

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JACQUELINE CHUMA BATISTELLA

**UMA NOVA PROPOSTA PARA A REMOÇÃO DA COMPONENTE DC DAS
CORRENTES DE FALTA USANDO MÍNIMOS QUADRADOS E TRANSFORMADA
DISCRETA DE FOURIER**

**ALEGRETE
2018**

JACQUELINE CHUMA BATISTELLA

**UMA NOVA PROPOSTA PARA A REMOÇÃO DA COMPONENTE DC DAS
CORRENTES DE FALTA USANDO MÍNIMOS QUADRADOS E TRANSFORMADA
DISCRETA DE FOURIER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Universidade Federal do Pampa – Unipampa

Curso de Engenharia Elétrica

Grupo de Energia e Sistemas Elétricos de Potência – GESEP

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

**ALEGRETE
2018**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

B333n Batistella, Jacqueline Chuma

Uma Nova Proposta Para A Remoção Da Componente DC
Das Correntes De Falta Usando Mínimos Quadrados E
Transformada Discreta de Fourier / Jacqueline Chuma
Batistella.

84 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA,
2018.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

1. Componente DC. 2. Filtros Digitais. 3. Transfor-
mada Discreta de Fourier. 4. Método dos Mínimos Quadra-
dos. I. Título.

JACQUELINE CHUMA BATISTELLA

**UMA NOVA PROPOSTA PARA A REMOÇÃO DA COMPONENTE DC DAS
CORRENTES DE FALTA USANDO MÍNIMOS QUADRADOS E TRANSFORMADA
DISCRETA DE FOURIER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

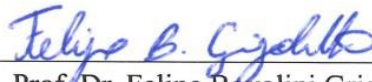
Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29 de junho de 2018.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
Orientador



Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto
UNIPAMPA



Prof. Dr. Alessandro Botti Benevides
UNIPAMPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me dar força, saúde e determinação para alcançar os meus objetivos. Também pelos obstáculos encontrados no caminho, são eles que nos fazem querer ir além.

A todos os professores da Universidade Federal do Pampa por contribuírem com a minha formação, em especial aos professores Felipe Grigoletto e Alessandro Benevides pelo aceite em participar da banca bem como pelas sugestões.

Ao professor, orientador e, por vezes, um verdadeiro pai, Eduardo Machado dos Santos por toda confiança depositada em mim, boa vontade e conhecimentos transmitidos.

Aos meus pais, Neila e Sergio, por todo apoio, amor e incentivo, os quais formaram o alicerce desta trajetória. Jamais chegaria até aqui sem eles.

A pessoa mais iluminada, amável e bondosa do mundo, minha vó Marina, que me enche de felicidade e que faz com que tudo valha a pena.

Ao meu irmão gêmeo Matheus, pela cumplicidade. Obrigada por me inspirar com a tua personalidade e inteligência.

A todos meus colegas e amigos da graduação, pela parceria, conversa e ajuda. Em especial a Ana Paula Lorenzoni, companheira de todos os trabalhos e exemplo de pessoa, solícita, esforçada, ética, inteligente e que me fez ver que “no final tudo dá certo”, ao Andryan pelas estadias no fim da graduação bem como pelas conversas e risadas, ao Paulo Vinicius Callai por procurar sempre me mostrar a parte prática das teorias aprendidas além de todo o suporte, encorajamento e companhia durante toda a graduação. E, também, aos amigos Felipe Carpes, Paulo Piovesan e Henrique Eickoff pelas palavras de incentivo e por sempre estarem dispostos a ajudar.

Não poderia deixar de agradecer meu amigo Evair Severo, que sempre me mostrou o lado positivo das coisas e que para tudo há um motivo, através da sua fé inabalável. Obrigada por me fazer crescer pessoalmente com todos teus ensinamentos sobre a vida.

Ao meu namorado, Maurício Oberto, pela paciência, amor, carinho e bondade raros de se encontrar hoje em dia, além da companhia diária e da ajuda no estágio e neste trabalho.

A Jussara Lopes, que se tornou minha segunda mãe, por me oferecer casa, amor, carinho e, principalmente, por permitir que eu convivesse com uma pessoa de coração tão grande como ela.

“Não importa o que aconteça, continue a nadar”

(Procurando Nemo, 2003)

RESUMO

Na ocorrência de um curto-circuito surgem componentes transitórias que prejudicam o funcionamento correto dos relés de proteção bem como dos transformadores de corrente. Nesse contexto, a componente DC, a qual surge no primeiro instante da ocorrência da falta e tem caráter exponencial, apresenta um nível maior de dificuldade para sua remoção, uma vez que se trata de um sinal não periódico, cujo espectro inclui todas as frequências. Os algoritmos dos relés numéricos fazem uso dos dados originários de filtros digitais, os quais realizam cálculos para estimação dos fasores de tensão e corrente. Para garantir que os relés atuem de forma rápida e seletiva, sem comprometer a precisão, é necessário que estes fasores estejam livres de ruídos, harmônicas e da componente DC, devendo conter apenas a frequência desejada. Dessa forma, garante-se que não haja distorção na leitura do relé e que este opere dentro da faixa na qual foi configurado, enviando um sinal de disparo aos disjuntores, caso seja necessário. Neste Trabalho, propõe-se a utilização do Método dos Mínimos Quadrados para a remoção da componente DC, a qual é estimada e subtraída do sinal de entrada. O resultado é processado pelo Filtro de Fourier de Meio Ciclo ou pelo Filtro de Fourier de Ciclo Completo. Assim, com o intuito de selecionar o filtro mais adequado para a proteção do sistema elétrico, é realizada uma comparação entre os desempenhos dos referidos filtros, com e sem o passo de estimar a DC antes do processamento do sinal. A referida comparação é feita através da análise de índices de desempenho como o *overshoot* da resposta de saída antes da convergência, o erro relativo e o tempo de convergência. Por fim, salienta-se que a seleção do algoritmo mais apropriado deve levar em consideração o seu desempenho no índice que seja mais importante para a respectiva aplicação.

Palavras-chave: Componente DC; Filtros Digitais; Fourier de Meio Ciclo; Fourier de Ciclo Completo; Mínimos Quadrados;

ABSTRACT

In the event of a short-circuit there are transient components that impair the correct functioning of the protection relays as well as the current transformers. In this context, the DC component, which appears at the first instant of occurrence of the fault and has an exponential character, presents a higher level of difficulty for its removal, since it is a non-periodic signal, whose spectrum includes all frequencies. The algorithms of the numerical relays make use of the data of the digital filters which perform the calculations for estimation of voltage and current phasors. To ensure that the relays operate quickly and selectively, without compromising accuracy, these phasors must be free of noise, harmonics and the DC component, and must contain only the desired frequency. This ensures that there is no distortion in the relay reading and that it operates within the range in which it has been configured, sending a shot signal to the circuit breakers, if necessary. In this work, it is proposed to use the least squares method for the removal of the DC component, which is estimated and subtracted from the input signal. The result is processed by either the Half Cycle Fourier Filter or the Full Cycle Fourier Filter. Thus, in order to select the most adequate filter for the protection of the electric system, a comparison is made between the performances of said filters, with and without the step of estimating the DC before the signal processing. This comparison is made through the analysis of performance indexes, such as the overshoot of the output response before convergence, the relative error and the convergence time. Finally, it should be pointed out that the selection of the most appropriate algorithm should take into account its performance in the index that is most important for the respective application.

Keywords: DC Component; Digital Filters; Half-Cycle Fourier; Full Cycle Fourier; Least squares;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Zona de Proteção.	28
Figura 2 - Corrente de curto-circuito simétrica e suas envoltórias.	30
Figura 3 - Corrente de Curto-Circuito real.	31
Figura 4 - Circuito RL.	33
Figura 5 - Relés de atração magnética. (a) Relé de êmbolo. (b) Relé de alavanca.	35
Figura 6 - Arquitetura de um relé de proteção digital.	38
Figura 7 - Circuito do Transformador de Corrente.	40
Figura 8 - Janela de Dados Móvel.	43
Figura 9- Sistema Teste.	50
Figura 10- Sinal de corrente de curto-circuito monofásico em 85% da LT.	51
Figura 11 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma Falta Monofásica em 85% da LT com 64 amostras por ciclo.	54
Figura 12 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Monofásica em 85% da LT com 64 amostras por ciclo.	56
Figura 13 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma Falta Monofásica em 45% da LT com 96 amostras por ciclo.	57
Figura 14 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Monofásica em 45% da LT com 96 amostras por ciclo.	59
Figura 15 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma Falta Monofásica em 5% da LT com 64 amostras por ciclo.	60
Figura 16 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma falta bifásica em 85% da LT com 96 amostras.	61
Figura 17 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Bifásica em 85% da LT e com 96 amostras por ciclo.	64
Figura 18 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma falta bifásica em 5% da LT com 64 amostras.	66

Figura 19 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Bifásica em 5% da LT e com 64 amostras por ciclo.	68
Figura 20 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma falta trifásica em 85% da LT com 64 amostras.	69
Figura 21 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Trifásica em 85% da LT e com 64 amostras por ciclo.	72
Figura 22 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma falta trifásica em 5% da LT com 96 amostras.	73
Figura 23 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Trifásica em 5% da LT e com 96 amostras por ciclo.	75
Figura 24 – Ângulo de fase da falta monofásica em 85% da LT com 64 amostras por ciclo..	82
Figura 25 – Ângulo de fase da falta monofásica em 45% da LT com 96 amostras por ciclo..	82
Figura 26 – Ângulo de fase da falta bifásica em 85% da LT com 96 amostras por ciclo.....	83
Figura 27 - Ângulo de fase da falta bifásica em 5% da LT com 64 amostras por ciclo.	83
Figura 28 - Ângulo de fase da falta trifásica em 85% da LT com 64 amostras por ciclo.	84
Figura 29 - Ângulo de fase da falta trifásica em 5% da LT com 96 amostras por ciclo.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais Relés quanto as Funções.....	39
Tabela 2 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 85% da LT, com 16 amostras por ciclo.....	52
Tabela 3 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 85% da LT, com 32 amostras por ciclo.....	53
Tabela 4 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 85% da LT, com 64 amostras por ciclo.....	53
Tabela 5 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 85% da LT, com 96 amostras por ciclo.....	53
Tabela 6 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 45% da LT, com 64 amostras por ciclo.....	55
Tabela 7 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 45% da LT, com 96 amostras por ciclo.....	57
Tabela 8 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 5% da LT, com 64 amostras por ciclo.....	58
Tabela 9 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 5% da LT, com 96 amostras por ciclo.....	58
Tabela 10 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2 ϕ em 85% da LT, com 16 amostras por ciclo.....	61
Tabela 11 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2 ϕ em 85% da LT, com 64 amostras por ciclo.....	62
Tabela 12 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2 ϕ em 85% da LT, com 96 amostras por ciclo.....	62
Tabela 13 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2 ϕ em 45% da LT, com 16 amostras por ciclo.....	63
Tabela 14 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2 ϕ em 45% da LT, com 64 amostras por ciclo.....	63

Tabela 15 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2ϕ em 45% da LT, com 96 amostras por ciclo.....	65
Tabela 16 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2ϕ em 5% da LT, com 16 amostras por ciclo.....	65
Tabela 17 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2ϕ em 5% da LT, com 64 amostras por ciclo.....	66
Tabela 18 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2ϕ em 5% da LT, com 96 amostras por ciclo.....	66
Tabela 19 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3ϕ em 85% da LT, com 64 amostras por ciclo.....	69
Tabela 20 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3ϕ em 85% da LT, com 96 amostras por ciclo.....	70
Tabela 21 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3ϕ em 45% da LT, com 64 amostras por ciclo.....	71
Tabela 22 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3ϕ em 45% da LT, com 96 amostras por ciclo.....	71
Tabela 23 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3ϕ em 5% da LT, com 64 amostras por ciclo.....	73
Tabela 24 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3ϕ em 5% da LT, com 96 amostras por ciclo.....	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Considerações Gerais.....	15
1.2 Justificativa	16
1.3 Objetivos	17
1.4 Estrutura do Trabalho	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Considerações Gerais.....	19
2.2 Revisão Bibliográfica	19
2.3 Considerações Finais	25
3 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	26
3.1 Considerações Gerais.....	26
3.2 Sistemas de Proteção	26
3.3 Tipos de Curto-Circuito	29
3.4 Influência da Componente DC nos Relés de Proteção	32
3.5 Principais Dispositivos utilizados nos Esquemas de Proteção.....	34
3.5.1 Relés	34
3.5.2 Transformadores de Instrumentação	40
3.6 Considerações Finais	42
4 TÉCNICAS DE FILTRAGEM DIGITAL PARA ESTIMAÇÃO FASORIAL.....	43
4.1 Considerações Gerais.....	43
4.2 Algoritmos de Filtragem Digital.....	43
4.3 Filtro de Fourier de Ciclo Completo.....	44
4.4 Filtro de Fourier de Meio Ciclo.....	45
4.5 Proposta para remoção da Componente DC	45
4.6 Índices de Desempenho	47
4.7 Considerações Finais	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
5.1 Considerações Gerais.....	50
5.2 Sinais Testados	50
5.3 Resultados	52
5.3.1 Faltas Monofásicas.....	52
5.3.2 Faltas Bifásicas	60
5.3.3 Faltas Trifásicas	69

5.4 Considerações Finais	76
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
6.1 Conclusões	77
6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	77
REFERÊNCIAS.....	79
APÊNDICE	82

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Para que a energia elétrica tenha sua disponibilidade garantida aos consumidores, deve-se atentar para o estudo da proteção de sistemas elétricos de potência. Distúrbios na rede podem modificar consideravelmente a operação do sistema elétrico sob regime permanente, o que, por consequência, pode acarretar na suspensão do fornecimento de energia. Em vista disso e dos atendimentos às normas que regem o setor elétrico brasileiro, a busca por tecnologias que assegurem a confiabilidade do sistema e mantenham os níveis adequados de qualidade de energia é cada vez maior (DIAS FILHO, 2015).

As linhas de transmissão são responsáveis pelo transporte de energia elétrica das fontes geradoras até os centros de consumidores. Elas estão submetidas às mais diversas intempéries climáticas e possuem grande extensão, o que as torna os elementos mais susceptíveis à ocorrência de distúrbios, dentro os quais se destacam os curto-circuitos, classificados como o evento mais preocupante para os sistemas de potência. Para que esses distúrbios sejam extintos, utilizam-se os relés de proteção, que monitoram o sistema identificando os defeitos e localizando-os da maneira mais exata possível (SILVA, 2009). Na ocorrência de uma eventualidade, um curto-circuito, por exemplo, a elevada corrente sensibiliza o relé e este envia um sinal de comando para abertura dos disjuntores associados aos componentes protegidos, isolando a falta no sistema com o mínimo de desconexões possíveis para a máxima continuidade do fornecimento de energia.

Sob condição anormal, os sinais do sistema observados pelos relés são distorcidos por fatores como componentes harmônicas, ruídos e a componente DC de caráter exponencial. Essas componentes prejudicam o funcionamento correto dos relés e dos transformadores de corrente. De forma a remover ou reduzir o efeito dessas componentes, são utilizados filtros digitais que realizam os cálculos para a estimação dos fasores de tensão e corrente, os quais serão utilizados pelos algoritmos dos relés. Esses fasores devem ser livres de qualquer componente transitória, devendo conter apenas o sinal senoidal fundamental, em amplitude e ângulo de fase, para que não haja erro na estimação da grandeza medida e, conseqüentemente, atuação indevida do relé (STEFANELLO *et al.*, 2010 a).

A componente DC surge no primeiro instante da ocorrência da falta devido a mudança instantânea do estado do sistema. Por ter caráter exponencial, trata-se de um sinal não periódico,

cujo espectro inclui todas as frequências, o que torna sua remoção uma das maiores dificuldades no estudo da filtragem digital (STEFANELLO *et al.*, 2010 a).

Com o propósito de estimar fasores com respostas cada vez mais precisas e rápidas, diversos métodos são propostos, cada qual baseado num conceito matemático. Os mais conhecidos utilizam a Transformada Discreta de Fourier, o Método dos Mínimos Quadrados e a Transformada Wavelet, sendo que a maioria encontrada na literatura baseia-se em modificações realizadas no Filtro tradicional de Fourier.

Neste Trabalho, utiliza-se o Método dos Mínimos Quadrados para estimar a componente DC e subtraí-la do sinal a ser processado pelos filtros. Dessa forma, utilizando índices de desempenho como tempo de convergência, sobre-elevação e erro máximo, avalia-se o Algoritmo de Fourier de Ciclo Completo e o Algoritmo de Fourier de Meio Ciclo, com e sem a estimação da DC precedendo a filtragem digital.

1.2 Justificativa

Distúrbios na rede provocam suspensão do fornecimento de energia, o que acarreta em prejuízos tanto para o consumidor como para as empresas responsáveis pelo atendimento da demanda, a qual cresce cada vez mais. Em vista disso, exige-se cada vez mais do sistema elétrico, o qual deve ser confiável e estável. Em consequência, as empresas devem aprimorar seus serviços, visto que a competitividade em torno do mercado de energia tem aumentado.

Para que a qualidade da energia e a continuidade no serviço de abastecimento sejam atendidas, requer-se um sistema de proteção capaz de reduzir o índice de ocorrências de faltas, por exemplo, em situações de curto-circuito, e que, num imprevisto, seja capaz de retornar à operação sob condições normais no menor tempo possível.

Nesse contexto, a estimação de fasores está diretamente ligada ao desempenho dos relés de proteção, dispositivos estes que são, juntamente com os disjuntores, capazes de isolar parte do sistema defeituoso e que, se bem ajustados e coordenados, reduzem o trecho desenergizado a uma parcela menor de consumidores. Ainda, ressalta-se que os fasores lidos pelos algoritmos dos relés numéricos devem ser livres de informações indesejáveis, contendo apenas a componente de frequência fundamental. Para isso, faz-se necessária a utilização da filtragem digital que elimine ou reduza consideravelmente essas informações, sendo que, quanto mais exatas e rápidas as respostas desses filtros, maiores as chances de atuação correta da proteção, elevando a confiabilidade do sistema.

Sendo assim, diversos métodos de estimação fasorial já foram propostos utilizando diferentes ferramentas matemáticas. No entanto, nenhuma conclusão a cerca de quais desses filtros devem ser empregados em determinada aplicação, pois os trabalhos que comparam os filtros avaliam-os considerando que todos os índices de desempenho têm a mesma importância, visto que isto depende da função para a qual o estimador fasorial está destinado.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desse Trabalho consiste em comparar algoritmos de estimação fasorial que utilizam diferentes técnicas matemáticas, como a Transformada Discreta de Fourier e Mínimos Quadrados. Como objetivos específicos, citam-se:

- Criação de um sistema teste no software EMTP-ATP®, para simulação do comportamento real do sistema elétrico, com diferentes condições operacionais;
- Criação de um banco de dados a partir dos sinais gerados no EMTP-ATP®;
- Implementação dos algoritmos de estimação fasorial em Matlab®;
- Proposição de técnica fundamentada em Mínimos Quadrados para remoção da componente DC
- Processamento dos sinais do banco de dados pelas metodologias implementadas;
- Análise do desempenho de cada método frente aos casos estudados;
- Determinação da melhor técnica dentre as estudadas frente a cada situação simulada no banco de dados.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este Trabalho está dividido em 6 capítulos. No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica a cerca das diferentes técnicas para estimação fasorial e das comparações já realizadas entre elas.

No Capítulo 3, é feita uma abordagem sucinta a cerca dos principais elementos utilizados nos esquemas de proteção, bem como sobre os princípios fundamentais a serem seguidos para a atuação correta dos sistemas de proteção. Dentre os principais equipamentos utilizados

nesses sistemas, destacam-se os relés, os TCs e os TPs, os quais têm suas características detalhadas. Além disso, são apresentados os tipos de curto-circuito e a influência da componente DC no desempenho dos relés de proteção.

No Capítulo 4, descrevem-se os Filtros de Fourier utilizados, bem como a proposta para remoção da Componente DC, através da sua estimação por Mínimos Quadrados. Também, são apresentados os índices de desempenho adotados na comparação entre os desempenhos apresentados pelos respectivos filtros.

Já o Capítulo 5 aborda os resultados obtidos por cada filtro frente aos casos simulados no EMTP- ATP®, em que foram alterados o ponto de ocorrência da falta, o tipo de curto-circuito e a taxa de amostragem.

Para finalizar, são apresentadas as Conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros no Capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Gerais

O presente Capítulo traz a revisão bibliográfica realizada, a qual permitiu o desenvolvimento das técnicas utilizadas neste Trabalho, para posterior comparação. São apresentados alguns dos diversos trabalhos encontrados na literatura sobre técnicas que utilizam a Transformada Discreta de Fourier. Também, são apresentadas as modificações realizadas nos filtros tradicionais de Fourier, além de trabalhos que utilizam o Filtro de Kalman, Mínimos Quadrados e a técnica de Janelas Curtas.

2.2 Revisão Bibliográfica

Diversas técnicas de redução ou remoção das componentes indesejáveis dos sistemas de potência, principalmente da componente exponencialmente decrescente (DC) das correntes de curto-circuito, têm sido apresentadas na literatura. As primeiras datam da década de 70, quando surgiram novas perspectivas para os sistemas de proteção, referentes à utilização de computadores, o que possibilitou o desenvolvimento de algoritmos de estimação de fasores voltados, principalmente, para a proteção de distância em linhas de transmissão.

A seguir, é feita uma breve discussão sobre os algoritmos de estimação fasorial encontrados na literatura, em ordem cronológica, salientando as principais ideias dos respectivos autores.

Um dos primeiros algoritmos propostos na literatura é apresentado por Mann e Morrison (1971). Nesse trabalho, um determinado número de amostras dos sinais de corrente e tensão são usadas para estimar o valor máximo de ambos. A partir desse valor, calcula-se a impedância da linha de transmissão e, também, são detectadas as condições da falta com base na queda de impedância.

No entanto, essa técnica pode apresentar erros em relação à componente DC e às harmônicas. Devido a isso, Mann e Morrison (1971) indicaram a utilização de uma impedância mímica no secundário do transformador de corrente, pois se a carga conectada no secundário tiver a mesma razão X/R que o primário, a tensão através da carga será puramente senoidal. Entretanto, o cancelamento da componente DC não é possível para todas as faltas, pois a razão X/R do primário combina a fonte e a linha de transmissão para o ponto de falta e como, em

geral, estas não são iguais, a parcela que pode ser removida da componente DC dependerá do ponto de ocorrência da falta.

Já o algoritmo proposto em Rockefeller e Udren (1972) é similar ao de Mann e Morrison (1971), pois são utilizadas derivadas no cálculo dos fasores. Estas, teoricamente, cancelam a componente DC. Dessa forma, este algoritmo oferece vantagem em relação ao proposto por Mann e Morrison (1971), exceto pelo fato de ser mais sensível às harmônicas de alta frequência na ocorrência de uma falta.

Phadke, Hlibka e Ibrahim (1976), McLaren e Redfern (1975) e Phadke, Hlibka e Ibrahim (1977) fizeram uso da Transformada de Fourier para estimar os fasores de frequência fundamental. Foi a partir das técnicas propostas por McLaren e Redfern (1975) e Phadke, Hlibka e Ibrahim (1977), os quais utilizavam a Transformada Discreta de Fourier (TDF) aplicada a um ciclo de amostras dos sinais, que surgiu um dos algoritmos mais tradicionais: o de Fourier de um ciclo. Este algoritmo é menos afetado pela componente DC e remove todas as harmônicas de ordem inteira do sinal. Já Phadke, Hlibka e Ibrahim (1976) utilizaram a TDF para meio ciclo de amostras dos sinais, o que reduz para a metade o tempo de resposta. Esse aumento de velocidade implica na perda da capacidade de eliminação de harmônicas pares, além de ser mais sensível a componente exponencial.

Além disso, para a estimação fasorial, Sachdev e Baribeau (1979) utilizaram uma técnica baseada no Método dos Mínimos Quadrados, onde propuseram o uso de um filtro *anti-aliasing* para que as harmônicas de ordem superior ou igual a cinco fossem eliminadas. No entanto, considerou-se que os sinais eram livres de harmônicas pares, resultando, dessa forma, num sinal composto apenas pela frequência fundamental e a terceira harmônica. Para a obtenção da componente DC, foram utilizadas aproximações da série de Taylor com apenas os dois primeiros termos. Este algoritmo obteve bons resultados em suas avaliações.

Destaca-se também a utilização do filtro de Kalman, o qual se trata de um processo recursivo de estimação eficiente, muito utilizado dentro da teoria de controle moderno. Este estima o estado instantâneo de um sistema dinâmico linear, perturbado por ruídos através de medições ao longo do tempo, linearmente relacionadas com este estado, mas corrompidas pelos ruídos (SANTOS, 2011). Girgis (1982) utilizou esse filtro como base para um algoritmo recursivo de estimação de fasores. Para uma melhor resposta desse filtro, o sistema a ser protegido, assim como as estatísticas dos ruídos de falta, deve ser bem conhecido, o que caracteriza uma desvantagem. Além disso, a componente DC é incluída na matriz de estados do algoritmo. Porém, isso só é realmente válido se for conhecida a constante de tempo desta componente, o que

não é possível, já que ela depende de parâmetros aleatórios como impedância e localização da falta incidente.

Phadke, Thorp e Adamiak (1983) estabeleceram o algoritmo de Fourier de um ciclo recursivo. Um algoritmo de estimação fasorial recursivo calcula o novo fasor a partir do antigo, ou seja, depende da entrada presente e de todas as anteriores. Dessa forma, o esforço computacional é reduzido e os coeficientes dos filtros variam a cada amostra, acarretando numa pior resposta transitória que o algoritmo de Fourier não-recursivo, visto que é mais afetado pelas componentes indesejáveis.

Sachdev, Wood e Johnson (1985) e Girgis e Makram (1988) apresentam melhorias do algoritmo baseado no filtro de Kalman proposto por Girgis (1982). Girgis e Makram (1988) processaram simultaneamente os dados de corrente e tensão de cada fase em dois modelos de filtro de Kalman, sendo um que assume a fase em condições normais e outro que a assume em condições de falta. Em ambas, a fase é decidida a partir das probabilidades calculadas e, posteriormente, o filtro continua a obter as melhores estimativas das variáveis de estado de corrente e tensão que, na convergência para valores mais precisos, são selecionados os melhores pares para decidir a localização da falta. O esquema foi testado em dados simulados digitalmente e a classificação das faltas foi duplamente segura usando os dados de tensão e corrente. Além disso, a convergência das estimativas atingiu valores exatos dentro de meio ciclo, determinando a localização da falta.

No trabalho de Sachdev e Nagpal (1991) foi utilizado o método dos mínimos quadrados para a estimação de fasores na forma recursiva. Na representação do sinal de entrada, foram consideradas a componente fundamental, a segunda, terceira, quarta e quinta harmônicas, bem como a componente DC. Esta última é aproximada da mesma forma como na proposta por Sachdev e Baribeau (1979), ou seja, pelos dois primeiros termos da Série de Taylor da sua representação. O filtro proposto, com fins de aplicação em proteção diferencial de transformadores, é comparado com seu desempenho utilizando a Transformada Discreta de Fourier e apresentando melhor resposta.

Nesse contexto, cabe ressaltar que o Filtro de Fourier é composto por um somatório de cossenos, responsável pelo cálculo da parte real do fasor, e um somatório de senos, referente à parte imaginária do respectivo fasor. Schweitzer e Hou (1993) analisaram as respostas em frequência do Filtro de Fourier de um ciclo e constaram que a parte com o cosseno é menos afetada pela componente DC do que a parte imaginária com o seno. Com base nessa constatação, foi proposta uma técnica de filtragem que ficou conhecida como Filtro Cosseno. O filtro é aplicado

a janela de dados atual e à uma janela de dados defasada um quarto de ciclo. Os autores concluíram que o filtro cosseno apresenta melhores características de filtragem que os de Fourier, Walsh, Kalman e Mínimos Quadrados no que se refere à remoção da componente DC. No entanto, pode apresentar um atraso de um quarto de ciclo em comparação com o algoritmo de Fourier de um ciclo.

Benmouyal (1995) mostra um novo algoritmo para eliminação da componente DC, conhecido como Filtro Mímico Digital. Trata-se de um filtro passa alta de primeira ordem, projetado para ter um ganho unitário na frequência fundamental. O autor avaliou o desempenho do filtro de Fourier de um ciclo e Fourier de meio ciclo, com e sem a adição do filtro mímico, onde constatou que, com o novo filtro, a ação da componente exponencialmente decrescente é completamente suprimida sobre uma ampla faixa de constantes de tempo. A desvantagem é a maior sensibilidade às harmônicas e aos ruídos. Esses filtros também foram comparados com os filtros de Kalman, Cosseno e Mínimos Quadrados, apresentando melhores resultados. Assim, os bons resultados obtidos pela proposta de Benmouyal (1995), devem-se ao fato de que, no cálculo dos parâmetros do filtro mímico, foi utilizada a mesma constante de tempo da componente DC considerada no sinal avaliado, pois quanto menor a discrepância entre os valores das constantes de tempo do filtro e do sinal, menores serão os erros na estimação do fasor (SILVA, 2009). Contudo, a constante de tempo e a amplitude da componente DC do sinal são desconhecidas, visto que depende da posição da falta, resistência de falta e do ângulo da tensão no instante em que surge o curto-circuito, não sendo possível conhecê-la com exatidão.

Partindo do princípio de que a TDF pode eliminar harmônicas com cálculos rápidos e simples, mas que, em contrapartida, tem sua precisão e velocidade de convergência influenciada pela componente DC, Gu e Yu (2000) apresentam um novo algoritmo de Fourier. Na aplicação da Transformada Discreta de Fourier de Ciclo Completo (TDFCC), é necessário um ciclo de amostras mais duas amostras para a obtenção dos sinais de frequência fundamental e remoção da componente DC. Já a aplicação da Transformada Discreta de Fourier de Meio Ciclo (TDFMC) requer metade de um ciclo de amostras mais duas ou três amostras para atingir o objetivo. O autor assumiu que a componente DC é uma função de decaimento exponencial com uma constante de tempo e amplitude, constatando que, após $N+2$ amostras, o fasor complexo de frequência fundamental pode ser resolvido. Além disso, a solução é precisa quando o sinal apresenta mais de uma componente DC. Para o relé de distância, o qual requer uma estimativa precisa do fasor de frequência fundamental bem como uma rápida convergência, este algoritmo é altamente eficaz.

Em 2003, outra modificação é feita no algoritmo de Fourier. A técnica, proposta por Sidhu *et al.* (2003), ao contrário de alguns outros algoritmos com parâmetros predeterminados e simplificações, é adaptável às condições do sistema e da falta. Ela utiliza dois filtros em paralelo, um ajustado na frequência fundamental e outro numa frequência bem maior que a frequência de corte do filtro *anti-aliasing*, para que somente a componente DC afete na saída desse filtro. Os autores concluíram que o algoritmo por eles apresentado oferece várias vantagens, quando comparado ao Filtro de Fourier de Ciclo Completo.

A metodologia de Balamourougan e Sidhu (2006) também faz uso da Transformada Discreta de Fourier (TDF). Nela, assume-se que o sinal de entrada passa por um filtro *anti-aliasing* analógico, o qual remove harmônicas de ordem maior contidas no sinal. Também, é requerido dois conjuntos de filtros ortogonais digitais, sendo um deles sintonizado na frequência fundamental e projetado para eliminar todas as harmônicas, mantendo a componente DC de forma que o sinal, ao passar por este conjunto de filtros, contenha a componente de frequência fundamental distorcida pela componente DC. O segundo conjunto é ajustado em uma harmônica cuja ordem deve ser inferior a metade da frequência de amostragem, mas superior à frequência de corte do filtro *anti-aliasing*, que por sua vez, já eliminou essa harmônica. Portanto, a saída desse conjunto contém apenas a componente DC, que pode ser removida relacionando a saída dos dois conjuntos de filtros ortogonais. Para o projeto desses filtros ortogonais, pode-se utilizar tanto a TDF quanto os Mínimos Quadrados. Porém, é escolhida a primeira forma por esta fornecer melhor capacidade de supressão de ruído. O desempenho desse algoritmo é comparado com dois outros de meio ciclo: o Método dos Mínimos Quadrados e o Filtro de Fourier com o filtro mímico. Os resultados mostram que o algoritmo proposto além de convergir mais rapidamente para o valor final, tem uma melhor precisão em comparação aos outros dois.

O método proposto por Lee, Kang e Nam (2008) utiliza a mesma ideia vista de Sidhu *et al.* (2003), ou seja, ambos partem do fato de que o fasor de frequência fundamental pode ser encontrado se a saída do Filtro de Fourier referente a componente DC for conhecida. No trabalho apresentado por Lee, Kang e Nam (2008), o processo da TDF é decomposto em um conjunto de amostras pares e um conjunto de amostras ímpares. A componente exponencial é calculada e eliminada por meio da diferença entre os dois conjuntos de amostras. Os resultados mostraram que esse algoritmo estima com precisão o fasor na presença da componente DC, apresentando um bom desempenho até mesmo quando o sinal analisado inclui duas componentes de decaimento exponencial.

Segundo Cho *et al.* (2009), para eliminar a componente DC, a mesma deve ser estimada por meio do cálculo da integral da corrente de falta durante um período mais um pequeno intervalo de tempo. Após o cálculo, esta componente é subtraída dos dados amostrados em um período de tempo, a fim de ser eliminada para obtenção da componente de frequência fundamental. O algoritmo apresentou maior velocidade de convergência e melhor precisão que a TDF convencional.

Stefanello *et al.* (2010a) avaliam cinco algoritmos baseados na Transformada Discreta de Fourier, sendo estes a TDFCC, o algoritmo proposto por Sidhu *et al.* (2003), a proposta de Lee, Kang e Nam (2008), o TDFCC modificado e o TDFMC. Para que os algoritmos fossem testados, os autores desenvolveram sinais de testes a partir de equações matemáticas e, para tornar possível a comparação entre eles, foram utilizados índices de desempenho que os avaliam em termos da capacidade de rejeição da componente DC, resposta transitória, imunidade a ruídos, exatidão da resposta e frequência de amostragem. Cada filtro analisado sobressai-se em alguma característica. Porém, foi considerado que todos os índices de desempenho têm a mesma relevância e os primeiros classificados foram os que apresentaram melhor desempenho na maioria destes índices. Apesar de exigirem maior esforço computacional, em vista do número de equações matemáticas envolvidas, os algoritmos propostos por Sidhu *et. al.* (2003) e Lee, Kang e Nam (2008) foram considerados melhores.

Assim como no trabalho anterior, em Stefanello *et al.* (2010b) também é realizada uma comparação entre filtros fundamentados na TDF. Neste caso, foram analisados o filtro proposto por Lee, Kang e Nam (2008), em sua forma original e com janela de dados reduzida, bem como o filtro proposto por Cho *et al.* (2009). Para a avaliação dos mesmos foram considerados os mesmos índices de desempenho e sinais de teste usados em Stefanello *et al.* (2010a). Os autores concluíram que o algoritmo com a janela de dados reduzida apresenta uma resposta de convergência mais rápida sem perder a exatidão. Além disso, concluíram que o método de redução do tamanho da janela de amostras estabiliza a resposta meio ciclo antes do que o algoritmo proposto por Cho *et al.* (2009), sendo possível sua aplicação em outros algoritmos de estimação de fasores fundamentados na TDF, visto que seus desempenhos serão consideravelmente melhores.

2.3 Considerações Finais

Neste Capítulo, foram apresentadas as principais metodologias revisadas, ressaltando, de forma sucinta, as conclusões dos autores bem como algumas das principais vantagens e desvantagens de cada método. Tendo em vista os melhores resultados obtidos pelas modificações no Filtro de Fourier, este trabalho também propõe a sua utilização, porém, com a utilização de uma técnica fundamentada em Mínimos Quadrados para a remoção da componente DC das correntes de curto-circuito.

Os filtros comparados neste Trabalho são descritos no Capítulo 4. Já o Capítulo seguinte aborda os principais fundamentos de um sistema de proteção, os quais servem como base para o desenvolvimento e compreensão deste Trabalho.

3 PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

3.1 Considerações Gerais

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é definido como todo o processo no qual a energia é submetida desde a geração até a distribuição, em baixa tensão, nas residências. Dessa forma, cabe ao SEP o contínuo fornecimento de energia bem como a qualidade e confiabilidade na entrega da mesma. O SEP, no entanto, está suscetível a uma série de eventos que podem prejudicar o alcance de suas funções como, por exemplo, descargas atmosféricas, falhas nas operações ou em seus dispositivos e catástrofes naturais (COSTA, 2007). Para evitar que faltas, como o curto-circuito, possam danificar equipamentos e materiais do sistema ou provocar danos aos consumidores, é necessário um sistema de proteção seletivo e eficaz que seja capaz de isolar somente a parte afetada e que assegure o rápido reestabelecimento das condições normais de operação do sistema elétrico. Nesse contexto, este Capítulo apresenta os conceitos básicos a cerca dos sistemas de proteção, os quais formam base para a formulação da técnica proposta neste Trabalho.

3.2 Sistemas de Proteção

O sistema de proteção compreende uma série de equipamentos elétricos, como relés, disjuntores, baterias, transformadores de corrente e transformadores de potencial. Estes, devem ser dispostos na ordem correta e devidamente ajustados respeitando alguns princípios, como o de seletividade e coordenação adotados na proteção (FORMIGA, 2012).

O termo seletividade está associado a disposição dos equipamentos de proteção. Num sistema seletivo, o dispositivo mais próximo à falta atua independente se esta for temporária ou permanente. Já a coordenação, baseia-se na determinação dos ajustes de forma a conseguir que as proteções de retaguarda atuem somente no caso de falha das proteções primárias, responsáveis pela proteção de uma zona específica, permitindo, desta forma, o reestabelecimento automático para faltas temporárias e seletividade para faltas permanentes (COTOSCK, 2007).

A velocidade de resposta e a sensibilidade na operação são outras das principais propriedades básicas de um sistema de proteção. O desligamento do trecho ou equipamento defeituoso deve dar-se no menor tempo possível e as respostas às anormalidades com a menor margem possível de tolerância entre a atuação e a não atuação. Por exemplo, em se tratando de um relé,

não deve haver atuação para variações de carga rotineiras no sistema. Dessa forma, em seu ajuste deve-se deixar uma folga de 40% a 50% na corrente de carga, para que o relé não atue indevidamente para flutuações de carga e, também, como margem para possibilitar as transferências de carga devido a manobras na configuração da rede do SEP em operação. No entanto, apesar dessa folga, o ajuste do relé deve satisfazer a inequação (3.1), mostrada na próxima seção, e a escolha da corrente de ajuste deve ser o mais próximo possível do limite inferior desta, como garantia de sensibilidade e de que o relé terá um alcance além do final do trecho protegido (SANTOS, 2016).

Um sistema que atende a estes requisitos de proteção proporciona desligamentos permanentes seletivos dos circuitos elétricos na ocorrência de faltas, minimizando o número de consumidores atingidos por tais desligamentos.

Um esquema de proteção com bom desempenho minimiza:

- Os danos nos equipamentos causados pelo defeito, reduzindo o custo da reparação dos estragos;
- A probabilidade do defeito se propagar e atingir outros equipamentos;
- O tempo no qual o equipamento fica indisponível;
- A perda de produção;
- A área desligada, que fica restrita ao trecho defeituoso, minimizando o público sem energia;

A nível de distribuição, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) avalia as concessionárias em diversos aspectos do fornecimento, como a qualidade dos serviços prestados que compreende a avaliação das interrupções ocorridas no sistema. Para essa avaliação, destacam-se os indicadores de continuidade coletivos DEC, que se trata da duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, e FEC, que se refere a frequência com que essas interrupções ocorrem (ANEEL, 2016).

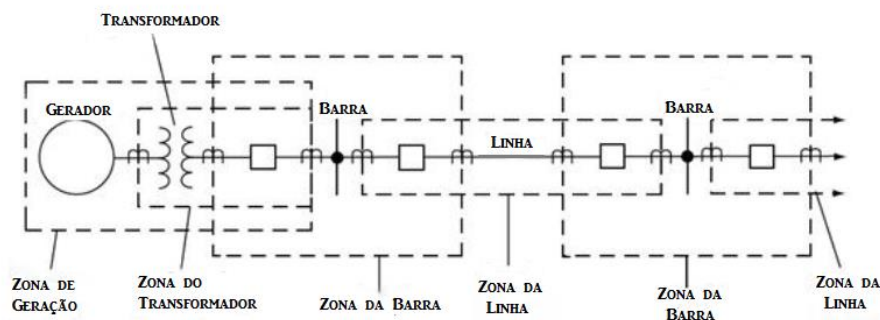
A ANEEL exige que as concessionárias mantenham um padrão de continuidade no fornecimento de energia elétrica, visando manter a qualidade na prestação do serviço público. Para tal, são editados limites para os indicadores coletivos de continuidade. Periodicamente a ANEEL faz a avaliação destes índices através de subdivisões das distribuidoras, chamadas de Conjuntos Elétricos. Esses conjuntos podem ter abrangência variada, abrangendo mais de um município ou alguns municípios possuindo mais de um conjunto (ANEEL, 2016).

De maneira geral, o DEC e o FEC representam, respectivamente, o tempo e a quantidade de vezes que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica para o período considerado, podendo ser mês, trimestre ou ano. Para que as concessionárias atendam as exigências que são impostas, em relação a esses indicadores, reforça-se a necessidade de um sistema que, a partir da detecção automática de anormalidades na operação, realize ações naturais que preservem a integridade do sistema.

No SEP, a proteção está diretamente ligada aos principais equipamentos que compõem o sistema. Sendo assim, cada um deles possui sua proteção específica, com diferentes filosofias e relés, que o isola do restante da rede em caso de defeito. Ao trecho protegido pela proteção do respectivo equipamento, dá-se o nome de zona de proteção.

As zonas de proteção (Figura 1) são definidas com base na localização dos transformadores de corrente, responsáveis pela medição da grandeza a ser monitorada, e também são limitadas pela menor sobrecorrente que o dispositivo de proteção é capaz de detectar, geralmente a corrente de curto-circuito monofásico terra-mínimo. Como maior garantia de proteção, essas zonas são sobrepostas, constituindo linhas de defesa. A primeira defesa, na ocorrência de falta, é a proteção principal que está situada na zona de proteção primária. Em caso de falha dessa proteção, deverá atuar o dispositivo situado a montante, cuja zona de proteção oferece retaguarda para a zona primária (SANTOS, 2016). Essa estratégia garante que haja uma escala de tempo no sentido da proteção principal para a de retaguarda, garantindo seletividade no desligamento do sistema.

Figura 1- Zona de Proteção.



Fonte: Silva (2012)

3.3 Tipos de Curto-Circuito

Um curto-circuito, que como o nome sugere representa o caminho mais curto que a corrente realiza num circuito, pode ser definido como “uma conexão intencional ou acidental, em geral de baixa impedância, entre dois ou mais pontos que normalmente estão em diferentes potenciais elétricos” (SANTOS, 2009, p. 1). Pelo fato da corrente percorrer um caminho com baixa impedância, ela atinge valores muito elevados, cuja intensidade depende do tipo de curto-circuito. Os tipos de curto-circuito são:

- Monofásico ou fase-terra;
- Bifásico;
- Bifásico-terra; e
- Trifásico.

O estudo de curto-circuito é indispensável no planejamento e controle do sistema elétrico, pois através dele realiza-se o dimensionamento do sistema de aterramento, o cálculo dos ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente (relés e disjuntores), a determinação da capacidade dos equipamentos em suportar as elevadas correntes de curto-circuito, entre outros (SANTOS, 2009).

As principais causas das ocorrências de curto-circuitos em sistemas de potência são (SANTOS, 2016):

- Descargas atmosféricas;
- Falhas mecânicas no isolamento;
- Envelhecimento e/ou desgaste de materiais;
- Ação das diferentes temperaturas;
- Poluição e queimadas;
- Queda de árvores sobre redes;
- Manobras incorretas; e
- Colisão de veículos com elementos que sustentam as linhas de transmissão.

Em relação ao tipo de curto-circuito mais frequente, tem-se o monofásico em 80% dos casos. A seguir, o bifásico com 15% das ocorrências e o trifásico com apenas 5% (METZ-NOBLAT, 2005).

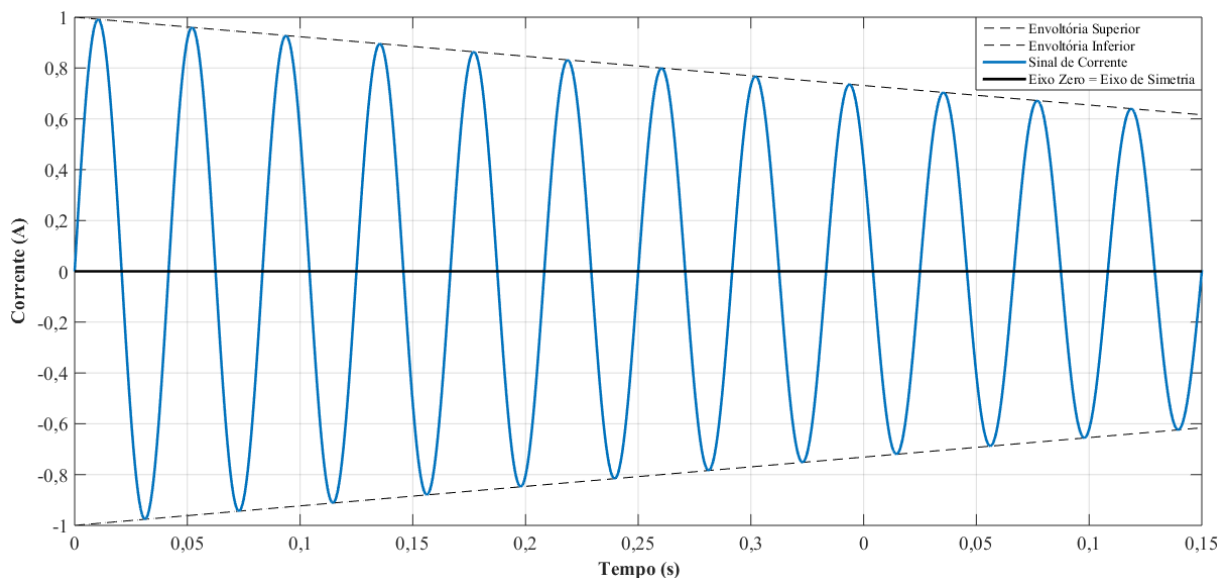
As implicações dos curtos-circuitos variam de acordo com a duração da falta, com o ponto onde esta ocorre e com a sua potência. Os danos incluem (METZ-NOBLAT, 2005):

- No local da falta, o surgimento de arcos elétricos, que resulta em:
 - Danos na isolamento;
 - Danos na solda dos condutores; e
 - Fogo e riscos a população.
- No circuito defeituoso:
 - Deformação dos barramentos;
 - Desconexão dos cabos; e
 - Aumento excessivo da temperatura devido a uma maior perda por efeito Joule.
- Em circuitos próximos:
 - Quedas de tensão enquanto a falta não é extinguida;
 - Desconexão de uma parte da rede, dependendo de como é a sua distribuição e dos ajustes e níveis de sensibilidade dos dispositivos de proteção; e
 - Instabilidade dinâmica e/ou perda de sincronismo de máquinas.

Em relação as formas de onda das correntes de curto-circuito, elas podem ser simétricas ou assimétricas. Essa classificação é feita com base na curva que tangencia os picos do sinal de corrente, chamada de envoltória (SANTOS, 2016).

Uma corrente é simétrica quando suas envoltórias são simétricas em relação ao eixo zero, como mostra a Figura 2.

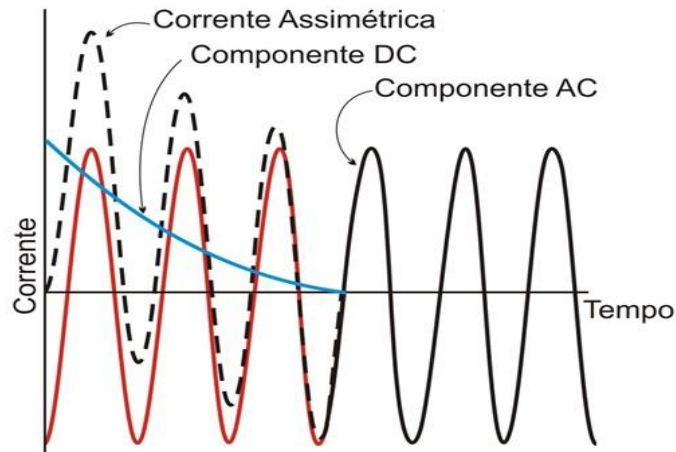
Figura 2 - Corrente de curto-circuito simétrica e suas envoltórias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Se não houver simetria entre as envoltórias da corrente e o eixo zero, a corrente é dita assimétrica, podendo ser total ou parcialmente assimétrica, que é o que acontece na prática, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 - Corrente de Curto-Circuito real.



Fonte: Cardoso Jr. (2004)

Como mostra a Figura 3, a corrente de falta é dada pela soma de uma componente unidirecional exponencialmente decrescente (componente DC) e uma componente alternada que varia senoidalmente com o tempo. Nota-se também que, inicialmente, a corrente é assimétrica, mas tende à simetria com o passar do tempo, uma vez que se tem a atenuação da componente DC. Aos períodos que a corrente é assimétrica dá-se o nome de subtransitório e transitório, passando a seguir para o período de regime (SANTOS, 2009).

A corrente de falta é simétrica quando o curto ocorre no exato instante em que a tensão da fonte é máxima e, é totalmente assimétrica, quando a falta ocorre no instante em que a tensão da fonte é nula (SANTOS, 2016). Por tratar-se de dois extremos, são de difícil ocorrência e, por isso, na prática a corrente de curto-circuito é, geralmente, parcialmente assimétrica.

Para a determinação da capacidade dos equipamentos em suportar os efeitos dinâmicos da elevada corrente de falta, utilizam-se os valores assimétricos da corrente. Os valores da parte simétrica são usados na determinação da capacidade de interrupção dos dispositivos de seccionamento, para determinar a capacidade de suportar os efeitos térmicos e para definir os ajustes dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente (SANTOS, 2009).

Os cálculos de curto-circuito determinam o valor da componente alternada simétrica. A partir desse valor é possível encontrar o fator de assimetria e, portanto, a componente exponencial. Entretanto, esse fator depende da frequência elétrica da rede, da relação X/R e do tempo considerado após o chaveamento. Ressalta-se que a impedância e a resistência da linha dependem diretamente do exato local da ocorrência da falta. Por este motivo e também pelo fato da componente DC tratar-se de um sinal não periódico, apresentando em seu espectro uma faixa de frequências relativamente grande, é que a remoção desta componente ou a atenuação de seus efeitos tornam um grande desafio.

3.4 Influência da Componente DC nos Relés de Proteção

A componente DC é uma das principais componentes transitórias que podem causar a saturação dos TCs. Isto pode comprometer o funcionamento dos variados tipos de relés.

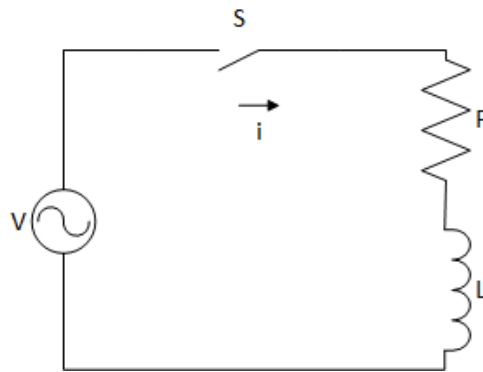
Sabe-se que, com a saturação, a forma de onda do primário do TC não é refletida fielmente no secundário, apresentando distorções em sua forma. Devido a isto, num relé de sobrecorrente, por exemplo, a saturação provoca um aumento considerável no tempo de atuação do relé, fazendo com que a elevada corrente de falta permaneça por um longo intervalo de tempo, podendo danificar os equipamentos conectados ao sistema (SANTOS, 2016).

Num relé de distância, a saturação resulta em uma redução na magnitude da corrente e defasagem angular, o que implica num aumento da impedância vista por estes relés. Dessa forma, ocorrem problemas de subalcance e atrasos na operação do relé. Já em relés diferenciais percentuais ou em esquemas que utilizam a conexão diferencial, a saturação gera correntes diferenciais fictícias, durante faltas externas. Essas correntes podem ser maiores do que os valores de ajuste para a operação do relé diferencial percentual ou para um relé de sobrecorrente com a conexão diferencial, causando assim problemas de sobrealcance.

Além dos efeitos que a componente DC pode provocar indiretamente nos relés, saturando os TCs, ela, por si só, pode causar erros na atuação dos relés, já que aumenta consideravelmente a magnitude da corrente no início de uma falta, podendo, portanto, fazer com que a corrente atinja o valor de ajuste e o relé opere além da sua zona de proteção, caracterizando um problema de sobrealcance (STEFANELLO *et al.*, 2010 a).

A seguir é feita uma análise do comportamento da corrente na ocorrência de um curto-circuito, utilizando um circuito RL, já que os sistemas de potência, na sua maioria, são predominantemente indutivos e resistivos (SILVA, 2014). O circuito RL é mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Circuito RL.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que, quando a chave S for fechada, circulará pelo circuito uma corrente i . A partir de então, a fonte V alimentará o circuito, até o indutor ficar totalmente carregado. Nesse intervalo de tempo, até que a corrente atinja seu valor de regime permanente, surge uma componente transitória, que permite um alcance de forma suave do valor máximo da corrente.

A tensão V é representada pela Equação 3.1.

$$V(t) = V_p \text{sen}(\omega t + \phi) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Onde V_p é a magnitude da tensão de pico, ω é a frequência angular e ϕ é o ângulo de fase.

Resolvendo a equação diferencial acima, tem-se a corrente do circuito durante a ocorrência de uma falta, expressa por (3.2).

$$i(t) = \frac{V_p}{\sqrt{(R^2 + \omega^2 \cdot L^2)}} \left[\text{sen}(\omega t + \phi - \theta) - \text{sen}(\phi - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (3.2)$$

Onde θ é o ângulo entre a tensão e a corrente, dado por (3.3).

$$\theta = \arctan\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (3.3)$$

A corrente representada em (3.2) tem o comportamento assimétrico já visto na Figura 3. Nota-se que parcela da corrente referente a componente unidirecional exponencial será nula quando $\phi - \theta = n\pi$, para todo n inteiro, e máxima quando $\phi - \theta = n\pi/2$, para todo n inteiro ímpar.

O tempo de decaimento da componente DC no sinal de corrente é determinado pelo valor da constante de tempo τ , que se trata da razão L/R do circuito (SILVA, 2014).

3.5 Principais Dispositivos utilizados nos Esquemas de Proteção

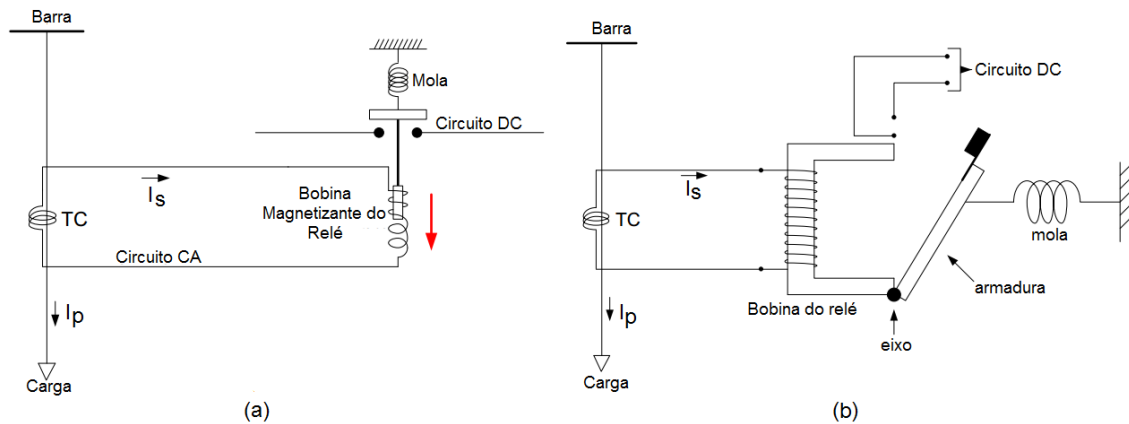
3.5.1 Relés

O Sistema Elétrico de Potência é protegido por esquemas de proteção que são basicamente comandados por relés. Esses desempenham a função de identificar os defeitos, localizá-los da maneira mais exata possível e promover a abertura dos disjuntores de modo a isolar o defeito, mantendo o restante do sistema em condições normais de operação. Na ocorrência de um curto-circuito, por exemplo, a elevada corrente sensibiliza o relé, que envia um sinal para abertura do disjuntor e que, conseqüentemente, acarreta na desconexão do trecho defeituoso do SEP. Dessa forma, os relés assumem a posição mais importante dentro de um sistema de proteção.

Com relação ao princípio de funcionamento, os relés podem ser eletromecânicos, estáticos ou digitais. Os relés eletromecânicos foram os primeiros a surgirem e, ainda assim, continuam amplamente utilizados, principalmente devido a sua grande vida útil. Esses relés são acionados por movimentos provenientes dos acoplamentos elétricos e magnéticos. Podem ser de atração ou indução eletromagnética.

O princípio de funcionamento dos relés de atração magnética é idêntico ao do eletroímã. Quando a corrente no secundário do Transformador de Corrente (TC) for maior que a corrente de ajuste do relé, a bobina de magnetização produzirá um campo magnético capaz de atrair o êmbolo ou alavanca provocando, conseqüentemente, o movimento dos mesmos e permitindo assim, a operação do relé. A Figura 5 mostra um relé de atração magnética de êmbolo e de alavanca (SANTOS, 2016).

Figura 5 - Relés de atração magnética. (a) Relé de êmbolo. (b) Relé de alavanca.



Fonte: Santos (2016).

O menor valor de campo magnético que produz uma força de atração das partes móveis do relé exatamente igual à força mecânica de retenção é chamado de Limiar de Operação do Relé. Ou seja, para esse valor de corrente, o relé fica na iminência de atuar, mas não atua, pois a força resultante sobre as partes móveis do relé é nula.

É comum, no trato com proteção de SEP, a utilização dos termos *pick up* e *drop out*. *Pick up* é o termo designado para a menor corrente que faz o relé operar, ou seja, é a menor corrente de todas as correntes que excedem o limiar de operação do relé. *Drop out* é o termo que se refere a desativação do relé, isto é, é a maior corrente que produz a abertura dos contatos do relé (SANTOS, 2016).

Para se obter uma operação adequada e segura do relé de sobrecorrente temporizado, por exemplo, é necessário ajustá-lo de modo a atender as condições expressas na Inequação (3.4).

$$(1,4 \text{ a } 1,5) * I_{\text{nominal de carga}} < I_{\text{ajuste}} < \frac{I_{\text{CC mínimo no final do trecho protegido}}}{a} \quad (3.4)$$

Como dito anteriormente, é necessária uma folga no ajuste do relé para que ele não atue indevidamente. O relé deve operar com absoluta garantia para qualquer curto-circuito no trecho protegido, desde que a Inequação (3.4) seja satisfeita. Escolhendo como ajuste do relé um valor o mais próximo possível do limite inferior da inequação, garante-se que a mínima corrente de curto-circuito no final do alimentador seja muitas vezes maior que o limiar de operação do relé. O fator de início de curva a , que aparece dividindo o último termo em (3.4), garante maior

confiabilidade na atuação do relé (SANTOS, 2016). Este, depende da natureza do relé, sendo igual 1,1 para relés digitais e igual a 1,5 para relés eletromecânicos.

Existem três formas de se proceder o ajuste dos relés de atração eletromagnética:

- Bobina magnetizante com vários TAPs;
- Mola de retenção com maior ou menor tracionamento;
- Variação no entreferro da alavanca da parte móvel.

A mudança de TAPs é uma forma muito segura para manter e garantir a repetitividade de performance da atração do relé, sendo este procedimento largamente empregado. O TAP do relé é a própria corrente de ajuste, onde este se encontra em seu limiar de operação.

Para medir o limiar de operação do relé, utiliza-se o termo conhecido como múltiplo do relé (M), que indica quantas vezes a corrente de defeito é maior que a do relé. O cálculo do múltiplo é dado pela Equação 3.5 (SANTOS, 2016).

$$M = \frac{I_s}{TAP} = \frac{I_p}{RTC * TAP} \quad (3.5)$$

Por natureza, os relés de atração eletromagnética são de característica instantânea, mas existem mecanismos que podem ser utilizados para que o relé atue com retardo de tempo, como, por exemplo, temporização por óleo e acoplamento de um relé de tempo auxiliar.

Os relés de indução eletromagnética funcionam utilizando o mesmo princípio de um motor elétrico, onde um rotor ou disco gira. O giro produz o fechamento do contato NA do relé, que ativa o circuito ou mecanismo que promove a abertura do disjuntor. Como exemplo de relé desse tipo, há o relé medidor de kWh, relé tipo duplo laço de indução e relé de Disco de Indução por Bobina de Sombra (SANTOS, 2016).

Os relés estáticos fazem uso de dispositivos eletrônicos próprios e específicos aos objetivos da proteção com componentes analógicos, em vez de bobinas e ímas como os eletromecânicos. Neles, não há nenhum dispositivo mecânico em movimento, todos os comandos e operações são feitos eletronicamente.

Esse tipo de relé surgiu com o objetivo de melhorar a sensibilidade, confiabilidade e velocidade dos sistemas de proteção visto que removeu partes móveis sensíveis ao desgaste, corrosão e vibração (SILVA, 2012). No entanto, muitos deles atuavam indevidamente devido, justamente, a sensibilidade muito apurada, sendo que pequenos transitórios ou harmônicos, comuns na operação do sistema, já eram suficientes para promover a atuação do relé. Alguns

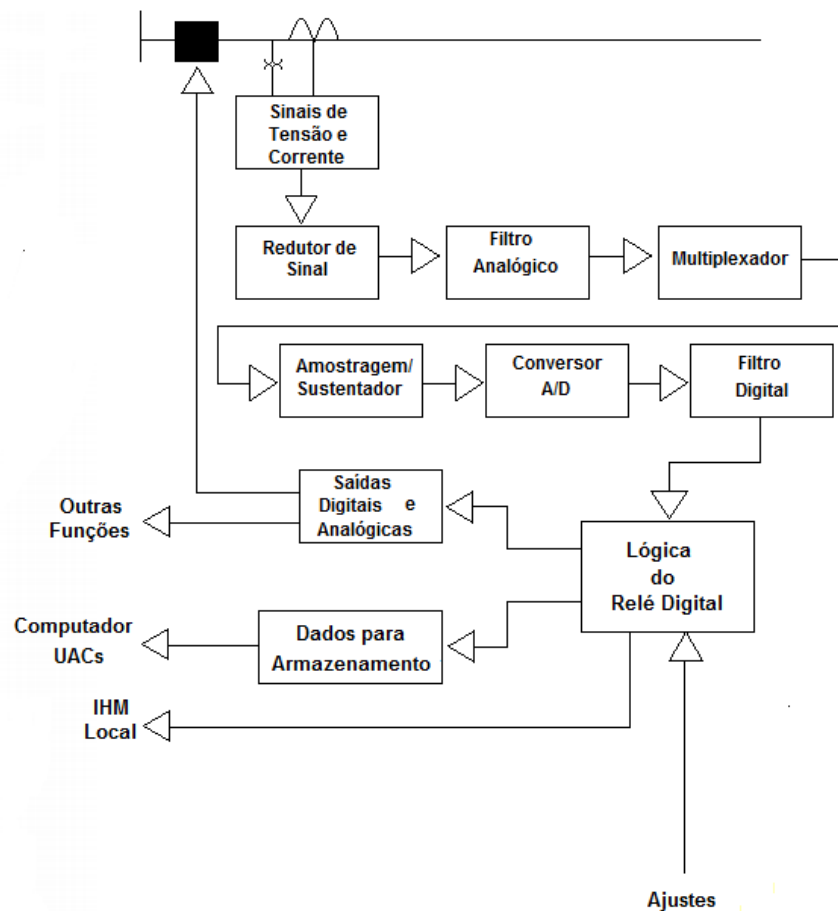
também apresentavam problemas em relação ao ambiente no qual eram instalados, já que, por utilizarem materiais eletrônicos, tinham limitada capacidade de tolerância a temperatura e a umidade além de necessitarem de uma fonte extra de energia, induzindo a implantação de sistemas adicionais de alimentação. Em razão disso, muitos foram substituídos pelos relés eletromecânicos. Ainda, com o rápido avanço da tecnologia, surgiram os relés digitais, antecipando o fim da era dos relés estáticos (GOES, 2013).

Com a evolução tecnológica e avanço na área da computação surgiram os relés digitais, que, segundo Santos (2016), consistem em relés eletrônicos comandados por microprocessadores, ou seja, microcomputadores específicos para proteção, onde os dados de entrada são controlados por um software que processa a lógica da proteção através de um algoritmo. Esse novo tipo de relé foi uma grande evolução, tanto no que diz respeito aos aspectos contrutivos quanto no funcionamento, o que possibilitou um considerável aumento no desempenho e na confiabilidade dos sistemas de proteção.

O relé digital é chamado de relé multi-função, pois pode emular qualquer relé eletromecânico e, além das funções de proteção, pode executar funções de medição e controle, permitindo ao usuário supervisionar a rede, com a verificação de valores eficazes de tensão e corrente, diretamente no dispositivo. Desta forma, é possível enviar comandos de abertura e fechamento para chaves seccionadoras, bem como efetuar o religamento dos disjuntores (SILVA, 2012). Relés digitais que incorporam um Processador Digital de Sinal (PDS) junto ao microprocessador são chamados de relés numéricos. Nele o sinal analógico é convertido em digital de maneira otimizada em um microprocessador apropriado de acordo com o algoritmo utilizado na filosofia de proteção do relé (SANTOS, 2016).

A Figura 6 mostra a estrutura básica de um relé de proteção digital. É visível que os relés dependem diretamente dos transformadores de instrumentação, já que recebem os sinais analógicos provenientes dos secundários dos TCs e TPs, ou sinais digitais, no caso de TCs ópticos.

Figura 6 - Arquitetura de um relé de proteção digital.



Fonte: Adaptado de Silva (2012).

Após o recebimento dos sinais, ocorre a adaptação dos sinais de entrada ao circuito do relé com o uso de transformadores auxiliares. De acordo com a necessidade, um filtro analógico passa-baixa *anti-aliasing* impede a passagem de frequências de mais alta ordem, filtrando ruídos no processamento dos sinais.

Com a multiplexação dos sinais de entrada, faz-se necessário a utilização de apenas um conversor A/D, que converte os sinais analógicos em digitais em intervalos definidos pela taxa de amostragem. Portanto, antes da conversão, no bloco Amostragem, é feita a preparação do sinal em amostras por ciclo, onde deve-se permitir a execução em tempo real das rotinas de proteção sem desrespeitar o Critério de Nyquist, ou seja, frequência de amostragem deve ser no mínimo igual a duas vezes a frequência do sinal de entrada (VELOSO, 2006).

Após isto, os relés executam algoritmos numéricos, vistos como filtros digitais, para estimar os fasores de frequência fundamental, a partir de amostras colhidas durante o processo de amostragem. Estes fasores devem estar livres de ruídos, de componentes em frequências

diferentes da fundamental e da componente que decai exponencialmente. Os algoritmos de filtragem, foco deste trabalho, devem garantir a confiabilidade na estimação dos parâmetros, já que, através destes, serão tomadas as decisões lógicas sobre a atuação do sistema de proteção.

Com base nos fasores estimados pelo algoritmo aplicado e na função desejada, executa-se a lógica de operação do relé, onde são realizados cálculos de proteção a partir da natureza da grandeza atuante. Diante da tomada de decisão lógica, no bloco de saídas digitais e analógicas, são cumpridas as funções finais do relé, podendo estar associadas a alarmes, dados de supervisão, comando para outros relés e, principalmente, atuação sobre os disjuntores locais ou remotos associados. Para fins de análise do desempenho do sistema de proteção e da situação do sistema durante acontecimentos anormais, é realizado o armazenamento de dados (SILVA, 2012).

Os principais tipos de relés quanto a função que exercem são mostrados na Tabela 1. A definição de qual relé será utilizado depende das características do sistema e dos recursos disponíveis (SILVA, 2012).

Tabela 1- Principais Relés quanto as Funções.

Tipos de Relés	
21	Relé de Distância
27	Relé de Subtensão
50	Relé de Sobrecorrente Instantâneo
51	Relé de Sobrecorrente Temporizado
59	Relé de Sobretensão
67	Relé Direcional
87	Relé Diferencial

Fonte: Elaborada pelo autor.

Embora tenham evoluído no princípio de funcionamento, a filosofia de proteção é sempre a mesma, ou seja, o objetivo do relé é proteger com garantia de sensibilidade, seletividade, rapidez, confiabilidade, vida útil, estabilidade, entre outras características.

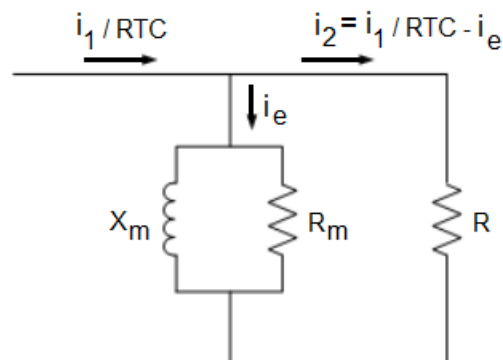
3.5.2 Transformadores de Instrumentação

Para que os sinais de tensão e corrente possam ser utilizados pelos equipamentos de monitoramento, proteção e controle é necessário realizar a adequação da magnitude dos mesmos. Essa é a função primordial dos transformadores de instrumentação.

O Transformador de Corrente (TC) é o dispositivo responsável por prover os sinais de corrente da rede para os relés a ele conectados, com o mesmo ângulo, porém, com valores menores, adequados aos equipamentos. Essa transformação ocorre através do fenômeno de acoplamento magnético, segundo uma relação de transformação. Para fins de padronização, todo TC fornece em seu secundário uma corrente nominal, simétrica, de 5 A (SANTOS, 2016).

Os núcleos dos TCs possuem características magnéticas não-lineares o que faz com que, quando expostos a altas correntes de faltas, possam alcançar elevados níveis de fluxo em seu núcleo, configurando assim o que se denomina de saturação do TC. A Figura 7 mostra o circuito simplificado do TC.

Figura 7 - Circuito do Transformador de Corrente.



Fonte: Adaptado de Santos (2016).

A corrente de excitação, i_e , está sempre presente, entretanto, é muito pequena em condições normais visto que a impedância do ramo magnetizante é grande. Todavia, quando ocorre a saturação do núcleo, o valor da impedância Z_m cai rigorosamente fazendo com que a maior parte da corrente i_1/RTC passe pelo ramo de magnetização. Estando o núcleo nessa condição, a corrente que chega ao relé tem a forma distorcida, levando o mesmo a operar inadequadamente (SANTOS, 2015).

A saturação pode ser causada pelo aumento nos níveis de curto-circuito, pelo fluxo remanescente e pela presença da componente DC, no caso de faltas assimétricas. A inadequação

na atuação do relé de sobrecorrente, por exemplo, deve-se ao fato de que a corrente do primário não é inteiramente refletida no secundário, de forma que, dependendo do grau de saturação, a corrente vista pelo relé, que está conectado em série com esse terminal, poderá ser muito menor, além de distorcida em relação a real, fazendo com que este não opere no tempo devido (COELHO, 2011).

Como a saturação do núcleo do TC reduz significativamente a magnitude da corrente e a defasa em ângulo, ocorre um aumento significativo na impedância vista pelos relés de distância, resultando dessa forma, em problemas de subalcançe e atrasos na operação desses relés.

Relés diferenciais são considerados confiáveis e robustos. Porém, critérios de alta sensibilidade e seletividade podem não considerar a possibilidade da saturação para faltas externas, as quais, em condições de saturação de pelo menos um dos TCs envolvidos, geram correntes diferenciais fictícias que podem ser maiores do que os valores de ajuste para operação deste tipo de proteção. Dessa forma, o relé considera a falta externa como interna e opera indevidamente (SANTOS, 2016).

Assim como o TC, o Transformador de Potencial (TP) exerce função essencial nos esquemas de proteção, sendo indispensáveis em esquemas de proteção de distância, de tensão, de frequência, bem como em esquemas de rejeição de cargas, entre outros. É função do TP isolar os equipamentos de medição, proteção e controle das altas tensões primárias do sistema elétrico e prover os sinais de tensão aos dispositivos a ele conectados em menor escala.

Os TPs devem ser conectados em paralelo junto ao sistema elétrico no ponto onde se deseja adquirir o sinal de tensão. O lado de alta tensão tem a tensão nominal da linha de transmissão ou alimentador no qual esteja conectado. A saída dos TPs, assim como nos TCs, é normalizada, nesse caso em 115 V de linha como valor nominal (SANTOS, 2016).

A máxima potência aparente que se pode conectar no secundário do TP sem que o erro de transformação ultrapasse o limite da sua classe de exatidão, define a carga nominal do transformador. A classe de exatidão depende da aplicação do TP, no caso de relés de proteção esta é 1,2%. Os instrumentos ligados em paralelo no secundário do TP não devem ultrapassar, em potência aparente, a carga nominal de placa do equipamento quando somados, pois dessa forma, o erro admissível pela classe de exatidão poderá ser extrapolado (SANTOS, 2016). Por fim, ressalta-se que a componente exponencialmente decrescente das correntes de curto-circuito (componente DC) surge apenas nos sinais de corrente da rede, não afetando os sinais de tensão.

3.6 Considerações Finais

O presente capítulo traz os fundamentos de um sistema de proteção, como as definições para os termos coordenação e seletividade, bem como apresenta os dispositivos utilizados nos esquemas de proteção, como relés, TCs e TPs. Além disso, ressalta as influências da componente DC nos relés de proteção. Tal abordagem foi feita com o objetivo de fornecer conhecimentos básicos para a melhor compreensão de todo o processo que ocorre com o sinal de corrente, bem como de tensão, desde a ocorrência da falta até a decisão lógica do relé.

O Capítulo seguinte mostra a influência que as informações indesejáveis têm sobre os relés de proteção e nos fasores estimados e apresenta os algoritmos de filtragem digital utilizados neste trabalho, assim como o Método dos Mínimos Quadrados e como ele é aplicado na estimação da componente DC. Ainda, são expostos os índices de desempenho utilizados na avaliação da convergência de cada método e na comparação entre ambos.

4 TÉCNICAS DE FILTRAGEM DIGITAL PARA ESTIMAÇÃO FASORIAL

4.1 Considerações Gerais

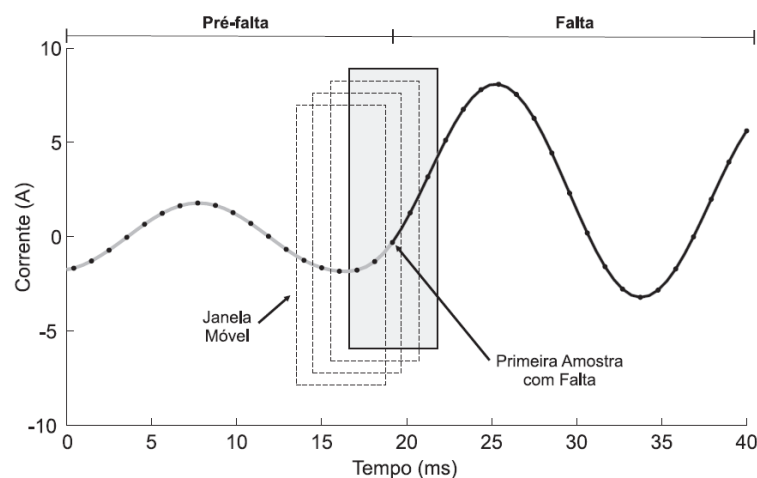
A filtragem digital, necessária na estimação dos fasores de corrente e tensão, consiste no processo de multiplicar amostras por coeficientes previamente determinados e, posteriormente, a fim de obter as grandezas digitais do fasor de entrada, combiná-las entre si (Stefanello *et al.*, 2010b). Espera-se que este procedimento elimine ou reduza consideravelmente informações indesejáveis dos fasores estimados, sendo que, quanto mais exatas e rápidas as respostas dos filtros, mais garantida será a correta atuação dos relés e o nível de confiabilidade do sistema.

Nesse Capítulo, apresenta-se o Filtro de Fourier de Ciclo Completo e o de Meio Ciclo, além da técnica com Mínimos Quadrados para estimação da componente DC antes do sinal ser processado pelos filtros. Além disso, o Capítulo descreve os índices de desempenho utilizados a fim de avaliar as respostas de cada método e compará-las.

4.2 Algoritmos de Filtragem Digital

Os algoritmos deste trabalho utilizam uma janela de dados móvel no processo de amostragem, onde a cada inclusão de uma nova amostra a janela desloca-se para a direita e exclui a amostra mais antiga, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Janela de Dados Móvel.



Fonte: Silva (2009).

O tamanho da janela de dados está diretamente ligado à eficiência do filtro em termos de velocidade de resposta e capacidade de rejeição das componentes indesejáveis, já que uma janela de dados pequena, por exemplo, aumenta a velocidade de resposta do filtro e, consequentemente, a velocidade em que o relé recebe a informação real da condição do sistema. Porém, isto pode levar mais tempo para a convergência do filtro aos valores adequados (STEFANELLO *et al.*, 2010b).

Para a garantia de fasores estimados corretamente, a janela móvel deve conter todos os dados pós-falta, pois quando o filtro encontra-se em seu período transitório, isto é, contendo amostras de dados pré e pós-falta na janela, os fasores não são confiáveis para que o relé tome uma decisão. É evidente que uma janela de dados grande levará mais tempo para ser preenchida com dados pós-falta (SCHWEITZER; HOU, 1992).

4.3 Filtro de Fourier de Ciclo Completo

O Filtro de Fourier de Ciclo Completo é um dos mais utilizados no âmbito da filtragem digital em relés de proteção. O algoritmo consiste simplesmente em multiplicar amostras de um ciclo do sinal de entrada com as amostras de um ciclo do sinal de referência, seno e cosseno, na frequência fundamental de modo a extrair a componente de frequência fundamental do sinal a ser filtrado (SILVA, 2009).

Alguns dos trabalhos que abordam esta técnica mostram que os resultados são bastante sujeitos a erros, pois este filtro não detecta a componente DC e, consequentemente, não a remove, sendo sensível a ela (FORMIGA, 2012). Em contrapartida, a resposta é obtida rapidamente e o filtro elimina harmônicas de ordem inteira (STEFANELLO *et al.*, 2010a).

As harmônicas podem ser calculadas pelas Equações (4.1) e (4.2).

$$I_c^m = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i[n] \cos\left(\frac{n2\pi}{N} m\right) \quad (4.1)$$

$$I_s^m = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i[n] \sen\left(\frac{n2\pi}{N} m\right) \quad (4.2)$$

Onde m representa a m -ésima harmônica, que, para referência ao Filtro de Ciclo Completo de frequência fundamental, deve ser igual a 1. N é o número de amostras em um ciclo e $i[n]$ é a n -ésima amostra do sinal de entrada (SILVA, 2014).

A magnitude e a fase do fasor estimado são dadas pelas Equações (4.3) e (4.4).

$$|I^m| = \sqrt{(I_c^m)^2 + (I_s^m)^2} \quad (4.3)$$

$$\theta_m = \tan^{-1} \left(\frac{I_s^m}{I_c^m} \right) \quad (4.4)$$

4.4 Filtro de Fourier de Meio Ciclo

No que se refere a teoria, o Filtro de Fourier de meio Ciclo (TDFMC) é o mesmo Filtro de Ciclo Completo apresentado anteriormente, entretanto, este tem a sua janela de dados reduzida em meio ciclo. Dessa forma, o tempo de resposta é reduzido. Porém, acaba-se perdendo a capacidade de excluir algumas das componentes indesejáveis (WU *et al.*, 2009).

As Equações (4.5) e (4.6), são utilizadas para o cálculo das harmônicas na estimação do fasor de frequência fundamental, sendo m igual a 1 (SILVA, 2009).

$$I_c^m = \frac{4}{N} \sum_{n=0}^{N/2-1} i[n] \cos \left(\frac{n2\pi}{N} m \right) \quad (4.5)$$

$$I_s^m = \frac{4}{N} \sum_{n=0}^{N/2-1} i[n] \text{sen} \left(\frac{n2\pi}{N} m \right) \quad (4.6)$$

Assim como no Filtro de Ciclo Completo, a magnitude e fase do fasor são calculadas pelas Equações (4.3) e (4.4).

4.5 Proposta para remoção da Componente DC

Wu *et al.* (2009) faz uso da Morfologia Matemática (MM) para estimar a componente DC e, posteriormente, removê-la do sinal de corrente de falta antes do mesmo ser processado pela Transformada de Fourier. Este algoritmo, baseado na MM, tem um atraso de $\frac{3}{4}$ de ciclo na melhor das hipóteses e de meio ciclo no pior caso, logo no início após a ocorrência da falta. A avaliação do desempenho dessa técnica foi feita com sinais de corrente gerados a partir de um modelo típico de rede e mostra que a DC pode ser extraída do sinal de falta e melhorar o desempenho da Transformada de Fourier, não sendo sensível as diferentes taxas de amostragem.

Partindo da ideia de Wu *et al.* (2009), nota-se que a estimação da componente DC também pode ser feita utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), já que trata-se de uma técnica matemática que busca o melhor ajuste para um conjunto de dados, o qual deve minimizar a soma quadrática das diferenças entre os valores dados e os valores de uma referência. Pan *et al.* (2004) utiliza dessa estratégia para fins de correção de efeitos da saturação dos transformadores de corrente.

A corrente de falta pode ser expressa pela combinação da componente periódica de regime, determinada pela fonte de tensão e pela componente exponencial que deverá ser eliminada. A Equação (4.5) representa a forma de onda da corrente de falta.

$$i(k) = A \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot k \cdot \frac{f}{f_{\text{samp}}} + \varphi\right) + B \cdot e^{\lambda k} \quad (4.5)$$

Onde k representa as amostras do sinal de corrente, f_{samp} é a frequência de amostragem e f é a frequência do sistema de potência. A , B , φ e λ são coeficientes desconhecidos que serão estimados pelo método (SANTOS, 2015).

A Equação (4.5) pode ser expressa segundo a Equação (4.6), expandindo o termo cosseno e utilizando a primeira ordem da Série de Taylor para a componente exponencial (SANTOS, 2015).

$$i(k) = A \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(\omega \cdot \varphi) - A \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\omega \cdot \varphi) + B + \lambda \cdot k \quad (4.6)$$

Em (4.6), ω representa a frequência angular, dada por $2\pi f/f_{\text{samp}}$. Assumindo que $C_1 = (A \cdot \cos\varphi)$ e $C_2 = (-A \cdot \text{sen}\varphi)$, a Equação (4.6) pode ser reescrita como (4.7).

$$i(k) = C_1 \cdot \cos(\omega \cdot k) + C_2 \cdot \text{sen}(\omega \cdot k) + B + \lambda \cdot k \quad (4.7)$$

Na forma matricial, tem-se (4.8), equação formada por amostras retiradas do sinal após a ocorrência da falta.

$$\begin{bmatrix} \cos(\omega.k_i) & \text{sen}(\omega.k_i) & k_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos[\omega(k_i + m_i)] & \text{sen}[\omega.(k_i + m_i)] & k_i + m_i & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \lambda \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(k_i) \\ \vdots \\ i(k_i + m_i) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Foram utilizadas amostras apenas do período pós-falta, numeradas como k_i até $k_i + m_i$ em (4.8), para N igual a 16, 32, 64 e 96 amostras por ciclo.

Além disso, a Equação (4.8) pode ser expressa por (4.9), onde M representa a matriz de senos e cossenos, P o vetor com os coeficientes desconhecidos e I o vetor com as amostras de corrente do sinal de entrada. Os parâmetros do vetor P podem ser encontrados obtendo a matriz pseudo-inversa de M e multiplicando-a pelo vetor I, conforme (4.10).

$$M.P = I \quad (4.9)$$

$$P = (M^T.M)^{-1}.M^T.I \quad (4.10)$$

Com a obtenção dos valores dos parâmetros da corrente, a parcela da componente DC pode ser estimada após a ocorrência da anormalidade e subtraída da componente periódica, a partir do termo $B.e^{\lambda k}$ em (4.5).

4.6 Índices de Desempenho

Para avaliar a eficiência dos filtros, estes tiveram sua resposta de magnitude comparadas em termos do tempo de convergência do método, da sobre-elevação, do erro relativo e do erro relativo máximo.

Como forma de verificar a validade de cada método de estimação fasorial, faz-se necessário a adoção de um critério de convergência e espera-se que o filtro o atenda. Neste trabalho, para que o filtro convirja, o erro relativo percentual deve ser menor ou igual a 0,1% durante dois ciclos consecutivos (STEFANELLO *et. al*, 2010 a). Quando essa condição é satisfeita, tem-se o instante de convergência (t_{conv}). O tempo de convergência (Δt_{conv}) é dado pelo intervalo entre o instante de convergência e o momento da inserção da falta (t_{falta}), conforme a Equação (4.11)

$$\Delta t_{conv} = t_{conv} - t_{falta} \quad (4.11)$$

O erro transitório da estimação é dado pela diferença entre o valor de corrente calculado para a amostra (k) e o valor de corrente de referência no mesmo instante, como mostra a Equação (4.12) (SANTOS, 2015).

$$erro(k) = I_{est}(k) - I_{ref}(k) \quad (4.12)$$

Onde I_{est} representa o valor da magnitude do fasor de corrente estimado e I_{ref} é o valor de referência da corrente, ambos em relação a amostra (k). A partir desse cálculo, pode ser obtido o erro relativo percentual, dado por (4.13).

$$erro_{rel(k)} = \left| \frac{erro(k)}{I_{ref}(k)} \right| * 100 \quad (4.13)$$

O erro relativo, como o nome sugere, é calculado em relação a corrente de referência. Já o erro máximo foi calculado sobre o erro relativo percentual e corresponde ao maior valor deste após o instante de convergência. (SANTOS, 2015).

Já a máxima sobre-elevação (Max OS) equivale ao maior valor positivo de erro transitório do sinal estimado, após a ultrapassagem do sinal de referência. Esse índice é calculado antes da convergência e expresso por (4.14).

$$OS(k) = \max(I_{est}(k) - I_{ref}(k)) \quad (4.14)$$

Os erros estão diretamente ligados a precisão do método. Logo, quanto menores, melhor é o desempenho do filtro. Salienta-se que a máxima sobre-elevação e o erro máximo só são calculados quando houver convergência do método.

4.7 Considerações Finais

Neste Capítulo é apresentada a técnica proposta para a remoção da componente DC das correntes de curto-circuito, a qual é fundamentada no Método dos Mínimos Quadrados e é associada aos filtros de estimação fasorial, de modo a se obter como resposta o fasor de corrente simétrica (60 Hz). Além disso, são mostrados os índices de desempenho utilizados, os quais permitem a comparação dos filtros com e sem a estimação da DC precedendo a filtragem.

No Capítulo seguinte, serão apresentados os resultados das comparações frente às diferentes condições do sistema teste analisado, o qual também será apresentado no próximo Capítulo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Considerações Gerais

Nesse Capítulo, são exibidos os resultados obtidos para os testes utilizando os filtros e a técnica para remoção da Componente DC, os quais são descritos no Capítulo 4. Para que esses resultados pudessem ser obtidos, foram feitas simulações computacionais de curto-circuito monofásico, bifásico e trifásico em uma linha de transmissão. De modo a obter sinais de corrente livres da componente exponencial, os sinais de corrente secundária foram processados pela técnica proposta para a remoção dessa componente.

Para comparação e discussão dos resultados alcançados com a metodologia proposta, foi adotado um sistema teste. Posteriormente, foi realizada uma análise com base nos índices de desempenho empregados, sendo que, como critério de convergência, adotou-se haverá ideia de que a resposta da estimação fasorial, em módulo, não deve apresentar um erro maior que 0,1% durante dois ciclos consecutivos do sinal.

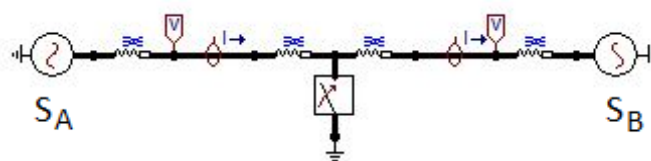
5.2 Sinais Testados

Para a avaliação do desempenho dos filtros foi criado um sistema teste no software EMTP-ATP®, de forma a simular o comportamento real do sistema. Os sinais gerados compuseram o banco de dados, com diferentes condições operacionais do sistema.

Como o objetivo deste trabalho trata-se especificamente da remoção ou atenuação da componente DC, parte-se do princípio, em todos os casos, que o sinal de entrada é pré-processado por filtros que eliminam as harmônicas. Desta forma, apenas a componente DC e a componente de frequência fundamental estão presentes no sinal de entrada dos filtros a serem avaliados.

O sistema teste implementado é mostrado na Figura 9.

Figura 9- Sistema Teste.



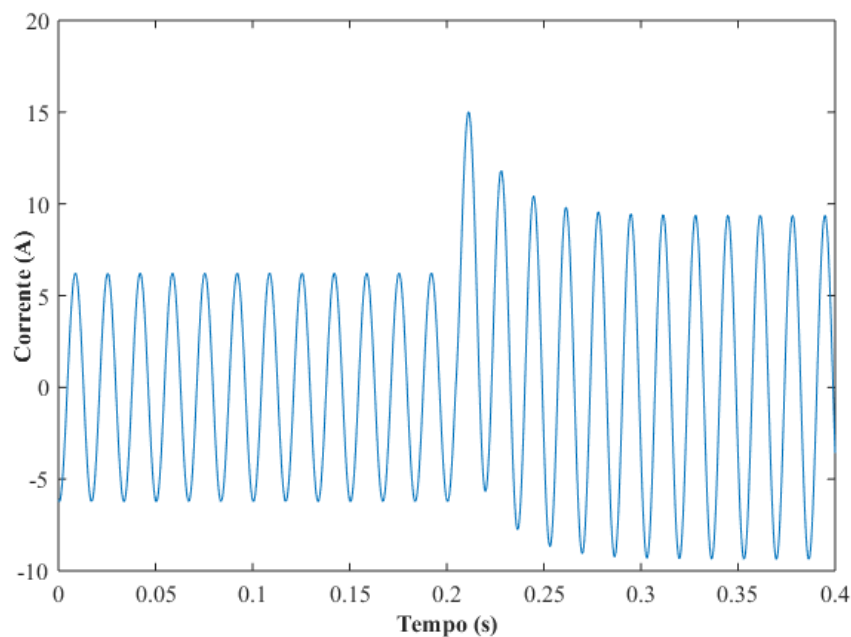
Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema representa uma linha de transmissão de 100 km, cuja impedância de sequência zero é $Z_{LT0} = 0,1841 + j1,2258 \Omega/\text{km}$ e a impedância de sequência positiva e negativa são $Z_{LT1} = Z_{LT2} = 0,041 + j0,3878 \Omega/\text{km}$, com fontes equivalentes nos dois terminais, cujo valor eficaz de tensão é de 190 kV e o ângulo de S_B está 30° atrasado em relação ao de S_A , para que o fluxo se dê de S_A para S_B . A impedância de sequência zero das fontes é $Z_{S0} = 3,681 + j24,515 \Omega$ e a de sequência positiva e negativa é $Z_{S1} = Z_{S2} = 0,819 + j7,757 \Omega$.

Como o relé encontra-se no lado secundário do TC, cuja relação de transformação é 2000:5, os valores de corrente já estão refletidos ao secundário, sendo considerado um TC em condições normais de operação, sem núcleo saturado.

Com o objetivo de verificar a influência da frequência de amostragem, os sinais foram amostrados nas frequências de 960 Hz, 1920 Hz, 3840 Hz e 5760 Hz, ou seja, taxas de amostragem equivalentes a 16, 32, 64 e 96 amostras por ciclo, respectivamente, num sistema com frequência fundamental de 60 Hz. Nos casos gerados, alterou-se o ponto de incidência da falta ao longo da linha de transmissão. Também foram considerados diferentes tipos de falta (monofásicas, bifásicas e trifásicas). A Figura 10 mostra um dos sinais gerados no EMTP-ATP®.

Figura 10- Sinal de corrente de curto-circuito monofásico em 85% da LT.



Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como na Figura 10, em todos os sinais testados o curto-circuito ocorre em 0,2 s. Ressalta-se que a forma de onda apresentada na Figura 10, corresponde a forma de onda de corrente da fase A sendo esta gerada a uma taxa de 64 amostras por ciclo.

5.3 Resultados

Nesta Seção, são apresentados os resultados obtidos pelas técnicas analisadas para cada índice de desempenho. Tais resultados são apresentados graficamente e também em Tabelas, onde cada método é representado conforme a abreviatura a seguir:

- ⇒ FFMC: Filtro de Fourier de Meio Ciclo;
- ⇒ FFMC+MMQ: Filtro de Fourier Meio Ciclo com remoção da componente DC por Mínimos Quadrados;
- ⇒ FFCC: Filtro de Fourier de Ciclo Completo; e
- ⇒ FFCC+MMQ: Filtro de Fourier de Ciclo Completo com remoção da componente DC por Mínimos Quadrados.

5.3.1 Falhas Monofásicas

Primeiramente, foram simuladas faltas monofásicas na fase A, ocorridas em 85%, 45% e 5% ao longo dos 100 km da linha de transmissão (LT), no sentido do terminal A para o B, para 16, 32, 64 e 96 amostras por ciclo.

Dessa forma, as Tabelas 2, 3, 4 e 5 apresentam os resultados apresentados por cada um dos filtros, em cada um dos índices de desempenho analisados, para as respectivas amostragens adotadas, para o processamento do sinal da fase em falta, para um curto-circuito monofásico envolvendo a fase A, ocorrido em 85 % da linha de transmissão.

Tabela 2 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 85% da LT, com 16 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	0,1761	5,2601	0,0164
FFMC+MMQ	0,0927	0,0525	0,0235
FFCC	0,1511	1,0084	0,0147
FFCC+MMQ	0,0677	0,0229	0,0221

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 85% da LT, com 32 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	0,1765	5,3151	0,0225
FFMC+MMQ	0,1000	0,5874	0,0343
FFCC	0,1510	1,0235	0,0237
FFCC+MMQ	0,0666	0,2268	0,0332

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 85% da LT, com 64 amostras por ciclo

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	0,1763	5,1198	0,0239
FFMC+MMQ	0,0995	0,4518	0,0334
FFCC	0,1510	0,9253	0,0234
FFCC+MMQ	0,0604	0,1764	0,0364

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 85% da LT, com 96 amostras por ciclo

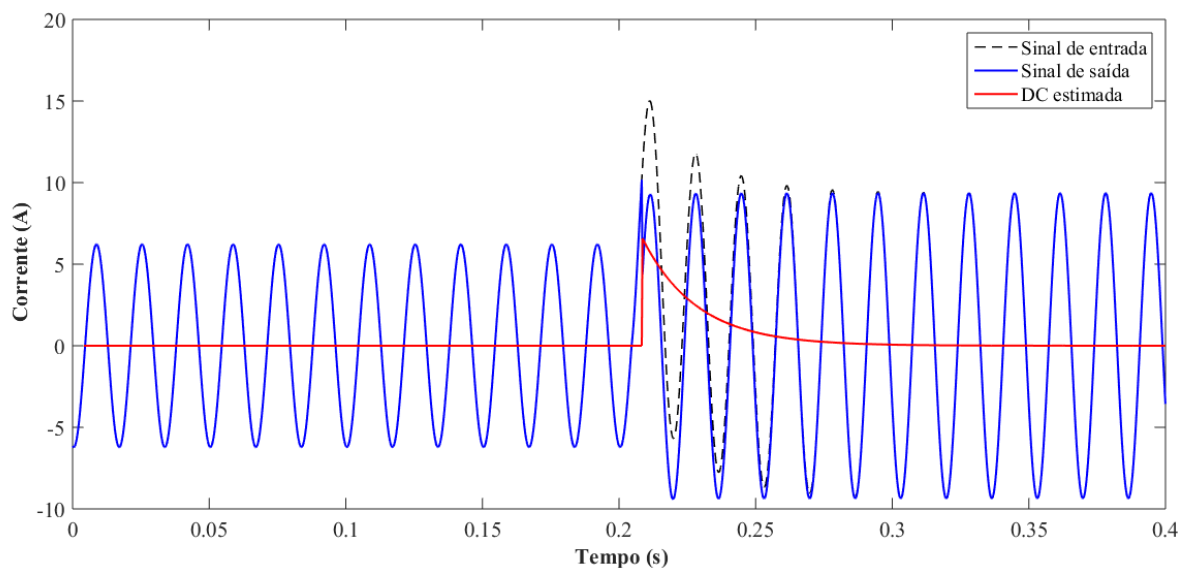
Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	0,1764	5,0363	0,0233
FFMC+MMQ	0,0913	0,4049	0,0330
FFCC	0,1510	0,8842	0,0232
FFCC+MMQ	0,0602	0,1599	0,0377

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 11, é mostrado o sinal de entrada (em preto), o qual corresponde à corrente da fase A, refletida ao secundário do TC, sendo esta forma de onda processada pelas metodologias em questão. Ainda, a respectiva Figura apresenta a Componente DC estimada pela téc-

nica proposta (em vermelho) e o sinal obtido pela subtração entre o sinal de entrada e a Componente DC estimada, o qual representa o sinal de corrente simétrica (sem DC, em azul). Este, por sua vez, é processado por um dos filtros de Fourier para a obtenção do fasor correspondente. Esses sinais foram obtidos a uma amostragem de 64 amostras por ciclo para o caso de falta monofásica em 85% da linha.

Figura 11 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma Falta Monofásica em 85% da LT com 64 amostras por ciclo



Fonte: Elaborado pelo autor.

O algoritmo começa o cálculo da estimação da componente DC $\frac{1}{4}$ de ciclo após a ocorrência da falta, para que a janela de dados esteja completa, contendo somente amostras do pós-falta. Isso causa uma leve oscilação do sinal de saída, durante o período em que a DC ainda não é estimada, como pode ser visto na Figura 11. Já a Figura 12 ilustra a resposta em magnitude dos filtros para o caso em questão, bem como o erro relativo da estimação fasorial em relação a referência.

Para que o filtro convirja, o erro relativo percentual deve ser menor ou igual a 0,1% durante dois ciclos consecutivos (Stefanello, 2010 a). Quando essa condição é satisfeita, tem-se o instante de convergência (t_{conv}). Assim, quanto menor for o tempo de convergência, maior a velocidade de resposta.

Além disso, é perceptível a oscilação das respostas dos filtros que não tiveram a componente DC estimada por Mínimos Quadrados em relação aqueles que apresentam esta etapa. Assim, é perceptível a melhora da estimação fasorial com a remoção da componente DC. Ainda, ressalta-se que, apesar da pequena oscilação no sinal de saída presente na resposta dos métodos que incluem a estimação da DC, o que ocorre em decorrência do ponto de início da estimação da DC não coincidir com o instante de incidência de falta, o erro relativo dessas metodologias é menor, mesmo antes da convergência, em comparação com a resposta daqueles que não tem a DC estimada.

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas 2 a 5, percebe-se que o desempenho dos filtros não varia consideravelmente com a variação do número de amostras. Dessa forma, pode-se concluir que não há vantagem no aumento da taxa de amostragem, visto que sua elevação só exigirá maior esforço computacional.

Os filtros mostrados acima, para a falta em 85 % da LT, apresentam os melhores resultados quanto à sobre-elevação, quando têm a componente DC estimada por Mínimos Quadrados (MQ), além de convergirem mais rápido. O erro relativo máximo acaba sendo maior nesses filtros, porém não caracteriza uma diferença considerável em relação aos que têm o erro menor, conforme visto nas Tabelas 2, 3, 4 e 5. Além disso, pode-se perceber que o Filtro de Fourier de Ciclo Completo apresenta a melhor resposta nos casos simulados para 16, 64 e 96 amostras, uma vez que a magnitude estimada por este filtro possui os menores erros em relação ao sinal de referência. Já para 32 amostras, o Filtro de Meio Ciclo foi o que apresentou menor erro.

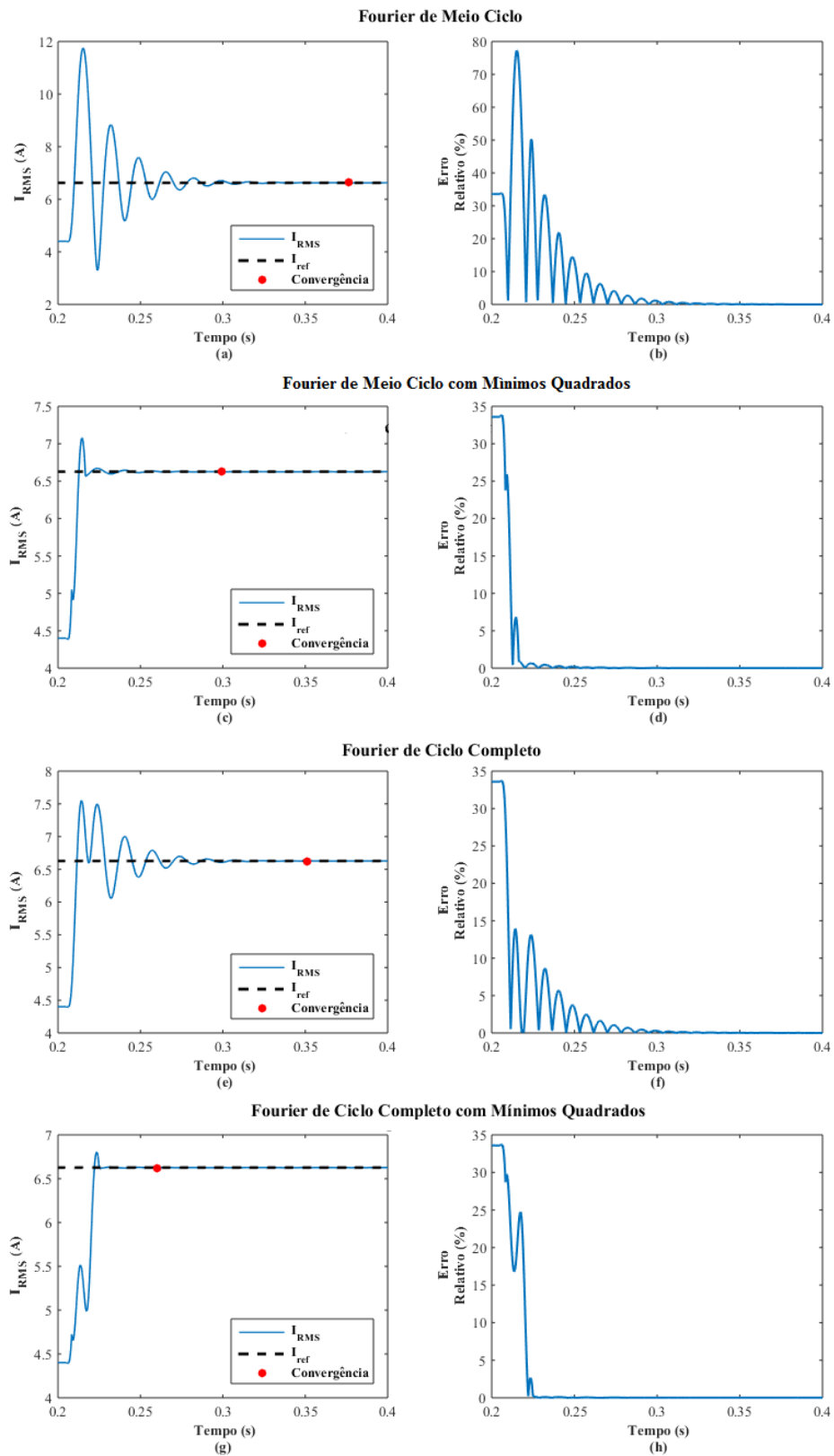
As Tabelas 6 e 7 mostram as respostas dos filtros para o caso da mesma falta ocorrer em 45% da LT com 64 e 96 amostras. Para essa distância da fonte geradora, não houve convergência dos filtros para 16 e 32 amostras.

Tabela 6 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 45% da LT, com 64 amostras por ciclo

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	0,1841	9,4991	0,0323
FFMC+MMQ	0,0930	0,4467	0,0177
FFCC	0,1588	1,6129	0,0322
FFCC+MMQ	0,0677	0,1760	0,0181

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Monofásica em 85% da LT com 64 amostras por ciclo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 45% da LT, com 96 amostras por ciclo

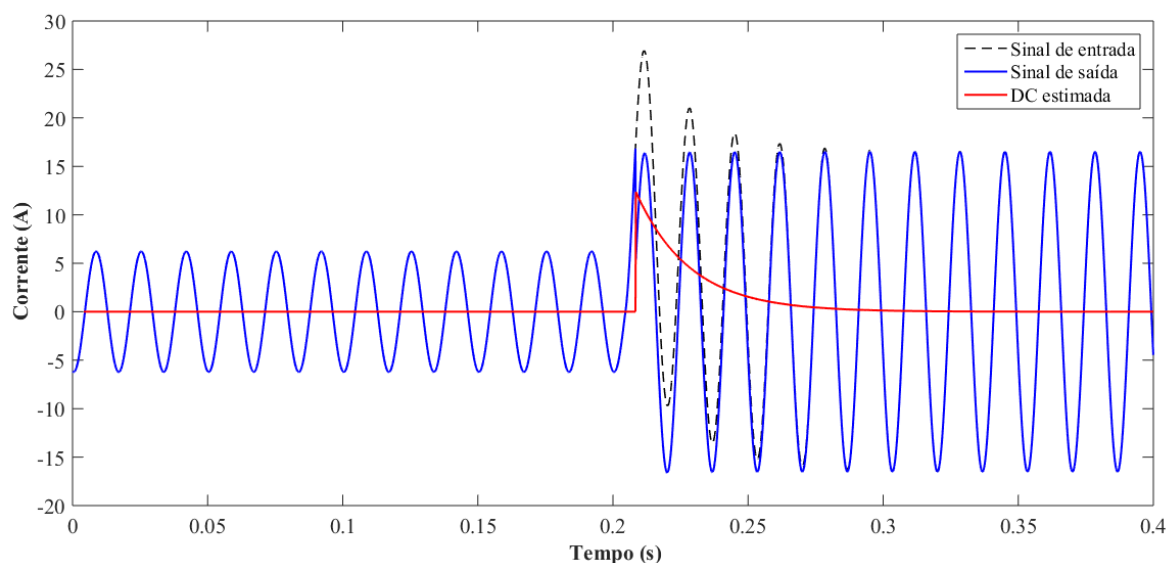
Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	0,3833	9,4408	0,02119
FFMC+MMQ	0,2923	0,3905	0,02759
FFCC	0,3514	1,6027	0,02089
FFCC+MMQ	0,2666	0,1557	0,02612

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 13 mostra o sinal de entrada dos filtros para 96 amostras, e a Figura 14 a resposta desses filtros, os quais obtiveram êxito em relação ao critério de convergência adotado. A boa resposta ocorreu também para 64 amostras por ciclo.

Ressalta-se que, para 64 amostras, o FFCC+MMQ é o que apresenta maior velocidade de convergência e, também, menor sobre-elevação. O menor erro, após a convergência, foi apresentado pela resposta do FFMC+MMQ, seguido pela resposta do FFCC+MMQ. Além disso, na Figura 14 é possível perceber que o erro relativo é maior para os casos em que não há a estimação da DC.

Figura 13 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma Falta Monofásica em 45% da LT com 96 amostras por ciclo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para essa falta, os índices de desempenho não apresentam grandes diferenças em relação às amostragens de 64 e 96 amostras, como pode ser visto nas Tabelas 6 e 7. No entanto, aqui, em comparação com a falta em 85% da LT, a quantidade de amostras é relevante, já que com 16 e 32 não há convergência dentro do intervalo simulado, a qual pode ser atingida em um tempo maior.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para uma falta monofásica em 5% da LT, onde os índices de desempenho são mostrados nas Tabelas 8 e 9, para 64 e 96 amostras, respectivamente. Já Figura 15 mostra o sinal de corrente de entrada para essa falta com 64 amostras, bem como a DC estimada pelo MMQ e o sinal resultante da remoção dessa componente.

Tabela 8 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 5% da LT, com 64 amostras por ciclo

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1107	0,8871	0,0750
FFCC	0,1924	14,2508	0,0870
FFCC+MMQ	0,0854	0,5064	0,0746

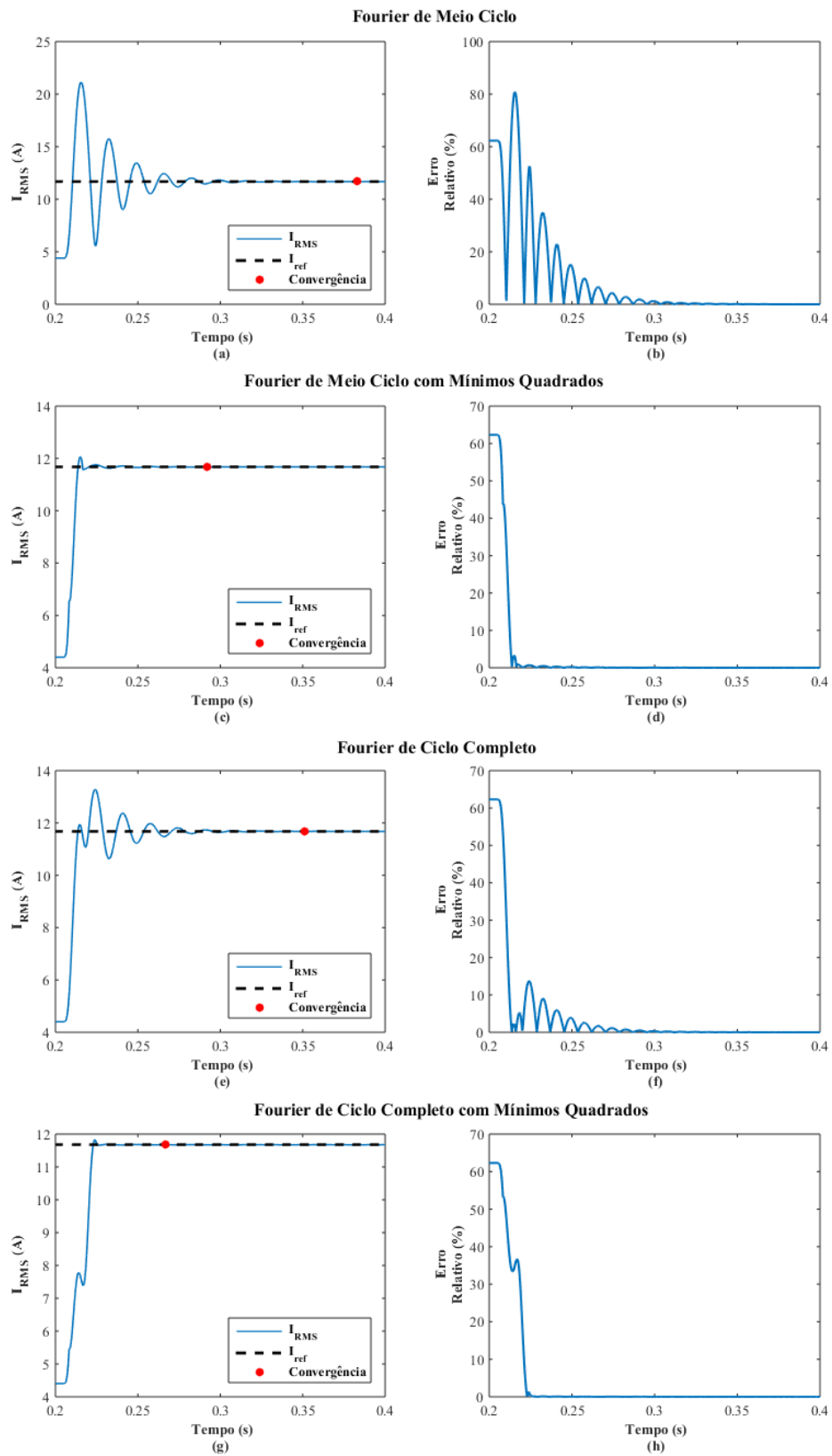
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 1 ϕ em 5% da LT, com 96 amostras por ciclo

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	0,1838	83,8525	0,0186
FFMC+MMQ	0,1005	0,6997	0,0309
FFCC	0,1519	14,2292	0,0206
FFCC+MMQ	0,0672	0,3331	0,0296

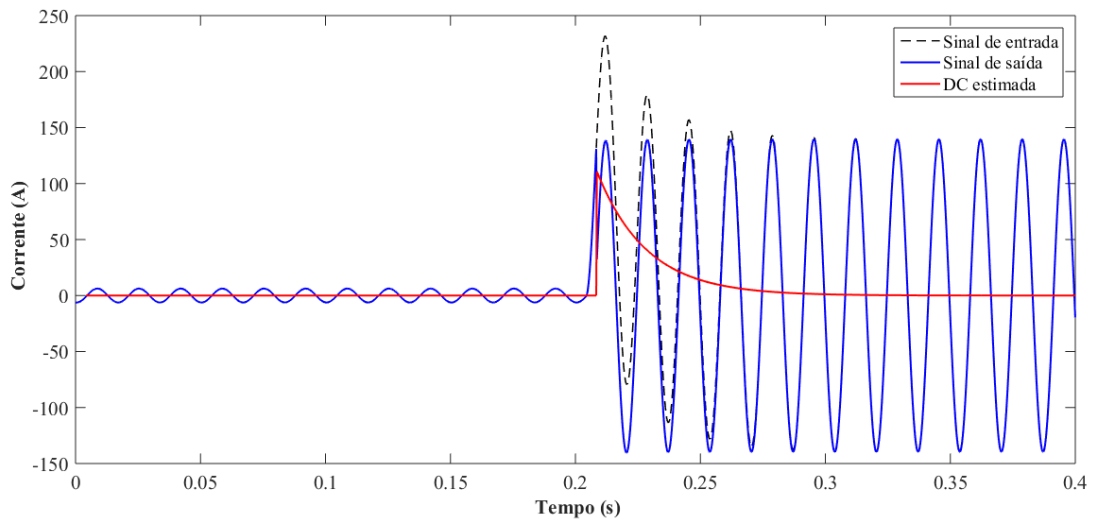
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Monofásica em 45% da LT com 96 amostras por ciclo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma Falta Monofásica em 5% da LT com 64 amostras por ciclo



Fonte: Elaborado pelo autor.

O fluxo do sistema simulado dá-se da esquerda para a direita, devido ao fato da fonte S_B ter o ângulo atrasado em relação a S_A . Dessa forma, nesse caso, a falta é localizada mais próxima da fonte da esquerda em relação aos casos anteriores. Nota-se um aumento na magnitude da corrente, o qual se deve ao fato do curto-circuito ocorrer próximo à fonte.

Para essa falta, os filtros não convergiram para as amostragens de 16 e 32 amostras por ciclo o que se justifica pelo mesmo motivo da falta em 45% da LT. Além disso, com o aumento do número de amostras houve aumento no número de filtros que convergiram. Enquanto não há convergência de nenhum filtro para 16 e 32 amostras, com 64 amostras apenas o Filtro de Fourier de Meio Ciclo não convergiu, o qual, geralmente, é o que apresenta o pior desempenho. Para 96 amostras, há a convergência da resposta de todas as metodologias.

5.3.2 Faltas Bifásicas

Inicialmente, são apresentados os resultados obtidos para o processamento do sinal da fase A para uma falta bifásica em 85% da LT. O sinal da falta com e sem a estimação da DC é mostrado na Figura 16, para 96 amostras/ciclo. As Tabelas 10, 11 e 12 trazem o desempenho dos filtros para 16, 64 e 96 amostras. Para essa falta com 32 amostras/ciclo, nenhum dos filtros converge para o critério adotado. É importante ressaltar que, para a falta bifásica em 85% da

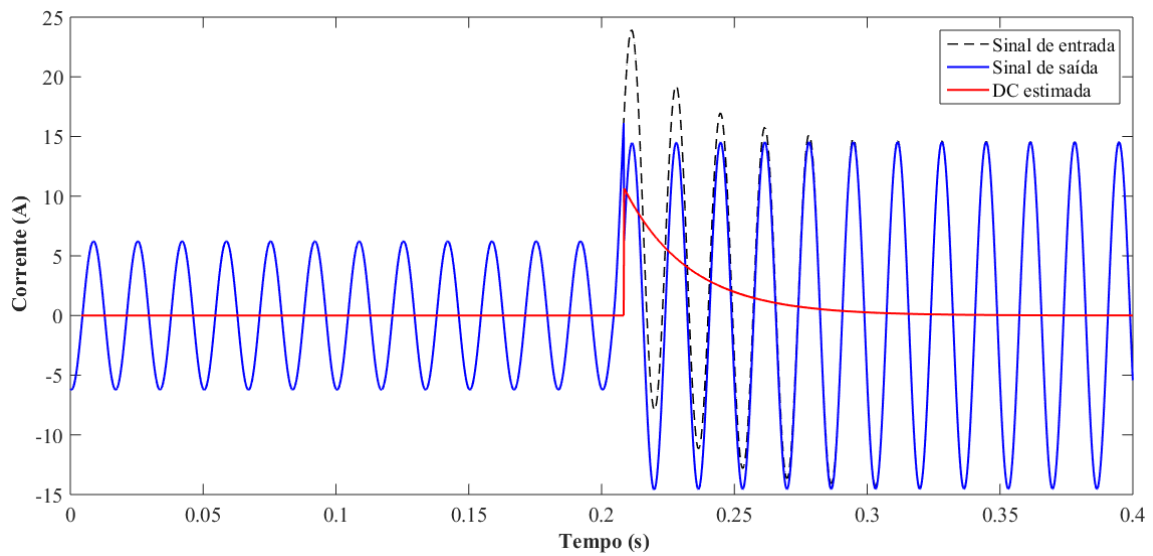
linha, a amplitude do sinal de corrente é maior do que verificado para a falta monofásica no mesmo ponto da LT. Conseqüentemente, o módulo do fasor resultante também é maior.

Tabela 10 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2 ϕ em 85% da LT, com 16 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1011	0,1030	0,0482
FFCC	0,2844	1,2161	0,0515
FFCC+MMQ	0,0604	0,0333	0,0495

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma falta bifásica em 85% da LT com 96 amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2ϕ em 85% da LT, com 64 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1018	0,7487	0,0639
FFCC	0,1836	1,2174	0,0509
FFCC+MMQ	0,0745	0,2803	0,0608

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2ϕ em 85% da LT, com 96 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1017	0,6917	0,0650
FFCC	0,1837	1,2129	0,0514
FFCC+MMQ	0,0741	0,2591	0,0611

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 10, pode-se observar que o Filtro de Fourier de Ciclo Completo com a DC estimada apresenta menor tempo de convergência além de menor sobre-elevação, sendo que o menor erro após a convergência ocorre para o Filtro de Meio Ciclo com a DC estimada. A segunda melhor resposta com base esse índice foi alcançada pelo Filtro de Ciclo Completo com a DC estimada. Ainda, cabe destacar que não há convergência para Filtro de Fourier de Meio Ciclo. Isso também se verifica para as demais amostragens, conforme pode ser visto nas Tabelas 11 e 12.

Dessa forma, é importante ressaltar que a não convergência nesses casos, não significa que os filtros sejam ineficazes, mas que eles apenas deixam de atender o critério adotado, o qual poderia ser satisfeito se o tempo de simulação adotado fosse maior.

Além disso, nota-se que, assim como para a falta monofásica, o Filtro de Fourier de Ciclo Completo com a DC estimada por MMQ apresenta maior velocidade de convergência e menor sobre-elevação.

A Figura 17 ilustra a resposta dos filtros para 96 amostras por ciclo. Nessa Figura, é possível ver que, assim como no caso da falta monofásica, a sobre-elevação e, conseqüentemente, o erro antes da convergência é consideravelmente maior nos casos em que a componente DC não é estimada.

Já as Tabelas 13,14 e 15 apresentam os resultados obtidos com o processamento da forma de onda da fase A, resultante da simulação de um curto-circuito bifásico em 45% da linha de transmissão. Conforme essas Tabelas, pode-se verificar que o FFMC não apresenta convergência para as diferentes taxas de amostragem analisadas. Além disso, ressalta-se que, para a taxa de 32 amostras/ciclo, a resposta de nenhum dos filtros atende o critério de convergência.

Tabela 13 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2ϕ em 45% da LT, com 16 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1011	0,1828	0,0435
FFCC	0,1833	2,1564	0,0522
FFCC+MMQ	0,0604	0,0624	0,0454

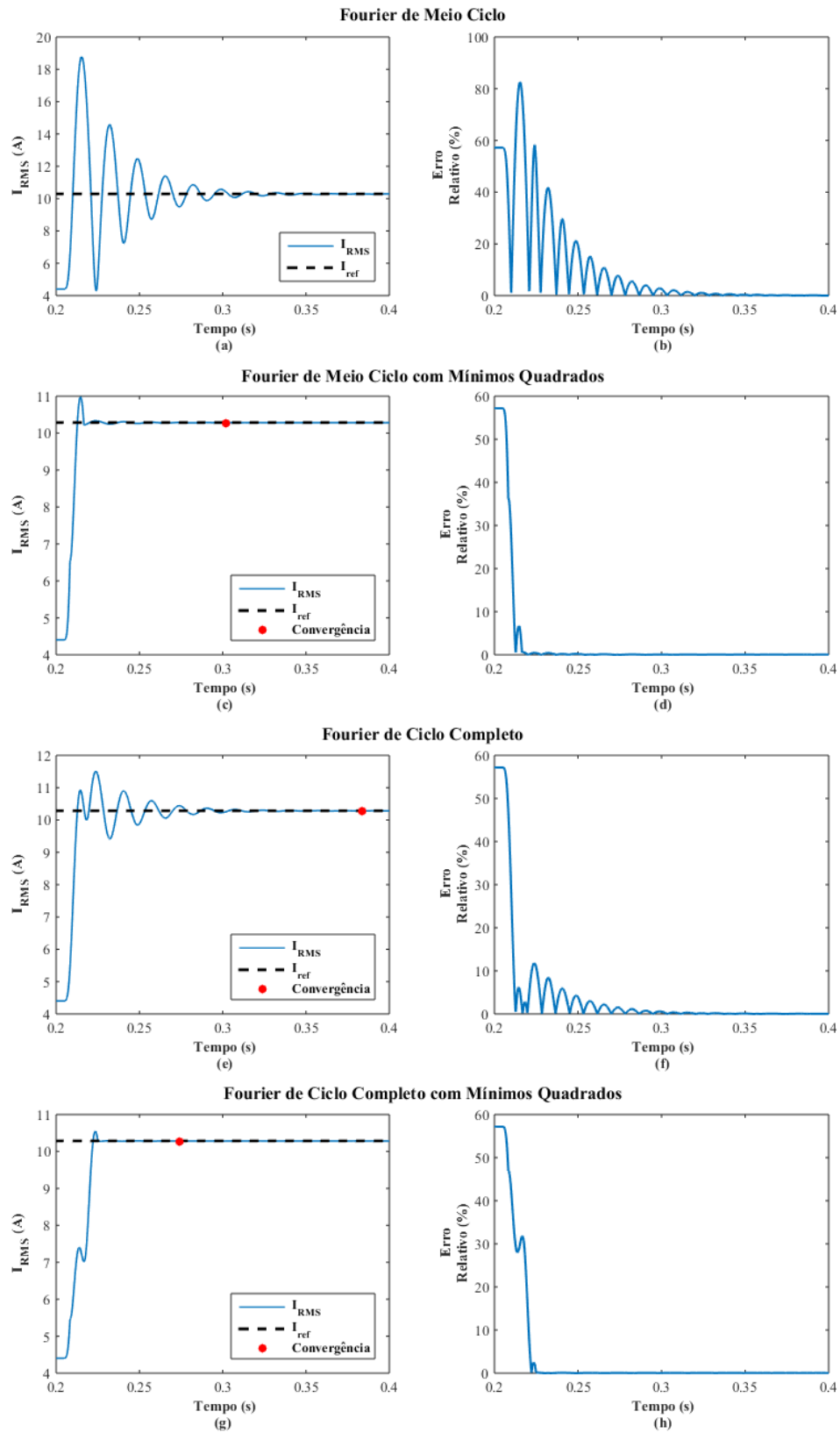
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2ϕ em 45% da LT, com 64 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1018	1,3435	0,0644
FFCC	0,1833	2,1830	0,0512
FFCC+MMQ	0,0750	0,5040	0,0616

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Bifásica em 85% da LT e com 96 amostras por ciclo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2ϕ em 45% da LT, com 96 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1019	1,2684	0,0651
FFCC	0,1837	2,1979	0,0520
FFCC+MMQ	0,0750	0,4720	0,0624

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda, destaca-se que o FFCC+MMQ apresenta menor tempo de convergência e menor sobre-elevação, como na maioria dos resultados já vistos. Já o FFCC apresenta o menor erro após a convergência mesmo com a maior sobre-elevação antes de convergir. Com 96 amostras/ciclo, o desempenho dos filtros é semelhante ao verificado para 64 amostras/ciclo, sendo a aplicação do filtro de Fourier de Ciclo Completo com estimação da DC por MMQ a que converge mais rápido e que apresenta menor sobre-elevação, sendo este seguido pelo desempenho apresentado pelo FFCC, o qual apresenta o menor erro máximo após a convergência.

Também, foi simulada uma falta bifásica em 5% da LT. As respostas dos filtros quanto aos índices de desempenho, para as diferentes amostragens testadas, são mostradas nas Tabelas 16, 17 e 18. Já o sinal de entrada a ser processado pelos filtros, em 64 amostras/ciclo, é apresentado na Figura 18. É importante ressaltar que para a taxa de 32 amostras/ciclo, nenhuma das respostas atingiu o critério de convergência.

Tabela 16 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2ϕ em 5% da LT, com 16 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1011	1,5344	0,0371
FFCC	0,1688	18,0821	0,0488
FFCC+MMQ	0,0604	0,5551	0,0394

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2 ϕ em 5% da LT, com 64 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1018	11,4185	0,0636
FFCC	0,1828	18,5399	0,0502
FFCC+MMQ	0,0752	4,2945	0,0611

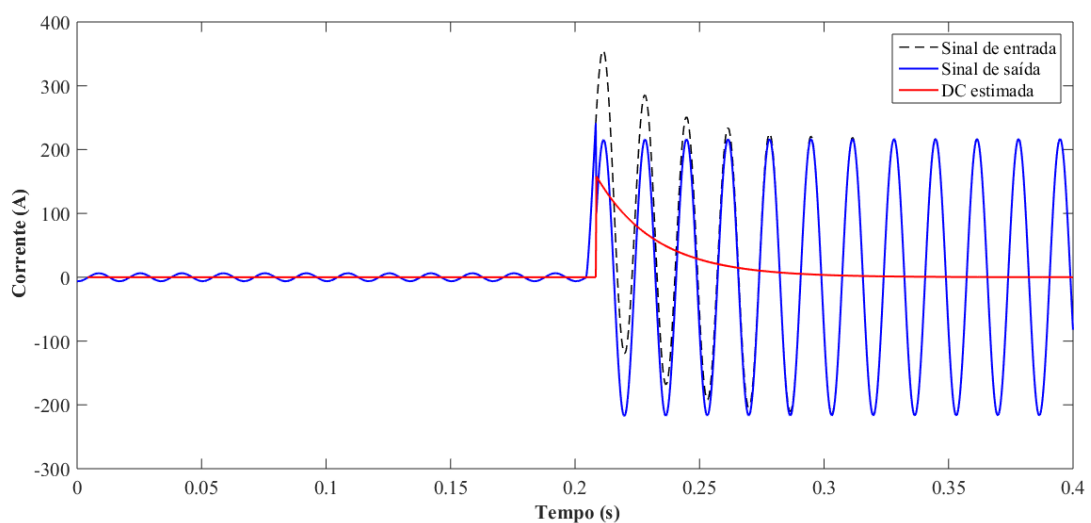
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 18 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 2 ϕ em 5% da LT, com 96 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1019	11,0428	0,0650
FFCC	0,1833	18,8833	0,0518
FFCC+MMQ	0,0753	4,0841	0,0626

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma falta bifásica em 5% da LT com 64 amostras.

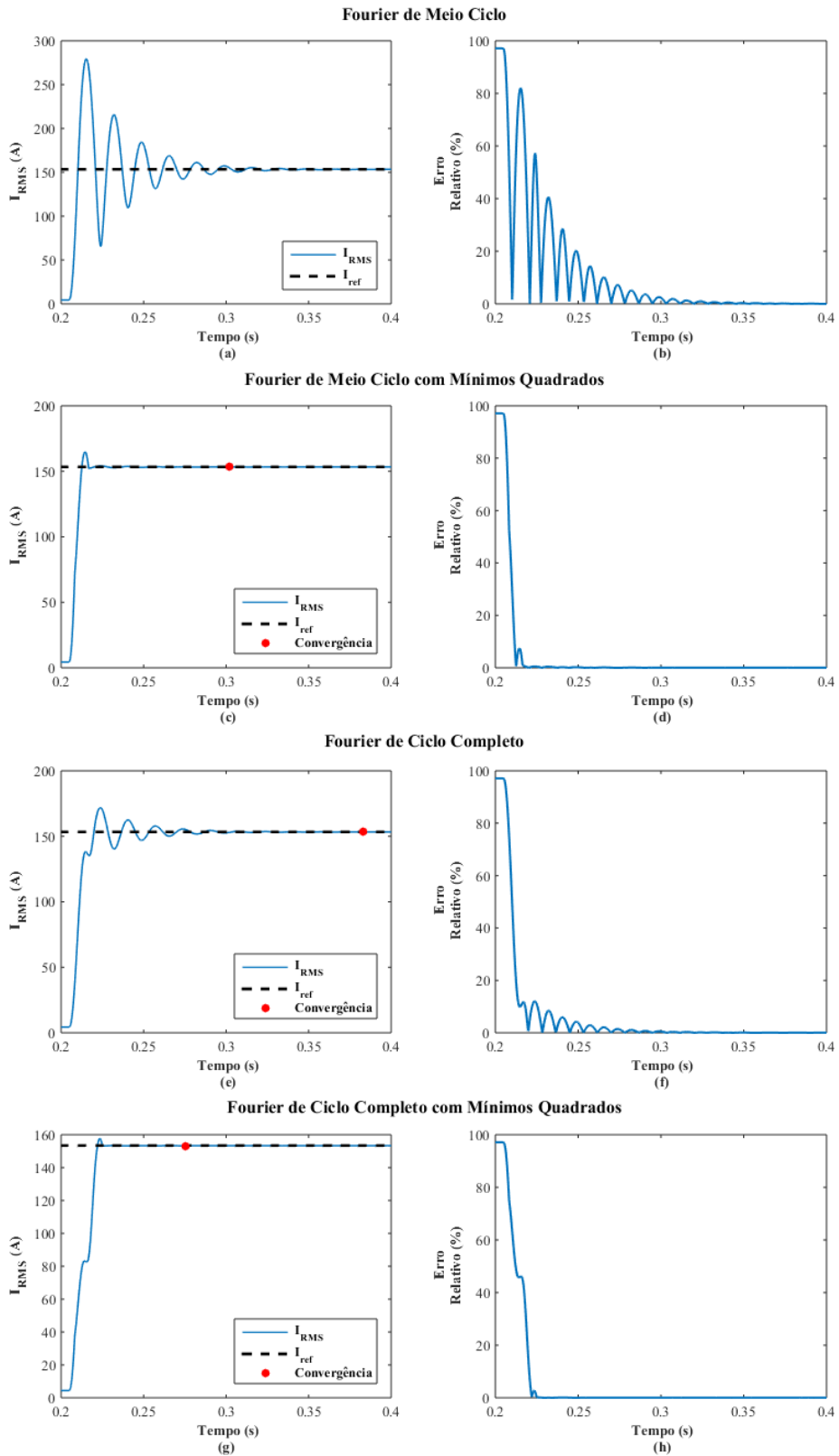


Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, a Figura 19 mostra as respostas dos filtros para o sinal de 64 amostras por ciclos.

Tanto para 64, quanto para 96 amostras por ciclo, o FFCC+MMQ apresenta maior velocidade de convergência e menor overshoot. O Filtro de Fourier sem a estimação da DC apresentou a maior sobre-elevação. Porém, o menor erro após a convergência é verificado para esse filtro em ambas as referidas amostragens.

Figura 19 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Bifásica em 5% da LT e com 64 amostras por ciclo.

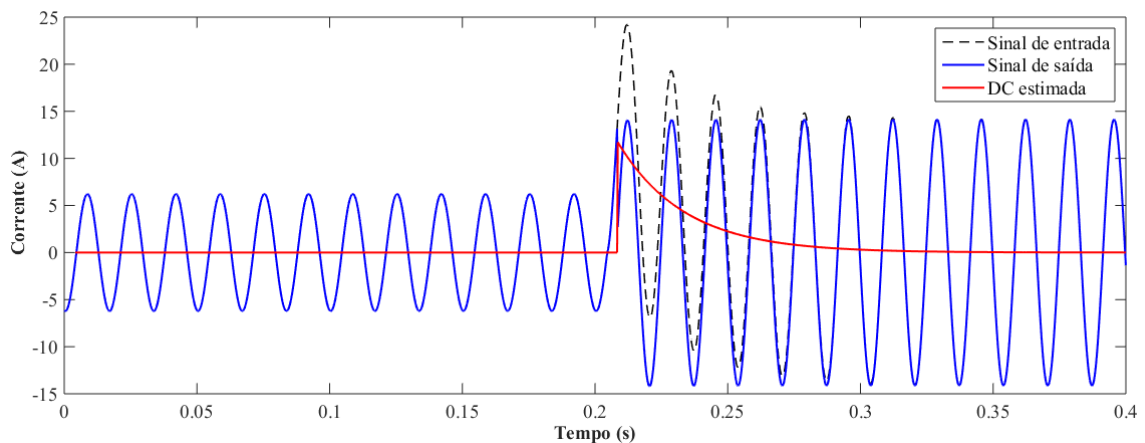


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.3 Falta Trifásicas

Para avaliar o desempenho dos filtros e da técnica proposta para a remoção da componente DC, foram simulados casos de curto-circuito trifásico nas mesmas condições apresentadas anteriormente. Assim, para uma falta em 85%, o sinal a ser processado pelos filtros, com taxa 64 amostras/ciclo, é mostrado na Figura 20. Ressalta-se que, para taxas de amostragem menores, os filtros não convergiram.

Figura 20 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma falta trifásica em 85% da LT com 64 amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As Tabelas 19 e 20 mostram as respostas para a falta simulada nas taxas de amostragem de 64 e 96 amostras por ciclo, respectivamente. Em ambos os casos, o Filtro de Meio Ciclo não atendeu o critério estabelecido para a convergência.

Tabela 19 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3ϕ em 85% da LT, com 64 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1185	0,0490	0,0726
FFCC	0,1857	1,2781	0,0615
FFCC+MMQ	0,0771	0,0235	0,0725

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3ϕ em 85% da LT, com 96 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1012	0,0518	0,0372
FFCC	0,1764	1,2618	0,0256
FFCC+MMQ	0,0597	0,0193	0,0374

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com 64 e 96 amostras, o Filtro de Fourier de Ciclo Completo com estimação da DC apresentou menor tempo de convergência e a menor sobre-elevação. Já o FFCC apresenta a melhor resposta em relação ao erro relativo máximo.

A Figura 21 mostra as respostas para a magnitude do fasor obtidas pelos quatro métodos analisados para a taxa de 64 amostras por ciclo. Nota-se que o Filtro de Meio Ciclo apresenta uma grande oscilação após a ocorrência da falta, ocasionando um grande erro relativo, fazendo com que não haja convergência em relação ao critério adotado. Ressalta-se que, também para este caso, o FFCC+MMQ apresenta a menor sobre-elevação e o menor tempo de convergência. Em contrapartida, o menor erro relativo é apresentado pelo filtro de Fourier de Ciclo Completo em sua aplicação original, isto é, sem a etapa de remoção da componente DC.

Para a falta trifásica em 45% da LT, a amplitude da corrente de falta aumenta em consequência da maior proximidade com o terminal emissor da linha. Para esse caso, nenhuma das metodologias atinge o critério de convergência para as amostragens de 16 e 32 amostras/ciclo para o critério adotado.

Já para as taxas de 64 e 96 amostras/ciclo, os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 21 e 22. Nota-se, mais uma vez que o Filtro de Fourier de Ciclo Completo, associado à metodologia proposta para a remoção da componente DC, converge num tempo menor e possui menor sobre-elevação e, conseqüentemente, um menor erro relativo antes da convergência da resposta. Além disso, a aplicação original do FFCC, também para este caso, apresenta o menor erro relativo após a convergência.

Tabela 21 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3ϕ em 45% da LT, com 64 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1185	0,0928	0,0728
FFCC	0,1857	2,4211	0,0617
FFCC+MMQ	0,0771	0,0446	0,0727

Fonte: Elaborado pelo autor.

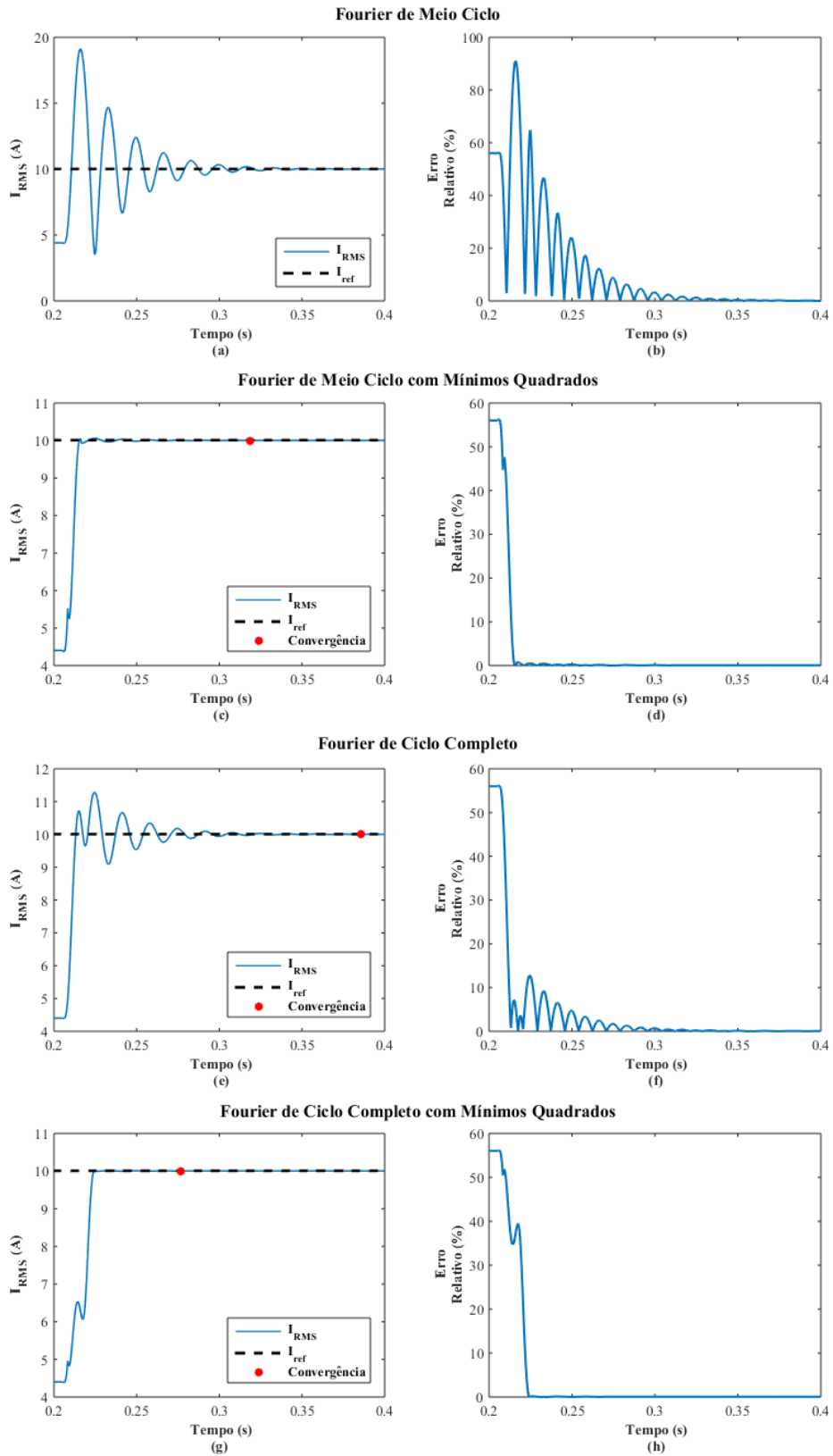
Tabela 22 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3ϕ em 45% da LT, com 96 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1014	0,0991	0,0376
FFCC	0,1764	2,4156	0,0253
FFCC+MMQ	0,0599	0,0372	0,0377

Fonte: Elaborado pelo autor.

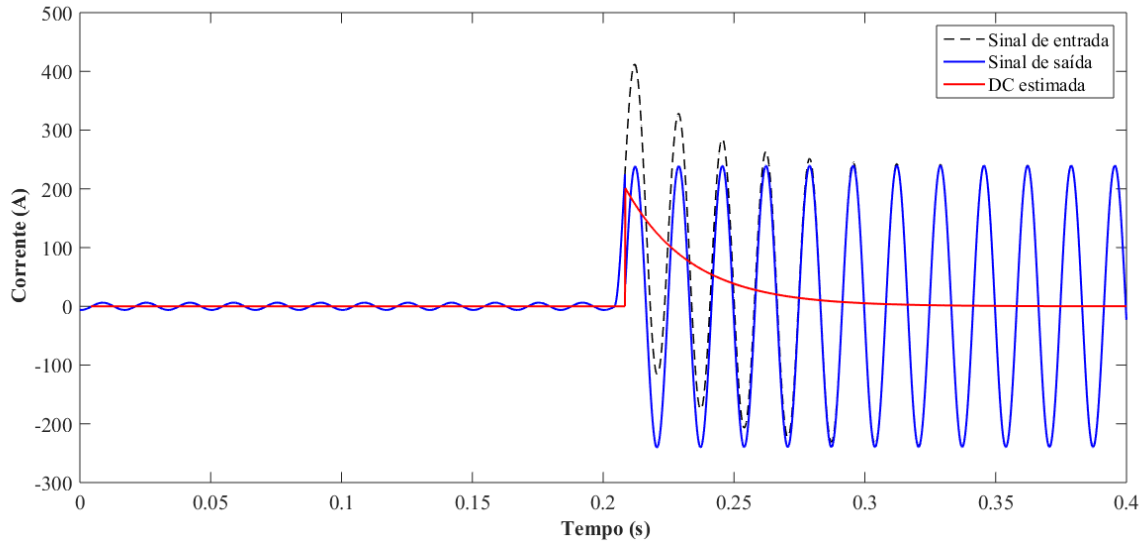
Por fim, são apresentados os resultados obtidos pelo processamento da forma de onda proveniente da simulação de um curto-circuito trifásico em 5% da LT, o qual apresenta a maior magnitude de corrente dentre os casos analisados. Tais resultados são apresentados nas Tabelas 23 e 24. Além disso, a forma de onda processada, a componente DC estimada pela técnica proposta e o sinal após a remoção dessa componente, para a amostragem de 96 amostras/ciclo, são mostrados na Figura 22.

Figura 21 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Trifásica em 85% da LT e com 64 amostras por ciclo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 - Sinais de corrente com e sem a eliminação da Componente DC para uma falta trifásica em 5% da LT com 96 amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3 ϕ em 5% da LT, com 64 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1187	0,8345	0,0726
FFCC	0,1857	21,7785	0,0618
FFCC+MMQ	0,0771	0,4021	0,0729

Fonte: Elaborado pelo autor.

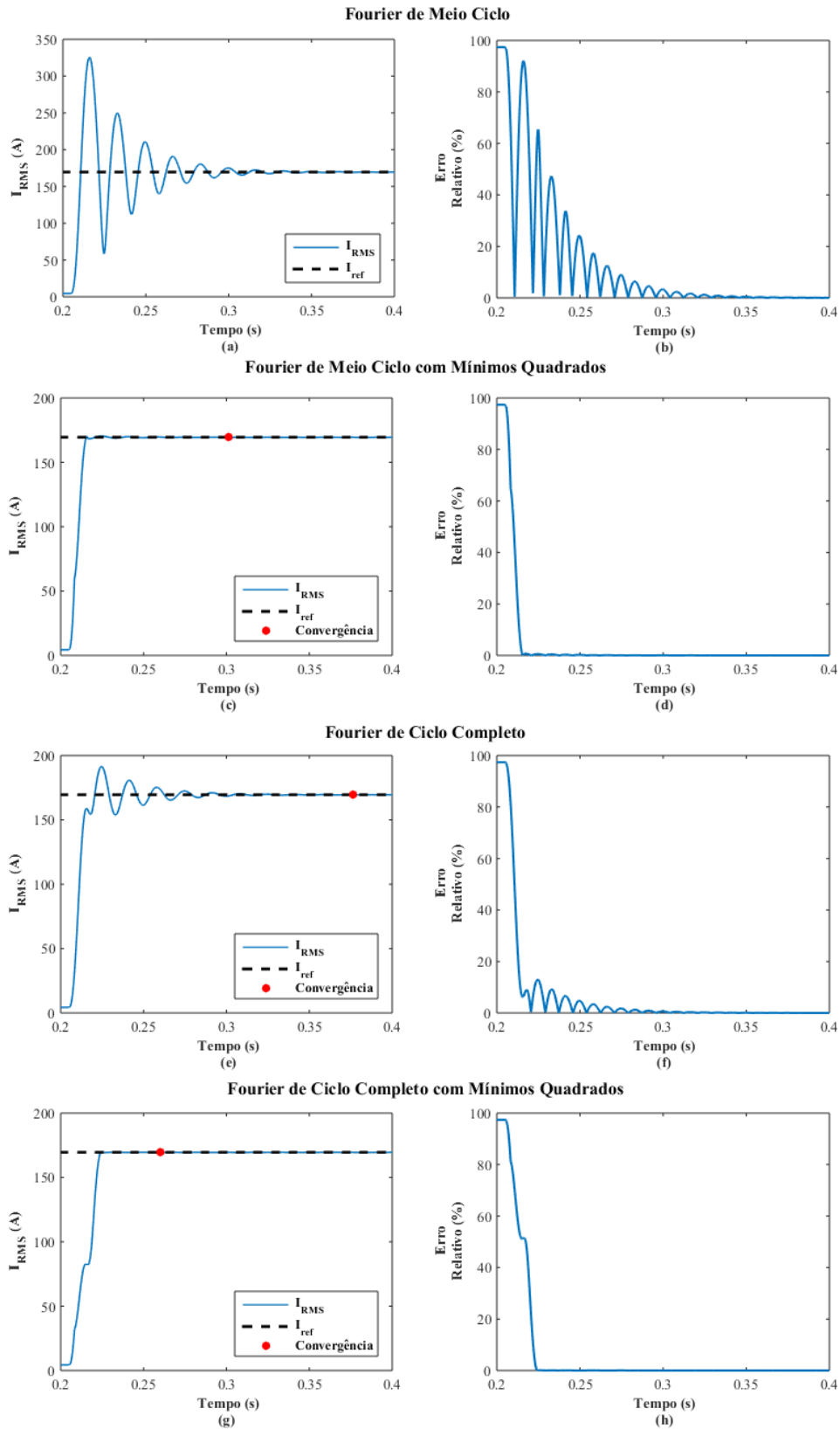
Tabela 24 - Desempenho dos Filtros para um Sinal de Falta 3 ϕ em 5% da LT, com 96 amostras por ciclo.

Método	Tempo de Convergência (s)	Max. OS antes da convergência (A)	Erro relativo máx. pós-convergência (%)
FFMC	---	---	---
FFMC+MMQ	0,1014	0,9004	0,0385
FFCC	0,1764	21,9560	0,0250
FFCC+MMQ	0,0599	0,3402	0,0386

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesses casos, novamente, pode-se concluir que o elevado *overshoot* implica num maior erro relativo antes da convergência das respostas, sendo este mais pronunciado para FFCC, como pode ser visto na Figura 23. Mesmo assim, essa metodologia atinge o critério de convergência e apresenta um erro relativo baixo após convergir. Por fim, para o FFMC, o qual apresenta uma grande oscilação em torno da corrente de referência, a resposta de magnitude do fasor não satisfaz o critério de convergência adotado, sendo essa metodologia a que apresenta o pior desempenho para o esse critério de convergência.

Figura 23 - Resposta Individual dos Filtros para um sinal de Falta Trifásica em 5% da LT e com 96 amostras por ciclo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Considerações Finais

O presente Capítulo apresentou os desempenhos dos Filtros de Fourier com e sem a utilização da técnica de eliminação da componente DC proposta. Foram simuladas faltas em 85%, 45% e 5% ao longo da linha de transmissão, a qual possui 100 km de extensão, para 16, 32, 64 e 96 amostras por ciclo.

Constata-se que, em todos os casos em que houve convergência da resposta do Filtro de Fourier de Ciclo Completo com a DC estimada por MMQ (FFCC+MMQ), este apresentou maior velocidade de convergência da resposta, bem como menor sobre-elevação antes da convergência. Em relação ao erro reativo após a convergência da resposta, foi constatado que, na maioria dos casos, o menor é verificado para o FFCC. Somente no caso da falta monofásica em 5% da LT, com 64 amostras/ciclo, o FFCC+MMQ apresentou o menor erro relativo máximo da resposta.

Ressalta-se que a escolha do melhor Filtro depende da lógica utilizada pelo relé, sendo que muitos são influenciados também pelo ângulo de fase. O Apêndice A – Resposta das Metodologias Analisadas em Relação ao Ângulo de Fase Estimado mostra as respostas para os ângulos de fase após o processamento sinais provenientes das simulações dos curtos-circuitos aqui discutidos.

O próximo Capítulo traz as conclusões finais do Trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O presente trabalho abordou a questão de filtragem da componente unidirecional exponencialmente decrescente (DC), a qual pode prejudicar a correta atuação dos relés de proteção, já que a sua presença nos sinais de corrente pode fazer com que os fasores de tensão e corrente não sejam estimados fielmente pelos algoritmos dos relés.

Com o propósito de estimar fasores com respostas cada vez mais rápidas e precisas, diversos métodos são propostos na literatura, cada qual baseado num conceito matemático, sendo que a maioria baseia-se em modificações realizadas no Filtro tradicional de Fourier.

Nesse contexto, o trabalho propõe uma nova metodologia que utiliza o Método dos Mínimos Quadrados para estimar a Componente DC dos sinais de corrente de falta, de modo a remover essa componente, antes destes serem processados pelos Filtros de Fourier de Meio Ciclo e de Ciclo Completo. Para avaliar a eficiência dessas metodologias, com e sem o passo da estimação da DC precedendo a filtragem, estes têm sua resposta de magnitude comparadas em termos da velocidade de convergência da resposta, da sobre-elevação e do erro relativo. Para tal, foi adotado como critério de convergência um erro relativo percentual menor ou igual a 0,1% durante dois ciclos consecutivos.

A técnica proposta apresentou resultados bastante satisfatórios, pois em todos os casos simulados em que houve convergência, o Filtro de Fourier de Ciclo Completo apresentou menor tempo de convergência e menor sobre-elevação, embora, na maioria dos resultados, o menor erro tenha sido apresentado pelo Filtro de Fourier sem a estimação da DC. O fato dos filtros não convergirem em alguns casos não significa que eles sejam ineficientes, podendo estes convergirem caso o tempo adotado para o critério de convergência fosse maior do que dois ciclos.

Por fim, tendo em vista os resultados, acredita-se que a proposta deste trabalho seja capaz de contribuir para o aumento da confiabilidade do SEP, já que a mesma melhora o desempenho de um dos filtros mais utilizados no âmbito da filtragem digital de sinais de corrente de falta.

6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros citam-se:

- Simular os casos para diferentes condições operacionais do sistema com base em sinais gerados por equações;
- A partir de análise com sinais gerados computacionalmente por equações, averiguar os índices de desempenho com as respostas para ângulo de fase;
- Realizar uma análise detalhada das respostas de ângulo de fase e magnitude das correntes de falta nas lógicas dos relés;

REFERÊNCIAS

- ANEEL. *Indicadores Coletivos de Continuidade (DEC e FEC)*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>>. Acesso em: 12 dezembro de 2017.
- BALAMOUGAN, V.; SIDHU, T.S. *A New Filtering Technique to Eliminate Decaying dc and Harmonics for Power System Phasor Estimation*. IEEE Power India Conference. 2006.
- BENMOUYAL, G. *Removal of DC-offset in current waveforms using digital mimic filtering*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, N°2. 1995.
- CARDOSO Jr., G.; FERREIRA, G.D. *Aplicação de Dispositivos de Proteção Contra Sobrecorrente em Sistemas Elétricos de Distribuição*. Apostila Versão 1.12-14/09/2009.
- CARDOSO Jr., G. *Curso de Especialização em Engenharia Elétrica com Ênfase em Análise de Sistemas de Energia e Automação e Controle de Processos (Curto-Circuito)*. Universidade Federal do Pará. 2004.
- CHO, Y.S. *An Innovative Decaying DC Component Estimation Algorithm for Digital Relaying*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, N° 1. 2009.
- COELHO, A. L. M. *Análise da Resposta Transitória de Transformadores de Corrente de Proteção e o Impacto em Relés de Sobrecorrente Numéricos*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá – Minas Gerais. 2011.
- COSTA, N. S. *Proteção de Sistemas Elétricos considerando Aspectos de Segurança da Rede de Comunicação*. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2007.
- COTOSCK, K.R. *Proteção de Sistemas Elétricos: Uma Abordagem Técnico-Pedagógica*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.
- FILHO, J. M.; MAMEDE, D.R. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2011.
- FORMIGA, D. A. *Estimação de Fasores para Proteção de Sistemas Elétricos Baseada em Mínimos Quadrados e Morfologia Matemática*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, RN. 2012.
- GIRGIS, A. A. *A new Kalman filtering based digital distance relay*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, N°9. 1982.
- GIRGIS, A. A.; MAKRAM, E. B. *Application of adaptive Kalman filtering in fault classification, distance protection, and fault location using microprocessors*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 3, N°1. 1988.
- GOES, A. R.G. *Modernização da Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2013.

GU, J.C.; YU, S.L. *Removal of DC Offset in Current and Voltage Signals using a Novel Fourier Filter Algorithm*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.15, N°1. 2000.

LEE, D. G.; KANG, S. H.; NAM, S. R. *New Modified Fourier Algorithm to Eliminate the Effect of the DC offset on Phasor Estimation Using DFT*. IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition. 2008.

MANN, B. J.; MORRISON, I. F. *Digital Calculation of Impedance of Transmission Line Protection*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS – 90, N° 1. 1971.

MCLAREN, P.G.; REDFERN, M. A. *Fourier –series techniques applied to distance protection*. Proc. IEE, vol.122, N° 11. 1975.

METZ-NOBLAT, B. de; DUMAS, F; POULAIN, C. *Calculation of Short- Circuit Currents*. Collection Technique, Schneider Electric. No.158, September 2005.

PHADKE, A. G.; THORP, J.S.; ADAMIAK, M.G. *A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, N°5. 1983.

PHADKE, A.G.; HLIBKA, T.; IBRAHIM, M. *A digital computer system of EHV substation: Analisis and filed tests*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95 N°1. 1976.

PHADKE, A.G.; HLIBKA, T.; IBRAHIM, M. *Fundamental basis for distance relaying with symmetrical components*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, N°2. 1977.

ROCKEFELLER, G. D.; UDREN, E. A. *High –speed distance relaying using a digital computer – II – Test Results*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 91, N°3. 1972.

SACHDEV, M. S.; BARIBEAU, M. A. *A new algorithm for digital impedance relays*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS -98, N°6. 1979.

SACHDEV, M. S.; WOOD, H.C.; JOHNSON, N. G. *Kalman filtering applied to power system measurements for relaying*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, N°12. 1985.

SACHDEV, M.S.; NAGPAL, M. *A recursive least error squares algorithm for power system relaying and measurement applications*. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.6, N°3. 1991.

SANTOS, C. H. F. d. *Teoria e prática do filtro de Kalman*. Curso de extensão. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Parque Tecnológico de Itaipu – Centro de Engenharias e Ciências Exatas. 2011.

SANTOS, E. M. d. *Compensação das Formas de Onda Distorcidas pela Saturação de Transformadores de Corrente com Auxílio da Estimção de Frequência*. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, RS. 2015.

SANTOS, E. M. d. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Universidade Federal do Pampa. Pag. 39,42,49. 2016.

SANTOS, V.M. *Estudo de Caso de Curto-Circuito em um Sistema Elétrico Industrial*. Trabalho de Conclusão de Concurso – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo - São Carlos-SP. 2009.

SCHWEITZER, E. O.; HOU. D. *Filtering for protective relays*. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Pullman, Washington USA. 1993.

SIDHU, T.; ZHANG, X.; ALBASRI, F.; SACHDEV, M. *Discrete- Fourier-transform-based technique for removal of decaying DC offset from phasor estimates*. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.150, N°.6. 2003.

SILVA, C. D. L. *Estimação Fasorial Aplicada a Relés de Proteção Numéricos Utilizando os Métodos de Ajuste de Curvas e Redes Neurais Artificiais*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria- RS. 2014.

SILVA, K. M. e. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. 2009. 208f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2009.

SILVA, M.G.M. *Avaliação de Desempenho de Relés de Proteção Digitais*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro.2012

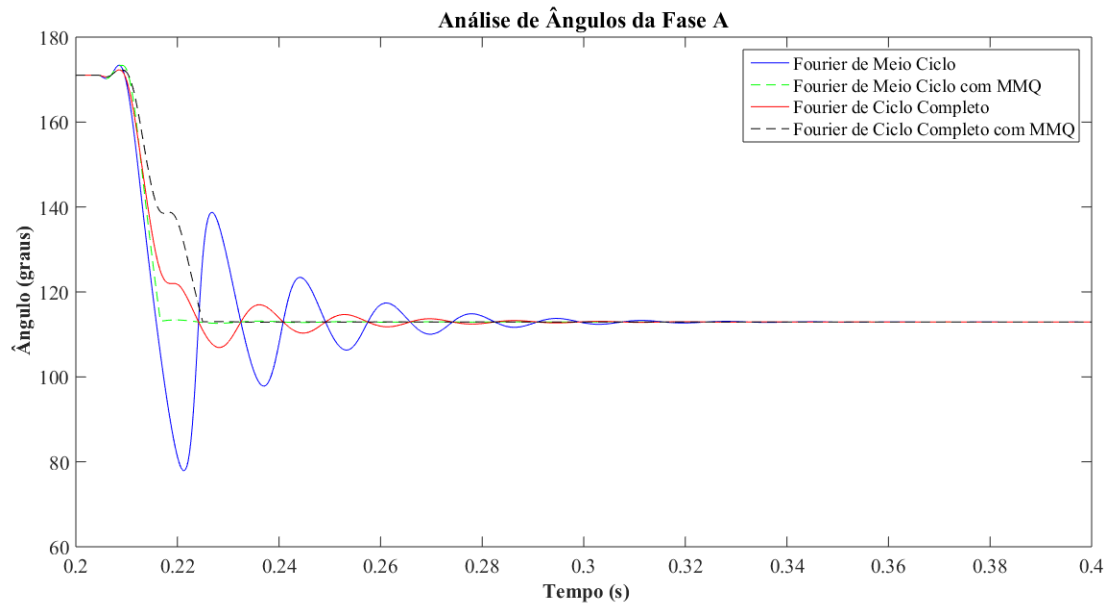
STEFANELLO, N.; CARDOSO Jr, G; MORAES, A. de.; MARCHESAN, G.; STEFANELLO, F.; SANTOS, E. dos. *Melhoria no Desempenho dos Filtros Fundamentados na Transformada Discreta de Fourier através da Redução do Tamanho da Janela de Dados*. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition Latin America. São Paulo. 2010b.

STEFANELLO, N.; MACHADO, T.; CARDOSO Jr, G.; SANTOS E. dos.; FARIAS, P.; CORRÊA, R. *Avaliação de Algoritmos de Filtragem Digital Fundamentados na Transformada Discreta de Fourier*. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito –MS, Brasil. 2010a.

VELOSO, H. M. *Índice de Desempenho dos Filtros Digitais para Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais. 2006.

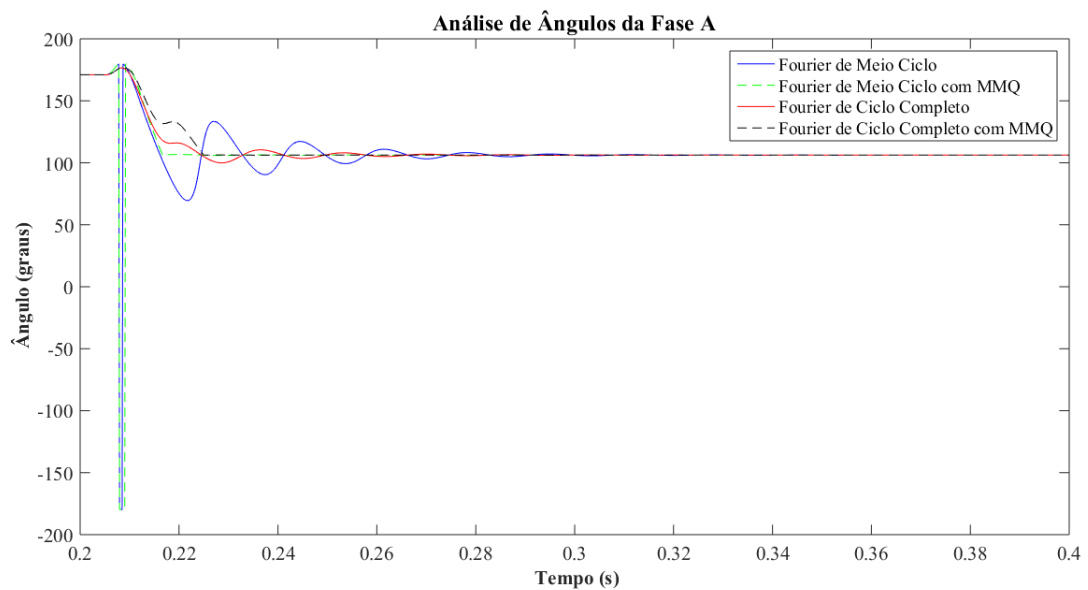
**APÊNDICE A – RESPOSTA DAS METODOLOGIAS ANALISADAS EM RELAÇÃO
AO ÂNGULO DE FASE ESTIMADO**

Figura 24 – Ângulo de fase da falta monofásica em 85% da LT com 64 amostras por ciclo



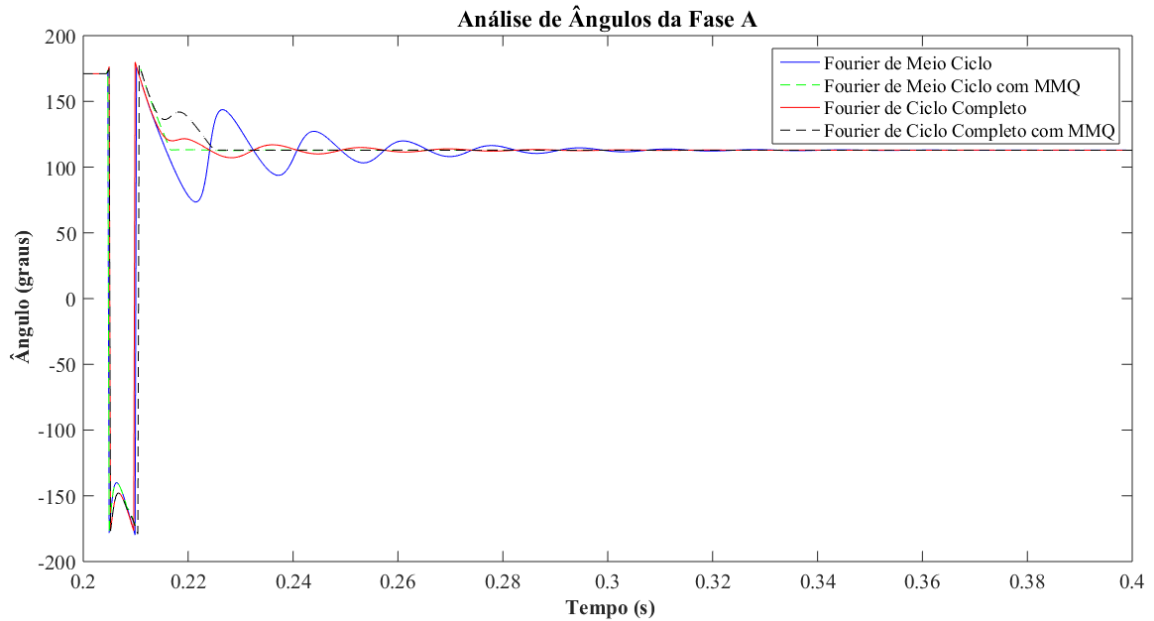
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Ângulo de fase da falta monofásica em 45% da LT com 96 amostras por ciclo



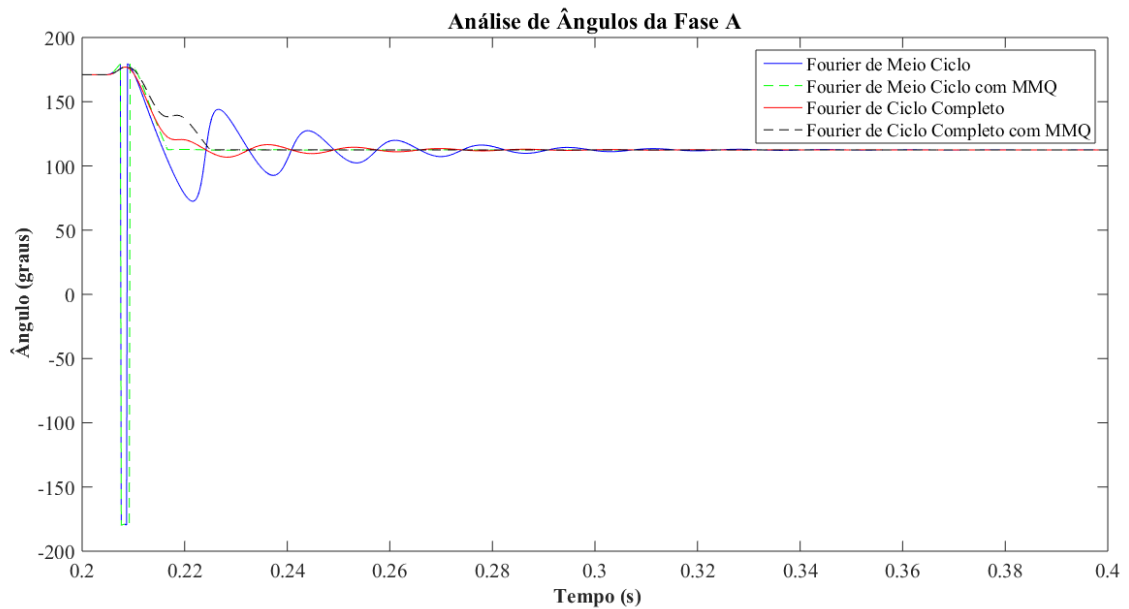
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Ângulo de fase da falta bifásica em 85% da LT com 96 amostras por ciclo.



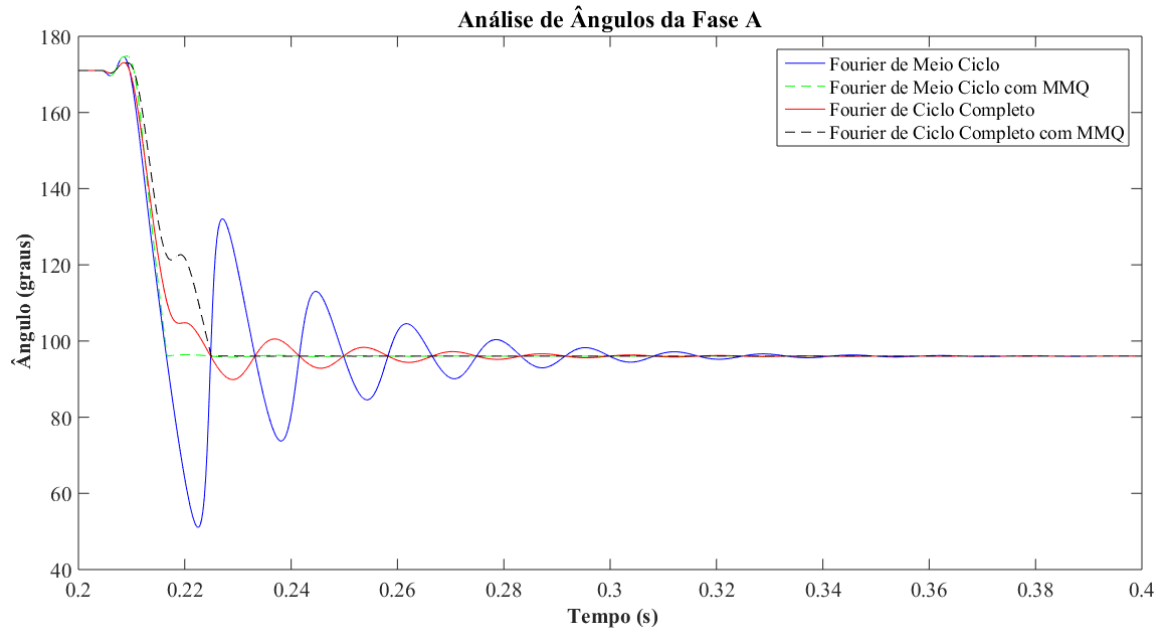
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Ângulo de fase da falta bifásica em 5% da LT com 64 amostras por ciclo.



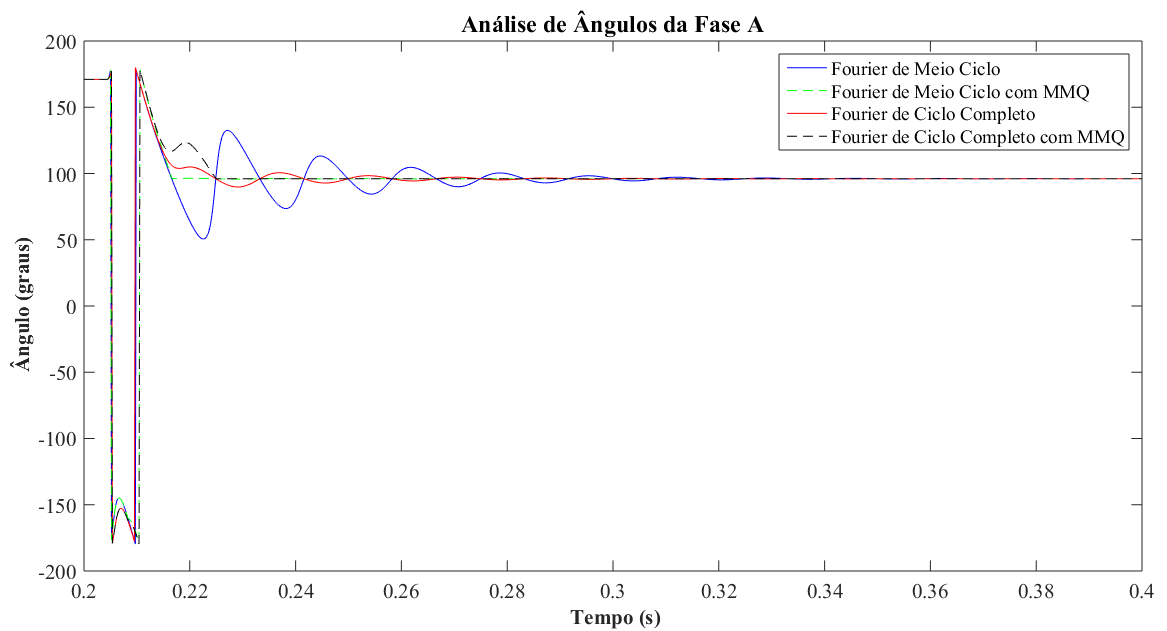
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Ângulo de fase da falta trifásica em 85% da LT com 64 amostras por ciclo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Ângulo de fase da falta trifásica em 5% da LT com 96 amostras por ciclo.



Fonte: Elaborado pelo autor.