transformação de tensão e corrente dos transformadores para instrumento, essas grandezas foram referenciadas ao

secundário, considerando assim que os transformadores para instrumentos são ideais. Em seguida, passam pela Unidade de Condicionamento de Sinais, após isso, pela Unidade de Aquisição de Dados e só então, são processados pela Unidade de Processamento de Dados. Após isso, os sinais de saída do relé, como os módulos de corrente, tensão e impedância, a distância de falta, o caminho de impedância e os sinais de *trip*, são externados.

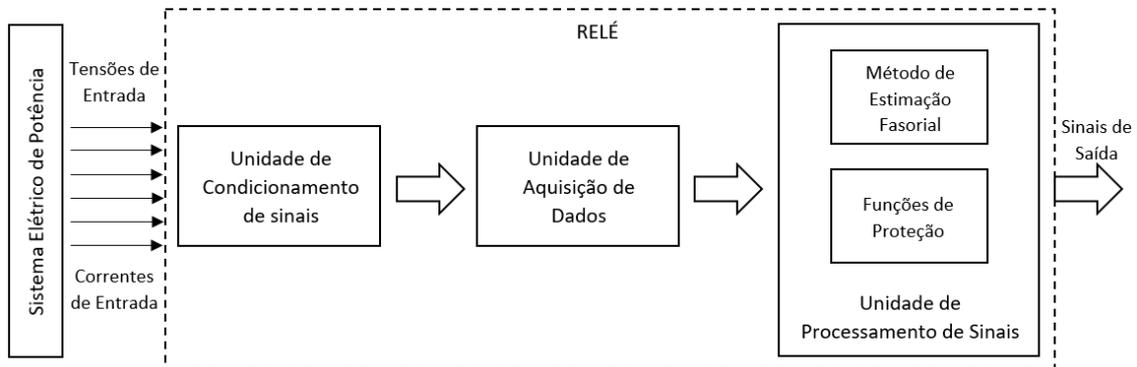


Figura 18 – Esquema representativo do relé modelado.

Fonte: Adaptado de CAMPOS (2016).

A Unidade de Condicionamento de Sinais é composta por um filtro *anti-aliasing* e tem a função de delimitar a banda de frequência dos sinais. Normalmente, são utilizados filtros passa-baixas para esse fim. Nesse trabalho são utilizados filtros passa-baixas Butterworth de 3ª ordem, com frequência de corte de 200 Hz.

A Unidade de Aquisição de Dados é responsável por digitalizar os sinais analógicos oriundos da unidade de condicionamento de sinais. Assim, através de um processo de descarte de amostras, o sinal proveniente do ATP, que está com o passo de tempo de 10 μ s, foi convertido para a taxa de amostragem de 16 amostras por ciclo.

Na Unidade de Processamento de Sinais, os fasores de tensão e corrente são calculados, a partir dos métodos de estimação fasorial mencionados anteriormente. Em seguida, os fasores são utilizados para calcular os valores de impedância, determinar os sinais de *trip*, entre outros.

Foi utilizada a característica MHO para o relé de distância autopolarizado e o comparador Cosseno foi implementado no MATLAB® para determinar se a localização da falta está ou não dentro da zona de atuação do relé.

CAPÍTULO 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentadas comparações entre cinco métodos de estimação fasorial, a saber: o método de Fourier de um ciclo, o método Cosseno Modificado, o método de Fourier de um ciclo combinado com o filtro Mímico, o algoritmo de Guo e o algoritmo de CAMPOS (2016), utilizando sinais obtidos através de duas abordagens.

Para avaliar o desempenho dos métodos em relação a sua resposta no tempo, foram utilizados índices de desempenho, tendo sinais analíticos como sinais de entrada, emulados através do *software* MATLAB®.

Além disso, foram simuladas faltas em uma linha de transmissão com compensação série, através do *software* ATP. Os algoritmos foram utilizados na proteção de distância, modelada utilizando o *software* MATLAB®, e as comparações dos resultados também são apresentadas nesse capítulo.

5.1 SIMULAÇÕES COM SINAIS ANALÍTICOS ATRAVÉS DO *SOFTWARE* MATLAB®

Juntamente com os índices de desempenho, sinais analíticos são utilizados na análise da resposta dos métodos de estimação fasorial. Esses sinais são úteis quando se deseja garantir a presença de determinadas componentes harmônicas, sub-harmônicas e simular a resposta dos filtros diante de diferentes constantes de tempo da componente DC de decaimento exponencial (CAMPOS, 2016).

5.1.1 Sinais Analíticos

De acordo com BAINS & ZADEH (2015), em condições de falta, um sinal de tensão e corrente pode ser expressado, no domínio de tempo discreto, por:

$$i[n] = A_1 \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} n + \phi_1\right) + \sum_{k=2}^L A_k \cdot \cos\left(2\pi k \frac{f_1}{f_s} n + \phi_k\right) + \sum_{r=1}^M B_r \cdot e^{-\frac{n}{T_s \tau_r}} \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_r^S}{f_s} n + \phi_r^S\right) + \text{ruído}, \quad (70)$$

onde n é o total de amostras registradas; L é o número total de harmônicos fundamentais e inteiros; M é o número total de componentes sub-harmônicas; f_s é a frequência de amostragem; f_1 é a frequência fundamental; A_k e ϕ_k são a magnitude e o ângulo de fase do componente harmônico k -ésimo; $k = 1$ representa o componente fundamental; e B_r , τ_r , f_r^s e ϕ_r^s são a magnitude, a constante de tempo, a frequência e o ângulo de fase do componente de frequência sub-harmônica, respectivamente.

Para avaliar a influência das componentes contidas em sinais de falta em sistemas com compensação série em métodos de estimação fasorial, através do *software* MATLAB®, foram gerados dois tipos de sinais. Os sinais gerados contêm componentes que normalmente estão presentes em sinais de falta de sistemas com essas características.

O primeiro sinal, o sinal $s_1[n]$, contém a componente fundamental somada a componentes sub-harmônicas. As componentes de frequência sub-harmônicas podem ser obtidas através da Equação (71):

$$s_1[n] = \sum_{r=1}^M B_r \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_r^s}{f_s} n + \phi_r^s\right). \quad (71)$$

Considerando que $f_s = f_1 \cdot N$, $\frac{2\pi}{N} = \theta$ e $B_r = \frac{1}{B}$:

$$s_1[n] = \sum_{r=1}^M B_r \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_r^s}{f_1 \cdot N} n + \phi_r^s\right) = \frac{1}{B} \sum_{r=1}^M \cos\left(\theta \cdot \frac{f_r^s}{f_1} \cdot n + \phi_r^s\right). \quad (72)$$

O segundo sinal, o sinal $s_2[n]$, contém a componente fundamental somada a componentes sub-harmônicas multiplicadas pela componente exponencial, que podem ser obtidas através da Equação (73):

$$s_2[n] = \sum_{r=1}^M B_r \cdot e^{-\frac{n}{f_s \tau_r}} \cdot \cos\left(2\pi \frac{f_r^s}{f_s} n + \phi_r^s\right). \quad (73)$$

Considerando que $f_s = f_1 \cdot N$, $\frac{2\pi}{N} = \theta$ e $B_r = \frac{1}{B}$, a componente resultante da multiplicação entre as componentes sub-harmônicas e a componente exponencial será dada pela Equação (74):

$$s_2[n] = \frac{1}{B} \sum_{r=1}^M e^{-\frac{n}{f_1 \cdot N \cdot \tau}} \cdot \cos\left(\theta \cdot \frac{f_r^s}{f_1} \cdot n + \phi_r^s\right). \quad (74)$$

Como as frequências sub-harmônicas variam geralmente na faixa entre 25 e 30 Hz (LAMBERT *et al.*, 1994), foram escolhidos três valores de sub-harmônicas para compor ambos os sinais: 25, 27,5 e 30 Hz. Além disso, foram considerados três valores para o peso das componentes sub-harmônicas B (5, 10 e 20) e seis valores de τ (0,5, 1, 2, 3, 4, 5). A frequência fundamental f_1 é 60 Hz e a frequência de amostragem f_s é 960 Hz.

5.1.2 Índices de Desempenho

Nas Tabelas 6, 7 e 8, são mostrados os resultados dos algoritmos de estimação fasorial para os índices ID_1 , ID_2 e ID_3 apresentados no Capítulo 4, considerando o sinal de entrada igual a $s_1[n]$ e variando os valores de B .

Tabela 6 – Resultados obtidos para o índice ID_1 com entrada $s_1[n]$.

B	Campos	FDFT	Cosseno M.	Mímico+FDFT	Guo
5	13,4245	19,3061	10,1521	9,7067	12,7311
10	5,4429	9,4877	5,0585	4,8852	6,3142
20	2,7178	4,7544	2,5457	2,5098	3,1928

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 7 – Resultados obtidos para o índice ID_2 com entrada $s_1[n]$.

B	Campos	FDFT	Cosseno M.	Mímico+FDFT	Guo
5	25,6874	42,1677	21,5293	22,7323	58,2712
10	12,8155	20,9384	10,7452	15,9603	39,5904
20	6,3961	10,4225	6,8154	13,1898	30,9275

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8 – Resultados obtidos para o índice ID_3 com entrada $s_1[n]$.

B	Campos	FDFT	Cosseno M.	Mímico+FDFT	Guo
5	8,0000	7,6875	7,8750	7,8125	7,3750
10	7,0625	6,9375	4,8750	5,8750	4,6875
20	3,0625	6,0000	2,9375	1,8750	2,8125

Fonte: Autoria Própria.

Nas Figuras 19, 20 e 21 são mostradas as amplitudes do fasor do sinal $s_1[n]$, para os três valores de B em estudo. É possível observar que o algoritmo de Guo apresenta o pior desempenho em relação ao *overshoot* e o FDFT apresenta maior oscilação em torno da resposta.

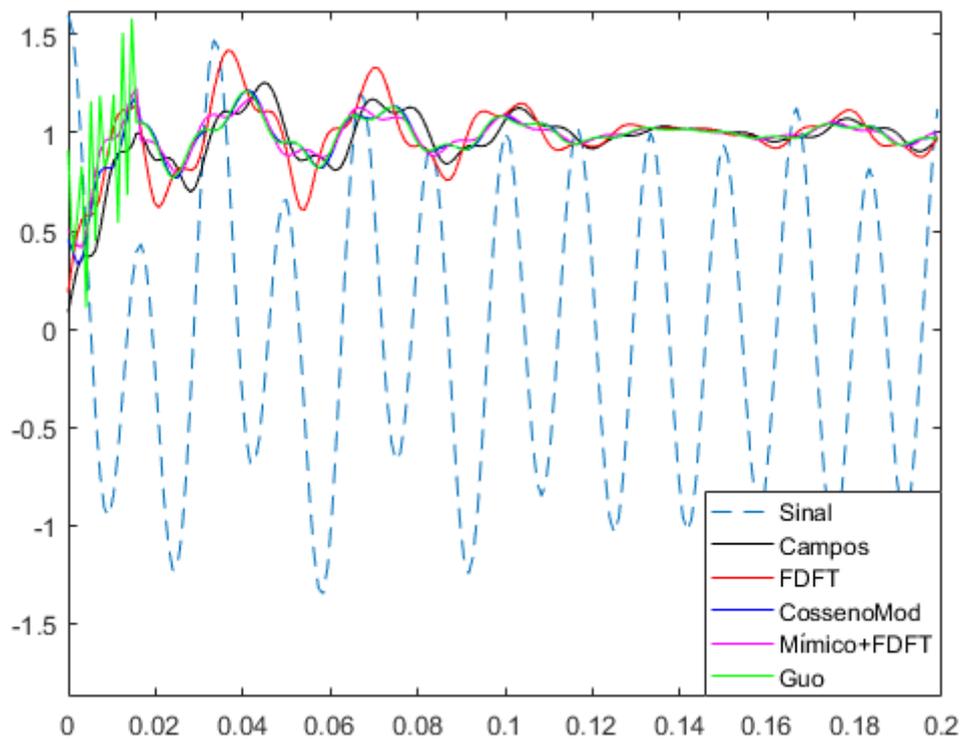


Figura 19 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s_1[n]$ e $B = 5$.

Fonte: Autoria Própria.

Em relação ao índice ID_1 , pode-se observar que, quanto menor o peso da componente sub-harmônica, menor a oscilação em torno do valor correto. Para $B = 5$, $B = 10$ e $B = 20$, o método FDFT obteve pior resultado, apresentando os maiores valores para o ID_1 , sendo o mais susceptível a componentes sub-harmônicas. O algoritmo de Guo também apresentou valores elevados para esse índice, enquanto os outros métodos competiram em relação ao desempenho.

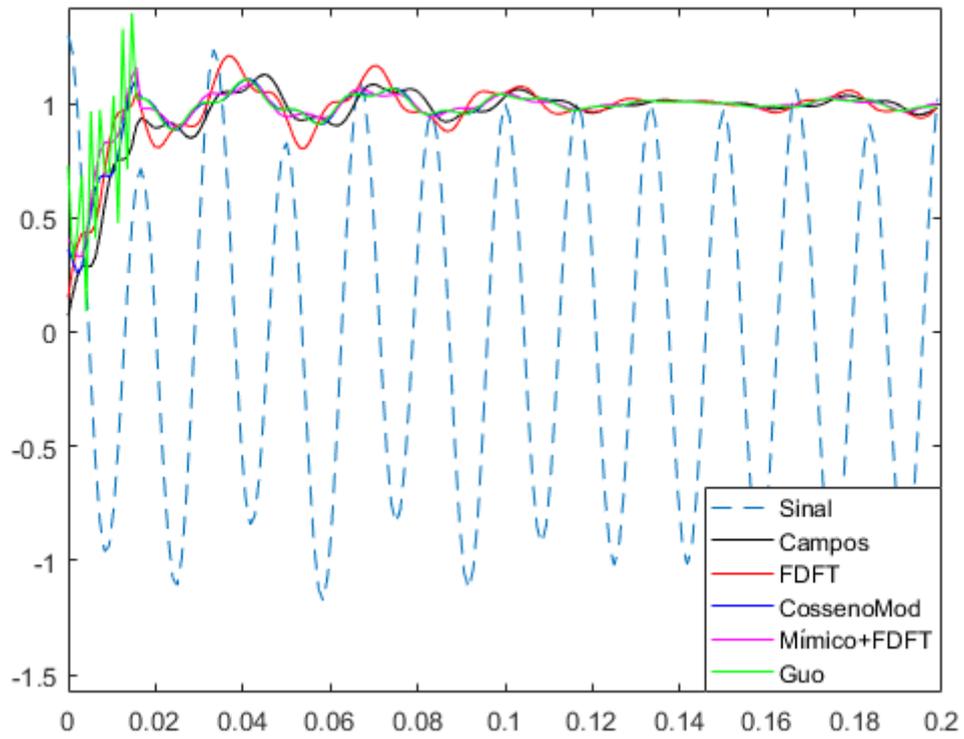


Figura 20 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s_1[n]$ e $B = 10$.

Fonte: Autoria Própria.

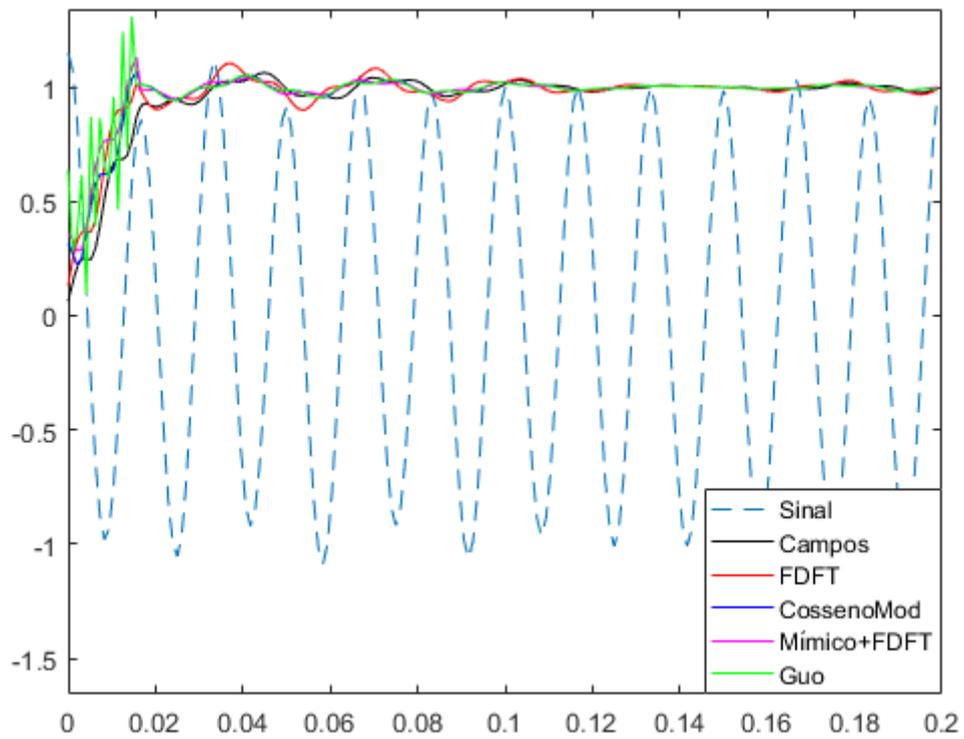


Figura 21 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s_1[n]$ e $B = 20$.

Fonte: Autoria Própria.

Em relação ao índice ID_2 , pode-se observar que o Cosseno Modificado obteve menor índice de *overshoot* em relação aos outros métodos avaliados, seguido pelo método de Campos; enquanto o algoritmo de Guo foi o mais afetado, com maior índice.

Já em relação ao índice ID_3 , todos os métodos tiveram suas velocidades de convergência diminuídas com o aumento de B . O método FDFT foi o que obteve pior desempenho na situação em que B é igual a 20.

Nas Tabelas 9, 10 e 11, são mostrados os resultados dos algoritmos de estimação fasorial para os índices ID_1 , ID_2 e ID_3 , considerando o sinal de entrada igual a $s_2[n]$ e variando os valores de B e de τ . Nas Figuras 22, 23 e 24 são mostradas as amplitudes estimadas do fasor, para o sinal $s_2[n]$.

Tabela 9 – Resultados obtidos para o índice ID_1 com entrada $s_2[n]$.

B	Ciclos	Campos	FDFT	Cosseno M.	Mímico+FDFT	Guo
5	0,5	0,6447	1,1871	1,3405	1,3542	4,2333
	1	1,6047	2,7404	1,9446	1,7385	4,7910
	2	3,4241	5,3770	3,0398	2,7788	5,8203
	3	4,9203	7,3597	3,9722	3,7336	6,7265
	4	6,0443	8,8685	4,7224	4,5139	7,4583
	5	6,9147	10,0503	5,3183	5,1311	8,0406
	Média	3,925477	5,930515	3,389632	3,20833	6,17834
10	0,5	0,0987	0,4686	0,6458	0,7144	2,0385
	1	0,2728	1,2113	0,9424	0,9017	2,3261
	2	0,8873	2,5042	1,4904	1,4205	2,8512
	3	1,5158	3,4838	1,9558	1,8988	3,3105
	4	2,0066	4,2417	2,3339	2,2949	3,6788
	5	2,3984	4,8358	2,6364	2,6011	3,9719
	Média	1,196601	2,790879	1,667459	1,638565	3,029504
20	0,5	0,0749	0,2301	0,3324	0,4250	1,0420
	1	0,1514	0,6017	0,4832	0,5177	1,1919
	2	0,4544	1,2535	0,7600	0,7758	1,4593
	3	0,7575	1,7503	0,9952	1,0161	1,6903
	4	1,0028	2,1281	1,1859	1,2142	1,8751
	5	1,1984	2,4236	1,3375	1,3673	2,0222
	Média	0,606587	1,397879	0,849004	0,886032	1,546784

Fonte: Autoria Própria.

Em relação ao índice ID_1 , para o sinal $s_2[n]$, pode-se observar que a oscilação da resposta em torno do valor correto aumenta com o aumento da constante de tempo τ . Para o valor de B igual a 5, a combinação do filtro Mímico com o método FDFT apresenta a menor média dos resultados, mostrando que esse método é menos susceptível a combinação entre a componente DC de decaimento e as componentes sub-harmônicas. Em contrapartida, o algoritmo de Guo e o método FDFT são os mais afetados, apresentando maiores médias de valores. Já para B igual a 10 e B igual a 20, o algoritmo de Campos tem como resultado médias mais baixas que os outros algoritmos avaliados, apresentando menor oscilação em torno do valor correto. O algoritmo de Guo e o método FDFT apresentam os maiores índices médios para ID_1 .

Tabela 10 – Resultados obtidos para o índice ID_2 com entrada $s_2[n]$.

B	Ciclos	Campos	FDFT	Cosseno M.	Mímico+FDFT	Guo
5	0,5	4,4256	16,4246	23,2780	29,9585	61,0686
	1	4,6629	15,8417	22,7073	28,5438	61,0172
	2	10,9527	17,1023	21,4251	26,4785	60,1778
	3	14,5529	23,0627	20,7460	25,4569	59,6885
	4	16,7737	26,8007	20,3462	24,8676	59,3935
	5	18,2655	29,3347	20,0852	24,4864	59,1989
	Média	11,60555	21,42776	21,43131	26,63195	60,09075
10	0,5	0,4189	7,7377	13,2171	20,2128	41,5472
	1	2,3256	6,9595	12,7565	19,3119	41,3377
	2	5,4716	8,4819	11,9698	18,1058	40,7663
	3	7,2712	11,4385	11,5686	17,5181	40,4570
	4	8,3799	13,2945	11,3349	17,1802	40,2740
	5	9,1241	14,5535	11,1831	16,9621	40,1542
	Média	5,498547	10,41095	12,00499	18,21516	40,75608
20	0,5	0,2047	3,7363	8,3304	15,4856	32,0716
	1	1,1578	3,2126	8,0507	14,9818	31,9110
	2	2,7311	4,2215	7,6174	14,3323	31,5801
	3	3,6307	5,6923	7,4002	14,0184	31,4065
	4	4,1846	6,6158	7,2743	13,8383	31,3046
	5	4,5562	7,2425	7,1927	13,7222	31,2381
	Média	2,744182	5,120167	7,64428	14,39642	31,58534

Fonte: Autoria Própria.

Em relação ao índice ID_2 , o algoritmo de Campos apresentou menores médias nas três situações, e se mostrou menos susceptível ao sinal composto pela combinação de componentes sub-harmônicas e componente DC de decaimento exponencial, apresentando menor percentual de *overshoot*. O algoritmo de Guo apresentou as piores médias para os três valores de B , seguido do filtro mímico, em comparação aos outros algoritmos.

Por fim, em relação a velocidade de convergência, o método Mímico combinado com FDFT apresenta menor índice médio para B igual a 5 e 10, apresentando menor tempo de resposta. Para B igual a 20, o menor índice é apresentado pelo algoritmo de Guo. O método mais afetado por esse tipo de sinal, nas três situações, é o FDFT.

Tabela 11 – Resultados obtidos para o índice ID_3 com entrada $s_2[n]$.

B	Ciclos	Campos	FDFT	Cosseno M.	Mímico+FDFT	Guo
5	0,5	2,0000	1,6875	1,8125	1,8125	1,3750
	1	3,0000	2,6875	1,8125	1,8125	2,3750
	2	4,0000	4,6875	2,8750	2,8125	3,3750
	3	4,0000	5,6875	3,8750	3,8125	4,3750
	4	5,0000	5,6875	4,8750	3,8125	5,3750
	5	6,0000	5,6875	4,8750	4,8125	5,3750
Média	4	4,354167	3,354167	3,145833	3,708333	
10	0,5	2,0625	1,9375	1,8750	1,8750	1,6875
	1	2,1250	1,9375	1,8750	1,8750	1,6875
	2	3,1250	3,9375	1,8750	1,8750	1,6875
	3	3,0625	3,9375	2,8750	1,8750	2,6875
	4	4,0625	4,9375	2,8750	2,8750	2,6875
	5	4,0625	4,9375	3,8750	2,8750	3,6875
Média	3,08333333	3,604167	2,541667	2,208333	2,354167	
20	0,5	1,9375	1,0000	1,9375	1,8750	1,8125
	1	2,0625	1,0000	1,9375	1,8750	1,8125
	2	2,0625	2,0000	1,9375	1,8750	1,8125
	3	2,0625	3,0000	1,9375	1,8375	1,8125
	4	2,0625	3,0000	1,9375	1,8750	1,8125
	5	2,0625	4,0000	1,9375	1,8750	1,8125
Média	2,04166667	2,333333	1,9375	1,86875	1,8125	

Fonte: Autoria Própria.

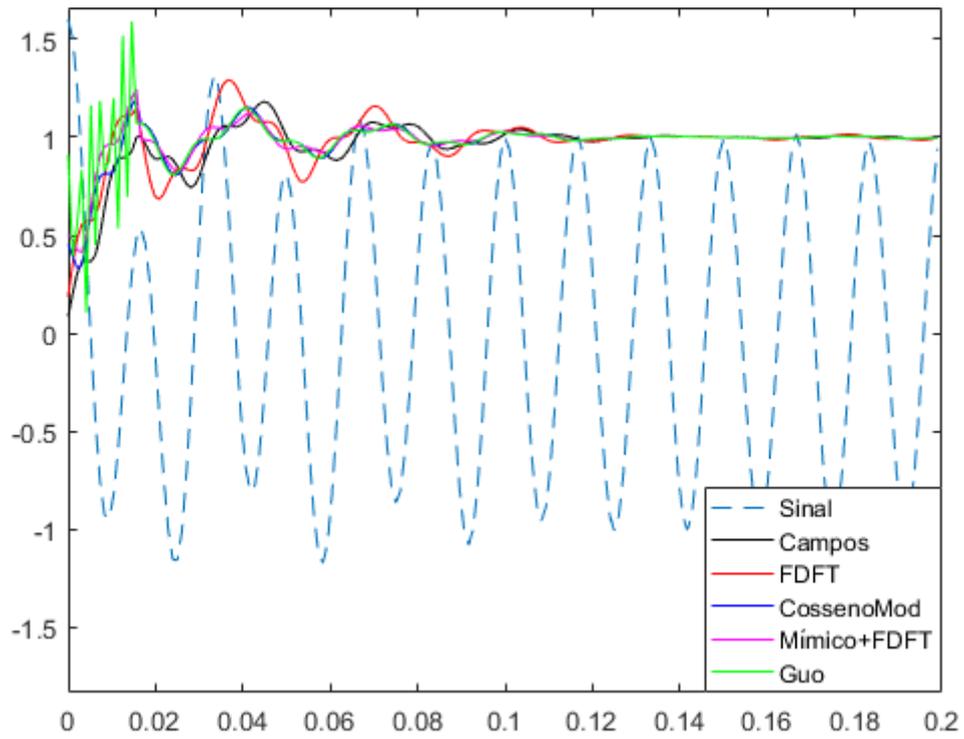


Figura 22 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s_2[n]$, para $B = 5$ e $\tau = 5$.

Fonte: Autoria Própria.

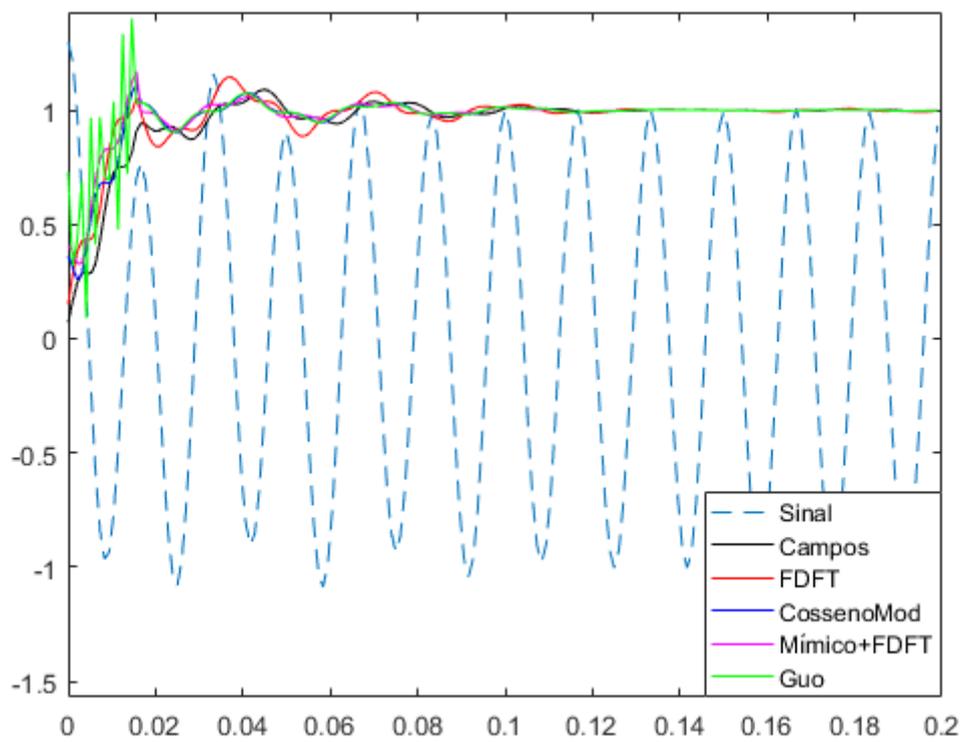


Figura 23 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s_2[n]$, para $B = 10$ e $\tau = 5$.

Fonte: Autoria Própria.

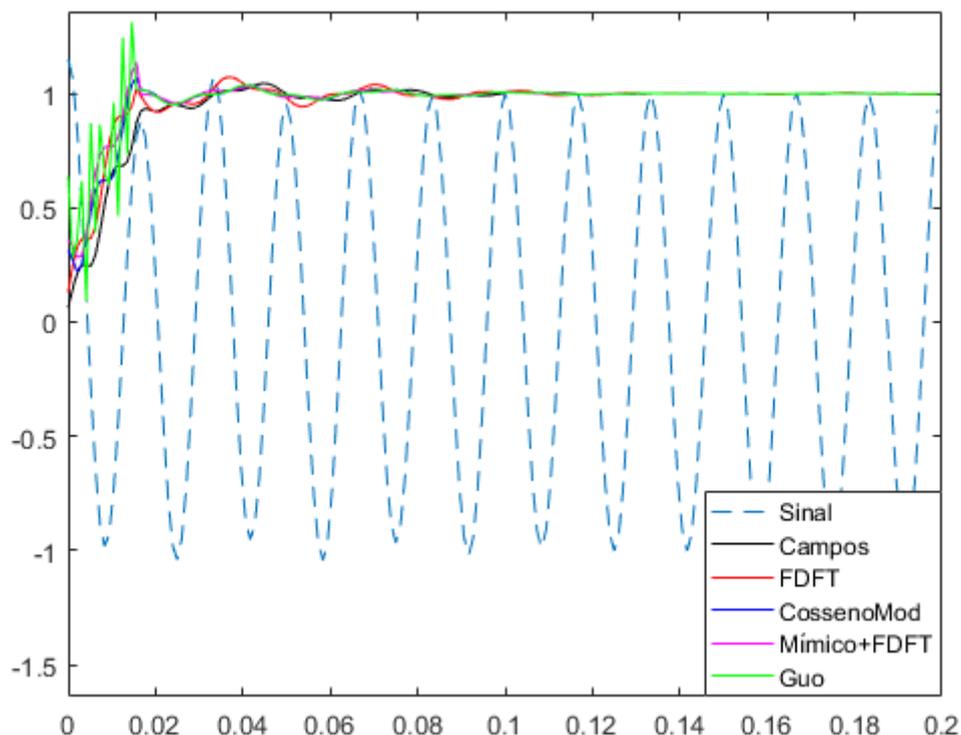


Figura 24 – Amplitude do fasor estimado para o sinal $s_2[n]$, para $B = 20$ e $\tau = 5$.

Fonte: Autoria Própria.

5.2 SIMULAÇÕES DE FALTAS EM LINHA DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

A seguir, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do banco de dados das simulações realizadas no ATP, mostradas na Tabela 5. Foram simuladas linhas de transmissão com três configurações: sem compensação, com compensação no meio e com compensação nas extremidades. Como dito anteriormente, esses dados de tensões e correntes foram utilizados como sinais de entrada na rotina do MATLAB[®], na qual foram implementados os algoritmos de estimação fasorial, através da modelagem de um relé de distância autopolarizado.

Em cada configuração, três diferentes parâmetros são avaliados: o caminho da impedância (Reatância versus Resistência) ao longo da característica MHO do relé de distância autopolarizado; o número de ciclos requeridos para estimar o valor final da distância de falta; o tempo entre o instante de falta e o sinal de *trip*. Como a trajetória da impedância calculada pelo relé pode se mover para dentro e para fora da área de atuação, foi considerado que a impedância aparente deve permanecer por pelo menos três amostras consecutivas seguidas dentro da zona de proteção.

5.2.1 Linha sem Compensação

As Figuras 25 e 26 mostram, respectivamente, a amplitude dos fasores de tensão e de corrente estimados da Fase A, para uma falta monofásica entre a Fase A e a terra, a 75 km da Barra 1, em uma linha de transmissão sem compensação. O ângulo de incidência da falta foi de 0° . Foram utilizados TC e TP ideais, ou seja, os sinais de corrente e tensão foram obtidos diretamente do barramento no quais os transformadores para instrumentos estão instalados.

Na Figura 26, pode-se observar de forma mais detalhada a oscilação no módulo da corrente, que é mais aparente no fasor estimado através do método FDFT. De acordo com CAMPOS (2016), o método FDFT é o mais susceptível a presença da componente DC de decaimento exponencial, por isso sofre um efeito indesejável na estimação. Além disso, percebe-se que o fasor estimado pelo método FDFT combinado com o Filtro Mímico o apresenta menor oscilação, visto que este consegue mitigar de forma eficaz o efeito da componente DC de decaimento exponencial na estimação fasorial do sinal.

A Figura 27 apresenta a trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância. Através da ampliação apresentada na Figura 27, é possível verificar que os algoritmos de estimação se dirigem a primeira zona de atuação do relé, visto que a falta ocorre na primeira metade da linha de transmissão. As oscilações, em maior quantidade principalmente para o método FDFT, são devidas a presença da componente DC de decaimento exponencial.

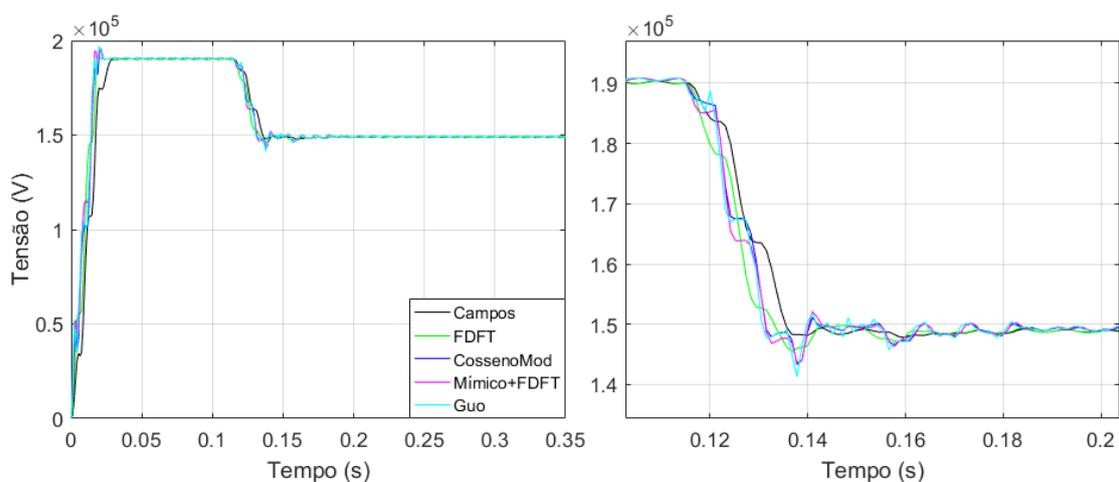


Figura 25 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AT, a 75 km.

Fonte: Autoria Própria.

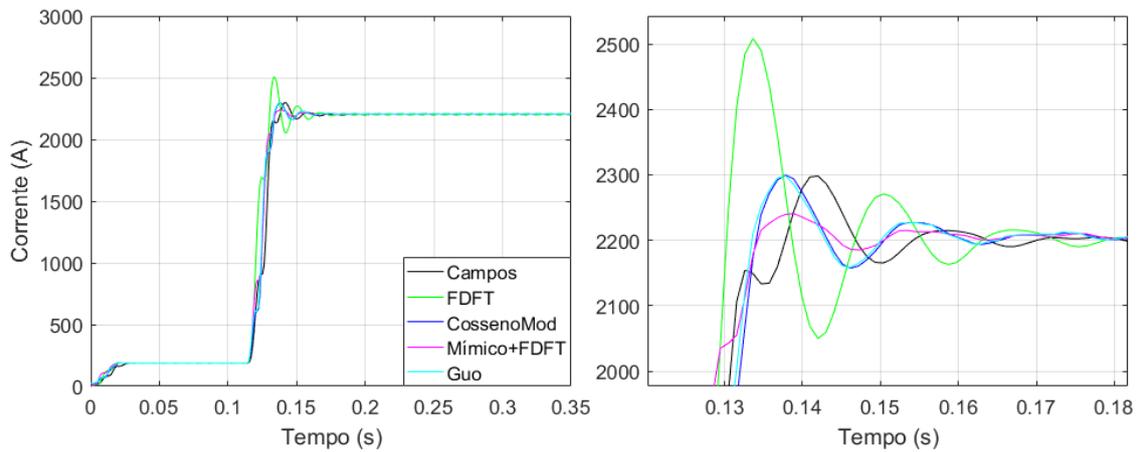


Figura 26 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AT, a 75 km.

Fonte: Autoria Própria.

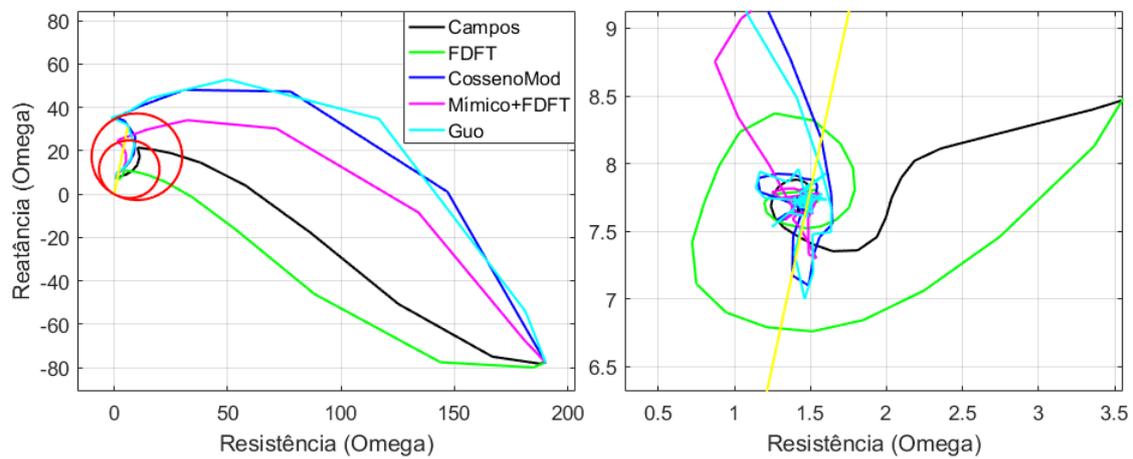


Figura 27 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância.

Fonte: Autoria Própria.

5.2.2 Linha com Compensação no Centro

Para avaliar os efeitos da inserção de compensação série no meio de uma linha de transmissão de 300 km, os resultados das simulações de falta foram separados em dois grupos: faltas na primeira metade da linha e na segunda metade da linha. Foram avaliados ainda diferentes graus de compensação e diferentes tipos de falta.

5.2.2.1 Trajetória da Impedância Aparente

Faltas na primeira metade da linha

Foram aplicadas faltas distantes 10 km, 75 km e 150 km da Barra 1, com graus de compensação de 40%, 60% e 80%, variando o ângulo de incidência (0° , 45° e 90°) e o tipo de falta – monofásica (AT), bifásica (AB), bifásica-terra (ABT) e trifásica (ABC). No sistema, os transformadores para instrumentos foram considerados ideais, ou seja, os fasores de tensão e corrente foram extraídos diretamente do sistema, para que não houvesse influência dos transformadores de instrumento na estimação da impedância vista pelo relé. Esses sinais foram divididos pelas relações de transformação dos transformadores para instrumentos, e assim enviados para o relé.

As Figuras 28, 29 e 30 apresentam os módulos estimados de tensão e corrente e a trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, para uma falta monofásica AT localizadas a 75 km em uma linha com GC de 40%.

Na Figura 28, percebe-se que o fasor de tensão estimado pelo algoritmo de Guo apresenta mais oscilações, enquanto o método de Campos é o menos afetado pela presença de componentes sub-harmônicas.

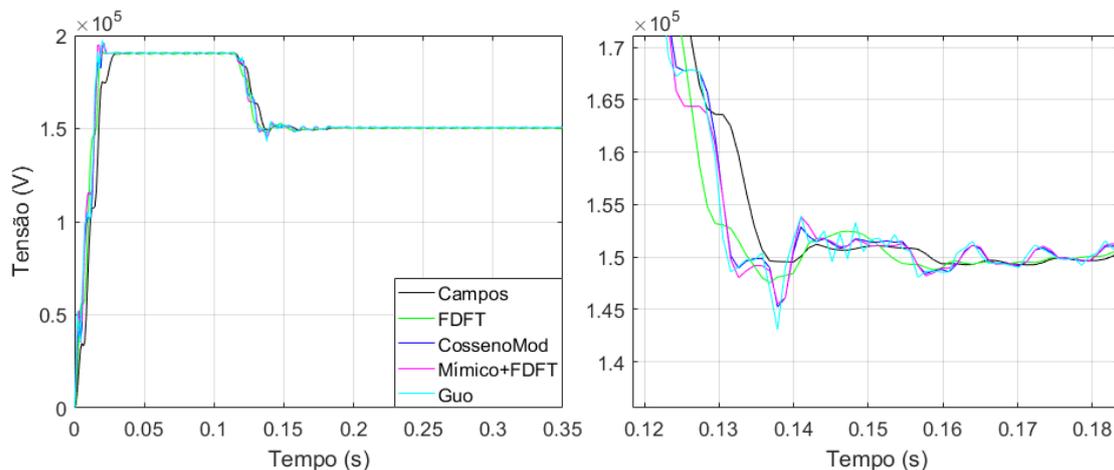


Figura 28 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AT, a 75 km, GC 40%.

Fonte: Autoria Própria.

Através da Figura 29, é possível observar que há diminuição do *overshoot* no sinal de corrente, se comparado com a Figura 26, referente ao caso sem compensação.

Isto é reflexo da redução da componente DC de decaimento exponencial provocado pela presença da compensação série.

A Figura 30 mostra a trajetória no diagrama $R-X$ da impedância aparente da unidade Z_{AT} do relé de distância para uma falta monofásica entre a Fase A e a terra. Nesse caso, apesar da presença da compensação série, todos os algoritmos foram capazes de convergir corretamente para a impedância de falta. Porém, alguns algoritmos tiveram mais oscilação em torno do ponto de falta do que outros, que é o caso do método FDFT e do algoritmo de Guo, que se mostram mais susceptíveis a presença de componentes sub-harmônicas.

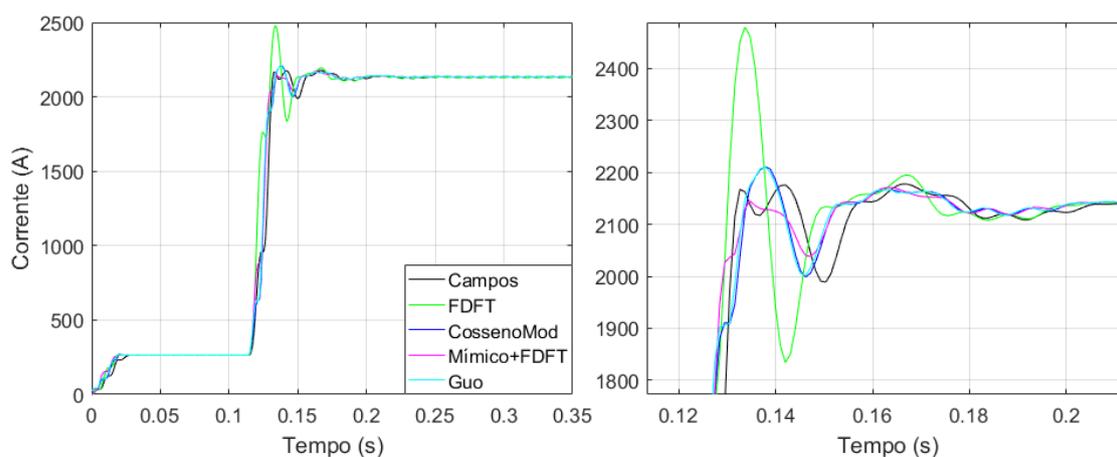


Figura 29 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AT, a 75 km, GC 40%.

Fonte: Autoria Própria.

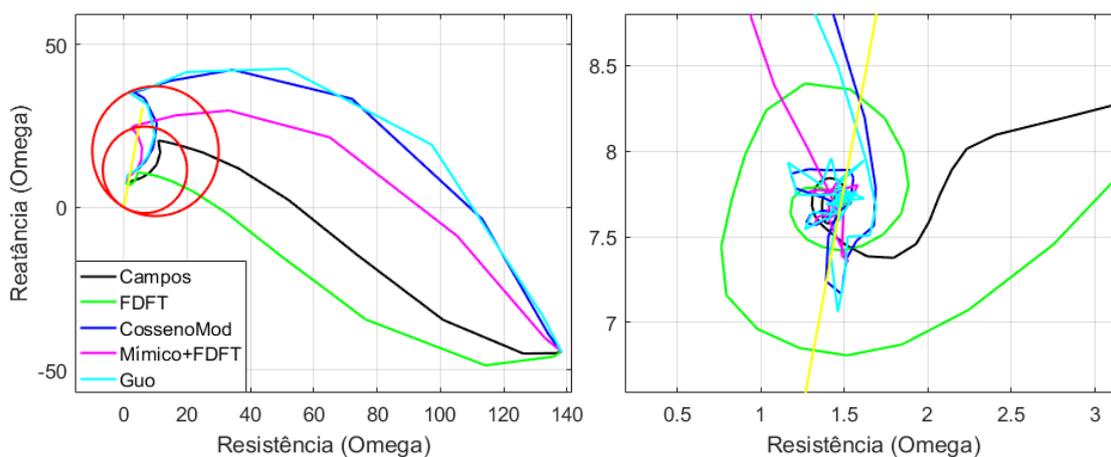


Figura 30 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 40%.

Fonte: Autoria Própria.

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam os módulos estimados de tensão e corrente e a trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, para uma falta monofásica AT localizadas a 75 km em uma linha com GC de 60%.

A presença da compensação série causa um aumento na magnitude de frequências sub-harmônicas, que são deslocadas para um valor de maior frequência e aproximadas da frequência fundamental, dificultando a filtragem dos sinais (MOURA, 2014). Com base nisso e analisando a Figura 32, pode-se perceber que há um aumento nas oscilações dos sinais e um aumento no tempo da chegada em regime permanente, que são causados pelas componentes sub-harmônicas resultantes da utilização da compensação série.

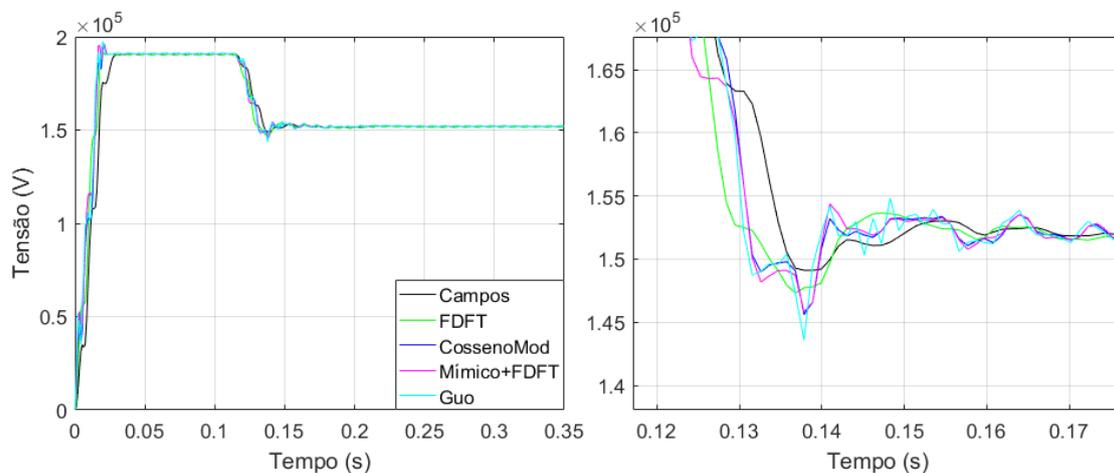


Figura 31 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AT, a 75 km, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

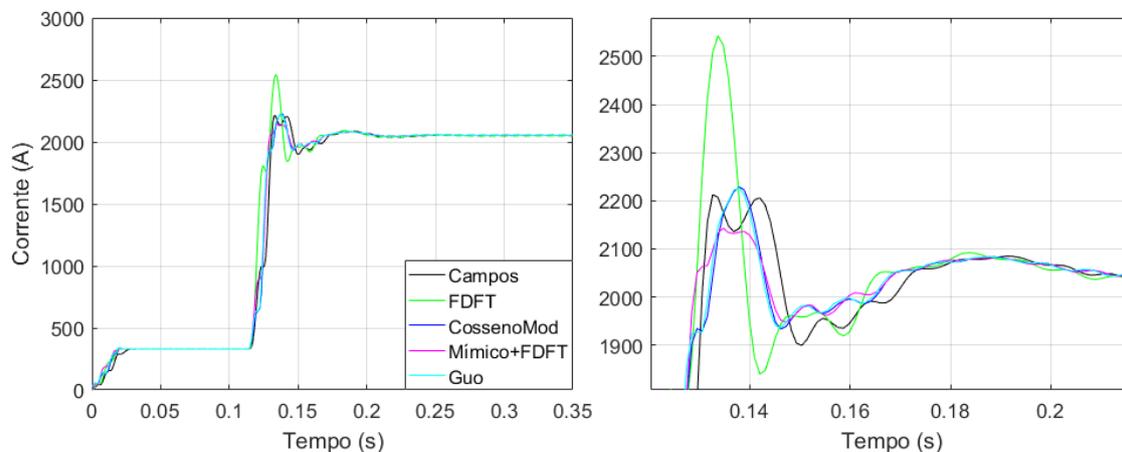


Figura 32 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AT, a 75 km, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 33 é mostrada a trajetória no diagrama $R-X$ da impedância aparente da unidade Z_{AT} do relé de distância para uma falta monofásica entre a Fase A e a terra, referente a compensação de 60%. Nesse caso, mesmo com a presença da compensação série com valor maior que na Figura 30, todos os algoritmos também foram capazes de convergir corretamente para a impedância de falta. Apesar disso, percebe-se que há muitas oscilações em torno do valor final, demonstrando grande influência da componente DC de decaimento e das componentes sub-harmônicas na estimação da impedância vista pelo relé, principalmente no método FDFT e no algoritmo de Guo.

Observando os resultados obtidos, percebe-se que, quando a compensação é instalada no meio da linha de transmissão, há influência da compensação na estimação dos fasores principalmente para o método FDFT e para o algoritmo de Guo. Mesmo assim, é possível constatar que os algoritmos conseguem convergir corretamente para o valor de impedância, visto que as faltas ocorridas na primeira metade da linha criam um novo circuito equivalente e deixam a compensação de fora, não comprometendo tanto o desempenho da estimação fasorial.

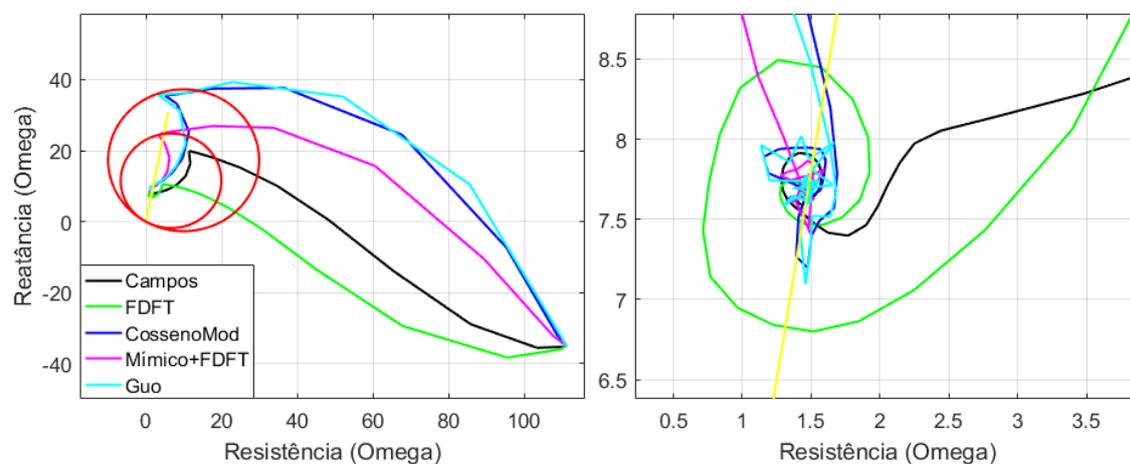


Figura 33 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

Faltas na segunda metade da linha

As faltas também foram aplicadas na segunda metade da linha de transmissão (AT, AB, ABT e ABC), a 225 km do começo da linha, com grau de compensação de 40%, 60% e 80%. As Figuras 34, 35 e 36 apresentam os módulos estimados de tensão e

corrente e a trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, para uma falta monofásica AT localizadas a 225 km em uma linha com GC de 40%.

Observando a Figura 34, percebe-se que o fasor de tensão estimado pelo algoritmo de Guo apresenta mais oscilações, juntamente com o Cosseno Modificado e o Filtro Mímico, enquanto o método de Campos é o que apresenta menos oscilações no fasor de tensão e se mostra menos afetado pelas componentes DC de decaimento exponencial e sub-harmônicas.

Através da Figura 35, pode-se perceber características transitórias mais efetivas no módulo da corrente estimada pelos algoritmos do que em faltas que ocorrem na primeira metade da linha. Também pode-se observar que o filtro mímico apresenta menor *overshoot*, enquanto o método FDFT tem o maior.

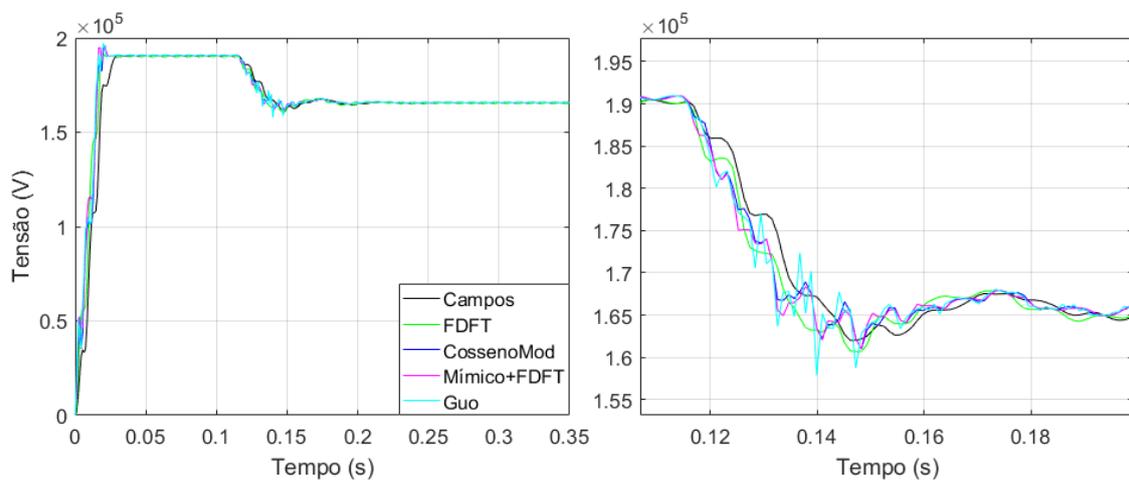


Figura 34 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AT, a 225 km, GC 40%

Fonte: Autoria Própria.

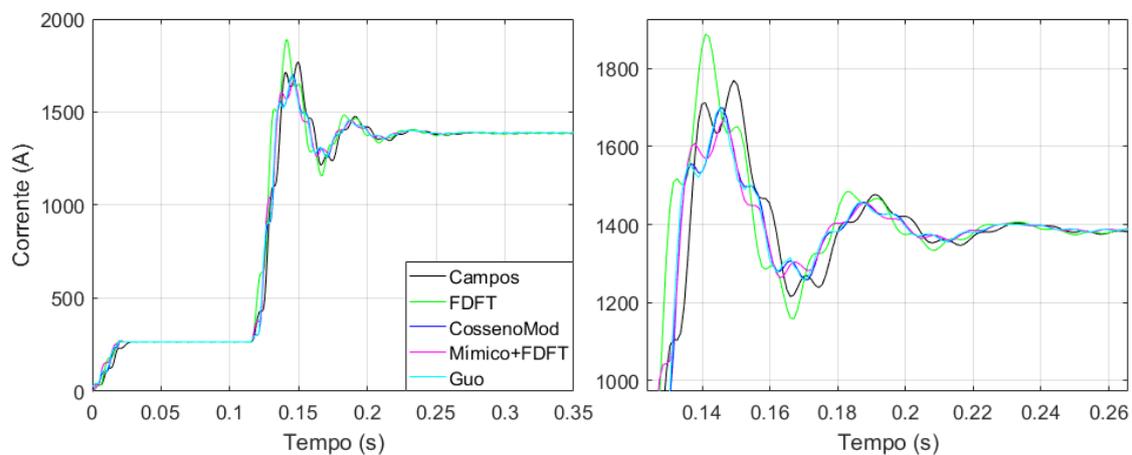


Figura 35 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AT, a 225 km, GC 40%.

Fonte: Autoria Própria.

Como pode ser visto na Figura 36, a impedância vista pelo relé está dentro da sua zona de atuação, mas seu valor não é o correto, mostrando a maior influência da compensação para o caso de faltas na segunda metade da linha. Essa maior dificuldade na estimação fasorial reflete na localização da falta.

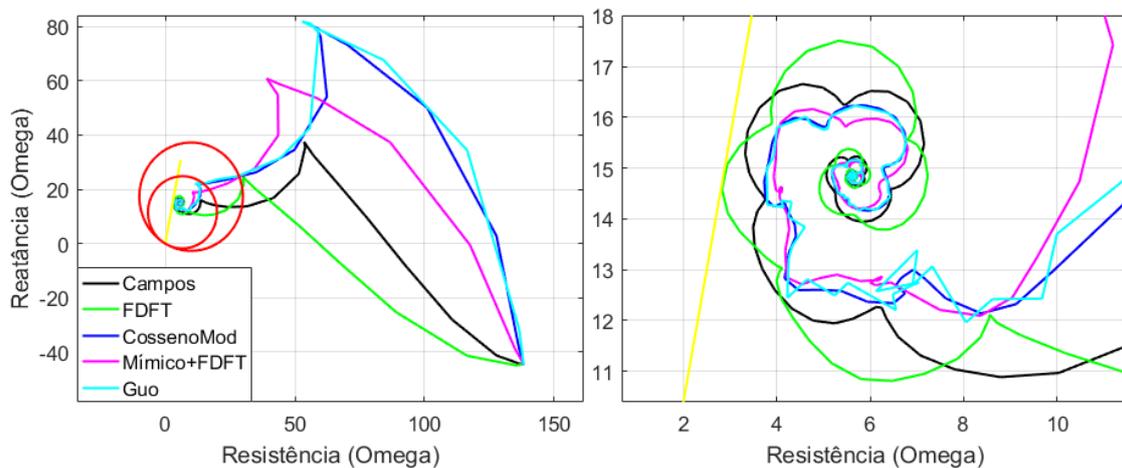


Figura 36 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 40%.

Fonte: Autoria Própria.

As Figuras 37, 38 e 39 apresentam os módulos estimados de tensão e corrente e a trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, para uma falta monofásica AT localizadas a 225 km em uma linha com GC de 60%.

Nas Figuras 37 e 38, percebe-se que os fasores de tensão e de corrente estimados, se comparados com o caso com grau de compensação de 40%, demoram mais para chegar em regime permanente. Isso é causado pelo aumento das componentes sub-harmônicas e DC de decaimento exponencial, consequência do aumento no grau de compensação.

Na Figura 39, pode-se observar que a impedância calculada também se dirige a primeira zona de proteção do relé, mas não apresenta o valor correto, o que reflete na localização da falta. O relé não vê o valor correto porque a capacitância o banco inserido alterou o valor da impedância do conjunto.

Durante faltas em linhas com compensação série, quando o sistema de *by-pass* atua corretamente, o banco de capacitores é contornado. Esse procedimento é realizado para evitar que a sua impedância seja considerada pelo relé e este não consiga ver a impedância de falta correta.

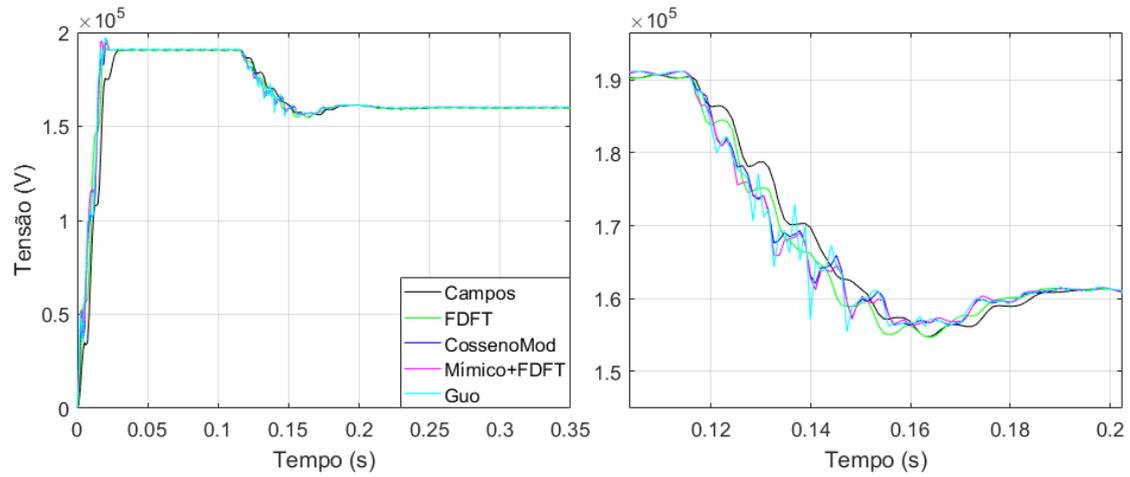


Figura 37 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AT, a 225 km, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

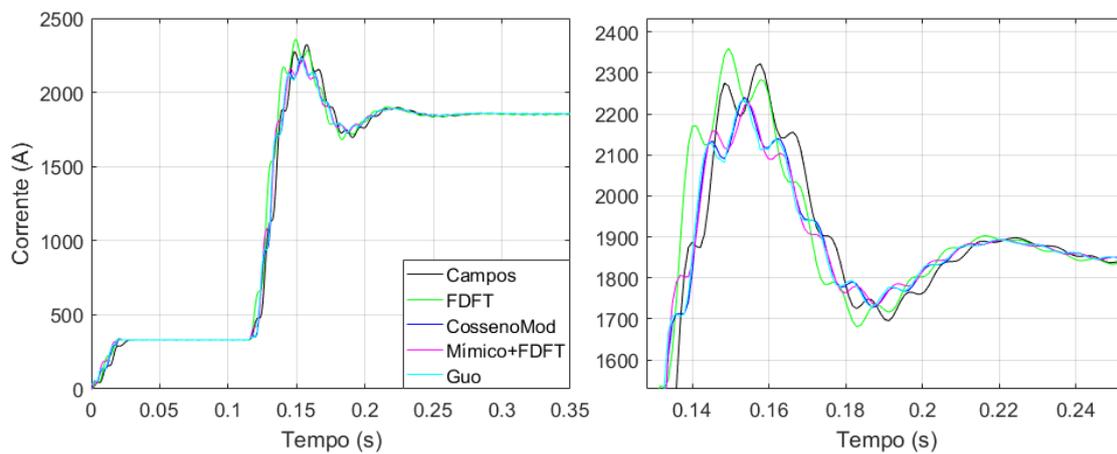


Figura 38 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AT, a 225 km, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

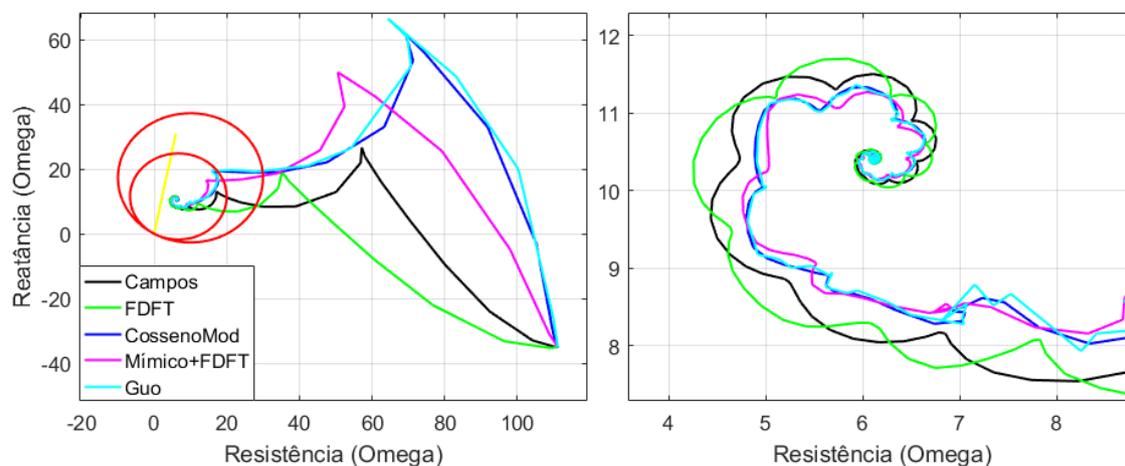


Figura 39 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

Nos casos apresentados nessa seção, para faltas na segunda metade da linha de transmissão, os efeitos causados pela instalação da compensação série no centro da linha foram elevados consideravelmente, se comparados com as faltas na primeira metade da linha. Como estão entre o relé e o ponto de falta, o circuito equivalente criado inclui os capacitores. Caso o sistema de *by-pass* falhe, em faltas ocorridas na segunda metade da linha, o relé não será capaz de estimar corretamente a impedância de falta e, conseqüentemente, a distância em que a falta ocorreu.

5.2.2.2. Número de Ciclos Requeridos para a Estimação da Distância de Falta

Nesta seção, foi avaliado o número de ciclos requerido para que a distância de falta fosse estimada. Para isso, foi utilizada a Equação 75:

$$E = \frac{|d_{real} - d_f|}{d_{real}} \cdot 100 (\%), \quad (75)$$

onde

E é o erro de estimação;

d_{real} é a distância real da falta, previamente conhecida; e

d_f é a distância calculada pelo relé.

O erro pode ser calculado conhecendo-se a distância real de falta (10 km, 75 km, 150 km ou 225 km) e a distância calculada, utilizando os métodos avaliados nas mesmas condições. Para calcular a distância de falta, foi utilizado o método da reatância simples.

O número de ciclos requeridos é obtido quando o valor do erro E for menor que a tolerância estabelecida durante 16 amostras consecutivas, o que corresponde a um ciclo. A tolerância é diferente para cada configuração da linha, em relação a compensação, devido a influência do grau de compensação na impedância do conjunto (banco de capacitores mais linha). Os valores adotados foram:

- Compensação de 40%: tolerância de 5%;
- Compensação de 60%: tolerância de 10%;
- Compensação de 80%: tolerância de 20%.

Faltas na primeira metade da linha

As Figuras 40 a 43 apresentam os resultados do número de ciclos requeridos para os curtos AT, AB, ABT e ABC aplicados na primeira metade da linha de transmissão, respectivamente. Foi considerado que as compensações de 40%, 60% e 80% foram instaladas no meio da linha. Em cada figura, estão apresentados nove gráficos em barra, referentes a três ângulos de incidência para cada um dos três graus de compensação, onde cada barra representa o número de ciclos.

Através da Figura 40, pode-se observar que as faltas monofásicas a 10 km exigiram mais ciclos de todos os algoritmos, se comparadas com as faltas em 75 km e 150 km. Além disso, é possível perceber que, com o aumento do grau de compensação, o número de ciclos requeridos não aumentou para nenhum dos algoritmos, e sim diminuiu em alguns casos. No geral, para estes casos, não houveram grandes alterações entre a quantidade ciclos requeridos por cada algoritmo.

Para os casos de faltas bifásicas (Figura 41), bifásicas-terra (Figura 42) e trifásicas (Figuras 43), com ângulo de incidência de 45° e distância de falta de 10 km, nenhum dos algoritmos conseguiu estimar a quantidade de ciclos necessárias. Já nos outros casos, os valores também se mostraram equilibrados e com poucas diferenças, assim como no caso monofásico.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;



(c) Grau de compensação 80%;

■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 40 – Número de ciclos requeridos para estimação da distância de falta *versus* distância de falta – falta monofásica.

Fonte: Autoria Própria.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;



(c) Grau de compensação 80%;

■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 41 – Número de ciclos requeridos para estimação da distância de falta *versus* distância de falta – falta bifásica.

Fonte: Autoria Própria.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;



(c) Grau de compensação 80%;

■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 42 – Número de ciclos requeridos para estimação da distância de falta *versus* distância de falta – falta bifásica-terra.

Fonte: Autoria Própria.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;



(c) Grau de compensação 80%;

■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 43 – Número de ciclos requeridos para estimação da distância de falta *versus* distância de falta – falta trifásica.

Fonte: Autoria Própria.

Faltas na segunda metade da linha

Para a distância de falta de 225 km, nenhum dos algoritmos obteve erro menor que a tolerância escolhida.

5.2.2.3 Tripping Time

Foram aplicadas faltas AT, AB, ABT e ABC na linha de transmissão com compensação série instalada no centro, variados o grau de compensação e o ângulo de incidência (0°, 45° e 90°). De acordo com CAMPOS (2016), o tempo de *trip* (t_{trip}) é dado pela diferença entre o tempo em que o sinal é enviado pelo relé aos demais equipamentos de proteção (t_{act}) e o tempo em que a falta ocorre (t_f), como apresentado na Equação 76.

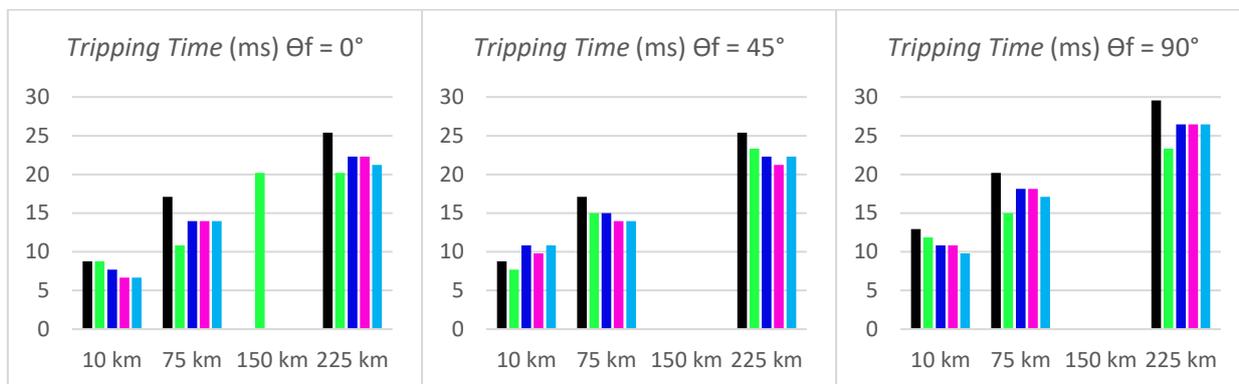
$$t_{trip} = t_{act} - t_f. \quad (76)$$

Como dito anteriormente, sabe-se que a trajetória da impedância calculada pelo relé pode se mover para dentro e para fora da área de atuação. Por esse motivo, foi considerado que a impedância aparente deve permanecer por pelo menos três amostras consecutivas seguidas dentro da zona de proteção.

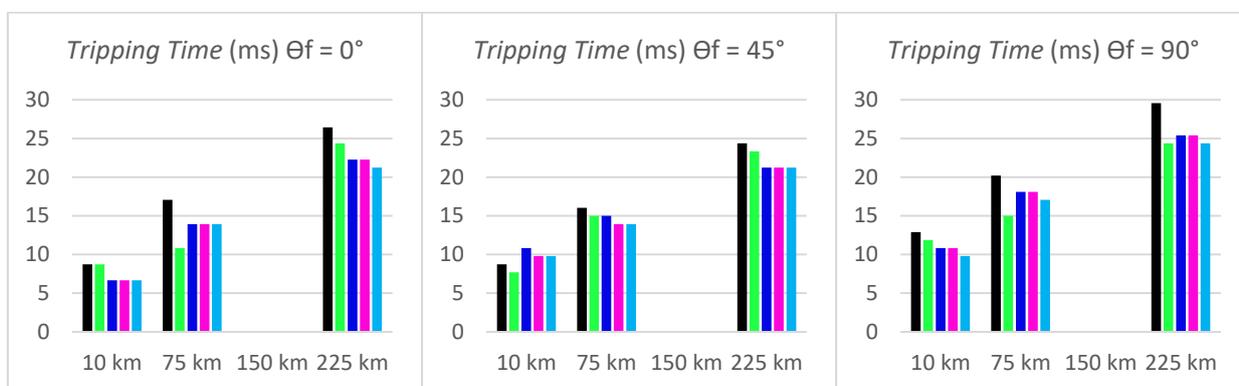
Para comparar cada um dos algoritmos abordados neste trabalho, para compensação no centro da linha, os valores de *tripping time* estão apresentados em gráficos de barras, divididos por tipo de curto, grau de compensação e ângulo de incidência de falta. As Figuras 44 a 47 são referentes aos curtos monofásico, bifásico, bifásico-terra e trifásico, respectivamente. Cada uma delas tem três valores relativos aos graus de compensação de 40%, 60% e 80%, que correspondem ao ângulo de incidência.

Considerando a Figura 44, é possível perceber que o tempo de *trip* é maior para faltas na segunda metade da linha de transmissão. Para o grau de compensação de 80%, os maiores valores de *trip* acontecem nas faltas que ocorrem a 225 km da Barra 1. Para faltas aplicadas a 150 km da Barra 1, com exceção do algoritmo de Campos e do método FDFT (em alguns casos), o valor de *trip* não existiu, considerando que os outros algoritmos não foram capazes de apresentar três amostras consecutivas com valor igual

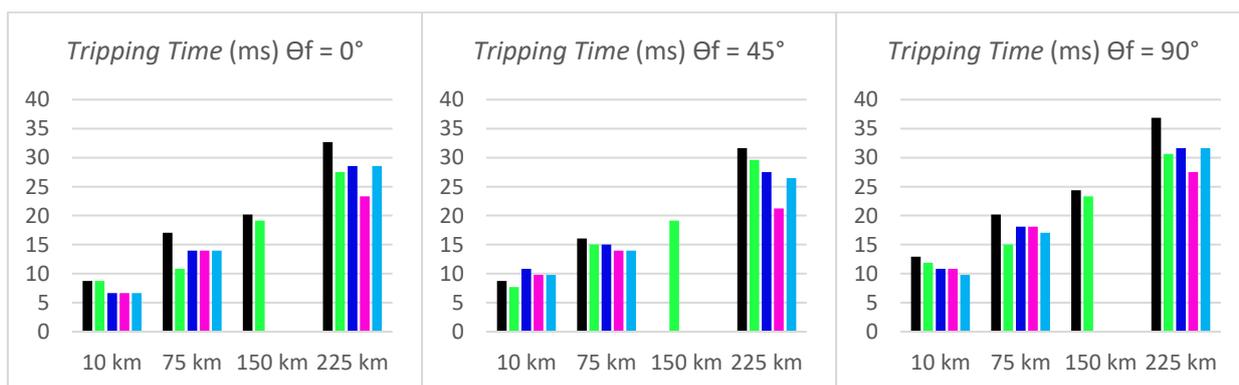
a “1”. Assim, para curtos que ocorrem muito próximos a compensação série, há uma dificuldade maior para o relé de reconhecer a falta.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;

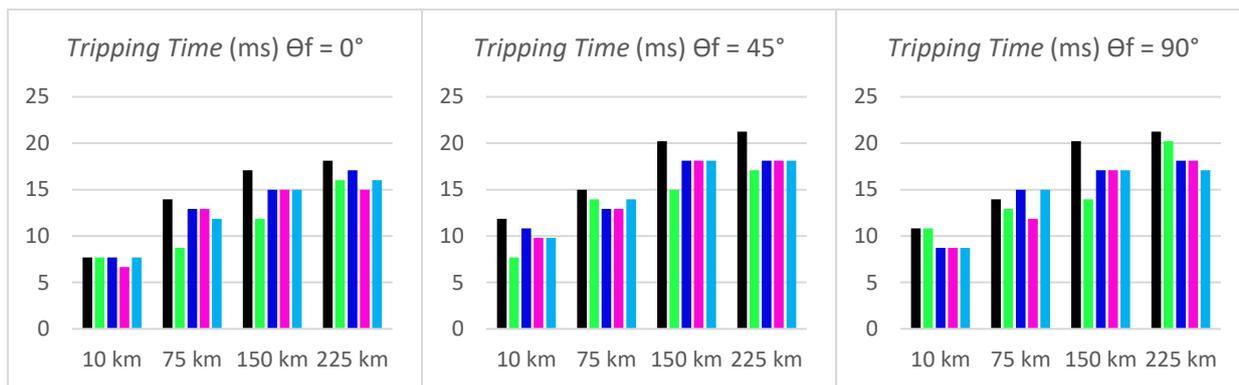


(c) Grau de compensação 80%.

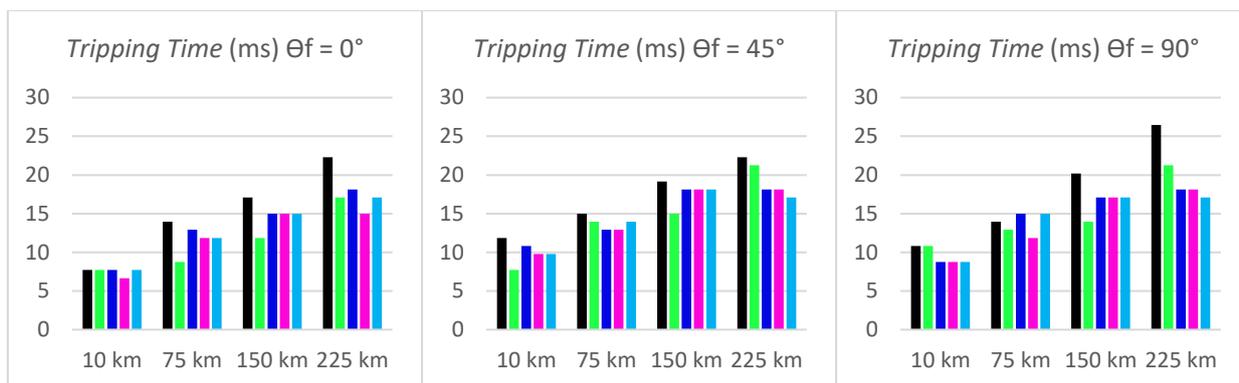
■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 44 – *Tripping time* para compensação série instalada no centro – falta monofásica.

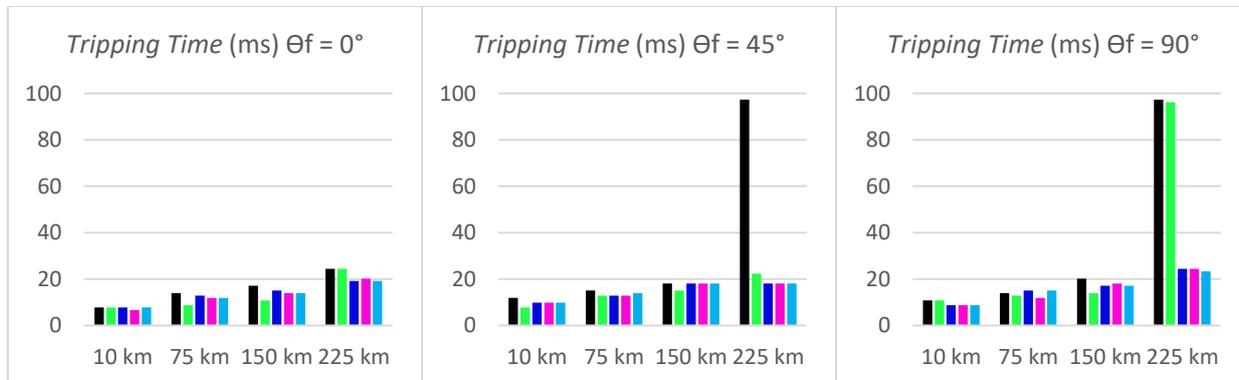
Fonte: Autoria Própria.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;

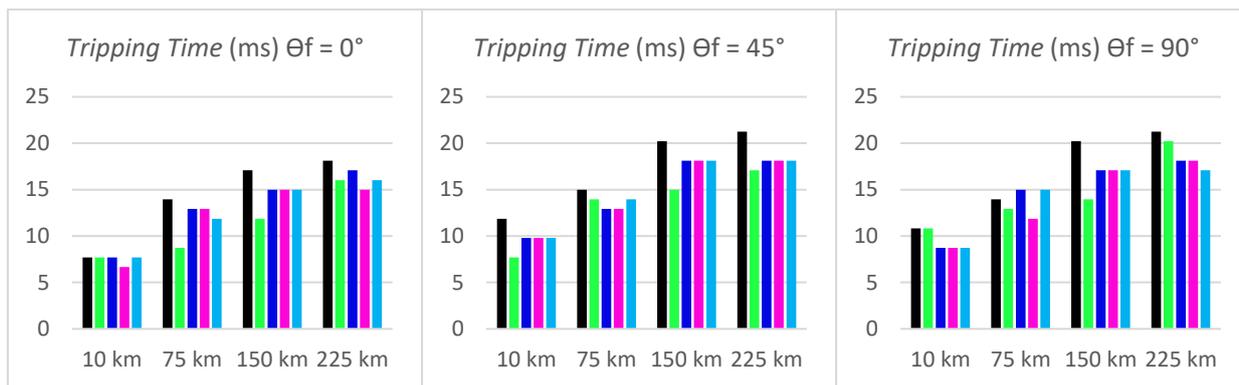


(c) Grau de compensação 80%.

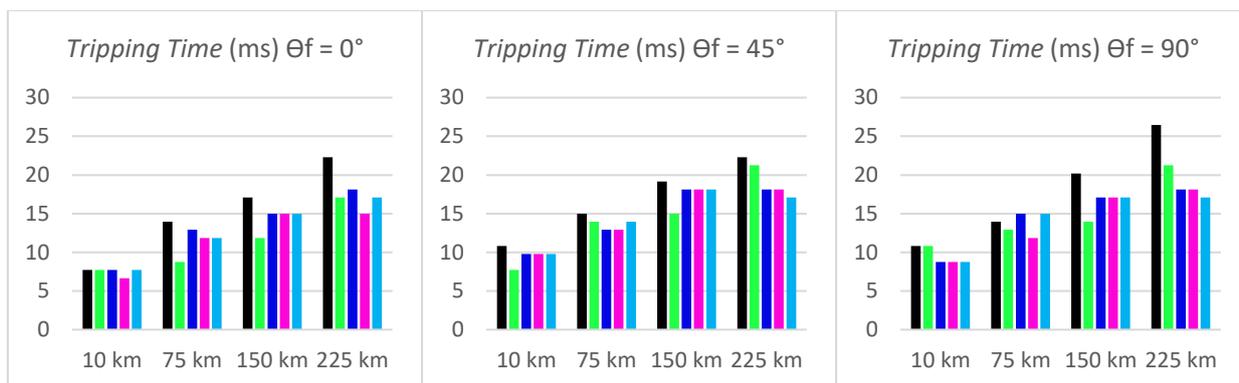
■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 45 – *Tripping time* para compensação série instalada no centro – falta bifásica.

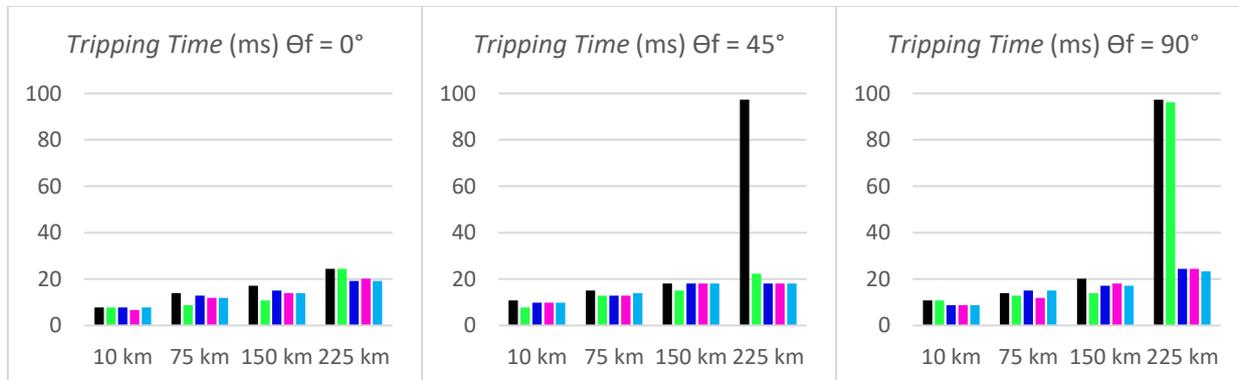
Fonte: Autoria Própria.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;

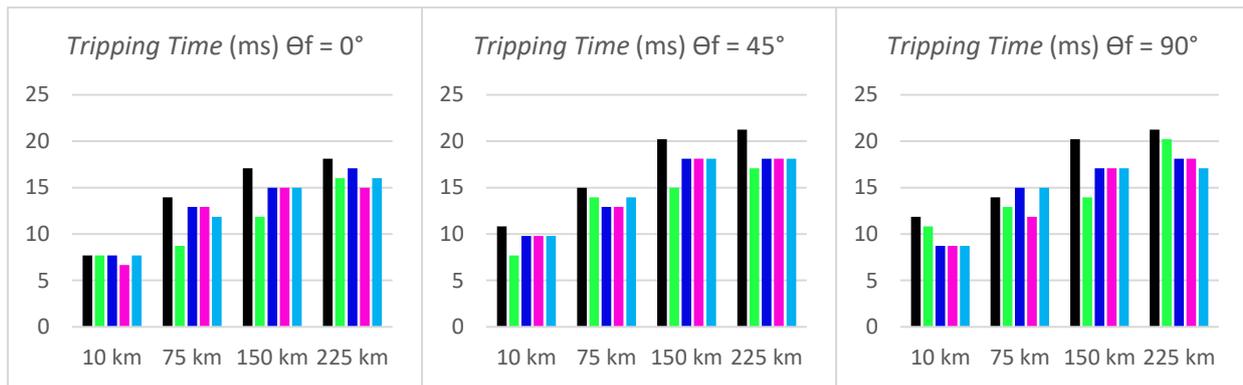


(c) Grau de compensação 80%.

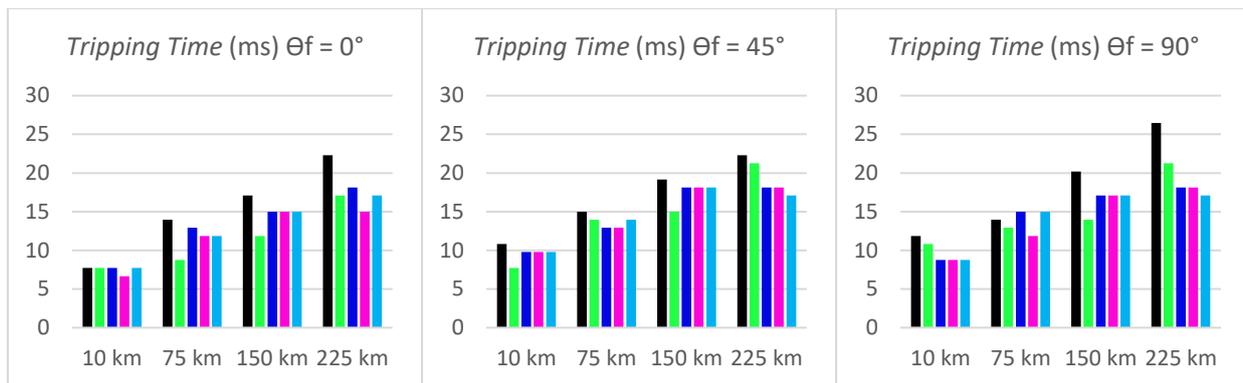
■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 46 – *Tripping time* para compensação série instalada no centro – falta bifásica-terra.

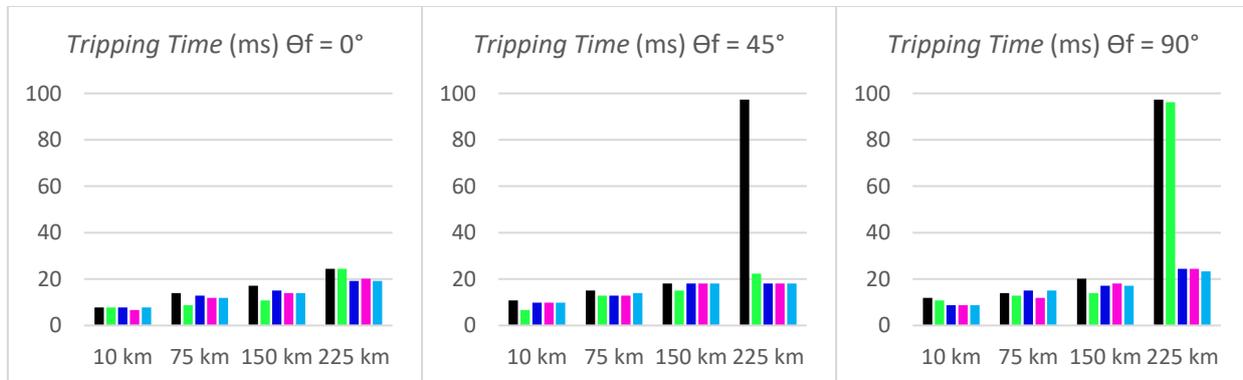
Fonte: Autoria Própria.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;



(c) Grau de compensação 80%.

■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 47 – *Tripping time* para compensação série instalada no centro – falta trifásica.

Fonte: Autoria Própria.

O *tripping time* quantifica o tempo de resposta do método. No método de Campos foram utilizados vários filtros em cascata, que reduzem a banda de frequência para tornar o processo de filtragem mais seletiva, no entanto, provocam o aumento do tempo de resposta. Logo, já era esperado que este algoritmo apresentasse um tempo de

resposta um pouco maior. Então, no caso do método de Campos, o tempo de resposta não é somente afetado apenas pela natureza do sinal.

Os algoritmos Cosseno Modificado, Mímico e de Guo mostraram valores semelhantes, principalmente nas situações em que o ângulo de incidência é igual a 45°. Independentemente do tipo de curto, grau de compensação e ângulo de incidência da falta, a presença da compensação resultou em sobrealcance.

Também foram simuladas 36 faltas localizadas a 290 km do início da linha, na linha de transmissão com compensação série instalada no meio da linha, nas mesmas condições que as faltas de 10, 75, 150 e 225 km. Mesmo as faltas sendo externas, o relé as identificou de forma errada, considerou que estavam dentro da primeira zona de proteção, e enviou sinal de *trip*, para todos os algoritmos.

5.2.3 Linha com Compensação nas Extremidades

Para avaliar os efeitos da inserção de compensação série nas extremidades de uma linha de transmissão de 300 km, os resultados das simulações de falta, assim como na seção anterior, foram separados em dois grupos: faltas na primeira metade da linha e na segunda metade da linha. Foram avaliados ainda diferentes graus de compensação e diferentes tipos de falta.

5.2.3.1 Trajetória da Impedância Aparente

Faltas na primeira metade da linha

Foram aplicadas faltas distantes 10 km, 75 km e 150 km da Barra 1, com graus de compensação de 40%, 60% e 80%. Em cada extremidade da linha, foi instalado metade do valor da compensação. Além disso, foram variados o ângulo de incidência (0°, 45° e 90°) e o tipo de falta – monofásica (AT), bifásica (AB), bifásica-terra (ABT) e trifásica (ABC). No sistema, os transformadores para instrumentos foram considerados ideais, ou seja, os fasores de tensão e corrente foram extraídos diretamente do sistema.

Foram escolhidas faltas bifásicas entre as fases A e B para apresentar os resultados nessa seção, com o objetivo de abordar outros tipos de falta nos resultados

apresentados. As Figuras 48, 49 e 50 apresentam os módulos estimados de tensão e corrente e a trajetória da impedância da unidade Z_{AB} do relé de distância, para uma falta bifásica AB localizadas a 75 km em uma linha com GC de 40%.

Através da Figura 48, é possível observar que há grande influência do local de instalação da compensação série no sinal estimado de tensão. Se comparado com a forma de onda de tensão do caso em que a compensação foi instalada no meio da linha, pode-se perceber que houve aumento na oscilação e no tempo de chegada ao regime permanente. O algoritmo de Campos foi o menos o que apresentou menor alteração, enquanto o algoritmo de Guo foi o mais afetado. Na Figura 49, pode-se observar que o sinal de corrente também é bastante afetado pela configuração de instalação.

Apesar da impedância vista pelo relé se encaminhar para a primeira zona de proteção, como pode ser visto na Figura 51, o local de falta apresentado não é o correto. Neste caso, o que ocorre é semelhante ao apresentado nas simulações de faltas na segunda metade de linhas de transmissão com compensação série instalada no meio, o relé não vê o valor correto porque a capacitância do banco inserido alterou o valor da impedância do conjunto. Caso a compensação não seja contornada pelo sistema de *bypass*, o relé não consegue identificar o real valor de impedância e, conseqüentemente, não consegue estimar a distância de forma correta.

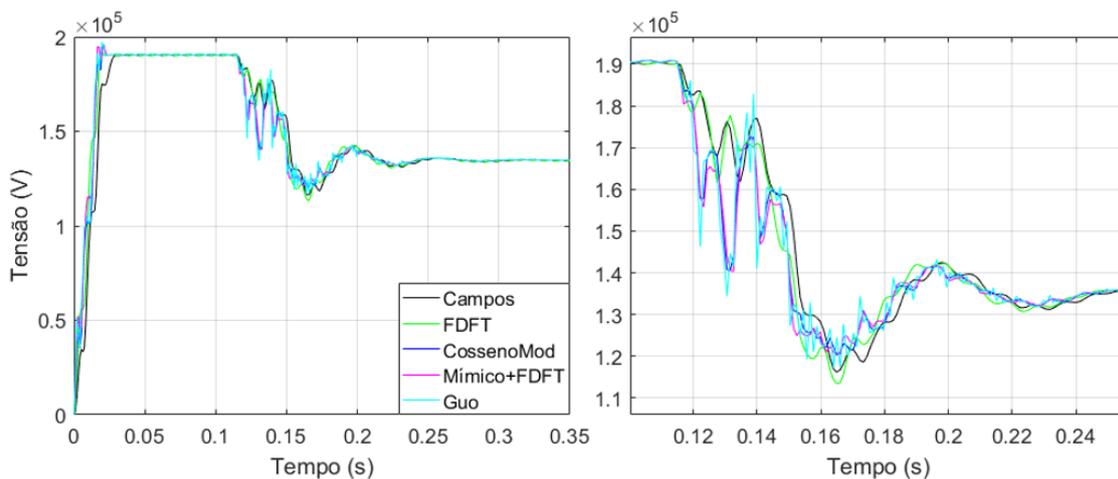


Figura 48 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AB, a 75 km, GC 40%.

Fonte: Autoria Própria.

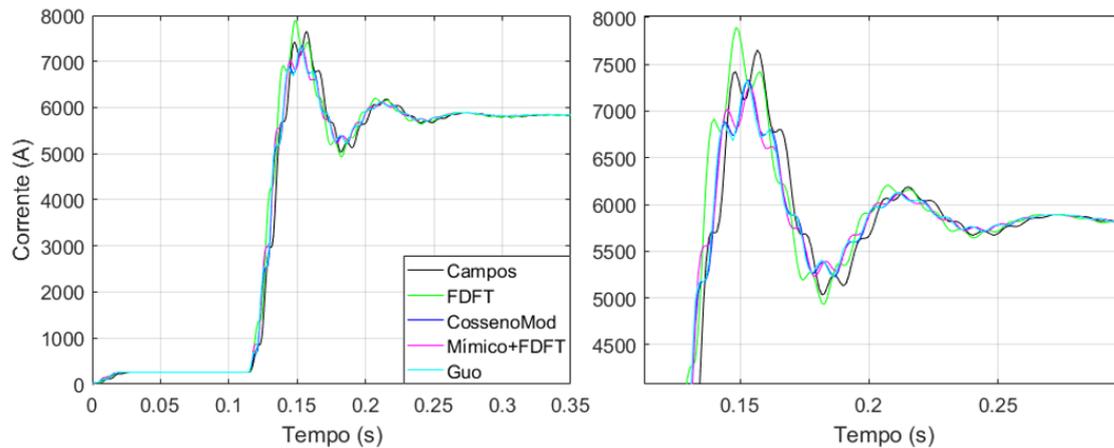


Figura 49 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AB, a 75 km, GC 40%.

Fonte: Autoria Própria.

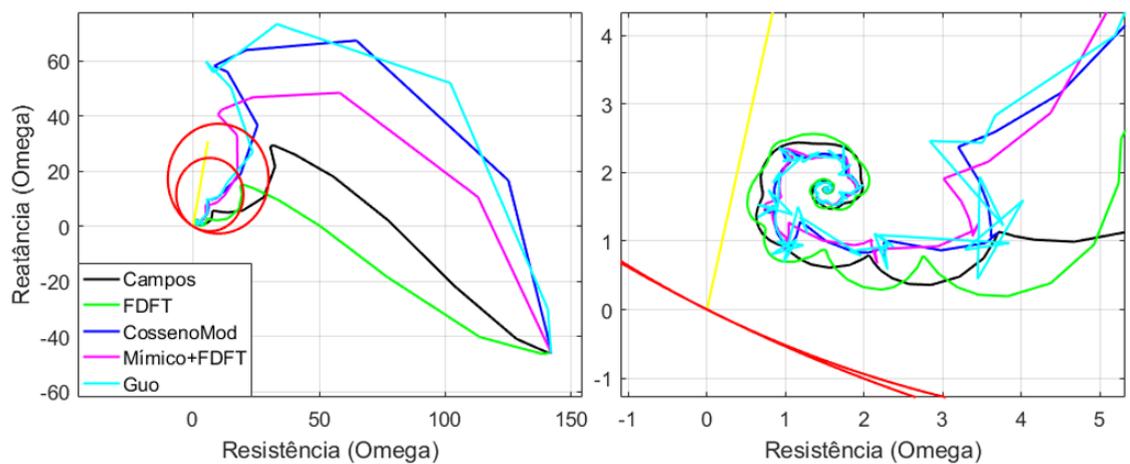


Figura 50 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AB} do relé de distância, GC 40%.

Fonte: Autoria Própria.

As Figuras 51, 52 e 53 apresentam os módulos estimados de tensão e corrente e a trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, para uma falta bifásica AB localizada a 75 km em uma linha com GC de 60%.

Na Figura 51, percebe-se que a tensão se eleva, ao invés de diminuir. Esse fenômeno é causado pela inversão de corrente, como consequência da presença da compensação e da característica capacitiva da reatância entre o relé e o ponto de falta. Ou seja, a reatância capacitiva do banco é maior que a soma entre as reatâncias indutivas das fontes e do trecho entre a Barra 1 e o ponto de falta.

Como resultado da inversão de corrente, o relé não consegue identificar a falta e a considera externa, como pode ser visto na Figura 53.

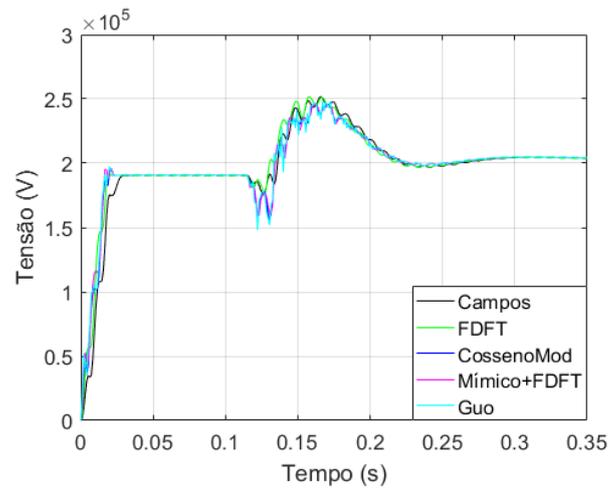


Figura 51 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AB, a 75 km, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

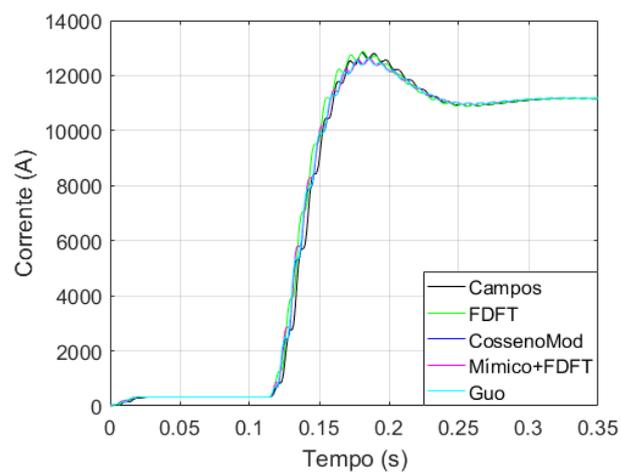


Figura 52 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AB, a 75 km, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

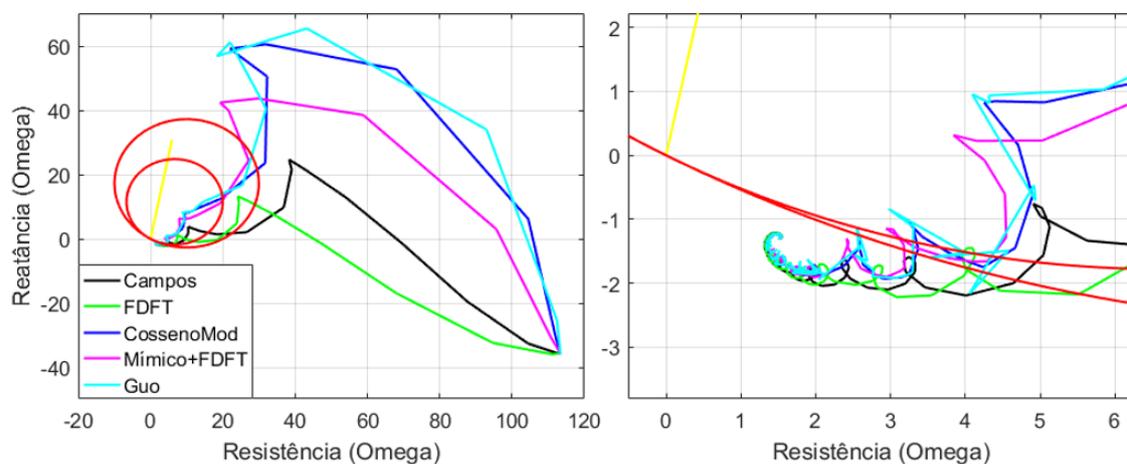


Figura 53 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

Faltas na segunda metade da linha

Para faltas aplicadas na segunda metade da linha de transmissão, os efeitos da presença e da instalação da compensação série nas extremidades são amenizados, devido ao fato de a impedância da Barra 1 ao ponto de falta ser maior.

As Figuras 54, 55 e 56 apresentam os módulos estimados de tensão e corrente e a trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, para uma falta bifásica AB localizada a 225 km em uma linha com GC de 40%, dividido igualmente e instalado nas extremidades.

Na Figura 54, pode-se observar que há grande oscilação nas formas de onda da tensão estimada, principalmente para o filtro Mímico, Cosseno Modificado e algoritmo de Guo. O algoritmo que se saiu melhor na estimação da tensão foi o algoritmo de Campos.

Na Figura 55, é possível observar oscilação considerável em todos os métodos, porém o método FDFT apresenta maior *overshoot*.

Na Figura 56, é apresentado o caminho da impedância estimada, que em regime permanente está dentro da primeira zona de proteção do relé, como esperado.

Neste caso, foi necessário menos tempo para que fosse atingido o regime permanente, se comparado com o curto localizado na primeira metade da linha.

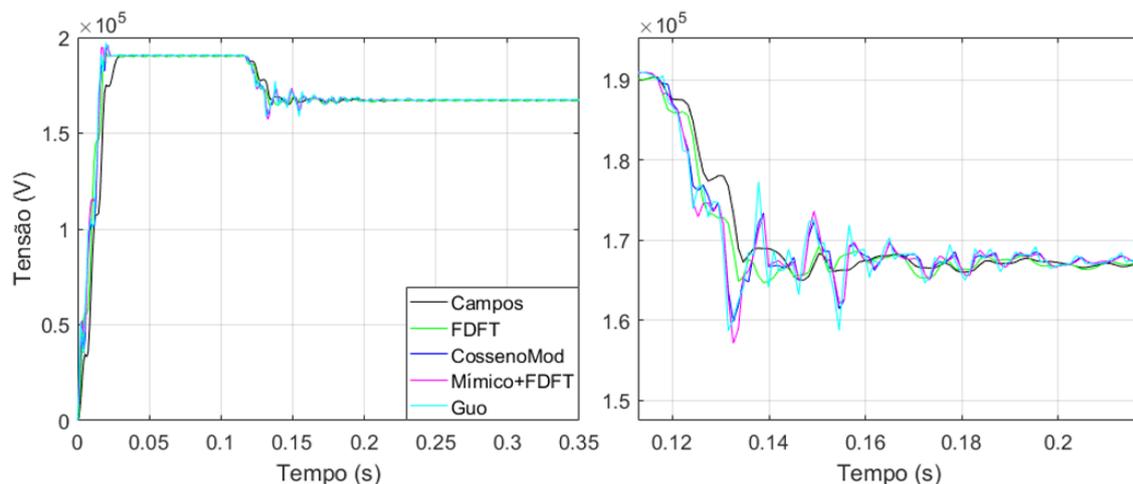


Figura 54 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AB, a 225 km, GC 40%.

Fonte: Autoria Própria.

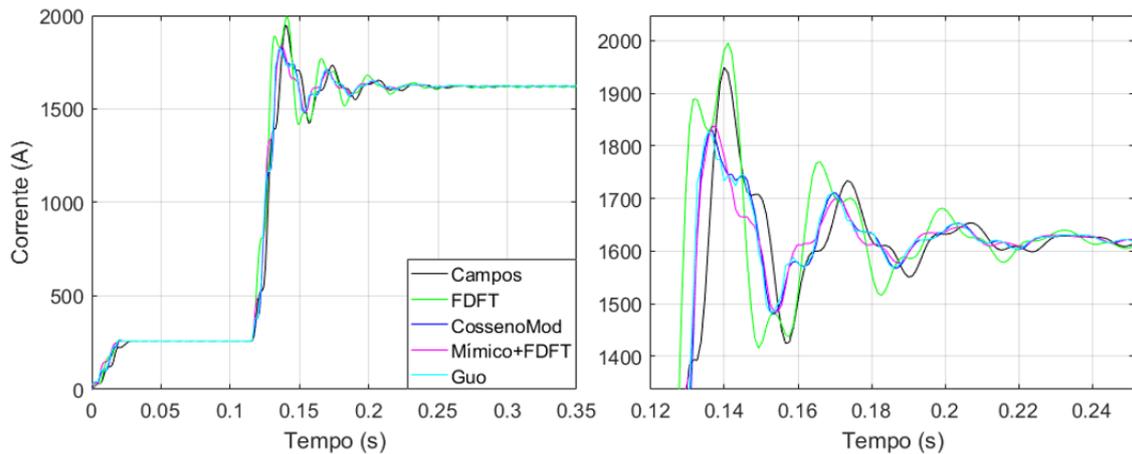


Figura 55 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AB, a 225 km, GC 40%.

Fonte: Autoria Própria.

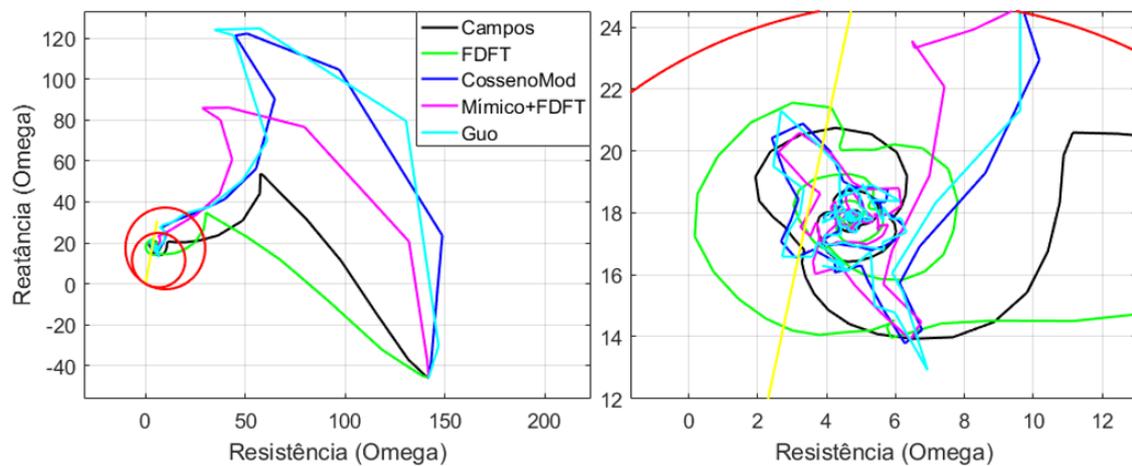


Figura 56 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 40%.

Fonte: Autoria Própria.

As Figuras 57, 58 e 59 apresentam os módulos estimados de tensão e corrente e a trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, para uma falta bifásica AB localizada a 225 km em uma linha com GC de 60%, dividido igualmente e instalado nas extremidades.

Comparando com o caso anterior, nota-se que não há grandes diferenças entre a tensão e a corrente estimadas. Em relação a Figura 56, a impedância estimada mostrada na Figura 60 está mais longe do local correto, devido ao aumento da compensação.

Os efeitos causados pela instalação da compensação série nas extremidades da linha são amenizados quando os curtos ocorrem na segunda metade da linha de transmissão, pois a impedância aparente entre a Barra 1 e o ponto de falta aumenta.

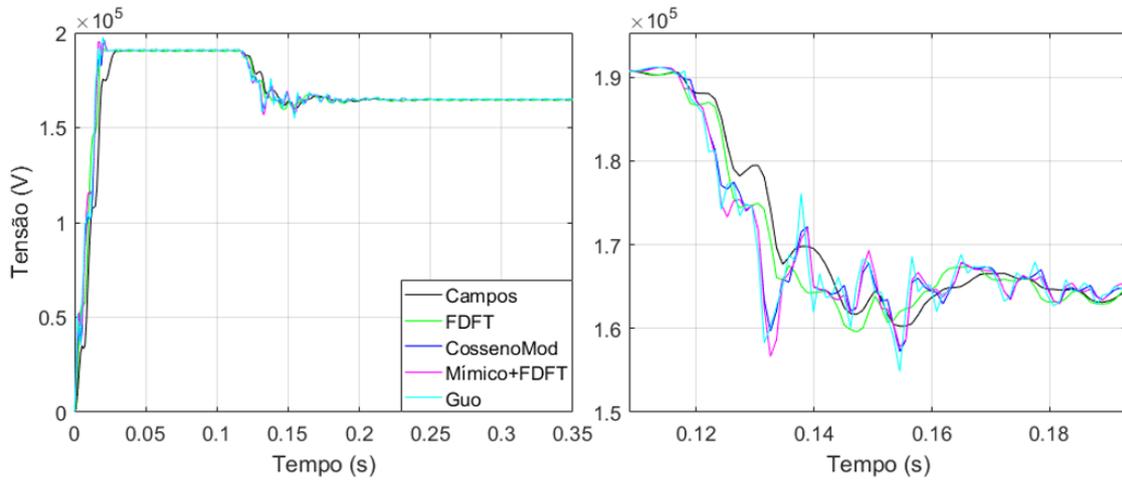


Figura 57 – Amplitude do fasor de tensão estimado para falta AB, a 225 km, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

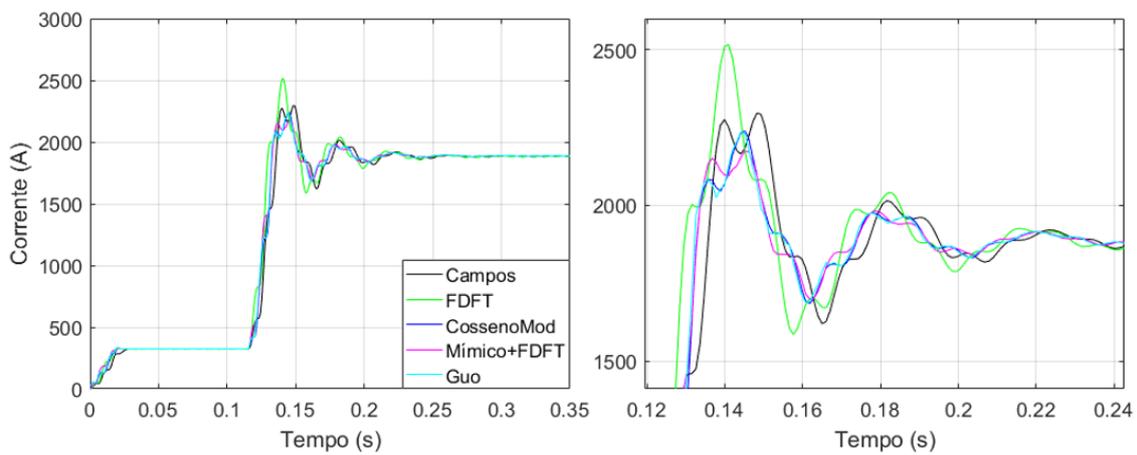


Figura 58 – Amplitude do fasor de corrente estimado para falta AB, a 225 km, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

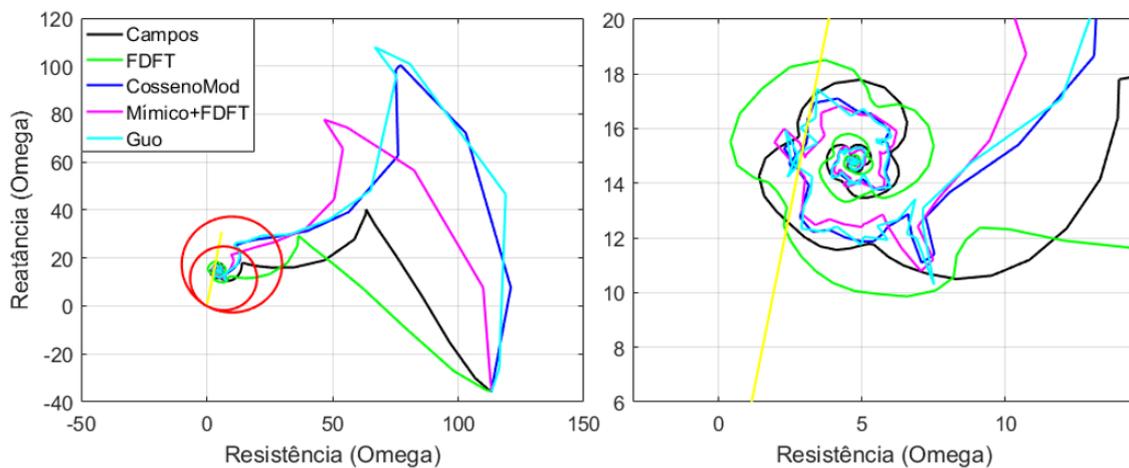


Figura 59 – Trajetória da impedância da unidade Z_{AT} do relé de distância, GC 60%.

Fonte: Autoria Própria.

5.2.3.2 Número de Ciclos Requeridos para a Estimação da Distância de Falta

Para faltas na linha de transmissão com a compensação série instalada nas extremidades, nenhum dos algoritmos obteve erro menor que a tolerância escolhida.

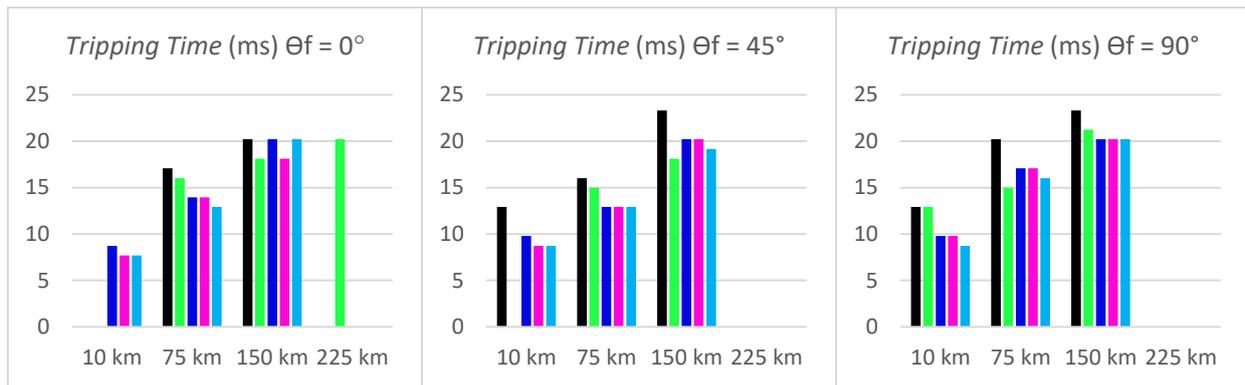
5.2.2.3 *Tripping Time*

Para comparar cada um dos algoritmos abordados neste trabalho, para a compensação instalada nas extremidades da linha, os valores de *tripping time* estão apresentados em gráficos de barras, divididos por tipo de curto, grau de compensação e ângulo de incidência de falta. As Figuras 61 a 64 são referentes aos curtos monofásico, bifásico, bifásico-terra e trifásico, respectivamente. Cada uma delas tem três valores relativos aos graus de compensação de 40%, 60% e 80%, que correspondem ao ângulo de incidência.

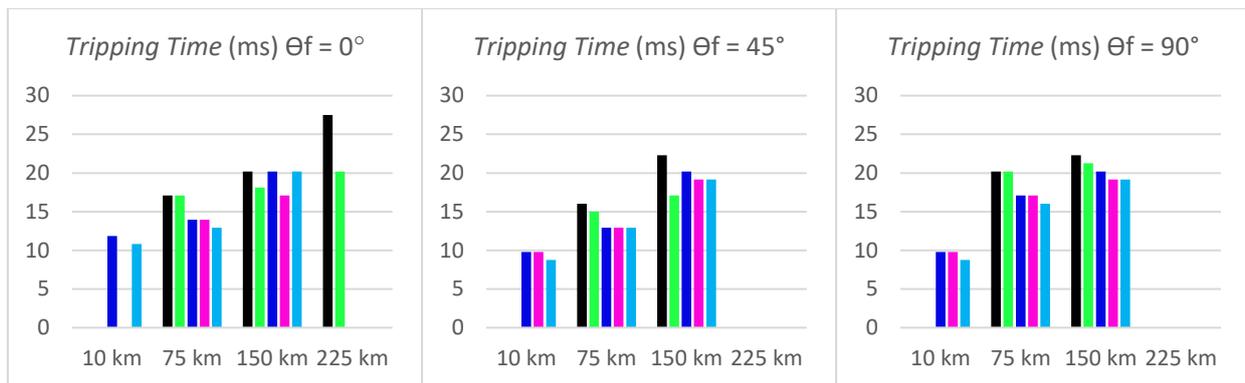
Na Figura 60, para faltas monofásicas em linhas com graus de compensação de 40% e 60%, pode-se perceber que todos os algoritmos apresentam dificuldade em reconhecer o curto que ocorre em 225 km. Com o aumento do grau de compensação, o relé passa a reconhecer o curto dessa distância. Além disso, é possível observar que há maior dificuldade no reconhecimento das faltas que ocorrem muito próximas ao barramento, pois o relé as identifica como externas, consequência da inversão de corrente.

Como pode ser visto nas Figuras 61, 62 e 63, existe a mesma dificuldade que ocorre nas faltas monofásicas: reconhecer o curto que ocorre a 10 km do início da linha. Com o aumento da compensação, todos os algoritmos foram afetados e não apresentaram *trip*, e em alguns casos, o curto de 75 km também não foi identificado.

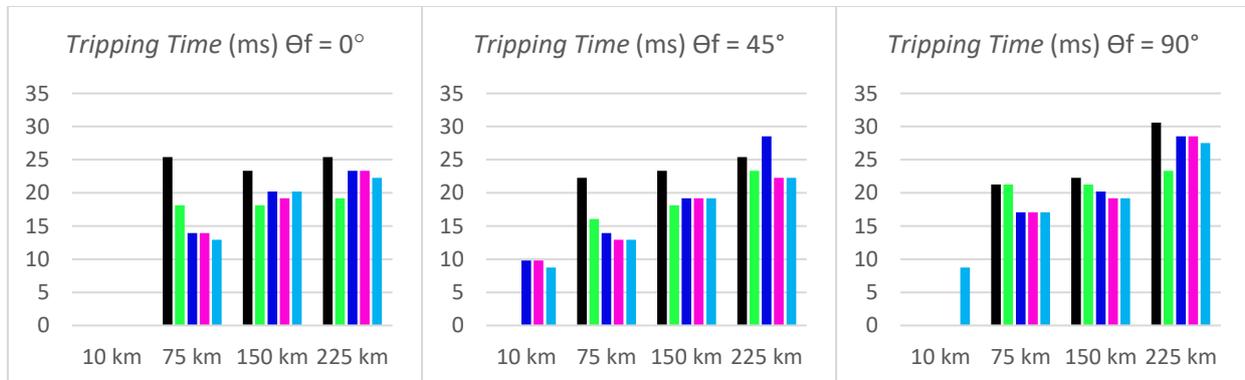
Também foram simuladas 36 faltas localizadas a 290 km do início da linha, na linha de transmissão com compensação série instalada nas extremidades da linha, nas mesmas condições que as faltas de 10, 75, 150 e 225 km. Com exceção das faltas monofásicas e com grau de compensação de 40%, o relé as identificou de forma errada, considerou que estavam dentro da primeira zona de proteção, e enviou sinal de *trip*, para todos os algoritmos.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;

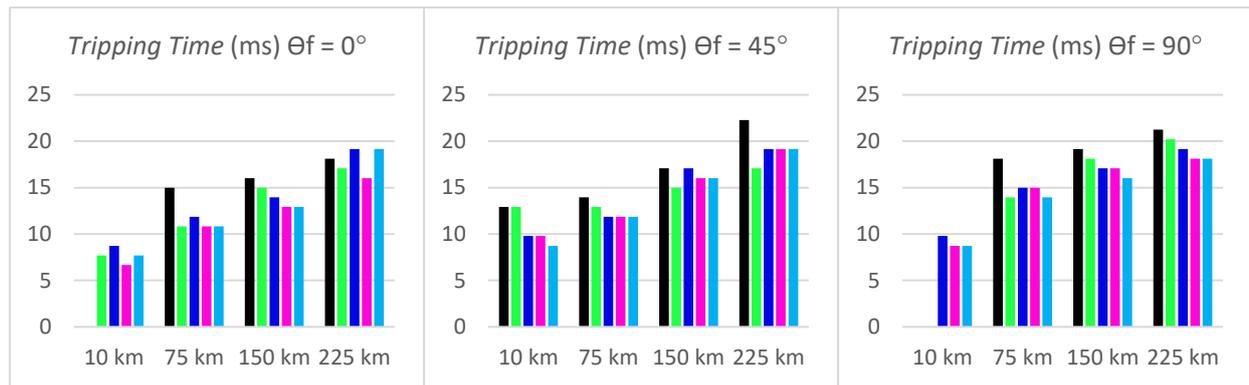


(c) Grau de compensação 80%.

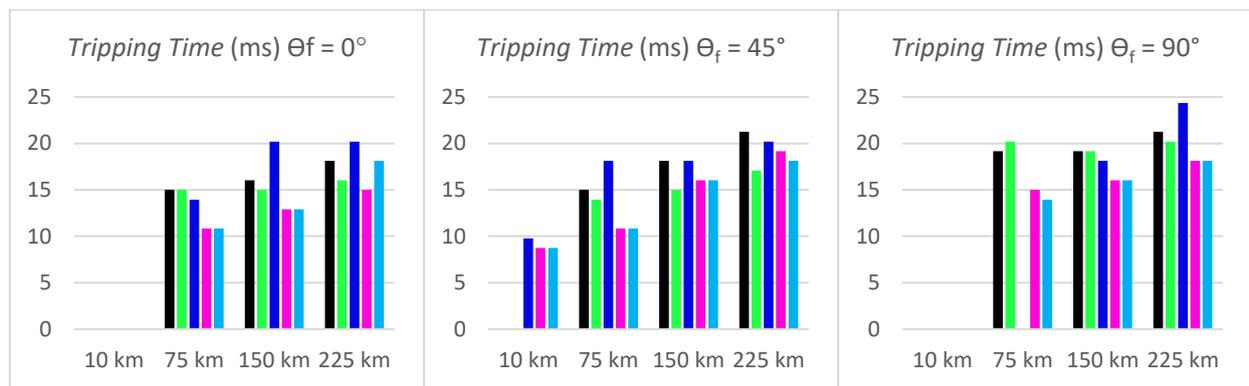
■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 60 – *Tripping time* para compensação série instalada nas extremidades – falta monofásica.

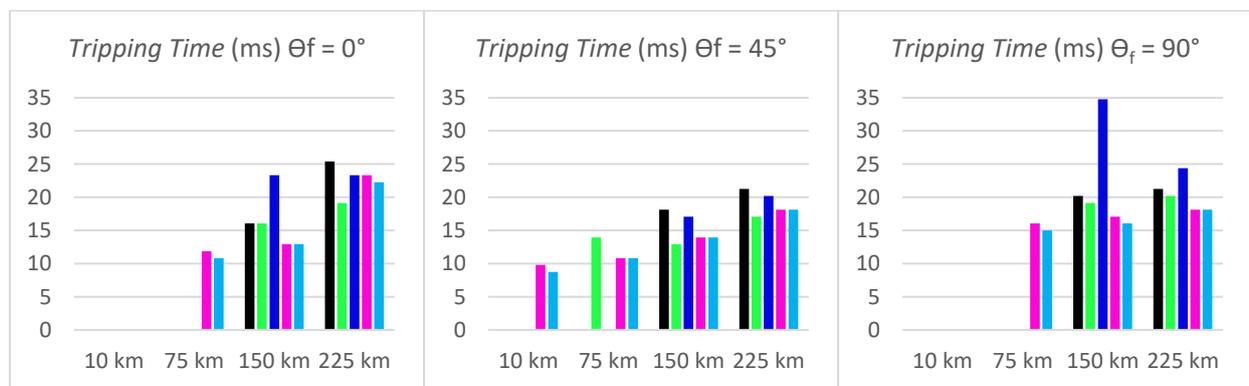
Fonte: Autoria Própria.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;

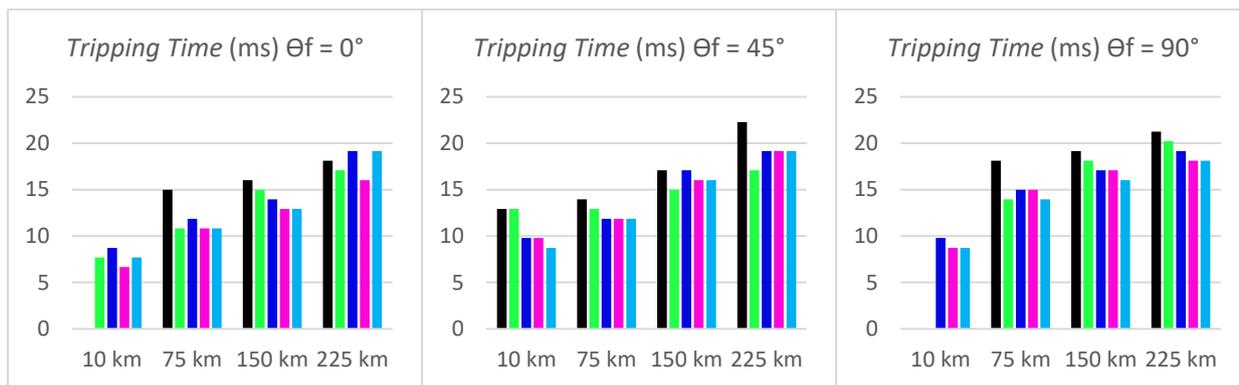


(c) Grau de compensação 80%.

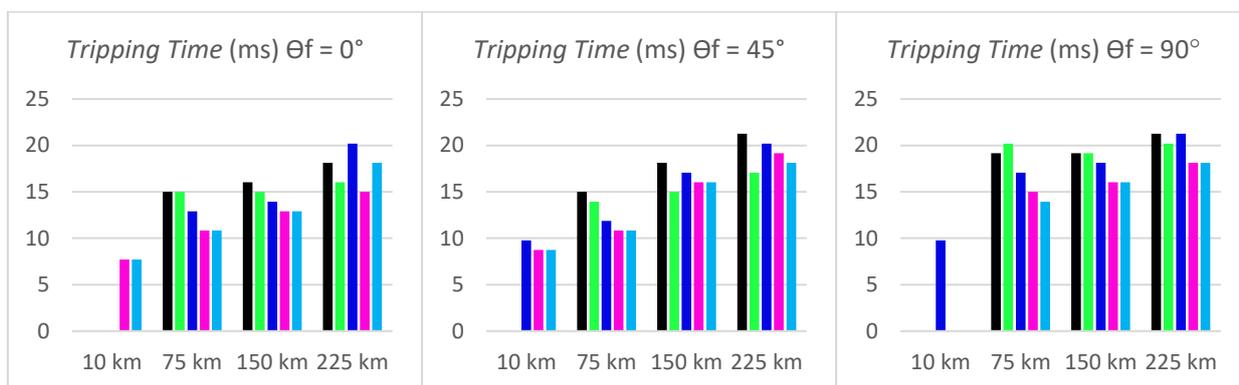
■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 61 – *Tripping time* para compensação série instalada nas extremidades – falta bifásica.

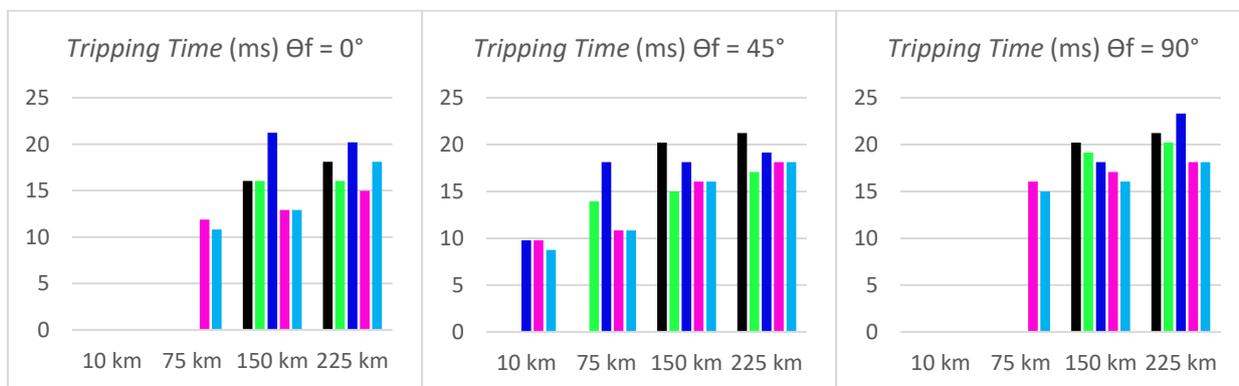
Fonte: Autoria Própria.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;

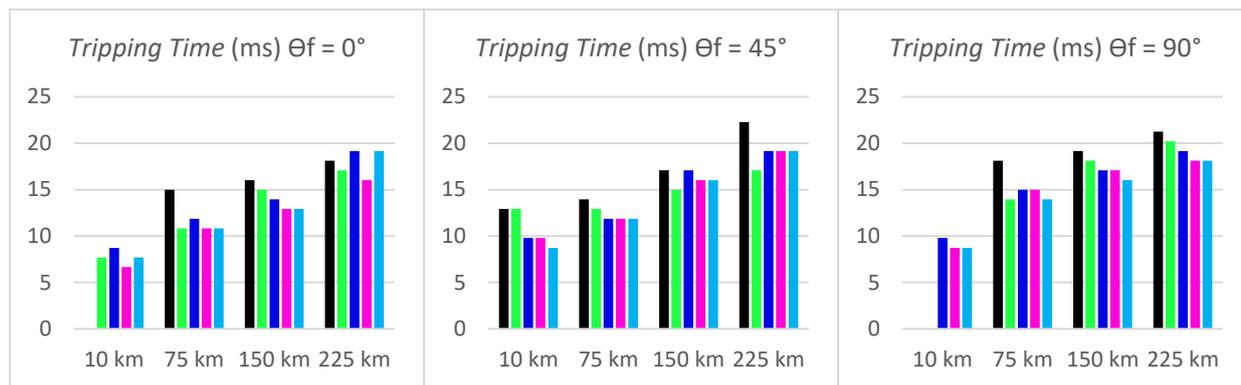


(c) Grau de compensação 80%.

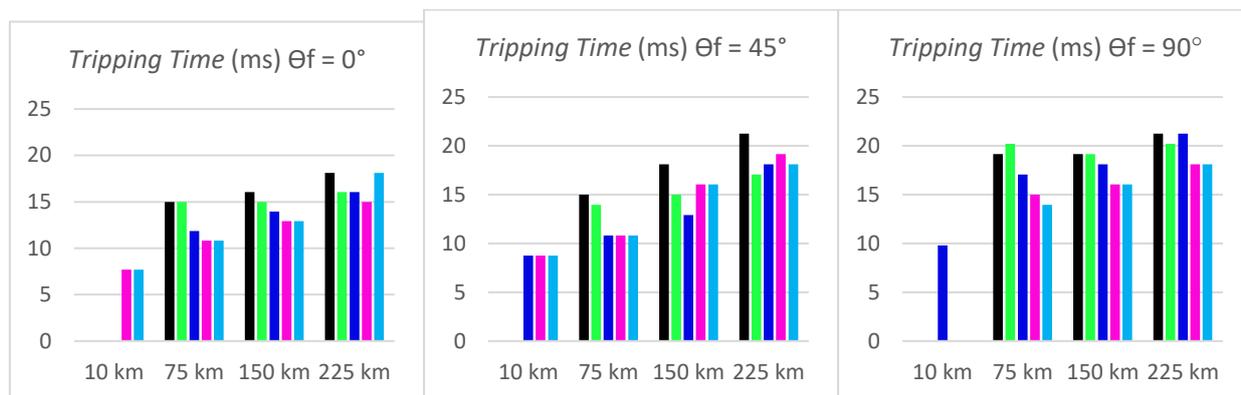
■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 62 – *Tripping time* para compensação série instalada nas extremidades – falta bifásica-terra.

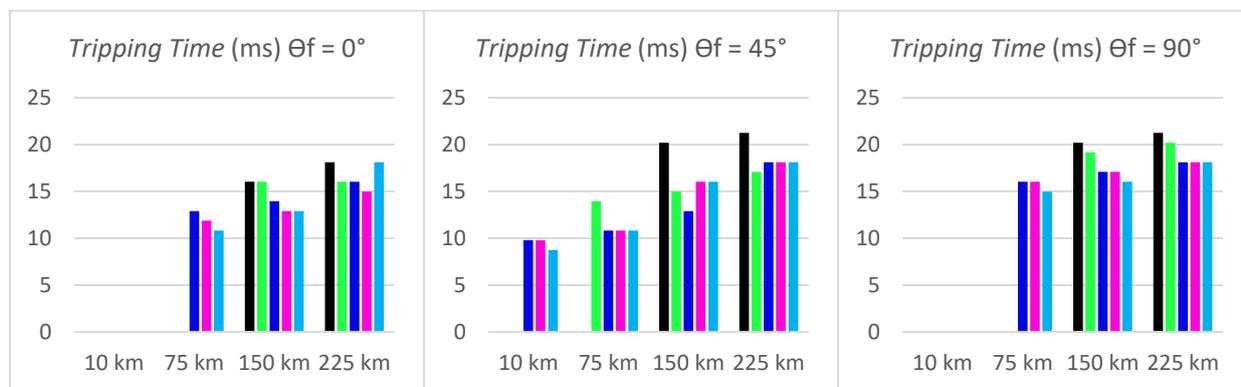
Fonte: Autoria Própria.



(a) Grau de compensação 40%;



(b) Grau de compensação 60%;



(c) Grau de compensação 80%.

■ Campos ■ FDFT ■ CossenoMod ■ Mímico+FDFT ■ Guo

Figura 63 – Tripping time para compensação série instalada nas extremidades – falta trifásica.

Fonte: Autoria Própria.

CAPÍTULO 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi analisado o desempenho de algoritmos de estimação fasorial na presença de compensação série. Para isso, foram realizados dois tipos de avaliações: uma utilizando sinais analíticos e outra utilizando sinais gerados através de simulações no *software* ATP.

Na primeira avaliação, foram gerados dois sinais analíticos (contendo componentes fundamental, harmônicas, sub-harmônicas e DC de decaimento exponencial) e utilizados como sinais de entrada, para que fossem avaliados através de índices de desempenho.

Para o primeiro sinal, em relação ao índice ID_1 , o método FDFT apresentou maior oscilação em torno da resposta para os três pesos adotados e se mostrou mais susceptível a componentes sub-harmônicas. O algoritmo de Guo também apresentou valores elevados para esse índice, enquanto os outros métodos competiram em relação ao desempenho.

Em relação ao índice ID_2 , pode-se observar que o Cosseno Modificado obteve menor índice de *overshoot* em relação aos outros métodos avaliados, seguido pelo método de Campos; enquanto o algoritmo de Guo foi o mais afetado, com maior índice.

Considerando o índice ID_3 , os métodos competiram em desempenho para B igual a 5 e a 10. Para B é igual a 20, o método FDFT foi o que obteve pior desempenho, apresentando maior velocidade de convergência.

Para o segundo sinal, nas situações em que B é igual a 10 e B é igual a 20, o algoritmo de Campos tem como resultado médias mais baixas que os outros algoritmos avaliados, apresentando menor oscilação em torno do valor correto e mostrando que é o método menos susceptível a combinação entre a componente DC de decaimento e as componentes sub-harmônicas, nessas situações. Para os casos em que o valor de B igual a 5, a combinação do filtro Mímico com o método FDFT apresenta a menor média dos resultados. Em contrapartida, o algoritmo de Guo e o método FDFT são os mais afetados, apresentando as maiores médias de valores para os três valores de B .

O algoritmo de Campos também apresentou menores médias para o índice ID_2 , nas três situações. Foi o método que obteve menor percentual *overshoot*, mostrando-se menos susceptível ao sinal em estudo. O algoritmo de Guo apresentou as piores médias para os três valores de B , seguido do filtro mímico, em comparação aos outros algoritmos.

Para o índice ID_3 , o método Mímico apresentou menores tempos de resposta, com os menores índices médios para B igual a 5 e 10. Para B igual a 20, o algoritmo de Guo se mostrou mais rápido. O método mais afetado por esse tipo de sinal, nas três situações, é o FDFT.

Na segunda avaliação, foram realizadas 288 simulações através do software ATP e os sinais gerados foram usados como sinais de entrada no *software* MATLAB®. As simulações foram divididas em dois grupos: compensação série no meio e nas extremidades. Em cada uma, foram realizadas faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas, variando o grau de compensação, o local de falta e seu ângulo de incidência.

Para faltas ocorridas na primeira metade de uma linha de transmissão com compensação série localizada no meio, percebe-se que há influência da presença do banco de capacitores na estimação fasorial, mas ainda assim o relé de distância consegue atuar de forma correta, pois o circuito equivalente formado não inclui o banco de capacitores. Por outro lado, em faltas ocorridas na segunda metade de linhas com essa configuração, o relé de distância é bastante afetado. Isso ocorre devido ao circuito equivalente que é formado após a falta, que inclui todos os capacitores instalados na linha.

Já no caso de faltas ocorridas em uma linha de transmissão com compensação localizada nas extremidades, o relé sempre tem seu desempenho afetado pelos capacitores. O problema é visto de forma mais evidente em faltas ocorridas na primeira metade da linha, pois o circuito equivalente formado após a falta é menor que o circuito equivalente de faltas que acontecem na segunda metade. Apesar dessa configuração de instalação sempre afetar o desempenho do relé independentemente da localização da falta, os curtos incluem apenas metade do banco no circuito equivalente formado após a falta.

A compensação série na linha de transmissão, independentemente do tipo de instalação, reduz o valor da impedância aparente e provoca sobrealcance das zonas de atuação. Assim, o relé de distância pode detectar uma falta externa de forma indevida e considerar que deve atuar. Além disso, pode provocar subalcance em faltas muito próximas do começo da linha.

Através das simulações, foi possível observar que todos os algoritmos testados são afetados pelas componentes indesejadas introduzidas pela presença de compensação série na linha.

Para dar continuidade aos estudos realizados nesta dissertação, são sugeridas as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Considerar a inserção dos equipamentos de proteção na modelagem do banco de capacitores série: MOV, chaves de *by-pass* e *spark gap*;
- Testar diferentes configurações de proteção;
- Utilizar outros métodos de localização de faltas;
- Comparar métodos que utilizam redes neurais artificiais para estimação fasorial com os algoritmos utilizados nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M.; FARMER, R. G. **Series Compensation of Power Systems**. Encinitas, California, EUA: PBLSH! Inc., 1996.
- BAINS, T. P. S.; ZADEH, M. R. D. Enhanced Phasor Estimation Technique for Fault Location in Series-Compensated Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 4, p. 2058-2060, 2015.
- BAINS, T. P. S.; ZADEH, M. R. D. Supplementary impedance-based fault-location algorithm for series-compensated lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 1, p. 334-342, 2016.
- BENMOUYAL, G. Removal of DC-offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering. **IEEE Transaction on Power Delivery**, v. 10, n. 2, p. 621–630, Apr. 1995.
- CAMPOS, A. K. X. S. **Um Novo Método de Estimação Fasorial para Uso em Relés Digitais de Proteção**. 2016. 158 f. Tese (Doutorado) – Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- CAMPOS, A. K. X. S.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES, D. A new phasor estimation method for digital protective relays. **Electric Power Systems Research**, v. 142, p. 227-236, 2017.
- CONCEIÇÃO, J. B. R. **Análise de transitórios em linhas de transmissão com compensação série**. 2016.
- DIAS FILHO, R. F. **Algoritmo de estimação fasorial para relés numéricos baseado no método generalizado de cancelamento por sinais atrasados**. 2015. 147 f. Tese (Doutorado) – Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- DINIZ, O. P. **Análise no plano alfa da proteção diferencial de linhas de transmissão com compensação série**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2016.
- FENTIE, D. D. **Understanding the dynamic MHO distance characteristic**. In: Protective Relay Engineers (CPRE), 2016 69th Annual Conference for. IEEE, 2016. p. 1-15.
- GÓMEZ-EXPÓSITO, A.; CONEJO, A.; CAÑIZARES, C. **Sistemas de Energia Elétrica: Análise e Operação**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- GONÇALVES, D. N. **Desempenho do Relé de Distância em Linhas de Transmissão Compensadas com TCSC**. Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro/Brasil, 2007.
- GUIMARÃES, J. M. C. **Investigação de Esquemas de Proteção para Linhas de Transmissão em EAT com Circuitos Duplos e com Compensação Série-Fixa**. 2016.

IEEE POWER SYSTEM RELAYING COMMITTEE. **EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing**. [S.l.], 2004.

IEEE Std C37.113TM-2015, **IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines**. 2015.

IZYKOWSKI, J.; ROSOŁOWSKI, E.; BALCEREK, P.; FULCZYK, M.; SAHA, M.M. Fault location on double-circuit series-compensated lines using two-end unsynchronized measurements. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 26, n. 4, p. 2072-2080, Oct. 2011.

LAMBERT, J. *et al.* Accurate Voltage Phasor Measurement in Series-compensated Network. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 1, January, 1994.

MAGNAGO, F. H., ABUR, A. Fault Location Using Wavelets. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 13, No. 4, pp. 1475-1480, October 1998.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: Grupo Gen-LTC, 2011.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro. Grupo Gen-LTC, 2013.

MOURA, D. S. **Avaliação do Impacto da Compensação Série na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão Usando Estimção de Fasores**. 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

MOURA, D. S.; MOREIRA, F. A.; SILVA, K. M. **Avaliação do Impacto da Compensação Série na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão Usando Estimção de Fasores**. 2012.

OLIVEIRA, A. D. de. **Métodos de estimação fasorial na presença de decaimento cc exponencial e inter-harmônicos**. 2015.

OLIVEIRA, A. L. P. de. **Avaliação do Comportamento da Proteção de Distância em Linha de Transmissão com Compensação Série Fixa Através da Simulação Digital em Tempo Real**. Itajubá, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, 2007.

ROBERTS, J. *et al.* **$Z=V/I$ does not make a distance relay**. In: Schweitzer engineering laboratories, inc. Pullman, Washington. 20th Annual Western Protective Conference. 1993. p. 19-21.

ROJAS, D. G. **Localização de faltas em linhas de transmissão com compensação série usando *pattern search***. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2016.

RUBEENA, R.; ZADEH, M. R. D.; BAINS, T. P. S. An accurate offline phasor estimation for fault location in series-compensated lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 2, p. 876-883, 2014.

RUSH, Peter. **Proteção e Automação de Redes: Conceito e Aplicação**. São Paulo: Editora Blucher: Schneider, 2011.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**, vol. único. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Bookman, 2004.

SILVA, K. M. **Estimação de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão**. Campina Grande, 2009. 208f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Campina Grande, 2009.

VIANELLO, Rodrigo *et al.* New phasor estimator in the presence of harmonics, dc offset, and interharmonics. In: **Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**, 2010 14th International Conference on. IEEE, 2010. p. 1-5.

YU, Chi-Shan *et al.* New fourier filter algorithm for series compensated transmission lines. In: **Power System Technology**, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on. IEEE, 2002. p. 2556-2560.

YU, Chi-Shan. A reiterative dft to damp decaying dc and subsynchronous frequency components in fault current. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 4, p. 1862–1870, Oct. 2006.

ZIEGLER, G. **Numerical Distance Protection: Principles and Applications**. 4. ed. Berlin, Germany: Siemens, AG, 2011.