

Avaliação do grau de compensação de bancos de capacitores série no desempenho da proteção de distância de linhas de transmissão

Wallace V. de Medeiros ^[1], Melinda Cesianara S. da Cruz ^[2]

^[1] UFERSA; Wallace.medeiros@alunos.ufersa.edu.br

^[2] UFERSA; melinda@ufersa.edu.br

Resumo: Este trabalho tem como objetivo analisar os efeitos da compensação série (banco de capacitores) em uma linha de transmissão (LT) de 230 kV e 200 km de comprimento, utilizando simulações no software ATPDraw e scripts analisados a partir do Matlab. O estudo foca na atuação do relé de proteção de distância aplicando simulações com diferentes graus de compensação (20% a 80%) e variando as localizações dos bancos de capacitores (início, meio, fim e extremidades da linha). O curto-circuito foi simulado na fase A em três distâncias da LT 30%(60km), 50%(100km) e 90%(180km). Analisando os resultados, é perceptível que a compensação série altera significativamente a impedância da linha, com variações percentuais que podem afetar a precisão do relé de distância. Em graus de compensações elevadas, foram vistos que o erro percentual das impedâncias em algumas fases foi notavelmente alto, observando-se assim distorções harmônicas e ressonâncias, principalmente, em curtos de maior distância do barramento transmissor (180 km). Dessa forma, chega-se à conclusão que a localização e o grau de compensação influenciam diretamente na estabilidade do sistema elétrico e a eficiência da proteção do relé de distância, sendo importante a otimização desses parâmetros para garantir a integridade do sistema elétrico.

Palavras-chave: Linhas de transmissão, Compensação, Proteção de distância, Matlab, ATPdraw.

Abstract: This work aims to analyze the effects of series compensation (capacitor banks) on a 230 kV and 200 km transmission line (TL), using simulations in the ATPDraw software and scripts analyzed in Matlab. The study focuses on the performance of the distance protection relay by applying simulations with different degrees of compensation (20% to 80%) and varying the locations of the capacitor banks (beginning, middle, end, and extremities of the line). The short-circuit was simulated in phase A at three distances along the TL: 30% (60 km), 50% (100 km), and 90% (180 km). Analyzing the results, it is evident that series compensation significantly alters the line impedance, with percentage variations that can affect the accuracy of the distance protection relay. At high degrees of compensation, the percentage error of the impedances in some phases was notably high, leading to observed harmonic distortions and resonances, particularly in faults located farther from the transmission bus (180 km). Therefore, it is concluded that the location and degree of compensation directly influence the stability of the electrical system and the efficiency of the distance protection relay, making it essential to optimize these parameters to ensure the integrity of the electrical system.

Key-words: Transmission lines, Compensation, Distance protection, Matlab, ATPdraw.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência têm como principal função fornecer energia para os consumidores, sejam estes, grandes indústrias até pequenos consumidores residenciais, mas para que a energia chegue ao seu destino, é preciso das linhas de transmissão. As linhas de transmissão é a responsável pelo transporte de energia elétrica recebida dos centros de geração de energia aos de consumo, e ainda áreas remotas. A eficiência e qualidade das linhas de transmissão garante a estabilidade do sistema elétrico de modo geral, entretanto, para a transmissão de energia em alta tensão e longas distâncias há desafios técnicos a serem enfrentados, como o efeito joule, limitação na capacidade de transmissão da linha e oscilações na qualidade da energia. Em um país como o Brasil que possui uma grande extensão territorial, os desafios mencionados anteriormente são ainda mais agravantes já que a distância entre a geração e o centro do consumo de energia é maior. [1]

Na realidade brasileira, a rede de transmissão é caracterizada por sua grande extensão, complexidade e a interligação do sistema, conhecido como sistema em anel. De acordo o balanço energético nacional (BEN) de

2024 que tem como base o ano de 2023, o Brasil possui uma geração de energia principalmente de fontes renováveis, onde se destaca a fonte hídrica por meio de hidrelétricas situadas nas regiões sul e sudeste e os centros de consumo nas regiões centro-oeste e sudeste, todavia o sistema elétrico dessas regiões é interligado com as demais regiões do país. A configuração do sistema elétrico brasileiro exige uma infraestrutura robusta e eficiente para que seja garantido a qualidade e estabilidade para o fornecimento contínuo de energia. Devido à crescente demanda energética e o avanço das energias renováveis intermitentes em ênfase a solar e eólica, tem-se exigido a modernização, bem como a expansão da rede de transmissão. Somado a isso, a variação da carga consumida diariamente e longas distâncias das linhas de transmissão há outras implicações como a regulação de tensão e minimizar as perdas.

Visto as dificuldades citadas anteriormente, uma das alternativas para otimizar o desempenho das linhas de transmissão é o uso da compensação série no sistema elétrico de potência. A compensação pode ser realizada de diversas maneiras, mas as que se destacam são por meio de reatores shunt e série, ela atua no controle da tensão e do fluxo de potência transmitido. A compensação com reatores shunt e série, são relevantes principalmente em linhas longas, como as do Brasil, onde o efeito das impedâncias e variações da carga no sistema de transmissão pode comprometer a continuidade de fornecimento de energia elétrica no sistema.

A compensação oferta benefícios para o sistema de transmissão como o aumento da capacidade de energia transmitida, redução das perdas e melhoria na estabilidade. Todavia, mesmo que a compensação tenha os seus benefícios, há consequências que devido a implementação da compensação na linha de transmissão, irá provocar consequências que podem ser visualizadas nas mudanças no perfil da tensão e corrente e ainda na operação e controle na coordenação do sistema de proteção. A presença dos dispositivos de compensação altera o comportamento do sistema durante as falhas, dessa forma, requer estudos a serem realizados para garantir uma maior segurança e confiabilidade do sistema elétrico, outro fator a ser estudado é a interação da compensação com as fontes renováveis como eólica e solar que possui variações na geração dependendo das estações do ano, podendo assim, comprometer o controle das variáveis do sistema elétrico.

Nesta perspectiva, tal trabalho tem como objetivo analisar os efeitos da compensação série em uma linha de transmissão na atuação do dispositivo de proteção de distância, onde foram aplicados diferentes graus de compensação, banco de capacitores alocados em quatro pontos distintos da linha e mudança na distância da falta. Para isso, foram realizadas simulações da linha de transmissão no software ATPDraw, referência na modelagem de sistemas de potências, e desenvolvido scripts no Matlab para análise dos resultados.

2. LINHAS DE TRANSMISSÃO

As linhas de transmissão são estruturas projetadas para que seja possível o transporte de energia elétrica de um ponto do circuito de transmissão a outro ponto. As linhas de transmissão são primordiais para conectar usinas hidrelétricas, eólicas, entre outras com subestações e os respectivos consumidores finais, sendo assim, a espinha dorsal do sistema de energia elétrica. A escolha do tipo de linha de transmissão depende de fatores como impacto ambiental, distância, requisitos técnicos, dentre outros fatores, alguns tipos de linhas de transmissão são:

- **Linhas Aéreas:** As linhas aéreas são as mais comuns no cotidiano para a transmissão de energia, principalmente em situações de longa distância. A construção dessas linhas consiste em condutores nu, cobertos ou isolados de alumínio ou cobre suspensos em postes de concreto ou torres metálicas.
- **Linhas Subterrâneas:** As linhas subterrâneas são condutores elétricos dispostos abaixo do solo podendo ser protegidos por um duto ou ainda diretamente aterrados. Normalmente utilizadas em grandes centros urbanos ou onde as linhas aéreas não são viáveis.

As linhas de transmissão possuem diferentes definições, pode ser uma linha de corrente alternada e ou de corrente contínua, outros fatores que divergem as linhas de transmissão são:

- Nível de tensão;
- Capacidade de transmissão;
- Frequência;
- Distância da linha;

Para melhor compreensão do presente trabalho, faz-se necessário uma breve explanação do estudo das linhas de transmissão com foco na distância da linha, as linhas de transmissão podem ser divididas em três: Linha longa, média e curta.

2.1. Linha longa ($L > 250$ km)

As equações gerais das linhas de transmissão em corrente alternada, senoidal, operando em regime permanente e com parâmetros distribuídos são:

$$V(x) = \cosh(\gamma x)V_r + Z_c \sinh(\gamma x)I_r \quad (2.1)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x)V_r + \cosh(\gamma x)I_r \quad (2.2)$$

Em (2.1) e (2.2):

x - Comprimento da linha;

$V(x)$ - Tensão de fase em qualquer ponto da LT (Linha de Transmissão);

$I(x)$ - Corrente de linha em qualquer ponto da LT (Linha de Transmissão);

V_r - Tensão de fase e a no terminal receptor;

I_r - Corrente de linha no terminal receptor;

Z_c é a impedância característica da linha: $Z_c = \sqrt{z/y}$,

z e y são a impedância série e admitância shunt da LT por unidade de comprimento, respectivamente.

γ é a constante de propagação que define a amplitude e fase da onda ao longo da linha, conforme a equação (2.3).

$$\gamma = \sqrt{zy} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (2.3)$$

Em (2.3), α é a constante de atenuação [Néper/m] e β é a constante de fase [rad/m], sendo definidas conforme as equações (2.4) e (2.5)

$$\alpha = \text{Re}(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{2}[(rg - \omega^2 LC) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)}]} \quad (2.4)$$

$$\beta = \text{Im}(\gamma) = \sqrt{\frac{1}{2}[(\omega^2 LC - rg) + \sqrt{(r^2 + \omega^2 L^2)(g^2 + \omega^2 C^2)}]} \quad (2.5)$$

Conforme a energia é transmitida na linha de transmissão, as variáveis elétricas como corrente e tensão irão sofrer uma diminuição na amplitude devido a perdas de energia, as perdas são causadas por fatores como resistência, dispersão, dielétrico e perda por efeito corona (Ocorre em linhas de transmissão de alta tensão quando o campo elétrico ao redor dos condutores atinge um valor crítico, assim ionizando o ar e causando pequenas descargas elétricas). Resolver as equações para as variáveis $V(x)$ e $I(x)$, definidas em (2.1) e (2.2), permite estabelecer uma relação entre as tensões e correntes em qualquer ponto da linha, com base nos valores iniciais de tensão V_r e corrente I_r . As LTs modeladas a partir do modelo exato, parâmetros distribuídos, podem ser descritas de acordo com a equação (2.6)

$$\begin{bmatrix} V_x \\ I_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & Z_c \sinh(\gamma x) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Na equação (2.6) temos os seguintes termos:

$$A = \cosh(\gamma x) \quad (2.7)$$

$$B = Z_c \sinh(\gamma x) \quad (2.8)$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) \quad (2.9)$$

$$D = A \quad (2.10)$$

2.2. Linha média (100 km > L > 250 km)

Uma linha de transmissão média, a parâmetros concentrados, é representada conforme o circuito de modelo Pi visto na Figura 1.

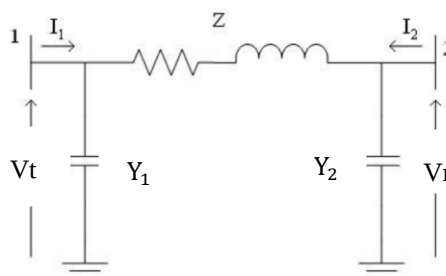


FIGURA 1. Circuito PI de uma Linha de Transmissão. Adaptado de [3]

Analisando a Figura 1 e aplicando as leis de Kirchoff para as tensões e correntes, tem-se que:

$$V_t = V_r + Z(I_r + Y_2 V_r) = (1 + ZY_2)V_r + ZI_r \quad (2.11)$$

$$I_t = Y_1 V_t + (Y_2 V_r + I_r) = Y_1[V_r + Z(I_r + Y_2 V_r)] + Y_2 V_r + I_r \quad (2.12)$$

$$I_t = [Y_1(1 + ZY_2) + Y_2]V_r + (1 + ZY_1)I_r \quad (2.13)$$

Assim, os parâmetros generalizados do circuito de modelo Pi são dados por:

$$A = 1 + ZY_2 \quad (2.14)$$

$$B = Z \quad (2.15)$$

$$C = Y_1(1 + ZY_2) + Y_2 \quad (2.16)$$

$$D = A \quad (2.17)$$

Para uma linha de transmissão simétrica, ou seja, $Y_1 = Y_2 = Y/2$, os parâmetros são representados conforme as equações (2.18) a (2.20)

$$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} \quad [pu] \quad (2.18)$$

$$B = Z \quad [\Omega] \quad (2.19)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) \quad [S] \quad (2.20)$$

2.3. Linha Curta ($L < 100$ km)

Para LTs de tamanho inferior a 100 km, a capacitância pode ser desprezada e a linha representada por somente uma impedância série, conforme a Figura 2.

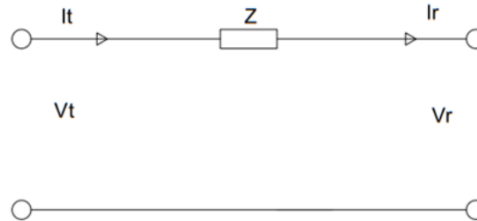


FIGURA 2. Circuito Equivalente de uma Linha Curta. [3]

Analisando o circuito equivalente da linha curta representado na Figura 2, tem-se que:

$$I_t = I_r \quad (2.21)$$

$$V_t = V_r + ZI_r \quad (2.22)$$

Na forma matricial, temos a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} V_t \\ I_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

3. COMPENSAÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A compensação em linhas transmissão faz-se necessário devido aos problemas técnicos já citados como, queda de tensão, perdas de energia, melhorar a capacidade de transmissão da linha e entre outros fatores. A compensação das linhas pode ser realizada através da inserção de elementos capacitivos em série, banco de capacitores, uma das finalidades seria a impedância da linha para melhorar a tensão e a capacidade de transmissão. Já a compensação shunt é realizada por meio de reatores (elementos indutivos) ou banco de capacitores. Os elementos indutivos servem para amenizar a potência reativa capacitiva, principalmente, gerada quando há uma linha de transmissão muito longa onde é ocasionado um efeito capacitivo na linha devido a interação da linha com o solo, onde pode ser chamado de capacitâncias naturais, assim pode ocorrer um fenômeno elétrico conhecido como efeito Ferranti onde a tensão no início do circuito é menor que no final da linha de transmissão. Dessa maneira o efeito Ferranti apresenta o efeito da sobretensão da linha, onde pode estar ativando as proteções de sobretensão. Logo a compensação shunt com elementos indutivos (reatores) pode ser utilizado para diminuir a tensão da linha, enquanto os elementos capacitivos (banco de capacitores) ocasionam efeitos contrários aumentando a tensão da linha.

Dessa forma, a compensação seja realizada por elementos em série ou paralelo com a linha, ambas possuem a mesma finalidade de corrigir a tensão, consequentemente a potência transmitida, isso para um controle eficiente das variáveis do sistema elétrico evitando perdas e melhorando a estabilidade do sistema.

Para o este trabalho, foi realizado um estudo para compensação série com banco de capacitores tendo os valores dos elementos fixos durante a simulação, os valores dos elementos foram variados apenas quando houve mudança no grau de compensação da linha e a localização dos bancos da linha, sendo quatro pontos distintos: extremidades, início, meio e fim. Para obtenção dos bancos de capacitores foram realizados os equacionamentos das matrizes de compensação demonstrados no tópico 3.1.

3.1. Matrizes de Compensação

Para que possa ser realizada uma compensação numa LT por meio de banco de capacitores é preciso definir o quadripolo equivalente para cada situação de compensação: extremidade, início, meio e fim.

O quadripolo equivalente resultante da compensação da extremidade é:

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A_{eq} & B_{eq} \\ C_{eq} & D_{eq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A + CZ_{cap} & AZ_{cap} + CZ_{cap}^2 + B + DZ_{cap} \\ C & D + CZ_{cap} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Se a LT for simétrica, ou seja, $A=D$ tem-se que:

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} A + CZ_{cap} & CZ_{cap}^2 + 2AZ_{cap} + B + D \\ C & A + CZ_{cap} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Para compensar totalmente a linha (compensação total), a parte imaginária do termo do quadripolo B deve ser igual a zero, logo:

$$B_{eq} = b_{eq} + jb'_{eq} = CZ_{cap}^2 + 2AZ_{cap} + B \quad (3.4)$$

$$B_{eq} = (c' + jc'')(jX_{cap})^2 + 2(a' + ja'')(jX_{cap}) + 2(b' + jb'') \quad (3.5)$$

$$b'_{eq} = -c''X_{cap}^2 + 2a'X_{cap} + b'' = 0 \quad (3.6)$$

Solucionando a equação de segundo grau da equação (3.6), as raízes podem ser encontradas pela equação (3.7):

$$X_{cap} = \frac{2a' \pm \sqrt{(-2a')^2 + 4c''b''}}{2c''} \quad (3.7)$$

Na equação (3.7) tem-se duas raízes obtidas para o valor da impedância capacitiva (X_{cap}) será utilizada para calcular os valores dos capacitores o valor negativo obtido.

Para as compensações das linhas, usualmente são realizadas as compensações de maneira parcial, com isso, o valor da capacitância é definido através da porcentagem da compensação escolhida do valor calculado para a compensação total. Neste trabalho, os percentuais de grau de compensação usados foram: 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%.

De forma análoga a compensação de linha na extremidade da LT, caso a compensação seja apenas no início da linha, temos que:

$$X_{cap} = -\frac{b''}{a'} \quad (3.8)$$

Para a compensação no fim da linha, tem-se:

$$X_{cap} = -\frac{b''}{a'} \quad (3.9)$$

E por último, a compensação no meio da LT:

$$X_{cap} = \frac{-2(a'b'' + a''b')}{(a'^2 - a''^2)}$$

4. PROTEÇÃO DE DISTÂNCIA

A proteção de distância é usualmente aplicada em sistema de linha de transmissão, esta é essencial para garantir segurança e confiabilidade do sistema elétrico. O relé de distância (função 21) é projetado para detectar a falta na linha de transmissão e localizar o ponto da falta, permitindo assim a identificação do local do curto-circuito e isolamento do sistema elétrico afim de minimizar interrupções indevidas no fornecimento de energia.

O princípio de funcionamento do relé de distância é baseado na leitura da impedância da linha, este deve receber parâmetros como tensão e corrente de cada fase da LT, as leituras destas variáveis são oriundas de equipamento como transformador de corrente e potencial que realizam o monitoramento das variáveis na subestação, a partir disto o relé realiza um papel fundamental na identificação precisa das faltas ocorridas. Os dados em tempo real da tensão e corrente são essenciais para que o relé consiga determinar a impedância da linha.

A tensão para o relé de distância é importante, pois auxilia na identificação do ponto de falta, como a tensão no barramento da subestação teoricamente é mais alta, na ocorrência de uma falta, a tensão irá tender a zero no ponto do curto-circuito, assim a diferença do ponto transmissor ou receptor até o ponto da falta é usada para calcular a impedância e determinar em qual comprimento da linha ocorreu a falta. Já a corrente de linha lida pelo relé com o auxílio dos transformadores de corrente, irá permitir diferenciar a falta de uma condição normal ou ainda de uma sobrecarga no sistema de transmissão, dessa maneira, a função adequada irá atuar.

Outros parâmetros como a fase e frequência de operação também são essenciais para identificar possíveis problemas no sistema. A fase das variáveis de tensão e corrente irá demonstrar a defasagem entre as grandezas elétricas mencionadas, ela é um fator importante para o cálculo da impedância da linha. Já a frequência em que a rede está operando é um parâmetro adicional para identificação de oscilações no sistema elétrico, o monitoramento irá indicar problemas de estabilidade como sobre e subfrequência ou ainda desligamentos dos locais de geração onde irá afetar proteção do sistema elétrico incluído o relé de distância e com isso a continuidade no fornecimento de energia.

A aplicação da proteção de distância baseia-se no monitoramento das grandezas elétricas como tensão e corrente em diversos pontos da LT e com isso realizar o cálculo da impedância. As variáveis medidas são comparadas com valores predefinidos e calculados da impedância da linha de transmissão para diversos pontos desta, no momento da falta, a impedância medida irá divergir dos valores esperados para condições normais de operação do sistema.

Há maneiras distintas de aplicar a proteção de distância, como: relés de impedância, admitância ou MHO, reatância e blinder [4]. Para este trabalho, será considerado o relé do tipo de impedância. A proteção de distância para o método do relé de impedância, a distância que se deseja proteger da linha é definida por um valor de impedância a partir do ponto medido no barramento transmissor ou receptor. Quando uma falta é reconhecida, o relé compara o valor medido com curvas pré-definidas de impedância afim de determinar o ponto da falta ao longo da linha, se a impedância do relé for menor que a definida para um ponto da linha ele irá atuar, caso contrário, não houve curto-circuito. De maneira geral, os relés de proteção de distância possuem uma representação gráfica conhecida como plano R-X representado na Figura 3, cada tipo de relé de impedância, reatância irá ter sua representação específica, porém todos irão ter a mesma aplicação e modo de entendimento.

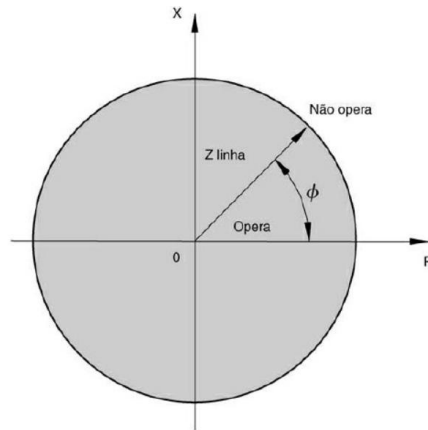


FIGURA 3. Plano R-X para os relés de proteção de distância. [4]

No plano R-X, tem-se o eixo vertical com a reatância e no eixo horizontal a resistência, a parte destacada em cinza o vetor Z_{linha} representa valores da impedância e Φ a fase, para toda a parte destacada tem-se valores pré-definidos em que o relé irá atuar, caso o relé realize a leitura de um valor de impedância em que está fora do círculo destacado significa que não houve nenhum curto-circuito e o sistema irá continuar operando normalmente até que aconteça o contrário. Além da Leitura da impedância, a fase das grandezas que irá mostrar a defasagem entre tensão e corrente complementa o sistema de proteção para calcular a distância até o ponto de falta.

A proteção de distância é essencial para os sistemas de proteção das linhas de transmissão, garantindo uma resposta ágil e seletiva diante das faltas na linha, com isso reduzindo os efeitos no fornecimento contínuo de energia elétrica. O desempenho da proteção, depende da precisão das medições e da configuração adequada dos parâmetros definidos no relé de proteção.

4.1. Cálculo das impedâncias

Os relés de distância baseados em impedância, que é o objetivo de estudo deste trabalho, determinam as impedâncias em caso de um curto-circuito monofásico. As equações para o cálculo das impedâncias de cada fase nos terminais transmissor e receptor podem ser visualizadas a seguir (Silva, 2009).

$$\begin{aligned} Z_{ta} &= \frac{V_{ta}}{I_{ta} + k_0 I_{ta0}} & Z_{ra} &= \frac{V_{ra}}{I_{ta} + k_0 I_{ta0}} \\ Z_{tb} &= \frac{V_{tb}}{I_{tb} + k_0 I_{ta0}} & Z_{rb} &= \frac{V_{rb}}{I_{tb} + k_0 I_{ta0}} \\ Z_{tc} &= \frac{V_{tc}}{I_{tc} + k_0 I_{ta0}} & Z_{rc} &= \frac{V_{rc}}{I_{tc} + k_0 I_{ta0}} \end{aligned}$$

Nas equações para o cálculo das impedâncias, $k_0 = \frac{Z_{0linha} - Z_{1linha}}{Z_{1linha}}$, Z_{0linha} e Z_{1linha} são as impedâncias de sequência zero e positiva, respectivamente, estas representam a impedância total para todo o comprimento da linha. As correntes de sequência zero nos terminais dos barramentos transmissor e receptor I_{ta0} e I_{ra0} , respectivamente, estas podem ser detalhadas pelas seguintes equações:

$$I_{ta0} = \frac{1}{3} (I_{ta} + I_{tb} + I_{tc}) \quad (3.10)$$

$$I_{ra0} = \frac{1}{3} (I_{ra} + I_{rb} + I_{rc}) \quad (3.11)$$

5. SISTEMA DE TRANSMISSÃO ANALISADO

O estudo realizado neste trabalho levou em consideração uma linha de transmissão simulada no software ATPDraw. A tensão da LT é de 230 kV e uma distância de 200 km, já os parâmetros elétricos da linha simulados são:

$$\begin{aligned}
R_{+} &= 0,09127 \, \Omega/\text{km} \\
R_{0} &= 0,44016 \, \Omega/\text{km} \\
L_{+} &= 1,376 \, \text{mH}/\text{km} \\
L_{0} &= 4,153 \, \text{mH}/\text{km} \\
C_{+} &= 0,00847 \, \mu\text{F}/\text{km} \\
C_{0} &= 0,0061 \, \mu\text{F}/\text{km} \\
g_{+} &= 0 \quad g_{0} = 0
\end{aligned}$$

Onde: R – Resistência; L – Indutância; C – Capacitância; g – Condutância; + - Dados de Sequência Positiva; 0 – Dados de Sequência Zero.

A simulação realizada no software ATPDraw para estudo do efeito de um curto-circuito na fase A de um sistema elétrico com compensação série da LT (bancos de capacitores) instalados em quatro locais da linha, no início, meio, fim e extremidades da linha, considerando a ocorrência desses curtos em três situações ao longo da LT de 30%(60km), 50%(100km) e 90%(180km) da extensão da linha. Além disso, em todos os casos de falta simulados admitiu-se que os bancos de capacitores série instalados nos diversos pontos possuem variação no grau de compensação para sete casos variando entre 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70% e 80%. O circuito da linha de transmissão simulada pode ser visualizado na Figura 4 e os circuitos simulados com compensação a partir da Figura 5.

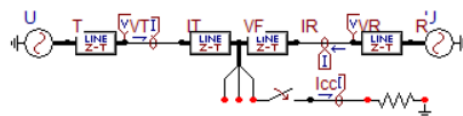


FIGURA 4. Sistema Analisado no ATPDraw [Autoria Própria].

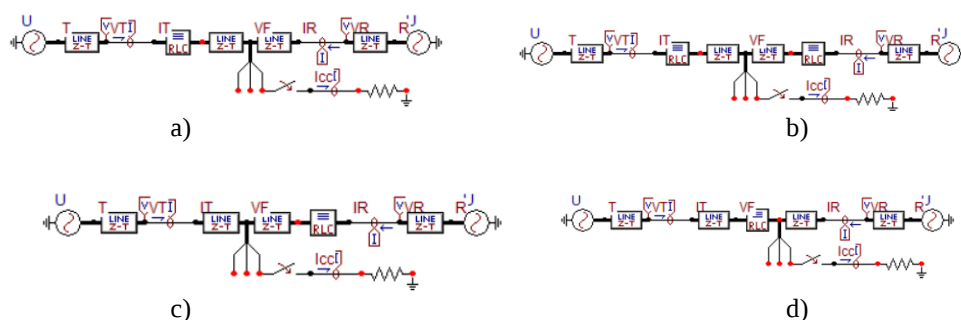


FIGURA 5. (a) Sistema Analisado com compensação no início; (b) Sistema Analisado com compensação nas extremidades; (c) Sistema Analisado com compensação no fim (d) Sistema Analisado com compensação no meio [Autoria Própria].

6. RESULTADOS

Após a realização das simulações no software ATPDraw da LT com compensação e na fase A simulado o curto-circuito, os dados de tensão e correntes da simulação foram exportados e importados em um script no Matlab para o cálculo das impedâncias de cada fase do sistema. As impedâncias do sistema são essenciais para a proteção do relé de distância, estas permitem a atuação da proteção da maneira ágil e precisa em caso de um curto na LT. Os dados a partir das simulações serão demonstrados nos respectivos tópicos de cada compensação série.

6.1. Simulação sem compensação

Para o sistema da LT sem compensação demonstrada na Figura 4, realizada a simulação da falta na fase A e obtidos os dados de tensão e corrente, foram calculadas as impedâncias tanto para o barramento transmissor como o receptor para cada fase nos três trechos simulados para o ponto de falta, de 30, 50 e 90% da linha, assim os valores das impedâncias podem ser visualizados na Tabela 1.

TABELA 1. Valores das impedâncias da linha de transmissão sem compensação (Autoria Própria).

Valor da impedância para 30% (31,59Ω)	Valor da impedância para 50% (52,66Ω)	Valor da impedância para 90% (94,79Ω)
Zta = 31,81 ∠ 80,41 Ω	Zta = 52,87 ∠ 80,17 Ω	Zta = 95,17 ∠ 80,60 Ω
Ztb = 99,57 ∠ -36,82 Ω	Ztb = 133,63 ∠ -33,01 Ω	Ztb = 189,25 ∠ -27,57 Ω
Ztc = 126,10 ∠ -31,44 Ω	Ztc = 185,61 ∠ -24,09 Ω	Ztc = 303,63 ∠ -10,07 Ω
Zra = 74,59 ∠ 80,41 Ω	Zra = 52,75 ∠ 80,15 Ω	Zra = 10,47 ∠ 79,87 Ω
Zrb = 274,48 ∠ -55,33 Ω	Zrb = 202,62 ∠ -51,78 Ω	Zrb = 76,30 ∠ -50,09 Ω
Zrc = 176,67 ∠ -159,86 Ω	Zrc = 144,15 ∠ -157,18 Ω	Zrc = 68,20 ∠ -147,17 Ω

O tamanho total da linha é de 200km, realizado os cálculos teremos uma impedância total da linha, como ser visto na Equação 6.1.

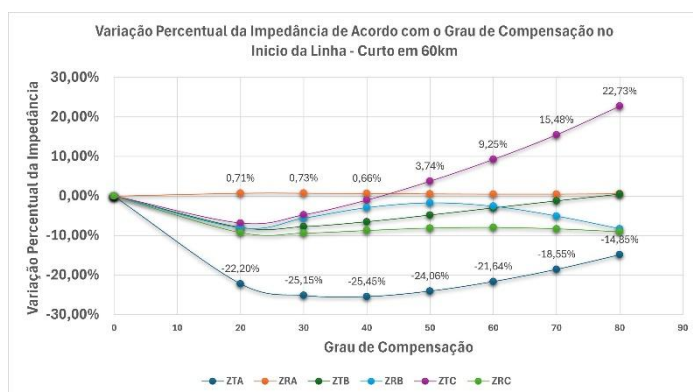
$$z = (0,09127 + 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 0,001376) \cdot 200 = 18,254 + i103,739 = 105,33 \angle 80,02 \Omega \quad (6.1)$$

Dessa maneira, o sistema total da LT com 200km possui uma impedância total de 105,33 Ω logo, para os trechos de 30% (60km) teremos uma impedância de 31,59 Ω e 73,74 Ω do lado do transmissor e receptor, respectivamente. De modo análogo, a impedância para 50%(100km) 52,66 Ω e 52,67 Ω, já para 90%(180km) a impedância é de 94,79 Ω e 10,54 para os lados do transmissor e receptor, mutuamente. Visto que as impedâncias calculadas/simuladas são próximas das reais para todos os pontos de falta, assim o relé de distância irá atuar visto a ausência da interferência da compensação ou qualquer outro erro.

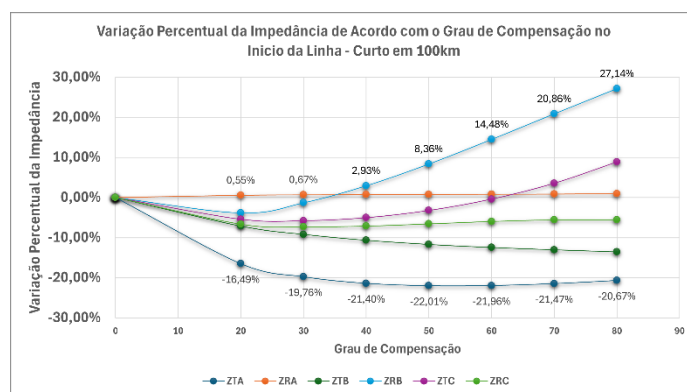
6.2. Compensação no início da LT

De modo geral, as impedâncias calculadas a partir da simulação a Fase A do lado transmissor demonstrou a maior divergência percentual para os valores menores que o esperado da realidade chegando a até um erro para menos de 25,45% no ponto de falta em 60km da linha e grau de compensação de 40%, exceto para o ponto de falta em 180km da linha e grau de compensação de 70 e 80% que na fase B o erro percentual foi maior que na fase A. Ainda no lado transmissor para o ponto em 60km da linha, a fase C que demonstrou um erro maior para mais que os valores reais de impedância sendo o maior erro percentual de 22,73% para grau de compensação de 80%.

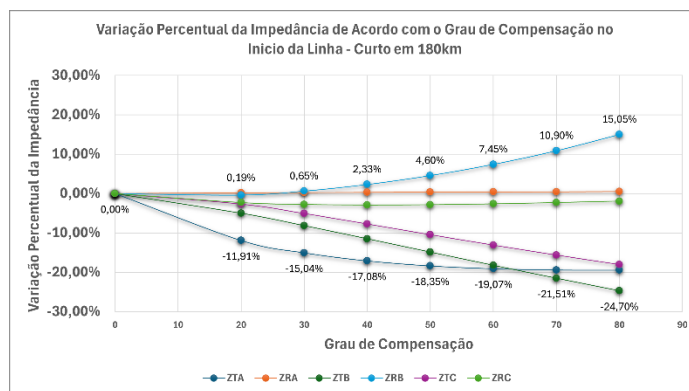
Já no lado do receptor a fase A para os graus de compensação de 20 a 40% e nos distintos pontos de falta a impedância foi maior que o esperado, no entanto, o maior erro foi de 0,73% praticamente irrelevante e não causando tanta perturbação para o sistema de proteção. Todavia, para os demais graus de compensação de 50 a 80%, a fase C teve um erro percentual para o curto-circuito simulado em 60km da linha no maior grau de compensação, chegando a um erro percentual de 22,73%, para a falta em 100km e 180km a impedância foi maior na Fase B chegando a até 27,14% a mais que o esperado (Curto em 100km e grau de compensação de 80%). O circuito simulado pode ser visualizado na Figura 5.a) e os resultados das simulações na Figura 6.



a)



b)

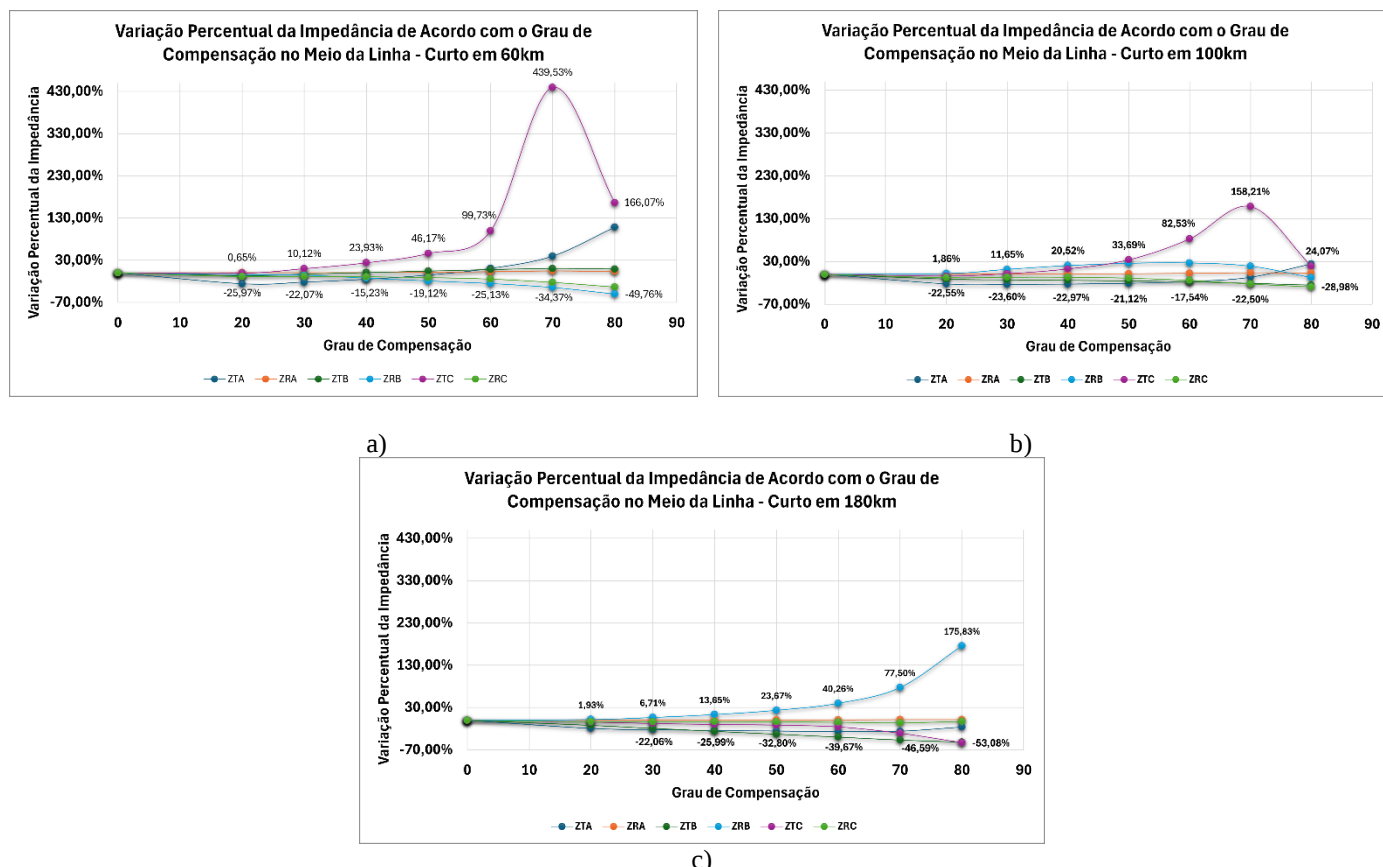


c)

FIGURA 6. (a) Gráfico da variação percentual da impedância de acordo com o grau de compensação no início da linha para curto em 60km da linha; (b) Curto em 100km da linha; (c) Curto em 180km da linha [Autoria Própria].

6.3. Compensação no meio da LT

Na compensação série no meio da linha de transmissão, o erro percentual apresentado foi maior para todos os casos quando comparado a compensação no início da linha. No caso do ponto da falta ser em 60km da linha a impedância ZTC se manteve a com maior erro percentual para mais que o esperado, houve ainda uma grande distorção para o grau de compensação de 70% que chegou a ter um valor de impedância 439,53% a mais e posteriormente para 80% de compensação uma redução para 166,07%, demonstrando assim que o aumento linear da compensação para este e outros casos não irá refletir um aumento ou queda do valor da impedância de modo linear, a mesma situação ocorre para o curto em 100km e 180km com fases diferentes, onde demonstra a influência do curto e da compensação no sistema elétrico, principalmente em graus de compensação elevado que pode ocorrer o fenômeno da ressonância causando distorções harmônicas. O circuito simulado da compensação no meio da LT pode ser visto na Figura 5.d) e os resultados gráficos gerados na Figura 7.



c)

FIGURA 7. (a) Gráfico da variação percentual da impedância de acordo com o grau de compensação no meio da linha para curto em 60km da linha; (b) Curto em 100km da linha; (c) Curto em 180km da linha [Autoria Própria].

6.4. Compensação no fim da LT

De maneira análoga a compensação no meio da linha, a impedância da fase C do lado transmissor nos casos do curto-circuito simulado em 60km e 100km da linha apresenta o maior erro percentual de valores maiores que o esperado sem apresentar grandes distorções, todavia, para o curto em 180km a impedância ZTC é maior até o grau de compensação de 40%, para um percentual maior de compensação a impedância ZRA será maior.

Já para os valores de impedância menores que o esperado se destaca ZRA e ZRC para os três casos, para os valores da fase A quando comparada com a compensação no início da linha no qual o banco de capacitor era próximo ao barramento transmissor ZTA apresentava valores menores que o esperado e na compensação no fim da linha que o banco de capacitor está mais próximo do barramento receptor ZTA demonstra os valores de impedância menores que o real. Na Figura 5.c) é possível ver o circuito simulado e na Figura 8 os gráficos da variação percentual das impedâncias.

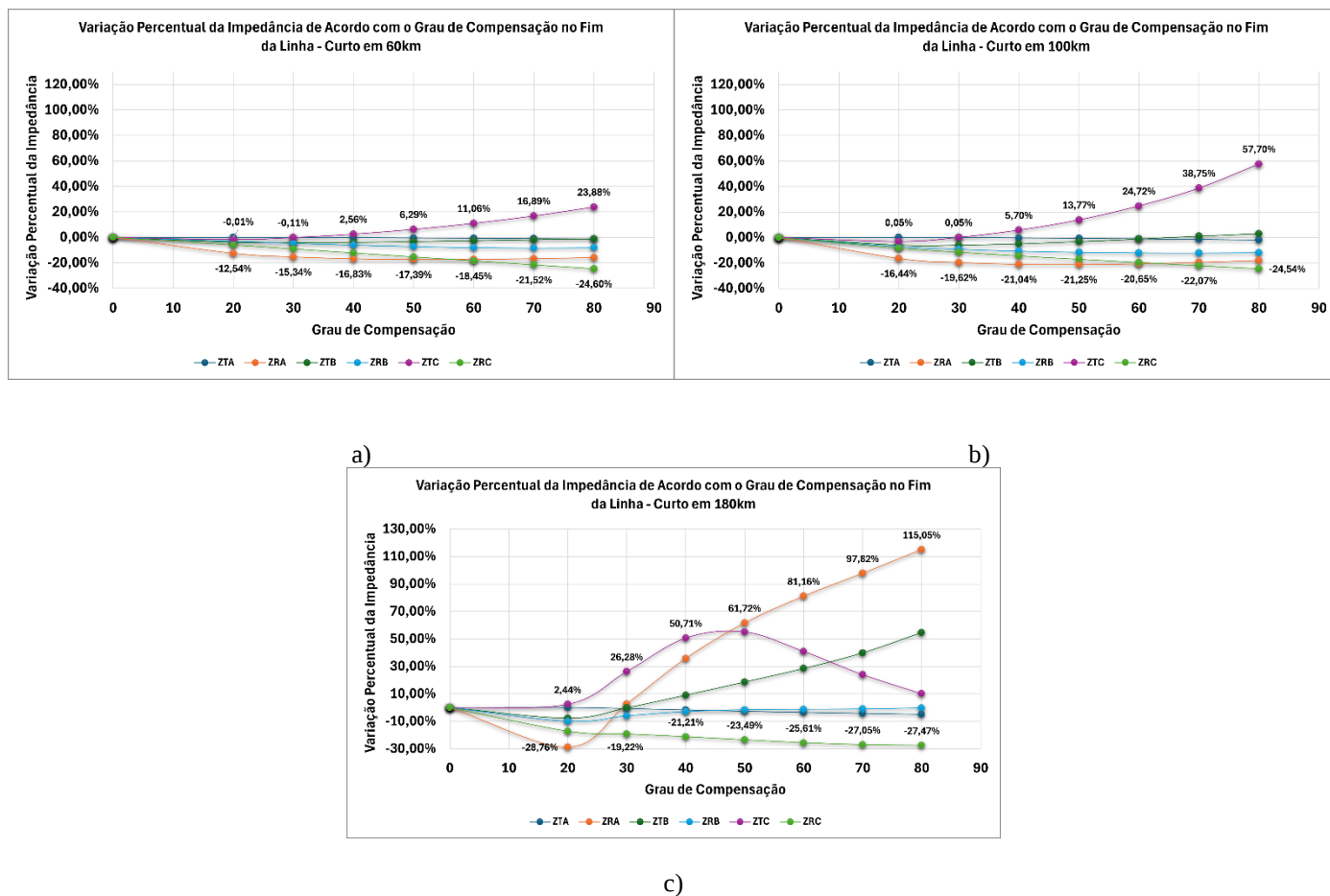


FIGURA 8. (a) Gráfico da variação percentual da impedância de acordo com o grau de compensação no fim da linha para curto em 60km da linha; (b) Curto em 100km da linha; (c) Curto em 180km da linha [Autoria Própria].

6.5. Compensação no extremidades da LT

Diferente dos outros tipos de compensação, o banco de inseridos nas extremidades da linha para o curto simulado em 60km e 100km da linha nenhuma impedância mostrou valores maiores que o real para os distintos graus de compensação, destacando ZTA em que os valores da impedância foram até 27,11% (Curto em 60km e grau de compensação de 80%) abaixo do previsto. Com o curto-circuito situado em 180km os a representação gráfica é semelhante aos outros casos já vistos anteriormente, enfatizando ZTC para valores de impedância até 103,60% (curto em 180km e grau de compensação de 80%) superior ao sistema sem compensação.

Na Figura 5.) é possível observar o circuito simulado e na Figura 9 os gráficos da variação percentual das impedâncias.

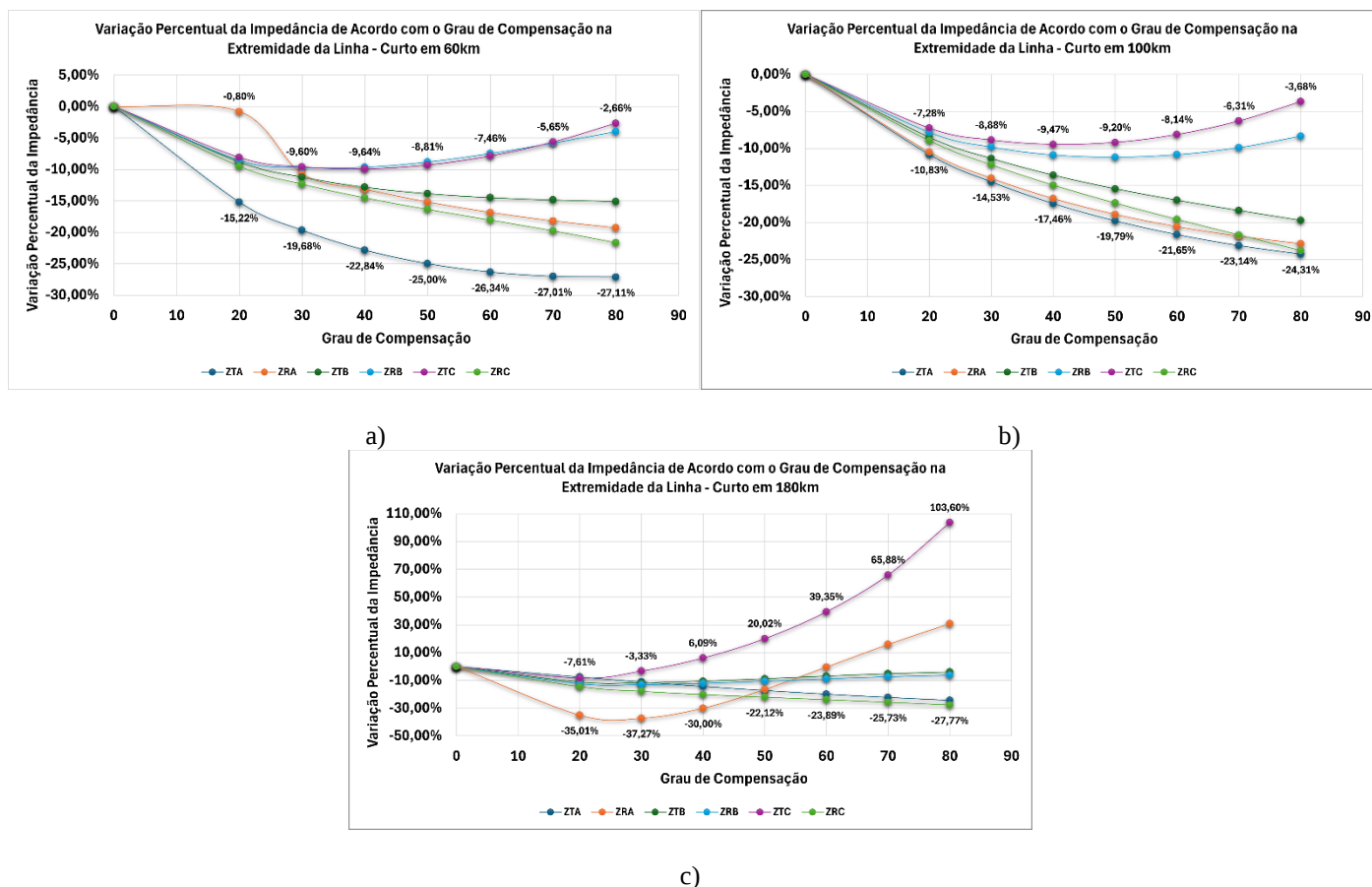


FIGURA 9. (a) Gráfico da variação percentual da impedância de acordo com o grau de compensação nas extremidades da linha para curto em 60km da linha; (b) Curto em 100km da linha; (c) Curto em 180km da linha [Autoria Própria].

7. CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado, verificou-se que a compensação série em linhas de transmissão impacta severamente os valores das impedâncias das fases da linha de transmissão, influenciando principalmente, na atuação do relé de proteção de distância. Para os graus de compensação estudados, compensações elevadas como de 70% e 80% podem causar distorções harmônicas e ressonâncias, em especial curtos em longa distância (180 km), comprometendo assim a precisão da proteção sistema elétrico de transmissão. Quanto a localização dos bancos de capacitores, este fator também irá ocasionar interferências, compensações no meio da linha demonstraram maiores variações de impedância (de modo especial para graus de compensação maiores), enquanto compensações nas extremidades da linha mostraram menor impacto. Portanto, é de extrema importância ajustar a localização do banco e o grau da compensação de tal forma a garantir estabilidade e a confiabilidade, consequentemente evitando falhas na proteção e interrupções no sistema elétrico.

REFERÊNCIAS

- [1] Monticelli, A.; Garcia, A. Introdução a Sistemas de Energia Elétrica. Editora: Unicamp, 2003.
- [2] Kagan, N.; Oliveira, Carlos C. B.; Robba, João E. Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, 2 ed.; Editora: Edgard Blucher, Brasil, 2000; p. 01-19.
- [3] Modelagem de Linhas de Transmissão Para Estudos de Transitórios Eletromecânicos. Disponível online: <https://portalidea.com.br/cursos/4210801f9d0836fbf77d305cd5ec1650.pdf> (acesso em 16/02/2025).
- [4] Mamede Filho, J., & Mamede, D. R. (2020). Proteção de Sistemas Elétricos de Potência (2ª ed.). LTC.
- [5] Bichels, A. Sistemas Elétricos de Potência: Métodos de Análise e Solução, 1 Ed. Editora: EDUTFPR, 2018.
- [6] Fuchs, R. D. Transmissão de Energia Elétrica – Volume 1. Rio de Janeiro: LTC, 1977.
- [7] Horowitz, S. H.; Phadke, A. G. (2008). Power System Relaying. Wiley-IEEE Press.
- [8] Silva, K. M. Estimção de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão. Tese de Doutorado: Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, 2009.