

# Análise de Sensibilidade Paramétrica da Proteção Diferencial de Linhas de Transmissão

Letícia A. Gama, Maria Leonor S. Almeida, Kleber M. Silva

**Resumo**—Nos últimos anos, a função diferencial tem sido largamente empregada na proteção unitária de linhas de transmissão (LTs), uma vez que a comunicação e sincronização de dados entre os dispositivos instalados nos diferentes terminais da linha deixou de ser um fator impeditivo. Nesse sentido, o presente trabalho propõe-se a apresentar uma análise do desempenho da função de proteção diferencial de LTs no plano- $\alpha$  frente à variação de diversos parâmetros, tais como: resistência, tipo e localização de faltas, o grau de carregamento do sistema e a capacidade de contribuição de curto-circuito das fontes. Para isso, foram considerados tanto os elementos diferenciais de fase como os de sequências negativa e zero. Utilizando-se o software *Alternative Transients Program* (ATP), simulou-se várias situações de curto-circuito em uma LT de 500 kV e 200 km. Os resultados obtidos são apresentados na forma de trajetórias no plano- $\alpha$  correspondentes à variação de cada um dos parâmetros avaliados, a partir das quais é possível averiguar a influência de cada um deles sobre o desempenho dos elementos diferenciais.

**Palavras-chave**—Proteção diferencial, linhas de transmissão, plano alfa de correntes.

## I. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência têm evoluído de pequenos sistemas isolados para os de grande porte cuja operação é feita de forma interligada, como é o caso do Sistema Interligado Nacional (SIN). Apesar das vantagens desse tipo de operação, há uma grande sinergia entre os diferentes subsistemas, de tal forma que distúrbios se propagam rapidamente pela rede. Dentre os componentes de um sistema elétrico de potência, a LT é aquele mais suscetível às faltas. Todavia, no contexto de operação interligada, estas exercem um papel preponderante, dado que são as responsáveis por conectar os diferentes subsistemas, permitindo o intercâmbio de grandes blocos de energia. Nesse sentido, é necessário utilizar modernos sistemas de proteção, a fim de garantir que as faltas sejam extintas rápida e apropriadamente, evitando assim o desencadeamento de *blackouts* de energia de grandes proporções [1].

Nos últimas anos, o uso de relés numéricos microprocessados em conjunto com modernos sistemas de comunicações ópticas tem impulsionado a aplicação da função de proteção diferencial para LTs [2], [3]. Nesse contexto, vários aprimoramentos têm sido reportados na literatura [4]–[6]. Em [4], propõe-se uma característica de restrição melhorada baseada no plano complexo de razão de correntes, também chamado de plano- $\alpha$ . Em [5], descreve-se o plano- $\alpha$  de correntes de sequências negativa e zero, mostrando que essa

estratégia apresenta grande sensibilidade para curtos-circuitos assimétricos com elevada impedância de falta. O efeito da corrente capacitiva de LTs longas e cabos de extra-alta tensão sobre o desempenho da proteção diferencial é cuidadosamente avaliado em [6].

O presente trabalho visa continuar o estudo apresentado em [7] e [8], no que diz respeito à análise das trajetórias no plano- $\alpha$  referente à operação da função de proteção diferencial aplicada às LTs. Os resultados obtidos demonstram a sensibilidade dos parâmetros que exercem grande influência na atuação da função diferencial, tais como: resistência e localização de falta, carregamento do sistema e força das fontes, sendo a análise da variação desses dois últimos parâmetros a principal contribuição desse trabalho.

## II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE CORRENTE PARA LTs

A função de proteção diferencial de corrente (código ANSI 87) tem princípio de operação baseado na comparação das correntes que entram e que saem de um determinado componente. Idealmente, caso a soma dessas correntes for diferente de zero, um curto-circuito interno é identificado.

### A. Função de Proteção Diferencial Percentual de Fase

A função de proteção diferencial de LTs (código ANSI 87L) é calculada a partir das correntes de fase medidas nos diferentes terminais de uma LT. Seu funcionamento tradicionalmente se baseia na comparação da corrente de operação,  $I_{op}$ , com uma porcentagem da corrente de restrição,  $I_{res}$  [3].

Em condições normais de operação ou na ocorrência de curtos-circuitos externos,  $I_{op}$  é nula e  $I_{res}$  é diferente de zero. Desse modo, a condição de operação não é satisfeita e a função de proteção diferencial, de todas as fases, não deve atuar. Em casos de curtos-circuitos internos,  $I_{res}$  e  $I_{op}$  possuem valores diferentes de zero, fazendo com que a condição de operação seja satisfeita. Destaca-se que a função 87L é segregada por fase, de modo que a abertura dos disjuntores pode ser realizada de forma monopolar [2].

### B. Função de Proteção Diferencial Percentual de Sequência Negativa e de Sequência Zero

Devido às condições do sistema, podem ocorrer curtos-circuitos que geram pequenas variações nas correntes de fase, fazendo com que a função de proteção não opere. As unidades de sequência negativa e zero, 87LQ e 87LG respectivamente, são utilizadas para atuar em condições críticas em que as unidades de fase não atuam. Definidas de forma análoga às unidades de fase, as unidades de sequência têm por função a detecção de faltas assimétricas.

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido da CAPES.

L. A. Gama e M. L. S. Almeida são alunas de mestrado e doutorado, respectivamente, em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília (UnB). (Emails: leticiaagama@aluno.unb.br, mlsalmeida@aluno.unb.br)

K. M. Silva é professor Adjunto do Departamento de Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília (UnB). (Email: klebermelo@unb.br)

### C. Plano- $\alpha$

Alternativamente ao plano de representação  $I_{op} \times I_{res}$ , o chamado plano- $\alpha$  de correntes também permite a análise do desempenho da função de proteção diferencial. Trata-se de um plano complexo que relaciona a parte real e imaginária da razão das correntes do terminal remoto pela corrente do terminal local. Esta razão é definida de forma genérica na Equação (1) por meio da variável  $M\phi L$ , em que  $\phi$  representa as fases A, B e C, ou as seqüências negativa e zero, Q e G.

$$M_{\phi L} = \frac{\hat{I}_{\phi R}}{\hat{I}_{\phi L}} \quad (1)$$

O plano- $\alpha$  foi originalmente proposto em [9], afim de melhor representar a relação entre as grandezas fasoriais envolvidas na função diferencial. O inverso deste coeficiente é representado por meio do plano- $\beta$ , cuja operação é equivalente a do plano- $\alpha$ , porém considerando o referencial oposto, conforme expresso na Equação (2). Sendo  $\phi$  a representação das fases A, B e C, ou das seqüências negativa e zero, Q e G.

$$M_{\phi R} = \frac{\hat{I}_{\phi L}}{\hat{I}_{\phi R}} \quad (2)$$

Em [4] e [10], a proteção diferencial proposta é fundamentada no plano- $\alpha$ , a qual é composta por cinco elementos diferenciais: três elementos de fases e dois de seqüência (zero e negativa). Para tanto, são discutidos os princípios de operação desta característica e suas principais vantagens e desvantagens em relação a outras proteções tradicionais são expostas. No esquema de proteção proposto, os elementos de fase são utilizados na detecção de faltas trifásicas e na seleção de fases em operações com abertura monopolar, enquanto os elementos de seqüência operam para curtos-circuitos assimétricos, inclusive aqueles com elevada resistência de falta. Os resultados obtidos indicam que o plano- $\alpha$  analisado garante elevada sensibilidade e segurança – operando com tempos de atuação menores que um ciclo – além de estabilidade para faltas externas com atrasos de comunicação ou na presença de transformadores de corrente (TCs) saturados. Descrevem-se ainda as diversas implementações da proteção diferencial e suas respectivas representações no plano- $\alpha$ , mostrando como as regiões do plano- $\alpha$  se correlacionam com problemas de atraso do canal de comunicação, saturação dos TCs e faltas com *outfeed*.

Por sua vez, [11] descreve as características do plano- $\alpha$ , ressaltando as diferenças e vantagens entre este e o plano operacional convencional. Os autores investigam o comportamento dos elementos de seqüência zero e negativa, mostrando que ambos aumentam a rapidez e a segurança da proteção.

Em [7] e [8], os autores investigam as possíveis trajetórias no plano- $\alpha$  dos elementos de fase e de seqüência frente à influência dos seguintes parâmetros: carregamento do sistema, comprimento da linha, nível de saturação dos TCs, valor da resistência de falta, presença de aberturas monopolares, corrente capacitiva, compensação série e oscilações de potência. Além disso, especialmente para uma linha curta, são obtidas analiticamente as equações dos quocientes dos elementos diferenciais para uma falta monofásica, deixando evidentes as variáveis capazes de alterar seu comportamento.

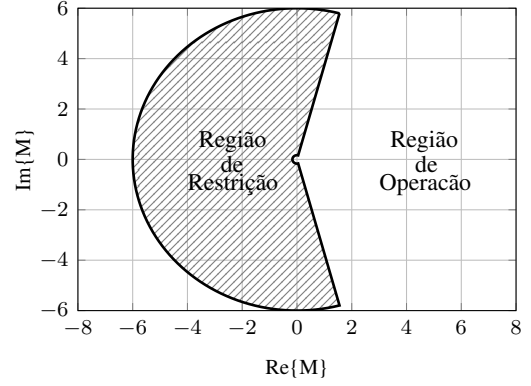


Figura 1: Característica de restrição modificada no plano- $\alpha$ .

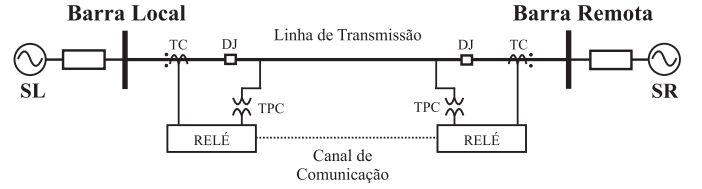


Figura 2: Sistema Elétrico

Os autores afirmam ainda que os elementos de fase apresentam sensibilidade finita para faltas resistivas. Todavia, os elementos de seqüência independem desse parâmetro e da corrente de carga do sistema.

De acordo com [10], pode-se mapear no plano- $\alpha$  o limiar de atuação do relé segundo a lógica diferencial. Este mapeamento é possível após modificações na equação que representa a condição de operação da proteção diferencial obtendo-se uma equação quadrática, a qual pode ser representada como uma circunferência. Neste caso utiliza-se a característica modificada do plano- $\alpha$  conforme citado em [4] e observado a partir da Fig. 1.

Ainda de acordo com a Fig. 1, a região de restrição consiste na área hachurada enquanto a região de operação é mapeada como sendo a área externa a esta.

Na ocorrência de uma falta externa ou em condições normais de operação, as magnitudes das correntes remota e local são aproximadamente iguais, sendo que essas correntes estão defasadas em cerca de  $180^\circ$  entre si. Portanto, a razão entre as correntes se localiza no ponto  $(-1; 0)$ , o qual está situado dentro da região de restrição e é definido como o ponto de estabilidade do sistema [3]. Por outro lado, para uma falta no interior da região protegida, a defasagem entre as correntes é aproximadamente nula de forma que a razão  $M\phi L$  ou  $M\phi R$  resulta em pontos localizados na região de operação.

### III. SISTEMA TESTE E PARÂMETROS ADOTADOS

O sistema elétrico utilizado neste trabalho está ilustrado na Fig. 2 e foi implementado no software ATP.

Na Fig. 2, as fontes do terminal local e remoto, representadas por  $SL$  e  $SR$ , são ideais e possuem seus parâmetros definidos com base na razão entre as impedâncias equivalente do sistema conectado a fonte analisada e a impedância da

Tabela I: Parâmetros Avaliados

| Variáveis de Simulação               | Valores Adotados                             |
|--------------------------------------|----------------------------------------------|
| Resistência de Falta ( $R_f$ )       | Fase-Fase: 0, 5,...,195, 200. ( $\Omega$ )   |
|                                      | Fase-Terra: 0, 10,...,90, 1000. ( $\Omega$ ) |
| Localização da Falta ( $p$ )         | 5, 10,...,90, 95. (% da linha)               |
| Carregamento do Sistema ( $\delta$ ) | -90, -85,...,+85, +90. ( $^\circ$ )          |
| Força da Fonte ( $SIR$ )             | 0,1; 0,2,...;1,9 e 2; 2,5,...; 10.           |

Tabela II: Casos Simulados

| Caso | Tipo de Falta | $p$   | $R_f$ | $SIR_L$ | $SIR_R$ | $\delta$   |
|------|---------------|-------|-------|---------|---------|------------|
| 1    | AT            | 50%   | Varia | 0,1     | 0,1     | $-5^\circ$ |
| 2    | AT            | Varia | 10,0  | 0,1     | 0,1     | $-5^\circ$ |
| 3    | BT            | 50%   | 0,0   | 1,0     | 1,0     | Varia      |
| 4    | ACT           | 50%   | 0,0   | 1,0     | 1,0     | Varia      |
| 5    | BC            | 50%   | 0,0   | 1,0     | 1,0     | Varia      |
| 6    | ABC           | 50%   | 0,0   | 1,0     | 1,0     | Varia      |
| 7    | AT            | 50%   | 0,0   | Varia   | 0,1     | $-5^\circ$ |

linha [12]. Em inglês, essa variável é chamada de *System-to-line Impedance Ratio* ( $SIR$ ), de onde vem a notação  $SIR_L$  para o terminal local e  $SIR_R$  para o terminal remoto. A LT avaliada possui tensão nominal de 500 kV, 200 km, 60 Hz e foi modelada como perfeitamente transposta, a parâmetros distribuídos constantes na frequência. Os TCs utilizados são iguais em ambos terminais, e do tipo C800 2000-5A [13].

#### IV. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE PARAMÉTRICA

Nas análises de sensibilidade paramétrica, considera-se o regime permanente de falta para verificar o comportamento dos quocientes no plano alfa, e com isso verificar a influência de cada uma das variáveis envolvidas no curto-circuito. Os fatores avaliados na análise de sensibilidade paramétrica e seus valores estão apresentados na Tab. I. Neste tipo de análise, apenas um parâmetro varia por vez, enquanto os outros são mantidos constantes, possibilitando observações mais abrangentes quanto à relação entre cada um dos parâmetro e a função de proteção avaliada.

Alguns dos casos avaliados serão apresentados por meio de gráficos do plano- $\beta$ , afim de que as trajetórias possam ser melhor visualizadas e interpretadas. Ressalta-se que neste artigo são analisados 7 casos, os quais estão descritos na Tabela II.

Ressalta-se também que a força da fonte está diretamente ligada à sua capacidade de contribuição de corrente de curto-circuito. Nesse sentido, quão menor a impedância equivalente do sistema ligado à fonte analisada, menor o valor de  $SIR$  e, portanto, maior a sua contribuição de corrente de falta.

É importante mencionar que a variação do carregamento do sistema, é determinada supondo a barra local possui tensão igual a  $1\angle 0^\circ$  p.u. e barra remota com  $1\angle \delta^\circ$  p.u. Quanto à variação da força da fonte,  $SIR_L$  varia enquanto o  $SIR_R$  e

o carregamento do sistema são mantidos constante e iguais à  $SIR_R = 0,1$  e  $\delta = -5^\circ$ .

Para a simulação do Caso 1, em que a resistência de falta é variada. As Figs. 3 e 4 apresentam as trajetórias dos quocientes no plano- $\beta$ , resultante da variação da resistência de falta. Ressalta-se que mesmo com a variação deste parâmetro, os elementos 87LQ e 87LG atuaram para todos os casos. Este fato ocorre pois as trajetórias produzidas pelos elementos de sequência no plano- $\beta$  dependem da configuração do sistema e da localização da falta e, como o curto-circuito acontece em 50 % da LT, que possui fontes iguais em ambos terminais, as impedâncias vistas em ambos os lados são as mesmas, fazendo com que os elementos de sequência possuam elevada sensibilidade para curtos-circuitos com variação da resistência de falta [14]. O comportamento das fases sãs é permanecer no ponto de estabilidade  $(-1;0)$ , independente do valor da resistência de falta. Isso porque neste artigo está sendo considerada a remoção da corrente capacitiva da LT, conforme descrito em [6]. O elemento da fase A, por sua vez, apresenta uma trajetória circular conforme apresentado na Fig. 3, e é capaz de detectar o curto-circuito interno monofásico AT até o valor de resistência de falta de 420  $\Omega$ , quando o quociente se localiza na região de restrição.

Nos casos em que a localização da falta na LT foi variada, verificou-se a partir do comportamento da trajetória do índice no plano- $\alpha$  exposto nas Figs. 5 e 6, que o módulo dos quocientes dos elementos de fase aumentam ou diminuem a depender da localização do curto-circuito. Conforme o ponto de ocorrência da falta se aproximou do terminal remoto, maior foi o valor do módulo dos quocientes. Isto se explica pelo fato dos quocientes do plano- $\alpha$  serem a razão entre as correntes remota e local, ou seja, quanto mais próximo do terminal remoto for a localização do curto-circuito, maior é o módulo de  $M_{\phi L}$  resultante. O mesmo foi observado para as unidades de sequência, sendo que nestas a parte imaginária da trajetória do quociente  $M_{aL}$  não possui variação relevante, enquanto que a parte real da desta trajetória varia.

Os quatro casos seguintes foram simulados afim de analisar a influência do carregamento, diferindo apenas quanto ao tipo de falta aplicada. Os Casos 3, 4, 5 e 6 foram simulados afim de avaliar a influência do carregamento e seus comportamentos são apresentados nas Figs. 7 e 8, 9 e 10, 11 e 12, 13 e 14, respectivamente. Conforme apresentado nas Figs. 7 e 8 referentes ao Caso 3, as fases sãs permanecem no ponto de estabilidade. Por sua vez, o elemento da fase B opera somente quando o carregamento do sistema está entre  $-10^\circ$  e  $+10^\circ$ , fato que indica a dependência do elemento de fase com relação à corrente de carga. Diferentemente das unidades de sequência, as quais efetuam a detecção do curto-circuito para qualquer valor de carregamento.

Para o Caso 4, o elemento de fase A só é ativado para valores de  $\delta$  entre  $-20^\circ$  e  $+20^\circ$ , enquanto que o da fase C para valores entre  $-25^\circ$  e  $+25^\circ$  de acordo com a Fig. 9. Os elementos de sequência negativa e de sequência zero operam independentemente do carregamento do sistema, como evidenciado na Fig. 10.

Avaliando o comportamento das trajetórias produzidas pelos elementos diferenciais apresentadas nas Figs. 11 e 12 referen-

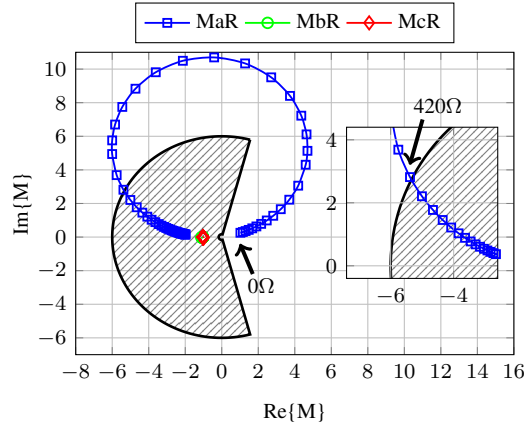


Figura 3: Plano- $\beta$  87L para o Caso 1.

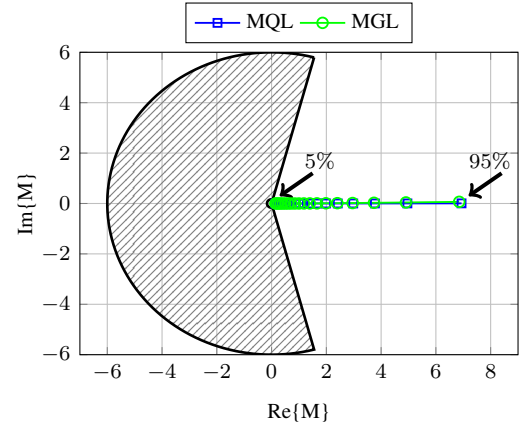


Figura 6: Plano- $\alpha$  87Q e 87G para o Caso 2.

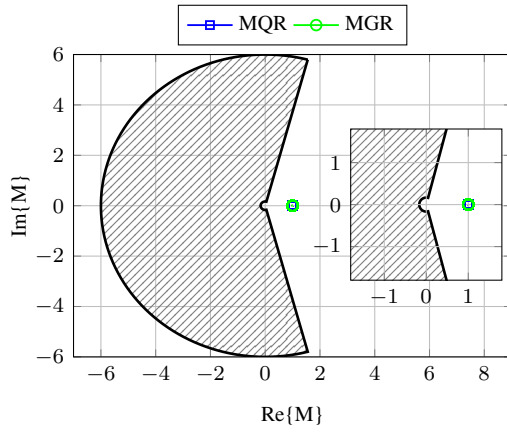


Figura 4: Plano- $\beta$  87Q e 87G para o Caso 1.

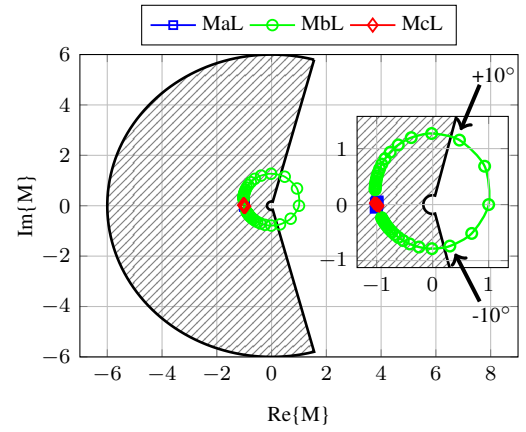


Figura 7: Plano- $\alpha$  87L para o Caso 3.

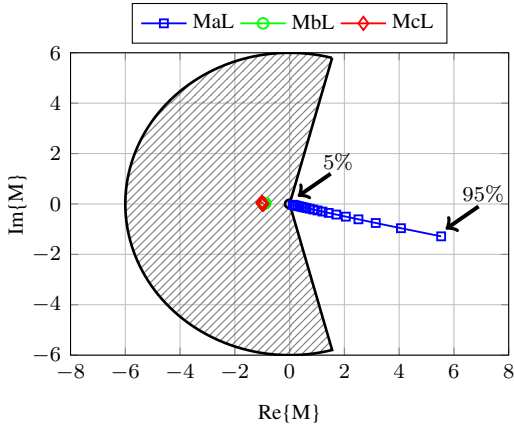


Figura 5: Plano- $\alpha$  87L para o Caso 2.

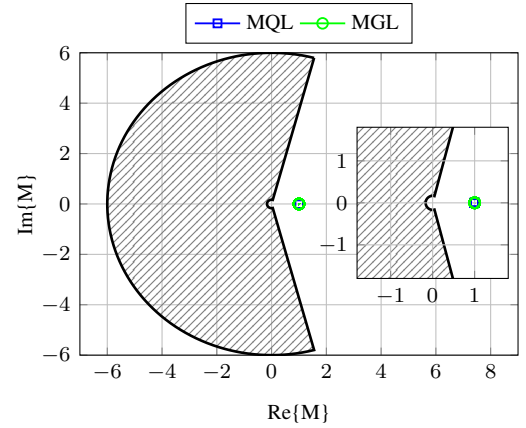


Figura 8: Plano- $\alpha$  87Q e 87G para o Caso 3.

tes ao Caso 5, verifica-se que os elementos de fase B e C possuem atuação correta apenas na faixa de valores de  $\delta$  de  $-20^\circ$  a  $+20^\circ$ . O elemento de sequência negativa então fica responsável por garantir a correta atuação da proteção, visto que a falta analisada neste caso não possui envolvimento da terra e então o elemento de sequência zero não é ativado.

No Caso 6 é aplicado um curto-circuito trifásico na metade da LT. Verifica-se, a partir da análise das Figs. 13 e 14, que os elementos de fase apresentam comportamento semelhante, ao

passo que os elementos de sequência permanecem na região de restrição, o que se justifica pelo fato de se tratar de um curto-circuito simétrico. É possível notar que a atuação do elemento de fase ainda está restrita a uma faixa de valores de carregamento do sistema de  $-25^\circ$  a  $+25^\circ$ , neste caso igual entre todas as fases.

As Figs. 15 e 16 apresentam o desempenho da função de proteção para o Caso 7, no qual  $SIR_L$  varia de 0,1 para 10,0 para um curto-circuito monofásico interno na fase A.

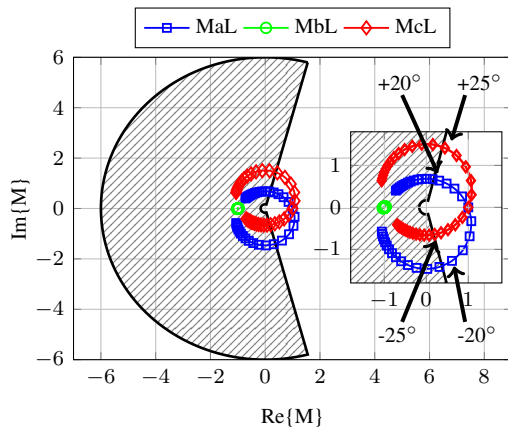


Figura 9: Plano- $\alpha$  87L para o Caso 4.

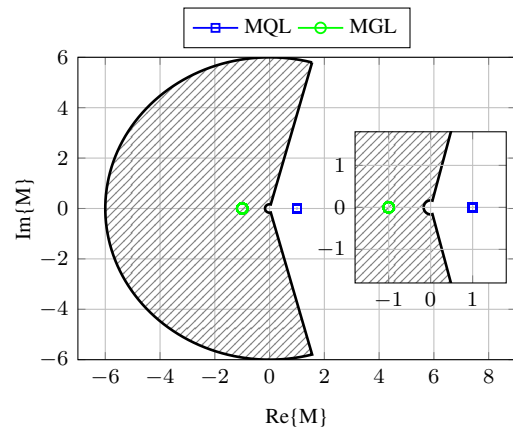


Figura 12: Plano- $\alpha$  87Q e 87G para o Caso 5.

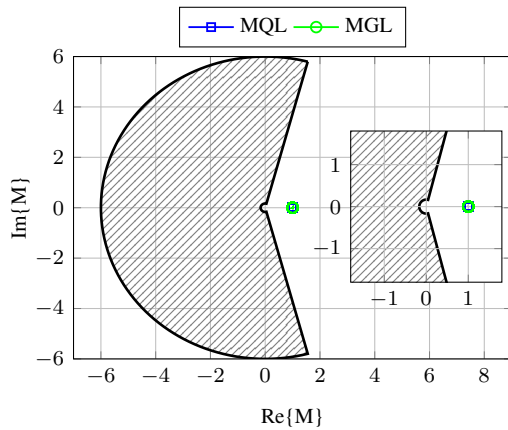


Figura 10: Plano- $\alpha$  87Q e 87G para o Caso 4.

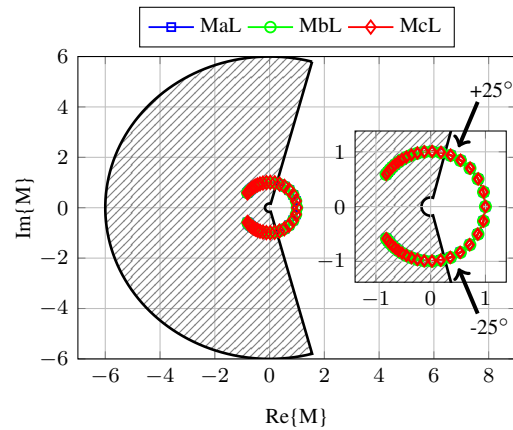


Figura 13: Plano- $\alpha$  87L para o Caso 6.

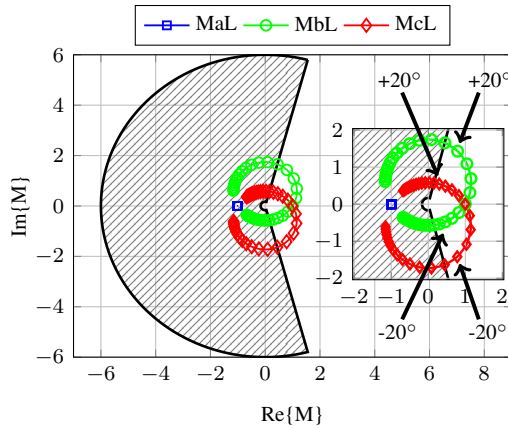


Figura 11: Plano- $\alpha$  87L para o Caso 5.

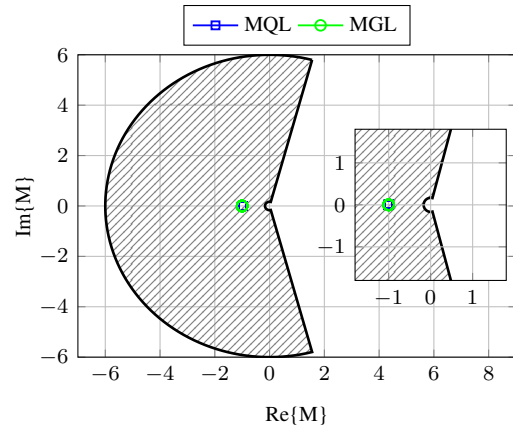


Figura 14: Plano- $\alpha$  87Q e 87G para o Caso 6.

Destaca-se que a variação da força da fonte é realizada considerando sempre um mesmo valor de carregamento, neste caso de  $\delta = -5^\circ$ . Assim, as impedâncias equivalentes da fonte analisada são calculadas em função do valor do  $SIR_L$  e, com base nestas, as tensões na fonte analisada são determinadas, a fim de se manter o mesmo carregamento durante a pré-falta.

Os elementos de fase sãs não possuem alteração relevante, o que é compreensível uma vez que a corrente de carga é mantida constante. Este fato faz com que a força das fontes

afete principalmente as correntes de falta. O elemento de fase da fase A é afetado, apresentando uma rotação que ocorre em decorrência da diminuição da corrente de falta total, da mesma maneira que a contribuição do terminal local.

Nota-se que com o aumento do  $SIR_L$ , a contribuição para faltas internas diminui, uma vez que as correntes diferenciais diminuem, aumentando o módulo de  $M_L$ . Por outro lado, conforme a fonte local fica mais fraca ( $SIR_L \geq 1$ ), os quocientes dos elementos de sequência do plano- $\alpha$  aumentam em módulo,

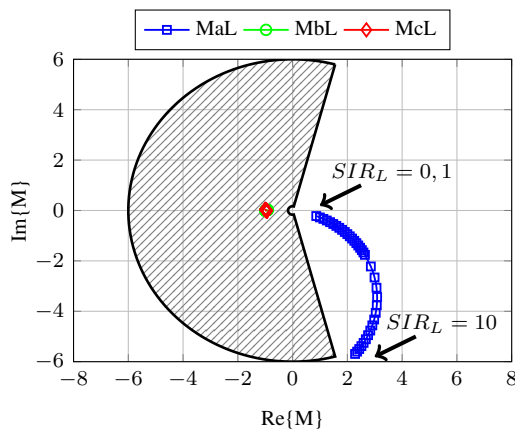


Figura 15: Plano- $\alpha$  87L para o Caso 7.

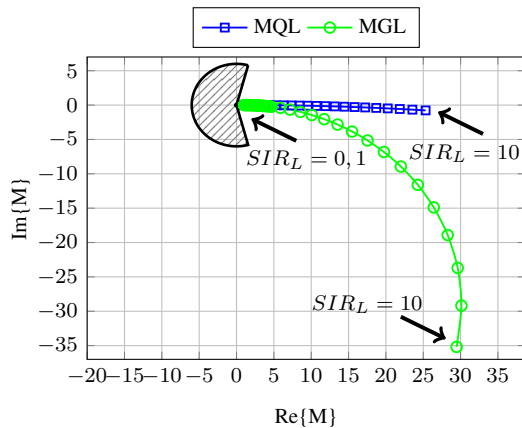


Figura 16: Plano- $\alpha$  87Q e 87G para o Caso 7.

tendendo ao infinito, o que é observado mais claramente nas trajetórias dos elementos de sequências negativa e zero. Já os quocientes dos elementos de fase produzem uma rotação de maneira que tendem a entrar na região de restrição [14].

## V. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo analisar as trajetórias obtidas no plano- $\alpha$  a partir da variação de quatro parâmetros, os quais são: resistência de falta, localização da falta, carregamento do sistema e força da fonte.

Dos resultados obtidos, observou-se que as fases sãs permaneceram no ponto de estabilidade  $(-1; 0)$ . Sobre as unidades de fase defeituosas, verificou-se que, com a variação da resistência de falta, elas operam corretamente até um certo valor de  $R_f$ , para o qual o quociente  $M$  se desloca da região de operação para a região de restrição. Por outro lado, os elementos de sequência apresentaram comportamento imune à variação da resistência de falta, permanecendo no ponto  $(1; 0)$ , ponto que representa o ponto de atuação.

Variando a localização da falta, observou-se que tanto para os elementos de fase quanto para os de sequência, à medida que a falta se aproxima do terminal remoto, o módulo dos quocientes  $M$  aumenta de forma aproximadamente linear.

Quanto à variação do carregamento, constata-se também que para as unidades de fase, a função de proteção possui atuação

correta apenas para uma faixa de valores de  $\delta$ , a qual difere de acordo com o tipo de curto-circuito aplicado. Fica, portanto, de responsabilidade das unidades de sequência a correta atuação da proteção diferencial de corrente avaliada. Ressalta-se que a falta trifásica corresponde a condição mais crítica de atuação da proteção, pois corresponde a um curto-circuito equilibrado e, portanto, não possui as unidades de sequência ativas.

Observou-se quanto à variação da força das fontes que sua variação não prejudicou o desempenho do algoritmo de proteção, ainda quando foram considerados valores elevados de  $SIR_L$  (fontes fracas). As unidades de fase e de sequência apresentaram atuação correta independente da força da fonte local, muito embora as trajetórias dessas unidades experimentem grande variação no plano- $\alpha$ .

Das análises realizadas, afirma-se que o algoritmo avaliado opera com elevada confiabilidade para a maioria dos casos testados. Além disso, nota-se a real necessidade de utilização dos elementos de sequência zero e negativa juntamente com os elementos de fase. Isso ocorre porque, com exceção do Caso 6 (correspondente a um curto-circuito simétrico), os elementos de sequência operaram corretamente em situações nas quais os elementos de fase não atuavam. É importante citar que este artigo abordou apenas alguns casos de curto-circuito, e que existe a intenção de analisar casos mais extremos de operação, por exemplo, a saturação de TCs durante curtos-circuitos externos.

## REFERÊNCIAS

- [1] Y. G. Paithankar and S. R. Bhide, *Fundamentals of Power System Protection*. Nova Déli, Índia: Prentice-Hall, 2007.
- [2] G. Ziegler, *Numerical Differential Protection: Principles and Applications*, 2nd ed. Berlim, Alemanha: Siemens, 2012.
- [3] H. J. A. Ferrer and I. Edmund O. Schweitzer, "Modern solutions for protection, control and monitorin of eletronic power system," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Tech. Rep., 2010.
- [4] H. Altuve, G. Benmouyal, J. Roberts, and D. A. Tziouvaras, "Transmission line differential protection with an enhanced characteristic," vol. 2, pp. 414–419 Vol.2, Abril 2004.
- [5] G. Benmouyal and J. B. Mooney, "Advanced sequence elements for line current differential protection," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2006.
- [6] Y. Xue, D. Finney, and B. Le, "Charging current in long lines and highvoltage cables protection application considerations," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2012.
- [7] G. Benmouyal, "The trajectories of line current differential faults in the alpha plane," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2005.
- [8] E. C. Molas, L. P. Morais, e K. M. Silva, "Análise das trajetórias no plano alfa referentes à operação da proteção diferencial de linhas de transmissão." Brasília, DF: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (XXII SNPTEE), Out. 2013.
- [9] A. R. C. Warrington, *Protective Relays: Their Theory and Practice, Volume 1*, 1st ed. Londres: Chapman & Hall, 1962.
- [10] D. Tziouvaras, H. Altuve, G. Benmouyal, and J. Roberts, "The effect of multiprinciple line protection on dependability and security," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2001.
- [11] G. Benmouyal and T. Lee, "Securing sequence-current differential elements," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2004.
- [12] M. J. Thompson and A. Somani, "A tutorial on calculating source impedance ratios for determining line length," Schweitzer Engineering Laboratories Inc., Pullman, WA, Tech. Rep., 2014.
- [13] *EMTP Reference Models for Transmission Line Relay Testing*, IEEE Power System Relaying Committee, 2004. [Online]. Available: <http://www.pes-psrc.org>
- [14] E. C. Molas, "Proteção diferencial de linhas de transmissão no plano alfa: Modelagem e simulação," Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Dez. 2014.