



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

**EFEITOS DE DIFERENTES POLARIZAÇÕES NO COMPORTAMENTO DAS PROTEÇÕES DE DISTÂNCIA DE LINHAS COMPENSADAS POR CAPACITORES SÉRIE**

Jorge Miguel Ordacgi F<sup>o</sup> \*

ONS

Rui Menezes de Moraes

ONS

Raul Balbi Sollero

CEPEL

**RESUMO**

A utilização de compensação série tornou-se um recurso comum no Brasil. Entretanto, características de projeto de algumas proteções de distância, que freqüentemente são tratadas como simples detalhes, podem ser determinantes para o seu desempenho numa linha compensada. Em algumas aplicações há sempre a possibilidade de se dirimir as dúvidas mediante ensaios dinâmicos em simuladores. Em outras, impõe-se a necessidade de estudos analíticos para avaliar se o desempenho das proteções será adequado.

Este artigo enfoca um importante aspecto da aplicação de relés de distância, com características de operação circulares ou quadrilaterais implementadas por qualquer tecnologia, às linhas de transmissão com compensação série: a adequação de suas grandezas de polarização.

**PALAVRAS-CHAVE**

Proteção de linhas compensadas, relés de distância, grandezas de polarização.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

**1.1 Compensação Série de Linhas de Transmissão**

O incremento na capacidade de transmissão obtido pela utilização de compensação capacitiva é função da redução da impedância série equivalente da linha. Para um mesmo ângulo de carga ( $\delta$ ) e um mesmo perfil de tensões  $E_S$  e  $E_G$ , a capacidade de transmissão de potência da linha será tanto maior quanto maior o grau de compensação,  $G_C = X_C/X_{LT}$ , onde  $X_C$  é a reatância equivalente do banco de capacitores série (BCS) e  $X_{LT}$  a reatância da linha de transmissão.

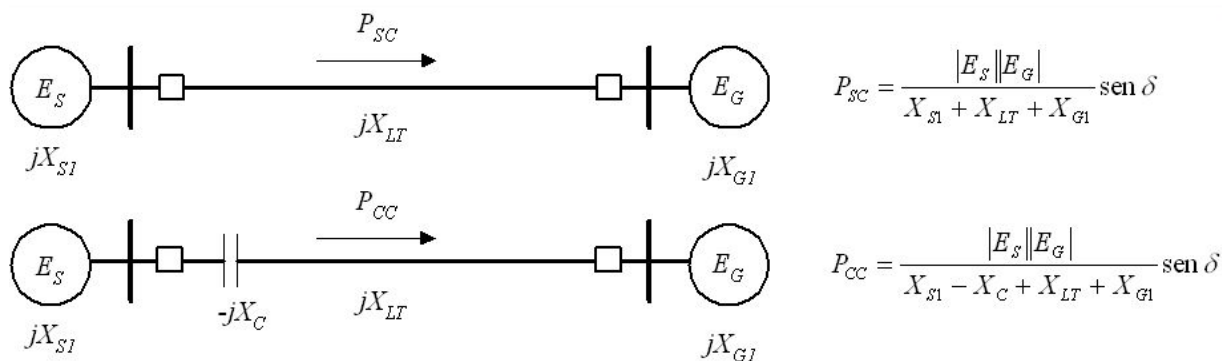


FIGURA 1 - Incremento da capacidade de transmissão em linhas compensadas

Em decorrência de sua ligação em série, os BCS estarão sujeitos a sobretensões elevadas durante a ocorrência de faltas na linha de transmissão. A corrente de falta e a queda de tensão nos terminais do BCS tendem a valores elevados sempre que a diferença entre a reatância da fonte ( $X_{S1}$ ) e a reatância do BCS ( $X_C$ ) for relativamente baixa. Para evitar que a queda de tensão nos terminais do BCS alcance valores que comprometam a integridade das unidades capacitivas, é necessária a utilização de proteção específica para estas condições. Isto é obtido por meio de circuitos em paralelo com o BCS, formados por centelhadores (*gaps*) ou uma combinação de resistores não lineares (*Metal Oxide Varistor* - MOV) e *gaps*. O *gap* tem característica binária, ou seja, o BCS é curto-circuitado quando a tensão nos seus terminais ultrapassa o valor ajustado para disparo (normalmente em torno de 2 pu). Assim, deve-se ter em conta que, dependendo da impedância da fonte, a corrente de falta pode não ser elevada o bastante para assegurar o disparo, devendo a proteção de distância medir a falta considerando a reatância do BCS. Já o MOV possui uma característica não-linear. A tensão nos terminais do BCS é limitada para a maioria das condições de falta interna, sem a necessidade de curto-circuitar o BCS. Desta forma, a compensação pode voltar ao serviço logo após a eliminação da falta, com vantagens para o desempenho dinâmico do sistema elétrico. O *gap* é utilizado em paralelo com o MOV e ajustado tão alto, que só dispare em casos de falta interna com elevada corrente de curto-circuito. Assim, o MOV é efetivo numa faixa em que a corrente da linha cause no capacitor série quedas de tensão maiores do que o limite de condução do resistor não linear e inferiores ao disparo do *gap*<sup>[1]</sup>. Apesar do complicador trazido pela variação dos parâmetros com a corrente de falta, para a análise realizada no âmbito deste artigo, não há diferenças marcantes entre a utilização de BCS protegidos por *gap* ou por MOV<sup>[2]</sup>.

## 2.0 - PARTICULARIDADES OCASIONADAS PELA UTILIZAÇÃO DE BCS

Duas particularidades são características da aplicação de BCS para compensação série de linhas de transmissão. A primeira é a inversão de corrente nos terminais da linha de transmissão e a segunda a inversão da tensão da barra. Estas duas condições são apresentadas a seguir.

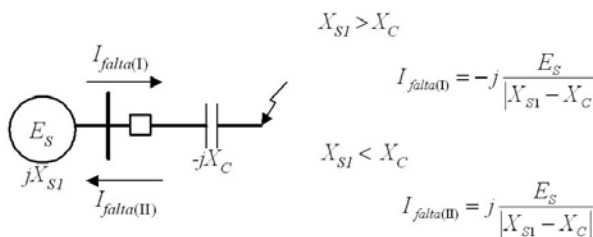


FIGURA 2 – Inversão de corrente

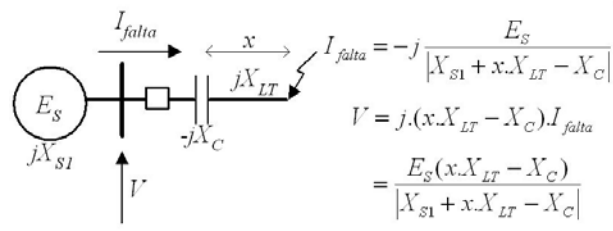


FIGURA 3 – Inversão da tensão

### 2.1 Inversão da corrente na linha compensada

Uma situação clássica e particularmente difícil para relés de distância aplicados em linhas compensadas é apresentada na Figura 2. A inversão da polaridade da corrente de falta na linha de transmissão ocorre dependendo da relação entre a impedância da fonte e a reatância do BCS. Sempre que  $X_C$  for maior que  $X_{S1}$  haverá inversão da corrente. A inversão da corrente afeta adversamente a maioria das funções de proteção de linha, incluindo os esquemas de teleproteção. Por outro lado, quando a reatância do BCS é maior que a reatância da fonte, é esperado que a corrente de falta seja elevada, e, nestas condições, é bastante provável a atuação do *gap*. A operação do *gap* corrige, abruptamente, a inversão, por retirar o capacitor do circuito. Nos BCS com MOV a chance desta ocorrência é reduzida, já que a reatância capacitiva equivalente é decrescente e a resistência equivalente é crescente com o aumento da corrente de curto. A inversão de corrente pode ser evitada durante a fase de planejamento do sistema, desde que se atente para que a reatância capacitiva série nunca seja maior que a reatância equivalente da fonte atrás da compensação.

### 2.2 Inversão da tensão na barra

Um outro efeito clássico próprio da proteção de linhas compensadas é o de inversão da tensão na barra para faltas na linha de transmissão. A ocorrência deste efeito depende da relação entre a impedância da LT até a falta e a reatância do BCS. Ou seja, haverá inversão de tensão sempre que  $X_C$  for maior que a parcela de reatância da linha até a falta ( $xX_{LT}$ ). Nota-se que a inversão de tensão ocorre para faltas no trecho após o BCS até o ponto em que a parcela da reatância da linha é igual à reatância do BCS. Faltas neste trecho possuem correntes mais elevadas, o que aumenta a possibilidade de atuação do *gap*. De novo, a operação do *gap* corrige a inversão de tensão e nas linhas com MOV as ocasiões em que se observa a inversão é minimizada. Ao contrário do efeito de inversão de corrente, entretanto, as funções de proteção de linha podem ser preparadas, com relativa facilidade, para conviver com esta inversão.

## 3.0 - POLARIZAÇÃO DE UM RELÉ

Relés de distância são implementados, na maioria dos casos, através da comparação do ângulo de fase de dois sinais. A decisão de operação pode ser realizada, dentre outras opções, por meio de um comparador co-seno (neste caso, a operação do relé ocorre quando  $90^\circ \geq \text{ângulo}(S_1/S_2) \geq -90^\circ$ ).

Um relé de distância do tipo MHO convencional utiliza sinais da forma:

$$\begin{cases} S_1 = I_{Loop} \cdot Z_R - V_{Loop} \\ S_2 = V_{Loop} \end{cases}$$

Onde  $I_{Loop}$  e  $V_{Loop}$  são as correntes e tensões correspondentes ao *loop* de falta e  $Z_R$  a impedância réplica do relé. Da mesma forma, um relé direcional pode ser obtido omitindo-se a tensão  $V_{Loop}$  do sinal  $S_1$ . Pode ser demonstrado que a característica de operação do relé MHO no plano de impedâncias é uma circunferência passando pela origem do diagrama RX. A origem do diagrama RX é o lugar geométrico da impedância medida para uma falta sólida no ponto de aplicação do relé (impedância nula devido à tensão nula). Nesta condição, o sinal  $S_2$  é nulo e não há garantia de operação nem de restrição. A característica de operação de um relé direcional, por sua vez, é uma reta perpendicular a  $Z_R$ , passando pela origem do diagrama RX.

### 3.1 Polarização por memória da tensão pré-falta

Tanto nos relés de distância quanto nos relés direcionais, para que se possa medir efetivamente e discriminar a direcionalidade para faltas na origem é necessário modificar o sinal de comparação  $S_2$ , de modo que o mesmo não se anule quando a tensão no ponto de instalação do relé for nula.

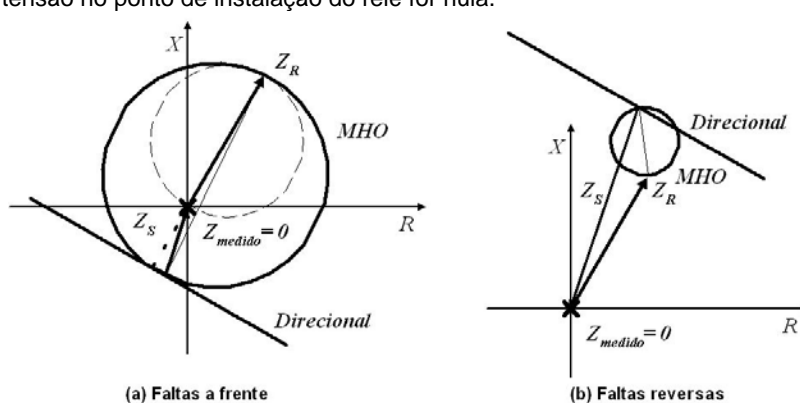


FIGURA 4— Deslocamento da característica de operação pelo efeito da polarização e discriminação de faltas à frente e reversa

Uma solução bastante empregada é a utilização de filtros ressonantes na frequência fundamental de modo que a tensão existente antes da falta seja mantida por tempo suficiente para assegurar a operação do relé, quando a tensão primária se anula. Isto resolve a questão da discriminação de falta sólida próxima, graças ao deslocamento de ambas as características de operação em função da impedância da fonte equivalente ( $Z_S$ ) “vista” pelo relé, como ilustrado na **FIGURA 4**. No caso do relé MHO, esta abordagem propicia o benefício adicional de ampliação de alcance resistivo em relação à característica convencional. É possível mostrar que a utilização de polarização por memória não compromete (ao contrário, reforça) a característica direcional de relés tipo MHO ou direcionais. De fato, para faltas reversas próximas, a característica destes relés altera-se para o ilustrado na **FIGURA 4(b)**, onde a origem (impedância zero) encontra-se bastante distante da nova característica de operação. A ação de memória é implementada pelo uso da tensão pré-falta da(s) fase(s) em falta ou pela tensão de seqüência positiva pré-falta. Em suma, em condições de carga, a tensão de polarização deve estar em fase com a tensão utilizada pelo relé para a medição da falta (*loop* de falta).

### 3.2 Polarização cruzada

A polarização cruzada consiste na utilização das tensões das fases sãs como grandezas de referência. Possui como vantagem o fato das tensões das fases sãs não serem afetadas pela variação da frequência do sistema, como ocorre com a polarização por memória, e como desvantagem o fato de ser inócua para faltas trifásicas, nas quais não há fases sãs. Atualmente, é bastante comum a utilização de grandezas de seqüência positiva para a polarização de relés de distância e direcionais. O uso de tensão de seqüência positiva sem ação de memória como grandeza de polarização apresenta as mesmas peculiaridades do esquema convencional de polarização cruzada.

### 3.3 Polarização singela e dual

A polarização singela consiste em usar exclusivamente ação de memória ou polarização cruzada. Já a polarização dual consiste na combinação de grandezas (de fase ou de seqüência positiva) pré-falta ( $V_{Memória}$ ), da(s) fase(s) em falta ( $V_{loop}$ ) e da(s) fase(s) sã(s) ( $V_{fase\_Sãs}$ ).

A escolha da polarização de um relé de distância é fundamental para o seu correto desempenho, principalmente em aplicações em linhas compensadas. Como será visto a seguir, a escolha da polarização permite que se tenha controle sobre a ampliação da área ocupada pela característica de operação do relé no diagrama polar.

#### 4.0 - OBTENÇÃO DA CARACTERÍSTICA DE OPERAÇÃO DE UM RELÉ MHO POLARIZADO

Tradicionalmente, o desempenho de relés de distância é verificado através da análise do comportamento de sua característica de operação no diagrama polar. Para a verificação das diferenças entre as opções de polarização, pode-se considerar um relé de distância genérico, com os seguintes sinais aplicados a um comparador de fase do tipo co-seno:

$$\begin{cases} S_1 = Z_R \cdot I_{Loop} - V_{Loop} \\ S_2 = f \cdot V_{Loop} + m \cdot V_{Memória} + p \cdot V_{Fases\_sãs} \end{cases}$$

Onde  $f$ ,  $m$  e  $p$  são fatores de proporcionalidade de cada parcela na tensão de polarização do relé. A expressão de  $S_2$  pode ser re-escrita, expandindo-a em função das quedas de tensão (em componentes simétricas) na impedância da fonte atrás do ponto de aplicação do relé, obtendo-se:

$$S_2 = V_{Pol} = f \cdot V_{Loop} + m \cdot (V_{S1} + V_{S2} + V_{S0} + V_{Loop}) + p \cdot (V_{S2} + V_{S0} + V_{Loop})$$

$$S_2 = V_{Pol} = (f + m + p) \left[ V_{Loop} + \frac{m \cdot V_{S1} + (m + p) \cdot (V_{S2} + V_{S0})}{f + m + p} \right]$$

Considerando que  $f$ ,  $m$  e  $p$  são números reais, o ângulo de fase do sinal  $S_2$  e, conseqüentemente, o desempenho do relé, não será alterado com o seguinte desenvolvimento:

$$S_2' = \frac{V_{Pol}}{(f + m + p)} = \frac{m \cdot V_{S1} + (m + p) \cdot (V_{S2} + V_{S0})}{f + m + p} + V_{Loop}$$

Assim, os sinais de comparação do relé em discussão podem ser re-escritos como:

$$\begin{cases} S_1 = Z_R \cdot I_{Loop} - V_{Loop} \\ S_2' = \frac{V_{Pol}}{(f + m + p)} = \frac{m \cdot V_{S1} + (m + p) \cdot (V_{S2} + V_{S0})}{f + m + p} + V_{Loop} \end{cases}$$

Se dividirmos  $S_1$  e  $S_2$  pela corrente  $I_{Loop}$ , a defasagem entre os dois sinais não será alterada e obtemos:

$$\begin{cases} S_1^* = Z_R - Z_{Loop} \\ S_2^* = \frac{m \cdot V_{S1} + (m + p) \cdot (V_{S2} + V_{S0})}{(f + m + p) \cdot I_{Loop}} + Z_{Loop} = Z_{S\_eqv} + Z_{Loop} \end{cases}$$

Podemos obter o valor de  $Z_{S\_eqv}$  através da seguinte substituição:

$$S_2' = S_2^* \cdot I_{Loop} = Z_{S\_eqv} \cdot I_{Loop} + V_{Loop} = \frac{V_{Pol}}{(f + m + p)}$$

Logo,

$$Z_{S\_eqv} = \frac{\frac{V_{Pol}}{(f + m + p)} - V_{Loop}}{I_{Loop}}$$

A expressão acima evidencia que  $Z_{S\_eqv}$  varia com as tensões de polarização e da fase em falta, possuindo valores diferentes para cada ponto de falta considerado<sup>[3]</sup>. Isto significa que a característica do relé obtida para um determinado  $Z_{S\_eqv}$  vale apenas para o ponto de falta considerado. Um relé direcional terá a sua característica de operação deslocada pelo mesmo parâmetro  $Z_{S\_eqv}$ , conforme ilustrado na Figura 4.

#### 5.0 - ANÁLISE DO EFEITO DAS DIFERENTES POLARIZAÇÕES

A expansão da característica de operação depende do valor de  $Z_{S\_eqv}$  que por sua vez depende da tensão de polarização utilizada. Assim, o efeito da escolha das diferentes polarizações sobre a característica de um relé tipo MHO polarizado pode ser efetuada através da análise do valor da impedância equivalente da fonte. Para a análise do efeito das diferentes polarizações para um relé de distância aplicado para proteção de uma linha compensada, devemos fazer uma distinção entre as inversões de corrente e as inversões de tensão. Uma vez que a inversão de corrente afeta a discriminação da direcionalidade do relé, não é necessário considerá-la, uma vez que a escolha da polarização do relé não influenciará na solução.

*Isto significa dizer que este trabalho se concentra nos casos em que a impedância da fonte atrás do relé é maior que a reatância do capacitor série.*

O mesmo não ocorre com as inversões de tensão. Nestes casos, a ampliação da característica do relé, em função da impedância da fonte  $Z_{S_{eqv}}$  tem efeito primordial na detecção de faltas próximas ao BCS. Esta afirmativa será demonstrada a seguir, tomando-se como referência um sistema de linha simples com fonte dupla, como o mostrado na **FIGURA 1**. Para análise das diferenças de desempenho foram considerados dois relés de distância, ambos com polarização por seqüência positiva. Um dos relés utilizando polarização singela por memória da tensão pré-falta e o outro, polarização dual por tensão da falta mais memória da tensão pré-falta. Os sinais de medição analisados estão mostrados na **TABELA 1**, apenas para os *loops* de falta AN e AB.

TABELA 1 - Relés analisados

FASE	Relé I Polarização singela	Relé II Polarização dual
AN	$\begin{cases} S_1 = (I_A + k_0 \cdot I_N) \cdot Z_R - V_A \\ S_2 = V_{A1}^{Mem} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1 = (I_A + k_0 \cdot I_N) \cdot Z_R - V_A \\ S_2 = 0,5 \cdot V_{A1} + 0,5 \cdot V_{A1}^{Mem} \end{cases}$
AB	$\begin{cases} S_1 = (I_A - I_B) \cdot Z_R - V_{AB} \\ S_2 = V_{AB1}^{Mem} \end{cases}$	$\begin{cases} S_1 = (I_A - I_B) \cdot Z_R - V_{AB} \\ S_2 = 0,5 \cdot V_{AB1} + 0,5 \cdot V_{AB1}^{Mem} \end{cases}$

Considerando o sistema da **FIGURA 1** e que os relés de distância acima obtêm as tensões do transformador de potencial da barra (caso comum no Brasil, na introdução de BCS em linhas de transmissão de 230kV existentes), podemos calcular os valores para a impedância equivalente da fonte para cada relé, em cada tipo de falta possível.

Nas expressões a seguir e nas demais foram empregadas as seguintes convenções:

- $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_0$  são fatores de distribuição de corrente das três componentes simétricas para falta à frente no BCS:

$$C_1 = \frac{-jX_C + Z_{LT1} + Z_{G1}}{Z_{S1} - jX_C + Z_{LT1} + Z_{G1}}, \quad C_2 = \frac{-jX_C + Z_{LT2} + Z_{G2}}{Z_{S2} - jX_C + Z_{LT2} + Z_{G2}} \quad \text{e} \quad C_0 = \frac{-jX_C + Z_{LT0} + Z_{G0}}{Z_{S0} - jX_C + Z_{LT0} + Z_{G0}};$$

- $C$  é o fator de distribuição de corrente entre as redes de seqüências negativa e zero para defeitos bifásicos à terra,  $C = \frac{Z_0}{Z_2 + Z_0}$ , onde  $Z_2$  e  $Z_0$  são as impedâncias equivalentes de seqüências negativa e zero vistas do

$$\text{ponto de falta, } Z_2 = \frac{Z_{S2} \cdot (-jX_C + Z_{LT1} + Z_{G2})}{Z_{S2} - jX_C + Z_{LT1} + Z_{G2}} \quad \text{e} \quad Z_0 = \frac{Z_{S0} \cdot (-jX_C + Z_{LT0} + Z_{G0})}{Z_{S0} - jX_C + Z_{LT0} + Z_{G0}};$$

- $k_0$  é a compensação de seqüência zero própria efetivamente ajustada no relé para o caso clássico de uso da corrente residual ( $3 \cdot I_0$ );

Além disto, para a apresentação do resultado nas Tabelas 2 e 3 a seguir, foi suposto, por simplicidade,  $Z_{S1} = Z_{S2} = Z_{S0} = Z_S$ ,  $C_1 = C_2 = C_0$ ,  $k_0 = 1$ ,  $Z_{LT0} = 4 \cdot Z_{LT1}$  e  $C = 0,5$ .

TABELA 2- Relé I - Valores de  $Z_{S_{eqv}}$  para polarização singela

RELÉ	FALTA	Impedância equivalente da fonte	Resultado
AN	ABC	$Z_{S1}$	$Z_S$
	AN	$\frac{C_1 Z_{S1} + C_2 Z_{S2} + C_0 Z_{S0}}{C_1 + C_2 + (1 + 3k_0)C_0}$	$\frac{Z_S}{2}$
BC	ABC	$Z_{S1}$	$Z_S$
	BC	$\frac{C_1 Z_{S1} + C_2 Z_{S2}}{C_1 + C_2}$	$Z_S$
	BCN	$\frac{C_1 Z_{S1} + C_2 Z_{S2}}{C_1 + C_2 C}$	$Z_S$

Os resultados das Tabelas 2 e 3 permitem as seguintes observações:

1. Se considerarmos  $Z_s > |-jX_c|$ , o uso da polarização singela por memória da tensão de seqüência positiva é vantajoso, pois maximiza o valor da impedância equivalente da fonte para as faltas trifásicas, bifásicas e bifásicas para a terra. O mesmo não ocorre com a polarização dual, quando a inclusão da parcela da tensão de seqüência positiva das fases em falta faz com que a impedância equivalente da fonte seja menor, em todas as faltas analisadas.
2. Para a polarização singela, o caso mais crítico corresponde à falta fase-terra, onde a redução da impedância equivalente da fonte é tanto maior quanto maior o  $k_0$ .
3. Para a polarização dual, o caso mais crítico também corresponde à falta fase-terra. Por outro lado, quando se utiliza  $m$  bem menor que  $p$ , o caso mais crítico tende a ser a falta trifásica, em função direta do valor de  $m$ ,
4. No caso de utilização de polarização dual, deve-se verificar se a mínima impedância equivalente da fonte ocasiona expansão da característica de operação do relé suficiente para permitir a detecção da falta mais crítica, que é a falta localizada no início da linha ( $x=0$ ), imediatamente após o BCS.

TABELA 3 – Relé II - Valores de  $Z_{s\_eqv}$  para polarização dual

RELÉ	FALTA	Impedância equivalente da fonte	Resultado
AN	ABC	$\frac{m}{m+p}Z_{s1}$	$\frac{Z_s}{2}$
	AN	$\frac{mC_1Z_{s1} + (m+p)C_2Z_{s2} + (m+p)C_0Z_{s0}}{(m+p)(C_1 + C_2 + (1+3k_0)C_0)}$	$\frac{5}{12}Z_s$
BC	ABC	$\frac{m}{m+p}Z_{s1}$	$\frac{Z_s}{2}$
	BC	$\frac{mC_1Z_{s1} + (m+p)C_2Z_{s2}}{(m+p)(C_1 + C_2)}$	$\frac{3}{4}Z_s$
	BCN	$\frac{mC_1Z_{s1} + (m+p)C_2CZ_{s2}}{(m+p)(C_1 + C_2C)}$	$\frac{2}{3}Z_s$

O desempenho comparativo entre as opções de polarização analisadas pode ser melhor observado nas figuras a seguir, resultado de um estudo de caso para um sistema com dupla fonte<sup>[4]</sup>. Em todas as figuras, a característica de operação em linha cheia corresponde ao relé I (polarização singela) e a em linha tracejada ao relé II (polarização dual). A simulação compreende uma linha de transmissão com 40% de compensação série, com relés de distância e direcionais utilizando informação de potencial do lado da barra. A impedância medida pelo relé está indicada por um sinal \*.

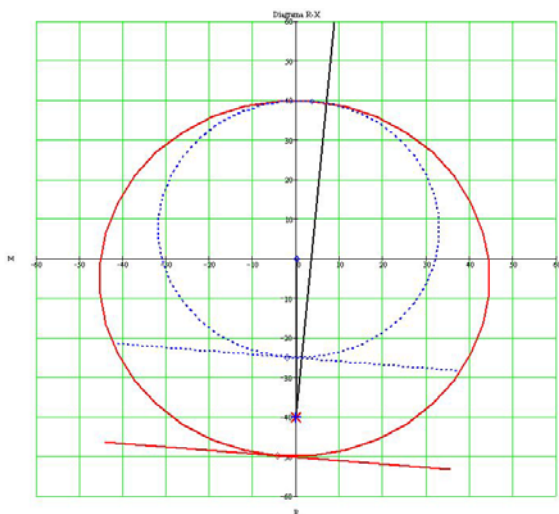


FIGURA 5– Falta trifásica – Relés AN

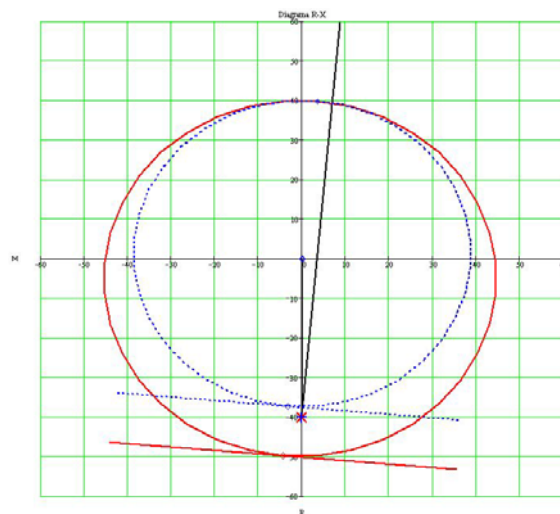


FIGURA 6 – Falta BC – Relés BC

A FIGURA 5 apresenta as características de operação dos relés de distância e direcionais do *loop* AN para uma falta trifásica no início da linha ( $x=0$ ), logo após o BCS. Conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3, as características de operação dos relés que utilizam polarização singela por memória da tensão pré-falta de seqüência positiva se expandem, permitindo a correta operação do relé, mesmo com a ocorrência da inversão da tensão. O mesmo não ocorre com os relés que utilizam a polarização dual. Neste caso, para a falta indicada, nem o relé de distância nem o relé direcional operariam.

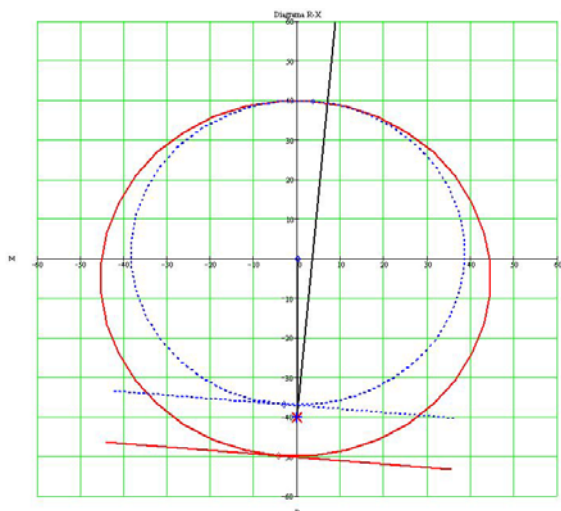


FIGURA 7 – Falta BCN – Relés BC

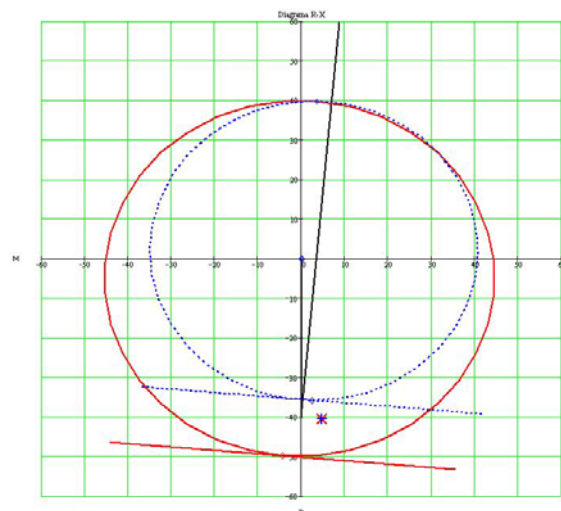


FIGURA 8 – Falta BCN – Relés BN

A FIGURA 6, apresenta as características de operação dos relés do *loop* BC, para uma falta bifásica envolvendo as fases B e C, localizada em  $x=0$ . Pode-se notar que o desempenho dos relés é semelhante ao apresentado para a falta trifásica, mesmo considerando a maior expansão da característica de operação do Relé II. Nas FIGURA 7, 8 e 9 estão apresentados os resultados para uma falta bifásica para a terra envolvendo as fases B e C, para os relés dos *loops* BC, BN e CN, respectivamente. Todos os resultados são semelhantes, notando-se apenas que a impedância medida pelos relés BN está deslocada ligeiramente para a direita e pelos relés CN para a esquerda. Este comportamento é explicado pela diferença entre a relação das impedâncias de seqüência zero e positiva do capacitor série ( $X_0/X_1=1$ ) e da linha de transmissão ( $Z_0/Z_1=4$ ) que é utilizada para ajuste da constante  $k_0$  dos relés, para medição das faltas à terra. Estes três últimos resultados reforçam as vantagens da detecção das faltas bifásicas para a terra através dos relés que medem as grandezas fase-fase, sobre aqueles que medem as grandezas fase-terra.

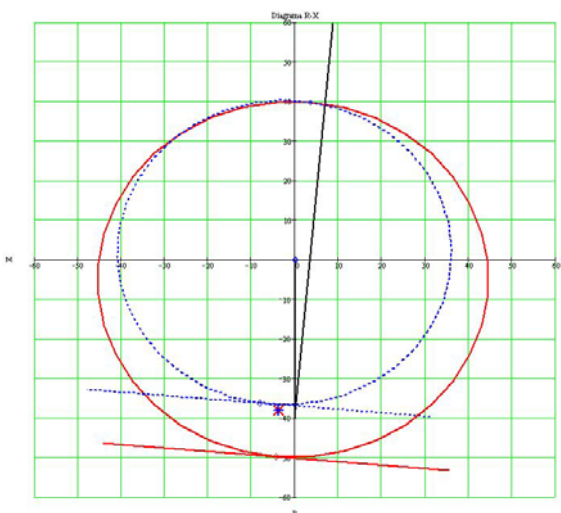


FIGURA 9 – Falta BCN – Relés CN

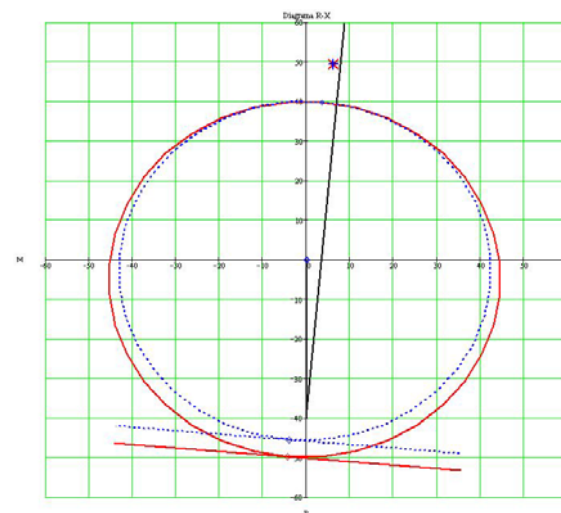


FIGURA 10 – Subalcance nos relés de terra

A diferença entre as relações de seqüência zero e positiva do BCS e da linha inclui um erro não linear na medição da impedância pelos relés de terra que é responsável por considerável subalcance para faltas próximas ao ajuste



dos relés, como pode ser inferido na FIGURA 10, obtida para uma falta no ponto correspondente ao alcance teórico dos relés ( $x=0,6$ ). Este efeito, associado à possibilidade de disparo do *gap* com a retirada do BCS de serviço, faz com que o ajuste das unidades de primeira zona da proteção de distância tenha que ser determinado com cautela para que não ocorram atuações indevidas.

Por fim, a FIGURA 11 apresenta os resultados obtidos para uma falta monofásica (fase A), considerando os relés do *loop* AN. Note que neste caso, ambos os relés operariam.

## 6.0 - CONCLUSÕES

A introdução de compensação série em linhas de transmissão protegidas por relés de distância ou direcionais deve ser precedida de análise cuidadosa para verificar se o desempenho destas proteções se mantém adequado em função das inversões de corrente e tensão ocasionadas pela utilização dos BCS. Ocorrendo a inversão da corrente da linha, a discriminação da direcionalidade pelos relés somente será possível se houver disparo do *gap*. Entretanto, em relés com alimentação de potencial de barra, as conseqüências da inversão de tensão podem ser contornadas pela escolha adequada da tensão de polarização. A utilização de polarização singela por memória da tensão pré-falta é capaz de contornar os problemas decorrentes da inversão de tensão.

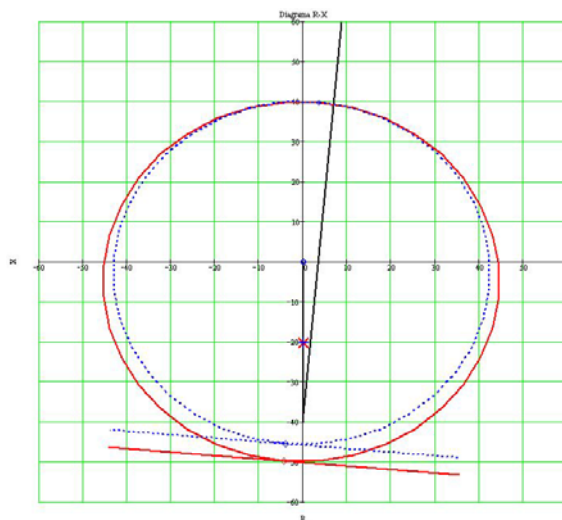


FIGURA 11 – Falta AN – Relés AN

Dado que o pior caso de inversão de tensão para falta à frente ocorre imediatamente após o BCS, a verificação do desempenho dos relés com informação de potencial de barra pode ser obtida através do cálculo do valor de  $Z_{S_{eqv}}$  e a comparação em módulo com a reatância do BCS. Caso o valor de  $Z_{S_{eqv}}$  seja inferior em módulo ao valor da reatância do BCS, a proteção instalada não é adequada a linhas compensadas e deve ser substituída. Caso contrário, justifica-se investir no aprofundamento da análise específica da aplicação por meio de estudos e ensaios de simulação.

É importante citar que, embora a análise apresentada tenha se limitado a relés utilizando polarização por grandezas de seqüência positiva (bastante comum nos projetos mais modernos), o método apresentado se aplica às demais opções de polarização, bastando que se tenha conhecimento das grandezas de polarização utilizadas.

Assim, diante da perspectiva de aplicação de compensação série a uma linha de transmissão existente cuja proteção utilize informação de potencial da barra, os autores sugerem que o método aqui apresentado seja utilizado como uma forma expedita de verificação *a priori* se a proteção de distância instalada é adequada para conviver com os requisitos de direcionalidade impostos pela introdução do BCS, antes de se investir em análises mais elaboradas e ensaios em simuladores.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Ziegler, "Numerical Distance Protection - Principles and Applications", SIEMENS, Publicis – MCD – Verl., 1999.
- [2] D. L. Goldsworthy, "A Linearized Model for MOV-protected Series Capacitors", IEEE Transactions on Power Systems, Volume PWRS-2, Number 4, 1987.
- [3] R. B. Sollero, J. M. Ordacgi F<sup>o</sup>, "Determinação Acurada das Características de Operação dos Relés Tipo Mho", V Seminário Técnico de Proteção e Controle, GTP/SCEL/GCOI e CCON, Curitiba, PR, 1995.
- [4] S. E. Zocholl, "Three-Phase Circuit Analysis and the Mysterious  $k_0$  Factor", 22<sup>nd</sup> Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, Washington, October 24-26, 1995.