



Universidade Federal  
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Paulo Vinicius Bezerra de Oliveira

# **Métodos de Estimação Fasorial Aplicados à Proteção de Sistemas Elétricos**

Campina Grande, Brasil  
4 de março de 2017

Paulo Vinicius Bezerra de Oliveira

# **Métodos de Estimação Fasorial Aplicados à Proteção de Sistemas Elétricos**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração : Processamento de Energia

Orientador: Prof. Dr. Washington Araújo Neves

Campina Grande, Brasil

4 de março de 2017

Paulo Vinicius Bezerra de Oliveira

## **Métodos de Estimação Fasorial Aplicados à Proteção de Sistemas Elétricos**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração : Processamento de Energia

Aprovado em:    /    /

---

**Professor Avaliador**

Avaliador

---

**Prof. Dr. Washington Araújo Neves**

Orientador, UFCG

Campina Grande, Brasil

4 de março de 2017

*Este trabalho é dedicado à Deus, à minha família e  
meus amigos que sempre estiveram presente.*

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as coisas boas que Ele tem me proporcionado, pela minha saúde e pelas oportunidades que Ele me deu.

Agradeço meus pais José e Josilene, por serem os melhores pais que um filho pode ter. Por sempre terem se esforçado para me proporcionar tudo do melhor, educação, saúde, amor, estiveram juntos comigo em minha trajetória de estudos, em cada batalha que enfrentei e em todas as minhas conquistas, a todo momento, com muita fé, torcida e carinho. Hoje devo tudo que sou e que conquistei à eles.

Agradeço aos meus irmãos Pedro e Victor, pela amizade, companheirismo e pela força que sempre me deram para continuar caminhando.

Agradeço minha melhor amiga Gêssica por sempre estar presente, mesmo nos momentos difíceis e por sempre ter me ajudado com sua amizade e carinho.

Agradeço todos os professores, coordenador e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG.

Agradeço aos amigos que fiz em Campina Grande, em especial João André, Paulo Mendel, Demontiez, Guilherme Dantas e Bruna Larissa pelo companheirismo demonstrado no tempo em que moramos juntos em Campina Grande.

A todos os meus amigos pelos momentos de descontração, especialmente nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao professor Washington e seu aluno Raphael Leite por toda ajuda oferecida durante o desenvolvimento deste trabalho.

*"Dar menos  
do que o  
seu melhor é  
sacrificar o dom."  
(Steve Prefontaine)*

# RESUMO

Neste trabalho, é feita uma análise qualitativa de diferentes algoritmos de estimação fasorial aplicados à Proteção de Sistemas Elétricos. O funcionamento adequado dos relés (elemento mais importante do sistema de proteção) está diretamente ligado à qualidade da informação que os mesmos recebem dos Transformadores para Instrumentos. Portanto, é essencial que as grandezas de tensão e corrente passem por um processo de filtragem das componentes fundamentais. Para realizar a comparação entre as seis técnicas de estimação fasorial em estudo, é feita uma análise da aplicação de cada um dos métodos em situações reais ocorrentes nos Sistemas Elétricos de Potência. A partir dos resultados obtidos das simulações, é possível identificar quais métodos obtiveram os melhores desempenhos.

**Palavras-chave:** Estimação fasorial, Proteção de sistemas elétricos, Distorção harmônica, Localização de faltas.

# ABSTRACT

In this work, it is performed a qualitative analysis of different phasor estimation algorithms applied to Power System Protection. The proper operation of relays (the most important element of a protection system) is directly linked to the quality of the information they receive from the Instrument Transformers. Therefore, it is essential that voltage and current go through a process of filtering the fundamental components. In order to carry out the comparison among the six phasor estimation techniques under study, it is performed an analysis of the application of each one of the methods in real situations in the Electric Power Systems. From the results obtained from the simulations, it is possible to identify which methods obtained the best performances.

**Keywords:** Phasor estimation, Power system protection, Harmonic distortion, Fault location.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Subsistema de proteção de um SEP. Além do relé, o sistema de proteção consiste de transformadores, disjuntores e bateria . . . . .	15
Figura 2 – Zonas de proteção de um sistema de potência. . . . .	17
Figura 3 – Exemplo de amostragem de dois sinais senoidais com frequência de amostragem de 1 kHz. . . . .	24
Figura 4 – SEP de 230 kV modelado no ATP. . . . .	30
Figura 5 – Tensão $V_a$ e os fasores dos seis métodos para o caso 1. . . . .	31
Figura 6 – Tensão $V_b$ e os fasores dos seis métodos para o caso 1. . . . .	32
Figura 7 – Tensão $V_c$ e os fasores dos seis métodos para o caso 1. . . . .	32
Figura 8 – Corrente $I_a$ e os fasores dos seis métodos para o caso 1. . . . .	32
Figura 9 – Corrente $I_b$ e os fasores dos seis métodos para o caso 1. . . . .	33
Figura 10 – Corrente $I_c$ e os fasores dos seis métodos para o caso 1. . . . .	33
Figura 11 – Tensão $V_a$ e os fasores dos seis métodos para o caso 2. . . . .	34
Figura 12 – Tensão $V_b$ e os fasores dos seis métodos para o caso 2. . . . .	34
Figura 13 – Tensão $V_c$ e os fasores dos seis métodos para o caso 2. . . . .	34
Figura 14 – Corrente $I_a$ e os fasores dos seis métodos para o caso 2. . . . .	35
Figura 15 – Corrente $I_b$ e os fasores dos seis métodos para o caso 2. . . . .	35
Figura 16 – Corrente $I_c$ e os fasores dos seis métodos para o caso 2. . . . .	35
Figura 17 – Tensão $V_a$ e os fasores dos seis métodos para o caso 3. . . . .	36
Figura 18 – Tensão $V_b$ e os fasores dos seis métodos para o caso 3. . . . .	36
Figura 19 – Tensão $V_c$ e os fasores dos seis métodos para o caso 3. . . . .	37
Figura 20 – Corrente $I_a$ e os fasores dos seis métodos para o caso 3. . . . .	37
Figura 21 – Corrente $I_b$ e os fasores dos seis métodos para o caso 3. . . . .	37
Figura 22 – Corrente $I_c$ e os fasores dos seis métodos para o caso 3. . . . .	38
Figura 23 – Tensão $V_a$ e os fasores dos seis métodos para o caso 4. . . . .	39
Figura 24 – Tensão $V_b$ e os fasores dos seis métodos para o caso 4. . . . .	39
Figura 25 – Tensão $V_c$ e os fasores dos seis métodos para o caso 4. . . . .	39
Figura 26 – Corrente $I_a$ e os fasores dos seis métodos para o caso 4. . . . .	40
Figura 27 – Corrente $I_b$ e os fasores dos seis métodos para o caso 4. . . . .	40
Figura 28 – Corrente $I_c$ e os fasores dos seis métodos para o caso 4. . . . .	40

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	Sistema Elétrico de Potência
SP	Sistema de Proteção
LT	Linha de Transmissão
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
TC	Transformador de Corrente
FCDF	<i>Full Cycle Discrete Fourier Transform</i>
HCDF	<i>Half Cycle Discrete Fourier Transform</i>
TI	Transformadores para instrumento
COSMOD	Cosseno Modificado
GUO	Algoritmo de Guo

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta$	Delta maiúsculo
$Hz$	Hertz
$\omega$	Ômega
$\mu$	Micro
kV	Kilovolt
f	frequência
T	período
j	unidade imaginária
$\pi$	número irracional pi
$\Omega$	Ômega maiúsculo/Ohm

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Filosofia da Proteção</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Relés</b>	<b>17</b>
2.2.1	Relés Eletromecânicos	17
2.2.2	Relés Estáticos	18
2.2.3	Relés Digitais	19
2.2.4	Relés Numéricos	19
<b>2.3</b>	<b>Série e Transformada de Fourier</b>	<b>20</b>
2.3.1	Série de Fourier	20
2.3.2	Transformada de Fourier	22
<b>2.4</b>	<b>Filtros Anti-Aliasing</b>	<b>23</b>
<b>2.5</b>	<b>Algoritmos de Estimação Fasorial</b>	<b>25</b>
2.5.1	Fourier de Ciclo Completo (FCDFT)	26
2.5.2	Fourier de Meio Ciclo (HCDFT)	26
2.5.3	Cosseno Modificado (COSMOD)	27
2.5.4	Algoritmo de Guo (GUO)	27
2.5.5	FCDFT e HCDFT + Filtro Mímico	28
<b>3</b>	<b>ANÁLISES E RESULTADOS</b>	<b>30</b>
<b>3.1</b>	<b>Caso 1</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Caso 2</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>Caso 3</b>	<b>36</b>
<b>3.4</b>	<b>Caso 4</b>	<b>38</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>41</b>
<b>4.1</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>41</b>
<b>4.2</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>42</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica vem apresentando um ritmo de crescimento elevado em todo o mundo. No Brasil, por exemplo, no período entre 1995 e 2011, o consumo anual de energia elétrica aumentou de 243 mil Gwh para 433 mil Gwh, um crescimento de 78%. Esse aumento de consumo é inerente ao desenvolvimento da sociedade, e como consequência observa-se que os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) estão se tornando cada vez mais robustos e complexos, fazendo assim com que o mesmo esteja mais susceptível a ocorrência de defeitos. Um SEP é basicamente um conjunto de equipamentos que opera de modo sincronizado e controlado afim de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica ao cliente com eficiência e qualidade. Pode-se então dizer que um SEP é composto por: geração, transmissão e distribuição.

A maioria dos equipamentos constituintes dos sistemas elétricos, como transformadores, geradores dentre outros, possuem custo elevado e manutenção dispendiosa e longa. Associado a isso, há o fato de que se faz necessária a continuidade do serviço de fornecimento de energia elétrica por parte das concessionárias aos consumidores, portanto, eventuais defeitos que possam danificar os aparelhos ou comprometer fornecimento de energia elétrica devem ser resolvidos de maneira breve e eficiente.

Nesse contexto, a Proteção de Sistemas Elétricos possui grande importância devido à suas funções de proteger os SEPs e também garantir a continuidade do serviço. Um sistema de proteção elétrico pode ser definido como um conjunto de equipamentos que tem como objetivo desempenhar a proteção contra faltas no SEP e quaisquer outras condições de operação anormais nos componentes do sistema elétrico.

O dispositivo mais importante em um sistema de proteção é o relé, pois ele é o responsável por identificar anormalidades no sistema elétrico e tomar a decisão de quais disjuntores abrir afim de retirar do sistema a parte defeituosa desligando a menor parte possível do sistema, evitando ou minimizando os danos aos equipamentos e mantendo a continuidade do fornecimento de energia. Os relés tem apresentado uma grande evolução devido ao avanço das tecnologias digitais.

Em condições de falta, a corrente e a tensão analisadas pelos relés estão sujeitas a interferências como componente DC de decaimento exponencial, componentes harmônicos, fenômenos transitórios de alta e baixa frequência e não linearidades causadas pelos transformadores de instrumentos (FORMIGA, 2012). A impedância de falta pode ser calculada de duas maneiras distintas, podem ser baseados nos cálculos dos fasores na frequência fundamental ou na resolução de equações diferenciais (SILVA, 2009). Os algoritmos de estimação fasorial são baseados na Transformada de Fourier, utilizados em relés digitais

(PHADKE; THORP, 2009).

## 1.1 Objetivos

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo realizar análises a cerca dos Métodos de Estimação Fasorial aplicados à Proteção de Sistemas Elétricos encontrados na literatura atualmente e, a partir de tais análises decidir quais métodos apresentam melhores desempenhos quando aplicados em situações reais ocorrentes nos Sistemas Elétricos de Potência.

## 1.2 Metodologia

Esse trabalho será desenvolvido no Laboratório de Sistemas de Potência (LSP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Será necessária a realização de uma revisão bibliográfica, na qual serão utilizados artigos produzidos por pesquisadores do próprio laboratório e também artigos disponibilizados pelo IEEE.

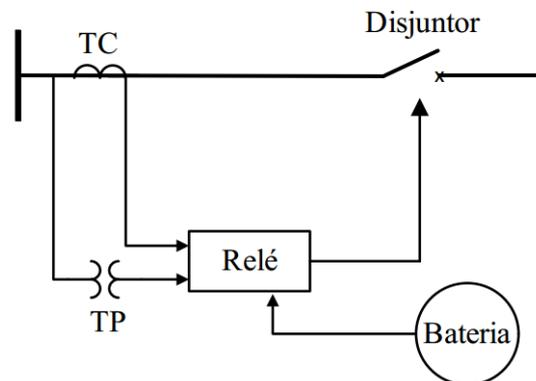
Para a realização dos testes necessários para o desenvolvimento deste trabalho, faz-se necessário o uso de alguns softwares. Os circuitos estudados serão simulados no Alternative Transient Program (ATP). Os dados coletados nessas simulações serão tratados e analisados utilizando o MatLab. O MatLab também será utilizado para a criação de rotinas para a simulação dos Métodos de Estimação Fasorial.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Filosofia da Proteção

Um Sistema de Proteção (SP) protege o SEP de efeitos deletérios de uma falta continuada. Uma falta (geralmente um curto-circuito, ou mais normalmente, uma situação de anormalidade no sistema) ocorre aleatoriamente. Se algum componente faltoso do SEP (linha de transmissão, barramento, transformador, etc.) não for isolado do resto do sistema o mais rapidamente possível, pode ocasionar instabilidade ou um desligamento do sistema devido à ação de outros dispositivos de proteção. Um SP deve então remover a parte faltosa do sistema do resto do SEP o mais rápido possível (PHADKE; THORP, 2009). Na Figura 1 pode-se observar um subsistema de proteção de um SEP.

Figura 1 – Subsistema de proteção de um SEP. Além do relé, o sistema de proteção consiste de transformadores, disjuntores e bateria



O sistema de proteção é responsável por: selecionar, coordenar, ajustar e aplicar os vários equipamentos e dispositivos protetores a um sistema elétrico, de forma a guardar entre si uma determinada relação, tal que uma anormalidade no sistema possa ser isolada e removida, sem que as outras partes do mesmo sejam afetadas (GIGUER, 1988).

O princípio de funcionamento de um sistema de proteção típico pode ser resumido da seguinte forma: os transformadores para instrumentos (transformador de corrente – TC e transformador de potencial – TP) reduzem as magnitudes das grandezas necessárias à função de proteção (tensão e/ou corrente) para níveis aceitáveis de leitura e acesso seguro. Em seguida, essas informações são disponibilizadas ao relé, que se encarrega de processá-las. Caso os valores das grandezas excedam valores pré-definidos, os contatos do relé são fechados e neste instante, a bobina de abertura do disjuntor, alimentada por uma fonte auxiliar, é energizada abrindo os contatos principais do disjuntor (SÁ et al., ).

Os requisitos necessários para a operação dos sistemas elétricos exigidos pelos órgãos reguladores são:

- Continuidade do serviço: mediante limites para os indicadores coletivos de duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC) e frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) verifica se os índices estão em limites aceitáveis. Se a concessionária não cumprir os limites recebe uma multa;
- Eficiência Energética: A expressão eficiência energética refere-se a técnicas e procedimentos que visam reduzir perdas e eliminar desperdícios, sem comprometer conforto e produção;
- Qualidade da Energia: A expressão qualidade de energia refere-se a um conjunto de alterações de tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos, da geração ao uso final.

A seguir são apresentadas algumas definições associadas à proteção de sistemas (ANDERSON, 1998):

- Confiabilidade da proteção: É definida como a probabilidade de funcionamento correto da proteção quando houver a necessidade de sua atuação. Para isto a proteção deve atuar adequadamente para uma falta dentro de sua zona de proteção e não deve atuar para uma falta fora de sua zona de proteção;
- Segurança na proteção: É uma expressão usada para identificar a habilidade de um sistema ou equipamento de deixar de operar desnecessariamente. Porém, assim como confiabilidade da proteção, o termo muitas vezes é usado para indicar que um sistema está operando corretamente;
- Sensibilidade na proteção: É a habilidade que um sistema tem de identificar uma situação de funcionamento anormal em que exceda o nível normal ou detectar o limiar em que a proteção deve atuar;
- Seletividade na proteção: É uma expressão associada ao arranjo dos dispositivos de proteção de forma que somente o elemento em falta seja retirado do sistema. Isto é, os demais elementos devem permanecer conectados ao sistema. A característica de seletividade restringe a interrupção somente dos componentes, do sistema, que estão em falta;
- Zona de proteção: São as regiões de sensibilidade. Na Figura 2, mostra-se um exemplo de zonas de proteção;



relés é que eles são providos de um isolamento galvânico entre as entradas e saídas de uma forma simples, barata e segura, por isso quando necessita-se de uma simples função liga/desliga, onde os contatos de saída têm de conduzir correntes substanciais, eles ainda são utilizados (RUSH, 2011).

Os relés eletromecânicos podem ser classificados como (RUSH, 2011):

- Armadura de atracamento (contato móvel);
- Bobina móvel;
- Indução;
- Térmico;
- Motorizado;
- Mecânico.

No entanto, atualmente, o relé de armadura de atracamento é o único que ainda é significativamente utilizado, os outros tipos foram substituídos por relés mais modernos (RUSH, 2011).

### 2.2.2 Relés Estáticos

O termo “estático” indica que o relé não possui nenhuma parte móvel. Apesar dessa definição, os contatos de saída ainda são geralmente atraídos como os dos relés de armadura. Nesse caso, o termo “estático” refere-se à ausência de partes móveis para gerar a característica de um relé.

A introdução dos relés estáticos iniciou-se na década de 1960. Seu projeto era baseado no uso de dispositivos eletrônicos com componentes analógicos em vez de bobinas e ímãs para gerar as características de um relé. As versões iniciais usavam dispositivos discretos como transistores e diodos junto com resistores, capacitores, indutores etc., mas avanços na eletrônica possibilitaram nas versões posteriores o uso de circuitos integrados lineares e digitais para o processamento de sinais e implementação de funções de lógica. Os mesmos circuitos básicos podem ser comuns a vários relés, porém o empacotamento ainda era restrito a uma única função de proteção por invólucro e, portanto, funções complexas exigiam vários conjuntos de equipamentos apropriadamente interconectados. Programação pelo usuário estava restrita às funções básicas de ajuste das curvas características do relé. Os relés estáticos podem ser vistos, em termos simples, como uma substituição eletrônica aos relés eletromecânicos, com alguma flexibilidade adicional na instalação e alguma economia de espaço (RUSH, 2011).

As instalações de fabricação dos relés estáticos são diferentes quando comparadas as necessárias para os relés eletromecânicos. Calibração e reparos não são mais realizados no campo, sem equipamento especializado.

### 2.2.3 Relés Digitais

Com o desenvolvimento dos computadores, surgiram os relés digitais. A introdução de relés de proteção digitais foi um grande avanço na área da proteção. Os antigos circuitos analógicos foram substituídos por microprocessadores e microcontroladores para desempenharem as funções de proteção. Os primeiros exemplos foram colocados em serviço por volta de 1980 e, com o aumento da capacidade de processamento, podem ser considerados como a tecnologia corrente para muitas aplicações. Entretanto, essa tecnologia está sendo substituída pelos relés numéricos.

Os relés digitais introduziram a conversão analógica digital (A/D) de todas as variáveis analógicas medidas e o uso de microprocessador para implementação do algoritmo de proteção. O microprocessador usa algumas técnicas de cálculo ou utiliza a Transformada Discreta de Fourier para implementação do algoritmo. Sua funcionalidade tende a ser limitada, ficando restrita basicamente à função de proteção. Funcionalidades adicionais, quando comparadas com os relés eletromecânicos ou estáticos, estão disponíveis, normalmente na forma de uma variedade de ajustes e maior precisão. Um canal de comunicação com um computador remoto pode ser disponibilizado (RUSH, 2011).

A capacidade limitada dos microprocessadores utilizados nos relés digitais restringe o número de amostras da forma de onda por ciclo que eles podem medir. Isso limita a velocidade de operação do relé para certas aplicações. Um relé digital para uma função particular de proteção poderia ser muito mais lento que um relé estático equivalente. Entretanto, o tempo extra não é significativo em termos de tempo total de atuação e seus possíveis efeitos na estabilidade do sistema de potência (RUSH, 2011).

### 2.2.4 Relés Numéricos

Relés numéricos são capazes de melhorar a performance da proteção consideravelmente. Os relés numéricos possuem um processador de sinal digital (DSP) especializado como o hardware computacional (AREVA, 1995). Usando o DSP como o processador do relé, o relé numérico é capaz de atender aos requisitos de proteção como confiabilidade, sensibilidade, seletividade e rapidez (PRICE, 2010), (KHEDERZADEH, 2006). Portanto, o uso dos relés numéricos em breve substituirá as tecnologias dos relés anteriores - digitais, estáticos e eletromecânicos - (GOH et al., 2011).

O processamento dos relés numéricos com DSP é também otimizado para aplicações de processamento de sinais em tempo real (AREVA, 1995). Como resultado o relé se torna

capaz de realizar processamentos mais complexos de sinais digitais para detectar faltas mais rápida e precisamente quando comparado com as tecnologias anteriores. Conseqüentemente a confiabilidade do relé aumenta. Os relés numéricos ainda possuem a vantagem de poder desempenhar outras atividades além da proteção, esses relés são habilitados também com comunicação avançada, auto-supervisão, capacidade de controle, medição e também gravação de eventos (GOH et al., 2011).

Os relés numéricos fornecem uma vasta gama de funções de proteção como sobrecorrente, sobrecorrente direcional, subtensão, sobretensão e outros tipos de proteção (ELMORE, 2003). A proteção de sobrecorrente é de grande importância nos sistemas de distribuição, uma vez que tais sistemas constituem a maior parte do sistema elétrico e, portanto, o diagnóstico de faltas nessa porção do sistema se torna mais complexo. As faltas que ocorrem no sistema de distribuição afetam a confiabilidade, a segurança e a qualidade do SEP (GOH et al., 2011).

Para a proteção de sobrecorrente, os relés operam com ou sem delays pré-determinados e aciona o disjuntor associado quando a corrente que flue no relé excede o valor estabelecido. A sobrecorrente ocorre devido a presença de faltas ou condições de sobrecarga. Essa anormalidade pode causar graves problemas, pois esse elevado valor da corrente pode causar danos tanto a parte faltosa quanto a parte saldável do sistema (GOH et al., 2011).

Até mesmo em casos em que a duração do transitório da tensão e da corrente é curta, a operação dos relés de proteção podem ser afetados. Como resultado, o relé pode falhar na abertura do disjuntor em caso de anormalidade no SEP ou pode acionar a abertura do disjuntor quando não se faz necessário (PHADKE; THORP, 2009).

## 2.3 Série e Transformada de Fourier

### 2.3.1 Série de Fourier

A série de Fourier permite que sinais periódicos sejam representados em função de uma soma de funções trigonométricas, sendo estas, senos e cossenos. (LOPES et al., 2012)

Um sinal é dito ser periódico quando existe um valor positivo  $T$  para o qual a equação (2.1) é satisfeita para todos os valores de  $t$ . Nesse caso, diz-se que  $x(t)$  é periódico com período  $T$  (OPPENHEIM, 2010).

$$x(t) = x(t + T) \quad (2.1)$$

A frequência fundamental do sinal é dada por  $f_0 = \frac{1}{T}$ .

Um exemplo de sinal periódico é o sinal  $x(t) = e^{j\omega_0 t}$ . Este sinal tem frequência fundamental  $\omega_0$  e período fundamental  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ . A esse sinal está associado o conjunto de

exponenciais complexas harmonicamente relacionadas. Pode-se observar esse conjunto na equação (2.2).

$$\phi_k(t) = e^{jk\omega_0 t} = e^{jk(\frac{2\pi}{T})t} \quad (2.2)$$

Onde  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Cada um dos sinais expressados da equação (2.2) tem frequência fundamental que é um múltiplo de  $\omega_0$  e, portanto, cada um é periódico com período T. Desse modo, uma combinação linear de exponenciais complexas harmonicamente relacionadas na da equação (2.3) também é periódica com período T:

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk(\frac{2\pi}{T})t} \quad (2.3)$$

Os termos para  $k = \pm 1$  possuem frequência fundamental  $\omega_0$  e são chamados de componentes fundamentais ou componentes de primeira harmônica. Os termos para  $k = \pm N$  são denominados componentes de  $N$  –ésima harmônica.

Para um sinal periódico poder ser representado em função da soma de senos e cossenos, supõe-se que o mesmo seja real e possa ser representado segundo a equação (2.3). Portanto, assumindo que  $x(t) = x^*(t)$  obtem-se a equação abaixo (OPPENHEIM, 2010):

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_k^* e^{-jk\omega_0 t} \quad (2.4)$$

Realizando a substituição de  $k$  por  $-k$ :

$$x(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_{-k}^* e^{jk\omega_0 t} \quad (2.5)$$

Comparando-se as equações (2.3) e (2.5), se faz necessário que  $a_k = a_{-k}^*$  para que a igualdade seja verificada. Portanto, a equação (2.3) pode ser reescrita como mostrado na equação (2.6).

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} [a_k e^{jk\omega t} + a_{-k} e^{-jk\omega t}] \quad (2.6)$$

Substituindo  $a_k$  por  $a_{-k}^*$  na equação (2.6), obtem-se:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} [a_k e^{kj\omega t} + a_k^* e^{-jk\omega t}] \quad (2.7)$$

Como os termos do somatório são conjugados complexos, a equação pode ser escrita como em (2.8).

$$x(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} 2\Re[a_k e^{jk\omega_0 t}] \quad (2.8)$$

Representando o termo na forma retangular tem-se que  $a_k = B_k + jC_k$  e, portanto, a equação (2.8) pode ser reescrita em função de senos e cossenos como mostrado na equação (2.9).

$$x(t) = a_0 + 2 \sum_{k=1}^{+\infty} [B_k \cos k\omega_0 t - C_k \sin k\omega_0 t] \quad (2.9)$$

Os coeficientes da série de Fourier são obtidos da seguinte forma:

$$B_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \cos(2\pi k f_0 t) dt \quad (2.10)$$

$$C_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \sin(2\pi k f_0 t) dt \quad (2.11)$$

A equação (2.8) pode também ser representada de outra forma fazendo  $a_k = A_k e^{j\theta_k}$ . A equação pode ser então reescrita como mostrado na equação (2.12).

$$x(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \cos(k\omega_0 t + \theta_k) \quad (2.12)$$

Onde,

$$A_k = \sqrt{B_k^2 + C_k^2} \quad (2.13)$$

$$\theta_k = \arctan\left(\frac{-C_k}{B_k}\right) \quad (2.14)$$

### 2.3.2 Transformada de Fourier

A série de Fourier é a representação dos sinais periódicos como combinações lineares de exponenciais complexas. Porém, para sinais aperiódicos não se pode realizar essa representação por esse método. A transformada de Fourier pode ser vista como uma adaptação da série de Fourier para sinais aperiódicos. A análise consiste em assumir que um sinal aperiódico pode ser analisado como um sinal periódico de período infinito. Mais especificamente, na representação da série de Fourier de um sinal periódico, enquanto o período aumenta, a frequência fundamental diminui e os componentes harmonicamente relacionados se tornam próximos em frequência. Quando o período tende a infinito, os

componentes de frequência se aproximam de tal modo que se forma um conjunto contínuo e o somatório da série de Fourier agora tende a ser uma integral (OPPENHEIM, 2010).

A transformada de Fourier é calculada de acordo com a equação (2.15).

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.15)$$

Já a transformada inversa de Fourier é calculada de acordo com a equação (2.16).

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(j\omega)e^{j\omega t} dt \quad (2.16)$$

É possível aplicar a transformada de Fourier também a sinais periódicos. Pode-se construir de forma direta a transformada de Fourier de um sinal periódico a partir de sua representação em série de Fourier. O resultado desse processo é um trem de impulsos no domínio da frequência. Uma característica do sinal resultante é que as áreas dos impulsos são proporcionais aos coeficientes da série de Fourier.

Tomando como exemplo o seguinte sinal:

$$X(\omega) = 2\pi\delta(\omega - \omega_0) \quad (2.17)$$

Encontra-se o sinal  $x(t)$  aplicando a transformada inversa. O sinal no domínio do tempo é:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} 2\pi\delta(\omega - \omega_0)e^{-j\omega t} dt = e^{j\omega_0 t}$$

Sempre que  $X(j\omega)$  possuir a forma linear de impulsos igualmente espaçados em frequência:

$$X(j\omega) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} 2\pi a_k \delta(\omega - k\omega_0) \quad (2.18)$$

o resultado da transformada inversa de Fourier resultará em:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} \quad (2.19)$$

## 2.4 Filtros Anti-Aliasing

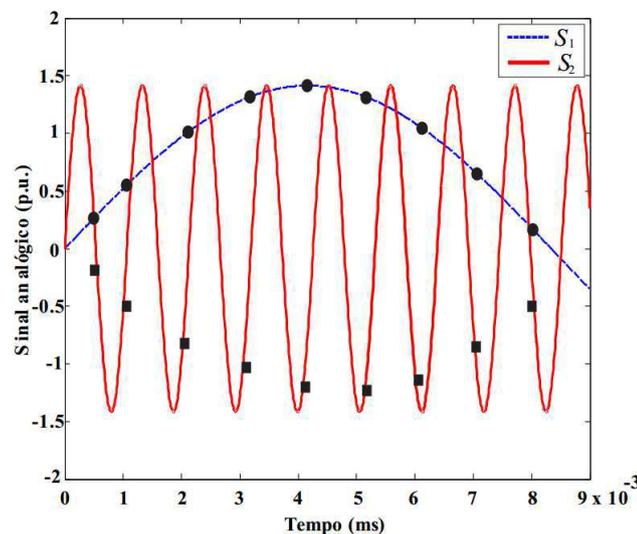
Para que uma determinada componente de frequência  $f$  do sinal analógico possa ser completamente reconstituída durante um processo de amostragem realizado por conversores A/D, a frequência de amostragem deve ser, no mínimo, igual a  $2f$ , frequência esta

denominada de frequência de Nyquist. Como os transitórios eletromagnéticos oriundos de distúrbios no SEP possuem componentes de alta frequência superpostas a frequência fundamental, e como a taxa de amostragem dos relés de proteção são fixas, faz-se necessário realizar uma filtragem analógica antes dos relés realizarem o processamento dos sinais obtidos dos TI para evitar a ocorrência da sobreposição de espectro (ou *aliasing*) (MACHADO, 2013). Para isso, são utilizados filtros passa-baixas, denominados de filtros anti-aliasing, cuja frequência de corte deve ser, no máximo, igual a metade da taxa de amostragem (PHADKE; THORP, 2009).

Segundo (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2009), caso a frequência de amostragem  $f_s$  utilizada pelos conversores A/D para reconstituir, com fidelidade, o sinal analógico de frequência fundamental  $f_1$  não obedeça ao critério de Nyquist, componentes de frequência  $f_1$ ,  $f_s - f_1$ ,  $f_s + f_1$ ,  $2f_s - f_1$ , etc., podem aparecer no sinal digitalizado, além de promover uma defasagem de  $\pi$  radianos, caracterizando, assim, o fenômeno *aliasing*.

Para ilustrar o processo de sobreposição de espectros, é apresentado na Figura 3 a digitalização de um sinal de frequência fundamental  $f_1$  de 60 Hz,  $S_1$ , e de um sinal de frequência fundamental  $f_2$  de 940 Hz,  $S_2$ , utilizando uma frequência de amostragem  $f_s$  de 1 kHz. Percebe-se, da Figura 3, que o sinal digitalizado proveniente de  $S_1$ , representado por círculos no gráfico, contém a informação de  $S_1$ , permitindo, assim, que o sinal analógico possa ser completamente reconstituído. Por outro lado, o sinal amostrado proveniente de  $S_2$ , representado por quadrados no gráfico, não representa fielmente a informação contida no sinal  $S_2$ , visto que tal sinal foi digitalizado na frequência  $f_s$ , não obedecendo o Teorema de Nyquist. Neste caso, há surgimento de uma nova componente de frequência de 60 Hz ( $f_s - f_2$ ) no sinal amostrado, além de uma defasagem de 180 graus como consequência do fenômeno *aliasing*.

Figura 3 – Exemplo de amostragem de dois sinais senoidais com frequência de amostragem de 1 kHz.



Existem diversos tipos de filtros analógicos, como Butterworth, Chebyshev, Bessel. Em algoritmos de proteção, os filtros Butterworth de segunda ordem são normalmente os mais utilizados (PHADKE; THORP, 2009) devido ao fato de não apresentarem oscilações ao longo da faixa de passagem (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007).

## 2.5 Algoritmos de Estimação Fasorial

Pode-se definir os algoritmos de estimação fasorial como rotinas que são implementadas em relés numéricos que se baseiam na análise das grandezas elétricas (tensão e corrente) fundamentais dos sistemas elétricos de potência (BAINY et al., 2012).

O processo de estimação fasorial resulta na obtenção de um fasor composto por módulo e ângulo. A teoria dos fasores é comumente aplicada na resolução de circuitos de corrente alternada e. Essa teoria tem sido bastante empregada atualmente no monitoramento em tempo real do comportamento dinâmico dos SEPs. Os sinais elétricos analisados podem ser afetados por componentes de frequências distintas da fundamental e, portanto, se faz necessário filtrar tais componentes afim de se analisar sinal com apenas uma componente (LOPES et al., 2015).

Anteriormente já foi apresentada a série de Fourier na equação (2.12):

$$x(t) = \sum_{k=1}^{+\infty} A_k \cos(k\omega_0 t + \theta_k)$$

onde:

$$A_k = \sqrt{B_k^2 + C_k^2}$$

$$\theta_k = \arctan\left(\frac{-C_k}{B_k}\right)$$

Das equações apresentadas acima, pode-se então representar os fasores para a  $n$  - ésima harmônica da seguinte forma:

$$X_k = \frac{A_k}{\sqrt{2}} \angle \theta_k = \frac{1}{\sqrt{2}} (B_k - jC_k) \quad (2.20)$$

Nos algoritmos de estimação fasorial a componente  $B_k$  é tratada como parte real ( $X_{re}$ ) e a componente  $C_k$  como a parte imaginária ( $X_{im}$ ) do sinal em análise. Embora existam distinções de um algoritmo para outro, o objetivo de todos é encontrar o módulo e fase do das grandezas em estudo para representá-las no domínio digital (LOPES et al., 2012).

A seguir serão apresentados alguns dos algoritmos de estimação fasorial encontrados na literatura. São eles:

- Fourier de Ciclo Completo;
- Fourier de Meio Ciclo;
- Cosseno Modificado;
- Algoritmo de Guo;
- Fourier de Ciclo Completo e Fourier de Meio ciclo + Filtro Mímico.

### 2.5.1 Fourier de Ciclo Completo (FCDFST)

O algoritmo Fourier de Ciclo Completo será referenciado nesse trabalho pela sigla FCDFST (Full Cycle Discrete Fourier Transform).

Em (PHADKE; THORP, 2009) é mostrado que o desenvolvimento da série de Fourier para um período equivalente a um ciclo fundamental de um sinal digitalizado  $x(m)$  periódicos e considerando que cada ciclo contenha  $N$  amostras. Como resultado, obtém-se as componentes reais e imaginárias do sinal periódico:

$$X_{re}(k) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \cos\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (2.21)$$

$$X_{im}(k) = -\frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \sin\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (2.22)$$

O termo  $x(k - N + m)$  nas equações (2.21) e (2.22) é a  $m$  - ésima amostra da  $k$  - ésima de dados do sinal  $x$  janelado.

### 2.5.2 Fourier de Meio Ciclo (HCDFT)

O algoritmo Fourier de Meio Completo será referenciado nesse trabalho pela sigla HCDFT (Half Cycle Discrete Fourier Transform).

De maneira semelhante ao algoritmo FCDFST, para o algoritmo HCDFT obtém-se as expressões para a parte real e imaginária do sinal a partir do desenvolvimento da série de Fourier, porém, neste caso apenas é considerado um período de análise igual à metade do ciclo do sinal  $x$ , com um número de amostras  $N$  (PHADKE; THORP, 2009). As componentes real e imaginária são calculadas como mostrado nas equações (2.23) e (2.24).

$$X_{re}(k) = \frac{4}{N} \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(k - N + m) \cos\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (2.23)$$

$$X_{im}(k) = -\frac{4}{N} \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(k - N + m) \sin\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (2.24)$$

sendo o termo  $x(k - N + m)$  a  $m$ -ésima amostra da  $k$ -ésima de dados do sinal  $x$  janelado.

### 2.5.3 Cosseno Modificado (COSMOD)

Em (SILVA, 2010) é introduzido o filtro cosseno clássico, porém, ele apresenta algumas limitações. Tais limitações puderam ser superadas com a implementação do algoritmo cosseno modificado (HART; NOVOSEL; SMITH, 2000). Esse método, assim como o método HCDFT, apresenta semelhanças com o método FCDFT. A expressão deste algoritmo para calcular a parte real  $X_{re}$  é idêntica à expressão para calcular a parte real  $X_{re}$  do algoritmo FCDFT. A diferença entre os dois algoritmos está no cálculo da parte imaginária  $X_{im}$  do sinal. No algoritmo do cosseno modificado, faz-se uso de uma amostra adicional além do ciclo fundamental. A adição dessa amostra faz com que a eliminação da componente CC do decaimento exponencial ocorra de maneira melhor, além de não haverem grandes atrasos no algoritmo. Nas equações (2.25) e (2.26) são apresentadas as expressões para o cálculo das partes real e imaginária do sinal.

$$X_{re}(k) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \cos\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (2.25)$$

$$X_{im}(k) = \frac{X_{re}(k-1) - X_{re}(k) \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \quad (2.26)$$

sendo o termo  $x(k - N + m)$  a  $m$ -ésima amostra da  $k$ -ésima de dados do sinal  $x$  janelado.

Neste trabalho, este algoritmo será referenciado como COSMOD.

### 2.5.4 Algoritmo de Guo (GUO)

Em (GUO; KEZUNOVIC; CHEN, 2003) é apresentado um novo algoritmo de estimação fasorial. Assim como o método COSMOD, o método de GUO é uma adaptação do método FCDFT, o cálculo da parte real  $X_{re}$  é igual ao dos outros dois métodos. No entanto, o cálculo da parte imaginária  $X_{im}$  é feito de um modo diferente. As equações (2.27) e (2.28) apresentam as expressões para o cálculo das partes real e imaginária do sinal.

$$X_{re}(k) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k - N + m) \cos\left(\frac{2\pi}{N}m\right) \quad (2.27)$$

$$X_{im}(k) = -\frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(k-N+m) \sin\left(\frac{2\pi}{N}m\right) + \Gamma \quad (2.28)$$

onde:

$$\Gamma = \frac{2}{N} \cot\left(\frac{2\pi}{N}\right) (PS_2 - PS_1)$$

e:

$$PS_1 = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2k),$$

$$PS_2 = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2k+1)$$

Neste trabalho, este algoritmo será referenciado como GUO.

### 2.5.5 FCDFT e HCDFT + Filtro Mímico

O filtro mímico (BENMOUYAL, 1995), basicamente consiste de um filtro digital Passa Altas com o atraso calculado baseado na razão entre indutância e resistência do sistema ( $L/R$ ). Na prática, em caso de circulação de um sinal de corrente CC de decaimento exponencial por uma impedância RL com relação  $L/R$  igual à constante de tempo de decaimento desse sinal, a componente CC de decaimento exponencial é eliminada da forma de onda da tensão sobre a impedância do circuito RL (PHADKE; THORP, 2009).

Devido à isso, a associação dos algoritmos FCDFT e HCDFT com o filtro mímico é bastante comum na proteção das LTs.

Uma das características do filtro mímico é que o mesmo pode ser aplicado no domínio do tempo diretamente nos sinais analisados, sendo assim, a filtragem se dá segundo a equação (2.29).

$$x(k)^* = K[(1 + \tau_d)x(k) - \tau_d x(k-1)] \quad (2.29)$$

onde  $x(k)^*$  é a amostra do sinal filtrado no instante  $k$  e  $x(k)$  e  $x(k-1)$  são as amostras do sinal nos instantes  $k$  e  $k-1$ , respectivamente. A constante  $\tau_d$  é a constante de tempo de projeto do filtro mímico e  $K$  é o ganho do filtro -calculado para ter ganho 1 na frequência fundamental. O cálculo da ganho  $K$  é feito como segue:

$$K = \sqrt{\frac{1}{[(1 + \tau_d) - \tau_d \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right)]^2 + [\tau_d \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)]^2}} \quad (2.30)$$

O valor da constante de tempo  $\tau_d$  é selecionado baseado na razão  $L/R$  de sequência positiva da LT. Utilizando essa associação, torna-se possível a eliminação quase que total da componente CC de decaimento exponencial dos sinais analisados. No entanto, nem

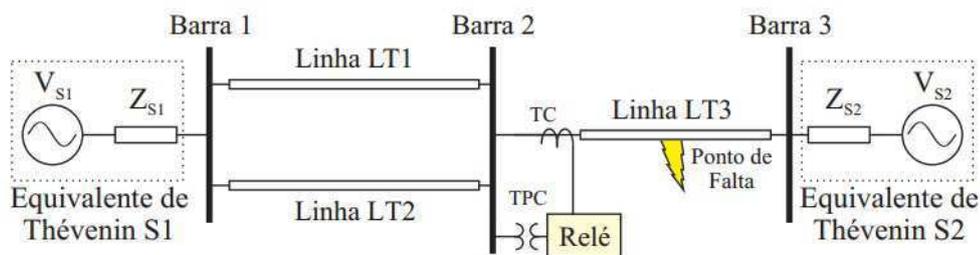
sempre os parâmetros do sistema são conhecidos, e, nesses casos a constante de tempo  $\tau_d$  é obtida empiricamente, o que pode ocasionar em um desempenho pior do filtro.

Neste trabalho, as associações dos algoritmos FCDFT e HCDFT com o filtro mímico serão referenciados respectivamente como FCDFT+MIMICO e HCDFT+MIMICO.

### 3 ANÁLISES E RESULTADOS

Os seguintes resultados foram obtidos através de simulações. No total, foram analisados 4 casos de faltas, com diferentes parâmetros para cada caso. Para todos os casos, considerou-se um sistema elétrico de 230 kV e comprimento de 200 km. O SEP modelado pode ser observado na Figura 4. A Barra 2 foi tomada como o ponto de medição, onde se encontra um relé digital. Os algoritmos de estimação fasorial foram implementados usando uma taxa de 16 amostras/ciclo. Além disso, foram implementados filtros anti-aliasing de 3ª ordem do tipo Butterworth com frequência de corte em 180 Hz.

Figura 4 – SEP de 230 kV modelado no ATP.



Fonte: (LOPES et al., 2015).

Os parâmetros alterados de uma situação de falta para outra foram:

- Tipo da falta;
- Ângulo de incidência da falta;
- Resistência da falta;
- Distância da falta.

As simulações foram feitas com a utilização dos *softwares* MatLab e ATP.

Para a simulação do sistema, foi utilizada uma rotina no ATP de modo que fosse possível realizar as alterações dos parâmetros para os diferentes casos e ao final da simulação fossem obtidos os referentes valores de tensão e de corrente, antes e após a ocorrência da falta.

Para o cálculo dos fasores de cada método, foram escritas funções no MatLab, além de uma rotina para realizar as simulações e implementações dos filtros e outros dados

utilizados. A partir dos dados obtidos da simulação do sistema no ATP, foram calculados os fasores de tensão e corrente para cada um dos 6 métodos nos 4 casos analisados.

As análises aqui realizadas foram referentes ao tempo que cada método levou para retomar o cálculo dos fasores após a falta.

### 3.1 Caso 1

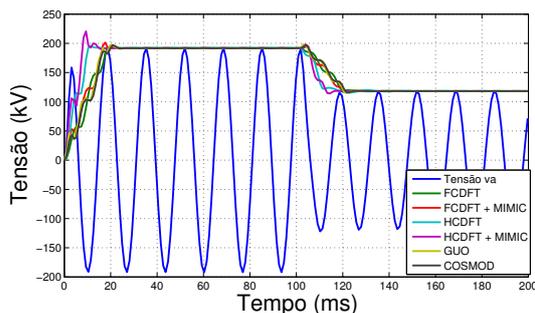
Os parâmetros utilizados no primeiro caso analisado foram:

- Falta fase-terra (Fase A para a terra);
- Ângulo de incidência de  $30^\circ$ ;
- Resistência da falta de  $1.0 \Omega$ ;
- Distância de 40 km.

Os resultados das simulações são mostrados nas Figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10. Em cada imagem são ilustradas as tensões, as correntes e os fasores calculados de cada uma das fases e é dado um zoom no momento de ocorrência da falta para mostrar o comportamento do sinal e dos fasores.

Figura 5 – Tensão  $V_a$  e os fasores dos seis métodos para o caso 1.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

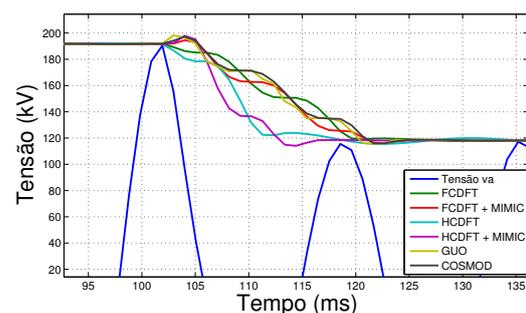
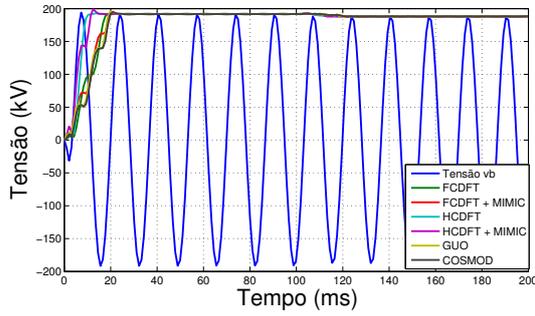


Figura 6 – Tensão  $V_b$  e os fasores dos seis métodos para o caso 1.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

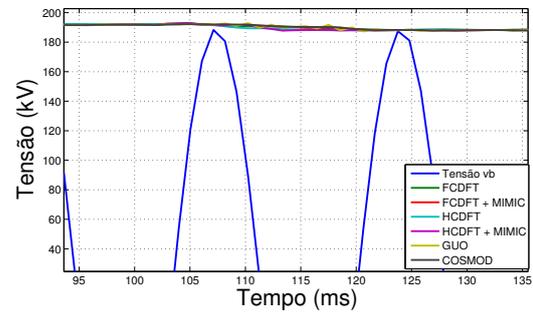
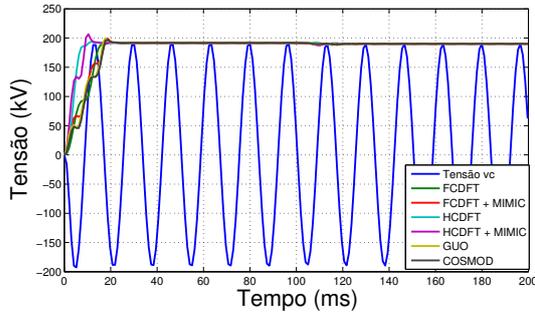


Figura 7 – Tensão  $V_c$  e os fasores dos seis métodos para o caso 1.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

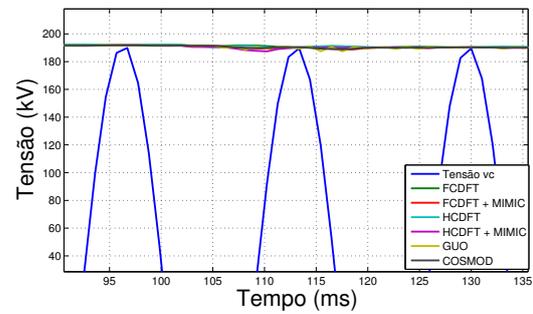
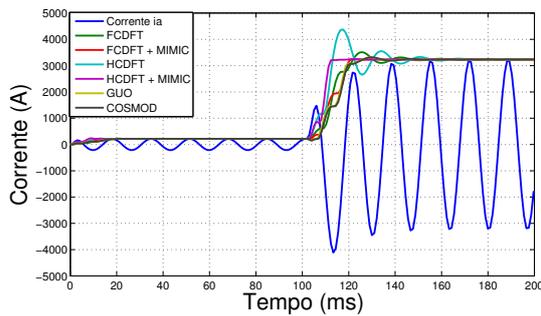


Figura 8 – Corrente  $I_a$  e os fasores dos seis métodos para o caso 1.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

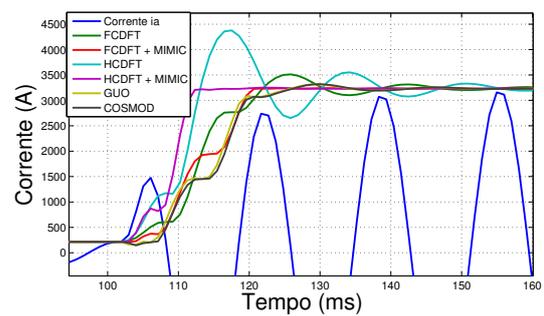
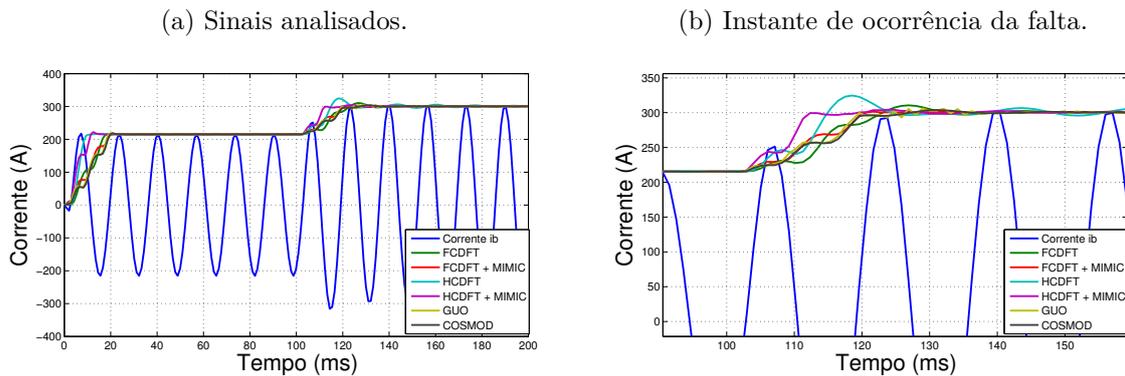
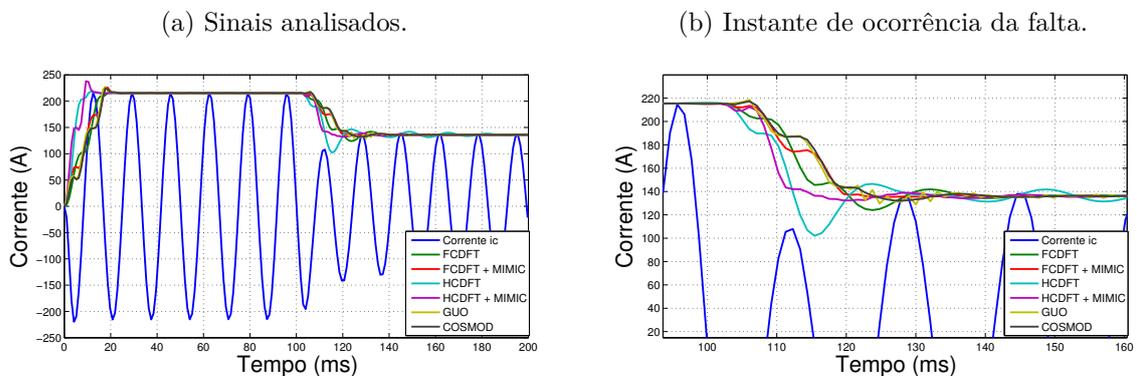


Figura 9 – Corrente  $I_b$  e os fasores dos seis métodos para o caso 1.Figura 10 – Corrente  $I_c$  e os fasores dos seis métodos para o caso 1.

Analisando a Figura 5 observa-se que os métodos FCDFDT+MIMIC e COSMOD apresentaram os melhores desempenhos, uma vez que esses métodos foram os que na condição pós-falta, mais rapidamente passaram a calcular corretamente o fasor da tensão da fase  $a$ . Por outro lado, o método HCDFT foi o que apresentou pior desempenho, pois houve um alto grau de oscilação antes de começar a realizar o cálculo correto do fasor.

Para o sinal de corrente nas três fases (Figuras 8, 9 e 10), o método que obteve melhor desempenho foi o FCDFDT+MIMIC, enquanto que os outros demoraram um pouco mais para calcular o fasor.

### 3.2 Caso 2

Os parâmetros utilizados no terceiro caso analisado foram:

- Falta bifásica-terra BCT (Fases B e C para a terra);
- Ângulo de incidência de  $150^\circ$ ;
- Resistência da falta de  $1.0 \Omega$ ;

- Distância de 150 km.

Os resultados das simulações são mostrados nas Figuras 11, 12, 13, 14, 15 e 16. Em cada imagem são ilustradas as tensões, as correntes e os fasores calculados de cada uma das fases e é dado um zoom no momento de ocorrência da falta para mostrar o comportamento do sinal e dos fasores.

Figura 11 – Tensão  $V_a$  e os fasores dos seis métodos para o caso 2.

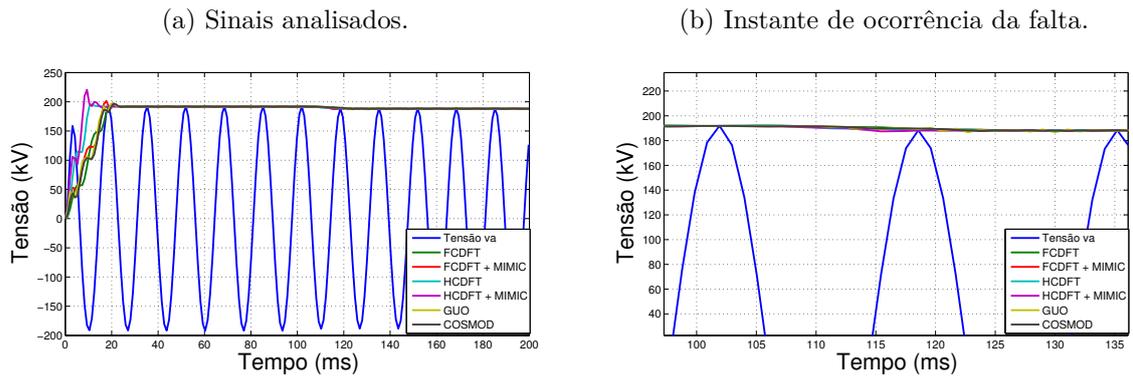


Figura 12 – Tensão  $V_b$  e os fasores dos seis métodos para o caso 2.

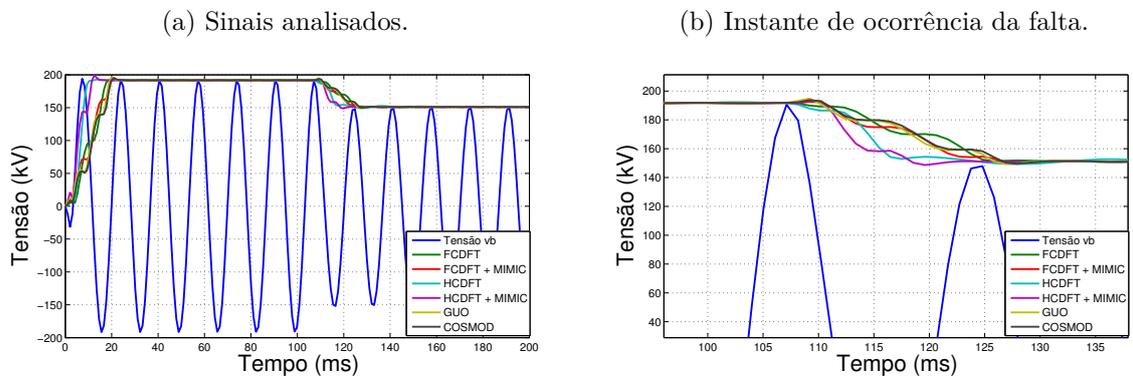


Figura 13 – Tensão  $V_c$  e os fasores dos seis métodos para o caso 2.

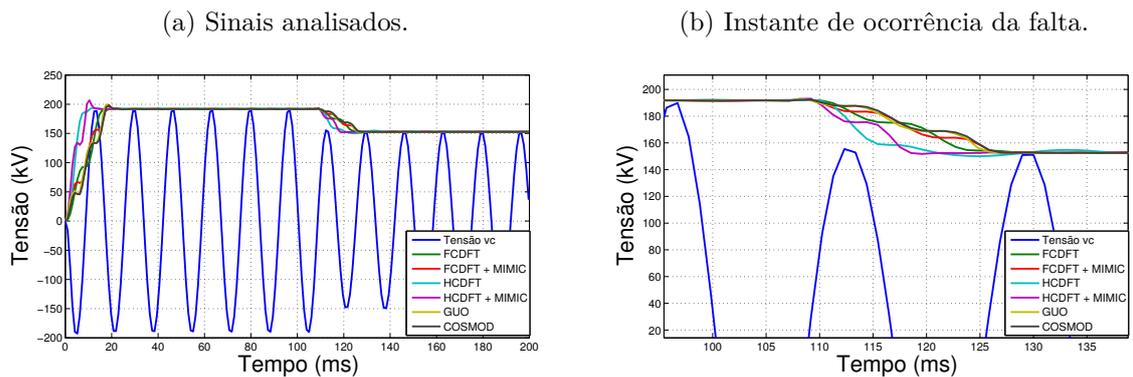


Figura 14 – Corrente  $I_a$  e os fasores dos seis métodos para o caso 2.

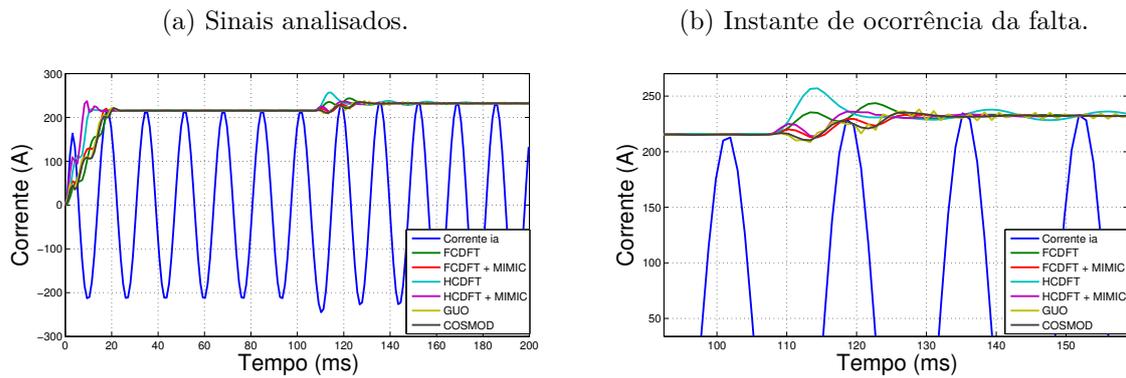


Figura 15 – Corrente  $I_b$  e os fasores dos seis métodos para o caso 2.

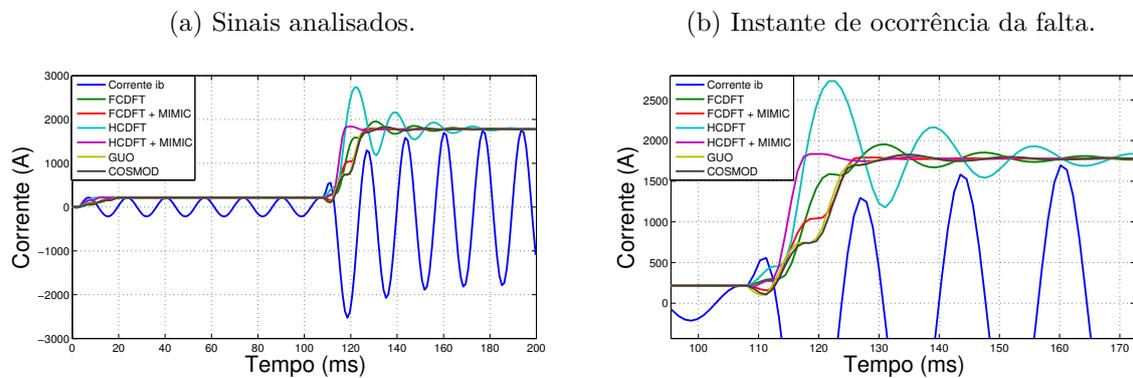
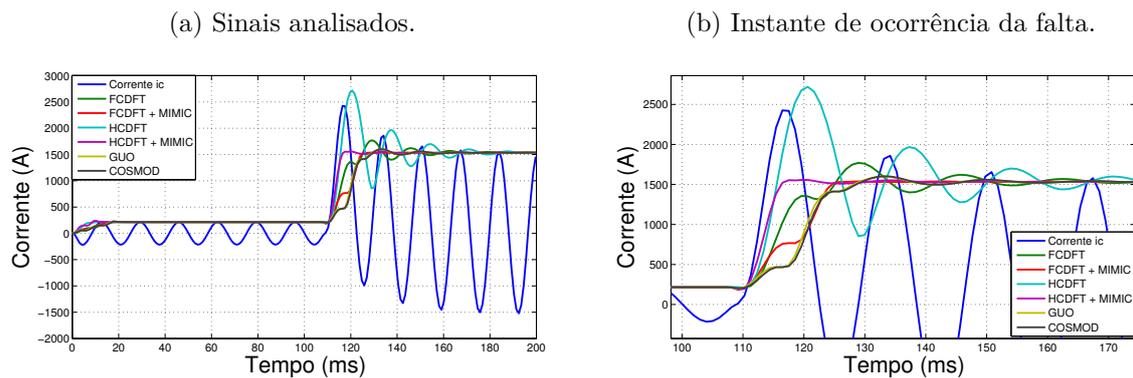


Figura 16 – Corrente  $I_c$  e os fasores dos seis métodos para o caso 2.



Analisando a os sinais de tensões nas fases  $b$  e  $c$  observa-se que os métodos FCDFT+MIMIC e COSMOD mais uma vez apresentaram os melhores desempenhos, enquanto que o método HCDFT apresentou novamente um alto grau de oscilação antes de começar a realizar o cálculo correto do fasor.

Para o sinal de corrente nas três fases, o método que obteve melhor desempenho foi o FCDFT+MIMIC.

### 3.3 Caso 3

Os parâmetros utilizados no terceiro caso analisado foram:

- Falta trifásica ABC;
- Ângulo de incidência de  $0^\circ$ ;
- Resistência da falta de  $5.0 \Omega$ ;
- Distância de 30 km.

Os resultados das simulações são mostrados nas Figuras 17, 18, 19, 20, 21 e 22. Em cada imagem são ilustradas as tensões, as correntes e os fasores calculados de cada uma das fases e é dado um zoom no momento de ocorrência da falta para mostrar o comportamento do sinal e dos fasores.

Figura 17 – Tensão  $V_a$  e os fasores dos seis métodos para o caso 3.

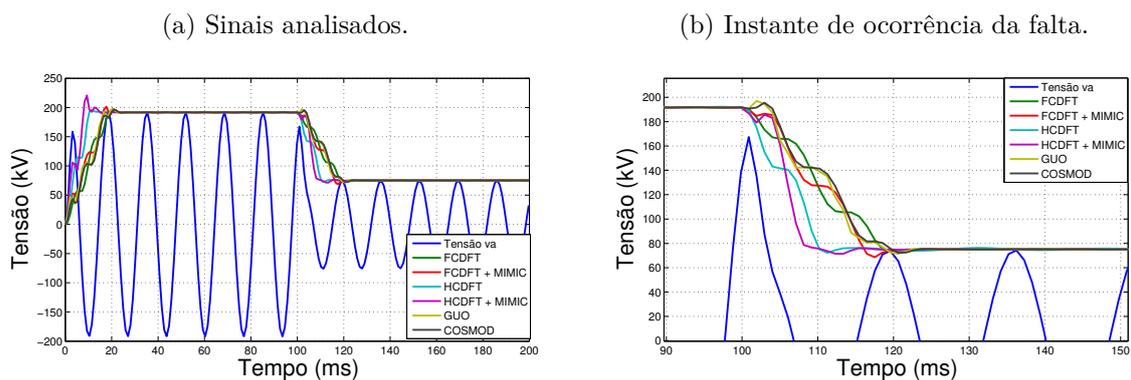


Figura 18 – Tensão  $V_b$  e os fasores dos seis métodos para o caso 3.

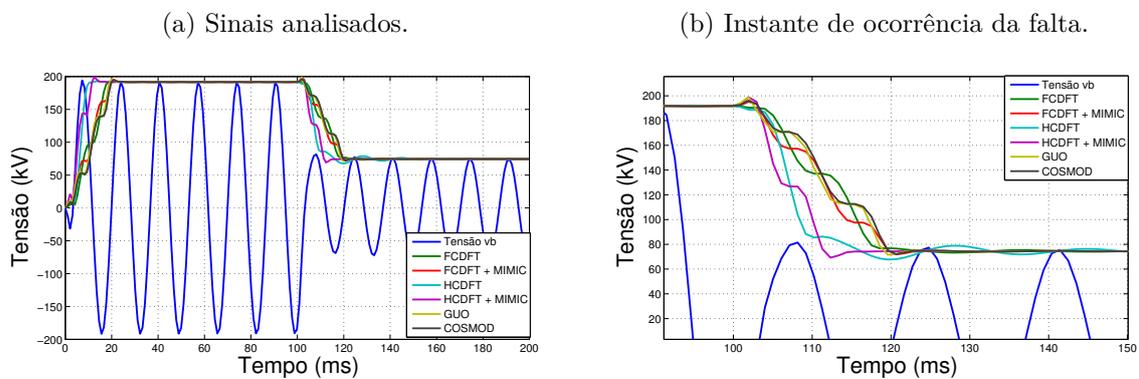
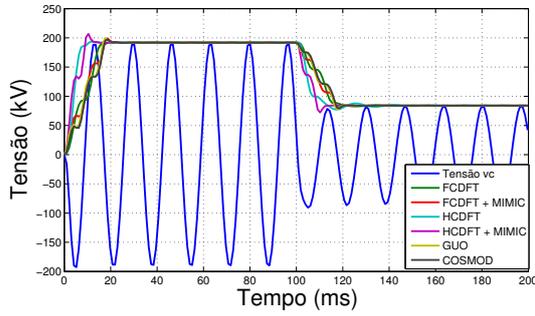


Figura 19 – Tensão  $V_c$  e os fasores dos seis métodos para o caso 3.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

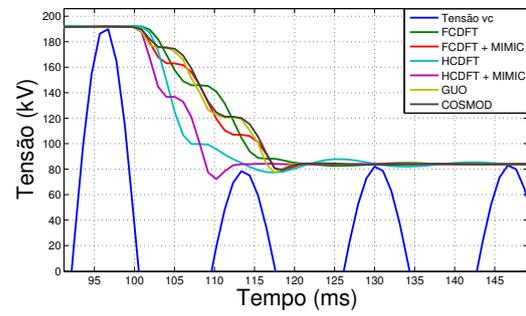
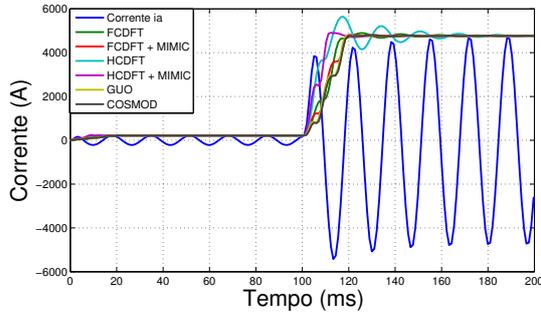


Figura 20 – Corrente  $I_a$  e os fasores dos seis métodos para o caso 3.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

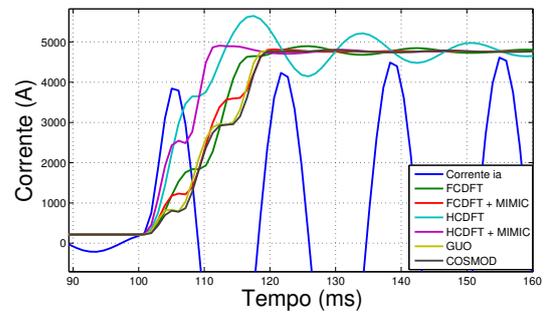
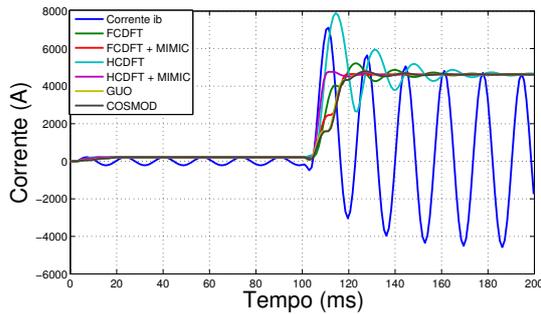


Figura 21 – Corrente  $I_b$  e os fasores dos seis métodos para o caso 3.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

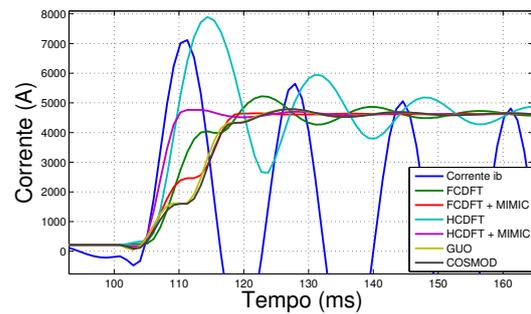
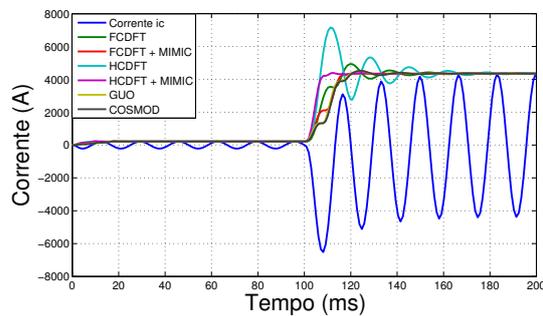
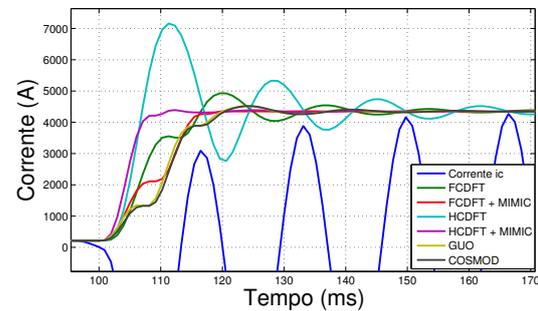


Figura 22 – Corrente  $I_c$  e os fasores dos seis métodos para o caso 3.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.



Analisando a os sinais de tensões nas três fases observa-se que os métodos FCDFT+MIMIC, GUO e COSMOD apresentaram os melhores desempenhos, já os outros três métodos obtiveram resultados inferiores.

Para o sinal de corrente nas três fases, o método que obteve melhor desempenho foi o FCDFT+MIMIC. Por outro lado, mais uma vez o método HCDFT apresentou os piores resultados.

### 3.4 Caso 4

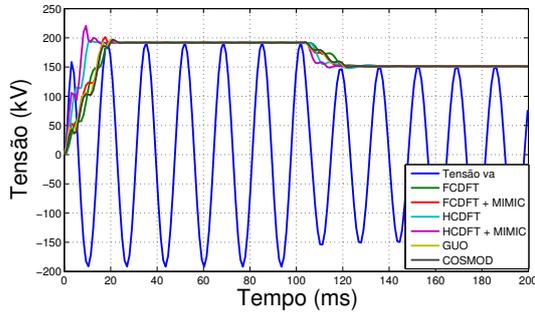
Os parâmetros utilizados no quarto caso analisado foram:

- Falta bifásica AB;
- Ângulo de incidência de  $39^\circ$ ;
- Resistência da falta de  $5.0 \Omega$ ;
- Distância de 100 km.

Os resultados das simulações são mostrados nas Figuras 23, 24, 25, 26, 27 e 28. Em cada imagem são ilustradas as tensões, as correntes e os fasores calculados de cada uma das fases e é dado um zoom no momento de ocorrência da falta para mostrar o comportamento do sinal e dos fasores.

Figura 23 – Tensão  $V_a$  e os fasores dos seis métodos para o caso 4.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

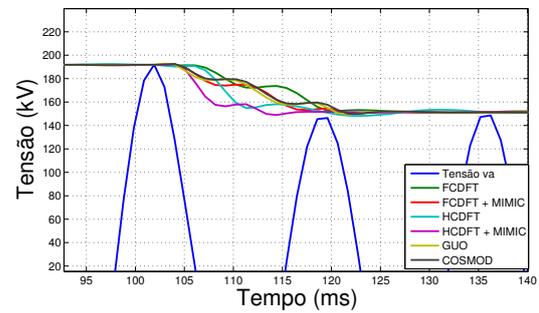
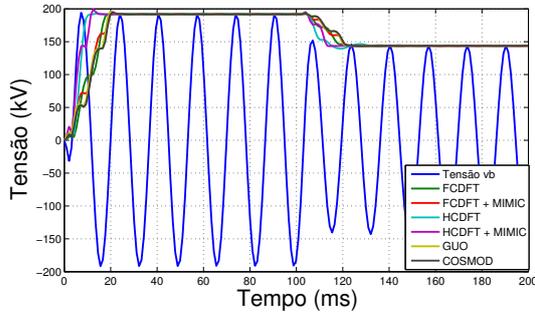


Figura 24 – Tensão  $V_b$  e os fasores dos seis métodos para o caso 4.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

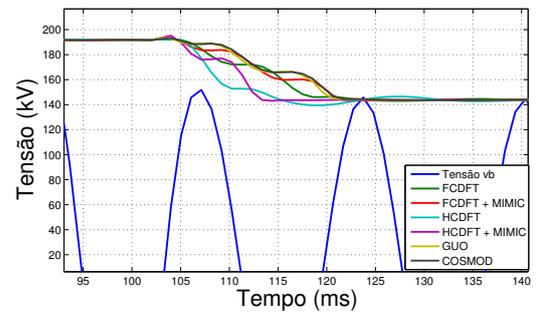
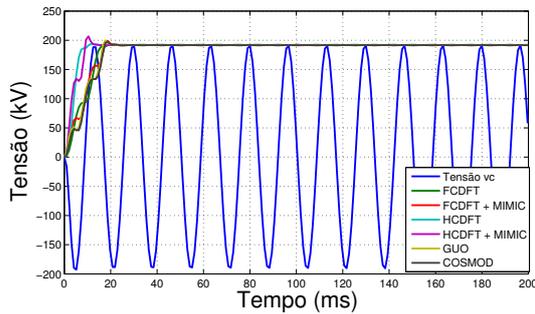


Figura 25 – Tensão  $V_c$  e os fasores dos seis métodos para o caso 4.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

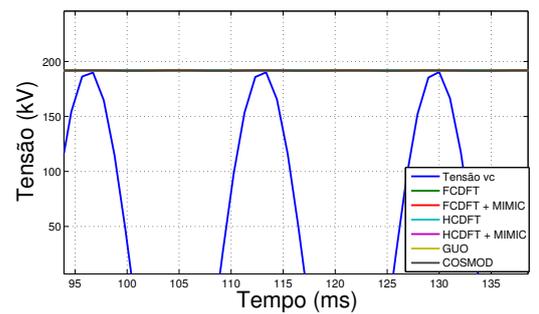
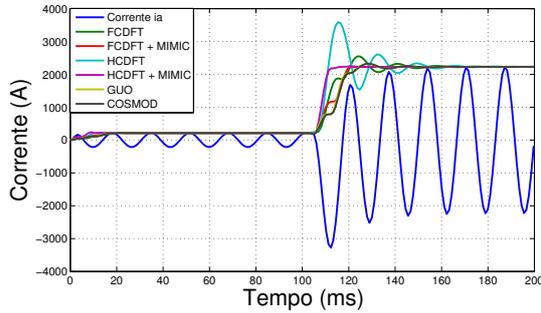


Figura 26 – Corrente  $I_a$  e os fasores dos seis métodos para o caso 4.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

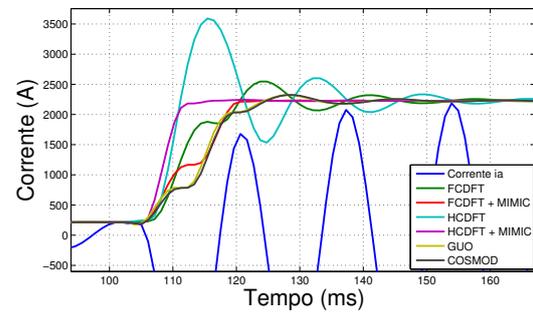
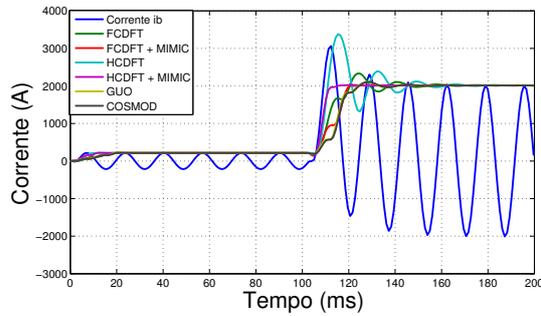


Figura 27 – Corrente  $I_b$  e os fasores dos seis métodos para o caso 4.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.

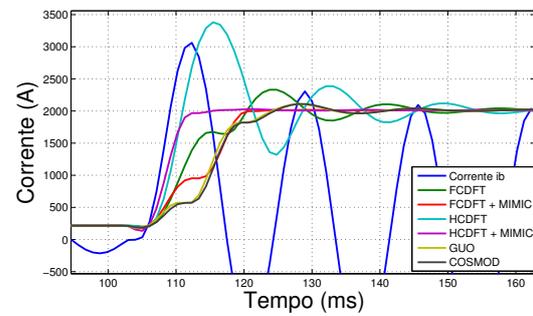
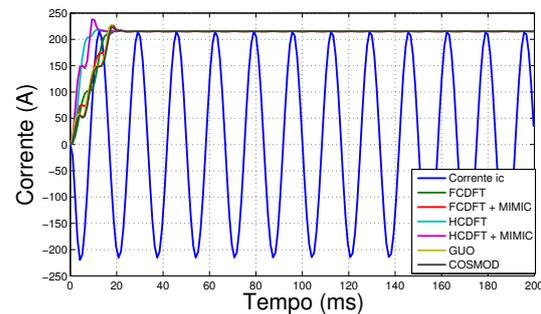
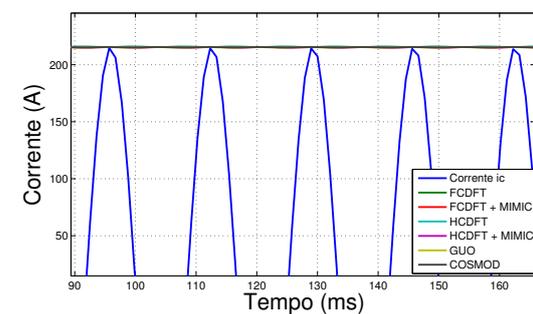


Figura 28 – Corrente  $I_c$  e os fasores dos seis métodos para o caso 4.

(a) Sinais analisados.



(b) Instante de ocorrência da falta.



Analisando a os sinais de tensões nas três fases observa-se que os métodos FCDFT+MIMIC, GUO e COSMOD apresentaram os melhores desempenhos, enquanto que os outros três métodos obtiveram resultados inferiores.

Para o sinal de corrente nas três fases, o método que obteve melhor desempenho foi novamente o FCDFT+MIMIC.

# 4 CONCLUSÃO

## 4.1 Considerações Finais

Neste trabalho, foi feita uma análise qualitativa de diferentes algoritmos de estimação fasorial aplicados à Proteção de Sistemas Elétricos. No total, seis métodos de estimação de fasores foram implementados e avaliados em situações faltosas do sistema: Fourier de ciclo completo (FCDFT), Fourier de meio ciclo (HCDFT), Fourier de ciclo completo associado a um filtro mímico (FCDFT+MIMIC), Fourier de meio ciclo associado a um filtro mímico (HCDFT+MIMIC), cosseno modificado (COSMOD) e algoritmo de Guo (GUO).

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica e em seguida uma detalhada fundamentação teórica à cerca dos assuntos estudados neste trabalho. Uma descrição matemática foi apresentada, tanto para cada um dos algoritmos avaliados quanto para os filtros à eles associados. Posteriormente, foi realizada a simulação do sistema no ATP para 4 casos distintos de faltas na LT.

Após a avaliação dos métodos, foi possível observar que aqueles baseados em dados de um ciclo completo apresentaram melhores desempenhos em relação aos de meio ciclo. Para os algoritmos HCDFT e HCDFT+MIMIC, especialmente para o primeiro, verificou-se uma elevada oscilação no momento do transitório após a ocorrência da falta.

No geral, ao final do presente trabalho, conclui-se que os métodos que apresentaram melhores desempenhos foram os algoritmos de FCDFT+MIMIC e COSMOD, com um destaque maior para o primeiro. Os outros métodos apresentaram resultados inferiores.

## 4.2 Trabalhos Futuros

Como continuação do estudo realizado neste Trabalho de Conclusão de Curso, são sugeridas as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Avaliação da influência do tempo de decaimento da componente CC sobre o desempenho do filtro mímico;
- Traçar a Trajetória da Impedância Aparente no Plano R-X.

# REFERÊNCIAS

- ANDERSON, P. M. *Power system protection*. [S.l.]: Wiley, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- AREVA, T. Network protection automation guide. 1995. Citado na página 19.
- BAINY, R.; CARDOSO, L.; SILVA, C.; LOPES, F.; PESENTE, J.; OTTO, R. Influência de modelos de transformadores de potencial capacitivo sobre a estimação de fasores de tensão. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2012. Citado na página 25.
- BENMOUYAL, G. Removal of dc-offset in current waveforms using digital mimic filtering. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 10, n. 2, p. 621–630, 1995. Citado na página 28.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. *Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes*. [S.l.]: SEL/EESC/USP, 2007. Citado na página 25.
- ELMORE, W. A. *Protective relaying: theory and applications*. [S.l.]: CRC press, 2003. v. 1. Citado na página 20.
- FORMIGA, D. A. *Estimação de Fasores para Proteção de Sistemas Elétricos Baseada em Mínimos Quadrados e Morfologia Matemática*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012. Citado na página 13.
- GIGUER, S. *Proteção de sistemas de distribuição*. [S.l.]: Sagra, 1988. Citado na página 15.
- GOH, Y. L.; RAMASAMY, A. K.; NAGI, F. H.; ABIDIN, A. A. Z. Evaluation of dsp based numerical relay for overcurrent protection. *International Journal of Systems Applications, Engineering and Development*, v. 5, p. 396–403, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- GUO, Y.; KEZUNOVIC, M.; CHEN, D. Simplified algorithms for removal of the effect of exponentially decaying dc-offset on the fourier algorithm. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 711–717, 2003. Citado na página 27.
- HART, D. G.; NOVOSEL, D.; SMITH, R. A. *Modified cosine filters*. [S.l.]: Google Patents, 2000. US Patent 6,154,687. Citado na página 27.
- KHEDERZADEH, M. Back-up protection of distance relay second zone by directional overcurrent relays with combined curves. In: IEEE. *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*. [S.l.], 2006. p. 6–pp. Citado na página 19.
- LOPES, F.; BARROS, D.; REIS, R.; NASCIMENTO, J.; BRITO, N.; NEVES, W.; SOARES, S. Influência de modelos de transformadores de potencial capacitivo sobre a estimação de fasores de tensão. *SBSE*, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 25.

- LOPES, F.; BARROS, D.; REIS, R.; NASCIMENTO, J.; BRITO, N.; NEVES, W.; SOARES, S. Influência de métodos de estimação fasorial no processo de análise de faltas no sistema chesf. *CBQEE*, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 30.
- MACHADO, E. P. *Compensação Dinâmica dos Transitórios de Baixa Frequência de Transformadores de Potencial Capacitivos para Otimização da Proteção de Linhas de Transmissão*. Tese — Universidade Federal de Campina Grande, Dezembro 2013. Citado na página 24.
- OPPENHEIM, A. V. *Sinais e sistemas*. [S.l.]: Prentice-Hall, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 23.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer relaying for power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. Citado 7 vezes nas páginas 14, 15, 20, 24, 25, 26 e 28.
- PRICE, E. The next step in the evolution of protection and control implementation. In: IEEE. *Protective Relay Engineers, 2010 63rd Annual Conference for*. [S.l.], 2010. p. 1–16. Citado na página 19.
- RUSH, P. *Proteção e automação de redes: conceito e aplicação*. [S.l.]: Schneider, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 19.
- SÁ, J. A. de; COSTA, F. B.; OLIVEIRA, N. L. d. S.; BRITO, N. S.; SOUZA, B. A. de; GURJÃO, E. C.; CARMO, U. A. do. Uso de um simulador em tempo real no ensino de proteção de sistemas elétricos. Citado na página 15.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J. J.; ROSOLOWSKI, E. *Fault location on power networks*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009. Citado na página 24.
- SILVA, K. *Estimação de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão*. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado)-Universidade federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009. Citado na página 13.
- SILVA, K. Um algoritmo de filtragem adaptativa da componente dc de decaimento exponencial para a estimação de fasores em relés digitais. In: *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado na página 27.