

Proteção para Cabos Subterrâneos/Submarinos Usando Esquema de Comparação Direcional de Seqüência-Negativa

Jesús Vargas
INELAP-PQE.

Armando Guzmán
Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.

Jorge Robles
Comision Federal de Electricidad

A edição revisada anterior foi lançada em janeiro de 2000

Originalmente apresentado na
26th Annual Western Protective Relay Conference, outubro de 1999

Traduzido para o Português em fevereiro de 2017

PROTEÇÃO PARA CABOS SUBTERRÂNEOS/SUBMARINOS USANDO ESQUEMA DE COMPARAÇÃO DIRECIONAL DE SEQÜÊNCIA-NEGATIVA

Jesús Vargas
INELAP-PQE.
Guadalajara, Jal. Mexico

Armando Guzmán
Schweitzer Engineering
Laboratories, Inc.
Pullman, WA USA

Jorge Robles
Comision Federal de
Electricidad
Mexico, D.F. Mexico

RESUMO

Os requisitos para o sistema de proteção de cabos subterrâneos e submarinos são diferentes do que aqueles usados para linhas aéreas. Este *paper* analisa a aplicação de esquemas de comparação direcional para proteger dois cabos submarinos de 34,5 kV. Esses cabos têm 24 km de extensão e interligam a Ilha de Cozumel ao sistema do continente do México. O artigo discute a modelagem dos cabos através de componentes simétricas e analisa a performance do elemento direcional de seqüência-negativa durante condições de faltas nos cabos.

INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, relés diferenciais de corrente têm sido usados para proteção de cabos nas aplicações da transmissão e da distribuição. Essas aplicações também requerem relés de distância ou de sobrecorrente direcional para propiciar proteção quando o canal de comunicação estiver fora de serviço.

Este *paper* propõe uma solução alternativa para proteção de faltas desequilibradas. A solução é baseada nos relés direcionais de seqüência-negativa usados em um esquema de comparação direcional. Essa solução propicia uma cobertura excelente para resistência de falta e não requer proteção de *backup* adicional. O artigo também analisa a performance do relé direcional nas aplicações de cabos em que a admitância do cabo não é desprezível.

PROTEÇÃO PARA CABOS SUBTERRÂNEOS E SUBMARINOS

Os cabos de transmissão de energia são os meios mais confiáveis para conexão de diferentes equipamentos em um sistema elétrico [1]. Eles podem ser usados como links da transmissão e da distribuição. Esperamos mais aplicações dos cabos de potência nos sistemas elétricos devido aos avanços na tecnologia do cabo de polietileno reticulado (*Cross-Linked Polyethylene – XLPE*), restrições ambientais e disponibilidade de direito de passagem.

Os cabos de potência requerem proteção para condições de corrente de sobrecarga e curto-circuito. As aplicações da proteção dos cabos de potência devem considerar as diferentes configurações e características da impedância dos cabos.

Tipos de Cabo [2]

Tubular (*Pipe*)

Este cabo consiste de três cabos com condutores blindados, cada um com um condutor de cobre, isolamento de papel impregnado, fita semicondutora e skid wires (para proteção mecânica durante a instalação e para facilitar o puxamento do cabo). Os cabos são instalados em um tubo de aço, o qual é revestido pelo lado de fora para evitar corrosão.

Enchimento de Fluido sob Pressão com Isolamento de Papel Impregnado (*Self-Contained Fluid Filled – SCFF*)

Estes cabos consistem de três cabos monofásicos, cada um deles tendo um condutor de cobre com um núcleo oco. O núcleo oco permite a pressurização do fluido, com fluido dielétrico sob pressão de 15 a 40 psi (libras por polegada quadrada) ou sob alta pressão de aproximadamente 200 psi, dependendo da aplicação. Os cabos são normalmente isolados com papel impregnado e têm revestimento de chumbo ou alumínio para evitar a entrada de umidade e suportar a pressão do fluido.

Dielétrico Sólido

Estes cabos consistem de três cabos monofásicos ou três condutores simples, cada um deles com sua própria isolamento instalada em uma armação comum.

O cabo é formado por condutores de cobre ou alumínio com isolamento de XLPE (*Ethylene Propylene Rubber* – Borracha Sintética de Etileno Propileno) e um revestimento externo contra penetração de umidade. Os cabos XLPE, como o que está mostrado na Figura 1, são os preferidos tanto para linhas de transmissão quanto da distribuição. Os cabos de média tensão são protegidos através de um revestimento externo de cloreto de polivinila (PVC) ou XLPE.

A atmosfera úmida (água, sal, poluição, etc.) associada ao campo elétrico de alta intensidade provoca o fenômeno conhecido como arborescência elétrica provocada pela água (*water tree*) na isolamento. Uma vez que esse fenômeno danifica a isolamento em um período de tempo de operação relativamente curto, os cabos de alta tensão de XLPE necessitam de barreiras contra a entrada de umidade no revestimento metálico, instaladas sob os revestimentos externos. Os revestimentos metálicos podem ser de alumínio (Al), aço inoxidável, chumbo (Pb), fita laminada de Al ou fita laminada de Pb.

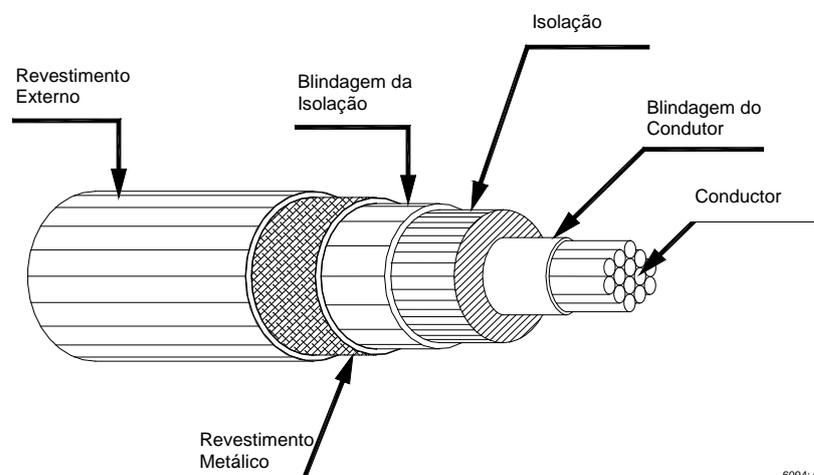


Figura 1: Construção do Cabo de XLPE.

Proteção dos Cabos para Corrente de Curto-Circuito

O cabo deve ser protegido contra o sobreaquecimento causado pela circulação de correntes elevadas de curto-circuito no seu condutor. O ponto da falta pode ser no próprio cabo ou em qualquer outra parte do sistema elétrico.

Durante uma falta entre fases, as perdas I^2R no condutor da fase elevam a temperatura do condutor e conseqüentemente a dos materiais de isolamento, blindagens e adjacentes. Durante uma falta à terra, as perdas I^2R tanto no revestimento quanto no condutor da fase elevam a temperatura de forma similar à das faltas entre fases.

Durante a circulação da corrente de curto-circuito, não deve ser permitido que a temperatura do condutor aumente até o ponto em que possa prejudicar os materiais de isolamento. A proteção dos cabos durante condições de curto-circuito limita os danos aos cabos se a falta for no cabo, e/ou limita a quantidade de calor transferida dos condutores metálicos para os materiais de isolamento e outros materiais.

O custo elevado dos cabos de transmissão de energia justifica a implementação de esquemas de teleproteção (*communications-assisted schemes*). De forma geral, os esquemas para proteção de linhas aéreas e proteção de cabos subterrâneos são os mesmos. Entretanto, devemos analisar e entender as diferenças entre as duas aplicações para proteger adequadamente os cabos de potência.

Os três esquemas piloto básicos para proteção de cabos através de relés são: Diferencial de Corrente, Comparação de Fases e Comparação Direcional.

Diferencial de Corrente

O esquema de proteção diferencial de corrente pode consistir de três elementos de fase segregada com restrição diferencial ou um elemento com restrição diferencial que combine as informações das três fases. Esses elementos diferenciais usam as grandezas de operação e restrição obtidas das correntes locais e da extremidade remota. A grandeza de operação é a magnitude da soma vetorial dessas correntes. A grandeza de restrição é normalmente a soma escalar das mesmas correntes. O relé diferencial de corrente usa as grandezas de operação e restrição para formar a característica do tipo restrição. A característica do relé define a região para faltas internas. Se os valores das grandezas de operação e restrição estiverem dentro da região de faltas internas, o relé declara uma condição de trip.

O esquema diferencial é usado freqüentemente para proteção de cabos pois é um esquema menos dependente das características do cabo. A seguir, são apresentadas as principais características do esquema diferencial de corrente:

- a. O esquema não fornece proteção de backup.
- b. A disponibilidade do esquema depende da performance do canal de comunicação.
- c. O esquema somente requer sinais de corrente.
- d. O esquema necessita de um canal de comunicação com faixa de banda adequada para transmitir e receber as informações de corrente.
- e. O esquema requer poucos ajustes; os ajustes devem considerar o efeito das correntes de carregamento da linha.
- f. O esquema de fase segregada tem cobertura limitada para resistência de falta.
- g. O esquema é imune às condições de perda de sincronismo e reversão de corrente.
- h. O esquema requer uma lógica especial de segurança para condições de faltas externas com saturação do transformador de corrente (TC).

Comparação de Fases

Este esquema compara o ângulo de fase entre as correntes de ambas as extremidades do cabo. O método de comparação de fase usa um sinal combinado que fornece as informações para todos os tipos de falta. Neste esquema, o sinal composto é submetido a um amplificador de onda quadrada para obter um sinal de onda quadrada que contenha as informações do ângulo de fase. O relé compara o sinal de onda quadrada local com os sinais de onda quadrada remotos; se a coincidência dos dois sinais for maior do que um certo valor, por exemplo, 90°, o esquema declara uma condição de falta interna.

Este esquema foi muito popular no passado pois ele tem mínimos requisitos para o canal de comunicação. Uma vez que os sinais de corrente contêm as informações do ângulo de fase, este esquema é mais seguro do que o esquema diferencial de corrente para condições de falta externa com saturação do TC. Todas as outras características são as mesmas que as do esquema diferencial de corrente.

Comparação Direcional

Os esquemas de comparação direcional usam diferentes tipos de unidades de medição (elementos direcionais, elementos de distância) em cada extremidade do cabo. Essas unidades de medição determinam a direção da falta. Este esquema compara as informações da direção da falta de cada extremidade do cabo para determinar se existe uma falta no cabo.

Freqüentemente, estes esquemas usam elementos de distância nas aplicações dos cabos de transmissão de energia. Este método deve considerar os seguintes fatos:

- a. A impedância dos cabos de potência é menor do que a impedância de linhas aéreas pois o espaçamento dos condutores de fase nos cabos é menor do que o espaçamento nas linhas aéreas. Em alguns casos, a impedância pode ser menor do que o valor mínimo de ajuste do relé de distância.
- b. O ângulo de impedância de seqüência-zero dos cabos é menor do que o ângulo de impedância de seqüência-zero das linhas aéreas. A compensação do ângulo de seqüência-zero requer uma faixa de ajuste abrangente que acomode todos os ângulos possíveis do cabo.

Os elementos direcionais que operam com as grandezas das componentes de seqüência fornecem uma outra possibilidade para a implementação do esquema de comparação direcional. Posteriormente, neste *paper*, vamos analisar a aplicação do elemento direcional de seqüência-negativa para proteção de cabos de transmissão de energia. A seguir, são apresentadas as características principais do esquema de comparação direcional:

- a. As unidades de medição fornecem proteção principal e de *backup*.
- b. A perda do canal de comunicação somente desabilita as funções de comparação direcional, mas não desabilita as funções da proteção direcional de *backup* local e remoto.
- c. O esquema requer sinais de tensão e corrente de ambas as extremidades da linha.
- d. Os esquemas de Transferência de Trip com Sobrealcance Permissivo (*Permissive Overreaching Transfer Trip – POTT*) operam normalmente através dos canais de comunicação com Chaveamento por Desvio de Frequência (*Frequency Shift Keying – FSK*).
- e. No caso dos cabos do tipo tubular (*pipe*) ou cabos com conduíte magnético, a impedância de seqüência-zero não é constante e depende da corrente circulante através do cabo.

- f. A corrente de carregamento deve ser considerada quando estiver efetuando os ajustes dos elementos de fase para evitar a operação incorreta do relé.
- g. Os elementos direcionais com componentes de seqüência-negativa propiciam excelente cobertura para resistência de falta [3]. Esses elementos não precisam ser dessensibilizados para os efeitos da corrente de carregamento.

CARACTERÍSTICAS DOS CABOS

As características dos cabos são um fator importante na avaliação dos esquemas de proteção para as aplicações dos cabos de transmissão de energia. Adicionalmente, precisamos calcular as impedâncias indutivas de seqüência-positiva, negativa e zero e admitâncias da capacitância para determinar os ajustes do esquema [4, 5, 6]. Nas aplicações de cabos com três condutores, podemos não considerar as assimetrias do cabo, porém temos de considerar essas assimetrias se estivermos aplicando elementos direcionais de seqüência para proteger cabos com um condutor [7]. A seguir, vamos concentrar nossa atenção nos cabos com um condutor.

Cabos com Um Condutor

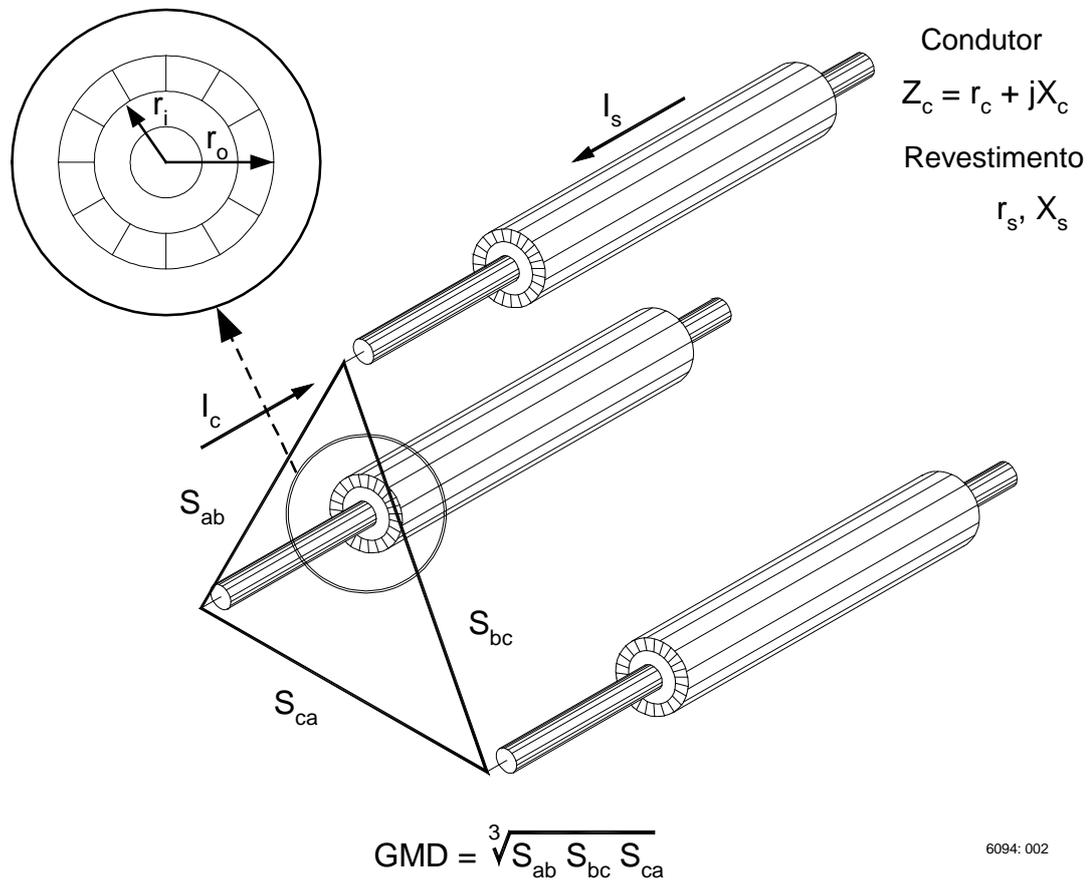


Figura 2: Grupo de Três Cabos com Um Condutor.

A Figura 2 mostra um grupo de três cabos com um condutor, um para cada fase. A queda de tensão devida à corrente circulante no condutor é:

$$V = I_c \cdot Z_c - j \cdot I_s \cdot X_m \quad \text{Equação 1}$$

A queda de tensão ao longo do revestimento é zero com o revestimento aterrado:

$$0 = (r_s + j \cdot X_s) \cdot I_s - j \cdot I_c \cdot X_m \quad \text{Equação 2}$$

onde:

- Z_c = Impedância do condutor (Ω)
- r_s = Resistência ac do revestimento (Ω)
- X_s = Reatância própria do revestimento (Ω)
- X_m = Reatância mútua entre o condutor e o revestimento (Ω)
- I_s = Corrente no revestimento (A)
- I_c = Corrente no condutor (A)

A reatância do revestimento, X_s , e a reatância mútua, X_m , são iguais quando o condutor é concêntrico dentro do revestimento. Resolva a Equação 2 para I_s , e substitua X_m por X_s :

$$I_s = \frac{j \cdot I_c \cdot X_m}{r_s + j \cdot X_m} \quad \text{Equação 3}$$

A substituição de I_s na Equação 1 resulta em:

$$V = I_c \cdot Z_c - j \cdot \left(\frac{j \cdot I_c \cdot X_m}{r_s + j \cdot X_m} \right) \cdot X_m \quad \text{Equação 4}$$

A impedância do condutor, Z_c , é igual a $r_c + jX_c$. A substituição da resistência do condutor, r_c , e a reatância do condutor, X_c , na Equação 4, resultam em:

$$V = \left[\left(r_c + \frac{r_s \cdot X_m^2}{r_s^2 + X_m^2} \right) + j \cdot \left(X_c - \frac{X_m^3}{r_s^2 + X_m^2} \right) \right] \cdot I_c \quad \text{Equação 5}$$

$$V = [(r_c + r_{sh}) + j \cdot (X_c + X_{sh})] \cdot I_c \quad \text{Equação 6}$$

onde r_{sh} na Equação 6 representa as perdas no revestimento causadas pelas tensões induzidas pela corrente do condutor no revestimento. Essas tensões geram correntes no revestimento que elevam a resistência do condutor. X_{sh} na Equação 6 representa a correção da reatância devido à presença das correntes no revestimento. Ela tem um sinal negativo pois a direção da corrente no revestimento está em oposição à direção da corrente no condutor.

Componentes da Resistência

Considerando a Equação 5, a resistência ac de um condutor simples em um grupo de três condutores é:

$$r = r_c + \frac{r_s \cdot X_m^2}{r_s^2 + X_m^2} \quad \text{Equação 7}$$

A reatância mútua, X_m , para um condutor simples é [8]:

$$X_m = 0,002893 \cdot f \cdot \log \frac{2 \cdot \text{GMD}}{r_o + r_i} \quad \Omega / \text{phase} / \text{km} \quad \text{Equação 8}$$

onde:

- f = Frequência do sistema (Hz)
- GMD = Distância Média Geométrica (*Geometric Mean Distance*) (m)
- r_o = Raio externo do revestimento (m)
- r_i = Raio interno do revestimento (m)

A resistência do revestimento é [6]:

$$r_s = \frac{k}{(r_o + r_i) \cdot (r_o - r_i)} \quad \text{Equação 9}$$

onde:

- k = Função (material do revestimento)

As características mais importantes dos componentes da resistência são:

- a. A resistência do cabo é maior do que a resistência própria do condutor.
- b. A resistência do cabo depende da GMD.
- c. A resistência do cabo depende do material e da geometria do revestimento.
- d. Se o revestimento tiver uma junção elétrica sólida (*bonded*), como na Opção ③ da Figura 3 [9], sua resistência pode ser 50–90 por cento da resistência do condutor. A isolação do revestimento em um ou dois pontos reduz a resistência, porém gera tensões elevadas no revestimento que podem aumentar a eletrólise ou propiciar condições perigosas. O método *bonding* de blindagem do cabo está também relacionado a capacidade de condução de corrente do cabo.

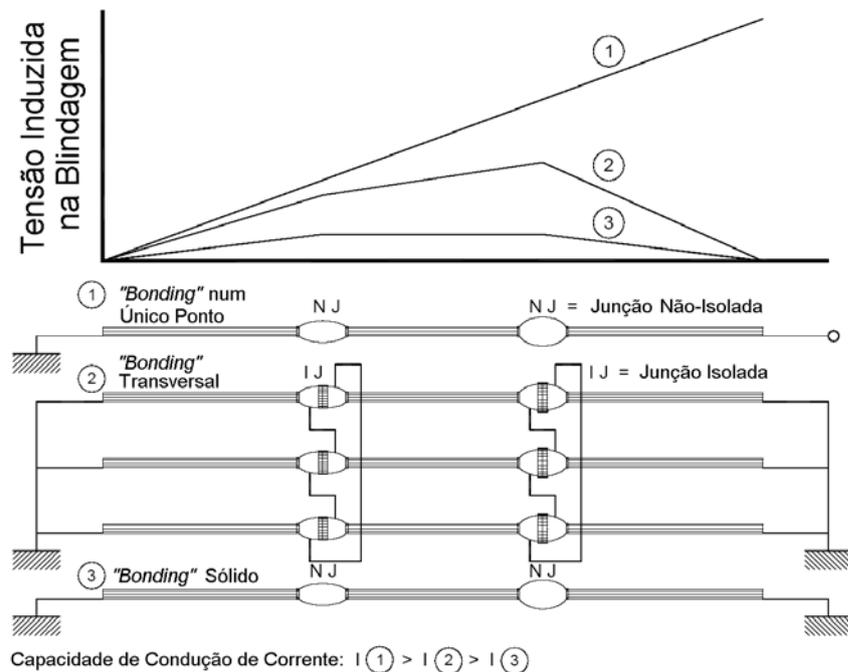


Figura 3: Método *Bonding* de Blindagem do Cabo.

Componentes da Reatância

Considerando a Equação 5, a reatância de um condutor simples em um grupo de três condutores é:

$$X = X_c - \frac{X_m^3}{r_s^2 + X_m^2} = X_c + X_{sh} \quad \text{Equação 10}$$

A reatância do condutor, X_c , para um condutor simples é [8]:

$$X_c = 0,002893 \cdot f \cdot \log \frac{\text{GMD}}{\text{GMR}_{\text{cond}}} \quad \Omega / \text{phase} / \text{km} \quad \text{Equação 11}$$

onde:

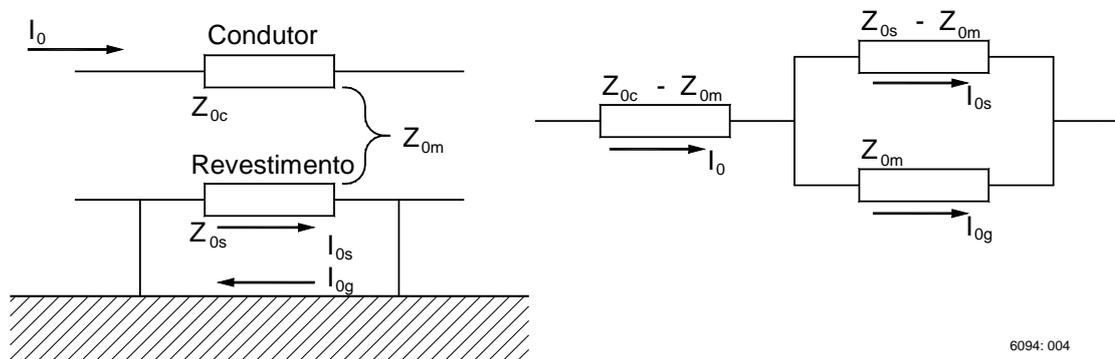
$\text{GMR}_{\text{cond}} =$ Raio Médio Geométrico (*Geometric Mean Radius*) (m)

As características mais importantes dos componentes da reatância são:

- A reatância do cabo, X , é menor do que a reatância do condutor simples, X_c , devido ao acoplamento mútuo do revestimento.
- Quanto mais próximos estiverem os condutores de fase um do outro, menor será a reatância do condutor, X_c .
- A redução da reatância do cabo, X_{sh} , depende da reatância mútua, X_m , que é uma função de GMD. X_{sh} também depende da resistência do revestimento, r_s , que é uma função do material e da geometria do revestimento.
- Se o revestimento for isolado, como na Opção ① da Figura 3, ou descontínuo, como na Opção ② da mesma figura, as correntes no revestimento são desprezíveis. Nesses casos $X = X_c$ pois r_{sh} tem um valor elevado.

Impedância de Seqüência-Zero

Os revestimentos dos cabos normalmente têm conexões à terra em diversos pontos. A forma com que os revestimentos estão conectados e a resistência das conexões determinam a impedância do caminho de seqüência-zero. A Figura 4 mostra um circuito equivalente do caminho de seqüência-zero.



6094: 004

Figura 4: Correntes de Retorno de Seqüência-Zero e Circuito Equivalente.

Vamos determinar a impedância de seqüência-zero, Z_0 , para as três possibilidades de retorno da corrente de seqüência-zero:

1. Retorno da corrente somente pelo revestimento; I_{0s} :

$$Z_0 = Z_{0c} - Z_{0m} + Z_{0s} - Z_{0m} \quad \text{Equação 12}$$

$$Z_0 = Z_{0c} + Z_{0s} - 2Z_{0m} \quad \text{Equação 13}$$

2. Retorno da corrente somente pela terra; I_{0g} :

$$Z_0 = Z_{0c} - Z_{0m} + Z_{0m} = Z_{0c} \quad \text{Equação 14}$$

3. Retorno da corrente pelo revestimento e pela terra em paralelo; I_{0s} and I_{0g} :

$$Z_0 = Z_{0c} - Z_{0m} + \frac{(Z_{0s} - Z_{0m}) \cdot Z_{0m}}{Z_{0s}} \quad \text{Equação 15}$$

$$Z_0 = Z_{0c} - \frac{Z_{0m}^2}{Z_{0s}} \quad \text{Equação 16}$$

onde:

Z_{0c} = Impedância de seqüência-zero do condutor (Ω)

Z_{0s} = Impedância de seqüência-zero do revestimento (Ω)

Z_{0m} = Impedância mútua de seqüência-zero (Ω)

As características mais importantes da impedância de seqüência-zero são:

- A impedância depende do método *bonding* e do aterramento do revestimento do cabo.
- Seu ângulo pode variar de ângulos pequenos (corrente de retorno somente pelo revestimento) até ângulos com valores próximos ao ângulo do cabo Z_{0c} (corrente de retorno somente pela terra).
- A presença de caminhos paralelos (cabos, condutores de terra) e a resistividade de terra devem ser consideradas na determinação da impedância de seqüência-zero.
- No caso dos dutos magnéticos, a impedância de seqüência-zero varia com a corrente de seqüência-zero.

Baseando-se nas características relacionadas acima, as grandezas de seqüência-zero não são apropriadas para proteção de cabos. De forma similar, esse mesmo raciocínio mostra a dificuldade na aplicação da proteção de distância de terra para os cabos.

Reatância Capacitiva Shunt

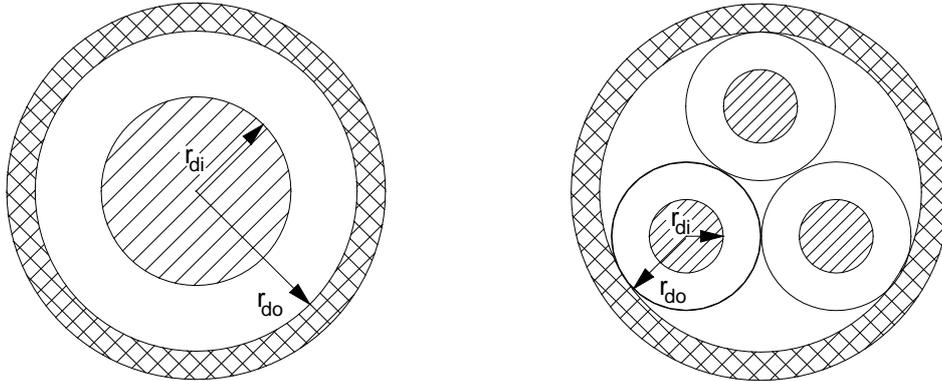
A capacitância, C , entre um condutor isolado dentro de um revestimento concêntrico e o próprio revestimento é [4]:

$$C = \frac{0,024127 \cdot \epsilon_R}{\log \frac{r_{do}}{r_{di}}} \mu\text{F} / \text{km} \quad \text{Equação 17}$$

onde:

- ϵ_R = permitividade relativa do material de isolamento
- r_{do} = Raio interno do revestimento ou raio externo da isolamento, se estiver sendo usada fita para blindagem (m)
- r_{di} = Raio do condutor (m)

Se o revestimento for aterrado, a Equação 17 fornece a capacitância à terra.



6094: 005

Figura 5: Capacitância de Condutores Blindados.

As capacitâncias shunt de seqüência-positiva, negativa e zero para condutores simples com revestimentos metálicos são todas iguais. Isto também é válido para cabos com três condutores blindados, que possuem condutores redondos e sua própria camada de blindagem. A Figura 5 mostra as seções transversais de um cabo um condutor e um cabo com três condutores. Cabos com três condutores envolvidos por uma cinta, sem blindagem do condutor, têm capacitância de seqüência-zero menor do que as capacitâncias de seqüência positiva e negativa.

As características mais importantes da reatância capacitiva shunt são:

- Para um condutor simples com revestimento metálico, as capacitâncias de seqüência positiva, negativa e zero são as mesmas que a capacitância de um dos condutores em relação a seu revestimento ($C_1 = C_2 = C_0$).
- A capacitância do cabo depende principalmente da geometria do condutor simples.
- Não há relação entre S (distância entre os condutores simples) e a capacitância shunt do cabo.
- À medida que a resistência dielétrica da isolamento aumenta (processo ou material novo), a capacitância do cabo aumenta enquanto a espessura requerida para isolamento diminui.
- As reatâncias da capacitância shunt de seqüência-zero, x_0 , seqüência-positiva, x_1 , e seqüência-negativa, x_2 , são iguais a $\frac{1}{\omega \cdot C_0}$, $\frac{1}{\omega \cdot C_1}$, e $\frac{1}{\omega \cdot C_2}$ respectivamente.

C_0 , C_1 , e C_2 são as capacitâncias de seqüência-zero, positiva e negativa por comprimento da unidade. A Equação 18 converte capacitância-por-quilômetro em reatância ohms-por-fase total, onde ℓ é o comprimento em quilômetros:

$$X_{C012} = \frac{X_{C012}}{\ell} = \frac{1}{\ell \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{012}}$$

Equação 18

Cabo Submarino

Os cabos submarinos estão localizados a uma profundidade considerável em relação ao nível da superfície; conseqüentemente, o caminho da corrente de retorno ocorre não somente pelo revestimento e pela terra, mas também pela água do mar.

A distribuição da corrente entre os caminhos varia inversamente às resistividades dos caminhos. Uma vez que a resistividade da água do mar varia de 0,01 a 0,000025 vezes a resistividade da terra, praticamente toda a corrente de retorno circula pela água do mar. Por este motivo, temos também que considerar a resistividade da água do mar ao efetuar o cálculo da impedância de seqüência-zero do cabo.

Parâmetros do Cabo entre Playa del Carmen – Chankanaab

O cabo de transmissão de energia de nossa aplicação conecta a Subestação Playa del Carmen (PCA) localizada na Península de Yucatan, continente, com a Subestação Chankanaab II (CHS), localizada na Ilha de Cozumel. A conexão é efetuada através de dois circuitos de 34,5 kV (CI1, CI2). Cada circuito consiste de três condutores monofásicos, e cada circuito tem três seções. A Tabela 1 relaciona o comprimento e o tipo de cada seção. O Apêndice 1 inclui a configuração e a geometria do cabo.

Tabela 1: Seções dos Circuitos

Seção	De	Para	Comprimento (m)	Tipo
1	Subestação Playa del Carmen (PCA)	Costa de Playa del Carmen	5.500	Subterrâneo
2	Costa de Playa del Carmen	Costa da Ilha de Cozumel	18.000	Submarino
3	Costa da Ilha de Cozumel	Subestação Chankanaab II (CHS)	500	Subterrâneo

Calcule as impedâncias de seqüência do cabo efetuando os seguintes passos:

- Obtenha as matrizes de admitância e impedância do cabo para cada seção do cabo.
- Obtenha os circuitos PI (π) equivalentes por fase.
- Calcule os diagramas da constante ABCD por fase para cada seção do cabo [6].
- Obtenha o equivalente série das três seções.
- Obtenha o circuito equivalente PI (π) das três seções.
- f. Calcule a impedância e admitância de seqüência das matrizes de impedância e admitância de fase, Z_{ABC} e Y_{ABC} .

A Equação 19 e a Equação 20 transformam as matrizes de fase em matrizes de seqüência.

$$Z_{012} = T^{-1} \cdot Z_{ABC} \cdot T \quad \text{Equação 19}$$

$$Y_{012} = T^{-1} \cdot Y_{ABC} \cdot T \quad \text{Equação 20}$$

onde:

T = Transformação das Componentes Simétricas [5].

A Tabela 2 mostra as admitâncias e impedâncias de seqüência totais do cabo que incluem as três seções do cabo.

Tabela 2: Admitâncias e Impedâncias de Seqüência Equivalentes do Cabo

Seqüência	Impedância (Ω)	Admitância (S)
Zero	$Z_0 = 13,39 \angle 24^\circ$	$Y_0 = 0,0019 \angle 89,9^\circ$
Positiva	$Z_1 = 10,56 \angle 54^\circ$	$Y_1 = 0,0019 \angle 89,9^\circ$
Negativa	$Z_2 = 10,56 \angle 54^\circ$	$Y_2 = 0,0019 \angle 89,9^\circ$

ELEMENTO DIRECIONAL DE SEQÜÊNCIA-NEGATIVA

Medição da Impedância de Seqüência-Negativa para Faltas à Frente e Reversa

Podemos medir a impedância de seqüência-negativa do sistema usando a corrente e tensão de seqüência-negativa, V_2 e I_2 , na localização do relé para um sistema determinado. Vamos denominar essa impedância de $Z_{2Medida}$. A Figura 6 mostra um sistema com duas fontes e um diagrama de seqüência-negativa para faltas à terra.

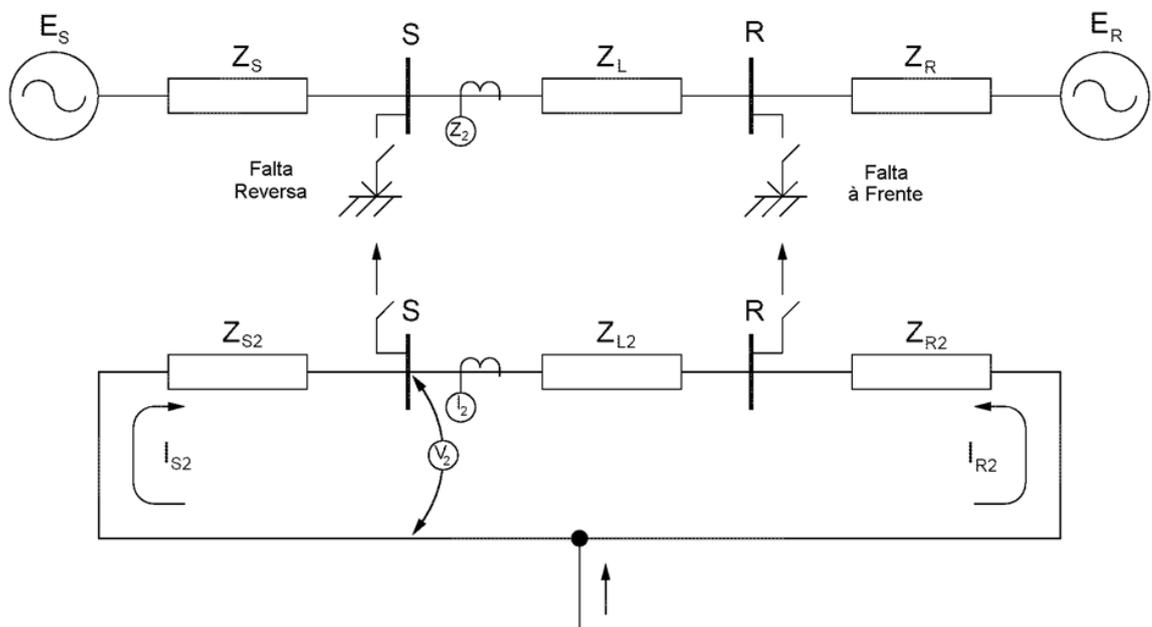


Figura 6: Medição da Impedância de Seqüência-Negativa para Faltas à Frente e Reversa.

A Tabela 3 mostra a medição da impedância de seqüência-negativa para faltas fase-terra na direção nas direções à frente e reversa.

Tabela 3: Medição da Impedância de Seqüência-Negativa para Faltas à Frente e Reversa.

Condição	V2	I2	Z2 _{Medida}
Falta Fase-Terra à Frente	$-I_{S2} \cdot Z_{S2}$	I_{S2}	$-Z_{S2}$
Falta Fase-Terra Reversa	$-I_{R2} \cdot (Z_{R2} + Z_{L2})$	$-I_{R2}$	$Z_{R2} + Z_{L2}$

onde:

Z_{S2} = Impedância de seqüência-negativa da fonte em S (Ω)

Z_{R2} = Impedância de seqüência-negativa da fonte em R (Ω)

Z_{L2} = Impedância de seqüência-negativa da linha (Ω)

Schweitzer e Roberts [10] descrevem o elemento direcional de seqüência-negativa que mede a impedância de seqüência-negativa, Z2, e compara o resultado com os valores limites de faltas à frente e reversa para efetuar uma declaração da direção da falta. O elemento direcional usa a Equação 21 para a medição de Z2.

$$Z2 = \frac{\text{Re}[V_2 \cdot (I_2 \cdot 1\angle\theta)^*]}{|I_2|^2} \quad \text{Equação 21}$$

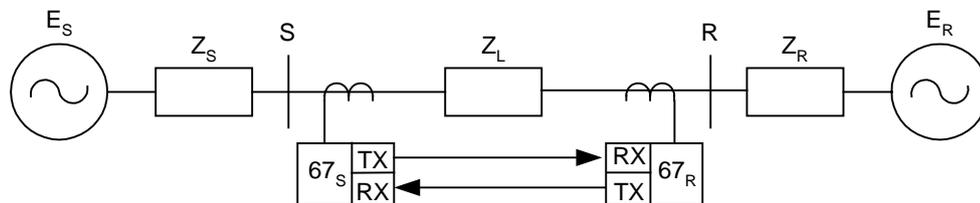
onde:

$Z2_{\text{Medida}}$ = Impedância de seqüência-negativa medida (Ω)

$\angle\theta$ = Ângulo da impedância de seqüência-negativa da linha (graus)

O elemento direcional de seqüência-negativa declara uma condição de falta na direção à frente se $Z2_{\text{Medida}}$ for menor do que o valor limite da impedância à frente, Z2F. O elemento declara uma condição de falta na direção reversa se $Z2_{\text{Medida}}$ for maior do que o valor limite da impedância reversa, Z2R. Z2F tem de ser menor do que Z2R para evitar qualquer sobreposição entre as regiões de falta “à frente” e “reversa”.

$Z2_{\text{Medida}} = -Z_{S2}$ para faltas à frente e $Z2_{\text{Medida}} = Z_{2L} + Z_{2R}$ para faltas reversas. A diferença nas medições das impedâncias para faltas na direção à frente e reversa é: $Z_{S2} + Z_{2L} + Z_{2R}$. Precisamos ajustar os limites Z2F e Z2R entre as medições de Z2 para as direções à frente e reversa. Se considerarmos fontes infinitas, Z_{2L} é a diferença nas medições das impedâncias entre as faltas à frente e reversa.



TX = Transmissor; RX = Receptor

6094-007

Figura 7: Elementos Direcionais de Seqüência-Negativa, 67, em Ambas as Extremidades do Cabo para Proteção de Faltas Desequilibradas.

Podemos implementar um esquema de comparação direcional para detectar faltas desequilibradas no cabo através desses elementos direcionais em ambas as extremidades do cabo. A Figura 7 mostra esses elementos direcionais, 67_S e 67_R , em um esquema de Transferência de Trip com Sobrealcance Permissivo (POTT) implementado usando o sistema de comunicação entre relés [11].

A Tabela 4 mostra a medição da impedância de seqüência-negativa de ambos os elementos direcionais para faltas fase-terra.

Tabela 4: Medições da Impedância de Seqüência-Negativa em Ambas as Extremidades do Cabo

Localização da Falta Fase-Terra	$Z_{2\text{Medição em S}}$	$Z_{2\text{Medição em R}}$
S	$Z_{L2} + Z_{R2}$	$-Z_{R2}$
na linha	$-Z_{S2}$	$-Z_{R2}$
R	$-Z_{S2}$	$Z_{L2} + Z_{S2}$

As diferenças nas medições das impedâncias entre faltas na direção à frente e reversa em ambas as extremidades do cabo são:

Elemento Direcional em S:

$$Z2 = Z_{L2} + Z_{R2} - (-Z_{S2}) = Z_{S2} + Z_{L2} + Z_{R2} \quad \text{Equação 22}$$

Elemento Direcional em R:

$$Z2 = Z_{L2} + Z_{S2} - (-Z_{R2}) = Z_{R2} + Z_{L2} + Z_{S2} \quad \text{Equação 23}$$

Nós ajustamos $Z2F = Z_{L2}/2$ and $Z2R = Z2F + 0,1$, em ambas as extremidades do cabo; com esses ajustes, os elementos direcionais efetuam a declaração correta da direção da falta sem que haja sobreposição das regiões das faltas à frente e reversa.

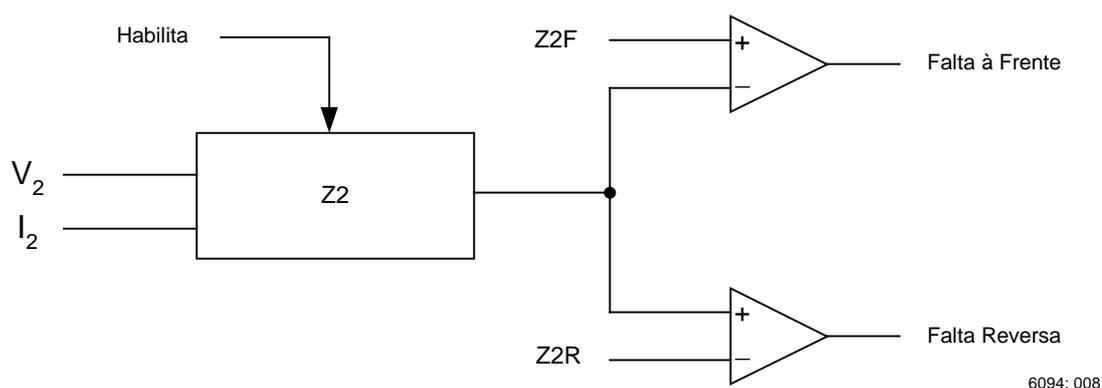


Figura 8: Elemento Direcional de Seqüência-Negativa com Valores Limites de Faltas à Frente e Reversa para Declaração da Direção da Falta [12].

LUGAR GEOMÉTRICO DA IMPEDÂNCIA Z2 NAS APLICAÇÕES DOS CABOS

Lugar Geométrico da Impedância de Seqüência-Negativa Considerando a Admitância do Cabo

O modelo da linha na seção anterior incluiu somente a impedância série da linha, Z_L . Esse modelo é apropriado para aplicações em linhas aéreas onde a admitância da linha é desprezível devido ao seu valor relativo ser pequeno quando comparado com a impedância série da linha. Esse modelo não é válido para aplicações em cabos devido aos seguintes fatos:

- À medida que os condutores das fases ficam mais próximos um do outro, a impedância série da linha fica menor.
- À medida que a distância entre o condutor da fase e o revestimento diminui, a capacitância do cabo aumenta. À medida que a capacitância aumenta, a reatância capacitiva shunt diminui.
- A impedância série é proporcional ao comprimento do cabo; a reatância da capacitância shunt é inversamente proporcional ao comprimento do cabo.

Vamos analisar o efeito da adição da admitância do cabo ao modelo do cabo na medição de Z_2 do elemento direcional.

A Figura 9 mostra um diagrama de seqüência-negativa para um sistema com duas fontes com uma interconexão através de um cabo. O modelo do cabo inclui a admitância capacitiva shunt em ambas as extremidades do cabo.

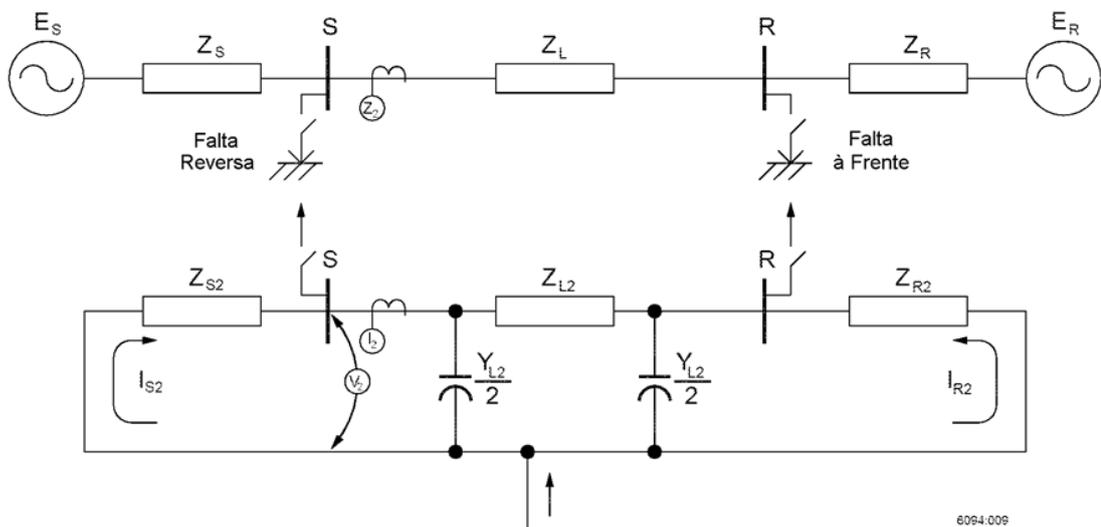


Figura 9: Sistema com Duas Fontes e com Interconexão via Cabo. O Diagrama de Seqüência- Negativa Inclui a Admitância do Cabo.

Para uma falta à frente, $V_2 = -I_{S2} \cdot Z_{S2}$ and $I_2 = I_{S2}$,

então:

$$Z_2^{\text{"À Frente" Medida}} = \frac{-I_{S2} \cdot Z_{S2}}{I_{S2}} = -Z_{S2} \quad \text{Equação 24}$$

Para uma falta reversa $Z_{2\text{Reversa Medida}}$ é expressa em termos dos elementos do diagrama, conforme mostrado a seguir:

$$Z_{2\text{Reversa Medida}} = \frac{4 \cdot Z_{L2} + 2 \cdot Y_{L2} \cdot Z_{L2} \cdot Z_{R2} + 4 \cdot Z_{R2}}{4 + 4 \cdot Y_{L2} \cdot Z_{R2} + 2 \cdot Y_{L2} \cdot Z_{L2} + Y_{L2}^2 \cdot Z_{L2} \cdot Z_{R2}} \quad \text{Equação 25}$$

onde:

$Y_{L2} =$ Admitância de seqüência-negativa do cabo (S)

A Figura 10 mostra o lugar geométrico da impedância de seqüência-negativa no plano da impedância de seqüência-negativa para uma falta reversa, para diferentes valores de Y_{L2} , enquanto todas as outras impedâncias são constantes. Quando a impedância é zero, a medição de Z_2 ocorre no ponto B; este ponto corresponde ao caso do modelo simplificado da impedância série. À medida que a admitância aumenta, o ponto de medição move-se mais para cima, à direita, e a distância em relação à origem aumenta. Teremos um ponto entre B e C para diferentes tipos de cabos.

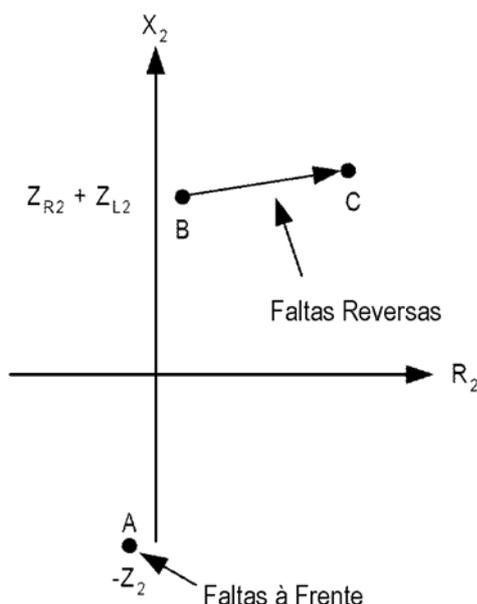


Figura 10: Lugar Geométrico da Impedância de Seqüência-Negativa para Falta à Frente e Reversa nas Aplicações de Cabos.

Para uma aplicação adequada do elemento direcional de seqüência-negativa, as regiões das faltas à frente e reversa não devem se sobrepor.

Lugar Geométrico de Z_2 nas Aplicações de Cabos Submarinos

A Figura 11 mostra o lugar geométrico da impedância de seqüência-negativa para um cabo submarino que tem as mesmas características e configuração daquele da Seção 2 de nossa aplicação. A figura mostra dois gráficos para as faltas fase-terra reversas: um deles corresponde ao lugar geométrico da impedância sem considerar a capacitância do cabo no modelo da linha; o outro considera a capacitância do cabo. Cada ponto do gráfico corresponde a comprimentos diferentes do cabo, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 128 km. Nós começamos observando o efeito da capacitância do cabo no lugar geométrico da impedância para distâncias de 32 km e maiores. O ângulo da impedância de seqüência-negativa varia de 78° a 39°. O primeiro ângulo corresponde a 1 km e o segundo a 128 km.

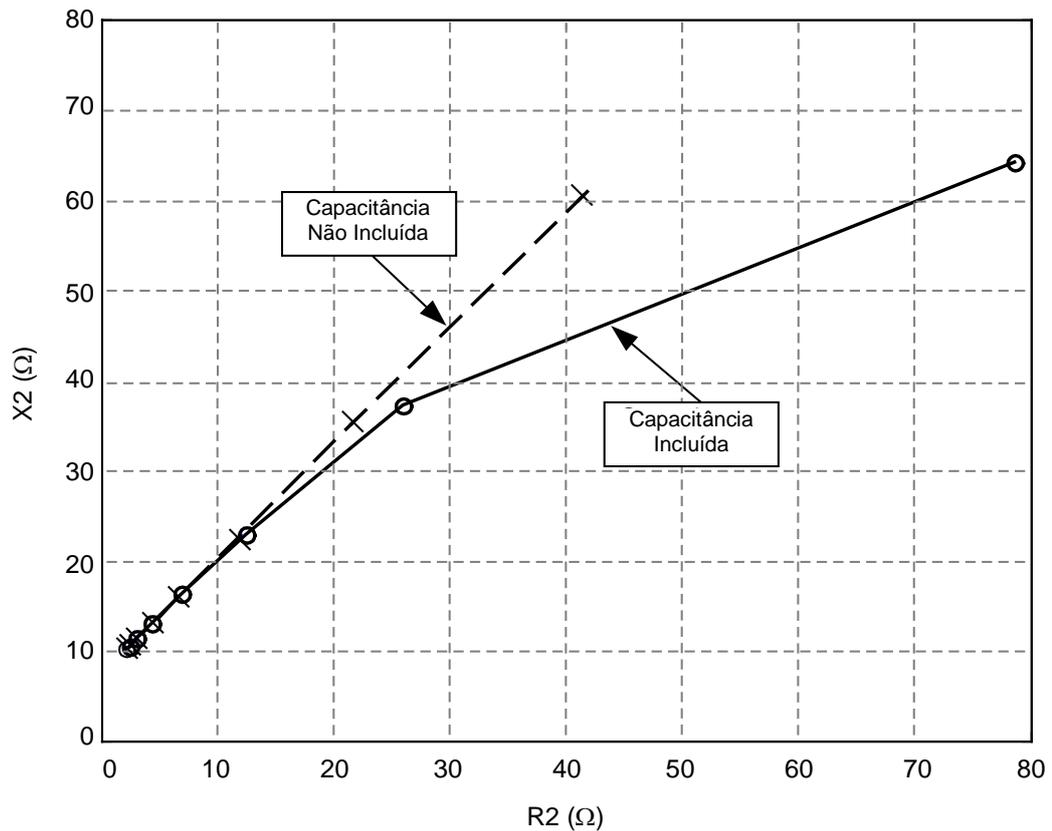


Figura 11: Lugar Geométrico da Impedância de Seqüência-Negativa para Falta Reversas em Aplicações de Cabos Submarinos.

CONCLUSÕES

1. A impedância de seqüência-zero do cabo depende dos caminhos de retorno da corrente, enquanto a impedância de seqüência-negativa não depende. Por esse motivo, as grandezas de seqüência-negativa são mais apropriadas do que as grandezas de seqüência-zero para proteção de cabos.
2. Os elementos direcionais de seqüência-negativa, com a ajuda das comunicações, propiciam uma proteção de cabos sensível e confiável contra faltas desequilibradas.
3. A admitância de seqüência-negativa do cabo altera a medição de Z_2 para faltas reversas. Essa admitância tem de ser incluída no modelo do cabo para determinar corretamente o ajuste do elemento direcional de seqüência-negativa do relé.
4. A medição da impedância de seqüência-negativa define as regiões “à frente” e “reversa” no plano da impedância de seqüência-negativa de forma que elas não se sobrepõem.
5. Os elementos de distância requerem faixas de ajuste especiais para compensar corretamente a impedância de seqüência-zero do cabo.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Standards Board, “IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems”, the Institute of Electric and Electronics Engineers, Inc., 1986.
- [2] Working Group D12 of the Line Protection Subcommittee, PSRC, “Protective Relaying Considerations for Transmission Lines with High Voltage AC Cables”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, N° 1, janeiro de 1997.
- [3] Roberts, J., Schweitzer, E. O. III, Arora, R., e Poggi, E., “Limits of the Sensitivity of Ground Directional and Distance Protection”, 50th Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Atlanta, GA, maio de 1996.
- [4] E. Clarke, “Circuit Analysis of A-C Power Systems Volume II”, General Electric Company, 1950.
- [5] C. F. Wagner e R. D. Evans, “Symmetrical Components”, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1933.
- [6] Central Station Engineers, “Electrical Transmission and Distribution Reference Book”, 4ª Edição, Westinghouse Electric Corporation, 1964.
- [7] J. Roberts e A. Guzmán, “Directional Element Design and Evaluation”, 21st Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 1994.
- [8] J. Lewis Blackburn, “Symmetrical Components for Power Systems Engineering”, Marcel Dekker Inc., 1993.
- [9] Sumitomo Electric Industries, LTD, “Development of Optical Fibers Incorporated Single-Core Submarine Power Cable”, Sumitomo Electrical Review, 1994.
- [10] E. O. Schweitzer III e J. Roberts, “Distance Relay Element Design”, 19th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 1992.
- [11] Behrendt, K. C. “Relay-to-Relay Digital Logic Communication for Line Protection, Monitoring, and Control”, 23rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 1996.
- [12] Armando Guzmán, J. Roberts e D. Hou, “New Ground Directional Elements Operate Reliably for Changing System Conditions”, 23rd Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, outubro de 1996.

BIOGRAFIAS

Jesús Vargas recebeu seu BSEE com louvor da Guadalajara Autonomous University (UAG), México, em 1986. Ele trabalhou como engenheiro de proteção de relés de 1986 a 1996 na Federal Electricity Commission, dedicando-se principalmente à análise de faltas, avaliação de novas tecnologias e comissionamentos. Em 1996, integrou a equipe da INELAP como diretor da divisão de sistemas de relés de proteção. A INELAP fornece os serviços de projeto, consultoria e apoio em sistemas de proteção, controle, automação e integração para concessionárias de energia elétrica e indústrias. Ele tem efetuado conferências na UAG sobre proteção de sistemas de potência. É membro do IEEE e foi o representante oficial do IEEE, seção Guadalajara, Jal., México.

Armando Guzmán recebeu seu BSEE com louvor da Guadalajara Autonomous University (UAG), México, em 1979. Ele recebeu um diploma em engenharia de fibra óptica do Monterrey Institute of Technology and Advanced Studies (ITESM), México, em 1990. Trabalhou como supervisor regional do Departamento de Proteção na Região de Transmissão Oeste da Federal Electricity Commission (a empresa concessionária de energia elétrica do México) por 13 anos. Realizou conferências na UAG sobre proteção de sistema de potência. Desde 1993, ele integra a equipe da Schweitzer Engineering Laboratories, em Pullman, Washington, onde atualmente é um engenheiro de pesquisas. É membro do IEEE e é autor e co-autor de diversos *papers* técnicos.

Jorge Robles recebeu seu BSEE do National Polytechnic Institute (IPN), México, em 1976. Ele começou a trabalhar na Federal Electricity Commission em 1978 como engenheiro de sistemas de relés de proteção. Desde 1988, ele responde pelo Órgão Responsável pelas Subestações da Distribuição, que cuida dos sistemas de proteção das redes de subtransmissão e distribuição nacionais. Ele é membro do IEEE e membro do subcomitê de sistemas de proteção da seção do IEEE do México, e é autor e co-autor de papers técnicos.

APÊNDICE 1: CONFIGURAÇÃO E GEOMETRIA DOS CABOS

Seções 1 e 3 do Cabo

Tensão do Cabo Subterrâneo: 34,5 kV

Material do Condutor: Cobre Cu

Área do Condutor: 400 mm²

Isolação: XLPE

Comprimento da Seção 1: 5.500 m

Comprimento da Seção 3: 500 m

Capacidade em Amperes: 566 A

Tabela 5: Geometria do Cabo e Características do Material das Seções 1 e 3

Seção	Material	Espessura (mm)	Resistividade ($\zeta \cdot m$)	Permeabilidade μ_R	Permitividade ϵ_R
1. Condutor	Cobre	23,5	$1,72 \times 10^{-8}$	1	-
2. Isolador 1	XLPE	10,25	-	1	2,35
3. Revestimento	Cobre	0,2	$1,72 \times 10^{-8}$	1	-
4. Isolador 2	PVC	4	-	1	4,55

$$r_c = 11,75 \text{ mm}$$

$$\Delta_1 = 10,25 \text{ mm}$$

$$r_{i1} = 22 \text{ mm}$$

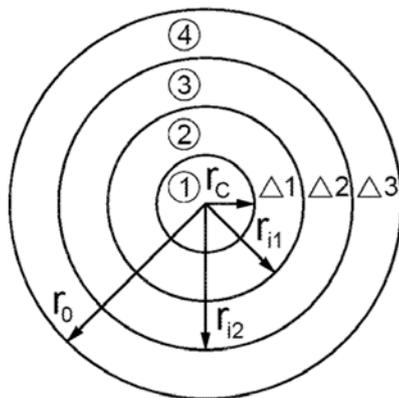
$$\Delta_2 = 0,2 \text{ mm}$$

$$r_{i2} = 22,2 \text{ mm}$$

$$\Delta_3 = 4 \text{ mm}$$

$$r_0 = 26,2 \text{ mm}$$

Seção Transversal do Cabo



Fora de Escala

Configuração do Cabo

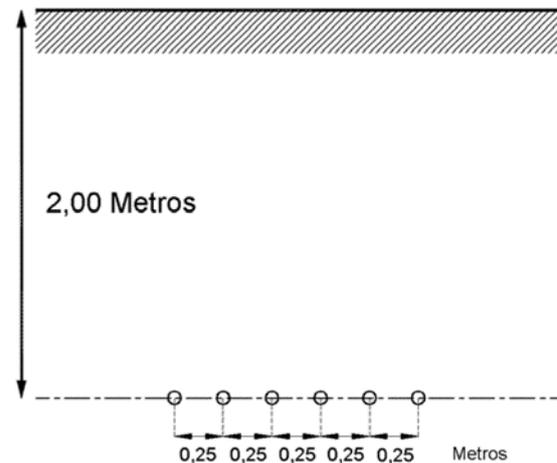


Figura 12: Configuração e Geometria das Seções 1 e 3 do Cabo.

Seção 2 do Cabo

Tensão do Cabo Submarino: 34,5 kV

Material do Condutor: Cobre Cu

Área do Condutor: 300 mm²

Isolação: XLPE

Revestimento: Chumbo

Comprimento: 18.000 m

Capacidade em Amperes: 500 A

Tabela 6: Geometria do Cabo e Características do Material da Seção 2

Section	Material	Thickness (mm)	Resistivity ($\zeta \cdot m$)	Permeability μ_R	Permittivity ϵ_R
1. Conductor	Copper	21,6	$1,72 \times 10^{-8}$	1	-
2. Insulator 1	XLPE	9,56	-	1	2,35
3. Sheath	Lead	2,20	$20,10^{-8}$	1	-
4. Insulator 2	Polyethylene	9,1	-	1	2,35
5. Armor	Steel	10,26	$9,70 \times 10^{-8}$	300	-
6. Insulator 3	PVC	3,6	-	1	4,55

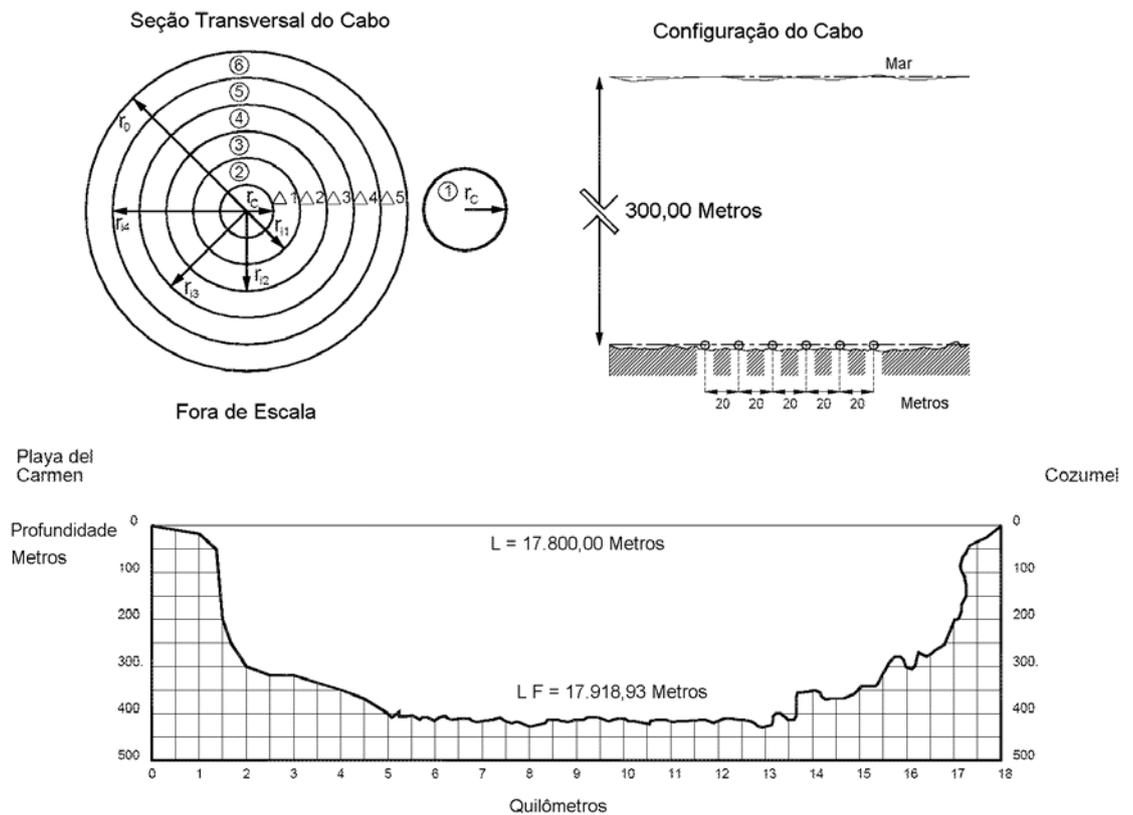


Figura 13: Configuração e Geometria da Seção 2 do Cabo.

$$\begin{aligned}r_c &= 10,8 \text{ mm} \\r_{i1} &= 20,36 \text{ mm} \\r_{i2} &= 22,56 \text{ mm} \\r_{i3} &= 31,66 \text{ mm} \\r_{i4} &= 41,92 \text{ mm} \\r_0 &= 45,52 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= 9,56 \text{ mm} \\ \Delta_2 &= 2,20 \text{ mm} \\ \Delta_3 &= 9,1 \text{ mm} \\ \Delta_4 &= 10,26 \text{ mm} \\ \Delta_5 &= 3,6 \text{ mm}\end{aligned}$$