

ANÁLISE E MITIGAÇÃO DO EFEITO FERRANTI EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 500 kV POR MODELAGEM COMPUTACIONAL

Lucas da Silva Faustino (Centro Universitário da Fundação Hermínio Ometto)

lucas.sf987@alunos.fho.edu.br

Daniel Augusto Pagi Ferreira (Centro Universitário da Fundação Hermínio Ometto)

danielferreira@fho.edu.br

Resumo

O aumento da demanda por energia elétrica e a necessidade de garantir a confiabilidade do Sistema Elétrico de Potência impulsiona estudos e melhorias contínuas na infraestrutura de transmissão. Um dos principais desafios é manter a tensão dentro de níveis adequados. Este trabalho estuda o fenômeno de sobretensão conhecido como efeito Ferranti, que ocorre em linhas de transmissão longas operando em vazio ou sob baixa carga. O objetivo principal foi analisar a elevação de tensão na barra receptora e avaliar estratégias de compensação reativa para mitigar o fenômeno. Foram utilizados métodos de modelagem matemática e simulação computacional no software ATPDraw, considerando o modelo π -equivalente e parâmetros reais de uma linha de 500 kV. Três cenários de diferentes comprimentos foram avaliados, verificando o impacto da distância no aumento da tensão na barra receptora. Os resultados indicaram elevação de até 15% acima da tensão nominal na condição sem compensação. A aplicação de um reator, dimensionado para 60% da potência reativa capacitiva total, reduziu a sobretensão para 5,4% acima da nominal, atendendo aos Procedimentos de Rede do ONS. Conclui-se que o uso de compensação reativa foi eficaz na mitigação do efeito Ferranti, contribuindo para eficiácia operacional e confiabilidade em sistemas de transmissão.

Palavras-Chaves: transmissão de energia, efeito Ferranti, compensação reativa.

1. Introdução

Com a crescente demanda de energia elétrica no país, o Sistema Elétrico de Potência (SEP) enfrenta desafios cada vez maiores para suprir essas necessidades. Sua principal finalidade é fornecer aos seus consumidores energia de forma contínua, segura e ininterrupta, mantendo níveis e padrões de qualidade definidos por normativos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão fiscalizador do setor. Segundo a própria Agência “O CONFIA (Congresso Nacional de Fiscalização da ANEEL) reafirma o compromisso da ANEEL com a segurança, qualidade e eficiência do setor elétrico, impulsionando soluções inovadoras para o aprimoramento da atuação regulatória” (ANEEL, 2025).

Segundo Bichels (2018, p.23), “Atualmente (2017) o Brasil conta com um colossal sistema elétrico interligado, com mais de 138.965 km de linhas”. Em 2025, o país registrou diversos recordes de consumo de energia elétrica. Conforme notícia do Ministério de Minas e Energia (MME) que disse “somente nesta semana, a demanda instantânea de energia quebrou três recordes consecutivos, atingindo o pico de 106.532 megawatts (MW) na última quarta-feira (26/02), de acordo com dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)” (MME, 2025).

O expressivo crescimento do consumo e da infraestrutura de transmissão está diretamente relacionado à configuração geográfica e energética do país. As principais bacias hidrográficas brasileiras, onde se concentram as grandes usinas hidrelétricas, localizam-se em regiões afastadas dos principais centros de carga, situados em áreas metropolitanas e industriais. Essa característica faz com que o SEP possua, tradicionalmente, a geração distante dos centros consumidores, exigindo a transmissão de energia através de longas linhas de transmissão, conforme Miller (1987).

Observa-se que o aumento da demanda por energia elétrica e a necessidade de garantir a estabilidade e confiabilidade do SEP, conforme os marcos regulatórios vigentes, têm impulsionado estudos e melhorias contínuas na infraestrutura de transmissão. Um dos principais desafios enfrentados pelos engenheiros eletricistas é manter a tensão elétrica dentro de níveis adequados, evitando variações excessivas o que pode causar falhas e danos aos equipamentos conectados à rede. Conforme Martins (2015, p.12), “devido ao elevado custo dos equipamentos de potência e à importância de se fornecer energia de qualidade, faz-se necessário um estudo detalhado do impacto de surtos em sistemas de energia elétrica”, especialmente dos efeitos de alto impacto para rede do Sistema Interligado Nacional (SIN), tais como o efeito Ferranti, descargas atmosféricas, ferrorressonância e sobretensões de manobras, como energização de capacitores e desenergização de reatores.

Linhos de transmissão (LT) operando em baixa carga ou em vazio apresentam o comportamento de aumento de tensão na extremidade receptora em relação à extremidade emissora, fenômeno conhecido como efeito Ferranti. Para o controle desse fenômeno, utiliza-se reator *shunt*, que atua como regulador, absorvendo potência reativa excessiva e ajudando a manter a tensão dentro dos limites operacionais aceitáveis (D'Ajuz et al., 1987).

Diante desse contexto, este trabalho tem por objetivo analisar os impactos técnicos e operacionais do efeito Ferranti em LT longas e o método de compensação reativa *shunt* para sua mitigação.

2. Referencial Teórico

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento deste trabalho, abrangendo os conceitos utilizados na realização das simulações e na compreensão das grandezas e parâmetros das LT modeladas.

2.1. Sistema Elétrico de Potência (SEP)

O SEP é constituído por unidades geradoras, transformadores, linhas de transmissão e redes de distribuição, que são responsáveis por entregar energia elétrica aos consumidores finais e às empresas que recebem diretamente da rede de transmissão, que realiza a adequação da tensão em suas próprias instalações.

As unidades geradoras de energia elétrica são compostas por máquinas que transformam a energia mecânica (potencial gravitacional e cinética nas hidrelétricas) em energia elétrica, injetando assim uma potência elétrica que é transmitida através da rede de transmissão em alta tensão, de modo a minimizar perdas indesejadas durante o transporte.

A energia que então é gerada passa por uma transformação para que se adeque a padronização das tensões para linhas de transmissão, em regime permanente, conforme a Tabela 1, encontrado e adaptados do site do ONS, dentro dos Procedimentos de Rede, Módulo 2, Submódulo 2.6 (ONS, 2022).

Tabela 1 – Tensão máxima em regime permanente

Tensão nominal do sistema (kV)	Tensão máxima (kV fase-fase, eficaz)
13,8	14,5
34,5	36,2
69	72,5
88	92,4
138	145
230	242
345	362
440	460
500 ou 525	550
765	800

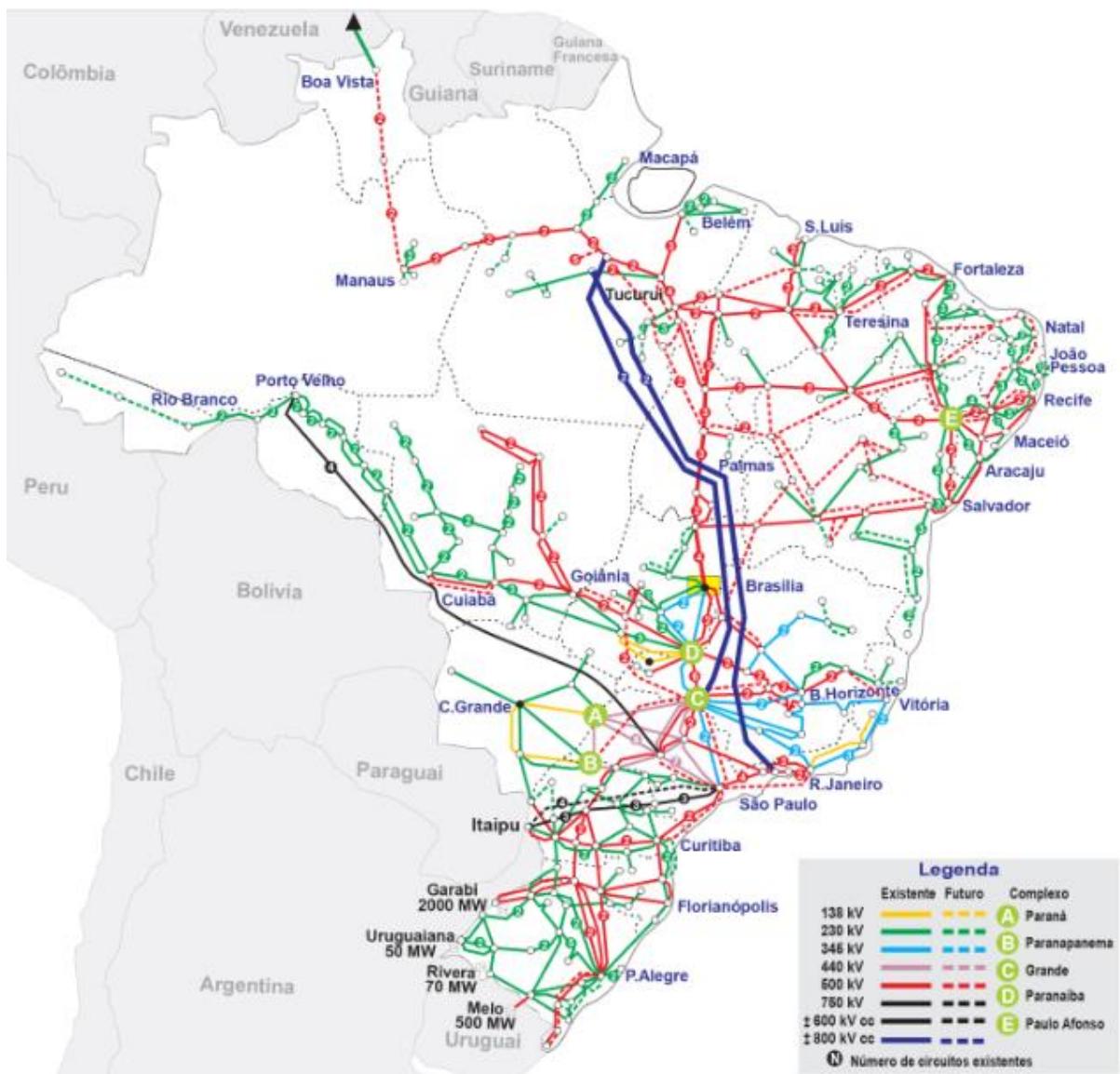
Fonte: Adaptado do ONS (2022)

2.2. Sistema Interligado Nacional (SIN)

O SIN é um robusto sistema elétrico que interliga as regiões brasileiras, composta por milhares de quilômetros de linhas de transmissão. Também denominado de rede básica de transmissão, tem como principais funções a transmissão de energia gerada pelas usinas para os grandes

centros de carga, a integração entre os diversos elementos do sistema elétrico para garantir a estabilidade e confiabilidade da rede, além de interligar as bacias hidrográficas e a integração energética com os países vizinhos. A Figura 1 apresenta o mapa do sistema interligado nacional (SIN) encontrado no Relatório Anual em 2023 quando o ONS completava 25 anos (ONS, 2024).

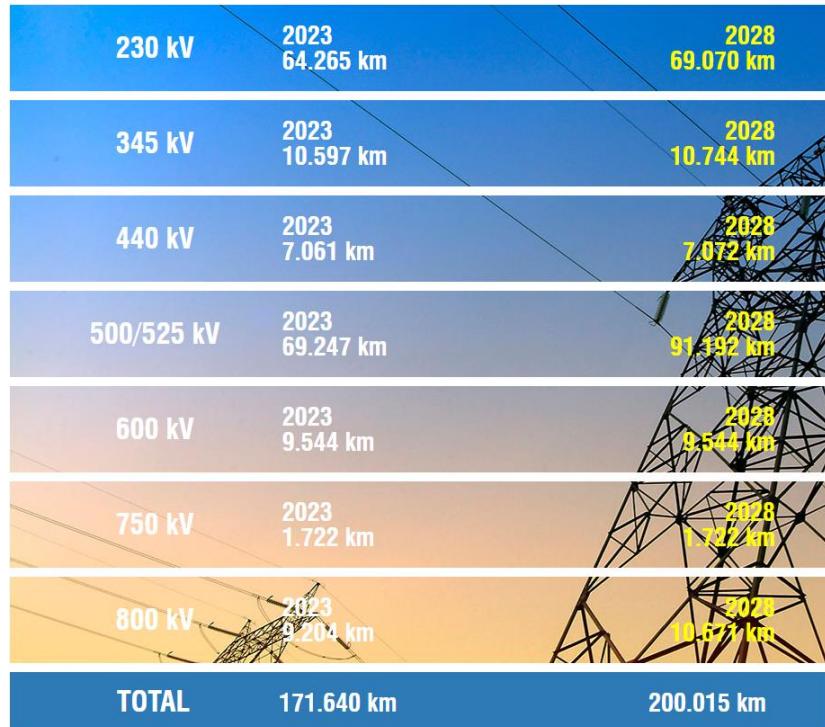
Figura 1 - Sistema Interligado Nacional (SIN) em 2023



Fonte: ONS (2024)

O sistema opera em níveis de tensão compreendidos entre 230 kV a 750 kV, em corrente alternada. Segundo dados do ONS, verifica-se que existe uma grande expansão para os próximos anos. Com estudos em andamento em diversas regiões do país visando ampliar o alcance do SIN para todo o território brasileiro, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Extensão da rede básica de transmissão em 2023 e previsão de aumento para 2028

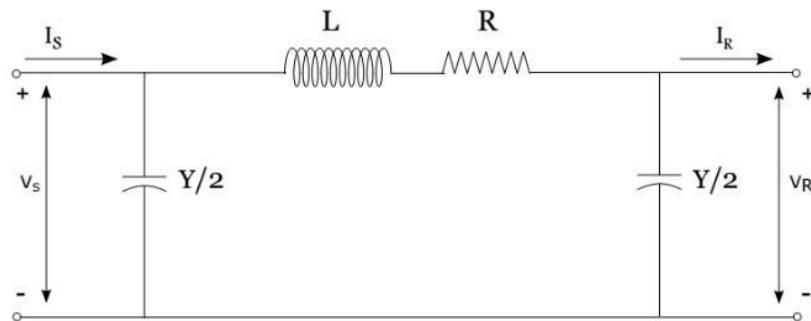


Fonte: ONS (2025)

2.3. Parâmetros elétricos de uma linha de transmissão

A LT pode ser representada por seu circuito equivalente mostrado na Figura 3, adaptada de Fuchs (2015), que consiste em uma indutância por unidade de comprimento ℓ (H/km), uma capacitância por unidade de comprimento c (F/km). Os elementos que representam perdas nos condutores e por dielétricos são, respectivamente, a resistência por unidade de comprimento r (Ω/km) e condutância por unidade de comprimento g (S/km). Este circuito equivalente é constituído por parâmetros distribuídos ao longo da LT.

Figura 3 - Circuito equivalente de uma linha de transmissão a parâmetros distribuídos



Fonte: adaptado de Breda (2017)

É possível perceber que esses elementos representam os efeitos físicos e eletromagnéticos que estão ao longo da extensão da linha, como explicado a seguir:

- Resistência (r): representa as perdas ôhmicas nos condutores devido ao efeito Joule, dependendo do material, da seção transversal e da temperatura dos condutores. A resistência contribui para a dissipação de energia na forma de calor e afeta diretamente a eficiência da transmissão;
 - Indutância (ℓ): está associada ao campo magnético gerado pela corrente elétrica nos condutores. Ela causa uma oposição à variação da corrente e influencia o comportamento transitório da linha. A indutância depende da geometria da linha e da distância entre os condutores;
 - Capacitância (c): representa o armazenamento de energia no campo elétrico entre os condutores e entre os condutores e o solo. Ela é responsável por permitir a circulação de corrente capacitiva mesmo na ausência de carga. A capacidade depende da configuração geométrica da linha e das características dielétricas entre os condutores;
 - Condutância (g): modela as perdas dielétricas no meio isolante entre os condutores. Embora geralmente pequena, pode se tornar relevante em linhas muito longas ou em condições de alta umidade e poluição. Ela representa a corrente de fuga que ocorre através do dielétrico.
- O circuito equivalente de uma linha de transmissão é representado por um modelo onde cada pequeno segmento da linha possui os elementos r , ℓ , c e g por unidade de comprimento. As linhas médias e longas são representadas pelo modelo π -equivalente de parâmetros distribuídos ou concentrados, dependendo se o estudo precisa considerar aspectos ao longo da linha ou apenas nas barras emissora e receptora, respectivamente.

2.4. Efeito Ferranti

O efeito Ferranti é um fenômeno que ocasiona o aumento da tensão na extremidade receptora aberta de uma LT, tornando-a superior à tensão no lado da geração, devido ao fluxo de corrente capacitativa através da indutância série da linha (D'AJUZ, *et al.*, 1987).

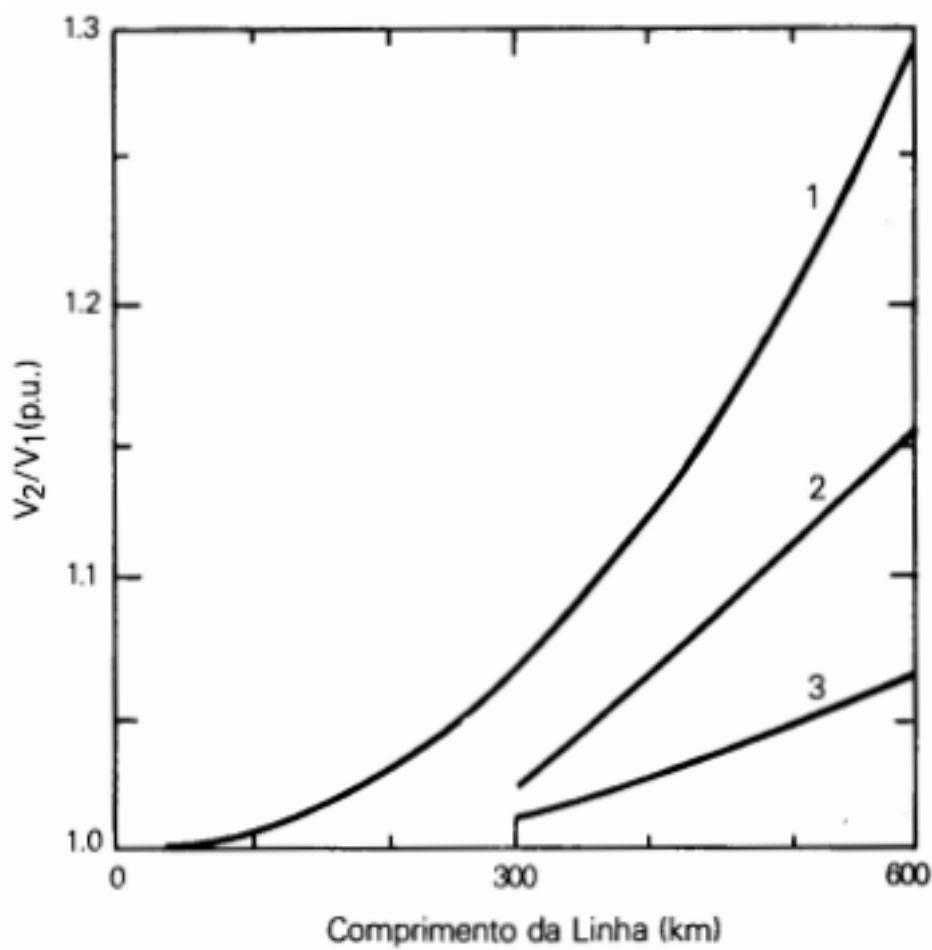
O fenômeno foi descoberto pelo engenheiro Sebastian Ziani de Ferranti em 1890, tendo seu nome perpetuado em homenagem à sua contribuição. Até hoje trata-se de um dos fenômenos mais relevantes na operação de sistemas elétricos de potência de grande porte. A manifestação deste efeito torna-se crítica em LT longas de alta tensão, podendo elevar a tensão terminal acima da nominal, dependendo do comprimento da linha e das suas características construtivas. O

fenômeno se intensifica em períodos de baixa demanda de carga, ocorrendo normalmente durante madrugadas e finais de semana, quando o sistema elétrico interligado é reduzido, ou seja, em momentos de baixa demanda de energia.

A Figura 4 apresenta a magnitude aproximada da elevação da tensão em função do comprimento da linha, devido ao efeito Ferranti onde são mostradas três curvas que representam as seguintes condições:

- Primeira, linha sem compensação;
- Segunda, linha com 50% de compensação capacitiva série;
- Terceira, linha com 50% de compensação capacitativa série e 70% de compensação reativa em derivação.

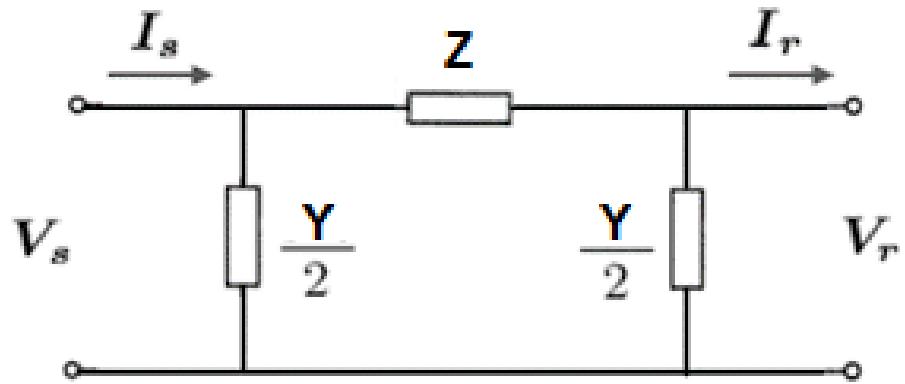
Figura 4 – Condições de elevação da tensão com o comprimento da LT com e sem compensação de efeito Ferranti



Fonte: Adaptado de Ary D'Ajuz et al., (1987)

Para melhor compreensão, é possível representar a LT por um circuito a dois terminais, conforme a Figura 5 (Ary D'Ajuz *et al.*, 1987).

Figura 5 - Modelo π -equivalente (parâmetros concentrados)



Fonte: Adaptado de Ary D'Ajuz *et al.*, (1987)

Nesse modelo, Z representa impedância série total da linha (comportamento resistivo e indutivo), enquanto Y corresponde à admitância *shunt* total, representando o comportamento capacitivo da linha. As equações gerais do modelo π -equivalente para as tensões (2.4.1) e correntes (2.4.2) são expressas por:

$$V_s = V_r \cosh(\gamma l) + Z_c I_r \operatorname{senh}(\gamma l) \quad (2.4.1)$$

$$I_r = I_s \cosh(\gamma l) + \frac{V_s}{Z_c} \operatorname{senh}(\gamma l) \quad (2.4.2)$$

Em que:

- V_s = Tensão no terminal emissor;
- V_r = Tensão no terminal receptor;
- Z_c = Impedância característica da linha de transmissão, $Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$;
- I_r = Corrente no terminal receptor;
- l = Comprimento da linha (em km);
- γ = Constante de propagação (em 1/m), $\gamma = \sqrt{ZY}$.

Na condição de linha em vazio ou sob rejeição de carga, o terminal receptor encontra-se aberto, de modo que $I_r = 0$. Assim, a Equação 2.4.1 pode ser simplificada para Equação 2.4.3:

$$V_s = V_r \cosh(\gamma l) \quad (2.4.3)$$

Para uma linha não compensada e desprezando-se as perdas, o efeito Ferranti pode ser calculado pela expressão (2.4.4):

$$\frac{V_r}{V_s} = \frac{1}{\cosh(\gamma l)} \quad (2.4.4)$$

2.5. Compensação do efeito Ferranti

Segundo Fuchs (2015), a compensação em derivação por reatores indutivos tem como objetivo neutralizar o efeito das reatâncias capacitivas das LT. Dessa forma, busca-se principalmente, a atenuação do efeito Ferranti, mantendo os valores das tensões nas extremidades da linha dentro dos níveis desejados.

Admitindo que o reator possua resistência desprezível, ou seja, possui apenas a parte imaginária, considera-se apenas a reatância no cálculo, de modo a satisfazer a condição em que a potência reativa na linha somada a potência reativa do reator seja igual a zero. A reatância indutiva do reator necessário pode ser estimada pela Equação 2.5.1:

$$X_r = \frac{2}{B \times l} \quad (2.5.1)$$

Em que:

- X_r = Reatância indutiva do reator (em Ω);
- B = Susceptânciia total da linha por unidade de comprimento (em $\mu\text{S}/\text{km}$).

Conhecendo a impedância do reator, é possível determinar, pela Equação 2.5.2, a potência reativa total (Q_r) fornecida do sistema. Dessa forma, o valor de X_r pode ser ajustado para fornecer a compensação adequada, com objetivo de controlar a tensão na barra receptora dentro dos limites admissíveis e, consequentemente, mitigar o efeito Ferranti (MORAES, 2025).

$$Q_r = \frac{V^2}{X_r} \quad (2.5.2)$$

3. Metodologia

Este capítulo descreve os procedimentos adotados para a análise do fenômeno de sobretensão conhecido como efeito Ferranti, em LT de alta tensão, bem como a avaliação de estratégias de mitigação baseadas na instalação de reatores *shunt*. O método adotado é de natureza quantitativa, fundamentado em modelagem matemática e validação por meio de simulações em ambiente computacional.

O desenvolvimento do trabalho foi dividido em cinco etapas principais, descritas a seguir:

1. Revisão teórica: levantamento bibliográfico sobre parâmetros elétricos de linhas de transmissão, fenômenos de sobretensão, equações do modelo π -equivalente e métodos de compensação reativa (apresentados no capítulo 2).
2. Modelagem da linha de transmissão: determinação dos parâmetros distribuídos (r , ℓ , c e g) de uma linha real de 500 kV de comprimento variável, representada pelo modelo π -equivalente.
3. Cálculo do efeito Ferranti: determinar a elevação de tensão na barra receptora a partir dos parâmetros elétricos previamente determinados.
4. Simulação computacional: implementação do modelo no *software* ATPDraw com a verificação do comportamento da tensão na barra receptora sob diferentes condições de compensação.
5. Análise e comparação dos resultados: avaliação dos níveis de sobretensão com e sem compensação, observando o impacto da inserção do reator *shunt*.

3.1. Dados Utilizados

Os parâmetros elétricos de uma LT real, com tensão nominal de 500 kV foram cedidos por uma empresa que trabalha com projetos de sistemas de transmissão de energia elétrica, a qual preferiu não ser identificada. Os valores de impedância e susceptância à frequência industrial de 60 Hz estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados Utilizados

Impedância Unitária (Ω/km)	Susceptância Unitária ($\mu S/km$)
0,0227+0,3572 j	4,613

Fonte: Empresa (2025)

Observa-se que na Figura 4 que representa o aumento da tensão em função do comprimento da linha, que, para atender o critério apresentado na Tabela 1, a tensão não pode ultrapassar 10% acima da tensão nominal, ou seja, não deve exceder 1,1 p.u.

Foram definidos três cenários distintos de LT, com os mesmos parâmetros elétricos apresentados na Tabela 2, mas com diferentes comprimentos: 200 km, 330 km e 400 km. Esses comprimentos foram escolhidos com objetivo de observar o efeito Ferranti sob diferentes graus de impacto na tensão da barra receptora e verificar a necessidade ou não de compensadores.

3.2 Simulações Computacionais

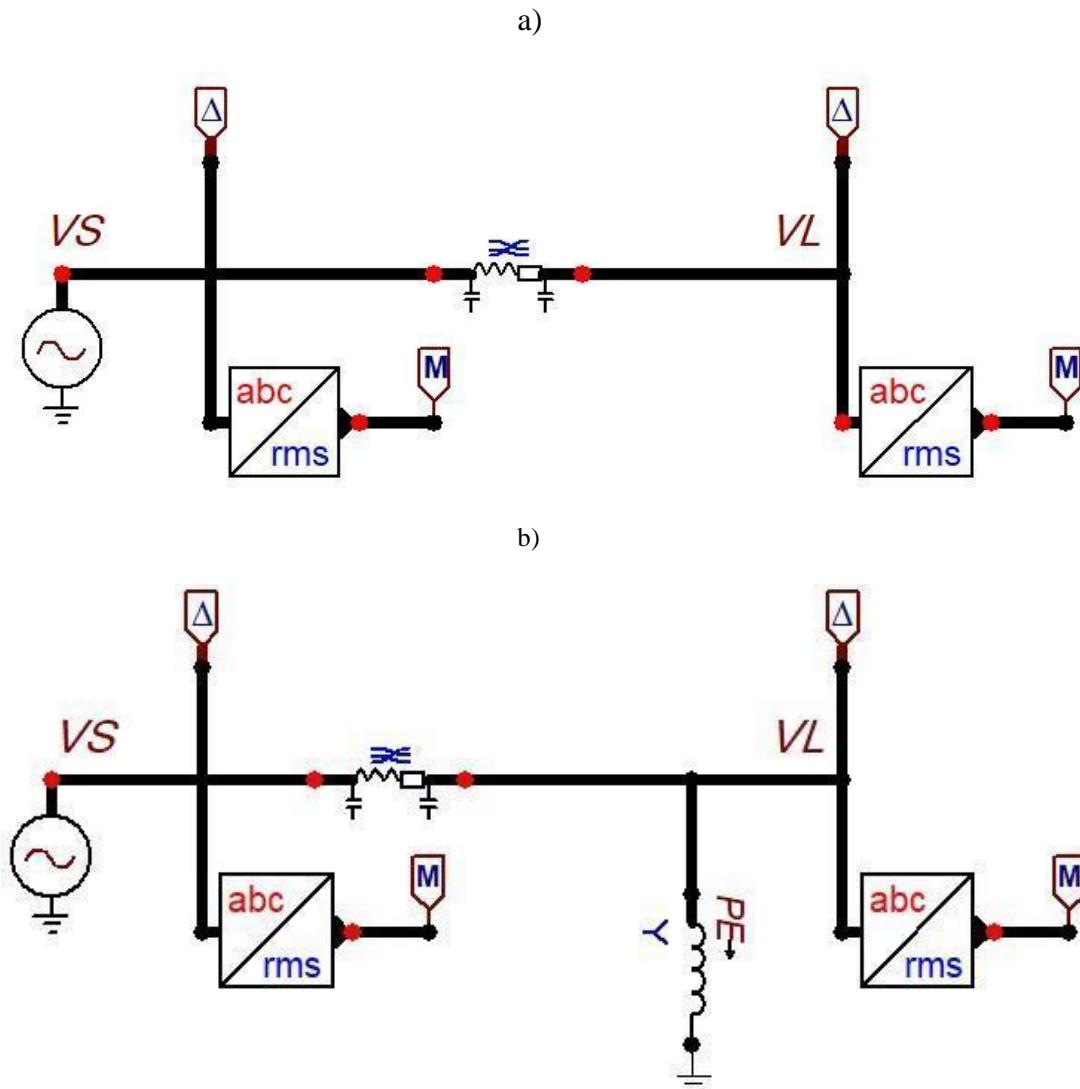
As simulações computacionais foram realizadas no *software* ATPDraw, o qual permite a modelagem e análise de sistemas de potência. O modelo foi construído com base no circuito π -equivalente, a fim de implementar o modelo digital de uma LT, utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 2. Cada cenário definido (200 km, 330 km e 400 km) foi implementado separadamente, de modo avaliar o comportamento de V_r sob diferentes comprimentos de linhas.

O gerador de tensão foi modelado como uma fonte senoidal trifásica balanceada, operando à frequência industrial de 60 Hz, com tensão nominal de 500 kV, conectado ao sistema através da um bloco para linhas e cabos do ATPDraw, onde trás o modelo π -equivalente e considera sua transposição ao longo do seu comprimento. A extremidade receptora da linha foi considerada em vazio, de forma a reproduzir a condição típica em que o efeito Ferranti ocorre com maior intensidade. Foram feitos dois conjuntos de simulações principais, para obter os resultados:

- Linha sem compensação: LT sem qualquer tipo de compensação, para verificar o comportamento natural da sobretensão no terminal receptor em função do comprimento;
- Linha com compensação: inserção de reator *shunt* no terminal da linha, com objetivo de observar a mitigação do efeito Ferranti.

A Figura 5 apresenta a modelagem implementada no ATPDraw, na qual é possível observar quatro pontos de medição, utilizados para registrar as tensões de emissor e receptor, em seus valores eficazes e máximos. Os blocos ABC/RMS (*models*) são funções do ATPDraw que faz o cálculo automaticamente do valor eficaz, cujas as medições agilizam a etapa de análise de resultados.

Figura 5 – Modelagem feita no software ATPDraw considerando: a) linha sem compensação e b) linha com compensação



Fonte: Autor (2025)

4. Resultados

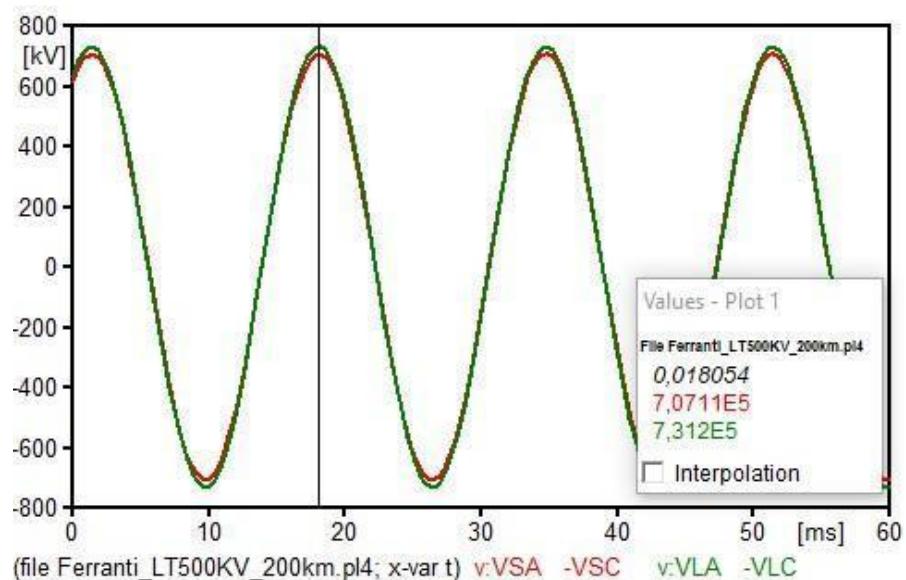
Neste capítulo são apresentados os procedimentos de execução das simulações e a organização dos resultados, evidenciando a variação do módulo da tensão no terminal receptor em função do comprimento da linha. Além disso, é verificado quais cenários requerem a presença de elementos compensadores. Sendo elaborado um gráfico de tensões eficazes e máximas, para cada cenário, permitindo a verificação do aumento da tensão de linha na barra de carga, consequentemente, a visualização do efeito Ferranti, agilizando a etapa de análise.

4.1. Resultados da simulação no ATPDraw

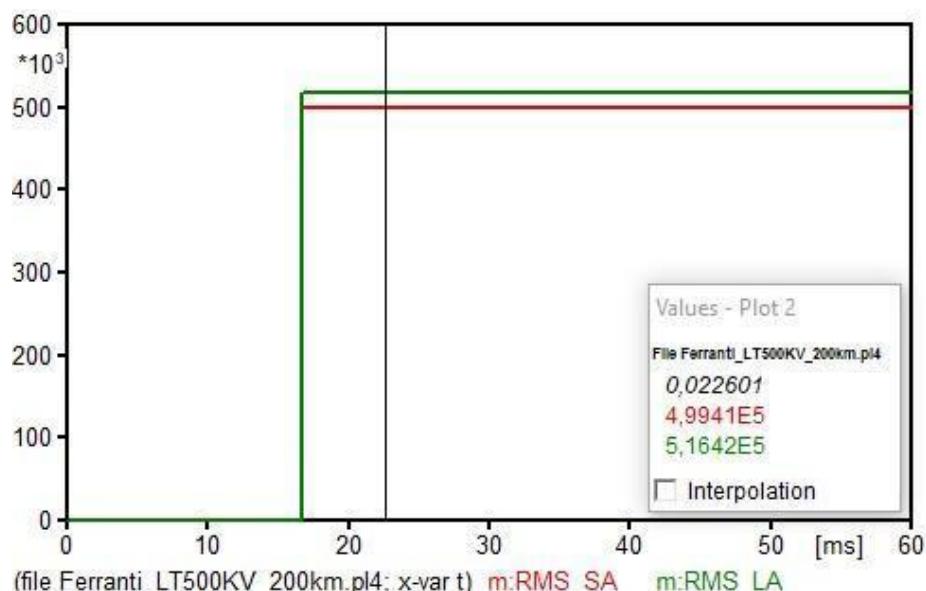
Os resultados de cada cenário são apresentados nas figuras a seguir: Figura 6 para 200 km, Figura 7 para 330 km e Figura 8 para 400 km.

Figura 6 - Aumento da tensão de linha para o cenário de 200 km, na barra de carga (em verde), em comparação à tensão da fonte (em vermelho), com base em seus valores: a) máximo e b) eficaz

a)

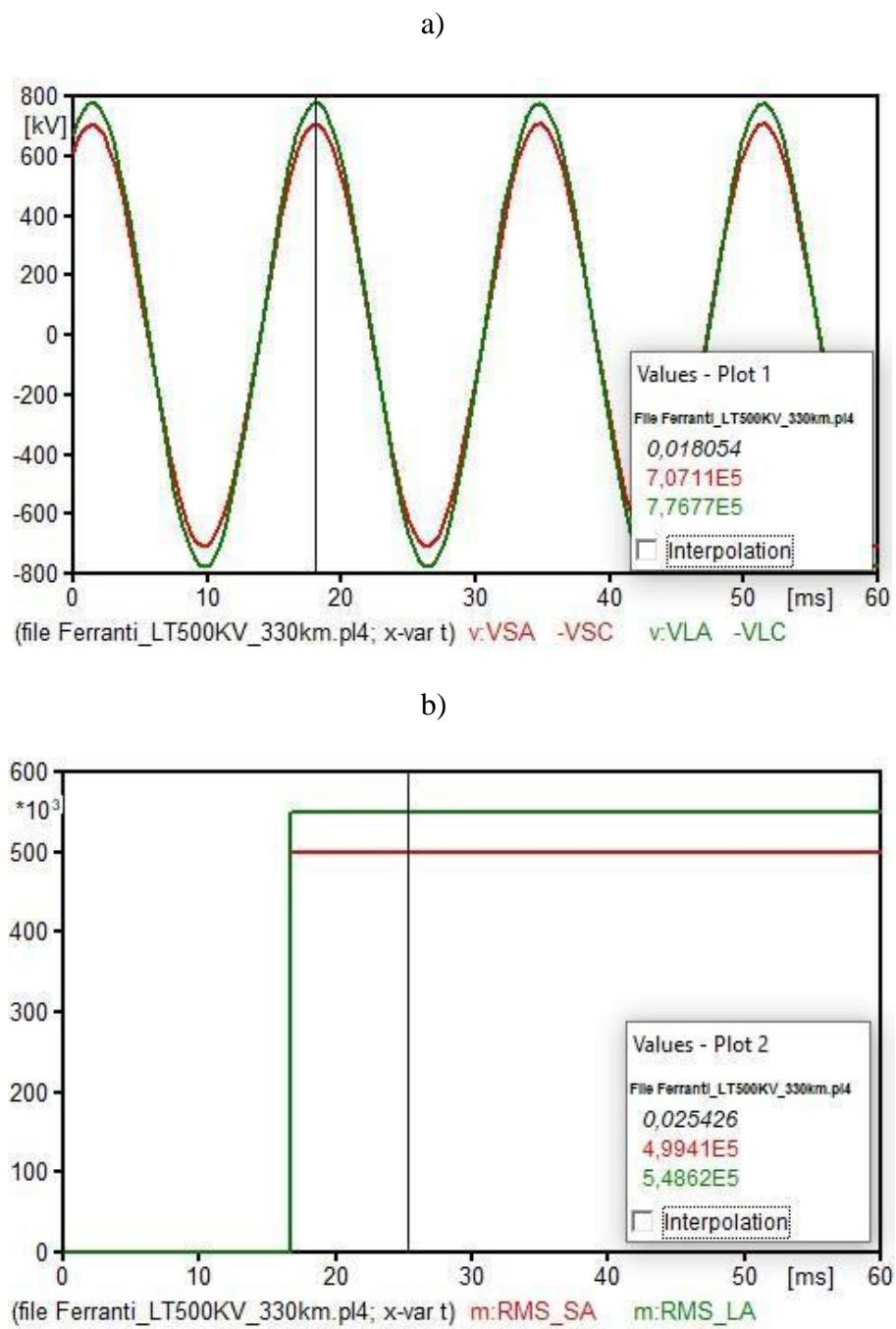


b)



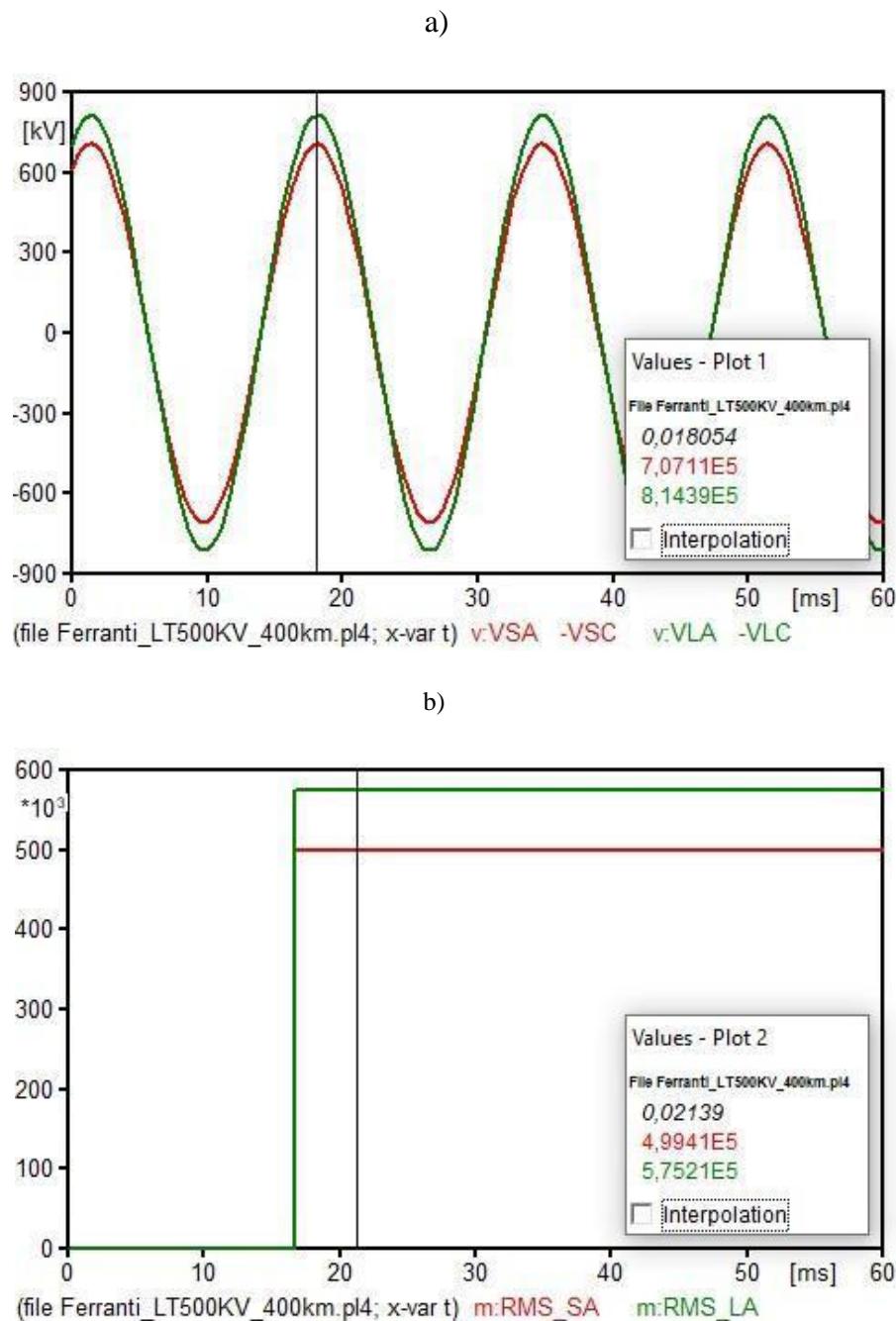
Fonte: Autor (2025)

Figura 7 - Aumento da tensão de linha para o cenário de 330 km, na barra de carga (em verde), em comparação à tensão da fonte (em vermelho), com base em seus valores: a) máximo e b) eficaz



Fonte: Autor (2025)

Figura 8 - Aumento da tensão de linha para o cenário de 400 km, na barra da carga (em verde), em comparação à tensão da fonte (em vermelho), com base em seus valores: a) máximo e b) eficaz



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 3 apresenta os resultados consolidados de todos os cenários, permitindo identificar aqueles que necessitam ou não de compensação. Observa-se que:

- Para o cenário de LT de 200 km o módulo da tensão no receptor apresenta um pequeno aumento, de aproximadamente 3,2% acima da tensão nominal;

- Para o cenário de LT de 330 km o módulo da tensão no receptor apresenta um aumento mais considerável, de aproximadamente 9,6% acima da tensão nominal, mas ainda sem necessidade de compensação por ser menor que 10% (Tabela 1);
- Para o cenário de LT de 400 km o módulo da tensão no receptor apresenta um aumento de aproximadamente 15% acima da tensão nominal, extrapolando o valor permitido de 10% pelo ONS (Tabela 1). Dessa forma torna-se necessária a aplicação de compensação reativa.

Tabela 3 – Resultados e análise da necessidade de compensação

Comprimento da LT	Resultados obtidos de V_r		Necessidade de compensação
	Tensão linha RMS (kV)	Tensão linha RMS (p.u.) ⁽¹⁾	
200 km	516	1,032	Não
330 km	548	1,096	Não
400 km	575	1,150	Sim

(1) Valores em p.u. com base na tensão nominal (500 kV).

Fonte: Autor (2025)

A partir dos resultados obtidos na Tabela 3, foi possível dimensionar o compensador reativo, conforme procedimento descrito na Seção 2.5. Admitiu-se que a impedância do reator Z_r possui comportamento predominantemente indutivo, possibilitando determinar a potência reativa Q_r necessária a ser compensada.

Entretanto, Zanetta Junior (2020) ressalta que não é recomendado a compensação total do efeito Ferranti. Assim, adotou-se o ajuste de compensação de aproximadamente 60%, buscando equilíbrio entre eficácia operacional e segurança do sistema.

4.2. Projeto do compensador reativo

O compensador foi dimensionado a partir da Equação 2.5.1, por meio da qual foi possível determinar a reatância indutiva do reator *shunt* necessária neutralizar o efeito das reatâncias capacitivas da linha. Em seguida, foi realizado o cálculo da potência reativa do sistema pela Equação 2.5.2, adotando-se 60% deste para a compensação. Foi calculada a nova impedância X_r' necessária para neutralizar o efeito Ferranti, mantendo o módulo da tensão no receptor dentro dos valores admissíveis para a operação em regime permanente, conforme os Procedimentos de Rede do ONS (ONS, 2022).

Abaixo são apresentados os valores obtidos a partir dos cálculos realizados para o projeto do compensador destinado à mitigação do efeito Ferranti. Conhecendo o valor da susceptância unitária do sistema, dado encontrado na Tabela 2, é possível calcular a condição que satisfaz a

Equação 2.5.1, e encontrar assim o valor da reatância indutiva para compensação total da reatância capacitativa LT, anulando o efeito Ferranti:

$$X_r = \frac{2}{B \times l} = \frac{2}{4,613 \times 10^{-6} \times 400} \rightarrow X_r = 1080 \Omega$$

A partir da Equação 2.5.2 foi calculado a potência reativa total do sistema, provocada pelo efeito capacitivo da linha.

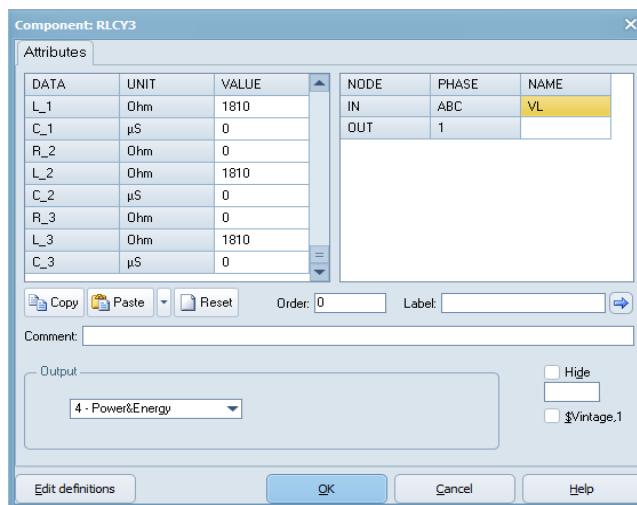
$$Q_r = \frac{V^2}{Xr} = \frac{500^2}{1080} = 231,48 \text{ kVar}$$

Adotando-se uma compensação de 60% de 231,48 kVar, o reator *shunt* deverá ser de aproximadamente 138 kVar (Q'_r). Então é possível calcular a nova impedância X'_r do reator a ser utilizada, através da Equação 2.5.2:

$$X'_r = \frac{V^2}{Q'_r} = \frac{500^2}{138} = 1810 \Omega$$

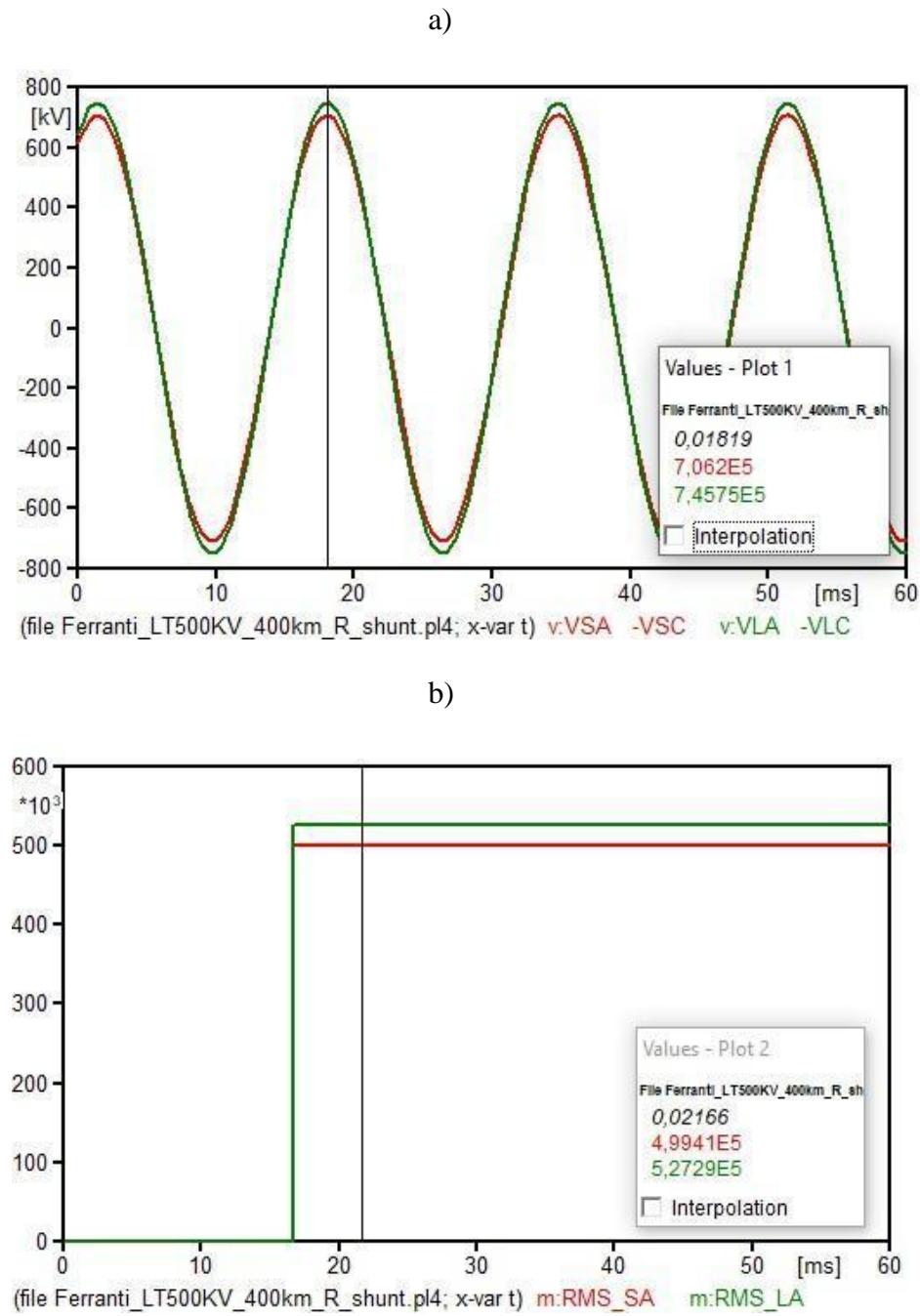
Após a determinação da nova impedância, que visa mitigar o efeito Ferranti, foi inserido um novo elemento no circuito (já apresentado na Figura 5b). Esse elemento representa o reator *shunt*, composto por uma impedância puramente indutiva, cuja função é neutralizar o efeito capacitivo da linha, corrigindo a sobretensão provocada pelo fenômeno, apresentado na Figura 9 as configurações do bloco RLCY3 do software ATPDraw que demonstram a impedância do reator *shunt*. Com modelo ajustado, foi realizada uma nova simulação. Os gráficos obtidos demonstram, agora, as reduções das tensões máximas e eficaz sob ação do reator *shunt*, conforme apresentado na Figura 10 (para linha de 400 km).

Figura 9 – Configurações do bloco RLCY3 para atuar como reator *shunt* com impedância indutiva de 1810 Ω



Fonte: Autor (2025)

Figura 10 – Tensões com o reator *shunt* inserido na barra da carga (em verde), em comparação à tensão no emissor (em vermelho), com base em seus valores: a) máximo e b) eficaz



Fonte: Autor (2025)

A Tabela 4 apresenta a análise comparativa dos resultados obtidos nas simulações com e sem o compensador, permitindo validar a eficácia do reator *shunt* na mitigação do efeito Ferranti em condições de linha em vazio, como as observadas em períodos noturnos, quando há redução significativa do carregamento do sistema. Observa-se que, antes da compensação, a tensão na barra receptora V_r atingia 575 kV, representado 15% acima da tensão nominal. Após a inserção

do reator *shunt* no sistema, a tensão na barra receptora V_r foi reduzida para 527 kV, correspondendo a um acréscimo de 5,4% em relação à tensão nominal, condição admitida pelos dos Procedimentos de Rede do ONS para operação em regime permanente (Tabela 1).

Tabela 4 – Comparação dos resultados da simulação com e sem compensação

Sem compensador		Com compensador	
Tensão de linha RMS (kV)	Tensão de linha RMS (p.u.) ⁽¹⁾	Tensão de linha RMS (kV)	Tensão de linha RMS (p.u.) ⁽¹⁾
575	1,150	527	1,054

(1) Valores em p.u. com base na tensão nominal (500 kV)

Fonte: Autor (2025)

5. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo analisar os impactos técnicos e operacionais do efeito Ferranti, fenômeno que provoca sobretensões em LT longas operando em vazio ou baixa carga. Buscou-se avaliar estratégias de mitigação por meio de compensação reativa utilizando reatores *shunt*, os quais atuam como reguladores de tensão, absorvendo a potência reativa excessiva e contribuído para a tensão ficar dentro dos limites operacionais admissíveis.

As simulações foram realizadas no *software* ATPDraw, utilizando o modelo π -equivalente e parâmetros reais de uma LT de 500 kV. Foram analisados três comprimentos distintos (200 km, 330 km e 400 km), com o objetivo de avaliar os casos em que haveria necessidade de compensação. As medições de tensão máxima e eficaz nas barras emissoras e receptoras permitiram verificar a conformidade com o limite de 10 % acima da tensão nominal, conforme estabelecido nos Procedimentos de Rede do ONS.

Os resultados mostraram que linhas com até 330 km (considerando os dados utilizados) não necessitam de compensação, mantendo-se dentro dos limites normativos. Já o cenário de 400 km apresentou elevação de aproximadamente 15% na tensão terminal, exigindo o uso de reator *shunt* para mitigação do efeito Ferranti. O compensador projetado, ajustado para compensar cerca de 60% da potência reativa associada ao efeito capacitivo, reduziu a sobretensão para 5,4% acima do valor nominal, validando a eficácia do método aplicado.

Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar diferentes topologias de compensação, incluindo dispositivos baseados em eletrônica de potência, como compensadores síncronos estáticos, que possibilitam maior precisão no controle de tensão e potência reativa em sistemas elétricos de transmissão.

Para acessar os arquivos de simulação e complementares acesse o link a seguir:
https://github.com/LSFaustino/EGE-TCC_LucasFaustino

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Congresso Nacional de Fiscalização promove nivelamento entre os fiscais da ANEEL e das Agências Reguladoras Estaduais.** Portal Gov, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/congresso-nacional-de-fiscalizacao-promove-nivelamento-entre-os-fiscais-da-aneel-e-das-agencias-reguladoras-estaduais>. Acesso em: 18 abr. 2025.
- BICHELS, A. **Sistemas elétrico de potência: métodos de análise e solução.** Curitiba: EDUTFPR, 2018. 466 p.
- BREDA, J. F. D. **Sistema de Monitoramento para Estimação de Estado Harmônico Trifásico para Sistemas de Distribuição utilizando Decomposição em Valores Singulares.** 2017. 146 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2017.
- D'AJUZ, Ary et al., **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento:** aplicação em sistemas de potência de alta tensão. Rio de Janeiro: EDUFF.1987. 425 p.
- FUCHS, Rubens D. **Transmissão de energia elétrica:** linhas aéreas. 3. ed. rev. e ampl. Uberlândia, MG: EDUFU, 2015. 2v.
- MARTINS, L. F. **Estudo e Simulação de Transitórios Envolvendo Ferrorressonância, Efeito Ferranti, Descargas Atmosféricas e Manobra de Capacitores e Reatores em Sistemas Elétricos.** 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.
- MILLER, Robert H. **Operação de Sistemas de Potência.** Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1987.
- MME. Assessoria Especial De Comunicação Social. **Demanda de energia bate novo recorde e sistema elétrico mantém estabilidade.** Portal Gov, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/demanda-de-energia-bate-novo-recorde-e-sistema-eletrico-mantem-estabilidade>. Acesso em: 23 mar. 2025.
- MORAES, G. G. F. **Estudo do Efeito Ferranti na linha de transmissão 230 kV: Inocência–Rio Verde do Norte utilizando o ATPDraw.** Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Jataí, 2025.
- ONS. **Procedimentos de Rede – Módulo 2: Critérios e Requisitos.** Submódulo 2.6: Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos. Revisão 2022.08. Brasília: ONS, 2022. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/documentos-tecnicos/procedimentos-de-rede>. Acesso em: 4 jun. 2025.
- ONS. **Relatório Anual 2023.** Brasília: ONS, 2024. Disponível em: <https://www.ons.org.br/>. Acesso em: 9 jul. 2025.
- ZANETTA JUNIOR, L. C. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência.** 2. ed. rev. São Paulo, SP: Edusp, 2020. 741 p.