

AVALIAÇÃO DO USO DE UM SIMULADOR EM TEMPO REAL NO DIAGNÓSTICO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CECÍLIA A. B. COSTA¹, NÚBIA S. D. BRITO², BENEMAR A. SOUZA²

¹ Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG – COPELE

² Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande
Rua Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, 58.429-900, Campina Grande, Paraíba, Brasil
E-mails: cecilia.costa@ee.ufcg.edu.br, nubia@dee.ufcg.edu.br, benemar@dee.ufcg.edu.br

Abstract— Simulation tools have become essential for power system protection studies, since their users are allowed to model the power system and its components in order to analyse protection schemes and to develop new protection functions, to say the least. This paper presents and evaluates three fault detection and three fault classification methods. Two of them are based on Park's transform, other two uses the maximal overlap discrete wavelet transform, one is based on the slopes of the current signal and another uses the fault and pre-fault current signals. For the evaluation, different faults scenarios on a 230 kV power system were carried out using batch mode simulation in the Real Time Digital Simulator (RTDS[®]). The obtained results are presented and compared with each other.

Keywords— Power system protection, RTDS[®], fault detection, fault classification, batch mode simulation.

Resumo— As ferramentas de simulação se tornaram essenciais para estudos de proteção de sistemas elétricos, visto que elas permitem ao usuário modelar sistemas e componentes para análise de esquemas de proteção e desenvolvimento de novas funções de proteção, por exemplo. Este artigo tem como objetivo apresentar e avaliar três métodos de detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão, sendo eles baseados na transformada de Park, na transformada *wavelet* discreta redundante, e na inclinação e amplitude do sinal de corrente nos instantes de pré-falta e falta. A avaliação consiste na modelagem de um sistema elétrico de 230 kV e na geração de diversos cenários de falta a partir de simulações em massa no *Real Time Digital Simulator* (RTDS[®]). Ao final, são apresentados os resultados comparativos entre os métodos apresentados.

Palavras-chave— Proteção de sistemas elétricos, RTDS[®], detecção de faltas, classificação de faltas, simulação em massa.

1 Introdução

O aumento da complexidade do SEP (SEP) e a crescente exigência dos consumidores por uma prestação de serviço de qualidade representam um desafio contínuo para as empresas do setor elétrico nas áreas de geração, transmissão e distribuição. Dentre os vários fatores que contribuem para a melhoria da qualidade, ou seja, do desempenho de uma empresa, um dos principais é certamente a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

No Brasil, o órgão responsável por avaliar o desempenho das empresas de energia elétrica é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), segundo a qual, um SEP é considerado indisponível quando ocorre desligamento programado ou não, ou atraso na entrada em operação (ANEEL, 2007). A disponibilidade está diretamente relacionada com a qualidade do sistema de proteção, que é definido como sendo o conjunto de equipamentos e acessórios destinados a realizar a proteção para curtos-circuitos (comumente denominados de faltas) e para outras condições de operação anormais em componentes de um SEP (ANEEL, 2008).

Dada a sua importância, é vasta a literatura acerca de estudos e pesquisas relacionados com a busca pela melhoria do desempenho dos sistemas de proteção. Análise do estado da arte mostrou que o desenvolvimento de ferramentas de simulação teve um

papel decisivo nesse processo, visto que possibilitou a construção de modelos cada vez mais realísticos, inclusive permitindo a emulação da operação em tempo real. A utilização de modelos computadorizados permite uma infinidade de estudos, como por exemplo: avaliação de esquemas de coordenação da proteção, desenvolvimento de novas funções de proteção, aprimoramento das funções existentes, desenvolvimento de métodos de diagnóstico de distúrbios (detecção, classificação, localização), etc. (Janíček & Mucha, 2006).

Este trabalho insere-se nesse contexto e avalia o uso de um simulador em tempo-real nas etapas de modelagem de SEP e implementação de diferentes métodos de detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão (LT) de energia elétrica. Os métodos de detecção e classificação baseados nas transformadas de Park e *wavelet* foram selecionados por fazerem parte das pesquisas desenvolvidas na Universidade Federal de Campina Grande. O terceiro método de detecção foi escolhido por apresentar vantagens em relação a outros métodos mais recorrentes, como por exemplo, o de comparação amostra a amostra. Por fim, o método de classificação de sobrecorrente foi escolhido por ser bastante difundido na literatura.

O artigo foi organizado da seguinte forma: inicialmente são apresentados os fluxogramas dos métodos avaliados, a ferramenta de simulação e a metodologia. Para encerrar, os principais resultados são mostrados e analisados e as conclusões apresentadas.

2 Diagnóstico de Falhas

No contexto do SEP, “falta” é um distúrbio (ou ocorrência) que acontece devido a um desligamento não programado dos seus componentes, originado das condições adversas às quais o SEP está sempre submetido. Na prática, as falhas ocorrem devido a rompimentos dos cabos em LT, falhas em equipamentos e fenômenos naturais, tais como: descargas atmosféricas, acumulação de poeira em isoladores, ventos fortes e queimadas (Costa *et al.*, 2010).

A etapa de diagnóstico se dá logo após a consumação da ocorrência, na qual análise minuciosa é realizada, buscando descobrir suas causas, características e consequências. Ao final, medidas corretivas e/ou mitigadoras são propostas visando obtenção de melhorias para o desempenho do SEP e da qualidade dos serviços públicos de energia elétrica.

O processo de diagnóstico de falhas compreende três etapas: detecção, classificação e localização. Neste trabalho foram consideradas apenas as duas primeiras etapas.

2.1 Etapa de Detecção de Falhas

A detecção de uma falta é uma etapa crucial no processo de atuação do sistema de proteção, visto que é ela quem irá (ou não) alavancar os processos de: i) envio do sinal de *trip* do relé para os disjuntores; ii) de gravação realizados pelos dispositivos de medição e de registros. Neste trabalho, foram avaliados três métodos de detecção de falhas, os quais são apresentados a seguir.

2.1.1 Método Inclinação

Método proposto por Nagaraju et al. (2011), o qual baseia-se na avaliação da diferença entre duas amostras adjacentes do sinal da corrente, conforme mostrado no fluxograma da Fig. 1.

2.1.2 Método TW

Método proposto por Costa et al. (2010), o qual baseia-se no uso da transformada wavelet discreta redundante (TWDR) para detectar a falta, conforme mostrado no fluxograma da Fig. 2.

2.1.3 Método TDQ

Método proposto por Lopes et al. (2013), o qual baseia-se no uso da transformada de Park para detectar a falta, conforme mostrado no fluxograma da Fig. 3.

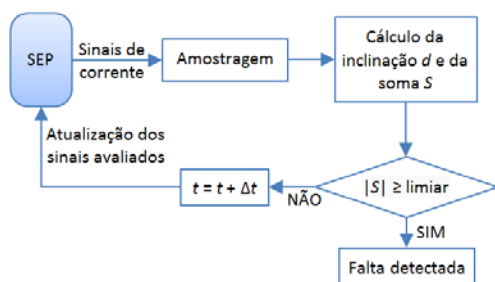


Figura 1: Método Inclinação.

Sendo: d : inclinação (diferença entre duas amostras de corrente adjacentes dividida pelo intervalo de tempo entre as amostras); S : soma das inclinações calculadas no regime permanente; *limiar*: aumento de 10% no valor da soma das inclinações em 1 ciclo de regime permanente.

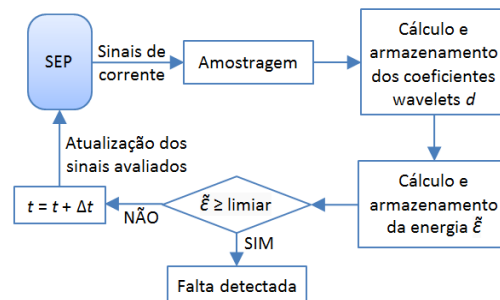


Figura 2: Método TW.

Sendo: d : coeficientes do filtro wavelet via TWDR; wavelet mãe: db4; E : energia janelada (soma dos coeficientes wavelets ao quadrado, em uma janela de um ciclo); *limiar*: razão entre o maior e o menor valor da energia calculada em um ciclo, em regime permanente.

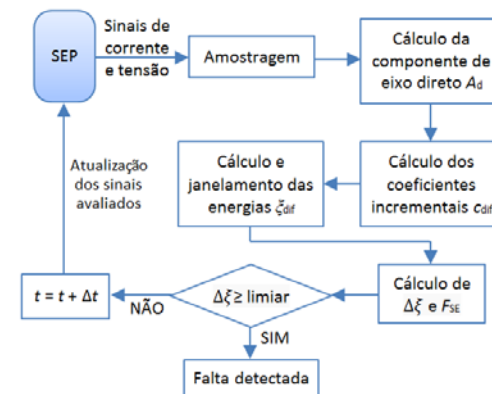


Figura 3: Método TDQ.

Sendo: A_d : componente de eixo direto dos sinais amostrados de corrente e tensão; c_{diff} : coeficientes incrementais das componentes de eixo direto (diferença entre o valor atual e o anterior); E_{diff} : energia dos coeficientes (soma dos coeficientes ao quadrado em uma janela de um ciclo); F_{SE} : fator de sensibilidade (razão entre o maior e o menor valor de energia calculada em uma janela, em regime permanente).

2.2 Etapa de Classificação de Falhas

A classificação da falta é a etapa que permite a identificação das fases envolvidas no evento. No caso das LT, dez tipos de falhas podem ocorrer: i) três falhas do tipo monofásica (AT, BT e CT); ii) três do tipo bifásica (AB, AC e BC); iii) três do tipo bifásica para terra (ABT, ACT e BCT); iv) a falta trifásica (ABC). Neste trabalho, foram avaliados três métodos de classificação de falhas, os quais são apresentados a seguir.

2.2.1 Método Sobrecorrente

Método apresentado em Adu et al. (2002), o qual baseia-se na análise do crescimento da corrente na fase sob falta em relação ao seu valor em regime permanente, conforme mostrado no fluxograma da Fig. 4 e Tabela 1. Neste trabalho, foram consideradas grandezas incrementais.

2.2.2 Método TW

Método proposto por Costa et al. (2012), o qual baseia-se no uso da TWDR para classificar a falta, conforme mostrado no fluxograma da Fig. 5 e Tabela 2.

2.2.3 Método TDQ

Método proposto por Lopes et al. (2014), o qual baseia-se no uso da transformada de Park para classificar a falta, conforme mostrado no fluxograma da Fig. 6 e Tabela 3.

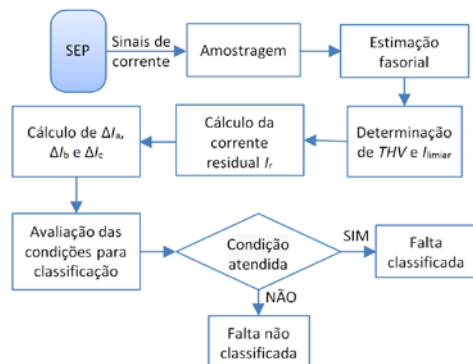


Figura 4: Método Sobrecorrente.

Sendo: THV : valor correspondente a 2 vezes o módulo da corrente em regime permanente; I_{limiar} : constante igual a 0,3; I_r : corrente residual (soma das diferenças entre corrente de fase e de pré-falta em cada fase); ΔI : diferença entre o módulo da corrente de falta menos de pré-falta, considerando dois ciclos após a detecção, e o valor de THV .

Tabela 1. Classificação da falta via método Sobrecorrente.

Condição	Tipo de falta
$\Delta I_a > 0 \text{ E } \Delta I_b < 0 \text{ E } \Delta I_c < 0 \text{ E } I_r > I_{limiar}$	AT
$\Delta I_a < 0 \text{ E } \Delta I_b > 0 \text{ E } \Delta I_c < 0 \text{ E } I_r > I_{limiar}$	BT
$\Delta I_a < 0 \text{ E } \Delta I_b < 0 \text{ E } \Delta I_c > 0 \text{ E } I_r > I_{limiar}$	CT
$\Delta I_a > 0 \text{ E } \Delta I_b > 0 \text{ E } \Delta I_c < 0 \text{ E } I_r \leq I_{limiar}$	AB
$\Delta I_a < 0 \text{ E } \Delta I_b > 0 \text{ E } \Delta I_c > 0 \text{ E } I_r \leq I_{limiar}$	BC
$\Delta I_a > 0 \text{ E } \Delta I_b < 0 \text{ E } \Delta I_c > 0 \text{ E } I_r \leq I_{limiar}$	CA
$\Delta I_a > 0 \text{ E } \Delta I_b > 0 \text{ E } \Delta I_c < 0 \text{ E } I_r > I_{limiar}$	ABT
$\Delta I_a < 0 \text{ E } \Delta I_b > 0 \text{ E } \Delta I_c > 0 \text{ E } I_r > I_{limiar}$	BCT
$\Delta I_a > 0 \text{ E } \Delta I_b < 0 \text{ E } \Delta I_c > 0 \text{ E } I_r > I_{limiar}$	ACT
$\Delta I_a > 0 \text{ E } \Delta I_b > 0 \text{ E } \Delta I_c > 0 \text{ E } I_r \leq I_{limiar}$	ABC

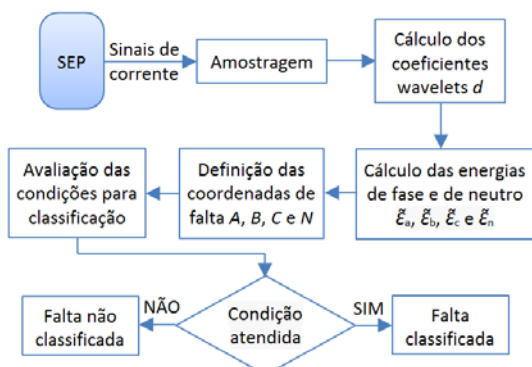


Figura 6: Método TW.

Sendo: d : coeficientes do filtro wavelet da TWDR; wavelet mãe: db4; $\tilde{E}$: energia janelada (soma dos coeficientes wavelets ao quadrado, em uma janela de um ciclo); coordenadas de falta (A, B, C e N), que correspondem à normalização das respectivas energias.

Tabela 2. Classificação da falta via método TW.

Condição	Tipo de falta
$B < 1/3 \text{ E } C < 1/3 \text{ E } N > 0,1$	AT
$A < 1/3 \text{ E } C < 1/3 \text{ E } N > 0,1$	BT
$A < 1/3 \text{ E } B < 1/3 \text{ E } N > 0,1$	CT
$A > 1/3 \text{ E } B > 1/3 \text{ E } N < 0,1$	AB
$B > 1/3 \text{ E } C > 1/3 \text{ E } N < 0,1$	BC
$A > 1/3 \text{ E } C > 1/3 \text{ E } N < 0,1$	CA
$A > 1/3 \text{ E } B > 1/3 \text{ E } N > 0,1$	ABT
$B > 1/3 \text{ E } C > 1/3 \text{ E } N > 0,1$	BCT
$A > 1/3 \text{ E } C > 1/3 \text{ E } N > 0,1$	ACT
$A < 1/3 \text{ E } B < 1/3 \text{ E } N < 0,1$ OU $A < 1/3 \text{ E } C < 1/3 \text{ E } N > 0,1$ OU $B < 1/3 \text{ E } C < 1/3 \text{ E } N > 0,1$	ABC

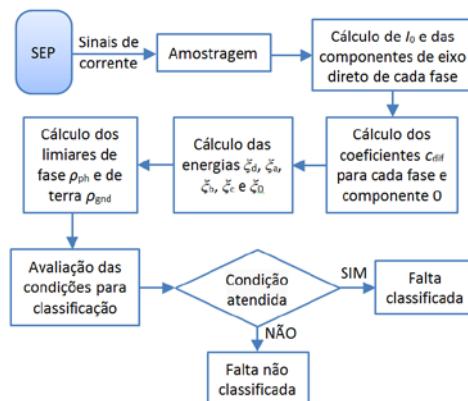


Figura 6: Método TDQ.

Sendo: I_{ad} , I_{bd} e I_{cd} : componentes de eixo direto de cada fase da corrente; I_0 : corrente de sequência zero; A_d : componente de eixo direto dos sinais amostrados de corrente e tensão; C_{dif} : coeficientes incrementais das componentes de eixo direto e sequência zero (diferença entre o valor atual e o anterior); $\tilde{\zeta}_d$, $\tilde{\zeta}_a$, $\tilde{\zeta}_b$, $\tilde{\zeta}_c$ e $\tilde{\zeta}_0$: energias janeladas de cada coeficiente (soma dos respectivos coeficientes ao quadrado, em uma janela de um ciclo); ρ_{ph} e ρ_{gnd} : limites de fase e de terra, respectivamente. Neste trabalho, foram considerados $\rho_{ph} = \tilde{\zeta}_d/10$ e $\rho_{gnd} = \tilde{\zeta}_d/2000$.

Tabela 3. Classificação da falta via método TDQ.

Condição	Tipo de falta
$\tilde{\zeta}_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_b < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_c < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_0 \geq \rho_{gnd}$	AT
$\tilde{\zeta}_a < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_c < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_0 \geq \rho_{gnd}$	BT
$\tilde{\zeta}_a < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_b < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_0 \geq \rho_{gnd}$	CT
$\tilde{\zeta}_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_c < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_0 < \rho_{gnd}$	AB
$\tilde{\zeta}_a < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_0 < \rho_{gnd}$	BC
$\tilde{\zeta}_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_b < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_0 < \rho_{gnd}$	CA
$\tilde{\zeta}_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_c < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_0 \geq \rho_{gnd}$	ABT
$\tilde{\zeta}_a < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_0 \geq \rho_{gnd}$	BCT
$\tilde{\zeta}_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_b < \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_0 \geq \rho_{gnd}$	ACT
$\tilde{\zeta}_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \tilde{\zeta}_0 < \rho_{gnd}$	ABC

4 O Simulador

Como ferramenta de simulação, utilizou-se o *Real time Digita Simulator (RTDS®)*: combinação de *hardware* e *software*, que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em SEP em tempo real (RTDS, 2016). A *interface* do *hardware* com o *software* é denominada de RSCAD, que é composta por um conjunto de módulos individuais, dentre os quais foram utilizados os seguintes módulos:

- *Draft*: módulo no qual o SEP é modelado a partir dos componentes das bibliotecas de SEP, controle e proteção e automação disponibilizada pelo *software*.
- *TLine*: módulo utilizado para modelagem das LT a partir das características físicas dos condutores e geometria da LT ou dos valores de impedância de sequência positiva e zero.
- *CBuilder*: módulo no qual são criados componentes de controle ou SEP, a partir de código em C, os quais são definidos de acordo com a necessidade do usuário. Todos os métodos de detecção e classificação apresentados neste trabalho foram implementados nesse módulo.
- *RunTime*: módulo no qual a simulação é executada e controlada pelo usuário, e onde são observadas as saídas do SEP, como gráficos de corrente e tensão. O arquivo *script*, responsável pela simulação automática dos casos de falta, é criado e executado neste módulo.

5 Metodologia

Para avaliar o potencial do RTDS, adotou-se a metodologia apresentada a seguir.

1. Modelagem do sistema-teste

Essa etapa foi modelada no módulo *Draft* do RTDS[®]. O sistema-teste baseou-se no SEP de 230 kV sugerido por IEEE (2004), cujo diagrama unifilar é mostrado na Fig. 7. Ele é composto por: duas LT paralelas, cada uma com 150 km de comprimento (LT 1 e LT 2); uma LT de circuito simples de mesmo comprimento (LT 3); dois equivalentes de Thévenin (S1 e S2), os quais representam os SEP conectados às barras 1 e 3. Os transformadores de corrente (TC) e de potencial capacitivo (TPC) apresentam relação de transformação de 500:1 e 400:1, respectivamente. Os parâmetros utilizados para modelagem das LT e dos equivalentes de Thévenin são apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. O modelo do relé digital é composto por: i) filtros *anti-aliasing* Butterworth de 2ª ordem com frequência de corte de 180 Hz; ii) subamostradores com taxas de 16 amostras/ciclo; iii) módulo de estimação fasorial via transformada de Fourier de ciclo completo e removedor de componente CC de decaimento exponencial.

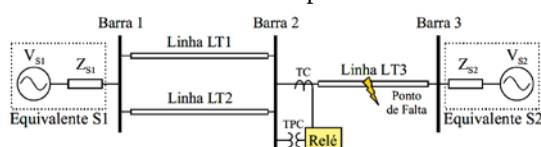


Figura 7: Diagrama unifilar do sistema-teste.

Tabela 1. Parâmetros das LT.

Sequência	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)	Susceptância (μs/km)
Zero	0,246349	1,33113	1,80723
Positiva	0,0937011	0,677849	2,42979

Tabela 2. Parâmetros dos equivalentes utilizados.

Dados	Equivalente	
	S1	S2
Tensão (p.u.)	1,00	0,95
Impedância seq. zero (Ω)	6,1 + j16,7	4,1 + j14,7
Impedância seq. pos. (Ω)	2,7 + j8,4	1,7 + j6,4

2. Construção da base de dados

Para avaliar o desempenho dos métodos, simulou-se um total de 600 cenários de falta, considerando-se todos os parâmetros de falta: resistência R_f , ângulo de incidência θ_f , local L_f e tipo de falta (Tabela 6). As faltas foram todas aplicadas na LT3, tomando-se como referência a barra 2. Todas as faltas duraram 12 ciclos.

Tabela 3. Parâmetros das faltas simuladas.

Parâmetros	Valores escolhidos
Tipo de falta	AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT, ABC
Local de falta (km)	15, 45, 75, 105, 135
Ângulo de incidência (°)	0, 30, 60, 90
Resistência de falta (Ω)	0,001, 5, 50

3. Implementação dos métodos de detecção e classificação de falta

A implementação dos métodos foi feita no módulo *CBuilder*, que permite a modelagem de componentes por meio de programação em linguagem C. Considerou-se subamostragem a uma taxa de 16 amostras/ciclo para todos os métodos.

4. Critérios para avaliação

Como critério de comparação, adotaram-se os critérios apresentados a seguir.

- Detecção: foi observado se os métodos detectaram a falta, e o tempo de detecção a partir do instante da incidência da falta. Assim, são obtidos dois parâmetros: i) taxa de acerto: porcentagem do número de faltas detectadas do total de simulações; ii) t_M (tempo médio de detecção): razão entre a soma de todos os tempos de detecção pelo número total de detecções.
- Classificação: foi observado se os métodos classificaram a falta ou não, e se essa classificação se deu de forma correta. Com isso, são obtidos três parâmetros: i) taxa de acerto: porcentagem de acerto da etapa de classificação; ii) taxa de erro: razão entre a quantidade de faltas que foram classificadas erroneamente e o total de faltas simuladas; iii) taxa de faltas não classificadas: razão entre a quantidade de faltas não classificadas e o total de simulações. Complementando essa informação, apresentaram-se as classificações mais recorrentes para cada tipo de falta classificada incorretamente.

5 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 7, 8, 9 e 10. Análise minuciosa dos resultados obtidos mostrou que em relação à etapa de detecção:

1. Método TW

Apresentou o menor tempo médio de detecção dentre os métodos. O pior desempenho foi na detecção de faltas monofásicas com resistência elevada ($R_f = 50 \Omega$) e localizadas a 105 e 135 km de distância.

2. Método TDQ

Apresenta a vantagem de utilizar apenas as amostras atuais dos sinais de corrente e/ou tensão, ou seja, não armazena amostras em instantes passados, o que diminui o processamento requerido para executar o método. Obteve a maior taxa de acerto. O pior desempenho foi na detecção de faltas monofásicas com resistência de 50 Ω e mais distantes da barra 2.

3. Método Inclinação

Esse método tem como vantagens a confiabilidade e rapidez na detecção da falta (Nagaraju et al., 2011). Apresentou o maior tempo médio de detecção e a menor taxa de acerto dentre os métodos avaliados. O pior desempenho foi nas faltas monofásicas com $R_f = 50 \Omega$ e L_f igual a 105 e 135 km.

Em alguns casos, a detecção via método Inclinação foi mais rápida que via TW, mesmo para faltas monofásicas. Um exemplo desse fato é mostrado na Fig. 8, que representa os sinais das correntes trifásicas referentes a uma falta AT, com resistência 0,001 Ω , ângulo de incidência 0° e localizada a 45 km da barra 2. (Os métodos TDQ e Inclinação detectaram no mesmo instante).

Em relação à classificação observou-se que:

1. Método TW

Classificou todas as faltas as quais foi submetido, porém apresentou o maior número de faltas classificadas incorretamente. Seus piores resultados fo-

ram obtidos com faltas monofásicas e bifásicas de resistência elevada e mais afastadas da barra 2.

2. Método TDQ

Apresentou a menor taxa de acerto e o maior número de faltas não classificadas. Seus piores resultados foram obtidos para faltas com $R_f = 50 \Omega$.

3. Método Sobrecorrente

Apresentou o melhor desempenho em relação à taxa de acerto. Além disso, não classificou de forma incorreta nenhuma falta. Esse método não foi capaz de classificar faltas bifásicas localizadas a 90% da LT com $R_f = 50 \Omega$.

Para ilustrar, apresentam-se nas Figs. 9 e 10 os valores de $\Delta \hat{I}_a$, $\Delta \hat{I}_b$, $\Delta \hat{I}_c$ e $|I_r|$ para uma falta do tipo AC, com $L_f = 90\%$, $\theta_f = 30^\circ$ e duas resistências distintas: 0,001 Ω e 50 Ω , respectivamente. A falta de menor R_f foi classificada de forma correta, enquanto a segunda não atendeu aos critérios de classificação, apesar do crescimento de $\Delta \hat{I}_a$ e $\Delta \hat{I}_c$.

Tabela 4. Desempenho dos métodos de detecção de falta.

Método	Taxa de acerto	t_M
Inclinação	98,67 %	5,80 ms
TW	99,00 %	4,42 ms
TDQ	99,67 %	4,53 ms

Tabela 5. Desempenho dos métodos de classificação de falta.

Método	Taxa de acerto	Faltas não classificadas
TDQ	88,67%	9,33%
TW	96,83%	0%
Sobrecorrente	98%	2%

Tabela 6. Desempenho dos métodos de detecção por tipo de falta.

Tipo de Falta	Taxa de acerto			Tempo médio de detecção		
	TDQ	Inclinação	TW	TDQ	Inclinação	TW
AT	100%	95%	100%	5,5 ms	6,4 ms	4,5 ms
BT	98,33%	98,33%	98,33%	5,2 ms	5,7 ms	4,8 ms
CT	100%	93,33%	93,33%	5,3 ms	6,1 ms	6,2 ms
AB	100%	100%	100%	3,8 ms	5,7 ms	3,8 ms
BC	100%	100%	98,33%	4,3 ms	5,8 ms	4,6 ms
AC	98,33%	100%	100%	4,8 ms	6,1 ms	4,4 ms
ABT	100%	100%	100%	3,7 ms	5,6 ms	3,8 ms
BCT	100%	100%	100%	4,4 ms	5,6 ms	4,2 ms
ACT	100%	100%	100%	4,5 ms	5,7 ms	4,1 ms
ABC	100%	100%	100%	3,8 ms	5,3 ms	3,8 ms

Tabela 7. Desempenho dos métodos de classificação por tipo de falta.

Tipo de Falta	Taxa de acerto			Outras estimativas		
	TDQ	TW	Sobrecorrente	TDQ	TW	Sobrecorrente
AT	80%	91,67%	100%	-	8,33% ABT, BCT	-
BT	80%	93,33%	100%	-	6,67% CT, ACT	-
CT	81,67%	95%	100%	-	5% AT	-
AB	88,33%	95%	93,33%	-	5% ABC	-
BC	91,67%	95%	93,33%	6,67% AB	5% ABC	-
AC	93,33%	98,33%	93,33%	-	1,67% ABC	-
ABT	96,67%	100%	100%	3,33% AT	-	-
BCT	93,33%	100%	100%	6,67% CT	-	-
ACT	98,33%	100%	100%	1,67% CT	-	-
ABC	83,33%	100%	100%	16,67% AC	-	-

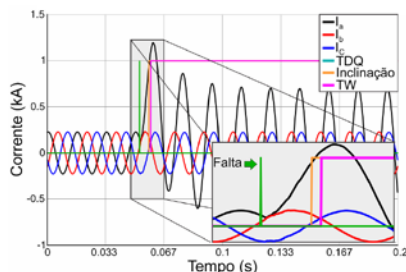


Figura 8: Instantes de detecção para uma falta tipo AT.

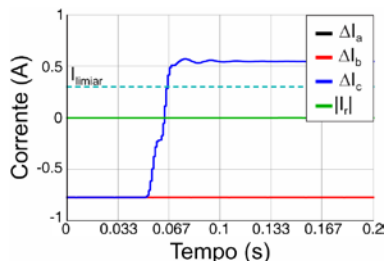


Figura 9: Valores de ΔI para falta AC com $R_f = 0,001 \Omega$.

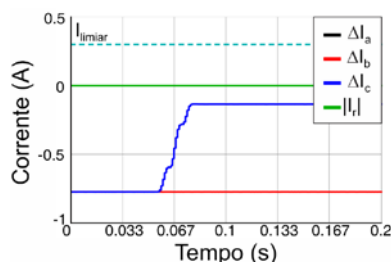


Figura 10: Valores de ΔI para falta AC com $R_f = 50 \Omega$.

6 Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo realizado em um simulador digital em tempo real, visando avaliação do seu potencial. Esse estudo constitui uma etapa de um projeto maior, no qual se pretende construir um modelo completo de um relé no simulador, inclusive as etapas de diagnóstico dos distúrbios. Neste sentido, implementaram-se neste trabalho três métodos de detecção e três métodos de classificação de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica, visando seleção dos métodos que serão embarcados no relé. O estudo realizado mostrou que o método de detecção baseado na transformada de Park e a classificação por Sobrecorrente apresentaram as maiores taxas de acerto, portanto, estes foram os métodos selecionados.

Em relação ao simulador propriamente dito, constatou-se seu enorme potencial, como por exemplo: i) existência de uma vasta biblioteca de componentes do sistema elétrico; ii) possibilidade de criação, por meio de programação em linguagem C, de novos componentes; iii) interface amigável; iv) possibilidade de construção de um modelo de faltas a partir dos componentes de sua biblioteca, o que permite a elaboração de um script, no qual as variáveis do modelo são alteradas de forma automática, sem a intervenção do usuário; v) possibilidade de acompanhar a evolução da falta graficamente, inclusive de forma interativa.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

- Adu, T (2002). An accurate fault classification technique for power system monitoring devices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 3, pp. 684-690.
- ANEEL. Edital de Leilão N° 006/2008, Anexo 6ª, Lote A. Características e requisitos técnicos básicos das instalações de transmissão.
- ANEEL. Resolução Normativa N° 270/2007. Estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade das instalações integrantes da rede básica, e dá outras providências.
- Costa, F. B; Souza, B. A; Brito, N. S. D (2012). Real-Time Classification of Transmission Line Faults Based on Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform. *Proceedings of the IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Orlando, FL, visto em 3 de fevereiro de 2016, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6281684>
- Costa, F. B; Souza, B. A; Brito, N. S. D; Silva, K. M (2010). Transformada Wavelet Discreta Aplicada ao Diagnóstico de Distúrbios. *Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Belém, pp.?
- IEEE Power System Relaying Committee (2004). EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing. 61 p.
- Janiček, F. and Mucha, M (2006). Distance digital relay model developed in ATP "foreign model" and C++. *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 57, No. 5, pp. 268-275.
- Lopes, F. V (2014). Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande.
- Lopes, F. V; Fernandes Jr., D; Neves, W. L. A (2013). A Traveling-Wave Detection Method Based on Park's Transformation for Fault Location. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No. 3, pp. 1626-1634.
- Lopes, F. V; Fernandes Jr., D; Neves, W. L. A (2014). Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão via Transformada de Park. *Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Foz do Iguaçu, visto em 20 de fevereiro de 2016, <http://www.sbse.org.br/anais/PDF/SBSE2014-0004.pdf>
- Nagaraju, K; Varma, P. S. V. S. T; Varma, B. R. K (2011). A Current-Slope Based Fault Detector for Digital Relays. *Proceedings of the Annual IEEE India Conference*, Hyderabad, visto em 2 de março de 2016, <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6139589>
- RTDS Technologies Inc. (n.d.), *RTDS® Simulator Software – RSCAD*, Winnipeg, visto em 4 de abril de 2016, <https://www.rtds.com/wp-content/uploads/2014/09/RSCAD-Software-Overview.pdf>