DOI: 10.48011/asba.v2i1.1336

# Uma Metodologia para Estudo dos Efeitos Infeed e Outfeed em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica

Rodrigo César Dantas de Lima\*, Raphael Leite de Andrade Reis\*\*, Núbia Silva Dantas Brito\*\*\*, Karcius Marcelus Colaço Dantas\*\*\*

\* Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPgEE/UFCG (e-mail: rodrigo.lima@ee.ufcg.edu.br)

\*\* Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE (e-mail: raphael.reis@ufrpe.br)

\*\*\* Departamento de Engenharia Elétrica, DEE/UFCG (e-mail: nubia@dee.ufcq.edu.br; karcius@dee.ufcq.edu.br)

Abstract: A methodology for analyzing the impacts of infeed and outfeed effects on electric power transmission lines is presented in this work. The methodology was applied to a 230 kV/60 Hz system, in which several fault scenarios were simulated. The results show that the infeed and outfeed effects may lead to an underreach or overreach relay operation, respectively. It was also found that the fault location can further aggravate these effects and that the infeed effect is more severe for the protection system.

Resumo: Uma metodologia para análise dos impactos dos efeitos infeed e outfeed em linhas de transmissão de energia elétrica é apresentada neste trabalho. A metodologia foi aplicada a um sistema de  $230~\rm kV/60~Hz$ , no qual foram simulados vários cenários de faltas. Os resultados obtidos demonstraram que os efeitos infeed e outfeed podem levar o relé a uma operação de subalcance ou sobrealcance, respectivamente. Constatou-se também, que a localização da falta pode agravar ainda mais esses efeitos e que o efeito infeed é mais severo para o sistema de proteção.

Keywords: Infeed, transmission line, outfeed, distance protection, overreach, underreach. Palavras-chaves: Infeed, linhas de transmissão, outfeed, proteção de distância, sobrealcance, subalcance.

# 1. INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) consiste de um sistema de grande porte composto por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte, os quais estão conectados por meio da malha de transmissão do SIN, constituída por mais de 140.000 km de linhas de transmissão (LT) (ONS, 2018). Em virtude das longas distâncias e por estarem sujeitas às mais diversas intempéries, as LT constituem os componentes dos Sistemas Elétricos de Energia (SEE) mais susceptíveis aos distúrbios, os quais devem ser eliminados o mais rápido possível, de modo a evitar desligamentos prolongados dos consumidores, perda da estabilidade do SEE e danos aos equipamentos.

Para proteger as LT dos distúrbios, a proteção mais utilizada atualmente é a proteção de distância, tendo em vista a sua simplicidade de parametrização e principalmente, a sua viabilidade econômica (SILVA, 2018). A proteção de distância tradicional baseia-se no uso de comparadores, os quais utilizam os sinais de tensão e corrente fornecidos pelos transdutores para obter a impedância aparente me-

dida pelo relé e efetuar a comparação desse valor com a impedância do trecho da LT a ser protegida.

Como o relé de distância tradicional compara as grandezas do SEE "vistas" de apenas um terminal da LT, pode haver redução da eficácia do sistema de proteção em algumas situações, dentre as quais destacam-se aqui os efeitos infeed e outfeed, os quais ocorrem quando as LT são aproveitadas para fornecer conexões intermediárias a outros componentes do SEE. Como consequência, esses efeitos interferem na medida da impedância aparente, podendo levar o relé a atuar de maneira errônea, conforme resumido a seguir:

- O efeito infeed torna o relé subalcançado, ou seja, o valor da impedância medida pelo relé de distância é maior do que o seu valor real. Neste caso, uma falta que ocorre na zona 1 será detectada na zona 2, devido ao subalcance. Como consequência, a proteção de distância atuará no tempo da zona 2, quando deveria atuar instantaneamente;
- O efeito *outfeed* torna o relé sobrealcançado, ou seja, o valor da impedância medida pelo relé de distância é menor do que o seu valor real. Neste caso, uma falta que ocorre na zona 2 será detectada na zona 1, devido

ao sobrealcance. Como consequência, a proteção de distância atuará instantaneamente, quando deveria esperar o tempo da zona 2.

Análise do estado da arte mostrou que esse é um tema atual e importante. O desempenho dos esquemas de proteção de distância considerando a LT com derivação e os efeitos infeed e outfeed foram avaliados em BÁEZ et al. (2006). A metodologia utilizada baseou-se no estabelecimento de parâmetros de proteção ideais. Por outro lado, uma metodologia adaptativa para o relé de distância baseada na estimativa da impedância aparente, assim como uma metodologia para avaliação do desempenho de proteção em LT, ambas considerando apenas a influência do efeito infeed, foram reportadas em NUNES and BRETAS (2017) e LOPES et al. (2017), respectivamente.

O efeito da corrente de *infeed* na atuação do elemento mho, bem como a apresentação da solução para evitar o subalcance decorrente da mesma foi reportado nos trabalhos de PAZOKI et al. (2014); THOMPSON and HEIDFIELD (2015) e ABBOUD et al. (2019). Neste último, os autores também relataram que o aumento no número de zonas do elemento mho pode contornar os problemas decorrentes dos efeitos *infeed* e *outfeed*, além de ajudar a aumentar o desempenho, segurança e confiabilidade da proteção da LT e do SEE.

Neste contexto, uma metodologia para análise dos efeitos infeed e outfeed em LT é apresentada neste trabalho. A metodologia foi aplicada a um SEE de 230 kV/60 Hz, no qual foram simulados vários cenários de faltas, e possibilitou um estudo comparativo das funções de proteção de distância. Além disso, a metodologia proposta permite validar funções programadas em outras plataformas por meio de comparações com as estimações realizadas por um software comercial.

# 2. PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

A proteção das LT de energia elétrica é realizada por um sistema constituído de relés, equipamentos e acessórios instalados em seus terminais, os quais devem ser necessários e suficientes para a detecção e eliminação de forma seletiva de todos os tipos de faltas e de outras condições anormais de operação (ONS, 2008). Atualmente, a proteção das LT no Brasil é realizada predominantemente pelos relés de distância, os quais aplicam o algoritmo da função de proteção de distância, que se baseia no princípio da medição da impedância, admitância ou reatância de sequência positiva da LT entre o local onde o relé está instalado e o local de ocorrência da falta, tomando como base as grandezas medidas pelos transformadores de potencial capacitivo (TPC) e transformadores de corrente (TC). A escolha da impedância de sequência positiva deve-se ao fato dela apresentar a distribuição praticamente uniforme ao longo da LT, estar presente em todos os tipos de falta e depender apenas das características dos condutores e da sua distribuição geométrica nas torres (ZIEGLER, 2006).

Matematicamente, o princípio do relé de distância baseiase na aplicação das expressões a seguir (ANDERSON, 1999):

$$Z_{\rm R} = \frac{\hat{V}_{\rm sec}}{\hat{I}_{\rm sec}},\tag{1}$$

$$Z_{R} = hZ_{L1sec} = hZ_{L1} \frac{RTC}{RTP}.$$
 (2)

Sendo:  $Z_R$  a impedância medida pelo relé;  $\hat{V}_{sec}$  a tensão fornecida pelo secundário do TPC;  $\hat{I}_{sec}$  a corrente fornecida pelo secundário do TC; h um percentual variável do comprimento total da LT, o qual depende da zona de proteção;  $Z_{L1sec}$  a impedância de sequência positiva da LT referida ao secundário;  $Z_{L1}$  a impedância de sequência positiva da LT; RTC a relação de transformação do TC; RTP a relação de transformação do TPC.

Os relés de distância apresentam unidades responsáveis pelo cálculo da impedância, considerando a característica da falta. Existem as impedâncias calculadas utilizando as grandezas entre fase e terra e entre fases (CAMPOS et al., 2015). Na Tabela 1 são apresentadas as entradas empregadas para as unidades fase-terra e fase-fase do relé de distância, sendo  $K_0$  o fator de compensação da corrente de sequência zero, calculado conforme a seguir (BLACKBURN, 1998).

$$K_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}},\tag{3}$$

em que  $Z_{L0}$  e  $Z_{L1}$  são, respectivamente, as impedâncias de sequência zero e positiva da LT.

Tabela 1. Sinais de entrada para as unidades fase-terra e fase-fase do relé de distância.

Unidade	Sinais de tensão	Sinais de corrente		
$Z_{AT}$	$\hat{V}_a$	$\hat{I}_a + K_0 \hat{I}_0$		
$\mathbf{Z}_{BT}$	$\hat{V}_b$	$\hat{I}_b + K_0 \hat{I}_0$		
$\overline{Z_{CT}}$	$\hat{V}_c$	$\hat{I}_c + K_0 \hat{I}_0$		
$\overline{Z_{AB}}$	$\hat{V}_a - \hat{V}_b$	$\hat{I}_a - \hat{I}_b$		
$Z_{BC}$	$\hat{V}_b - \hat{V}_c$	$\hat{I}_b - \hat{I}_c$		
$Z_{CA}$	$\hat{V}_c - \hat{V}_a$	$\hat{I}_c - \hat{I}_a$		

A impedância é usualmente representada em um gráfico denominado de Diagrama R-X ou Plano R-X, no qual o eixo das abscissas representa a resistência aparente, R, e o eixo das ordenadas, a reatância aparente, X. O relé de distância deve operar quando a impedância aparente estiver dentro da sua característica de operação (ou região de atuação), que consiste em uma figura geométrica no plano R-X. Diversas figuras geométricas podem ser utilizadas (círculos, retângulos, elipses, etc.). A escolha da característica depende do SEE a ser protegido e das características disponíveis nos relés (ANDERSON, 1999). O formato circular usado nos relés eletromecânicos constituiu a base dos estudos de proteção de distância (Figura 1(a)). Entretanto, com o advento dos relés digitais, a função quadrilateral é a mais utilizada atualmente (Figura 1(b)).

A interpretação das Figuras 1(a) e 1(b) pode ser resumida do seguinte modo: durante a operação normal do SEE, a impedância medida pelo relé será a impedância aparente  $Z_R$ , a qual em regime permanente de pré-falta, será um ponto fora da característica de operação do relé. Na ocorrência de um curto-circuito, a impedância  $Z_R$  desloca do seu valor inicial de pré-falta para dentro da característica de operação do relé e um sinal de trip pode ser acionado

para abertura dos disjuntores. A trajetória da impedância  $Z_R$  consiste em uma sequência de valores, os quais são calculados desde a pré-falta até o valor de regime permanente de falta. O instante em que a falta é identificada é chamado de detecção da falta. O tempo decorrido para que a impedância mude da condição de pré-falta para o valor dentro da zona de proteção do relé é o tempo em que a proteção inicia a operação.

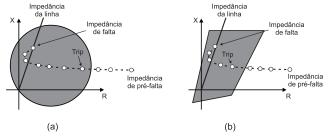


Figura 1. Trajetória de impedância vista pelo relé para o elemento: (a) mho; (b) quadrilateral.

## 3. EFEITOS INFEED E OUTFEED

As LT eventualmente possuem derivações chamadas de taps, as quais são utilizadas para estabelecerem conexões intermediárias de carga ou reforçar o SEE devido à tensões baixas. Esta configuração é conhecida como linhas multiterminais, que apesar de fortalecer o SEE, provoca problemas relativos ao sistema de proteção, principalmente quando há geração à montante dos pontos de tap nas linhas multiterminais (HOROWITZ and PHADKE, 2008).

Para analisar esses efeitos, considere o circuito da Figura 2, para uma falta aplicada no ponto F da LT com três fontes terminais. A impedância medida pelo relé  $R_A$  até o ponto de inserção do tap é  $Z_A$  e a impedância medida pelo mesmo relé do ponto de tap até o ponto de falta é  $Z_F$ . Conforme se vê, há uma contribuição à corrente de falta de cada uma dessas três fontes. Para o relé  $R_A$ , a tensão na barra A se relaciona à corrente da barra A pela Expressão 4 e a impedância vista pelo relé  $R_A$  está descrita na Expressão 5.

$$\hat{E}_A = Z_A \hat{I}_A + Z_F \left( \hat{I}_A + \hat{I}_C \right). \tag{4}$$

$$Z_R = \frac{\widehat{E}_A}{\widehat{I}_A} = Z_A + Z_F \left( 1 + \frac{\widehat{I}_C}{\widehat{I}_A} \right). \tag{5}$$

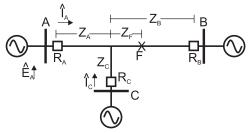


Figura 2. Efeito da corrente *infeed* na configuração de relés de distância.

A corrente  $\hat{I}_C$  é a corrente de contribuição proveniente do tap do SEE, a qual é denominada de: i) infeed se

estiver aproximadamente em fase com  $I_{\rm C}$ , isto é, se for uma contribuição na direção da falta (fazendo com que a corrente medida pelo relé seja menor do que a corrente medida da falta e provocando subalcance, ou seja, um aumento na impedância aparente medida pelo relé) ou ii) outfeed se estiver aproximadamente em oposição de fase com  $\hat{I}_{\rm C}$ , isto é, se a contribuição estiver na direção oposta à alimentação da falta (ocasionando sobrealcance, ou seja, há diminuição da impedância aparente medida pelo relé) (HOROWITZ and PHADKE, 2008). A relação  $\hat{I}_{\rm C}$  é chamada de coeficiente de infeed.

#### 4. METODOLOGIA

Para execução da análise dos efeitos infeed e outfeed, aplicou-se a metodologia apresentada na Figura 3. Inicialmente, o sistema-teste foi modelado no software Alternative Transients Program (ATP), seguido da simulação dos eventos e geração dos arquivos com extensão .PL4. O próximo passo foi executado no software The Output Processor (TOP®), fornecido gratuitamente pela Empresa Electrotek Concepts (CONCEPTS, 2019), no qual realizou-se a leitura dos arquivos .PL4, seguido da seleção dos registros oscilográficos desejados e posterior geração dos arquivos no formato Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE). No software Matrix Laboratory (MATLAB®) foram programadas as características de proteção mho autopolarizada, mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva e a característica quadrilateral auto-polarizada (FERRER and SCHWEITZER, 2010).

A estimação fasorial foi realizada por meio do algoritmo de Fourier de ciclo completo em conjunto com um filtro mímico digital para eliminação da componente CC de decaimento exponencial (PHADKE and THORP, 2009), (BENMOUYAL, 1995).



Figura 3. Metodologia para análise dos efeitos *infeed* e outfeed.

Para distinguir as condições de operação normal e de falta, foram utilizados comparadores de fase, sendo a seleção de fases realizada com base nas saídas da função de classificação de faltas (ADU, 2002). Em seguida, a partir da leitura dos arquivos COMTRADE, avaliou-se a atuação dos comparadores.

Por fim, para possibilitar análises e comparações mais robustas com as técnicas programadas, os registros oscilográficos foram exportados para o software Computer Aided Protection Engineering (CAPE), um software comercial destinado a realizar estudos de proteção de SEE, o qual apresenta modelos digitais reais de relés numéricos.

O sistema-teste baseou-se no sistema proposto em IEEE (2004) para realização de estudos de proteção, apresentado na Figura 4, o qual é composto basicamente por:

- Três LT de 230 kV com 150 km cada uma, sendo duas LT paralelas (LT1 e LT2) e uma LT de circuito simples (LT3);
- Uma LT com 50 km de comprimento (LT4), conectada a 75 km da barra 2 (B2), a qual foi utilizada para realizar os estudos dos efeitos infeed e outfeed;
- Três equivalentes de Thévenin (S1, S2 e S3) conectados às barras 1, 3 e 4, onde o equivalente da barra B4 representa o efeito infeed. Para o efeito outfeed, o equivalente S3 foi substituído por uma carga ( $Z_{s4} = 0,47+j3,39~\Omega/km$ ), conforme apresentado na Figura 5, muito embora o efeito outfeed também pode ser representado pelo mesmo sistema da Figura 4 ao inverter o fluxo de potência.

De modo a avaliar apenas os impactos decorrentes dos efeitos *infeed* e *outfeed*, os sinais de corrente e tensão foram monitorados por TC e TPC ideais, com relação de transformação 2000:5 e 2000:1, respectivamente.

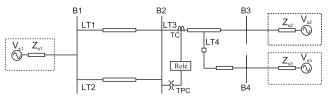


Figura 4. Sistema-teste para realizar estudos com *infeed*.

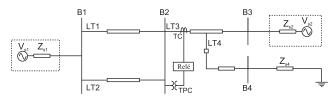


Figura 5. Sistema-teste para realizar estudos com *outfeed*.

## 5. ESTUDOS DE CASO

Os estudos de proteção foram realizados do ponto de vista da linha LT3, cujo sistema de proteção é composto por um disjuntor e um relé instalados na barra B2, considerandose três modos de operação do sistema-teste:

- Linha LT4 desconectada do sistema, ou seja, sem influência dos efeitos infeed e outfeed;
- Linha LT4 conectada ao sistema e equivalente de Thévenin S3 conectado à barra B4, ou seja, efeito infeed:
- Linha LT4 conectada ao sistema e substituição do equivalente S3 pela carga  $Z_{s4}$ , a qual é conectada à barra B4, ou seja, efeito *outfeed*.

Após cada simulação, a operação do relé simulado via  $software~{\rm MATLAB^{\circledR}}$  foi comparada com a operação do relé simulado no  $software~{\rm CAPE},$  assumindo como configurações corretas:

- Zonas 1 e 2 configuradas com 80% e 120% da impedância de sequência positiva da LT3, respectivamente;
- Elemento mho: ângulo de torque de 60°;
- Elemento quadrilateral: alcance resistivo das zonas 1 e 2 de 150  $\Omega$  e 610  $\Omega$ , respectivamente.

Ciente das dificuldades em representar da forma mais realista possível as funções de proteção dos relés, apenas os ajustes de alcance da primeira e segunda zonas, ângulo de torque da característica mho e o alcance resistivo da característica quadrilateral foram adotados como ajustáveis. Parâmetros como inclinação dos elementos de reatância e resistência da característica quadrilateral foram ajustados com valores típicos (FERRER and SCHWEITZER, 2010).

Os resultados obtidos foram separados de acordo com o tipo de falta, resultando em quatro conjuntos de casos: faltas monofásicas, bifásicas, bifásicas-terra e trifásicas. Além do tipo de falta, foram considerados a resistência de falta  $(R_f)$  como sendo igual a 1  $\Omega$  (visando avaliar apenas os efeitos infeed e outfeed, pois o aumento da resistência de falta torna o relé subalcançado, o que pode provocar erros na medição dos relés de distância convencionais (SILVA, 2009)) e localização de falta (d) com diferentes valores. Para isso, a linha LT3 foi dividida em seis pontos durante a modelagem no software ATP, o que possibilitou aplicação das faltas em 25 km, 50 km, 75 km, 100 km, 125 km e 150km. Porém, como a linha LT4 está conectada ao tap de 75 km, há influência dos efeitos infeed e outfeed apenas a partir de 100 km. Os parâmetros de falta adotados neste trabalho são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Características das faltas simuladas.

Parâmetros da simulação	Valores		
Tipo de falta	AT, BT CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT e ABC		
Resistência de falta $(\Omega)$	1		
Localização de falta (km)	100, 125 e 150		

Após a definição dos parâmetros das faltas, 30 faltas foram simuladas. Analisaram-se minuciosamente os seguintes casos para observação dos efeitos *infeed* e *outfeed*, respectivamente: i) falta CAT localizada a 125 km da barra B2 e ii) falta AB localizada a 150 km da barra B2.

As funções de distância ilustradas nas Figuras 6 a 8 representam apenas o elemento mho autopolarizado e quadrilateral, uma vez que o elemento mho polarizado varia dinamicamente com a perturbação (LOPES et al., 2017). A reta na cor preta representa a impedância de sequência positiva da LT e a reta na cor azul, o valor da impedância medida pelo relé. As zonas 1 dos elementos mho e quadrilateral estão representados também na cor preta. As zonas 2 desses mesmos elementos são as regiões pontilhadas.

#### 5.1 Caso 1: Efeito Infeed - Falta CAT

O primeiro caso estudado correspondeu a ocorrência de uma falta do tipo bifásica-terra, localizada a 125 km da barra B2. Na Figura 6 tem-se a atuação do comparador de distância, da qual observa-se que as funções de distância simuladas nos softwares MATLAB® e CAPE foram semelhantes, uma vez que a impedância aparente medida foi de 131, 48 $\angle 95, 83^{\circ}$   $\Omega$  e 131, 42 $\angle 94, 81^{\circ}$   $\Omega,$  respectivamente. Estas impedâncias foram medidas durante três ciclos após a detecção da falta. No entanto, o relé de distância não foi capaz de detectar a falta aplicada na zona 2, pois o efeito infeed tornou-o subalcançado e a falta foi detectada além do limite configurado das zonas de proteção.

Para solucionar o efeito *infeed* no relé de distância, devese manter o alcance da zona 1 como se não existissem

fontes intermediárias, pois na ausência do efeito *infeed*, a operação correta do relé é restaurada. Neste caso, devese calcular o alcance da zona 2 considerando a presença do mesmo (HOROWITZ and PHADKE, 2008). Assim, ao configurar a zona 2 com 150% da impedância de sequência positiva da LT, o relé de distância atuou corretamente, detectando a falta na zona 2, conforme apresentado na Figura 7.

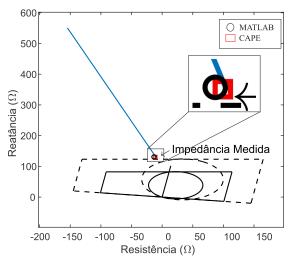


Figura 6. Atuação do relé de distância com efeito *infeed*: falta CAT.

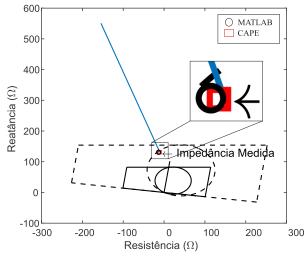


Figura 7. Atuação do relé de distância após solucionar o efeito *infeed*: falta CAT.

## 5.2 Caso 2: Efeito Outfeed - Falta AB

O segundo caso estudado correspondeu a ocorrência de uma falta do tipo bifásica, localizada a 150 km da barra B2. Na Figura 8 tem-se a atuação do comparador de distância, da qual observa-se que as funções de distância simuladas nos softwares MATLAB® e CAPE foram semelhantes, uma vez que a impedância aparente medida foi de  $76,57\angle 78,13^{\circ}$   $\Omega$  e  $76,48\angle 78,05^{\circ}$   $\Omega$ , respectivamente. No entanto, o relé de distância mediu uma impedância menor, de modo que uma falta na zona 1 foi detectada em vez de uma falta na zona 2, o que faz com que o relé de

distância atue instantaneamente, quando deveria aguardar o tempo da zona 2 (essa espera poderia ser necessária para que outro relé mais próximo da falta viesse a atuar, caso existisse).

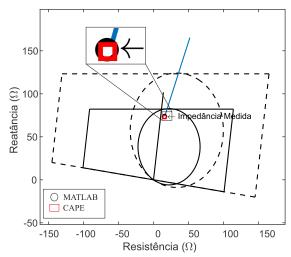


Figura 8. Atuação do relé de distância com efeito *outfeed*: falta AB.

Diferentemente do efeito *infeed*, no efeito *outfeed* não é possível minimizar a influência causada no relé de distância alterando-se o valor das zonas de proteção, pois os elementos de distância medem uma impedância com valor dentro da zona 1. Segundo recomendado na literatura, não se pode alterar o seu valor (HOROWITZ and PHADKE, 2008). Portanto, são necessários estudos mais aprofundados, pois a partir da análise do estado da arte realizada não se obteve informações sobre como é possível solucionar o sobrealcance provocado pelo efeito *outfeed*.

Um resumo de todos os casos avaliados é apresentado na Tabela 3, cuja análise minuciosa dos resultados mostrou o seguinte:

- Para o cenário sem a presença dos efeitos infeed e outfeed, o relé de distância atuou corretamente e localizou as faltas próximo do local em que foram aplicadas;
- Os efeitos *infeed* e *outfeed* inserem erros na medição da impedância aparente, independente do tipo de falta aplicada:
- Com relação ao efeito *infeed*, observou-se que os elementos de distância medem impedâncias maiores, isto é, o relé de distância fica subalcançado. Isso acontece porque a corrente de *infeed* flui no circuito monitorado, estando aproximadamente em fase com a corrente do relé;
- Em relação ao efeito outfeed, constatou-se que os elementos de distância mediram impedâncias menores, isto é, o relé fica sobrealcançado. Isso acontece porque a corrente de outfeed sai da LT para atender a carga Z<sub>s4</sub>, a qual está conectada à barra B4, ficando por esse motivo em fase contrária com a corrente do relé;
- À medida que o local de aplicação da falta aumenta, os efeitos *infeed* e *outfeed* também aumentam, acarretando em um maior erro relativo (calculado conforme a Equação 6), sendo essa influência mais severa nos casos simulados com efeito *infeed*.

Tabela 3. Resultados obtidos considerando os três cenários de simulação.

Parâmetros da falta		Localização da falta (km)			Erro relativo (%)		
Tipo	d (km)	Sem efeitos	Infeed	Outfeed	Sem efeitos	Infeed	Outfeed
AT	100	100,18	143,33	91,27	0,12	28,89	5,82
AT	125	123,68	190,14	102,43	0,88	43,43	15,05
AT	150	153,20	229,02	105,09	2,13	52,68	29,94
BT	100	99,90	140,03	93,96	0,07	26,69	4,03
BT	125	128,68	182,88	105,44	2,45	38,59	13,04
BT	150	151,70	234,27	111,10	1,13	56,18	25,93
СТ	100	99,05	140,62	94,91	0,63	27,08	3,39
СТ	125	127,32	186,18	105,41	1,55	40,79	13,06
CT	150	153,60	232,58	106,50	2,40	55,05	29,00
AB	100	104,21	137,99	101,79	2,81	25,33	1,19
AB	125	124,37	190,00	96,26	0,42	43,33	19,16
AB	150	154,24	230,64	114,64	2,83	53,76	23,57
BC	100	100,50	138,03	92,95	0,33	25,35	4,70
BC	125	125,70	187,58	104,60	0,47	41,72	13,60
BC	150	153,44	229,04	112,47	2,29	52,69	25,02
CA	100	100,81	139,75	95,07	0,54	26,50	3,29
CA	125	124,52	187,15	103,14	0,32	41,43	14,57
CA	150	148,92	234,84	115,12	0,72	56,56	23,25
ABT	100	100,35	138,63	98,99	0,23	25,75	0,67
ABT	125	123,88	187,40	100,58	0,75	41,60	16,28
ABT	150	151,38	227,59	115,39	0,92	51,73	23,07
BCT	100	100,93	137,69	93,55	0,62	25,13	4,30
BCT	125	124,45	186,51	104,59	0,37	41,01	13,61
BCT	150	149,27	226,46	111,10	0,49	50,97	25,93
CAT	100	100,94	136,13	94,24	0,63	24,09	3,84
CAT	125	125,12	189,87	104,88	0,08	43,25	13,41
CAT	150	150,99	229,54	111,52	0,66	53,03	25,65
ABC	100	102,06	136,23	95,66	1,37	24,15	2,89
ABC	125	126,35	194,24	106,20	0,90	46,16	12,53
ABC	150	150,14	226,82	107,57	0,09	51,21	28,29

$$\epsilon(\%) = \frac{|d - d'|}{l} \cdot 100, \tag{6}$$

sendo de d' os pontos de falta real e estimado, respectivamente <math> e l o comprimento da LT.

## 5.3 Variação do ponto de conexão da linha LT4

Conforme apresentado, a conexão da linha LT4 ao tap de 75 km possibilita à ocorrência dos efeitos infeed e outfeed. Ao simular faltas monofásicas (AT) localizadas a 50 km e 100 km, com a linha LT4 conectada a 25 km e 75 km da barra B2, não houve nenhuma modificação significativa na atuação dos comparadores, conforme pode ser verificado na Tabela 4.

Tabela 4. Mudança do ponto de conexão da linha LT4.

Localização da falta (km)						
LT4: tap de 25 km			LT4: tap de 75 km			
Sem efeitos	Infeed	Outfeed	Sem efeitos	Infeed	Outfeed	
50,49	50,84	50,26	50,51	50,88	50,32	
100,11	142,97	91,04	100,18	143,33	91,27	

## 5.4 Influência da força da fonte

Em proteção de sistemas elétricos, as fontes de tensão são classificadas como fortes ou fracas, dependendo da comparação do valor de sua impedância com os valores

das impedâncias das demais fontes do SEE. O conceito de forte ou fraca está diretamente relacionado a potência de curto-circuito da fonte, a qual indica a sua participação na corrente de curto-circuito quando da ocorrência de uma falta no SEE.

Visando verificar a influência da força das fontes dos equivalentes de Thévenin para os sistemas-testes considerados, foram simuladas faltas monofásicas (AT) localizadas a  $100 \, \mathrm{km}$  da barra B2 e reduzindo as impedâncias de sequência zero e positiva das fontes em 10% e 50%.

Conforme apresentado na Tabela 5, aumentar a força da fonte acarreta no aumento do erro à localização da falta. Entretanto, ao comparar com o primeiro caso simulado da Tabela 3, não há uma mudança significativa na influência dos efeitos *infeed* e *outfeed* na atuação dos comparadores de distância.

Tabela 5. Força da fonte na atuação dos comparadores de distância.

Localização da falta (km)						
Impedâncias 10% menores			Impedâncias 50% menores			
Sem efeitos	Infeed	Outfeed	Sem efeitos	Infeed	Outfeed	
99,84	142,28	91,11	96,58	140,66	90,43	

# 6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia para estudo dos efeitos *infeed* e *outfeed* em linhas de transmissão de

energia elétrica, em particular, na atuação dos comparadores da proteção de distância. A partir da metodologia proposta, verificou-se que os resultados obtidos com as funções de distância programadas foram similares as obtidas no *software* comercial, possibilitando que essa metodologia possa ser expansível e aplicável a outras análises de avaliação de funções de proteção.

Com relação ao efeito infeed, constatou-se que para faltas aplicadas na zona 2, o relé não atuou, pois as funções de distância detectaram a falta além do limite configurado da zona de proteção. Para esse caso, a solução foi aumentar o limite da zona 2. Mesmo assim, em alguns casos, o relé não detectou a falta, sendo necessário fazer a configuração da zona 3 do relé. Para o efeito outfeed, deve-se investigar uma forma de mitigar esse efeito no relé de distância, pois em todos os casos analisados as funções de distância detectaram as faltas na zona 1.

Os erros relativos à localização da falta foram calculados considerando o local de ocorrência da falta, onde verificouse que à medida que a distância entre o relé e a falta torna-se maior, os efeitos infeed e outfeed aumentam, fazendo com que o erro relativo também aumente. Os casos simulados com efeito infeed, por apresentarem maior erro relativo, foram mais severos ao sistema de proteção. Erros mais elevados poderiam ser obtidos caso maiores valores de resistência de falta fossem considerados, assim como o uso de modelos digitais mais realísticos de transformadores para instrumentos, o que ressalta as análises conduzidas neste trabalho em indicar os efeitos infeed e outfeed no desempenho da proteção, o que pode auxiliar no desenvolvimento de soluções que minimizem tais impactos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

#### REFERÊNCIAS

- ABBOUD, R., BELL, J., and SMYTH, B. (2019). Considerations and Benefits of Using Five Zones for Distance Protection. Annual Conference for Protective Relay Engineers, 72 edition.
- ADU, T. (2002). An Accurate Fault Classification Technique for Power System Monitoring Devices. IEEE Transactions on Power Delivery.
- ANDERSON, P.M. (1999). Power System Protection. IEEE Press Series on Power Engineering, Piscataway, NJ - USA.
- BENMOUYAL, G. (1995). DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering. IEEE Transactions on Power Delivery.
- BLACKBURN, J.L. (1998). Protective Relaying: Principles and Applications. Marcel Dekker Inc., New York, USA.
- BÁEZ, Y., PÉREZ, L., JIMÉNEZ, P., and CASTRO, J. (2006). Standardization of Benchmarks for Distance Relay Setting in Multi-Terminals Transmission Lines. Case: PDVSA 69kV System. IEEE.
- CAMPOS, A.K.X.S., FERNANDES, D., NASCIMENTO, J.P., and NEVES, W.L.A. (2015). *Influência dos Erros*

- Transitórios Apresentados pelos TC e TPC na Atuação de um Relé de Distância. XI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica.
- CONCEPTS, E. (2019). Power & Energy Systems Analysis, Planning & Solutions. Página na internet: www.electrotek.com.
- FERRER, H.J.A. and SCHWEITZER, E.O. (2010). Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.
- HOROWITZ, S.H. and PHADKE, A.G. (2008). Power System Relaying. John Wiley & Sons Ltd, 1 edition.
- IEEE (2004). EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing.
- LOPES, F.V., BARROS, D., REIS, R., COSTA, C., NAS-CIMENTO, J., BRITO, N.S.D., NEVES, W.L.A., and MORAES, S. (2017). Methodology for protection performance evaluation on power transmission networks. IEEE Transactions on Power Delivery.
- NUNES, J.U.N. and BRETAS, A.S. (2017). Ground Distance Relaying with Remote End Infeed Compensation. IEEE Power & Energy Society General Meeting.
- ONS (2008). Submódulo 2.6: Requisitos Mínimos dos Sistemas de Proteção e de Telecomunicações.
- ONS (2018). Sobre o SIN. Brasília.
- PAZOKI, M., MORAVEJ, Z., KHEDERZADEH, M., and NAIR, N.K.C. (2014). Distance Protection of Transmission Line with Infeed Based on Real-Time Simulator. Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC.
- PHADKE, A.G. and THORP, J.S. (2009). Computer Relaying for Power Systems. John Wiley & Sons Inc, New York, USA, 2 edition.
- SILVA, K.M. (2009). Estimação de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão. Doutorado em engenharia elétrica, UFCG, Campina Grande.
- SILVA, S.P.O. (2018). Influência da corrente capacitiva de linhas de transmissão no desempenho da função de proteção de distância. Mestrado em engenharia elétrica, UnB. Brasília.
- THOMPSON, M.J. and HEIDFIELD, D.L. (2015). Transmission line setting calculations beyond the cookbook. Annual Conference for Protective Relay Engineers, 68 edition.
- ZIEGLER, G. (2006). Numerical Distance Protection: Principals and Applications. Publicis Publishing, Berlin, Germany, 2 edition.