



**XXII SNTPEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GPC/15  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - V**

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

**ANÁLISE DAS TRAJETÓRIAS NO PLANO ALFA REFERENTES À OPERAÇÃO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

**Edgar Carvalho Molas(\*)**  
UnB

**Leila Pereira de Moraes**  
UnB

**Kleber Melo e Silva**  
UnB

**RESUMO**

Neste informe técnico são apresentadas análises das trajetórias no plano alfa das unidades diferenciais de fase e de sequência aplicados na proteção de linhas de transmissão, frente aos diferentes tipos de curto-circuito. Além de serem avaliadas expressões analíticas que descrevem o comportamento dessas unidades, foram realizadas simulações que levam em consideração a variação de parâmetros como o comprimento da linha, resistência de falta, corrente de carga, corrente capacitiva e a configuração do sistema. Dessa forma, os resultados aqui apresentados servem como base para o estudo do comportamento desse tipo de proteção, podendo contribuir sobremaneira na formação dos engenheiros de proteção.

**PALAVRAS-CHAVE**

Proteção Diferencial, Linhas de Transmissão, Plano Alfa

**1.0 - INTRODUÇÃO**

No que tange à proteção das linhas de transmissão (LTs), a função diferencial tem sido alvo de vários estudos nas últimas décadas, pois além de depender apenas da corrente do sistema, apresenta bons resultados mesmo para LTs longas, graças à utilização de relés numéricos em conjunto com sistemas de comunicação ópticos [1].

A análise da operação da proteção diferencial é, tradicionalmente, feita no plano corrente de operação versus corrente de restrição. Com o advento dos relés numéricos, alguns fabricantes têm optado pela análise no chamado plano alfa, que representa o quociente entre os fasores corrente, de fase ou de sequência, medidos nos terminais da LT. Assim, a detecção de faltas é realizada verificando-se se o ponto correspondente a esse quociente está fora de uma zona de restrição. Isso levou os fabricantes a realizarem estudos da sensibilidade das unidades diferenciais de fase e de sequência, investigando suas trajetórias no plano alfa para diversas situações de operação. Os fatores que exercem grande influência nestas trajetórias são: a natureza das correntes, isto é, fase ou sequência; a corrente de carga; o comprimento da linha; a resistência de falta; o nível de saturação dos transformadores de corrente; a presença de um pólo aberto e de compensação em série na LT. A combinação destes fatores gera as mais complexas trajetórias no plano alfa, de forma que o estudo em separado de seus efeitos pode fornecer subsídios para que sejam definidos ajustes apropriados para cada sistema em particular [2].

Este informe técnico dá continuidade ao estudo iniciado por G. Benmouyal [2] sobre a análise das trajetórias no plano alfa referentes à operação da proteção diferencial de LTs. Isto é feito pelo estudo das categorias de faltas ainda não abordadas, equacionando-se cada uma delas e verificando a dependência das unidades de fase e sequência, na proteção de linhas curtas e longas, de fatores como: a resistência de falta, defasagem angular entre as fontes, corrente de carga, corrente capacitiva e a configuração do sistema.

(\*) Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Elétrica – CEP 70910-900 Brasília, DF – Brasil  
Tel: (+55 61) 3107-5577 – Fax: (+55 61) 3107-5590 – Email: edgarmolas@aluno.unb.br

Os resultados são obtidos com a realização de simulações aplicadas à sistemas teste compostos por uma LT com equivalentes de Thévenin em suas extremidades [2]. A variação dos seus parâmetros permite que sejam obtidos gráficos que indicam a trajetória dos pontos no plano alfa para as mais diversas situações que o sistema está sujeito. Utiliza-se a característica de restrição modificada proposta por Tziouvaras et. al [3]. Assim, pretende-se fornecer aos engenheiros de proteção uma referência para estudos relacionados à proteção diferencial de LTs, auxiliando-os na escolha apropriada dos ajustes dos relés numéricos que aplicam o plano alfa na execução da proteção diferencial.

## 2.0 - OS SISTEMAS TESTE

Neste informe técnico foram utilizadas duas LTs: uma curta de 120 kV, cujas capacitâncias *shunt* são desconsideradas, e uma linha longa de 500 kV e 200 km de extensão. A Tabela 1 resume seus parâmetros.

Tabela 1 – Parâmetros dos Sistemas Utilizados

Linha Curta (80 km)					Linha Longa (200 km)			
Dados		Equivalentes			Dados		Equivalentes	
Sequência	Z [Ω]	Y [μS]	Local (P) [Ω]	Remoto (Q) [Ω]	Z [Ω]	Y [μS]	Local (P) [Ω]	Remoto (Q) [Ω]
Zero	12,54 ∠ 75°	–	1,5 ∠ 88°	1,5 ∠ 88°	274,1 ∠ 84,12°	567,31	15,94 ∠ 88°	15,94 ∠ 88°
Positiva	3,458 ∠ 86°	–	3 ∠ 70°	3 ∠ 70°	73,02 ∠ 87,26°	906,86	15,94 ∠ 88°	15,94 ∠ 88°

O equacionamento das correntes vistas pelo relé e dos quocientes do plano alfa é feito apenas para a linha curta. A linha longa, por sua vez, é modelada como um  $\pi$ -exato, através do qual se obtém a solução em regime permanente de cada situação estudada. A fim de avaliar o comportamento do sistema de proteção plota-se, para ambas, as unidades de fase e sequência, o plano alfa resultantes dos diferentes tipos de curtos-circuitos aplicados.

## 3.0 - TEORIA

O sistema com a LT curta é apresentado na Figura 1, na qual são indicadas as impedâncias dos equivalentes de Thévenin,  $Z_P$  e  $Z_Q$ , bem como sua impedância série  $Z_L$ . As correntes fornecidas pelas fontes possuem duas parcelas: a corrente de carga e a contribuição para a corrente de falta. Pelo teorema da superposição, pode-se calcular estas parcelas, independentemente, analisando-se o sistema em regime permanente antes e durante a falta.

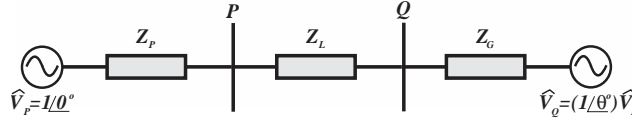


FIGURA 1 – Linha Curta.

### 3.1 Correntes Vistas pelos Relés

A partir do sistema da Figura 1, pode-se obter os circuitos de sequência em função da localização da falta. O parâmetro  $d$  indica o percentual da LT, em relação à barra P, em que ocorre a falta (Figura 2). Deste ponto em diante, o uso dos subscritos 0, 1 ou 2 fará referência às sequências zero, positiva e negativa, respectivamente. Apenas o diagrama de sequência positiva é apresentado, uma vez que os demais, a menos das fontes de tensão, são idênticos a este. Durante o regime permanente somente a sequência positiva está presente, de modo que a corrente de carga  $\hat{I}_{LD}$  pode ser calculada através da Equação (1).

$$\hat{I}_{LD} = \frac{\hat{V}_P - \hat{V}_Q}{Z_{1M} + Z_{1N}} \quad (1)$$

sendo:

$$Z_{1M} = Z_{P1} + d \cdot Z_{L1} \quad (2)$$

$$Z_{1N} = Z_{Q1} + (1-d) \cdot Z_{L1} \quad (3)$$

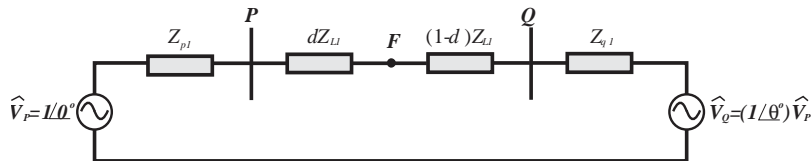


FIGURA 2 – Diagrama de sequência positiva.

Para calcular a corrente de falta são necessários os equivalentes de Thévenin dos circuitos de sequência. Analisando a Figura 2, a tensão de pré-falta no ponto F pode ser obtida a partir da Equação (4) a seguir:

$$\hat{V}_F = \hat{V}_P - Z_{1M} \cdot \hat{I}_{LD} \quad (4)$$

Considerando-se impedâncias  $Z_{2M}$ ,  $Z_{2N}$ ,  $Z_{0M}$  e  $Z_{0N}$  para as sequências negativa e zero, definidas de forma análoga às Equações (2) e (3), pode-se escrever as impedâncias dos equivalentes de sequência da seguinte forma:

$$Z_1 = \frac{Z_{1M} \cdot Z_{1N}}{Z_{1M} + Z_{1N}} \quad Z_2 = \frac{Z_{2M} \cdot Z_{2N}}{Z_{2M} + Z_{2N}} \quad Z_0 = \frac{Z_{0M} \cdot Z_{0N}}{Z_{0M} + Z_{0N}} \quad (5)$$

A depender do tipo de falta aplicado, a conexão dos equivalentes fornece as correntes de falta  $\hat{I}_{F1}$ ,  $\hat{I}_{F2}$  e  $\hat{I}_{F0}$  no ponto F. Utilizando-se estas correntes em conjunto com os coeficientes de distribuição de corrente apresentados na Equação (6), as contribuições provenientes das fontes podem ser obtidas por divisão de corrente e somadas à parcela de pré-falta como indicado nas Equações (7) e (8). As contribuições no domínio de fases são obtidas pela aplicação da matriz de Fortescue às correntes de sequências. A Tabela 2 apresenta os símbolos utilizados na representação das contribuições calculadas nas Tabelas de 3 a 6.

$$C_1 = \frac{Z_{1N}}{Z_{1M} + Z_{1N}} \quad C_2 = \frac{Z_{2N}}{Z_{2M} + Z_{2N}} \quad C_0 = \frac{Z_{0N}}{Z_{0M} + Z_{0N}} \quad (6)$$

$$\hat{I}_{P1} = C_1 \cdot \hat{I}_{F1} + \hat{I}_{LD} \quad \hat{I}_{P2} = C_2 \cdot \hat{I}_{F2} \quad \hat{I}_{P0} = C_0 \cdot \hat{I}_{F0} \quad (7)$$

$$\hat{I}_{Q1} = (1 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1} - \hat{I}_{LD} \quad \hat{I}_{Q2} = (1 - C_2) \cdot \hat{I}_{F2} \quad \hat{I}_{Q0} = (1 - C_0) \cdot \hat{I}_{F0} \quad (8)$$

Na Tabela 6, o termo  $D$  é definido como:

$$D = \frac{(Z_0 + R_F + 3R_G)}{Z_0 + Z_2 + 3R_G + 2R_F} \quad (9)$$

TABELA 2 – Correntes de Falta.

Tipo de Falta	Símbolo	Tipo de Falta	Símbolo
Curto Trifásico	$\hat{I}_{F1,3\phi}$	Curto Bifásico	$\hat{I}_{F1,2\phi}$
Curto Monofásico	$\hat{I}_{F1,1\phi}$	Curto Bifásico-Terra	$\hat{I}_{F1,2\phi-T}$

TABELA 3 – Curto-circuito Trifásico.

Corrente vista pelo relé P	Corrente vista pelo relé Q
$\hat{I}_{PA} = C_1 \cdot \hat{I}_{F1,3\phi} + \hat{I}_{LD}$	$\hat{I}_{QA} = (1 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,3\phi} - \hat{I}_{LD}$
$\hat{I}_{PB} = a^2 C_1 \cdot \hat{I}_{F1,3\phi} + a^2 \hat{I}_{LD}$	$\hat{I}_{QB} = a^2 (1 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,3\phi} - a^2 \hat{I}_{LD}$
$\hat{I}_{PC} = a C_1 \cdot \hat{I}_{F1,3\phi} + a \hat{I}_{LD}$	$\hat{I}_{QC} = a (1 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,3\phi} - a \hat{I}_{LD}$

TABELA 4 – Curto-circuito Monofásico AT.

Corrente vista pelo relé P	Corrente vista pelo relé Q
$\hat{I}_{PA} = (C_0 + C_1 + C_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\phi} + \hat{I}_{LD}$	$\hat{I}_{QA} = (3 - C_0 - C_1 - C_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\phi} - \hat{I}_{LD}$
$\hat{I}_{PB} = (C_0 + a^2 C_1 + a C_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\phi} + a^2 \hat{I}_{LD}$	$\hat{I}_{QB} = [1 - C_0 - a^2 (1 - C_1) + a(1 - C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,1\phi} - a^2 \hat{I}_{LD}$
$\hat{I}_{PC} = (C_0 + a C_1 + a^2 C_2) \cdot \hat{I}_{F1,1\phi} + a \hat{I}_{LD}$	$\hat{I}_{QC} = [1 - C_0 - a(1 - C_1) + a^2 (1 - C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,1\phi} - a \hat{I}_{LD}$

TABELA 5 – Curto-circuito Bifásico BC.

Corrente vista pelo relé P	Corrente vista pelo relé Q
$\hat{I}_{PA} = (C_1 - C_2) \cdot \hat{I}_{F1,2\phi} + \hat{I}_{LD}$	$\hat{I}_{QA} = (C_2 - C_1) \cdot \hat{I}_{F1,2\phi} - \hat{I}_{LD}$
$\hat{I}_{PB} = (a^2 C_1 - a C_2) \cdot \hat{I}_{F1,2\phi} + a^2 \hat{I}_{LD}$	$\hat{I}_{QB} = [a^2 (1 - C_1) - a(1 - C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,2\phi} - a^2 \hat{I}_{LD}$

$$\hat{I}_{PC} = (aC_1 - a^2C_2) \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi} + a\hat{I}_{LD} \quad \hat{I}_{QC} = [a(1-C_1) - a^2(1-C_2)] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi} - a\hat{I}_{LD}$$

TABELA 6 – Curto-circuito Bifásico-Terra BCT.

Corrente vista pelo relé P	Corrente vista pelo relé Q
$\hat{I}_{PA} = [-C_0(1-D) + C_1 - C_2D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi-T} + \hat{I}_{LD}$	$\hat{I}_{QA} = [-(1-C_0)(1-D) + (1-C_1) - (1-C_2)D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi-T} - \hat{I}_{LD}$
$\hat{I}_{PB} = [-C_0(1-D) + a^2C_1 - aC_2D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi-T} + a^2\hat{I}_{LD}$	$\hat{I}_{QB} = [-(1-C_0)(1-D) + a^2(1-C_1) - a(1-C_2)D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi-T} - a^2\hat{I}_{LD}$
$\hat{I}_{PC} = [-C_0(1-D) + aC_1 - a^2C_2D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi-T} + a\hat{I}_{LD}$	$\hat{I}_{QC} = [-(1-C_0)(1-D) + a(1-C_1) - a^2(1-C_2)D] \cdot \hat{I}_{F1,2\varphi-T} - a\hat{I}_{LD}$

### 3.2 Quocientes do Plano Alfa

Para avaliar as trajetórias no plano alfa, calculam-se os quocientes entre as correntes medidas em ambos os terminais da linha protegida. Isto é feito para as correntes de cada fase do sistema (unidades 87LA, 87LB e 87LC) e para as correntes de sequência negativa e zero (unidades 87LQ e 87LG). As Tabelas de 7 a 10 apresentam os quocientes das cinco unidades diferenciais para cada tipo de curto-circuito.

TABELA 7 – Curto-circuito Trifásico.

87LA	87LB	87LC	87LQ	87LG
$(1-C_1) - \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,3\varphi}}$	$(1-C_1) - \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,3\varphi}}$	$(1-C_1) - \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,3\varphi}}$	–	–
$C_1 + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,3\varphi}}$	$C_1 + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,3\varphi}}$	$C_1 + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,3\varphi}}$		

TABELA 8 – Curto-circuito Monofásico AT.

87LA	87LB	87LC	87LQ	87LG
$(3-C_0-2C_1) - \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,1\varphi}}$	–1	–1	$\frac{(1-C_2)}{C_2}$	$\frac{(1-C_0)}{C_0}$
$(C_0+2C_1) + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,1\varphi}}$				

TABELA 9 – Curto-circuito Bifásico BC.

87LA	87LB	87LC	87LQ	87LG
–1	$\frac{(aC_2 - a^2C_1 + a^2 - a) - a^2 \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,2\varphi}}}{(a^2C_1 - aC_2) + a^2 \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,2\varphi}}}$	$\frac{(a^2C_2 - aC_1 + a - a^2) - a \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,2\varphi}}}{(aC_1 - a^2C_2) + a \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,2\varphi}}}$	$\frac{(1-C_2)}{C_2}$	–

TABELA 10 – Curto-circuito Bifásico-Terra BCT.

87LA	87LB	87LQ	87LG
–1	$\frac{(1-C_1) - a(1-C_0)(1-D) - a^2(1-C_2)D - \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,2\varphi-T}}}{C_1 - aC_0(1-D) - a^2C_2D + \frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,2\varphi-T}}}$		$\frac{(1-C_2)}{C_2}$

$$\begin{array}{ccc}
87LC & \frac{(1-C_1)-(1-C_0)(1-D)a^2-aD(1-C_2)-\frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,2\varphi-T}}}{C_1-C_0(1-D)a^2-aC_2D+\frac{\hat{I}_{LD}}{\hat{I}_{F1,2\varphi-T}}} & 87LG \quad \frac{(1-C_0)}{C_0}
\end{array}$$


---

Percebe-se, em todos os casos, que os quocientes das unidades de fase envolvidas na falta dependem dos coeficientes de distribuição de correntes, bem como das correntes de carga e de falta. A última, por sua vez, depende diretamente de  $R_F$ . Por outro lado, as fases sãs apresentam valor constante e igual a -1, que é um valor que caracteriza o funcionamento normal do sistema ou uma falta externa. No caso em que a corrente de carga é zero, os pontos no plano alfa das unidades 87L se tornam independentes da corrente de falta.

A unidade 87LQ está presente em todos os curtos assimétricos, ao passo que a unidade 87LG se apresenta somente nas faltas que envolvam a terra. É importante notar que em todas as situações em que estas unidades estão presentes, seu quociente é constante, idêntico e dependente apenas dos coeficientes  $C_0$  ou  $C_2$ . Isto é, o uso destas unidades garante máxima sensibilidade para faltas resistivas, independente da corrente de carga.

### 3.3 Particularidade das Linhas Longas

Nas LTs longas o efeito das capacitâncias distribuídas não pode ser desprezado. Considerando-se a representação da LT por um modelo  $\pi$ , cada terminal contribui com uma parcela da corrente de descarga da linha, que se soma à corrente de carga e resulta em uma falsa corrente diferencial, podendo causar a atuação indevida das unidades de fase durante o regime permanente ou a alteração das trajetórias esperadas durante um curto-circuito. Uma vez que a redução da sensibilidade comprometeria a confiabilidade da proteção, a alternativa mais utilizada é a remoção, ou compensação, da corrente capacitiva [4]. A resolução do sistema da Figura 3 permite o cálculo da corrente capacitiva total. Sua remoção se dá subtraindo-se o valor calculado das contribuições das fontes antes e durante a ocorrência da falta. Para isso, considera-se que durante a falta, o perfil de tensão não sofre alterações acentuadas.

Assim como a corrente de carga, durante o regime permanente ou para operações com abertura tripolar, a corrente capacitiva só possui a componente de sequência positiva. Nestas condições, as unidades 87LQ e 87LG não são afetadas, mantendo as mesmas características que para LTs curtas. A remoção completa da corrente de pré-falta das unidades de fase elimina tanto a influência de  $R_F$  como o problema da corrente de capacitiva [1].

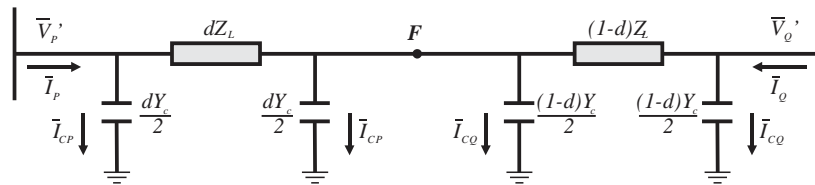


FIGURA 3 – Modelo  $\pi$ .

### 3.4 Sistemas com Abertura Monopolar

Quando ocorre uma falta durante uma abertura monopolar, o sistema passa a operar em desequilíbrio fazendo com que as unidades 87LQ e 87LG sofram influência das diversas variáveis do sistema. Nesta condição, existirão correntes de sequência zero e negativa em função das capacitâncias *shunt* e do pólo aberto. Estas componentes fazem com que as trajetórias das unidades de sequência dependam da corrente de falta, tornando-as equivalentes às unidades de fase. Assim, para restaurar sua sensibilidade original durante uma abertura monopolar, deve-se efetuar a remoção completa das correntes de sequência positiva e negativa de pré-falta [2].

## 4.0 - RESULTADOS E ANÁLISES

Para validar as observações da Seção 3, são apresentados os resultados das simulações de curtos nas LTs curta e longa. Avalia-se o efeito da variação de  $R_F$  e de  $d$ . Por limitação de espaço, são exibidos apenas os curtos AT e BCT, por apresentarem resultados nas cinco unidades. Entretanto, apenas o primeiro conjunto de gráficos das unidades de sequência será mostrado para cada tipo de linha, uma vez que eles são idênticos para todos os casos.

### 4.1 Linha Curta

As Figuras 4 e 5 apresentam o plano alfa de todas as unidades para um curto AT simulado em três pontos da linha ( $d = 0,1$ ,  $d = 0,5$  e  $d = 0,9$ ), com  $R_F$  variando de 0 a 100  $\Omega$ . Observa-se que para um determinado valor de  $R_F$ , a unidade 87LA deixa de detectar o curto. Valor este que é maior à medida que a localização da falta se afasta do

terminal local. Para este sistema, os valores de  $R_F$  a partir dos quais o relé deixa de enxergar a falta são:  $35 \Omega$ ,  $52 \Omega$  e  $68 \Omega$  para  $d = 0,1$ ,  $d = 0,5$  e  $d = 0,9$ , respectivamente. Destaca-se também que as unidades 87LB e 87LC ficam constantes no ponto  $(-1,0)$ , caracterizando restrição para as mesmas. Esse comportamento demonstra a viabilidade de utilização de esquemas de chaveamento monopolar, uma vez que a seleção de fases é inerente a esse tipo de proteção [2]. Por fim, as unidades 87LQ e 87LG detectam a falta em todos os casos. Como são dependentes apenas dos coeficientes de distribuição de correntes, seu valor de regime de falta varia com  $d$ , mas é invariável com  $R_F$ .

Na Figura 6 estão representadas as unidades de fase resultantes da aplicação de uma falta BCT. Observa-se que a unidade 87LA permanece constante na zona de restrição. Nota-se ainda que para este tipo de curto, a influência de  $R_F$  é menor. Dessa forma, um valor mais elevado seria necessário para inibir a atuação das unidades de fase.

#### 4.2 Linha Longa - Sem Remoção da Corrente Capacitiva

As trajetórias decorrentes da falta AT podem ser observadas nas Figuras 7 e 8. Percebe-se que, de forma semelhante à LT curta, a fase envolvida é afetada por  $R_F$ , porém duas observações devem ser feitas. Primeiramente, o valor de  $R_F$  capaz de inibir a atuação do relé é consideravelmente maior. Neste caso, nas faltas com  $d$  igual a 0,1 e 0,5, a unidade 87LA perdeu a sensibilidade com  $380\Omega$  e  $620\Omega$ , respectivamente. Além disso, as unidades 87LB e 87LC também sofreram variações na trajetória percorrida, indicando uma atuação indevida da fase C. Estas variações são decorrentes da presença da corrente capacitiva somada à corrente de carga.

Na Figura 9 são mostradas as trajetórias para um curto BCT. Verifica-se novamente que a fase sã apresenta dependência da resistência de falta e as fases afetadas traçam trajetórias diferentes das apresentadas para LT curta.

As unidades de sequência permaneceram constantes em ambos os casos.

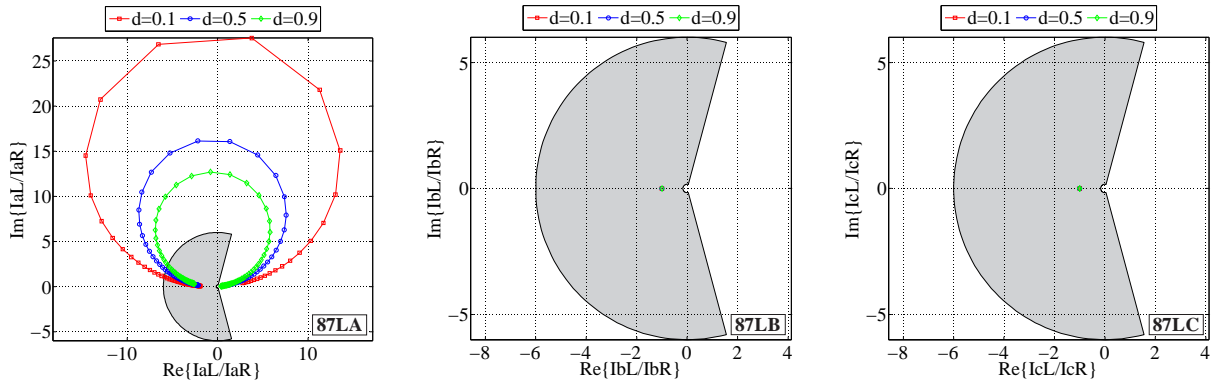


FIGURA 4 – Curto monofásico AT com variação da resistência de falta. Unidades de Fase.

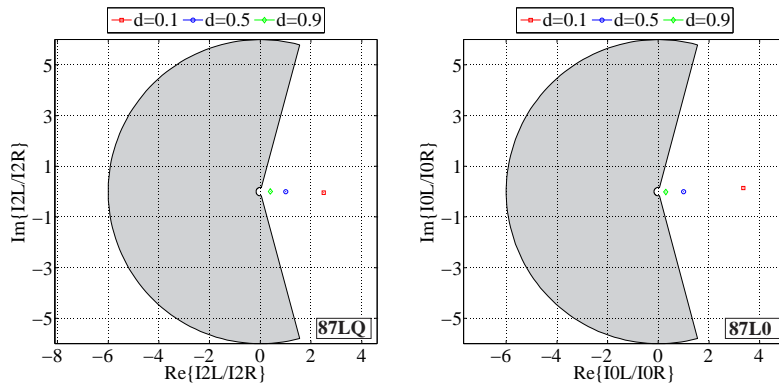


FIGURA 5 – Curto monofásico AT com variação da resistência de falta. Unidades de Sequência.

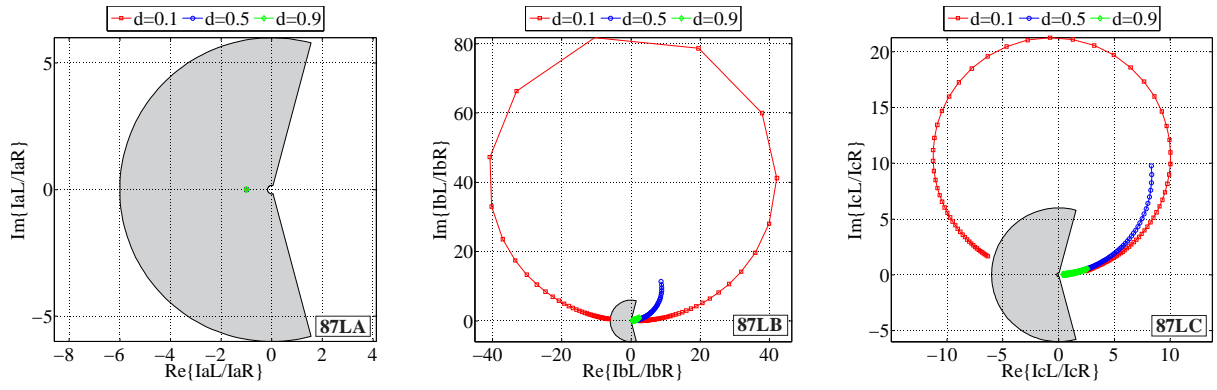


FIGURA 6 – Curto bifásico BCT com variação da resistência de falta. Unidades de Fase.

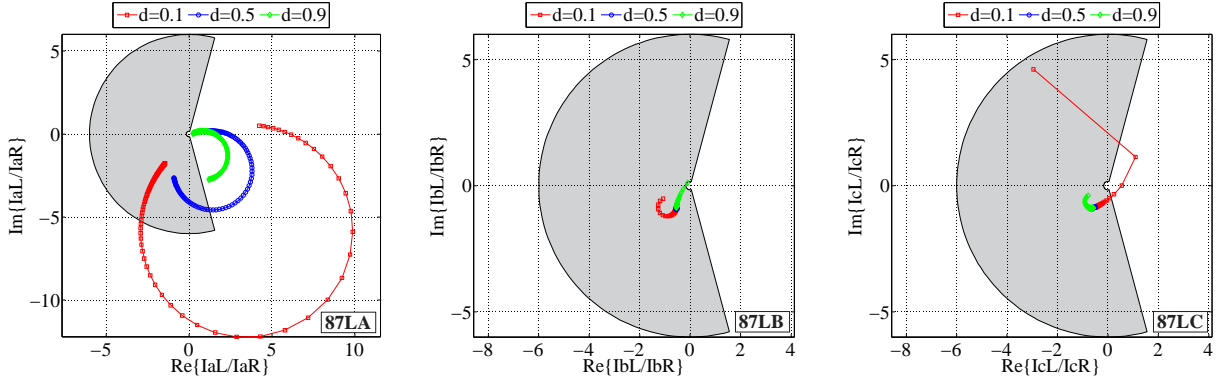


FIGURA 7 – Linha longa. Curto monofásico AT com variação da resistência de falta. Unidades de Fase.

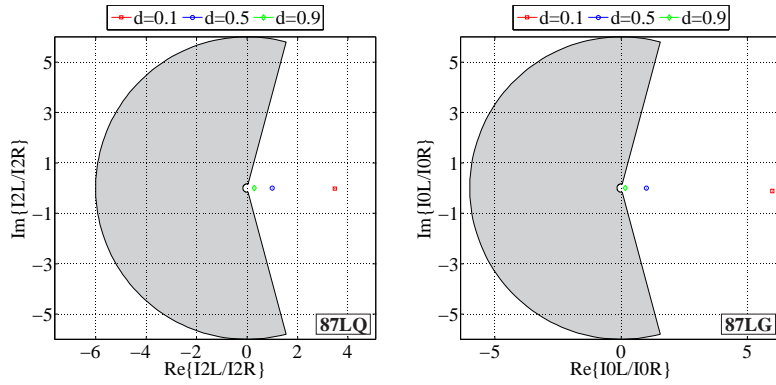


FIGURA 8 – Linha longa. Curto monofásico AT com variação da resistência de falta. Unidades de Sequência.

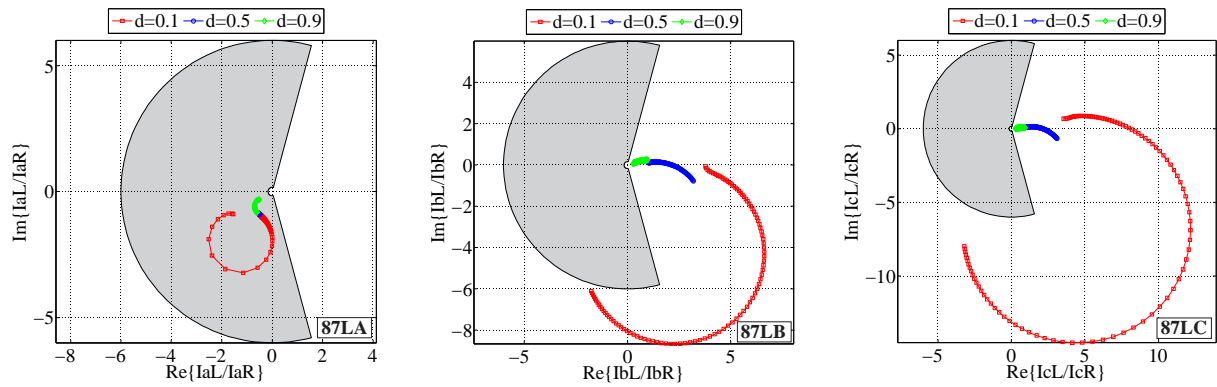


FIGURA 9 – Linha longa. Curto bifásico BCT com variação da resistência de falta. Unidades de Fase.

#### 4.3 Linha Longa - Com Remoção da Corrente Capacitiva

A Figura 10 apresenta as trajetórias para o curto monofásico AT após a remoção da corrente capacitiva. Nota-se que as fases sãs voltam a assumir o ponto  $(-1,0)$ , como ocorre na linha curta, ao passo que a fase afetada ainda sofre influência da resistência de falta com o comportamento semelhante ao apresentado para a LT curta. Este resultado mostra que a presença da corrente capacitiva cria dependência das unidades de fase sãs em relação à resistência de falta, além de alterar drasticamente a trajetória da unidade de fase afetada pela falta.

A Figura 11 mostra os resultados para a falta BCT. Observa-se o comportamento esperado da unidade da fase A, que permanece dentro da zona de restrição no ponto  $(-1,0)$ , e da fase C que apresenta a trajetória semelhante à apresentada na Figura 6. A unidade da fase B, por sua vez, teve sua trajetória modificada, apesar de manter comportamento da LT curta, no qual deixa de enxergar o curto para um determinado valor de resistência de falta.

Novamente, as unidades de sequência apresentam comportamento idêntico ao visto na Figura 8.

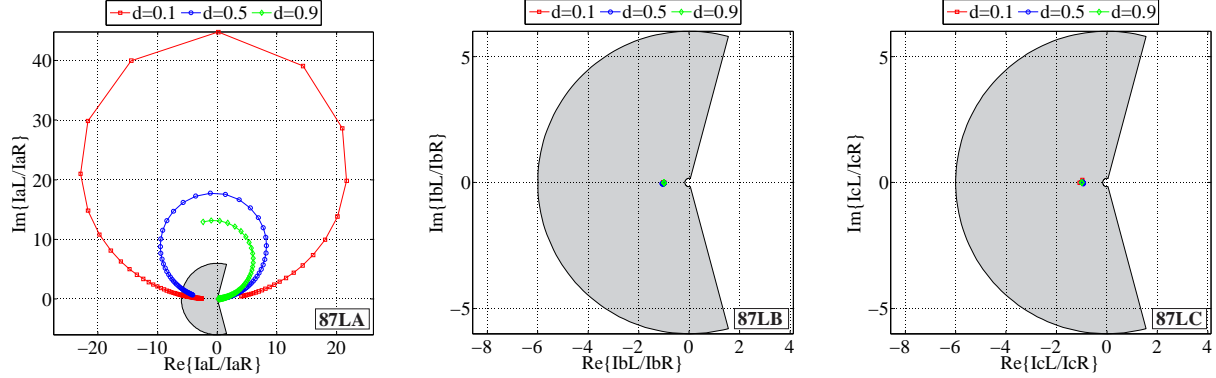


FIGURA 10 – Linha longa. Curto monofásico AT com variação da resistência de falta. Unidades de Fase.

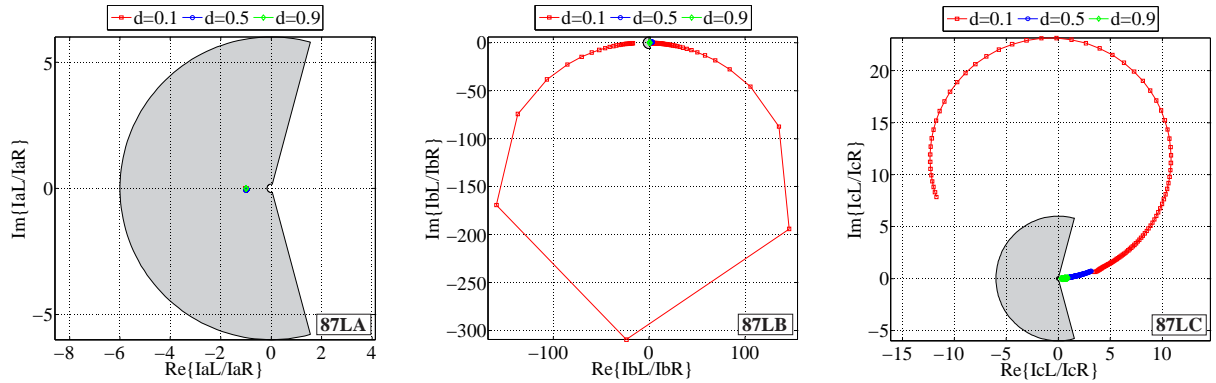


FIGURA 11 – Linha longa. Curto bifásico BCT com variação da resistência de falta. Unidades de Fase.

#### 5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foi descrito analiticamente o comportamento das trajetórias obtidas no plano alfa em decorrência de faltas aplicadas em uma LT curta. Verificou-se que as unidades de fase que não estão envolvidas na falta apresentam uma localização constante, o ponto  $(-1,0)$ , correspondente a uma condição de funcionamento normal. Pode-se observar também, o efeito da variação de  $R_F$  sobre as unidades de fase envolvidas na falta. Elas perdem sensibilidade ao curto quando a  $R_F$  atinge um limiar que depende da localização da falta. Além disso, verificou-se que as unidades de sequência do relé são completamente imunes à variação de  $R_F$  e apresentam localização constante e dependente apenas do local da falta e da configuração do sistema. Através das simulações com a LT longa, a influência da corrente capacitiva ficou clara e mostrou-se que após sua remoção as unidades de fase e de sequência passam a apresentar comportamento semelhante ao observado para linhas curtas.

Diversas análises ainda podem ser elaboradas, porém devido à limitação de espaço, estas foram não foram abordadas neste informe. Seu estudo, contudo, é imprescindível tendo em vista a escassez de material à cerca deste conteúdo e também a proposta inicial deste trabalho: desenvolver um material descritivo e explicativo que possa

ser utilizado tanto por novos quanto por experientes engenheiros de proteção que buscam compreender melhor o comportamento da proteção diferencial de linhas de transmissão.

## 6.0 - BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Ziegler, Numerical Differential Protection: Principles and Applications, 2nd ed., Berlin: Siemens, 2012.
- [2] G. Benmouyal, "The Trajectories of Line Current Differential Faults in the Alpha Plane," *SEL Inc.*, 2005.
- [3] D. A. Tziouvaras, H. Altuve, G. Benmouyal e J. Roberts, "Line Differential Protection with an Enhanced Characteristic," *SEL Inc.*, 2003.
- [4] T. S. Bi, Y. L. Yu, S. F. Huang and Q. X. Yang, "An Accurate Compensation Method of Distributed Capacitance Current in Differential Protection of UHV Transmission Lines," *IEEE*, 2005.
- [5] J. Roberts, D. Tziouvaras, G. Benmouyal e H. J. Altuve, "The Effect of Multiprinciple Line Protection on Dependability and Security," *SEL Inc.*, 2002.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Edgar Carvalho Molas**, é Engenheiro Eletricista, graduado na Universidade de Brasília (UnB) no ano de 2012. Atualmente é aluno de mestrado pelo Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da UnB. Tem especial interesse nas áreas de proteção de sistemas elétricos e transitórios eletromagnéticos.