

Avaliação de Funções de Proteção de Linhas de Transmissão Aplicadas no Domínio do Tempo

Felipe V. Lopes, Eduardo J. Leite Jr. e João Paulo G. Ribeiro

Resumo—Apresenta-se neste trabalho uma análise comparativa entre duas funções de proteção aplicadas no domínio do tempo capazes de prover a proteção unitária de linhas de transmissão. Ambas as técnicas têm sido tratadas como tendência no mercado de relés numéricos de proteção, visto que não requerem a estimação de fasores e, portanto, permitem a emissão de sinais de *trip* para casos de faltas internas em menos de meio ciclo após a incidência do curto-circuito. Para avaliar o desempenho das referidas funções de proteção, realizam-se simulações em massa de diversos cenários de falta em um sistema elétrico de 230 kV/60 Hz por meio do programa *Alternative Transients Program* (ATP), permitindo a identificação de vantagens, limitações e fontes de erro de cada algoritmo.

Palavras-chaves—ATP, domínio do tempo, linhas de transmissão, sistemas elétricos de potência, sistemas de proteção.

I. INTRODUÇÃO

EM DECORRÊNCIA do aumento da demanda por energia elétrica nas últimas décadas, os sistemas de transmissão têm sido requisitados a transmitir potências cada vez maiores, as quais são limitadas a níveis que dependem das margens de estabilidade do sistema. Neste contexto, sabe-se que essas margens de estabilidade estão diretamente relacionadas com o tempo crítico de eliminação de curtos-circuitos, o qual, por sua vez, deve ser maior que o tempo de atuação dos sistemas de proteção aplicados [1]. Sendo assim, pode-se concluir que quão mais rápidos forem os sistemas de proteção, maiores serão as margens de estabilidade do sistema e, consequentemente, maior será a potência passível de transmissão [2].

Os sistemas de proteção tradicionais se baseiam na análise de componentes de frequência fundamental em sua forma fasorial. Neste tipo de aplicação, o processo de estimação de fasores é imprescindível, embora apresente um atraso intrínseco devido ao janelamento de dados [3]. De fato, o valor correto dos fasores estimados só é obtido idealmente após o tempo de transição da janela de dados entre os períodos de pré-falta e de falta, quando apenas amostras do período de falta são avaliadas. Assim, se uma janela de um ciclo é utilizada no processo de estimação fasorial, por exemplo, um atraso da ordem de um ciclo pode ser verificado nos tempos de atuação das funções de proteção tradicionais [4].

Este trabalho teve apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Felipe V. Lopes é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB), Brasília-DF (e-mail: felipevlope@unb.br).

Eduardo J. Leite Jr. e João Paulo G. Ribeiro são, respectivamente, alunos de mestrado e iniciação científica (PIBIC) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB) (e-mails: {eduardoleite,joaopauloribeiro}@aluno.unb.br).

Para contornar maiores atrasos na eliminação dos curtos, funções de proteção rápidas têm sido cada vez mais reportadas na literatura especializada [2], [5]–[9], despertando o interesse das concessionárias de energia elétrica. Em [6], apresenta-se um método que utiliza grandezas incrementais dos sinais de corrente e de tensão, resultando em atuações rápidas e confiáveis. Em [7], utilizam-se comparadores de fase implementados no domínio do tempo para aumentar a velocidade de atuação da proteção. Em [8], apresenta-se uma análise sobre o uso de grandezas incrementais no domínio do tempo, destacando a possibilidade de promover atuações mais rápidas e confiáveis dos relés.

Nos últimos anos, alguns fabricantes de relés numéricos têm publicado desenvolvimentos no âmbito da proteção de linhas de transmissão (LTs) no domínio do tempo. Em [9], é apresentada a função de comparação de fase, a qual é chamada de função PC do termo em inglês *Phase Comparison*. Essa função é capaz de identificar curtos internos à LT monitorada em menos de meio ciclo após a incidência da falta e é independente dos parâmetros da linha. Em [2] é apresentado um sistema de proteção direcional no domínio do tempo capaz de identificar curtos diretos ou reversos a um dado ponto monitorado em tempos da ordem de um quarto de ciclo. Neste contexto, sabe-se que ambas as funções podem prover a proteção unitária da LT, sem requerer canais de comunicação com grande largura de banda, visto que transmitem apenas dados "on/off" de um terminal para o outro.

Neste trabalho apresenta-se uma análise comparativa entre as funções de proteção reportadas em [2] e [9] do ponto de vista dos respectivos tempos de atuação e segurança. Para tanto, são realizadas simulações em massa de faltas em um sistema elétrico de 230 kV/60 Hz, variando-se as características do curto-circuito (resistência, localização e ângulo de incidência de falta) bem como as condições de carregamento do sistema. Para cada caso, os tempos de *trip* de ambas as proteções são calculados, permitindo a identificação das vantagens, limitações e fontes de erro de cada função avaliada.

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA TESTE ANALISADO

A fundamentação teórica e a formulação matemática das duas funções de proteção avaliadas são apresentadas neste trabalho com base no sistema teste ilustrado na Fig. 1. Uma vez que as funções são aplicadas no domínio do tempo, correntes e tensões no sistema teste são representadas considerando a nomenclatura típica para valores instantâneos dos sinais monitorados, sendo: i_L e i_R as correntes nos terminais local e remoto, respectivamente; v_L e v_R as tensões nos terminais local e remoto, respectivamente.

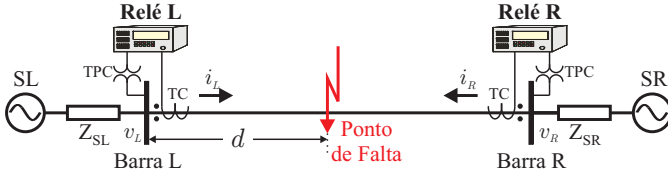


Fig. 1. Sistema teste analisado.

O sistema teste consiste em uma LT de 230 kV/60 Hz, 200 km, modelada como perfeitamente transposta com parâmetros distribuídos e constantes na frequência, que interliga dois circuitos equivalentes de Thévenin, os quais representam os sistemas elétricos em torno da LT monitorada. As fontes de tensão SL e SR são mantidas com valores de $1\angle 0^\circ$ pu e $1\angle \delta$ pu, respectivamente, sendo δ o ângulo de carregamento, o qual é ajustado para simular diferentes carregamentos no sistema em estudo. Os parâmetros de sequência zero e positiva da LT modelada e dos circuitos equivalentes de Thévenin são:

- $Z_{LT0} = 0,418 + j1,524 \Omega/\text{km}$,
- $Z_{LT1} = 0,035 + j0,301 \Omega/\text{km}$,
- $Z_{SL0} = Z_{SR0} = 0,0418 + j0,1524 \Omega$,
- $Z_{SL1} = Z_{SR1} = 0,0035 + j0,0301 \Omega$,

em que Z_{LT} , Z_{SL} e Z_{SR} representam a impedância da linha e dos equivalentes de Thévenin dos terminais local e terminal remoto, respectivamente, sendo os subscritos 0 e 1 referentes aos parâmetros de sequência zero e positiva, respectivamente.

Os algoritmos implementados foram avaliados por meio registros de faltas gerados no ATP. Utilizou-se um passo de integração de $5 \mu\text{s}$, sendo simulada uma frequência de amostragem de 15,36 kHz (256 amostras/ciclo). Foram também modelados filtros *anti-aliasing* analógicos do tipo Butterworth, passa-baixa de terceira ordem, com frequência de corte de 180 Hz. Uma vez que o objetivo deste trabalho não é avaliar a influência dos transformadores para instrumentos sobre os algoritmos analisados, transformadores de corrente (TC) e transformadores de potencial foram modelados como ideais em ambos os terminais da LT. Em trabalhos futuros, pretende-se avaliar individualmente a influência desses equipamentos sobre as funções de proteção implementadas.

III. FUNÇÕES DE PROTEÇÃO AVALIADAS

A. Proteção I: Comparação de Fases no Domínio do Tempo Conforme Proposto em [9]

A proteção PC se fundamenta na diferença angular entre as correntes do terminal emissor e receptor [10]. Assumindo as polaridades dos TCs conforme ilustrado na Fig. 1, idealmente, i_L e i_R têm polaridades opostas na ocorrência de faltas externas ou em condições normais do sistema. Por outro lado, i_L e i_R têm a mesma direção durante faltas internas, resultando idealmente em polaridades iguais. Deve-se destacar que, na prática, existem defasagens nos sinais de corrente devido ao efeito capacitivo da LT, sendo esse efeito passível de correção, conforme reportado em [11]. No domínio do tempo, a diferença angular é estimada com base no processamento de sinais modulados, cujo comportamento é determinado pela polaridade dos valores instantâneos das correntes medidas nos terminais da LT [9], [12].

Na Fig. 2, ilustra-se a aplicação da proteção PC para o caso de uma falta interna e de uma falta externa. Inicialmente, realiza-se a modulação das correntes i_L e i_R , processo este realizado com base na polaridade dos valores instantâneos das correntes medidas nos terminais da LT. Basicamente, para valores positivos de uma dada corrente, o sinal modulado recebe valor positivo unitário e, para valores negativos, o sinal modulado recebe valor nulo, conforme ilustrado nas Figs. 2(b) e 2(f) para os casos de faltas internas e externas, respectivamente. Em seguida, os sinais modulados referentes às correntes i_L e i_R são associados por meio de uma porta lógica AND, cujo sinal de saída é composto por pulsos que permanecem em nível alto apenas quando i_L e i_R são positivas. Assim, para faltas internas, i_L e i_R possuem mesma direção e, consequentemente, mesma polaridade, resultando em pulsos largos, conforme apresentado na Fig. 2(c). Por outro lado, para curtos externos ou durante a operação normal do sistema, as correntes possuem direções opostas e, consequentemente, polaridades diferentes, resultando em sinais que permanecem em nível baixo ou em pulsos estreitos, cuja largura é proveniente da defasagem causada pelo efeito capacitivo da LT (ver Fig. 2(g)).

Em [9], propõe-se que um curto interno seja indicado se a saída da porta lógica AND permanecer em nível alto durante um período de tempo maior que um quarto de ciclo. Nas Figs. 2(d) e Figs. 2(h) são ilustradas as contagens da largura dos pulsos para os casos de curtos internos e externos, respectivamente.

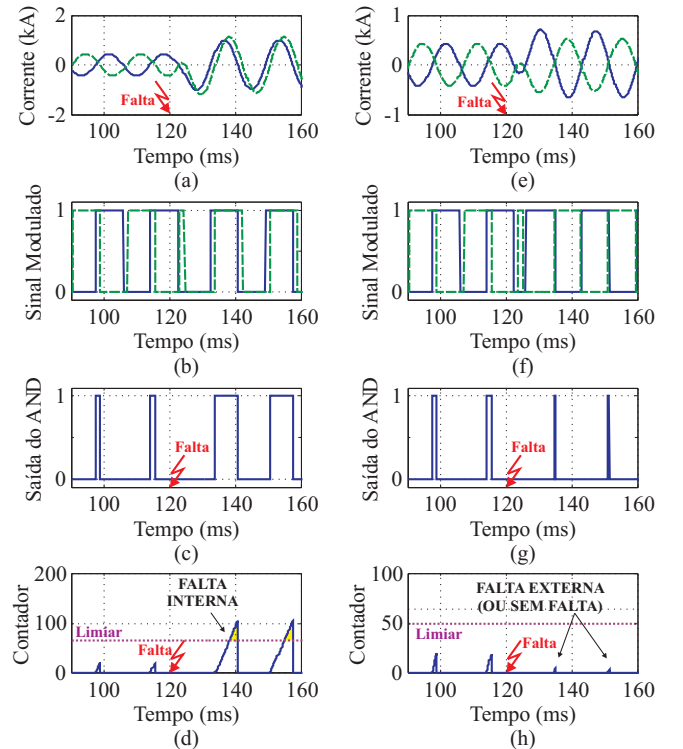


Fig. 2. Aplicação da proteção PC: (a) Correntes para curtos internos; (b) Sinais modulados para curtos internos; (c) Saída da porta AND para curtos internos; (d) Contagem da largura dos pulsos para curtos internos; (e) Correntes para curtos externos; (f) Sinais modulados para curtos externos; (g) Saída da porta AND para curtos externos; (h) Contagem da largura dos pulsos para curtos externos.

Deve-se destacar que o uso da proteção PC aplicada no domínio do tempo viabiliza atuações rápidas da proteção em tempos menores que o período de meio ciclo após a incidência da falta, tempo este que deve ser somado ao atraso do canal de comunicação utilizado. Nota-se ainda que o algoritmo é muito simples, visto que não depende dos parâmetros da LT, não utiliza amostras de pré-falta e não requer o uso de canais de comunicação com grande largura de banda, conforme explicado na seção anterior.

B. Proteção II: Elementos Direcionais no Domínio do Tempo Conforme Proposto em [2]

Os elementos direcionais apresentados em [2] se baseiam na análise de tensões e correntes incrementais, as quais são obtidas neste trabalho usando:

$$\Delta s(t) = s(t) - s(t - p \cdot T) , \quad (1)$$

em que Δs é a grandeza incremental instantânea, s é o valor instantâneo medido do sinal avaliado (tensão ou corrente), T é o período fundamental da grandeza medida e p é um número arbitrário de períodos, geralmente igual a 2 ou 3.

Para determinar a direção do curto-circuito, propõe-se em [2] o uso de comparadores, os quais são obtidos a partir do produto da tensão incremental Δv e da corrente réplica incremental Δi_Z usando:

$$S_{OP}(t) = \Delta v(t) \cdot \Delta i_Z(t) , \quad (2)$$

sendo a corrente réplica incremental calculada usando:

$$\Delta i_Z(t) = \frac{R_L}{|Z_L|} \cdot \Delta i(t) + \frac{L_L}{|Z_L|} \cdot \frac{d}{dt} \Delta i(t) , \quad (3)$$

em que Z_L , R_L e L_L são a impedância, resistência e indutância da LT, respectivamente.

Com o objetivo de melhorar a confiabilidade do elemento direcional, propõe-se em [2] o uso dos limiares adaptativos S_{FWD} e S_{REV} , os quais são calculados usando:

$$S_{FWD}(t) = -Z_{FWD} \cdot [\Delta i_Z(t)]^2 - \Delta_{MIN} , \quad (4)$$

$$S_{REV}(t) = Z_{REV} \cdot [\Delta i_Z(t)]^2 + \Delta_{MIN} , \quad (5)$$

em que Δ_{MIN} é o limiar mínimo e Z_{FWD} e Z_{REV} são ajustes do relé. Neste trabalho, utiliza-se $\Delta_{MIN} = 10^6$, $Z_{FWD} = 0,5 \cdot |Z_{SL}|$ e $Z_{REV} = 0,5 \cdot |Z_L|$, conforme sugerido em [2].

Uma vez calculados os comparadores e limiares adaptativos, declara-se uma falta direta quando:

$$S_{OP}(t) < S_{FWD}(t) . \quad (6)$$

Por outro lado, declara-se uma falta na direção reversa quando:

$$S_{OP}(t) > S_{REV}(t) . \quad (7)$$

Se as condições (6) e (7) não forem satisfeitas, assume-se que o sistema elétrico se encontra em regime permanente, ou seja, não existe uma condição de falta na LT.

Na Fig. 3, apresenta-se o comportamento de S_{OP} , S_{FWD} e S_{REV} para uma falta direta e para uma falta reversa. Analisando a região ampliada do período de pré-falta, nota-se que as condições (6) e (7) não são satisfeitas, conforme esperado.

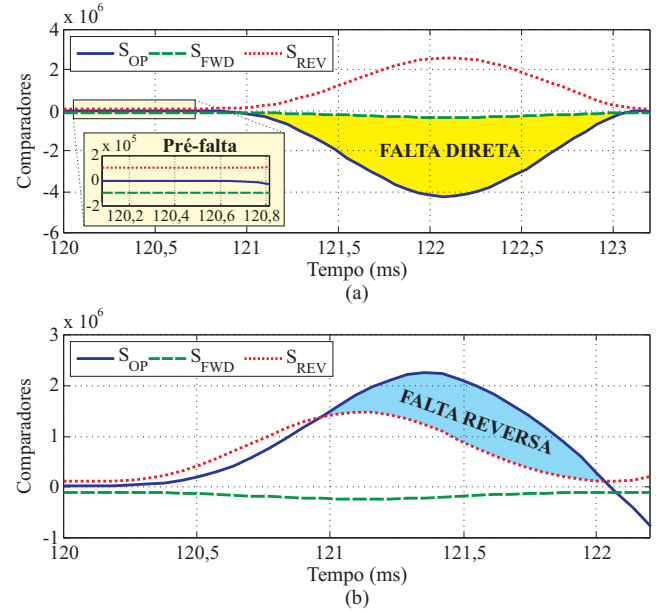


Fig. 3. Aplicação dos elementos direcionais propostos em [2]: (a) Curto interno; (b) Curto externo.

Entretanto, após o estabelecimento da condição de falta, os valores do comparador S_{OP} e dos limiares S_{FWD} e S_{REV} mudam no sentido de indicar a direção do curto-circuito.

Por uma questão de segurança, a detecção da direcionalidade da falta só é realizada quando uma mesma condição é satisfeita por algumas amostras consecutivas. Além disso, para implementação dos elementos direcionais propostos em [2] é necessário o procedimento de seleção de fases, o qual permite a escolha correta dos sinais de entrada a serem considerados para cada *loop* de falta. Conforme reportado em [2], a seleção de fases pode ser realizada por meio da análise dos valores assumidos pelos comparadores S_{OP} para cada unidade de medição. Esse procedimento é realizado tão logo ocorra a detecção de curtos reversos ou diretos por qualquer uma das unidades de medição. Assim, após a seleção de fases, passa-se a analisar apenas os sinais do *loop* de falta sensibilizado, os quais são responsáveis pela classificação final do curto-circuito como sendo direto ou reverso [2].

A detecção de faltas internas à LT é realizada por meio da análise dos elementos direcionais implementados em ambos os terminais da linha. Se ambos os elementos direcionais indicarem um curto direto, tem-se a detecção de uma falta interna e um sinal de *trip* é emitido aos disjuntores associados. Caso contrário, se ao menos um dos elementos direcionais indicar curto reverso, identifica-se uma falta externa. Deve-se destacar que, assim como a função PC, os elementos direcionais reportados em [2] também promovem atuações rápidas, com tempos de *trip* da ordem de 4 ms, os quais devem ser somados ao atraso dos canais de comunicação utilizados. Além disso, os elementos direcionais são implementados localmente em cada terminal monitorado, de forma que, nesse algoritmo, também não é necessário o uso de canais de comunicação com grande largura de banda, uma vez que apenas os sinais do tipo "on/off" usados na indicação de curtos diretos ou reversos são transmitidos de um terminal para o outro.

IV. SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A. Casos Avaliados

Para avaliar as proteções I e II implementadas, realizaram-se simulações em massa de faltas na LT descrita na Seção II, considerando diferentes valores do ângulo de incidência da falta, resistência de falta e carregamento do sistema. Para avaliar cada uma dessas variáveis em separado, foram considerados curtos-circuitos ao longo de toda a extensão da LT, variando a distância de falta de 1% a 99% do seu comprimento. Ao final, analisou-se o desempenho das proteções I e II implementadas considerando a variação do carregamento e das características do curto (resistência, ângulo de incidência e localização da falta) simultaneamente. Os resultados obtidos são apresentados e analisados nas próximas seções.

Para realizar uma avaliação detalhada dos resultados obtidos, os tempos de *trip* calculados para as proteções I e II são apresentados em forma de *boxplots*, tipo este de gráfico que permite a representação da distribuição de um conjunto de dados em formato visual por meio de cinco índices: o valor máximo, representado pela cauda superior; o quartil superior, representado pelo limite superior da caixa; a mediana, representada pela linha intermediária da caixa; o quartil inferior, representado pelo limite inferior da caixa; e o valor mínimo, representado pela cauda inferior. O quartil superior, a mediana e o quartil inferior representam neste trabalho, respectivamente, o tempo de *trip* máximo verificado em 75%, 50% e 25% dos casos analisados. Deve-se destacar que os tempos de atuação calculados não incluem os atrasos dos canais de comunicação, os quais, para a LT modelada de 200 km, são da ordem de 2 ms, assumindo o uso de cabos do tipo *Optical Fibre Ground Wires* (OPGW) [12].

B. Influência do Ângulo de Incidência da Falta

Apresentam-se na Fig. 4 os resultados obtidos para diferentes valores de ângulo de incidência θ . Para a obtenção desses resultados, foram considerados curtos francos do tipo AT e um ângulo de carregamento $\delta = -15^\circ$.

Percebe-se que as proteções I e II são influenciadas por variações do ângulo de incidência, visto que os tempos de atuação mudam para diferentes valores de θ . Comparada à proteção II, a proteção I demonstrou ser mais afetada quando $\theta = 180^\circ$ e 270° , o que se deve à influência da componente CC de decaimento exponencial e à polaridade das correntes instantâneas de falta quando $\theta \geq 180^\circ$.

É importante ressaltar que o ângulo de incidência da falta é determinante para o comportamento da componente CC de decaimento exponencial nas correntes medidas. Em resumo, para diferentes valores de θ , verificam-se componentes CC de decaimento exponencial com amplitudes maiores ou menores, com polaridades positivas ou negativas [13]. Neste contexto, sabe-se que a componente CC de decaimento exponencial é mais intensa para $\theta = 0^\circ$ e 180° , ângulos estes para os quais as componentes CC apresentam polaridades positiva e negativa, respectivamente. Por outro lado, para $\theta = 90^\circ$ e 270° , a referida componente CC não apresenta amplitudes relevantes, de forma que, nesses casos, as proteções no domínio do tempo são menos afetadas.

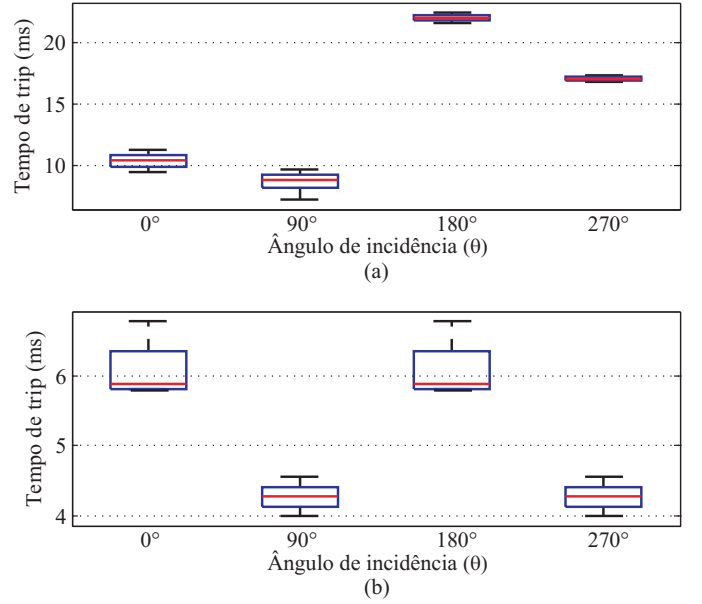


Fig. 4. Influência do ângulo de incidência: (a) Proteção I; (b) Proteção II.

Dos resultados, nota-se que, para ambas as proteções, os tempos de atuação são maiores para $\theta = 0^\circ$ e 180° do que para $\theta = 90^\circ$ e 270° , respectivamente. Tal resultado confirma a influência do ângulo de incidência de falta sobre ambos os algoritmos implementados e, especialmente sobre a proteção I, da componente CC de decaimento exponencial.

Ainda da Fig. 4, analisando a proteção I, nota-se que as atuações para $\theta > 180^\circ$ são mais lentas do que para $\theta < 180^\circ$, comportamento este não verificado na proteção II. Isso se deve ao fato das correntes iniciarem o período de curto-circuito com valores negativos quando $\theta > 180^\circ$, retardando a mudança do estado da saída da porta AND que associa os sinais modulados de cada terminal. Como consequência, a largura do primeiro pulso na saída da porta AND só aumenta depois de transcorrido aproximadamente meio ciclo do distúrbio, resultando em um atraso adicional da atuação da proteção.

Por fim, deve-se frisar que a proteção II foi mais rápida que a proteção I em todas as simulações, resultando em tempos de atuação da ordem de apenas meio ciclo para os piores casos. De fato, a corrente réplica utilizada elimina bem a componente CC de decaimento exponencial, resultando em um desempenho mais robusto às variações de ângulo de incidência e em tempos de *trip* da ordem de 4 ms nos melhores casos quando $\theta = 90^\circ$ e 270° .

C. Influência da Resistência de Falta

Na Fig. 5, apresentam-se os resultados obtidos para diferentes valores da resistência de falta R_F . Para essas análises, foram considerados curtos do tipo AT, com $\delta = -15^\circ$ e um ângulo de incidência $\theta = 90^\circ$.

Dos resultados obtidos, percebe-se que ambas as proteções são influenciadas por variações de R_F , sendo a proteção II menos afetada para valores elevados de resistência de falta. Tal comportamento pode ser justificado pelo uso de elementos incrementais na proteção II, o que não ocorre na proteção I na forma como foi implementada. Entretanto, sabe-se que o

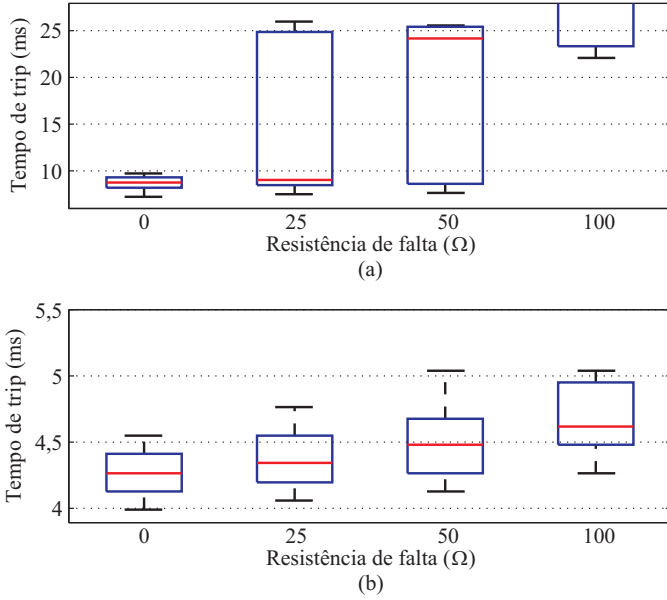


Fig. 5. Influência da resistência de falta: (a) Proteção I; (b) Proteção II.

desempenho da proteção I pode ser melhorado a partir do uso de elementos incrementais de fase ou mesmo de elementos de sequência, muito embora nesse último caso sejam necessárias rotinas adicionais para a seleção das fases com falta.

Analisando a Fig. 5(a), nota-se que a proteção I não atuou em vários casos para $R_F = 100 \Omega$ e teve um aumento relevante dos tempos de *trip* para $R_F = 25 \Omega$ e 50Ω . Nessas simulações, verifica-se ainda que houve um aumento do valor da mediana quando R_F passou de 25Ω para 50Ω , indicando a ocorrência de atrasos adicionais da ordem de 15 ms em até 50% dos casos avaliados. Isso pode ser explicado pela redução da corrente de curto-circuito para altos valores de R_F . Em decorrência disso, as correntes de carga do sistema predominam sobre as contribuições de curto-circuito, caracterizando uma situação de *outfeed* [12]. Assim, uma das correntes monitoradas não inverte o sentido como esperado, fazendo a proteção atrasar a atuação ou até, em alguns casos, não identificar o curto como sendo interno. Neste trabalho, a não atuação da proteção é tratada como um caso de tempo de *trip* tendendo ao infinito. Por isso, devido aos altos valores da mediana, quartil superior e cauda superior decorrentes da não atuação da proteção I para $R_F = 100 \Omega$, o *boxplot* desse caso não é completamente ilustrado na Fig. 5(a).

De uma forma geral, observa-se novamente que a proteção II demonstrou ser mais rápida em todos os casos analisados se comparada à proteção I. Além disso, a proteção II demonstrou ser menos afetada por variações de R_F , o que também se justifica pelo uso de componentes incrementais. Portanto, visto que as correntes incrementais permanecem com o comportamento esperado para curtos internos mesmo em situações de *outfeed*, os tempos de atuação não apresentam grandes atrasos adicionais quando R_F aumenta. Ainda assim, para valores baixos de R_F (curtos francos ou $R_F = 25 \Omega$), pode-se dizer que as proteções I e II apresentaram desempenhos satisfatórios, resultando, nos melhores casos, em tempos de atuação da ordem de 7 ms e 4 ms, respectivamente.

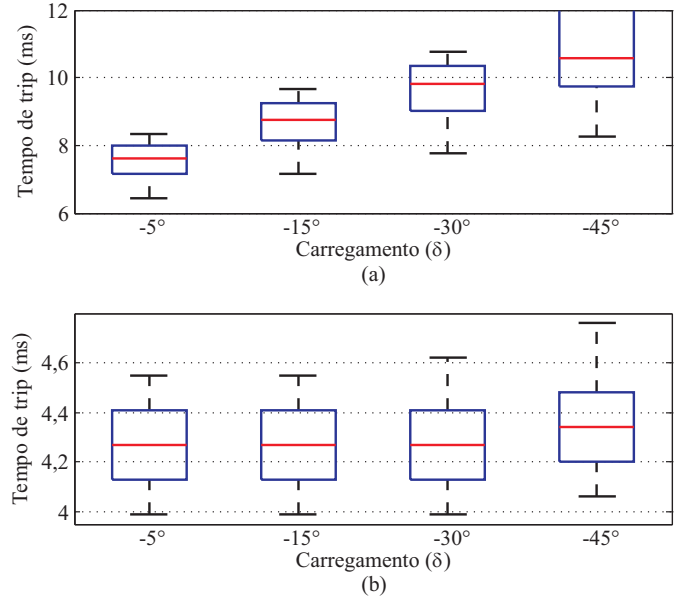


Fig. 6. Influência do carregamento: (a) Proteção I; (b) Proteção II.

D. Influência do Carregamento do Sistema

Apresentam-se na Fig. 6 os resultados obtidos para diferentes valores do ângulo de carregamento do sistema δ . Para realizar essa análise, foram considerados curtos francos do tipo AT, com ângulo de incidência $\theta = 90^\circ$.

De forma similar aos resultados obtidos durante a análise da influência da resistência de falta, a proteção II resultou em tempos de atuação menores que os obtidos por meio da proteção I, a qual não atuou para alguns casos de carregamento mais elevado. Por isso, conforme explicado anteriormente, o *boxplot* para $\delta = -45^\circ$ da proteção I não é completamente ilustrado na Fig. 6(a). Isso se deve também a situações de *outfeed*, nas quais as contribuições de curto-circuito são menores do que as correntes de carga do sistema, impedindo a identificação da direcionalidade da falta.

Analisando os resultados, nota-se que a proteção I resultou em tempos de *trip* menores que um ciclo fundamental para ângulos de carregamento de até -30° . Nos melhores casos, os tempos de atuação foram da ordem de 6 ms. Por outro lado, ao analisar os resultados obtidos por meio da proteção II, observa-se que novamente foram obtidos tempos de atuação menores em relação à proteção I, os quais não excederam 5 ms em todas as situações avaliadas. De fato, mesmo nos piores casos, para $\delta = -45^\circ$, o tempo de atuação foi de aproximadamente 4,5 ms em 75% dos casos avaliados (ver quartil superior), demonstrando a robustez e velocidade dos elementos direcionais reportados em [2].

E. Análise das Simulações em Massa

Nesta etapa da análise das proteções I e II, considerou-se a variação da localização da falta (de 1% até 99% do comprimento da LT), dos ângulos de incidência (0° , 90° , 180° e 270°), da resistência de falta (0Ω , 25Ω , 50Ω e 100Ω) e do ângulo de carregamento do sistema (-5° , -15° , -30° e -45°) para curtos monofásicos AT, totalizando 6336 simulações.

Para viabilizar uma análise mais detalhada dos resultados obtidos, os tempos de atuação calculados para as proteções I e II são apresentados em forma de polígono de frequência acumulada na Fig. 7, sem incluir os atrasos dos canais de comunicação utilizados.

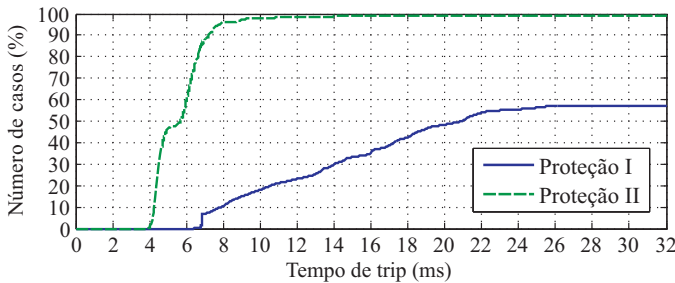


Fig. 7. Polígono de frequência acumulada dos tempos de *trip* das proteções I e II.

Dos resultados obtidos, percebe-se que para tempos de *trip* de até 26 ms, a proteção I atuou apenas em aproximadamente 59% das simulações. A não atuação dessa proteção ocorre especialmente para curtos-circuitos com valores elevados de resistência de falta e em condições de carregamento alto do sistema, conforme explicado nas subseções anteriores. Por outro lado, para a faixa de valores de tempos de *trip* considerada na Fig. 7, observa-se que a proteção II atuou em todas as simulações, atingindo o valor de 100% dos casos para um tempo de *trip* de aproximadamente 16 ms.

Dos polígonos de frequência acumulada, verifica-se ainda que a proteção I resultou em tempos de *trip* de aproximadamente 8 ms em apenas 10% dos casos. Devido à sensibilidade da proteção I a casos de *outfeed*, atuações da ordem de um ciclo fundamental foram verificadas em aproximadamente 40% dos casos, simulações estas para as quais a aplicação do método pode não ser vantajosa. Em contrapartida, a proteção II atuou em aproximadamente 6 ms para aproximadamente 60% dos casos e em até meio ciclo em aproximadamente 96% dos cenários considerados. Tais resultados confirmam a robustez e velocidade da proteção II para aplicações no domínio do tempo e evidenciam a necessidade de aprimoramentos na proteção I, no sentido de torná-la mais rápida e confiável. Ainda assim, é importante ressaltar que a simplicidade da proteção I é muito superior quando comparada à da proteção II, visto que não requer os parâmetros da LT nem das impedâncias dos circuitos equivalentes de Thévenin, sendo, portanto, bastante útil em situações nas quais os parâmetros do sistema elétrico monitorado não se encontram disponíveis ou quando existe dúvida quanto à precisão desses dados.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentou-se uma análise comparativa dos tempos de *trip* de duas funções de proteção de linhas de transmissão aplicadas no domínio do tempo. As referidas funções são capazes de prover a proteção unitária de linhas de transmissão, sem requerer o uso de algoritmos de estimação fasorial, os quais resultam, devido ao processo de janelamento de dados, em atrasos nas proteções tradicionais de linhas que se baseiam na análise de fasores fundamentais.

Durante as análises realizadas, as proteções avaliadas foram denominadas de proteção I e proteção II, sendo apresentados os fundamentos de cada um dos algoritmos. Em seguida, foram realizadas simulações em massa no ATP, através das quais foi possível identificar potencialidades e limitações de cada proteção em casos de variação da resistência de falta, ângulo de incidência de falta e carregamento do sistema.

Dos resultados obtidos, percebe-se que a proteção II demonstrou ser mais rápida e robusta do que a proteção I, muito embora apresente implementação mais complexa e requeira o conhecimento dos parâmetros do sistema. O uso de elementos incrementais na proteção II permitiu um desempenho satisfatório da função mesmo em casos de *outfeed*, resultando em tempos de *trip* da ordem de 6 ms em aproximadamente 60% dos 6336 cenários de falta simulados. Enquanto isso, embora tenha atuado em aproximadamente 7 ms em casos menos adversos, a proteção I apresentou problemas durante situações de *outfeed*, fato este que comprova a necessidade de aprimoramentos no sentido de torná-la mais robusta, o que pode ser alcançado por meio do uso de elementos de sequência ou de grandezas incrementais como sinais de entrada. Ainda assim, mesmo cientes de que a proteção II é mais rápida e robusta, conclui-se que a proteção I é vantajosa em casos nos quais não se conhecem os parâmetros do sistema ou mesmo quando existe dúvida quanto à precisão desses, visto que essa proteção, em sua forma mais simples de implementação, depende apenas das medições de corrente nos terminais da LT.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] P. M. Anderson, *Power System Protection*. Piscataway, NJ - USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.
- [2] E. Schweitzer, B. Kasztenny, A. Guzmán, V. Skendzic, and M. Mynam, "Speed of line protection - can we break free of phasor limitations?" in *68th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, March 2015.
- [3] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Computer Relaying for Power Systems*, 2nd ed. New York, USA: John Wiley & Sons Inc, 2009.
- [4] E. O. Schweitzer III and D. Hou, "Filtering for protective relays," *19th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, Oct. 1993.
- [5] G. Benmouyal and S. Chano, "Characterization of phase and amplitude comparators in uhs directional relays," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 646–653, May 1997.
- [6] A. Sirisha and S. Bhide, "Incremental quantities based relays," in *2014 International Conference on Power, Automation and Communication (INPAC)*, Oct 2014, pp. 27–32.
- [7] G. Benmouyal and J. Roberts, "Superimposed quantities: Their true nature and their application in relays," in *26th Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, WA, October 1999.
- [8] G. Benmouyal, "Amplitude-independent comparators for uhs directional relays," in *ixth International Conference on Developments in Power System Protection (Conf. Publ. No. 434)*, Mar 1997, pp. 78–82.
- [9] B. Kasztenny, I. Voloh, and E. Udren, "Rebirth of the phase comparison line protection principle," in *59th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, April 2006.
- [10] T. Hinge and S. Dambhare, "Secure phase comparison schemes for transmission-line protection using synchrophasors," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 2045–2054, Aug 2015.
- [11] Y. Xue, D. Finney, and B. Le, "Charging current in long lines and high-voltage cables-protection application considerations," in *39th Annual Western Protective Relay Conference*, October 2012.
- [12] H. J. Altuve and E. O. Schweitzer, *Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems*. Pullman, USA: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2010.
- [13] A. G. Phadke and J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. New York, USA: Springer Science & Business Media, 2008.