



**XXIII SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPC/31  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - V**

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC**

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA UTILIZADAS PELOS EQUIPAMENTOS INSTALADOS NO SISTEMA DA COPEL DISTRIBUIÇÃO**

**João Ricardo M. S. de Souza (\*)**  
CEFET-MG

**Marcelo A. Bettega**  
COPEL DISTRIBUIÇÃO S. A.

**Carla Rosangela L. Giacomazzi**  
COPEL DISTRIBUIÇÃO S. A.

**RESUMO**

Atualmente a busca pela melhoria na qualidade do fornecimento de energia elétrica tem sido um dos principais objetivos tanto por parte do poder concedente quanto das concessionárias. Dentro desta realidade, ferramentas que auxiliem na localização de faltas em linhas de transmissão tem se tornado cada vez mais importantes. Este trabalho tem por objetivo apresentar os métodos de localização de falta utilizados pelos relés de proteção e registradores digitais de proteção instalados no sistema da COPEL Distribuição fazendo uma análise comparativa do desempenho de cada um destes equipamentos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Linhas de Transmissão, Localização de Falta, Relés de Proteção, Registrador Digital de Perturbação

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Nos dias atuais a busca pela melhoria na qualidade do fornecimento de energia elétrica tem sido um dos principais objetivos tanto por parte do poder concedente quanto das concessionárias. Neste contexto, tem-se dado bastante ênfase na disponibilidade dos equipamentos que compõem o sistema elétrico.

Dentro desta realidade, ferramentas que auxiliem na localização de faltas em linhas de transmissão tem se tornado cada vez mais importantes. Ao se localizar uma falta em uma linha de transmissão com boa exatidão, permite-se que as equipes de campo identifiquem a origem do problema com maior rapidez, reduzindo-se o tempo de indisponibilidade desta linha e os custos decorrentes da manutenção (homem/hora de profissionais e deslocamento) e das penalidades decorrentes desta indisponibilidade (tais como parcela variável, DEC, FEC, DIC, FIC, DMIC e/ou DICRI).

A evolução da tecnologia digital, por outro lado, permitiu o desenvolvimento de diversas técnicas utilizando os mais diversos princípios. Assim, nos dias de hoje há diversos tipos de localizadores disponíveis no mercado como acessórios de relés de proteção, registradores digitais de perturbação (RDP) e até mesmo em softwares de análise de perturbações. Entretanto, a maioria destas ferramentas utiliza métodos fasoriais de uma ponta, ou seja, se baseiam nos fasores de tensão e corrente calculados a partir de uma única extremidade da linha de transmissão. Estes métodos são altamente susceptíveis à influência do carregamento pré-falta, da resistência de falta e da localização da falta em si. Para mitigar o efeito de cada um destes fatores, os fabricantes desenvolveram diferentes algoritmos. Entretanto, nenhum algoritmo baseado em métodos fasoriais de uma ponta é capaz de eliminar a influência de todos estes fatores simultaneamente. Em outras palavras, "o cobertor é curto".

Somando-se a isso o fato de que cada fabricante utiliza diferentes técnicas para processar os sinais de tensão e corrente (tanto na filtragem quanto no rastreamento da frequência e na estimação fasorial) pode-se inferir que o

(\*) Av. Dr. Antônio Chagas Diniz, n° 655, Cidade Industrial – CEP 32.210-160 Contagem, MG – Brasil  
Tel: (+55 31) 3368-4318 – Fax: (+55 31) 3368-4300 – Email: joaor@contagem.cefetmg.br

desempenho destes localizadores de falta disponíveis nos equipamentos existentes no mercado (relés de proteção e RDP) é bem diferente. Esta inferência será comprovado neste trabalho.

Este trabalho tem por objetivo apresentar os métodos de localização de falta utilizados pelos relés de proteção e RDP instalados no sistema da COPEL Distribuição fazendo uma análise comparativa do desempenho de cada um destes equipamentos. Para se fazer esta análise comparativa, foram simulados diversos casos de curto-circuito utilizando o software ATP e as formas de onda de tensão e corrente obtidas foram aplicadas em quatro relés de proteção de linha de transmissão e em um RDP de diferentes fabricantes utilizando-se um simulador de sistema elétrico de potência (mala de testes). Nestas simulações foram variadas a diferença entre o módulo e o ângulo das tensões das barras das extremidades da linha de transmissão, o local da ocorrência do curto-circuito e a resistência de falta.

## 2.0 - MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTA FASORIAIS

A maioria dos algoritmos de localização de faltas disponíveis nos equipamentos atualmente se baseiam nos fasores de tensão e corrente obtidos a partir das medições feitas nas extremidades das linhas de transmissão [1]. Tais métodos são conhecidos como métodos fasoriais e podem ser agrupados em dois grandes grupos: os métodos de uma ponta e os métodos de duas pontas.

### 2.1 Métodos Fasoriais de Uma Ponta

A proteção de distância, técnica amplamente utilizada para a proteção de linhas de transmissão desde a época dos relés eletromecânicos, se baseia no fato de que quando uma linha de transmissão é submetida a um curto-circuito, a distância deste curto-circuito até o terminal no qual está instalado o relé é proporcional à impedância de sequência positiva vista por este relé. Este mesmo princípio é utilizado pelos métodos de localização de faltas fasoriais de uma ponta.

Entretanto, esta premissa é verdade somente para os casos de curtos-circuitos francos, ou seja, quando a impedância de falta é nula. Na prática, na maioria dos curtos-circuitos não são francos. Assim, a impedância de falta se tornou o primeiro obstáculo a ser contornado pelos métodos de localização fasoriais.

De uma maneira geral, esta impedância de falta possui uma parte resistiva muito maior do que a parte indutiva, ao contrário do que ocorre com a impedância das linhas de transmissão. Assim, uma forma bastante simples de minimizar este efeito da impedância de falta é se basear somente na parte reativa da impedância vista pelo localizador. Este método que consiste somente na medição da reatância de sequência positiva é chamado de método da reatância simples [2,3].

Outra grandeza que afeta a exatidão dos métodos de localização de falta fasoriais é o carregamento pré-falta da linha de transmissão. Existem diversas maneiras de se contornar este problema dentre as quais se destaca a solução proposta por Takagi apresentada na referência [3,4]. No método de Takagi a corrente pré-falta é descontada da corrente de falta antes de ser calculada a impedância (ou a reatância) vista, melhorando ainda mais a exatidão do algoritmos.

Há ainda alguns métodos que utilizam as impedâncias equivalentes do sistema para tentar melhorar a exatidão dos localizadores de falta [5]. Tais métodos podem reduzir um pouco mais os erros decorrentes do carregamento da linha e pode até mesmo apresentar uma estimativa da resistência de falta. Entretanto, o fato do método utilizar a impedância equivalente da fonte como dado de entrada pode se tornar um problema quando o sistema está operando em alguma condição diferente da usual (com linhas ou transformadores próximos desligados, por exemplo).

Outra fonte de erro que afeta consideravelmente o desempenho dos métodos fasoriais é o acoplamento mútuo com outras linhas de transmissão. Este problema aparece principalmente nos casos de faltas que envolvem a terra, pois o acoplamento mútuo entre as linhas se manifesta predominantemente entre os modos de sequência zero [6].

Ressalte-se que no parágrafo anterior foi mencionado que este acoplamento mútuo aparece preferencialmente entre os modos de sequência zero, e não somente entre estes modos, como apregoa a literatura clássica. Isso porque para se afirmar que não há acoplamento mútuo entre os modos de sequência positiva e negativa é necessário que todo o sistema seja equilibrado. Entretanto, como as linhas que compõem os sistemas de distribuição de alta tensão (69 kV e 138 kV) da maioria das concessionárias não possuem transposição, essa premissa não é verdadeira na maioria das vezes. Além disso, mesmo que houvesse transposições, durante um curto-circuito a LT sob falta já estará em uma condição desequilibrada. Assim, na prática tem-se sempre um desequilíbrio. Espera-se, no entanto, que o efeito deste acoplamento mútuo entre os modos de sequência positiva e negativa seja baixo, não influenciando significativamente no resultado da localização de falta.

Vale ressaltar que, como os relés digitais já calculam estes fasores durante a execução dos seus algoritmos, via de regra estas técnicas são as mais utilizadas pelos fabricantes de relés de proteção [5,7,8,9]. Entretanto, cada

fabricante utiliza um método diferente. O objetivo deste trabalho é comparar o desempenho do algoritmo de localização fasorial de uma ponta de um RDP e de quatro dos relés de distância mais utilizados no sistema da COPEL.

## 2.2 Métodos Fasoriais de Duas Pontas

Buscando uma maneira de minimizar os erros decorrentes da resistência de falta, do carregamento da linha de transmissão e do desequilíbrio inerente do sistema foram desenvolvidos métodos fasoriais que utilizam os fasores de tensão e corrente de ambos os terminais. Estes métodos possuem formulações similares aos métodos de um terminal.

Outra vantagem dos métodos de dois terminais é a possibilidade de se trabalhar somente com grandezas de sequência positiva. Desta maneira as imprecisões inerentes às grandezas de sequência zero influenciam bem menos no resultado do método [6].

Um dos grandes desafios destes métodos, no entanto, é a comunicação entre os dois terminais. Além disso, a maioria destes métodos pressupõe em sua formulação que há uma sincronização entre os fasores calculados em ambos os terminais, o que nem sempre ocorre. Isso dificulta o uso destas soluções em relés de proteção comerciais.

Tais métodos no entanto, são muito utilizados em ferramentas de análise de perturbações (off-line), onde este sincronismo pode ser “forçado” pelo analista. Entretanto, não há no sistema da COPEL nenhum equipamento ou ferramenta que utiliza tais métodos.

## 3.0 - EXECUÇÃO DE TESTES EM LABORATÓRIO COM OS EQUIPAMENTOS INSTALADOS NO SISTEMA DA COPEL DISTRIBUIÇÃO

Conforme mencionado anteriormente, um dos objetivos deste trabalho é comparar o desempenho do algoritmo de localização fasorial de uma ponta de um RDP e de quatro dos relés de distância mais utilizados no sistema da COPEL. Para tal, foram simuladas diversas faltas trifásicas e monofásicas através do software ATP (Alternative Transient Program) utilizando-se o modelo apresentado na figura 1.

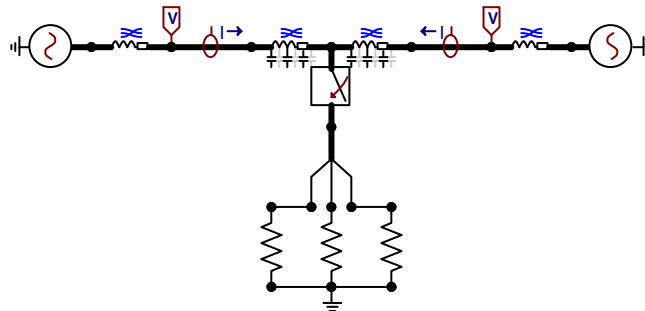


Figura 1 – Modelo do sistema utilizado para a simulação das faltas no ATPDraw

Nestas faltas foram variado basicamente quatro parâmetros de maneira independente partindo de um caso base:

- Diferença angular entre as tensões das fontes para simular um carregamento pré-falta (fluxo de potência ativa);
- Diferença entre o módulo das tensões das fontes para simular um carregamento pré-falta (fluxo de potência reativa);
- Resistência de falta e;
- Localização da falta

Posteriormente, os sinais de tensão e correntes extraídos das simulações feitas foram aplicados nos cinco equipamentos mencionados utilizando um simulador de sistema elétrica. A figura 2 mostra a montagem que foi utilizada durante o teste do RDP e de um dos relés.



Figura 2 – Montagem feita no laboratório para a realização dos testes

As figuras 3 a 6 apresentam os gráficos com os erros obtidos com a variação do carregamento pré-falta da linha de transmissão protegida. Para emular um fluxo de potência reativa foi variado o ângulo da fonte da esquerda do modelo da figura 1 (figuras 3 e 4). Para emular um fluxo de potência ativa foi variado o módulo da fonte da esquerda do modelo da figura 1 (figuras 5 e 6). O módulo da tensão da fonte da direita foi mantida sempre como 1 pu e o seu ângulo,  $0^\circ$ .

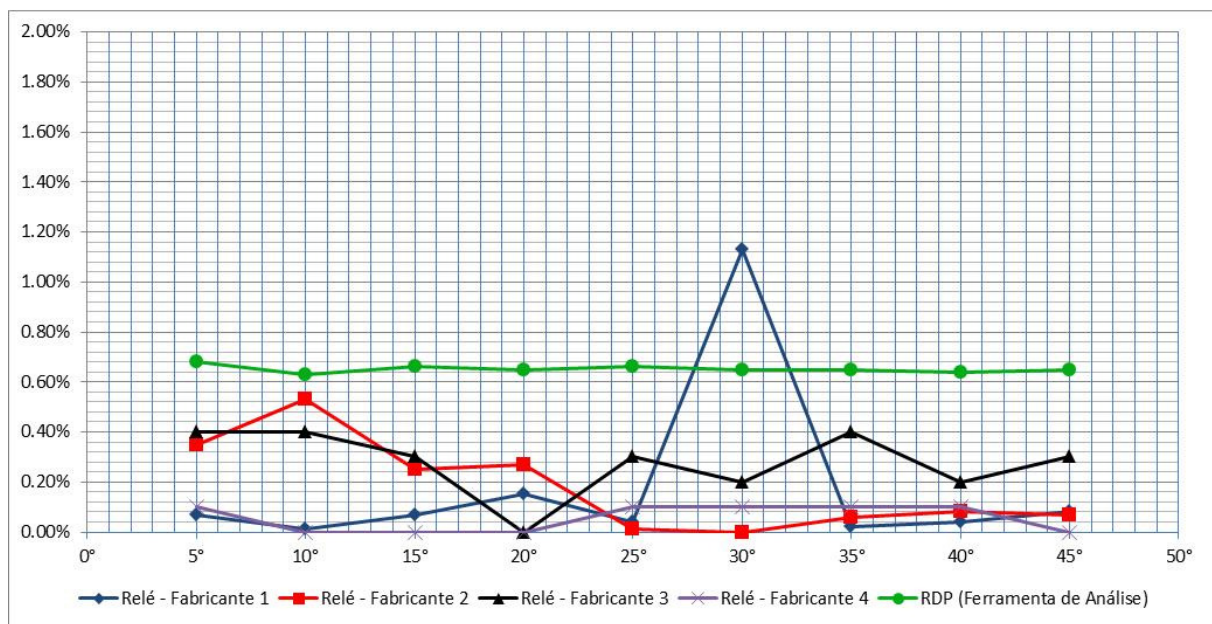


Figura 3 – Erro percentual da localização de falta x diferença angular da tensão (Curto-circuito trifásico)



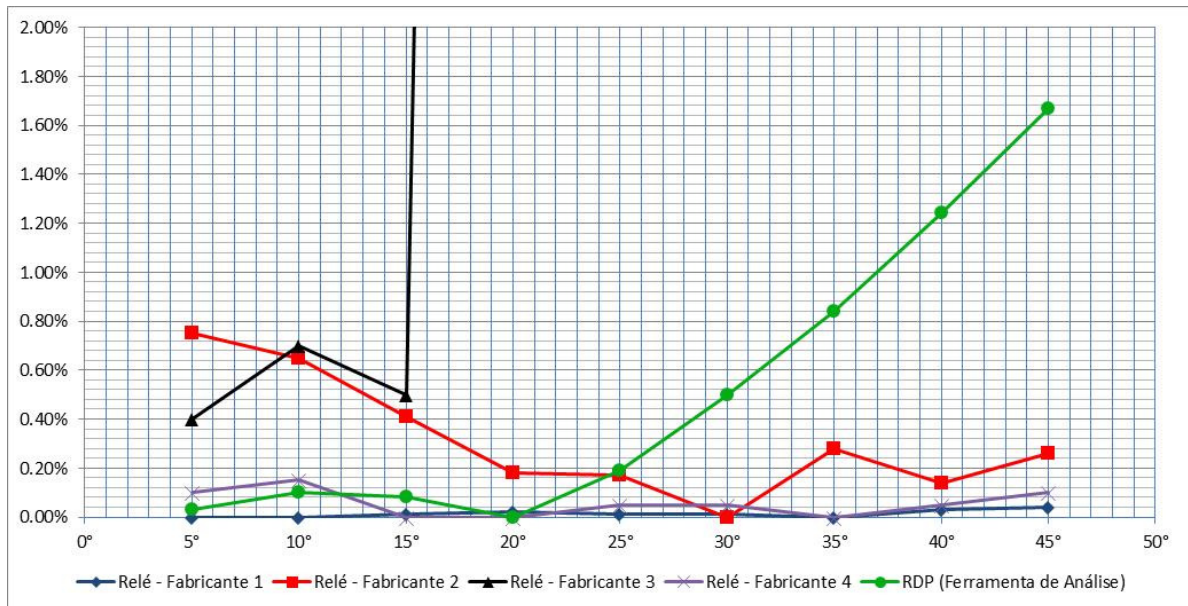


Figura 4 – Erro percentual da localização de falta x diferença angular da tensão (Curto-circuito monofásico AT)

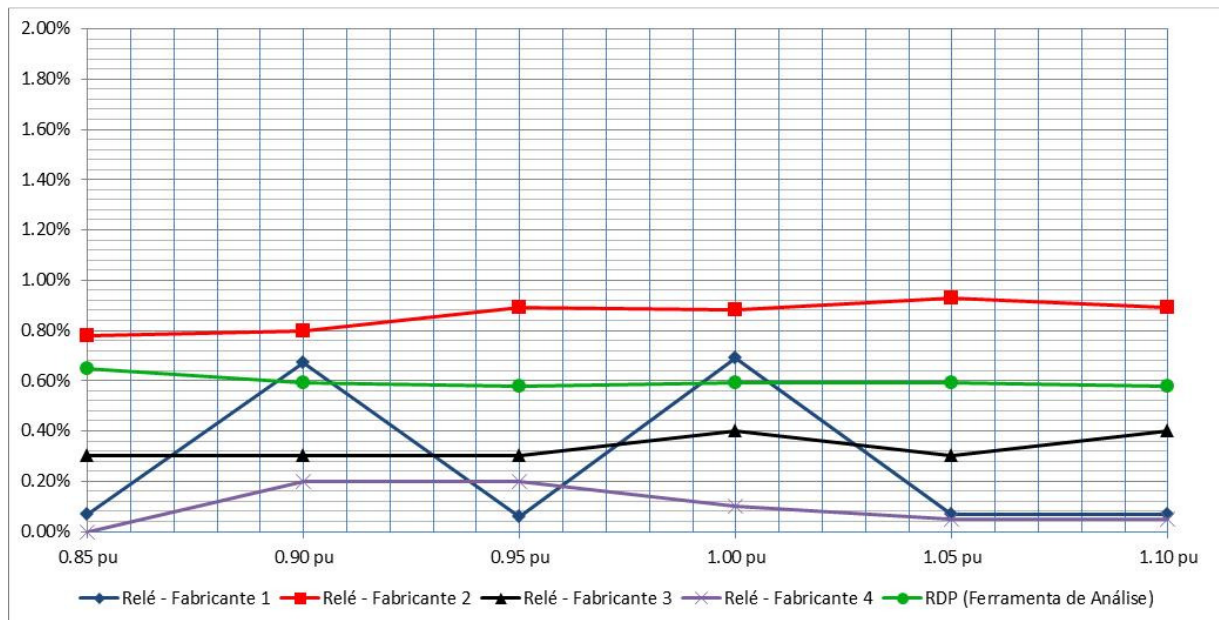


Figura 5 – Erro percentual da localização de falta x módulo da fonte de tensão do equivalente atrás (Curto-circuito trifásico)

Pelos gráficos das figuras 3 a 6 pode-se verificar que:

- Embora os resultados tenham sido muito parecidos, de uma maneira geral o equipamento que apresentou o melhor desempenho foi o relé do fabricante 4;
- O relé do fabricante 3 apresentou um desempenho muito ruim durante curtos-circuitos monofásicos na presença de um carregamento de reativo pré-falta elevado.
- Para o caso de curtos-circuitos monofásicos, a ferramenta de análise disponibilizada pelo fabricante do RDP também se mostrou bastante susceptível à grandes diferenças angulares entre as tensões em ambas as extremidades, o que é característico de situações carregamento de potência ativa pré-falta elevado.
- O relé do fabricante 1 apresentou uma maior instabilidade.

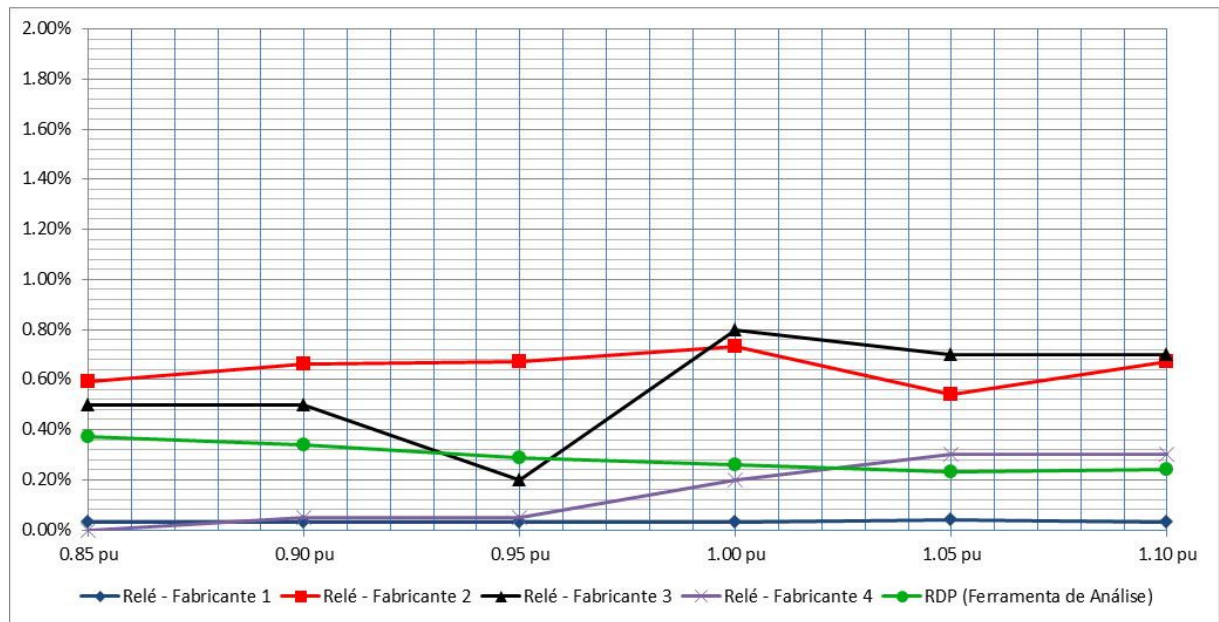


Figura 6 – Erro percentual da localização de falta x módulo da fonte de tensão do equivalente atrás (Curto-circuito monofásico AT)

As figuras 7 e 8 apresentam os gráficos obtidos com a variação da localização de falta ao longo da linha de transmissão. Pelos gráficos da figura 7 e 8 pode-se verificar que quanto maior a distância da falta, maior o erro dos localizadores de falta. Por uma questão de exatidão de tempo, nestes casos foram avaliados somente o relé do fabricante 1 e o RDP.

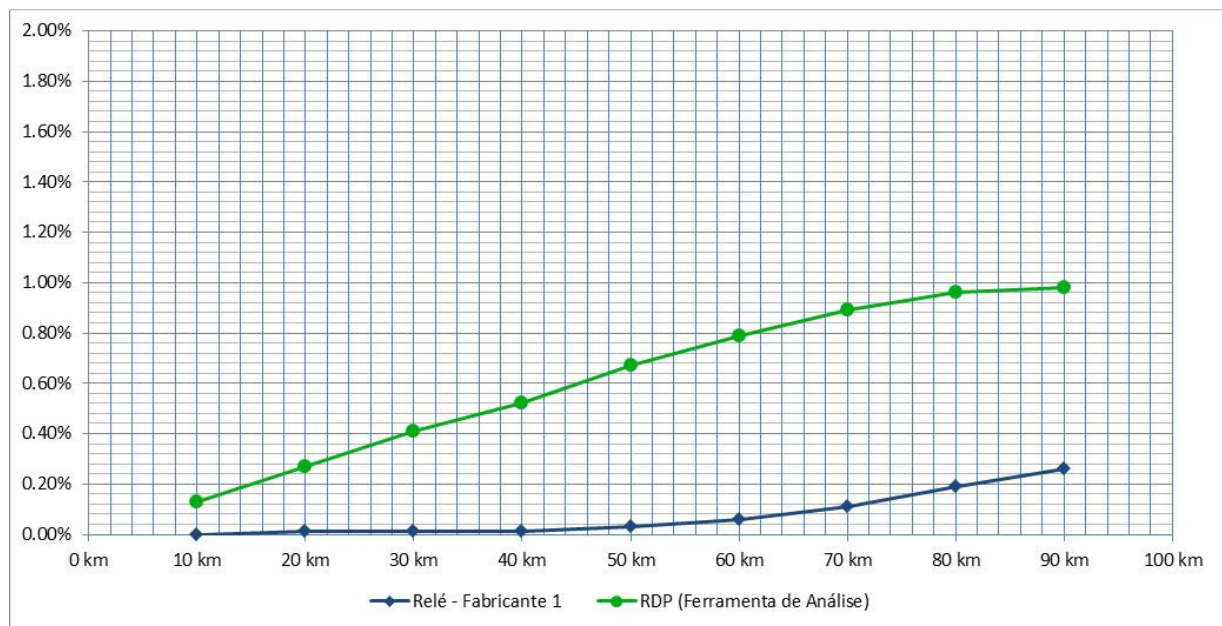


Figura 7 – Erro percentual da localização de falta x Distância da Falta (Curto-circuito trifásico)

O gráfico da figura 9 ilustra o efeito da resistência de falta nos localizadores dos equipamentos analisados. Pelo gráfico da figura 9 pode-se verificar que quanto maior a distância da falta, maior o erro dos localizadores de falta fasoriais.



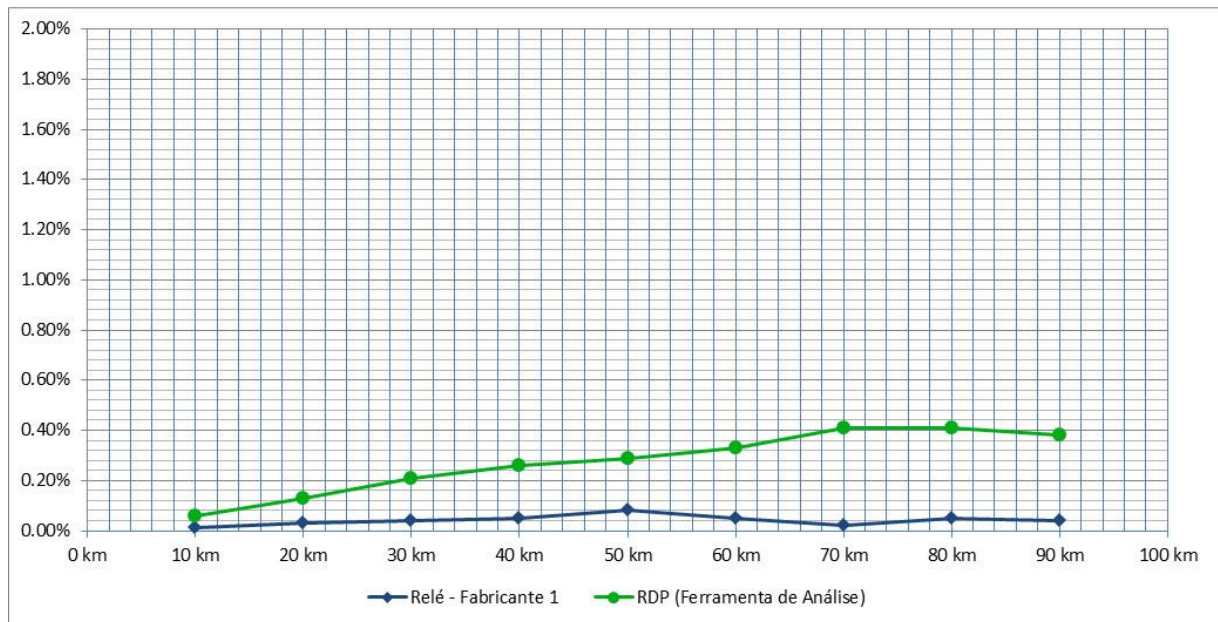


Figura 8 – Erro percentual da localização de falta x Distância da Falta (Curto-circuito monofásico AT)

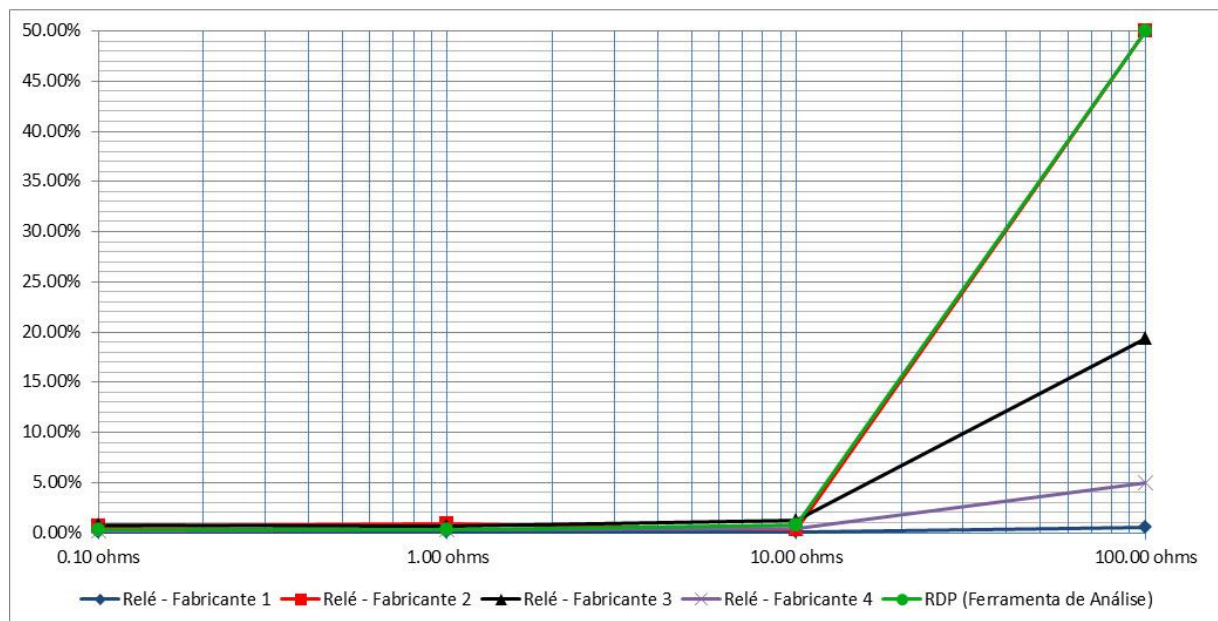


Figura 9 – Erro percentual da localização de falta x Resistência de Falta (Curto-circuito monofásico AT)

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Conforme apresentado neste trabalho, foi possível concluir que, de uma maneira geral a exatidão dos algoritmos de localização da falta disponíveis nos relés são similares à exatidão do algoritmo de localização de falta do RDP. Tal resultado era esperado, pois embora haja variações em seus códigos todos são métodos fasoriais de uma ponta e estão sujeitos às mesmas fontes de erro. Entretanto, tanto o RDP como alguns relés apresentaram um desempenho bastante ruim quando submetidos a um carregamento pré-falta elevado.

Outra constatação é que alguns relés apresentaram um desempenho bastante instável, ou seja, o resultado da localização de falta não possui uma boa repetibilidade.

Além disso, foi possível verificar também que quanto mais próximo da falta melhor o desempenho do localizador. Desta maneira, recomenda-se que a distância de falta fornecida pelo equipamento mais próximo do curto-circuito seja priorizada.

Constatou-se, ainda, que o desempenho dos métodos fasoriais de uma ponta disponíveis nos relés e nos RDPs são extremamente prejudicados pela resistência de falta. Quando a resistência de falta chega à ordem das centenas de ohms, o que é muito comum em faltas que envolvem árvores, os valores fornecidos por estas

ferramentas não deve ser levados em consideração.

Ressalte-se que cada um dos parâmetros cuja influência foi avaliada neste artigo foram variados de maneira independente. Embora isso possa fornecer um indicativo do desempenho destas ferramentas, do ponto de vista estatísticos estes resultados não podem ser considerados como definitivos. Uma análise bem mais completa e precisa pode ser feita a partir da aplicação do Método de Monte Carlo, onde cada um destes parâmetros seriam caracterizados por suas funções de densidade de probabilidade e seriam variados simultaneamente. Tal análise pode ser objeto de estudos futuros.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) COURY, D. V., OLESKOVICZ, M., GIOVANINI, R., "Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes", Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, Brasil, 2007
- (2) SOUZA, J. R. M. S., TUMA, R. W., "Utilização de um Novo Algoritmo para Estimação dos Fasores Fundamentais em Linhas de Transmissão com Compensação Série – Aplicação na Localização de Faltas", Trabalho apresentado no IX STPC – Seminário Técnico de Proteção e Controle, Belo Horizonte, Brasil, 1º a 5 de junho de 2008
- (3) FERRER, H. J. A., Schweitzer III, E. O., "Modern Solutions for Protection, Control and Monitoring of Electric Power Systems", Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, 2010
- (4) TAKAGI, T. et al., "A New Algorithm of an Accurate Fault Location for EHV/UHV Transmission Lines: Part I – Fourier Transformation Method", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, No. 3, Março, 1981
- (5) ABB, "Technical Reference Manual – Line Distance Protection IED REL 670 ANSI", Março, 2007
- (6) SOUZA, T. M., "Localização Automática de Faltas em Linhas de Transmissão de Circuito Duplo", Dissertação de Mestrado submetida à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2007
- (7) SIPROTEC Siemens, "Proteção de Distância 7SA6 – Versão 4.61 e superior", Manual, C53000-G1179-C156-1, 2008
- (8) ZIMMERMANN, K., "Impedance-based Fault Location Experience", Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Apresentado no Western Protective Relay Conference (WPRC) 2004.
- (9) GE Multilin, "D60 Line Distance Protection System Instruction Manual", Revisão 5.5x, 1601-0089-S5 (GEK-113411D), 2009

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

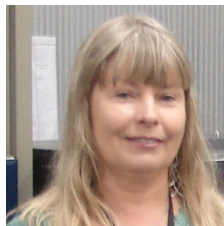


João Ricardo da Mata Soares de Souza nasceu em Belo Horizonte (MG) em 1981. É engenheiro eletricitista graduado pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em 2005, onde também obteve o grau de mestre em 2012. Atualmente é professor efetivo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Também atuou por 8 anos como engenheiro de proteção de sistemas elétricos na COPEL. Possui diversos trabalhos apresentados em eventos nacionais (como STPC e SNPTEE) e internacionais (como ERIAC e IPST) e publicados em revistas nacionais (como Espaço Energia, Eletroevolução e O Setor Elétrico).



Marcelo Alves Bettega nasceu em Curitiba (PR) em 1980. É engenheiro eletricitista graduado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) em 2005. Atualmente é engenheiro de proteção do sistema de distribuição da COPEL desde 2010. Também atuou por 8 anos na área de manutenção elétrica na Petrobras Repar.





Carla Rosangela Lubaszewski Giacomazzi nasceu em Curitiba (PR) em 1962. É engenheira eletrícista graduada pelo CEFET-PR em 1988. Atualmente é Engenheira Eletricista da Copel Renováveis desde junho de 2014. Também atuou por 3 anos na área de proteção, 14 anos na área de comercialização e 7 anos no planejamento do sistema da Copel Distribuição