

Proteção de Linhas Baseada na Comparação de Fases: Uma Análise da Aplicação de Correntes Incrementais no Domínio do Tempo

Eduardo J. Leite Jr., Felipe V. Lopes, e Kleber M. Silva

Resumo—Apresenta-se neste trabalho um estudo da aplicação de componentes incrementais na proteção de linhas de transmissão baseada na comparação de fases. Os estudos se baseiam na análise de diversas condições de faltas e na comparação das atuações da proteção quando utilizados como sinais de entrada elementos de fase, de sequência e incrementais. O software *Alternative Transients Program* (ATP) é utilizado para simular faltas em uma linha de transmissão de 500 kV/60Hz de 200 km de comprimento, considerando diferentes valores de *Source-to-line Impedance Ratio* (SIR), carregamento e parâmetros de falta. Dos resultados obtidos, conclui-se que o tempo de resposta do algoritmo quando utilizadas componentes incrementais se assemelha ao tempo de resposta quando utilizada a componente de sequência negativa, porém com seletividade de fases.

Palavras-chaves—Comparação de fase, elementos incrementais de corrente, proteção direcional, proteção no domínio do tempo.

I. INTRODUÇÃO

LINHAS de transmissão (LT) desempenham um papel importante em sistemas elétricos de potência, pois permitem a transmissão de energia das usinas de geração para os consumidores. Quanto maior a LT, maior é a sua susceptibilidade à ocorrência de faltas, devido ao fato de estarem mais expostas às intempéries climáticas e ambientais. Neste contexto, a detecção rápida de faltas é essencial para a proteção do sistema de potência, o que tem motivado vários estudos para o desenvolvimento de algoritmos de proteção que sejam simples, rápidos, seguros e eficazes. Alguns desses algoritmos se baseiam na comparação de correntes nos terminais da linha, como, por exemplo, a proteção diferencial [1]–[3].

A proteção diferencial consiste em uma forma amplamente utilizada para viabilizar a proteção unitária de LTs. Entretanto, este tipo de proteção requer investimentos na infraestrutura dos canais de comunicação que permitem o intercâmbio de pacotes de dados entre os terminais da LT com medições de tensão e corrente, além de outras informações como dados de sincronização. Uma outra solução capaz de prover a proteção unitária de LTs é a proteção baseada na comparação de fases, a qual é normalmente referenciada em inglês como *Phase Comparison* (PC).

Este trabalho teve apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Eduardo Leite Jr. é aluno de Mestrado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB), 70910-900 Brasília-DF, Brasil (e-mail: eduardoleite@aluno.unb.br).

Felipe Lopes e Kleber Silva são professores do Departamento de Engenharia Elétrica da UnB (e-mail: felipevlopes, klebermelo@unb.br).

A proteção PC foi bastante usada em décadas passadas nos relés de proteção estáticos analógicos. Atualmente, com a possibilidade de sua implementação em relés numéricos, essa função ressurgiu como uma função promissora para aplicações de proteção no domínio do tempo [1], visto que ela não depende dos parâmetros da LT e requer menor investimento nos sistemas de comunicação. De fato, apenas sinais lógicos "on/off" são transmitidos de um terminal para o outro, evitando a necessidade de canais com grande largura de banda.

Vale ressaltar que as questões relacionadas com a estabilidade dos sistemas elétricos de potência também têm motivado a evolução dos métodos de proteção no sentido de encontrar algoritmos mais rápidos [3], pois quão mais rapidamente as faltas são isoladas, menores os riscos de perda de estabilidade. Da literatura, sabe-se que as funções de proteção tradicionais se baseiam na análise de fasores fundamentais, os quais são estimados a partir do processamento digital de conjuntos de amostras contidas em janelas de dados com tamanhos que variam normalmente de um a dois ciclos [3]. Por isso, a maioria dos dispositivos de proteção baseados em componentes fundamentais têm um atraso intrínseco, visto que os fasores estimados só apresentam valores corretos após o período de transição da janela de dados, ou seja, quando a janela de dados utilizada pelos algoritmos de estimação de fasores se encontra totalmente no período de falta [3], [4]. Desta forma, nos últimos anos, várias funções de proteção aplicadas do domínio do tempo têm sido desenvolvidas, despertando o interesse das concessionárias de energia elétrica, especialmente por não requererem o processo de estimação de fasores.

Em [3], os princípios de elementos de proteção de alta velocidade no domínio do tempo são reportados, os quais podem alcançar tempos de atuação da ordem de poucos milissegundos. Em [1] é apresentada a função PC analisada neste trabalho. Uma vez que essas técnicas não empregam estimação de fasores, os tempos de atuação são reduzidos significativamente, sem comprometer a confiabilidade da proteção. Dentre os métodos de proteção de alta velocidade no domínio do tempo abordados nos estudos mais recentes, destaca-se o uso de grandezas incrementais com o objetivo de analisar separadamente o circuito puro de falta e obter, portanto, informações menos influenciadas pelas características do sistema de potência. Embora em algumas aplicações baseadas em elementos incrementais seja necessário uso de filtros adicionais devido aos transitórios causados pela ocorrência da falta, espera-se que o uso desses elementos torne os métodos atuais mais robustos, confiáveis e sensíveis [3].

Neste trabalho, apresenta-se um estudo sobre o desempenho da função PC quando aplicada usando correntes incrementais do sistema elétrico de potência. Basicamente, a função PC é avaliada para diversos cenários de falta, considerando como sinais de entrada grandezas de fase, de sequência e elementos incrementais. Para realizar as análises propostas, os tempos de atuação obtidos em cada caso são comparados, destacando as potencialidades do uso de componentes incrementais na proteção de LTs baseada na comparação de fases.

II. PROTEÇÃO DE LINHAS POR COMPARAÇÃO DE FASE

A. Fundamentos

Para um melhor entendimento dos fundamentos da proteção PC, considera-se o sistema elétrico de potência ilustrado na Fig. 1. Basicamente, a comparação de fases se fundamenta na diferença angular entre as correntes do terminal emissor e receptor. Considerando as polaridades dos transformadores de corrente (TCs) conforme ilustrado na Fig. 1, idealmente, $\hat{I}_S$ e $\hat{I}_R$ têm polaridades opostas na ocorrência de faltas externas ou em condições normais, ou seja, $\angle \hat{I}_S - \angle \hat{I}_R = 180^\circ$. Por outro lado, $\hat{I}_S$ e $\hat{I}_R$ têm a mesma direção quando da ocorrência de faltas internas, resultando em $\angle \hat{I}_S - \angle \hat{I}_R = 0^\circ$. Essas defasagens podem ser observadas na Fig. 2(b), na qual são apresentadas as formas de onda no tempo das correntes $i_s(t)$ e $i_r(t)$. Destaca-se que o efeito capacitivo da LT ocasiona uma defasagem entre $i_s(t)$ e $i_r(t)$ e, por isso, neste trabalho, a corrente capacitiva é removida antes da comparação das fases das correntes para garantir uma maior segurança do algoritmo [2].

B. Aplicação no Domínio do Tempo

Recentemente, tem-se verificado um aumento no número de trabalhos relacionados à aplicação da proteção por comparação de fase. Em [2] os autores usam o princípio da proteção PC com fasores fundamentais de corrente. Todavia, como mencionado anteriormente, implementar algoritmos usando fasores pode não ser vantajoso em termos de tempo de atuação. Dessa forma, alguns outros trabalhos apresentaram a comparação de fases usando grandezas instantâneas.

Em [1] é apresentada uma aplicação do uso das correntes instantâneas na proteção PC, algoritmo este que é objeto de estudo do presente trabalho. Quando empregada no domínio do tempo, a função PC realiza a análise dos valores modulados das correntes instantâneas por meio de uma porta lógica AND. A modulação do sinal é realizada de acordo com a

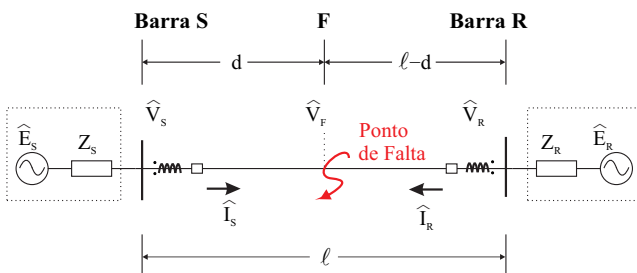


Fig. 1. Sistema de potência analisado.

polaridade da amostra dos sinais monitorados, de forma que, para valores positivos, o sinal modulado recebe valor positivo unitário e, para valores negativos, o sinal modulado recebe valor nulo. Assim, a comparação entre os sinais modulados das correntes em ambos os terminais é realizada por meio de uma porta lógica AND conforme (1), retornando valores positivos unitários apenas quando ambos os sinais forem positivos.

$$i_{AND}(t) = \text{AND}[i_{mod_s}(t), i_{mod_r}(t)] \quad (1)$$

Apresentam-se na Fig. 2(c) os sinais modulados $i_{mod_s}(t)$ e $i_{mod_r}(t)$. Para curtos externos ou em condições normais, as correntes se encontram praticamente em contra-fase, de forma que, associando $i_{mod_s}(t)$ e $i_{mod_r}(t)$ com uma porta lógica AND, tem-se uma saída com valor nulo ou pequenos pulsos a depender da defasagem causada pelo efeito capacitivo da LT (ver Fig. 2(d)). Por outro lado, para curtos internos à LT, as correntes ficam praticamente em fase e, portanto, a saída da porta lógica AND apresenta pulsos largos. Em [1], propõe-se que, se a saída da porta lógica AND permanecer em nível alto ativo durante um período maior que um quarto de ciclo, tem-se a indicação de um curto interno (ver Fig. 2(e)). Neste trabalho, a duração do pulso positivo será chamada de $\psi(t)$.

C. Sinais de Entrada

A existência da corrente capacitiva causa uma mudança de fase nas correntes medidas nos terminais da LT, afetando o princípio da comparação de fases [1]. Por essa razão, as correntes capacitivas podem sensibilizar os algoritmos mesmo sem a ocorrência de faltas, pois são enxergadas como correntes entrando na LT. Essa defasagem causada pelo efeito capacitivo pode ser amenizada por meio da remoção, no domínio do tempo, da corrente capacitiva $i_C(t)$ que flui pelas capacitâncias do modelo π -nominal da LT. Essa remoção é realizada usando:

$$i_C(t) = \frac{C}{2} \cdot \frac{du(t)}{dt}, \quad (2)$$

em que C é a capacitância da LT e $u(t)$ é a tensão na barra monitorada [5]–[7].

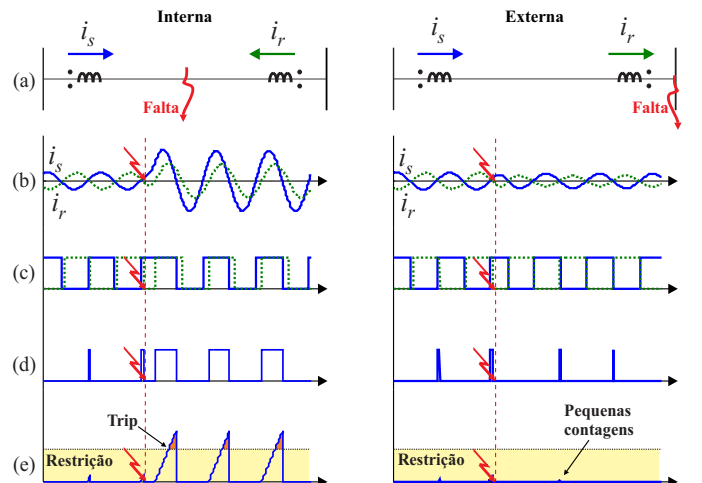


Fig. 2. Princípios da comparação de fase: (a) Falta interna (figura à esquerda) e externa (figura à direita); (b) Sinais instantâneos; (c) Sinais modulados; (d) Saída da porta lógica AND; (e) Contagem da largura do pulso AND.

As correntes corrigidas $i_s(t)$ nos terminais emissor e receptor são, portanto, calculadas usando:

$$i_{s,s}(t) = i_s(t) - (C/2) \cdot (du_s(t)/dt), \quad (3a)$$

$$i_{s,r}(t) = i_r(t) - (C/2) \cdot (du_r(t)/dt), \quad (3b)$$

em que $u_s(t)$ e $u_r(t)$ são as tensões nos terminais emissor e remoto, respectivamente. As correntes $i_{s,s}(t)$ e $i_{s,r}(t)$ são teoricamente livres do efeito capacitivo e serão usadas como sinais de entrada para as análises propostas neste trabalho.

Em [3] são apresentados métodos de proteção no domínio do tempo dentre os quais consta uma função de proteção direcional baseada na análise de elementos incrementais. Em teoria, a utilização de elementos incrementais torna os algoritmos mais robustos às características do sistema elétrico de potência, principalmente às condições de carregamento. Neste trabalho, considerar-se-á o cálculo de elementos incrementais conforme reportado em [3], usando:

$$\Delta i_s(t) = i_s(t) - i_s(t - p \cdot N \cdot \Delta t), \quad (4)$$

onde p é o um número arbitrário de ciclos, N é o número de amostra por ciclo e Δt é o período de amostragem. Neste trabalho, utilizou-se $p = 2$ e $N = 256$ amostras por ciclo.

O uso de (4) consiste basicamente na aplicação do teorema da superposição, no qual, idealmente, o circuito equivalente com falta é decomposto em um de pré-falta e em um puro de falta. Portanto, os sinais do circuito puro de falta podem ser obtidos pela subtração das grandezas do circuito de pré-falta dos sinais do com falta, minimizando os efeitos do carregamento do sistema [3], [8], [9]. Neste contexto, cabe frisar que, para fins de aplicação prática do algoritmo baseado em elementos incrementais, deve-se assegurar que a proteção atue dentro da janela de tempo utilizada para o cálculo de $\Delta i_s(t)$, conforme (4). Assim, quando a amostra $i_s(t - p \cdot N \cdot \Delta t)$ entra no período de falta, os valores obtidos deixam de ser válidos e, portanto, no caso de não atuação da função de proteção, outros elementos não-incrementais devem ser ativados.

Além dos elementos de fase, também são consideradas grandezas de sequência no domínio do tempo [10]. Em aplicações no domínio da frequência, o operador a da matriz de Fortescue possui valor $a = 1 \angle 120^\circ$ [11], o qual pode ser representado no domínio do tempo como um atraso equivalente a $2T/3$, sendo T o período fundamental. De forma análoga, a^2 pode ser representado como um atraso no tempo de $T/3$, conforme reportado em [10].

Em [1], propõe-se também o uso de um elemento misto $i_{s,12}(t)$. Esse elemento é composto por uma parcela da corrente de sequência positiva e por uma parcela da corrente de sequência negativa, sendo calculado por:

$$i_{s,12}(t) = i_{s,1}(t) + K \cdot i_{s,2}(t), \quad (5)$$

sendo $K = 0.2$.

A utilização da componente mista permite a identificação de faltas simétricas, para as quais, em condições ideais de equilíbrio do sistema monitorado, não existe a componente de sequência negativa. Portanto, uma vez que o elemento misto possui parcelas das componentes de sequência positiva e negativa, torna-se possível sensibilizar a proteção tanto para faltas simétricas quanto para faltas assimétricas [1].

III. SISTEMA TESTE E SIMULAÇÕES

O sistema teste analisado é o mesmo ilustrado na Fig. 1 e consiste em uma LT de 500 kV/60 Hz com 200 km de extensão que conecta dois circuitos equivalentes de Thévenin, os quais representam os sistemas conectados nas barras S e R. Os parâmetros do sistema são apresentados nas Tabelas I e II.

Observa-se na Tabela II que a impedância do equivalente de Thévenin no terminal emissor Z_S é multiplicada pelo SIR [12], o qual, quando não mencionado, terá valor padrão de 0,1. As fontes de Thévenin são corretamente ajustadas para obter as tensões $\hat{V}_S = 1 \angle 0^\circ$ pu e $\hat{V}_R = 1 \angle \delta$ pu, sendo δ o ângulo de carregamento. Os curto-circuitos simulados foram: monofásico AT; bifásico BC; bifásico com o terra BCT; e trifásico ABC. Para os casos em que não se mencionou o valor da resistência de falta, por padrão, foram simulados curtos francos. Na apresentação dos resultados, a seguinte notação foi usada para ψ : os subscritos A, B e C representam os valores correspondentes às grandezas das fases A, B e C, respectivamente; os subscritos 1, 2 e 12 representam as grandezas de sequência positiva, negativa e modo misto, respectivamente.

IV. RESULTADOS E ANÁLISES

Para analisar o desempenho da proteção PC em diferentes condições de falta, apresentam-se na Tabela III os seus tempos de atuação para alguns casos selecionados dentre os simulados. Deve-se frisar que os tempos de atuação apresentados não incluem o atraso do canal de comunicação, o qual, para a LT analisada de 200 km, seria da ordem de 2 ms assumindo o uso de cabos *Optical Fibre Ground Wire* (OPGW) [13].

Foram avaliados os tipos de faltas mencionados anteriormente com a variação dos seguintes parâmetros: localização d da falta em pu com relação à barra S; ângulo de incidência θ ; SIR do equivalente do terminal emissor; ângulo de carregamento δ do sistema; e a resistência de falta R_F .

TABELA I
PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO.

Dados Gerais			
Tensão: 500 kV / Comprimento da Linha ℓ : 200 km			
Parâmetros Elétricos da Linha			
Sequência	$R(\Omega/km)$	$X(\Omega/km)$	$\omega C(\mu\Omega/km)$
Zero	0.4930	1.339	2.890
Positiva	0.0186	0.267	6.124

TABELA II
DADOS DOS EQUIVALENTES DE THÉVENIN.

Componente	Variável	Valor
Impedância Z_S	$R_1 + jX_1 (\Omega)$	$(3.72 + j53.40) \times \text{SIR}$
	$R_0 + jX_0 (\Omega)$	$(98.6 + j267.8) \times \text{SIR}$
Impedância Z_R	$R_1 + jX_1 (\Omega)$	$3.72 + j53.40$
	$R_0 + jX_0 (\Omega)$	$98.6 + j267.8$

Da Tabela III, observa-se que a sensibilidade da função PC para variações de d influenciaram no tempo de atuação, porém com pouca relevância quando comparado às alterações impostas pelas outras variáveis. Observa-se também que o elemento misto foi sensibilizado em praticamente todos os casos simulados, muito embora sua utilização por si só não permita a seleção da fase com falta.

A influência da variação do SIR para um curto AT não sólido pode ser ilustrada a partir dos casos 5 e 6 apresentados na Tabela III. Observou-se que, em condições de elevada impedância da fonte, o algoritmo baseado na corrente de fase atua com tempo próximo a um ciclo e meio, valor este relativamente alto quando comparado aos resultados obtidos para o

elemento incremental de corrente, o qual permanece atuando com segurança, conforme visualizado na Fig. 3. O elemento incremental isola idealmente a componente da corrente pura de falta e, portanto, embora a contribuição para o curto seja menor para um elevado SIR, esta contribuição ainda é suficiente para sensibilizar a proteção PC. É importante ressaltar que, embora o elemento de fase e o elemento misto tenham sido sensibilizados, a largura do pulso diminuiu consideravelmente (ficando em torno de 5 ms), evidenciando a pouca segurança da função PC quando baseada apenas nessas componentes durante condições de *weak infeed*.

Na Fig. 4 são apresentadas as contagens dos pulsos para os Casos 1 e 2. Considerando os limites práticos de operação da

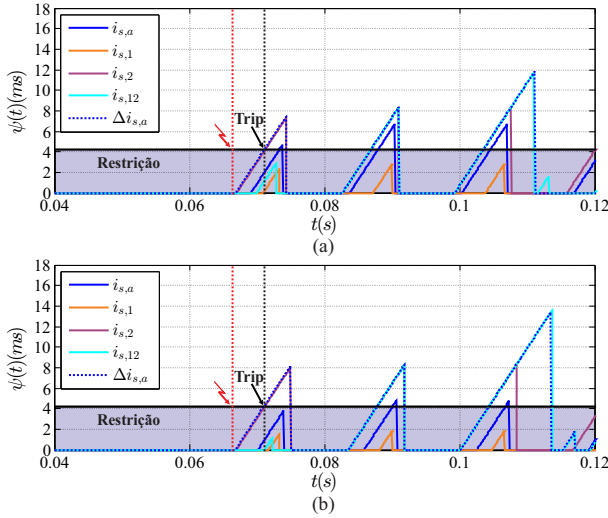


Fig. 3. Influência do SIR: (a) Caso 5; (b) Caso 6;

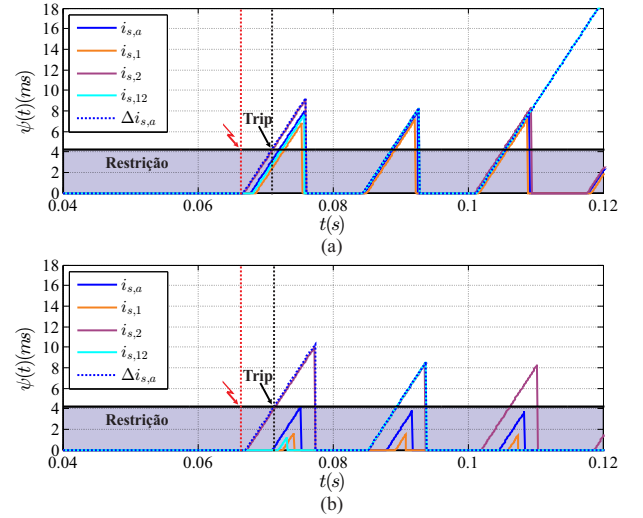


Fig. 4. Influência do ângulo δ : (a) Caso 1; (b) Caso 2;

TABELA III
RESULTADOS DA ANÁLISE PARA OS CASOS SELECIONADOS.

Caso	Tipo	d	$\theta(^{\circ})$	SIR	$\delta(^{\circ})$	$R_F(\Omega)$	Trip (ms)								
							$i_{s,a}$	$i_{s,b}$	$i_{s,c}$	$i_{s,1}$	$i_{s,2}$	$i_{s,12}$	$\Delta i_{s,a}$	$\Delta i_{s,b}$	$\Delta i_{s,c}$
1	AT	0,5	90,0	0,1	-3,0	0	5,67	-	-	6,51	4,69	5,53	4,55	-	-
2	AT	0,5	90,0	0,1	-45,0	0	8,89	-	-	-	5,11	8,40	4,90	-	-
3	AT	0,1	90,0	0,1	-45,0	0	-	-	-	-	4,76	6,72	4,62	-	-
4	AT	0,9	90,0	0,1	-45,0	0	7,21	-	-	-	5,39	9,24	4,97	-	-
5	AT	0,5	90,0	0,1	-10,0	50,0	6,93	-	-	-	4,83	6,65	4,69	-	-
6	AT	0,5	90,0	1,0	-10,0	50,0	23,73	-	-	-	4,76	7,49	4,62	-	-
7	AT	0,5	0	0,1	-10,0	5,0	8,19	-	-	-	6,72	7,84	6,72	-	-
8	AT	0,5	45,0	0,1	-10,0	5,0	19,04	-	-	20,3	18,34	18,9	18,34	-	-
9	AT	0,5	0	1,0	-10,0	5,0	9,87	-	-	-	6,09	6,09	6,16	-	-
10	BC	0,5	90,0	0,1	-3,0	0	-	6,58	20,65	22,82	11,62	12,04	-	6,09	20,65
11	BC	0,5	90,0	0,1	-45,0	0	-	9,8	54,39	25,76	14,28	15,4	-	8,68	21,35
12	BCT	0,5	90,0	0,1	-3,0	0	-	7,28	20,37	22,75	12,81	12,67	-	7,28	20,30
13	BCT	0,5	90,0	0,1	-45,0	0	-	10,78	54,18	25,62	14,98	15,75	-	9,38	21,0
14	ABC	0,5	90,0	0,1	-3,0	0	5,39	9,66	19,18	5,88	-	5,25	4,55	9,52	19,11
15	ABC	0,5	90,0	0,1	-45,0	0	7,35	12,74	53,48	24,99	-	7,0	4,76	11,41	20,23

LT, em inglês conhecidos como *line loadability* [11], adotou-se como ângulo máximo de carregamento $\delta = -45^\circ$. Nesta condição de carregamento, pode-se observar na Fig. 4(b) que, para correntes de fase e de sequência positiva, o algoritmo não perdeu a sensibilidade, mas teve um acréscimo no tempo de atuação próximo a 57% em relação ao tempo de atuação para carregamento baixo apresentado na Fig. 4(a). Esse atraso adicional pode se tornar ainda maior a medida que se eleva o carregamento até a perda total de sensibilidade do algoritmo.

Outro ponto que deve ser considerado sobre as condições de carregamento é a influência do SIR. No Caso 6 pode-se observar que, embora o carregamento não esteja próximo a valores máximos práticos de operação, o tempo de atuação foi elevado com relação ao tempo de atuação para carregamento e valores de SIR baixo, evidenciando que o aumento do carregamento pode influenciar de forma mais ou menos relevante, a depender dos valores de SIR. Por outro lado, as componentes de sequência negativa, mista e o elemento incremental continuaram atuando em menos de meio ciclo com um acréscimo no Caso 2 de 7% com relação ao Caso 1. Do mesmo modo, conforme esperado, a corrente de sequência negativa se mostrou robusta ao carregamento.

Assim como para a sequência negativa, as componentes incrementais também devem ser idealmente imunes ao carregamento, visto que o circuito puro de falta não possui fontes [3], [8]. Portanto, elementos incrementais e de sequência negativa devem ter desempenho adequado para condições de elevado SIR e para carregamentos elevados. Além disso, da Fig. 4, nota-se que, mesmo em situações de *outfeed*, o elemento incremental se mostra robusto, mantendo sua capacidade de seleção de fases na proteção da LT. Embora o elemento de sequência negativa e o elemento misto continuem atuando, seria necessário um algoritmo auxiliar para seleção de fase.

Observou-se nos casos 7 e 8 apresentados na Tabela III que o algoritmo teve seu desempenho afetado com a mudança do ângulo de incidência da falta. Na Fig. 5, apresentam-se os valores dos contadores durante a contagem da largura dos pulsos de saída da porta AND para esses dois casos. Sabe-

se que a componente CC de decaimento exponencial tem relação direta com o ângulo de incidência de falta e, por esta razão, influencia no desempenho do algoritmo, especialmente para casos de componentes CC de decaimento exponencial negativas. Na literatura, existem soluções para remoção da componente CC de decaimento exponencial, as quais não foram avaliadas neste trabalho. Ainda assim, espera-se que a remoção da componente CC resulte em uma resposta mais rápida do algoritmo.

As Figs. 6 e 7 apresentam os resultados obtidos para os casos 10 e 11 (curto bifásico) e 14 e 15 (curto trifásico), respectivamente. Para o curto bifásico, observou-se que os elementos de sequência não foram eficientes, enquanto que os elementos incrementais apresentaram respostas coerentes com as esperadas. Com o aumento do carregamento (ver Fig. 6(b)), observou-se que o tempo de atuação foi maior, porém a atuação dos elementos incrementais continuou sendo a mais rápida, mantendo a segurança na proteção. Um comportamento semelhante ocorreu para o curto trifásico, para o qual os elementos de sequência positiva e misto atuaram de forma satisfatória, porém, sem possibilitar a seleção da fase com falta. Os elementos incrementais novamente resultaram em um melhor desempenho e, uma vez que a contribuição de falta é maior para o curto trifásico, o aumento do carregamento não causou um atraso significativo na atuação da proteção.

Com o objetivo de apresentar o comportamento geral da função PC em relação a todos os sinais de entrada considerados nesse trabalho, foram simulados 7488 casos de faltas AT considerando um SIR fixo de 0,1 e variando o ângulo δ , o ângulo de incidência θ , distância da falta d e resistência de falta R_F . A Fig. 8 apresenta o polígono de frequência acumulada para essa base de dados.

Do polígono de frequência, observa-se que praticamente 50% das faltas simuladas foram detectadas em menos de 8 ms (aproximadamente meio ciclo) e todas as faltas simuladas foram detectadas com menos de um ciclo e meio para as componentes de sequência negativa e componente incremental de fase. Constataram-se ainda desempenhos semelhantes do

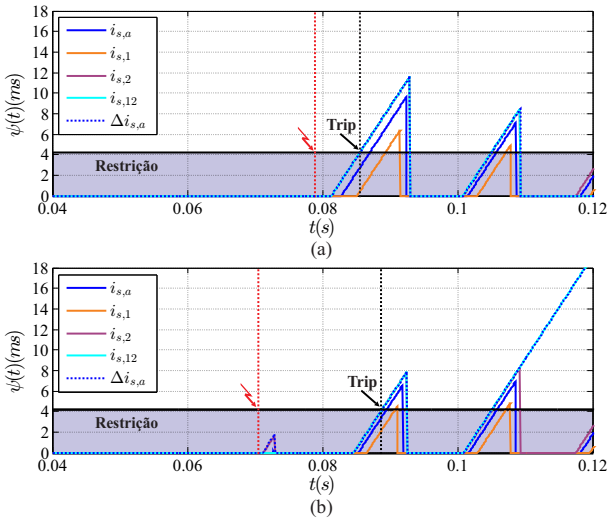


Fig. 5. Influência do instante de incidência: (a) Caso 7; (b) Caso 8;

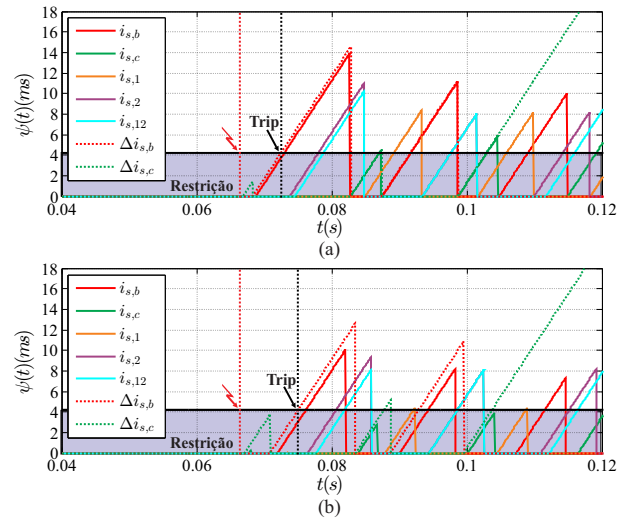


Fig. 6. Faltas Bifásicas sem o terra: (a) Caso 10; (b) Caso 11.

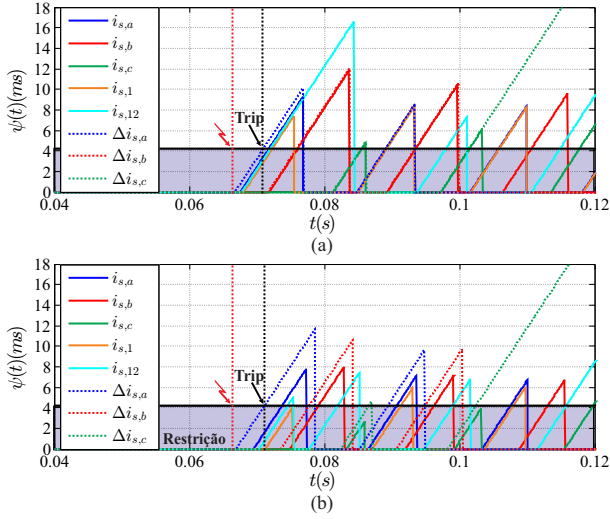


Fig. 7. Falta Trifásicas sem o terra: (a) Caso 14; (b) Caso 15.

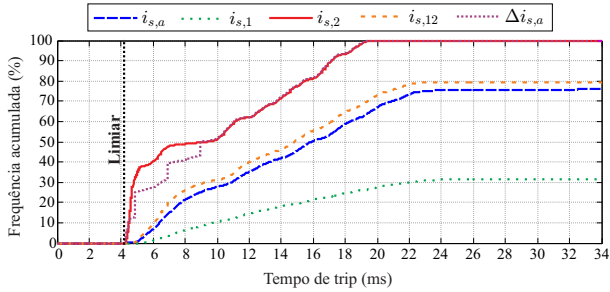


Fig. 8. Polígono de frequência acumulada dos tempos de trip para faltas AT.

elemento incremental e do elemento de sequência negativa. Por outro lado, o elemento de sequência positiva, que é mais influenciado pelas condições de carregamento do SEP, atuou somente em pouco mais de 30% dos casos. Vale ressaltar que esse cenário pode mudar caso seja considerado um valor elevado de SIR.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, analisou-se o desempenho de uma função de proteção de linhas de transmissão baseada na comparação de fases. Das análises realizadas, observou-se que a componente de sequência negativa e a componente incremental obtiveram performances semelhantes, evidenciando a possibilidade do uso de elementos incrementais como entrada da função PC de proteção. A utilização de elementos incrementais, além de melhorar a robustez da proteção em relação ao carregamento, possibilita a seleção da fase defeituosa.

Em praticamente todos os casos simulados o melhor tempo de atuação foi obtido por meio do uso de elementos incrementais. Constatou-se a robustez do algoritmo em cenários severos de carregamento e em elevado valor de SIR, conclusão esta que corrobora com o exposto na literatura. Concluiu-se ainda que o ângulo de incidência de falta pode influenciar consideravelmente no comportamento do algoritmo tendo em vista que, para componentes CC de decaimento exponencial negativas, o algoritmo apresentou baixa eficiência.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] T. Hinge and S. Damhare, "Secure phase comparison schemes for transmission-line protection using synchrophasors," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 2045–2054, Aug 2015.
- [3] 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.
- [4] Y. Guo, M. Kezunovic, and D. Chen, "Simplified algorithms for removal of the effect of exponentially decaying dc-offset on the fourier algorithm," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 3, pp. 711–717, July 2003.
- [5] S. Damhare, S. Soman, and M. Chandorkar, "Adaptive current differential protection schemes for transmission-line protection," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1832–1841, Oct 2009.
- [6] X. Deng, R. Yuan, T. Li, W. Liu, Y. Shen, and Z. Xiao, "Digital differential protection technique of transmission line using instantaneous active current: theory, simulation and experiment," *Generation, Transmission Distribution, IET*, vol. 9, no. 11, pp. 996–1005, 2015.
- [7] M. Wen, D. Chen, and X. Yin, "Instantaneous value and equal transfer processes-based current differential protection for long transmission lines," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 1, pp. 289–299, Jan 2012.
- [8] A. Sirisha and S. Bhide, "Incremental quantities based relays," in *Power, Automation and Communication (INPAC), 2014 International Conference on*, Oct 2014, pp. 27–32.
- [9] G. Benmouyal and J. Roberts, "Superimposed quantities: Their true nature and application in relays," in *26th Western Protective Relaying Conference. Spokane Washington*, 1999.
- [10] M. Karimi-Ghartemani and H. Karimi, "Analysis of symmetrical components in time-domain," in *Circuits and Systems, 2005. 48th Midwest Symposium on*, Aug 2005, pp. 28–31 Vol. 1.
- [11] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, 5th ed. USA: CL - Engineering, 2012.
- [12] M. Thompson and A. Somani, "A tutorial on calculating source impedance ratios for determining line length," in *Protective Relay Engineers, 2015 68th Annual Conference for*, March 2015, pp. 833–841.
- [13] 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.