

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS JATAÍ
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GUSTTAVO GUTIERRY FERREIRA MORAES

**ESTUDO DO EFEITO FERRANTI NA LINHA DE TRANSMISSÃO 230 KV
INOCÊNCIA - RIO VERDE DO NORTE UTILIZANDO O ATPDRAW**

**Jataí – GO
Junho/2025**

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem resarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor:

Matrícula:

Título do Trabalho:

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.



Local _____
Data _____



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

GUSTTAVO GUTIERRY FERREIRA MORAES

**ESTUDO DO EFEITO FERRANTI NA LINHA DE TRANSMISSÃO 230 KV
INOCÊNCIA - RIO VERDE DO NORTE UTILIZANDO O ATPDRAW**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Jataí para obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.
Orientadora: Profa. Dra. Jaqueline Oliveira Re-
zende

**Jataí – GO
Junho/2025**

GUSTTAVO GUTIERRY FERREIRA MORAES

**ESTUDO DO EFEITO FERRANTI NA LINHA DE TRANSMISSÃO 230 KV
INOCÊNCIA - RIO VERDE DO NORTE UTILIZANDO O ATPDRAW**

Trabalho de Conclusão de curso submetido à
Banca Examinadora do Instituto Federal de
Goiás, Câmpus Jataí para a obtenção do Grau
de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: ____ / ____ / _____.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Jaqueline Oliveira Rezende
Instituto Federal de Goiás - IFG
(Orientadora)

Prof. Dr. Fernando Silva Pereira
Instituto Federal de Goiás - IFG

Prof. Me. Antônio César Costa Ferreira Rosa
Instituto Federal do Triângulo Mineiro - IFMT

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

Moraes, Gusttavo Gutierry Ferreira.

Estudo do Efeito Ferranti na linha de transmissão 230 kV : Inocência – Rio Verde do Norte utilizando o ATPDraw [manuscrito]/ Gusttavo Gutierry Ferreira Moraes. - Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025.

72 f.; il.

Orientadora: Profa. Dra. Jaqueline Oliveira Rezende.

Bibliografias.

1. Compensação reativa. 2. Efeito Ferranti. 3. Linhas de transmissão. 4. Reatores. 5. Sobretensão. I. Rezende, Jaqueline Oliveira. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Tratamento da Informação – C. Jataí – Cód. F040/2025-1.
Bibliotecária – Rosy Cristina Oliveira Barbosa Sabino – CRB1/2380

Folha de Aprovação

GUSTTAVO GUTIERRY FERREIRA MORAES

ESTUDO DO EFEITO FERRANTI NA LINHA DE TRANSMISSÃO 230 KV INOCÊNCIA - RIO VERDE DO NORTE UTILIZANDO O ATPDRAW

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Monografia defendida e aprovada, em 10 de julho de 2025, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Jaqueline Oliveira Rezende
Presidente da banca / Orientadora
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Fernando Silva Pereira
Membro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus Jataí

Prof. Me. Antônio César Costa Ferreira Rosa
Membro
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro - Câmpus Paracatu

Jataí – GO

2025

Documento assinado eletronicamente por:

- **Fernando Silva Pereira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 05/08/2025 15:39:26.
- **ANTÔNIO CESAR COSTA FERREIRA ROSA, ANTÔNIO CESAR COSTA FERREIRA ROSA - Professor Efetivo EBTT - Iftm (10695891000282)**, em 05/08/2025 12:15:46.
- **Jaqueline Oliveira Rezende, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 05/08/2025 09:26:35.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 03/07/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 667614

Código de Autenticação: 9e1d2e0fcf



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Av. Presidente Juscelino Kubitschek,, 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714
(64) 3514-9579 (ramal: 9579)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha profunda gratidão à Deus por proporcionar saúde a mim e minha família.

Agradeço também aos meus pais, Rosângela e Edson por todo apoio que foi dado durante essa jornada.

À minha noiva Luciana por todo incentivo e compreensão dos momentos no quais não estive presente.

À minha tia Marilda, a primeira integrante de nossa família a alcançar a formação superior, cuja trajetória acadêmica constitui um exemplo inspirador de perseverança e superação.

Aos meus avós Doracy e Germiniano, pessoas humildes e muito trabalhadoras que vieram do campo, mas que foram meus maiores incentivadores desde a infância, motivando-me a buscar conhecimento e crescimento por meio dos estudos. Sem eles, acredito que nada disso teria início.

À minha irmã Gabriella, exemplo de superação e determinação, cuja coragem diante das adversidades de saúde revela uma notável força interior e resiliência, emergindo ainda mais fortalecida.

Ao Nilo por cuidar da minha família nos momentos de minha ausência.

Por fim, mas não menos importante, aos colegas de trabalho que me cobriram quando precisei e minha orientadora Dra Jaqueline pela compreensão e disponibilidade quanto aos horários e alinhamentos, devido a minha rotina.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero reconhecimento.

"Cada um terá a vista da montanha que estiver disposto escalar".

ICARO FONSECA

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de uma linha de transmissão de 230 kV, considerando o trecho entre Inocência e Rio Verde do Norte, com ênfase no fenômeno conhecido como Efeito Ferranti. Serão realizados cálculos para evidenciar o fenômeno e determinar os valores necessários à compensação, utilizando reatores indutivos em derivação. Posteriormente, serão realizadas simulações computacionais do sistema de transmissão. A extensão total da linha é de 508 km. As simulações serão conduzidas utilizando o software ATPDraw, com dados reais fornecidos pela concessionária de energia elétrica local.

As análises serão divididas em dois cenários principais: Cenário 1, com a linha operando em vazio sem a presença dos reatores indutivos, e Cenário 2, com a linha operando em vazio e a presença dos reatores de compensação. A partir dessas simulações, será possível observar o Efeito Ferranti e avaliar a eficácia da compensação reativa.

Palavras-chave: Compensação reativa; Efeito Ferranti; Linhas de transmissão; Reatores; Sobretensão.

ABSTRACT

This work aims to analyze the behavior of a 230 kV transmission line segment, focusing on the phenomenon known as the Ferranti Effect. Calculations will be performed to demonstrate the phenomenon and to determine the values required for compensation using shunt inductive reactors. Subsequently, computer simulations of the transmission system will be performed. The total length of the line is 508 km. The simulations will be conducted using the ATPDraw software, based on real data provided by the local electricity company. The simulations will be divided into two main scenarios: Scenario 1, with the line operating under no-load conditions without inductive compensation; and Scenario 2, with the line operating under no-load conditions with inductive reactors. Through these analyses, it will be possible to observe the Ferranti Effect and evaluate the effectiveness of reactive compensation.

Keywords: Ferranti effect; Overvoltage; Reactors; Reactive compensation; Transmission lines.

Lista de Figuras

1.1	Elementos da metodologia aplicada	3
1.2	Passo 1 - Acesso aos dados técnicos no site da ANEEL	4
1.3	Passo-2 Selecione os relatórios	4
3.1	Linha de Transmissão (Modelo Distribuído).	10
3.2	Representação do modelo π de uma linha de transmissão.	12
3.3	Representação de quadripolos.	13
3.4	Associação em cascata (série) de dois quadripolos.	15
3.5	Elevação da tensão por km	17
3.6	Sistema elétrico de potência e reator em derivação	22
3.7	Sistema com reatores variável	23
3.8	Compensação a vazio por reatores em derivação	23
3.9	Estrutura ATPDraw	29
3.10	Bloco <i>LINEZT_3</i>	30
3.11	Dados para simulação das linhas.	31
3.12	LT-230-kV-ILHA-SOLTEIRA-INOCÊNCIA.	32
3.13	LT-230-kV-CHAPADÃO-INOCÊNCIA.	32
3.14	LT-230-kV-CHAPADÃO-JATAÍ.	33
3.15	LT-230-kV-JATAI-RIO VERDE-NORTE.	33
3.16	Trecho total sem compensação	34
3.17	Círculo simulado	34
4.1	Configuração em série dos quadripolos Q1 a Q4	36
4.2	Configuração em série dos quadripolos Q1 com Q2 e Q3 com Q4	36
4.3	Configuração em série dos quadripolos Q1Q2 e Q3Q4	36
4.4	Configuração em série dos quadripolos Q1 e Q2	38
4.5	Configuração em série dos quadripolos Q3 e Q4	42
4.6	Configuração em série dos quadripolos Q1 a Q4 com reatores shunt	51
4.7	Configuração reator 34,89Mvar	53
4.8	Cenário real	54
4.9	Círculo real simulado	55
4.10	Círculo real	56
4.11	Fonte	57

4.12	Círculo completo da rede	57
4.13	Emissor e receptor a vazio	58
4.14	Linha com os reatores inseridos	58
4.15	Tensão emissor x receptor depois da correção	59
4.16	Carga do sistema	63
4.17	Carga aplicada na linha de transmissão	63
4.18	Gráfico de tensão de saída	64

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros elétricos totais da LT Inocência - Ilha Solteira	17
3.2	Principais categorias de componentes do ATPDraw	27
4.1	Quadripolos e respectivas linhas de transmissão	36
4.2	Parâmetros das linhas em sequência positiva e zero	38
4.3	Parâmetros das linhas em sequência positiva e zero	43
4.4	Variáveis que impactam o Efeito Ferranti	50
4.5	Especificações dos reatores shunt	53
4.6	Especificações dos reatores <i>shunt</i>	55
4.7	Comparação entre os cenários com e sem compensação	59
4.8	Comparação de características	62
4.9	Configuração do componente Load	62

LISTA DE SIGLAS

ONS Operador Nacional do Sistema

EPE Empresa de Pesquisa Energética

ANEEL AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA

CIGRÉ Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos

IEEE Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

ATP-EMTP *Alternative Transients Program - Electromagnetic Transients Program*

SIN Sistema interligado Nacional

EAT Extra Alta Tensão

UAT Ultra Alta Tensão

STATCOM *Static Synchronous Compensator*

FACTS *Flexible AC Transmission Systems*

PID *Proporcional–Integral–Derivativo*

HIL *Hardware-in-the-Loop*

Sumário

RESUMO

ABSTRACT

Lista de Siglas	1
1 Introdução	1
1.1 Objetivo geral	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Metodologia	2
1.4 Organização do Trabalho	5
2 Revisão Bibliográfica	7
3 Fundamentação Teórica	9
3.1 Linhas de Transmissão de Energia Elétrica	9
3.2 Modelo Equivalente π	11
3.3 Constantes Generalizadas de Associações de Quadripolos	12
3.3.1 O Quadripolo e suas Constantes Generalizadas	13
3.3.2 Associação Série de Quadripolos	14
3.4 O Efeito Ferranti	15
3.4.1 Condições de ocorrência	16
3.4.2 Consequências técnicas	16
3.4.3 Representação matemática	19
3.4.4 Modelo com aproximação hiperbólica	20
3.5 Compensação Reativa em Linhas de Transmissão	21
3.5.1 Reatores de Derivação: Conceito e Aplicações	21
3.5.2 Cálculo da Reatância Necessária	24
3.6 Simulação Computacional em Sistemas de Potência	24
3.6.1 ATPDraw: Origem, Estrutura e Aplicações	25
3.6.2 Importância da Simulação no Estudo do Efeito Ferranti	26
3.6.3 Modelagem de Linhas de Transmissão no ATPDraw	29
3.6.4 Representação Modal e Efeito da Transposição	31
3.6.5 Circuito representado	31

4 Resultados e Discussões	35
4.1 Configuração do Sistema	35
4.2 Modelagem Matemática do Efeito Ferranti	37
4.3 Associação em Série das Linhas Inocência-Ilha Solteira e Chapadão-Inocência .	38
4.3.1 Associação em Série de Q1 e Q2	41
4.4.1 Associação em Série de Q3 e Q4	45
4.4.2 Cálculos	46
4.4.3 Matriz Total Resultante	46
4.5 Dimensionamento dos reatores	51
4.6 Simulações ATPDraw (Cenário real)	54
4.7 Simulações ATPDraw (Cenário 1) sem correção dos reatores	56
4.8 Resultados das simulações (Cenário 2) com compensação dos reatores	58
4.9 Resultados das simulações (Cenário 3) com compensação dos reatores surgi- dos e com carga	59
4.9.1 Conversão para Elementos R e L	61
4.10 Configuração ATPDraw RLCY3	61
4.11 Características Técnicas	61
4.12 Parâmetros de Configuração	61
4.13 Modelagem Matemática	61
4.14 Verificação de Potência	62
4.15 Vantagens e Limitações	62
4.15.1 Parâmetros de Configuração	62
4.16 Análise Comparativa dos Resultados	64
4.16.1 Validação Prática	64
5 Conclusão	66
Conclusão	66
5.1 Trabalhos Futuros	66
6 Referências	68
Anexo: Código MATLAB para Simulação do Efeito Ferranti	71

1 INTRODUÇÃO

A transmissão e distribuição de energia elétrica são de grande importância desde que surgiram e começaram a ser utilizadas como ferramentas para a sociedade. Essa inovação representa uma das principais descobertas com mais impacto na civilização, abrangendo desde a iluminação até as aplicações industriais, substituindo as máquinas a vapor. As diversas formas pelas quais é possível trabalhar com essa energia afetaram todas as áreas de forma significativa, transformando os processos e impulsionando o desenvolvimento. Diante dos expressivos benefícios socioeconômicos decorrentes dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, essa temática consolidou-se como prioridade estratégica nas políticas de desenvolvimento nacional desde sua consolidação no século XX. A capacidade de levar eletricidade a diferentes regiões e garantir sua distribuição eficiente não apenas impulsionou o progresso industrial, mas também melhorou a qualidade de vida das comunidades, proporcionando benefícios em diversos setores. A capacidade de geração e transmissão de energia configura-se como elemento crítico para o desenvolvimento socioeconômico das nações, uma vez que o crescimento industrial demanda planejamento energético contínuo e expansão da capacidade instalada.

Nesse contexto, Fuchs (1977, p. 1) corrobora: "Aumentar constantemente as potências disponíveis nos sistemas elétricos tornou-se, pois, uma necessidade. Um regime de déficit energético representa poderoso freio a esse desenvolvimento". No Brasil, há um aumento constante de potência gerada e consumida (crescimento industrial e geração de energia) em consequência existe o aumento da quantidade das linhas de transmissão, segundo o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) estima-se que até 2025 haverá um aumento de 144.600 km para 184.054 km de extensão das linhas de transmissão em todo o país.

Além disso, esse grande crescimento de linhas de transmissão é justificável devido as características geográficas e de geração de energia elétrica nacionais. Desse modo, com grandes canais fluviais e uma grande faixa territorial, encontra-se muitas hidrelétricas ao decorrer da soberania brasileira, na qual há grande potencial de geração ainda não explorado. De acordo com EPE (Empresa de Pesquisa Energética), "O potencial hidrelétrico brasileiro é estimado em 172 GW, dos quais mais de 60% já foram aproveitados. Aproximadamente 70% do potencial ainda não aproveitado está localizado nas bacias hidrográficas Amazônica e Tocantins - Araguaia." Indubitavelmente, o cenário citado acima traz consigo um grande desafio de controle, manutenção e expansão devido ao tamanho das linhas. Uma das situações encontradas devido a esses aspectos é o aumento da tensão elétrica no receptor da linha de transmissão em redes de grande extensão conhecido como Efeito Ferranti. Essa sobretensão causa danos nos equipamentos da rede fazendo assim com que suas vidas úteis diminuam e impactem todo o sistema de distribuição. A importância dos estudos e métodos que contemplam a melhor performance nessa área vai diretamente de encontro com a eficiência no qual se consegue transmitir energia elétrica com a mais alta confiabilidade e qualidade.

Portanto, foi selecionado uma subestação de subtransmissão na região de Jataí-GO para a análise desse fenômeno, sendo que os dados analisados foram fornecidos pela concessionária responsáveis para maior veracidade dos resultados obtidos nesse trabalho.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar os efeitos do Efeito Ferranti em uma linha de transmissão entre Ilha Solteira e Rio Verde, no sudoeste de Goiás.

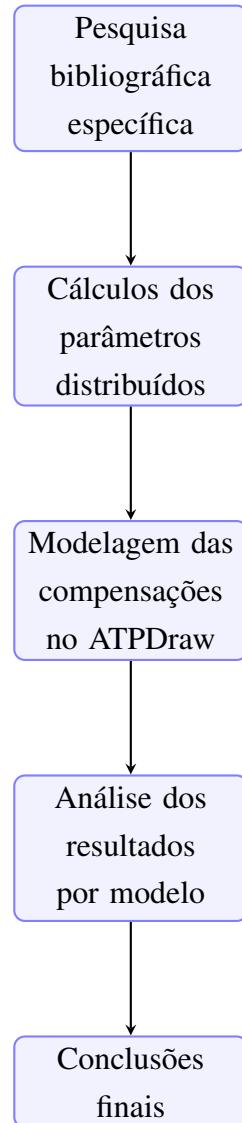
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Introduzir e aprofundar o conhecimento sobre linhas de transmissão;
- Desenvolver e simular a linha de transmissão utilizando o *software ATPDraw*;
- Calcular o valor da compensação reativa por meio de reatores indutivos;
- Contribuir para o entendimento técnico da linha de transmissão na região sudoeste de Goiás;
- Verificar a eficiência da compensação com reatores no sistema, avaliando os efeitos sobre a sobretensão;
- Comparar os resultados teóricos obtidos com as simulações no ATPDraw;
- Validar os parâmetros utilizados com base em dados oficiais disponibilizados pela ANEEL;
- Analisar os limites de aplicação do modelo π em linhas de transmissão extensas;
- Investigar o comportamento da tensão em regime de carga a vazio em diferentes trechos da rede modelada.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho foi estruturada em cinco etapas inter-relacionadas, conforme ilustrado na Figura 1.1, combinando abordagens teóricas e práticas para investigação do efeito Ferranti em linhas de transmissão de 230 kV:

Figura 1.1: Elementos da metodologia aplicada



Fonte: Autor.

1. Pesquisa bibliográfica específica

Revisão crítica da literatura especializada (IEEE, CIGRÉ, ANEEL), com foco em:

- Modelos matemáticos do Efeito Ferranti;
- Técnicas de compensação reativa;
- Parâmetros característicos de linhas de 230 kV;
- Estudos de caso documentados no setor elétrico brasileiro.

Os parâmetros serão obtidos por meio do site da ANEEL, no endereço eletrônico: https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes_liferay/editais_transmissao/edital_transmissao.cfm.

Para localizar os dados, basta seguir os dois passos descritos abaixo:

Figura 1.2: Passo 1 - Acesso aos dados técnicos no site da ANEEL

		Editais do ano	Pesquisar
		2025 ▲	
		2025 ▾	
		2024	NEEL Nº 004/2025
		2023	
Empreendimentos	<ul style="list-style-type: none"> - LOTE 1, composto pelas seguintes instalações no Estado de São Paulo: Sublote 1A: - LT 345 KV Miguel Reale - Centro, C1 e C2, Subterrâneas; Sublote 1B: - LT 345 KV Norte - Miguel Reale, C3 e C4, Subterrâneas. - LOTE 2, composto pelas seguintes instalações nos Estados do Maranhão, Paraíba, Pernambuco e Piauí: - LT 500 KV Santa Luzia II - Bom Nome II, C1, CS; - LT 230 KV Caxias II - Teresina II C1, CS; - LT 230 KV Teresina - Teresina III C1, CS; - SE 230 KV Caxias II - Controle Automático Rápido de Reativos - CARR. - LOTE 3, composto pelas seguintes instalações nos Estados do Rio Grande do Sul e Mato Grosso do Sul: - LT 230 KV Ivoli 2 - São Sebastião do Caí 2, C1, CS; - LT 230 KV Caxias - São Sebastião do Caí 2, C1, CS; - LT 230 KV Sarandi - Maringá, C1 e C3, CD; - SE 525/138 KV Erechim 3; - SE 230/69 KV Boa Vista do Buricá 2; - SE 230/138 KV São Sebastião do Caí 2; - SE 230/138 KV Ivoli 2; - Trechos de LT 525 KV entre a SE Erechim 3 e a LT 525 KV Itá - Caxias Norte C1; - Trechos de LT 230 KV entre a SE Boa Vista do Buricá 2 e a LT 230 KV Guarita - Santa Rosa C1; - Trechos de LT 230 KV entre a SE Ivoli 2 e a LT 230 KV Caxias - Campo Bom C1; - Trechos de LT 230 KV entre a SE Ivoli 2 e a LT 230 KV Caxias - Campo Bom C2. - LOTE 4, composto pelas seguintes instalações nos Estados do Mato Grosso e Rondônia: - LT 500 KV Jauru - Vilhena 2, C1, CS; 	2022 2021 2020 2019 2018 2017 2016 2015 2014 2013 2012 2011 2010 2009 2008 2007 2006	

Fonte: (ANEEL, 2025).

Figura 1.3: Passo-2 Selecione os relatórios

		Editais do ano	Pesquisar
		2008 ▾	
		Leilão 008/2008	
Empreendimentos	<ul style="list-style-type: none"> - LOTE A - LT Ilha Solteira ? Ilha Solteira 2, CD, em 440 KV; LT Ilha Solteira 2 ? Inocência 1 CD e 1 CS, em 230 KV; LT Inocência ? Chapadão 1 CD e 1 CS em 230 KV; Sul Subestação Chapadão, 23 - LOTE B - LT Chapadão ? Imbirussu CS, em 230 KV; LT Imbirussu ? Sidrolândia CS; LT Sidrolândia ? Anastácio, CS; Subestação Sidrolândia, 230 KV; Subestação Rio Br - LOTE C - LT Chapadão ? Jataí, CD, 230 KV; LT Barra dos Coqueiros - Quirinópolis, CS 230 KV; LT Palmeiras ? Edéia, CS, 230 KV; Subestação Jataí 230 KV; Subestação 		
Objeto	Licitação para a Contratação de Serviço Público de Transmissão de Energia Elétrica, mediante Outorga de Concessão, incluindo a construção, a operação e a manutenção, nacional, das instalações		
Reunião de Esclarecimento	Reunião para esclarecimento dos procedimentos do LEILÃO e MANUAL DE INSTRUÇÃO, no Auditório da ANEEL, sito à SGAN - Quadra 603/Módulos "I" e "J" - Brasília -		
Leilão	Sessão Pública de realização do leilão em 24/11/2008		
Local Leilão	Sessão pública de realização do LEILÃO, conduzida pela BVSP		
Edital e Documentos Vinculados RELATÓRIOS (R1 R2 R3 R4 R5) - Cronograma de Eventos			

Fonte: (ANEEL, 2025).

2. Cálculo dos parâmetros distribuídos

- Determinação analítica das constantes de propagação para as linhas estudadas;
- Aplicação do modelo de quadripolos;
- Cálculo do Efeito Ferranti em cada linha.

3. Modelagem das compensações no ATPDraw

- Configuração da rede real no ATPDraw;
- Inserção de cenários de compensação com reatores *shunt*.

4. Análise comparativa dos resultados

Avaliação quantitativa por meio de:

- Sobretensões no terminal receptor (V_R/V_S);
- Potência reativa compensada (Q_c);
- Tempo de estabilização pós-manobra.

5. Conclusões técnicas

Formulação de diretrizes para:

- Dimensionamento ótimo de reatores;
- Estratégias de operação em vazio;
- Mitigação de riscos à isoliação.

Ferramentas utilizadas:

- ATPDraw v6.1 Para simulação de transitórios eletromagnéticos
- MATLAB R2023a Análise matricial e desenvolvimento de algoritmos
- PlotXY Visualização e processamento de formas de onda

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em cinco capítulos do quais são fundamentais que seguem uma progressão lógica desde a fundamentação teórica até a análise prática dos fenômenos investigados. A organização foi planejada e programada para facilitar o entendimento de forma gradual do tema, de acordo com os detalhes a seguir:

1. Capítulo 1: Introdução

Apresenta o contexto e a importância do tema estudado, com foco nos desafios operacionais em linhas longas. Define de forma clara os objetivos gerais e específicos, além de explicitar a abordagem metodológica adotada ao longo da pesquisa.

2. Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

Examina trabalhos recentes sobre compensação reativa e modelagem de linhas, identificando lacunas no conhecimento que este estudo busca preencher.

3. Capítulo 3: Fundamentação Teórica

Desdobra-se em três blocos principais:

- Modelagem de linhas de transmissão (Seções 3.1 a 3.3)
- Análise detalhada do efeito Ferranti (Seção 3.4)
- Técnicas de compensação com reatores *shunt* (Seção 3.5)
- Ferramentas computacionais (Seção 3.6)

4. Capítulo 4: Resultados e Discussões

Aplicação prática com dois estudos de caso reais:

- Associação série das linhas Inocência-Ilha Solteira e Chapadão-Inocência
- Associação série Chapadão-Jataí e Rio Verde-Jataí

Inclui simulações no ATPDraw, análise comparativa e validação matemática dos resultados.

5. Capítulo 5: Conclusões

Síntese das contribuições e sugestões para trabalhos futuros, com ênfase na eficácia das soluções propostas.

6. Apêndice A

Disponibiliza o código MATLAB desenvolvido para simulação do efeito Ferranti, permitindo a reprodução dos resultados.

Cada capítulo complementa o anterior, formando uma sequência lógica que responde progressivamente aos objetivos estabelecidos na introdução. Os estudos de caso no Capítulo 4, em particular, servem como ligação entre a teoria e a aplicação real dos conceitos discutidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, busca-se descrever as referências utilizadas em teses e artigos científicos que estão correlacionados com os assuntos de simulação de redes de transmissão e trabalhos no qual foi usado o *software* ATPDraw como ferramenta de análise. Essas referências servem como base para afirmar a veracidade científica da monografia. Em (Soares,2017), o autor da tese realizou simulações de uma linha de transmissão de energia elétrica utilizando o *software* ATP (Alternative Transient Program). Essas simulações visam analisar métodos de controle de sobretensões para os casos de energização e religamento tripolar da linha, com o intuito de determinar as melhores condições para tais manobras. Os resultados são apresentados através de informações estatísticas obtidas das simulações, analisando os valores máximos e médios das sobretensões que podem ocorrer no sistema. A conclusão do trabalho ressalta a importância de realizar simulações para o estudo preventivo de manobras de energização de linhas de transmissão.

Em (Sudré, 2021) a publicação analisa a viabilidade da inserção de fontes de energia alternativas renováveis na matriz elétrica do país, com foco na região norte do estado de Minas Gerais, especificamente na conexão entre os municípios de Jaíba e Janaúba. O problema identificado é a dificuldade de escoamento de potencial elétrico na subestação Janaúba 3 devido à ultrapassagem dos limites de carregamento com a atual quantidade de autotransformadores. A solução proposta é a adição do 3º e 4º bancos de autotransformadores na subestação. O estudo valida a eficácia dessa solução por meio de simulações realizadas com o *software* Anarede, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), e replicadas utilizando o *software* livre ATPDraw, demonstrando resultados satisfatórios e comparáveis entre os dois programas.

Em (Oliveira, 2019), foi realizado uma análise das compensações série e paralela em sistemas elétricos de potência, considerando fontes simétricas e cargas equilibradas. Com o aumento previsto no consumo de energia elétrica nos próximos anos, é crucial que o Sistema Interligado Nacional (SIN) seja robusto o suficiente para atender a essas novas demandas. Este estudo busca analisar o desempenho e propor soluções para garantir o suprimento adequado de energia, considerando os custos e os impactos ambientais. Os compensadores são destacados como uma alternativa viável, pois podem atender às necessidades sem elevados gastos financeiros ou uso extensivo de espaço e com maior versatilidade de acordo com (Siemens Energy, 2023). O trabalho combina cálculos teóricos usando constantes generalizadas em quadripolos equivalentes com modelos computacionais desenvolvidos no *software* Alternative Transients Program (ATP). Os resultados mostram que a compensação série fixa reduz a indutância natural, melhorando a estabilidade sistêmica e aumentando a capacidade de transmissão da linha. Já a compensação paralela capacitiva fixa melhora o fator de potência e minimiza as quedas de tensão, enquanto a compensação indutiva fixa consome o reativo gerado em excesso pelas linhas, reduzindo o Efeito Ferranti e mantendo as barras dentro dos limites operacionais desejados.

Em (Martins, 2015), foi realizada uma simulação de fenômenos transitórios eletromagnéticos, como ferroressonância, efeito Ferranti, descargas atmosféricas e manobras de capacitores/reactores, utilizando o software ATP (Alternative Transients Program). O estudo confirmou a eficácia do ATP na modelagem desses transitórios, com resultados alinhados à teoria. Verificou-se que técnicas como a instalação de reatores em linha mitigam sobretensões do efeito Ferranti, enquanto para-raios se mostraram eficazes contra descargas atmosféricas e manobras de reatores. Além disso, o ajuste do tempo de chaveamento reduziu sobretensões na energização de capacitores, e o uso de resistores em paralelo com transformadores atenuou a ferroressonância, apesar de limitações práticas. Os resultados reforçam a importância de estratégias de compensação e proteção para garantir a estabilidade de redes elétricas frente a distúrbios transitórios, conforme discutido em (Siemens Energy, 2023).

Em (Rezende, 2013), foi investigada a compensação de reativos em linhas de transmissão de 400 km e 230 kV utilizando compensadores estáticos fixos, com foco na mitigação do *Efeito Ferranti*. O estudo empregou modelagem por quadripolos e simulações no software ATPDraw, considerando parâmetros reais de linhas do sistema brasileiro. Foram analisados oito arranjos de compensação (série, derivação e combinados), monitorando-se a tensão RMS no receptor sob diferentes condições de carga (60 MVA, 30 MVA e operação a vazio). Os resultados demonstraram que:

- Compensações série no meio da linha (Caso 2: $X_c = -j201,59 \Omega$) e combinações série-derivação (Casos 5–7) mantiveram a tensão dentro da faixa admissível ($\pm 5\%$ de 230 kV), mesmo em operação a vazio;
- Compensações exclusivamente em derivação (Caso 1: $Y = j0,0004787 \Omega$) controlaram o *Efeito Ferranti*, mas causaram quedas excessivas de tensão em plena carga;
- Arranjos com compensação série apenas no receptor (Caso 4) ou transmissor (Caso 3) mostraram-se ineficazes, com tensões fora dos limites operacionais.

Portanto entende-se que a combinação ótima de compensadores fixos (reatores em derivação para absorção de reativos e capacitores série para redução da reatância indutiva) elimina efetivamente o *Efeito Ferranti* e estabiliza a tensão, embora a localização dos dispositivos influencie criticamente o desempenho. O trabalho sugere como perspectiva futura a análise de compensadores estáticos chaveados para mitigação de transitórios.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentado os fundamentos teóricos necessários para a compreensão dos fenômenos físicos e elétricos associados ao comportamento de linhas de transmissão de longa distância, com ênfase no Efeito Ferranti. Tais fundamentos são essenciais para embasar os métodos de cálculo e simulação adotados ao longo deste trabalho.

Inicialmente, são discutidos os conceitos relacionados à estrutura física e aos parâmetros elétricos das linhas de transmissão, seguidos da abordagem sobre os modelos matemáticos comumente utilizados para representar o seu comportamento, com destaque para o modelo π . Em seguida, apresenta-se uma análise do Efeito Ferranti, abordando suas causas, implicações práticas e condições de ocorrência.

Também são tratados os métodos de compensação reativa aplicáveis ao controle de sobretensões em linhas operando a vazio, com foco na utilização de reatores de derivação. Por fim, é apresentada uma introdução ao *software* ATPDraw, ferramenta computacional adotada neste trabalho para a simulação do sistema elétrico em estudo, com ênfase na modelagem de linhas de transmissão, componentes e condições operacionais.

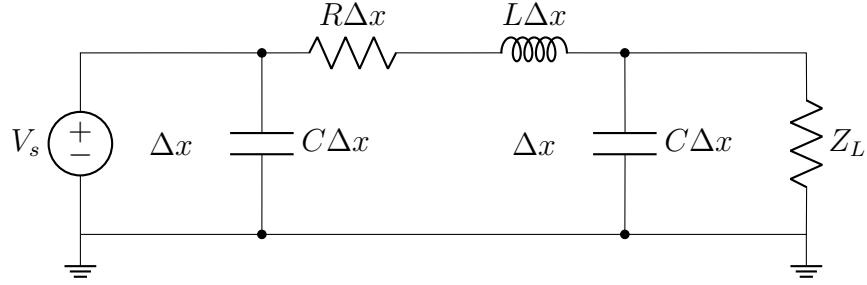
A fundamentação desenvolvida neste capítulo visa proporcionar embasamento técnico e conceitual para as análises realizadas nos capítulos seguintes.

3.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

As linhas de transmissão são elementos fundamentais nos sistemas elétricos de potência, responsáveis por transportar a energia elétrica gerada nas usinas até os centros de carga, com o menor nível possível de perdas e distorções. Elas operam, geralmente, em alta ou extra-alta tensão e percorrem longas distâncias, sendo essenciais para a interligação entre regiões geográficas distintas (Fuchs, 1997).

Fisicamente, uma linha de transmissão é constituída por condutores metálicos dispostos sobre torres ou postes, isoladores, para-raios e sistemas de aterramento. O meio pelo qual ocorre a propagação da energia é predominantemente o ar, o que caracteriza a linha como um sistema trifásico aéreo. Do ponto de vista do modelo elétrico, as linhas de transmissão são representadas por parâmetros distribuídos Figura 3.1.

Figura 3.1: Linha de Transmissão (Modelo Distribuído).



Fonte: Autor.

- **Resistência série (R):** representa as perdas ôhmicas dos condutores por efeito Joule;
- **Reatância indutiva série (L):** associada ao campo magnético produzido pelas correntes na linha, calculada por:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D_{eq}}{D_s} \right) \quad [\text{H/m}] \quad (3.1)$$

onde D_s é o raio médio geométrico do condutor e D_{eq} é a distância média geométrica entre os condutores de fase. Para uma linha com transposição completa, D_{eq} é calculada pela seguinte equação:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{d_{ab}d_{bc}d_{ca}} \quad (3.2)$$

sendo d_{ab} , d_{bc} e d_{ca} as distâncias entre os centros dos condutores das fases A e B, B e C, e C e A, respectivamente (Grainger, 1994)..

- **Condutância em derivação (G):** Representa as perdas por corrente de fuga nos isoladores e no ar (geralmente desprezível em linhas aéreas);
- **Susceptância capacitiva (B):** Representação do campo elétrico entre os condutores, dada por:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(D_{eq}/r)} \quad [\text{F/m}] \quad (3.3)$$

onde r é o raio do condutor e ε a permissividade do meio.

O comportamento da linha de transmissão depende diretamente do seu comprimento. Com base nisso, é comum classificá-las da seguinte forma (Grainger, 1994):

- **Linhas curtas:** até 80 km, nas quais os efeitos capacitivos são desprezíveis e apenas a impedância série é considerada;

- **Linhas médias:** entre 80 km e 240 km, nas quais o efeito da admitância shunt (capacitância) torna-se relevante. Para sua representação, existem dois modelos de parâmetros concentrados: o modelo T nominal e o modelo π nominal. Destes, o modelo π é o mais empregado na prática devido à sua conveniência em cálculos de fluxo de potência pois o modelo Pi simplifica a modelagem matemática de grandes sistemas de energia, evitando a criação de nós extras e o consequente aumento no número de equações que o modelo Tee exigiria. Essa vantagem computacional crucial levou à sua adoção como padrão, mesmo em cálculos isolados, para garantir consistência e facilitar a integração de dados;
- **Linhas longas:** acima de 240 km, exigindo modelagem com parâmetros distribuídos ou funções hiperbólicas, dado o comportamento ondulatório da tensão e corrente.

Em linhas longas, como a analisada neste trabalho, fenômenos como o Efeito Ferranti tornam-se relevantes, devido à predominância da capacidade sobre a carga. Por isso, torna-se essencial adotar modelos que levem em consideração os efeitos da distribuição dos parâmetros elétricos ao longo da linha.

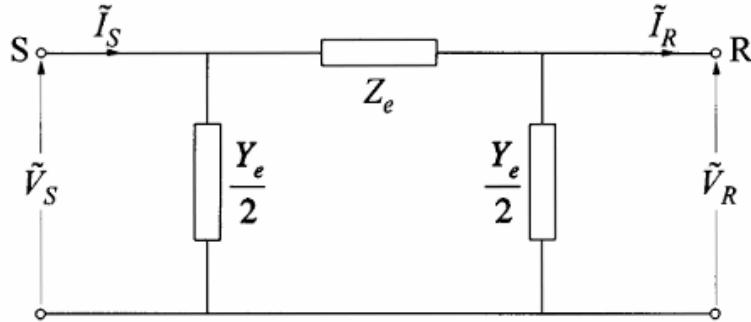
Além disso, aspectos como a transposição das fases (representada pelo cálculo de D_{eq} na Equação 3.1), o efeito pelicular, as perdas dielétricas e a interferência eletromagnética também podem impactar o desempenho da linha e, dependendo da aplicação, devem ser incorporados aos modelos utilizados em simulações ou estudos analíticos (Grainger, 1994).

3.2 MODELO EQUIVALENTE π

O modelo equivalente π é amplamente utilizado na análise de sistemas de potência para representar linhas de transmissão de média e longa distância. Esse modelo é classificado como um modelo de parâmetros concentrados (ou *lumped model*) e se baseia na simplificação da distribuição dos parâmetros elétricos ao longo da linha, concentrando-os em elementos discretos de impedância e admitância.

A estrutura do modelo π consiste em uma impedância série total $Z = R + jX$, representando as perdas ôhmicas e os efeitos indutivos da linha, e duas admitâncias shunt de valor $Y/2 = jB/2$ localizadas em cada extremidade da linha, representando os efeitos capacitivos da linha com relação ao solo e entre os condutores.

Figura 3.2: Representação do modelo π de uma linha de transmissão.



Fonte: (Kundur, 1994).

Os parâmetros Z e Y utilizados no modelo são definidos da seguinte forma:

- $Z = R + jX$ é a impedância série por unidade de comprimento da linha (em $\Omega \text{ m}^{-1}$), composta pela resistência R (associada às perdas ôhmicas) e pela reatância indutiva X (associada ao campo magnético gerado pelas correntes);
- $Y = G + jB$ é a admitância transversal por unidade de comprimento da linha (em S m^{-1}), formada pela condutância G (relacionada a fugas de corrente para o solo, geralmente desprezível em linhas aéreas) e pela susceptância capacitiva B (decorrente do campo elétrico entre os condutores e com o solo);

O modelo π equivalente é particularmente útil para linhas com comprimento entre 80 km e 240 km, onde os efeitos capacitivos não podem ser negligenciados, mas a modelagem com parâmetros distribuídos ainda não é obrigatória. No entanto, com ajustes adequados, pode ser estendido para linhas mais longas, servindo como aproximação para cálculos rápidos ou preliminares.

Apesar da praticidade do modelo π , ele possui limitações quando aplicado a linhas muito extensas (acima de 240 km). Em tais casos, o comportamento transitório e a distribuição real dos parâmetros ao longo da linha geram discrepâncias significativas em relação aos resultados fornecidos por modelos distribuídos. Para tais situações, é recomendado o uso de expressões baseadas em funções hiperbólicas (como \cosh e \sinh) ou simulações computacionais com ferramentas como o ATPDraw, que permitem modelagem modal e distribuída com maior precisão.

Segundo (kundur,1994), o modelo π é uma das ferramentas mais valiosas na análise de linhas de transmissão, mas seu uso deve ser criterioso e sempre validado frente ao contexto da aplicação e à extensão da linha analisada.

3.3 CONSTANTES GENERALIZADAS DE ASSOCIAÇÕES DE QUADRIPOLOS

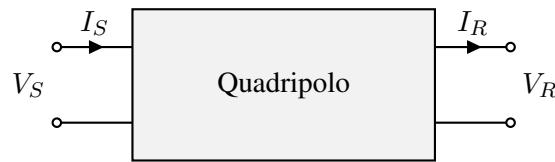
Em sistemas elétricos de potência, frequentemente é necessário analisar o comportamento de redes complexas que são formadas pela interconexão de componentes mais simples.

Muitos desses componentes, como seções de linhas de transmissão, transformadores e filtros, podem ser modelados como quadripolos (Fuchs, 1997). A caracterização de cada quadripolo individual por meio de suas constantes generalizadas A, B, C e D permite que a análise de associações desses elementos seja realizada de forma sistemática. Este capítulo detalha como determinar as constantes generalizadas equivalentes para as associações série e paralelo de quadripolos, com base nas formulações apresentadas por (Grainger, 1994).

3.3.1 O Quadripolo e suas Constantes Generalizadas

Um quadripolo é uma rede elétrica com um par de terminais de entrada (porta 1) e um par de terminais de saída (porta 2), conforme ilustrado na Figura 3.3.

Figura 3.3: Representação de quadripolos.



Fonte: Autor.

As relações entre tensões e correntes podem ser expressas por:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (3.4)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (3.5)$$

Onde as constantes são determinadas por:

$$A = I + \hat{Z} \left(\frac{\hat{Y}}{2} \right) \quad (3.6)$$

$$B = \hat{Z} \quad (3.7)$$

$$C = \frac{\hat{Y}}{2} + \frac{\hat{Y}}{2} \left(I + \hat{Z} \frac{\hat{Y}}{2} \right) \quad (3.8)$$

$$D = I + \left(\frac{\hat{Y}}{2} \right) \hat{Z} \quad (3.9)$$

onde:

- I : Matriz identidade 3×3
- \hat{Z} : Matriz de impedância série por unidade de comprimento
- \hat{Y} : Matriz de admitância *shunt* por unidade de comprimento

Interpretações físicas:

- $A = V_S/V_R|_{I_R=0}$: Relação de tensões em circuito aberto
- $B = V_S/I_R|_{V_R=0}$: Impedância de transferência
- $C = I_S/V_R|_{I_R=0}$: Admitânciade transferência
- $D = I_S/I_R|_{V_R=0}$: Relação de correntes em curto-circuito

Relação fundamental para redes recíprocas:

$$AD - BC = 1 \quad (3.10)$$

3.3.2 Associação Série de Quadripolos

Quando dois ou mais quadripolos são conectados em cascata (série), a saída de um quadripolo torna-se a entrada do seguinte, conforme ilustrado na Figura 3.4. Considera-se dois quadripolos, Q1 e Q2, com suas respectivas matrizes de transmissão $[T_1]$ e $[T_2]$:

$$[T_1] = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad [T_2] = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Para o primeiro quadripolo Q1:

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ I_{S1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{R1} \\ I_{R1} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Para o segundo quadripolo Q2:

$$\begin{bmatrix} V_{S2} \\ I_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{R2} \\ I_{R2} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Na conexão em cascata, a tensão e corrente de saída do primeiro quadripolo são a tensão e corrente de entrada do segundo, ou seja, $V_{R1} = V_{S2}$ e $I_{R1} = I_{S2}$. As grandezas de entrada da associação são $V_S = V_{S1}$ e $I_S = I_{S1}$, e as de saída são $V_R = V_{R2}$ e $I_R = I_{R2}$. Substituindo, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Portanto, a matriz de transmissão equivalente $[T_{eq}]$ para a associação em série é o produto das matrizes individuais, na ordem em que os quadripolos aparecem da fonte para a carga (Grainger,1994):

$$[T_{eq}] = [T_1][T_2] = \begin{bmatrix} A_1A_2 + B_1C_2 & A_1B_2 + B_1D_2 \\ C_1A_2 + D_1C_2 & C_1B_2 + D_1D_2 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Assim, as constantes generalizadas equivalentes são:

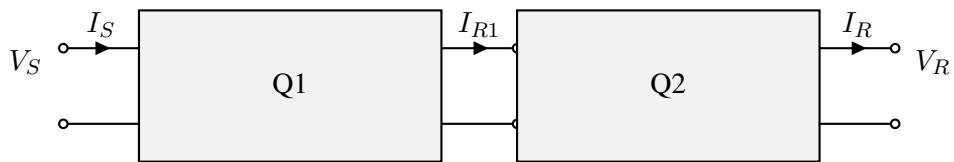
$$A_{eq} = A_1A_2 + B_1C_2 \quad (3.16)$$

$$B_{eq} = A_1B_2 + B_1D_2 \quad (3.17)$$

$$C_{eq} = C_1A_2 + D_1C_2 \quad (3.18)$$

$$D_{eq} = C_1B_2 + D_1D_2 \quad (3.19)$$

Figura 3.4: Associação em cascata (série) de dois quadripolos.



Fonte: Autor.

A capacidade de combinar quadripolos permite a modelagem de sistemas complexos de forma modular. Por exemplo, uma linha de transmissão longa pode ser dividida em várias seções menores, cada uma representada por um quadripolo, e a matriz de transmissão total obtida pela multiplicação em cascata. Similarmente, a combinação de uma linha com um transformador em cada extremidade também pode ser tratada usando essas técnicas.

A correta aplicação dessas formulações é crucial para estudos de fluxo de potência, estabilidade e transitórios em sistemas de energia elétrica, garantindo que o comportamento da rede composta seja adequadamente representado.

3.4 O EFEITO FERRANTI

O Efeito Ferranti caracteriza-se como um fenômeno eletromagnético singular em sistemas de potência, no qual observa-se a elevação da tensão na extremidade receptora de uma linha de transmissão em relação à extremidade emissora, mesmo quando não há carga conectada ao terminal final. Este comportamento, aparentemente paradoxal, foi identificado pelo engenheiro italiano Sebastian Ziani de Ferranti em 1890, durante a instalação de cabos subterrâneos para a estação de Deptford (D'AJUZ, 1987), e desde então constitui um dos fenômenos mais relevantes na operação de sistemas elétricos de grande porte.

A manifestação deste efeito é particularmente crítica em linhas de transmissão de extra-alta tensão (EAT) e ultra-alta tensão (UAT) com extensões superiores a 200 km, onde o aumento de tensão pode alcançar valores entre 10% e 20% acima da tensão nominal, dependendo do comprimento da linha e de suas características construtivas. Em (Grainger, 1994) demonstra que

este comportamento intensifica-se durante períodos de baixa demanda, como madrugadas e feriados, quando o sistema opera com carregamento substancialmente reduzido.

Do ponto de vista físico, o fenômeno pode ser compreendido através da análise do modelo π da linha de transmissão, onde a capacidade shunt distribuída ao longo da linha assume papel preponderante quando há pouca ou nenhuma carga conectada. De acordo com (Glover,2016), a capacidade distribuída, representada pelos campos elétricos entre os condutores e entre estes e o solo, propicia a geração de potência reativa capacitiva, resultando em correntes que fluem em sentido contrário à direção convencional da potência ativa, produzindo assim a elevação progressiva de tensão ao longo da linha.

As implicações práticas deste efeito são significativas para o planejamento e operação de sistemas elétricos, exigindo a implementação de medidas mitigadoras como reatores shunt, compensadores síncronos ou estáticos (STATCOM), e estratégias de controle avançado para manter os níveis de tensão dentro dos limites operacionais seguros (Kundur,1994). Além disso, conforme destacado por (Mamede,2014), o dimensionamento adequado da isolação dos equipamentos terminais deve considerar os níveis de sobretensão decorrentes deste fenômeno, evitando assim falhas prematuras e garantindo a confiabilidade operacional do sistema.

Estudos conduzidos por especialistas indicam que o Efeito Ferranti representa um dos principais fatores limitantes para a extensão máxima de linhas de transmissão não compensadas, estabelecendo restrições técnicas que impactam diretamente o planejamento da expansão de sistemas elétricos (Paganotti,2016.)

3.4.1 Condições de ocorrência

Fisicamente, a origem do efeito está associada à predominância da capacidade distribuída ao longo da linha. Em uma linha sem carga, a corrente capacitiva gerada pelo campo elétrico entre os condutores e o solo circula em direção à fonte, elevando o potencial elétrico ao longo do comprimento da linha. Como consequência, a extremidade receptora da linha apresenta uma tensão superior àquela aplicada na extremidade emissora. Esse efeito é mais acentuado em linhas com grande comprimento, baixa carga e operando em alta tensão. Para linhas curtas, o efeito é desprezível, mas em linhas acima de 240 km, operando em vazio, a elevação da tensão pode ultrapassar 10% do valor nominal (Kundur,1994).

3.4.2 Consequências técnicas

Do ponto de vista operacional, o Efeito Ferranti representa um desafio significativo para sistemas de transmissão, pois a sobretensão na extremidade receptora pode exceder os limites de isolamento de transformadores, disjuntores e demais equipamentos (Kundur,1994). Para avaliar esse comportamento, realizou-se uma simulação baseada em dados reais de uma linha de transmissão. O procedimento incluiu as seguintes etapas:

1. Utilização dos dados de referência da linha em estudo;

2. Aumento progressivo do seu comprimento, preservando os demais parâmetros elétricos;
3. Inclusão dos parâmetros específicos da interligação Inocência–Ilha Solteira no modelo;
4. Execução, no *MATLAB*, da simulação para um cenário de 500 km de extensão utilizando os dados reais da linha na representados no gráfico da Figura 3.5 utilizando os dados disposto na Tabela 3.1.

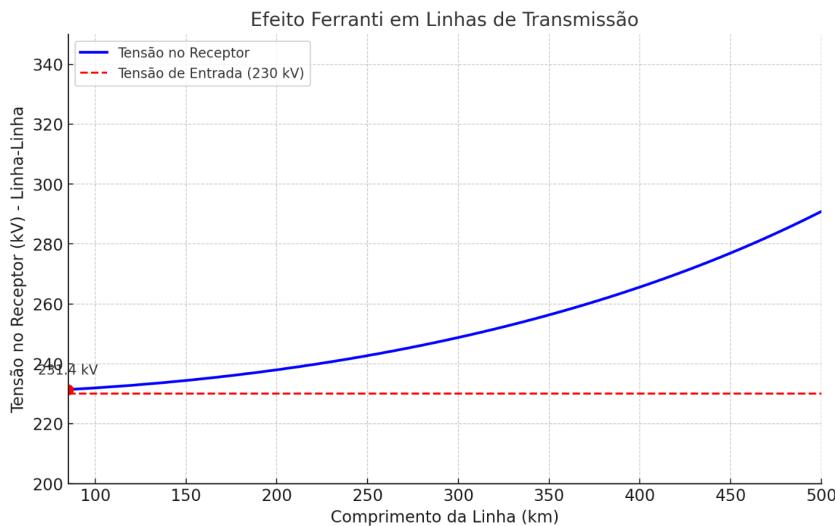
Os resultados indicam um crescimento exponencial da amplitude da tensão terminal, conforme ilustrado na Figura 3.5.

Tabela 3.1: Parâmetros elétricos totais da LT Inocência - Ilha Solteira

Parâmetro	Valor unitário	Valor total (85 km)
R_1	0,0000428 Ω/m	3,638 Ω
X_1	0,0003191 Ω/m	27,1235 Ω
B_1	0,0052588 $\mu S/m$	446,998 μS (0,000446998 S)

Fonte: Adaptado (PSR, 2008).

Figura 3.5: Elevação da tensão por km



Fonte: Autor.

Segundo (Fuchs,1997), tais sobretensões podem ocasionar falhas no isolamento, envelhecimento prematuro de componentes e aumento do risco de descargas disruptivas, o que compromete a confiabilidade do sistema elétrico. As principais implicações do Efeito Ferranti em linhas de transmissão são:

1. **Necessidade de maior isolamento:** exige aumento do nível de isolamento em linhas e equipamentos terminais devido às sobretensões geradas.

2. **Aumento de perdas por efeito Corona:** embora ajudem a reduzir sobretensões, essas perdas crescem quadraticamente com a tensão, aumentando radiointerferência e ruídos audíveis. Requer condutores de maior bitola, elevando custos.
3. **Risco de auto-excitacão:** a corrente capacitiva absorvida em vazio ($0 < \ell < \lambda/4$ e $\lambda/2 < \ell < 3\lambda/4$) pode causar auto-excitacão em máquinas síncronas, gerando tensões incontroláveis se não houver capacidade de absorção da carga capacitiva (Fuchs,1997), onde:

- ℓ : comprimento físico da linha de transmissão [km]
- λ : comprimento de onda da linha, calculado por $\lambda = \frac{v}{f}$, com:
 - $v \approx 3 \times 10^8$ m/s (velocidade de propagação)
 - f = frequência do sistema

4. Risco de ressonância harmônica

Os impactos técnicos também se manifestam na coordenação de isolamento. De acordo com (Hileman,1999), o dimensionamento adequado dos para-raios e demais dispositivos de proteção contra sobretensões deve obrigatoriamente considerar não apenas os surtos atmosféricos e de manobra, mas também as tensões sustentadas decorrentes do Efeito Ferranti, particularmente em subestações terminais de linhas longas.

Adicionalmente, (Grigsby,2012) destaca que o fenômeno pode contribuir para a ocorrência de ressonância harmônica em sistemas com alto nível de carregamento capacitivo, especialmente quando existem fontes de distorção harmônica conectadas próximas aos terminais da linha, como conversores estáticos de potência. Em frequências harmônicas, a amplificação das tensões pode ser ainda mais severa, resultando em sobreaquecimento de equipamentos e operação indevida de relés de proteção.

Sob a perspectiva da qualidade de energia, (Arrillaga,2003) aponta que a rejeição súbita de carga em linhas longas pode levar a sobretensões transitórias que, combinadas com o Efeito Ferranti, atingem patamares particularmente elevados, exigindo atuação rápida dos sistemas de proteção e controle.

Para mitigar essas consequências, é comum adotar medidas compensatórias, sendo a principal delas o uso de reatores shunt (de derivação), estrategicamente instalados nas extremidades da linha para consumir a potência reativa gerada pela capacitância (Kundur,1994). O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS,2019), recomenda que o dimensionamento desses reatores considere as diferentes condições operativas, desde o regime de carga mínima até rejeições totais de carga, garantindo que a tensão permaneça dentro da faixa de $\pm 5\%$ da nominal. Outras soluções incluem compensadores síncronos, STATCOM (compensadores estáticos síncronos), e, em sistemas mais modernos, compensadores FACTS (Sistemas de transmissão CA flexíveis) com controle eletrônico que permite ajuste dinâmico da compensação conforme as necessidades operacionais.

3.4.3 Representação matemática

A modelagem matemática do Efeito Ferranti pode ser feita com base no modelo π . A equação geral de uma linha de transmissão representada como quadripolo é dada por:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_S \\ \vec{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_R \\ \vec{I}_R \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Onde:

- \vec{V}_S : **Tensão complexa no terminal emissor (Send)**

Fasor tensão no início da linha ($V_S \angle \theta_S$), incluindo magnitude e fase.

- \vec{V}_R : **Tensão complexa no terminal receptor (Receive)**

Fasor tensão no final da linha ($V_R \angle \theta_R$). Sob Efeito Ferranti em vazio, $|\vec{V}_R| > |\vec{V}_S|$.

- \vec{I}_S : **Corrente complexa no terminal emissor**

Corrente injetada na linha pela subestação transmissora.

- \vec{I}_R : **Corrente complexa no terminal receptor**

Corrente na extremidade receptora. Em condições de vazio (Efeito Ferranti), $\vec{I}_R = 0$.

- $A = V_S/V_R|_{I_R=0}$: Relação de tensões em circuito aberto

- $B = V_S/I_R|_{V_R=0}$: Impedância de transferência

- $C = I_S/V_R|_{I_R=0}$: Admitânciade transferência

- $D = I_S/I_R|_{V_R=0}$: Relação de correntes em curto-circuito

$$A = 1 + \hat{Z} \left(\frac{\hat{Y}}{2} \right) \quad (3.21)$$

$$B = \hat{Z} \quad (3.22)$$

$$C = \frac{\hat{Y}}{2} + \frac{\hat{Y}}{2} \left(1 + \hat{Z} \frac{\hat{Y}}{2} \right) \quad (3.23)$$

$$D = 1 + \left(\frac{\hat{Y}}{2} \right) \hat{Z} \quad (3.24)$$

onde:

- I : Matriz identidade 3×3

- \hat{Z} : Matriz de impedância série por unidade de comprimento

- \hat{Y} : Matriz de admitância *shunt* por unidade de comprimento

Equacionamento do Efeito Ferranti

Considerando a condição de operação em vazio ($\vec{I}_R = 0$), a equação matricial do quadripolo (3.25) reduz-se a:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_S \\ \vec{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{V}_R \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Em seguida:

1. **Relação de tensão:** $\vec{V}_S = A\vec{V}_R + B \cdot 0 = A\vec{V}_R$

2. **Relação de corrente:** $\vec{I}_S = C\vec{V}_R + D \cdot 0 = C\vec{V}_R$

$$\vec{V}_S = A\vec{V}_R \quad \Rightarrow \quad \vec{V}_R = \frac{\vec{V}_S}{A} \quad (3.26)$$

Substituindo a expressão do parâmetro A do modelo π nominal (Eq. 3.21):

$$A = 1 + Z \left(\frac{Y}{2} \right) \quad (3.27)$$

na relação de tensão (3.26), obtém-se:

$$\vec{V}_R = \frac{\vec{V}_S}{1 + \frac{ZY}{2}} \quad (3.28)$$

Interpretação física:

- $Z = R + jX_L$: **Impedância série total** da linha [Ω]
- $Y = G + jB_C$: **Admitância shunt total** da linha [S]
- O termo $ZY/2$ representa a **relação de compensação reativa** entre efeito capacitivo (B_C) e indutivo (X_L)

3.4.4 Modelo com aproximação hiperbólica

Para maior precisão em linhas de transmissão extensas, é possível recorrer ao modelo de linha longa, que leva em conta os parâmetros distribuídos ao longo da linha. Neste caso, a tensão e a corrente na extremidade de envio são dadas por:

$$\vec{V}_S = \vec{V}_R \cdot \cosh(\gamma\ell) \quad (3.29)$$

$$\vec{I}_S = \frac{\vec{V}_R}{Z_c} \cdot \sinh(\gamma\ell) \quad (3.30)$$

Onde:

- $\gamma = \sqrt{ZY}$ é a constante de propagação da linha;
- $Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$ é a impedância característica;
- ℓ é o comprimento da linha.

As expressões (3.29) e (3.30) mostram que o comportamento da linha se aproxima de uma linha de transmissão real com parâmetros distribuídos, sendo ideal para simulações em ferramentas como o ATPDraw.

3.5 COMPENSAÇÃO REATIVA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

A compensação reativa é uma técnica amplamente utilizada em sistemas de potência com o objetivo de controlar os níveis de tensão, melhorar o fator de potência, reduzir perdas por efeito Joule e evitar sobretensões em regime permanente. No contexto específico das linhas de transmissão longas operando sob condição de vazio, a compensação reativa tem papel fundamental na mitigação do Efeito Ferranti, pois atua diretamente sobre a componente capacitiva do sistema.

Em linhas de transmissão extensas, a capacidade distribuída ao longo da linha gera uma corrente reativa de natureza capacitativa, que se acumula nos terminais da linha quando não há carga conectada. Essa corrente, ao retornar para a fonte, provoca elevação de tensão na extremidade receptora — fenômeno já descrito anteriormente como Efeito Ferranti.

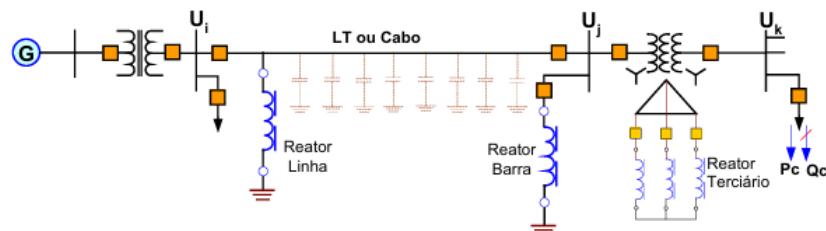
Quando essa sobretensão ultrapassa os limites operacionais dos equipamentos da subestação, é necessário implementar dispositivos que consumam a potência reativa gerada em excesso, restaurando o equilíbrio do sistema e preservando os níveis de tensão dentro dos padrões aceitáveis (Glover2016).

3.5.1 Reatores de Derivação: Conceito e Aplicações

Os reatores em derivação *shunt* são equipamentos fundamentais para o controle da tensão em sistemas elétricos de potência, possuindo importantes funções operacionais. De acordo com (Frontin,2013), esses dispositivos têm como principal objetivo absorver o excesso de potência reativa capacitativa gerada nas linhas de transmissão, mantendo e estabilizando os níveis de tensão dentro dos limites adequados para operação controlada. Além disso, os reatores shunt desempenham a função de reduzir sobretensões transitórias associadas a manobras operacionais como é demonstrado na Figura 3.6 protegendo assim o sistema elétrico e os equipamentos interligados. Adicionalmente, os reatores podem efetuar uma variação artificial do comprimento das

linhas, permitindo ajustes na configuração elétrica e facilitando a gestão eficiente dos níveis de tensão no sistema. A classificação desses equipamentos é feita conforme sua localização física no sistema elétrico, sendo categorizados em reatores de linha, reatores de barra e reatores de terciário (Frontin,2013).

Figura 3.6: Sistema elétrico de potência e reator em derivação

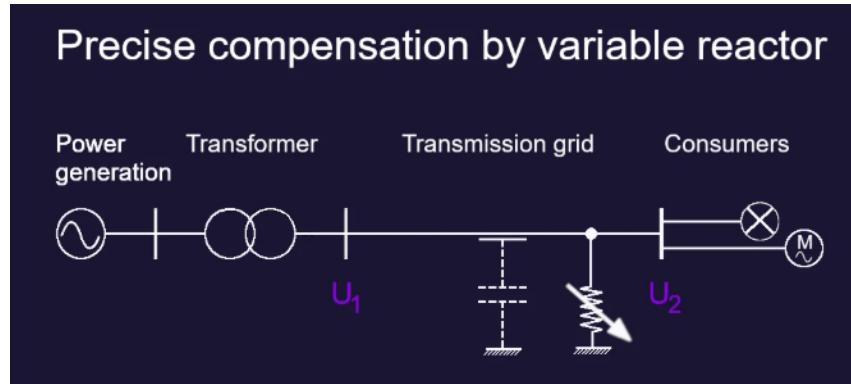


Fonte: (Frontin,2013).

Dessa forma, os reatores shunt são essenciais para a estabilidade e a confiabilidade operacional dos sistemas elétricos de alta tensão. Do ponto de vista construtivo, (Fink,1999) classifica os reatores shunt em três categorias principais:

- **Reatores com núcleo de ar:** consistem em enrolamentos concêntricos sem núcleo ferromagnético, geralmente imersos em óleo isolante ou encapsulados em resina epóxi. Tradicionalmente mais comuns em aplicações de média tensão, esses reatores apresentam impedância linear e ausência de perdas por histerese (Harlow,2004).
- **Reatores com núcleo de ferro:** utilizam núcleo ferromagnético com entreferros distribuídos para evitar saturação magnética. Conforme (Willis,2004), essa é a topologia mais empregada em sistemas de alta tensão (AT) e extra-alta tensão (EAT), devido à menor dispersão de fluxo magnético e melhor relação custo-benefício para potências elevadas. Atualmente, no Brasil, existem reatores de derivação com núcleo de ferro operando em níveis de até 500 kV, fabricados por empresas como Siemens e GE. Um exemplo recente é a instalação de um reator de 500 kV na subestação SE Penedo (CHESF), destacando sua relevância em sistemas modernos de transmissão.
- **Reatores variáveis:** incorporam comutadores sob carga (OLTCs) que permitem o ajuste dinâmico da reatância durante a operação. Segundo (ONG,2010), esse tipo tem ganhado destaque em redes complexas, nas quais as condições de carga variam significativamente ao longo do dia. A Figura 3.7 ilustra uma aplicação típica de reator variável conectado ao sistema.

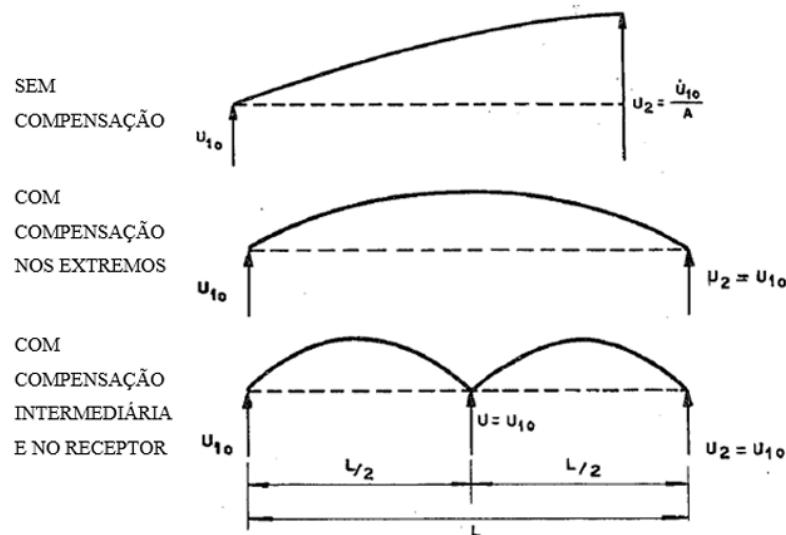
Figura 3.7: Sistema com reatores variável



Fonte:(Siemens Energy 2023)

Embora a compensação reativa possa ser distribuída ao longo da linha, a abordagem mais comum é a instalação de reatores nas extremidades da linha, especialmente na extremidade receptora. Essa escolha se justifica por questões práticas e econômicas, além de coincidir com o ponto de maior elevação de tensão sob regime de vazio (Fuchs,1997). Em alguns casos, reatores intermediários (reatores em trechos) são utilizados para compensar parcialmente trechos longos ou em linhas com seccionamentos. A escolha da topologia de compensação depende das características da linha, da frequência de operação em vazio e da sensibilidade da subestação terminal, na Figura 3.8 consegue-se visualizar as localizações acima citadas.

Figura 3.8: Compensação a vazio por reatores em derivação



Fonte: (Fuchs, 1977).

(Hingorani,2000) ressalta que o dimensionamento correto dos reatores deve considerar não apenas o regime permanente, mas também os transitórios de energização da linha. Conforme a norma IEEE Std C57.21-2008, os reatores shunt possuem requisitos específicos de operação em sobretensão: devem operar continuamente a 105% (1,05 pu) de sua tensão nomi-

nal.

Para a proteção dos reatores *shunt*, (Horowitz, 2008) recomenda a utilização de esquemas diferenciais combinados com proteção de sobrecorrente e sobreexcitação, além de monitoramento contínuo de temperatura e gases dissolvidos no óleo para reatores imersos, garantindo assim a confiabilidade e longevidade destes componentes essenciais para a operação segura de linhas de transmissão longas.

3.5.2 Cálculo da Reatância Necessária

A reatância do reator necessário pode ser estimada com base na potência reativa total gerada pela linha em vazio, considerando o efeito da susceptância total distribuída. O valor ideal do reator deve compensar a potência reativa injetada pela capacitância da linha, ou seja, satisfazer a condição de:

$$Q_{\text{linha}} + Q_{\text{reator}} = 0$$

Como $Q_{\text{linha}} = \frac{1}{2} \cdot V^2 \cdot B \cdot \ell$ (em var), portanto:

$$Q_{\text{reator}} = \frac{V^2}{X_L}$$

então, para compensação total:

$$X_L = \frac{2}{B \cdot \ell} \quad (3.31)$$

Onde:

- V : Tensão eficaz (fase-neutro) no ponto de conexão do reator (em V)
- X_L é a reatância indutiva do reator (em Ω);
- B é a susceptância total da linha por metro (em S m^{-1});
- ℓ é o comprimento da linha (em m).

Na prática, o valor de X_L pode ser ajustado para fornecer uma compensação parcial, com o objetivo de não anular completamente o Efeito Ferranti, mas limitar sua magnitude a valores admissíveis.

3.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

A simulação computacional tornou-se uma ferramenta essencial na engenharia elétrica contemporânea, sobretudo na análise e no planejamento de sistemas de potência. Por meio dela, é possível investigar o comportamento dinâmico de redes elétricas em diferentes cenários operacionais, realizar estudos de transitórios eletromagnéticos, avaliar respostas a distúrbios,

dimensionar sistemas de proteção e validar estratégias de controle. Tudo isso de forma segura, econômica e sem o risco de comprometer a integridade física dos ativos reais.

Neste trabalho, a simulação foi utilizada com o objetivo de estudar o Efeito Ferranti em uma linha de transmissão de 230 kV, utilizando dados reais fornecidos por agentes do setor elétrico, como a concessionária local, a ANEEL e o ONS. Para isso, adotou-se o *software* ATPDraw, que é uma interface gráfica para o programa ATP (Alternative Transients Program), reconhecido internacionalmente pela sua precisão na simulação de transitórios eletromagnéticos e análise em regime permanente.

3.6.1 ATPDraw: Origem, Estrutura e Aplicações

O ATP (Alternative Transients Program) é uma versão derivada do EMTP (Electromagnetic Transients Program), originalmente desenvolvido nos Estados Unidos no final da década de 1960, no contexto de pesquisas patrocinadas pela Bonneville Power Administration (BPA). O EMTP foi pioneiro na modelagem digital de transitórios em sistemas de potência, porém apresentava uma limitação considerável: a necessidade de inserção manual de dados por meio de arquivos de entrada baseados em texto (*deck files*), escritos em linguagens estruturadas pouco intuitivas.

Essa abordagem textual exigia do engenheiro não apenas domínio da teoria dos sistemas de potência, mas também conhecimento de sintaxe rígida e estruturação de blocos, o que tornava o processo suscetível a erros, pouco acessível a usuários iniciantes e extremamente moroso para modelagem de sistemas complexos.

Nesse cenário, surgiu o ATPDraw, desenvolvido inicialmente por pesquisadores do SINTEF (Foundation for Scientific and Industrial Research) na Noruega, na década de 1990, como resposta à necessidade de **automatizar, agilizar e democratizar o processo de modelagem no ATP**. A proposta era clara: criar uma interface gráfica amigável que eliminasse a necessidade de editar arquivos-texto, permitindo ao usuário construir circuitos por meio de diagramas esquemáticos, com inserção gráfica de componentes, configuração paramétrica intuitiva e geração automática dos arquivos de entrada do ATP.

Com sua biblioteca modular contendo mais de 200 componentes — entre linhas de transmissão, transformadores, máquinas síncronas, fontes de tensão e corrente, elementos de proteção e carga — o ATPDraw passou a resolver um problema crítico da engenharia elétrica aplicada: **a limitação da produtividade e da confiabilidade nos estudos computacionais de sistemas complexos**.

Atualmente, o ATPDraw é amplamente utilizado por empresas de energia, universidades e centros de pesquisa para simulação de fenômenos de alta complexidade, tais como:

- **Estudos de transmissão:** análise de sobretensões em linhas longas, coordenação de isolamento, variações de tensão e compensação reativa.

- **Proteção e seletividade:** simulação de relés digitais, coordenação entre disjuntores, e resposta de sistemas de proteção a faltas.
- **Integração de fontes renováveis:** avaliação dos impactos técnicos de parques eólicos e solares na estabilidade e na qualidade da energia.
- **Indústrias de grande porte:** modelagem de partidas de motores de alta potência, transitórios em fornos elétricos e em processos siderúrgicos.
- **Ensino e pesquisa:** validação de modelos teóricos, desenvolvimento de novos algoritmos de proteção, e capacitação técnica em transitórios.

O ATPDraw é mantido como *software* gratuito e amplamente documentado, com suporte ativo da comunidade internacional, promovendo acesso democrático à simulação de alta fidelidade em sistemas elétricos de potência. Sua estrutura orientada a blocos e sua integração transparente com o ATP tornam-no uma ferramenta ideal para análises envolvendo fenômenos rápidos e não lineares, como o Efeito Ferranti.

3.6.2 Importância da Simulação no Estudo do Efeito Ferranti

No contexto do Efeito Ferranti — fenômeno caracterizado pela elevação da tensão na extremidade de uma linha de transmissão em vazio — a simulação numérica é particularmente valiosa. Isso ocorre devido à presença de ondas viajantes e reflexões que tornam a análise analítica limitada e sujeita a simplificações. A simulação com o ATPDraw permite modelar com precisão a linha de transmissão, considerando sua capacidade distribuída, os parâmetros elétricos reais, e o tempo de propagação da onda eletromagnética.

Dessa forma, foi possível avaliar com precisão a magnitude da sobretensão gerada nas condições simuladas, identificar o impacto do comprimento da linha e das condições de carregamento, e validar os resultados com base em referências técnicas confiáveis, assegurando a robustez e a aplicabilidade prática das conclusões obtidas.

O ATPDraw é uma interface gráfica open-source desenvolvida para o ATP-EMTP (Alternative Transients Program), ferramenta consolidada mundialmente para simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência (LEFRANC,2023). Sua biblioteca modular inclui mais de 200 componentes, organizados em categorias especializadas conforme detalhado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Principais categorias de componentes do ATPDraw

Categoría	Componentes Representativos
Elementos de Rede	Modelos avançados de linhas de transmissão (Bergeron, JMarti) Transformadores com saturação magnética Bancos de capacitores e reatores shunt
Fontes e Excitações	Fontes senoidais com harmônicos Modelos de surtos atmosféricos (Heidler) Máquinas síncronas e de indução
Dispositivos de Proteção	Disjuntores com modelo de arco elétrico Relés digitais programáveis (MODELS) Varistores de ZnO não-lineares

Fonte: Adaptado de (dommel,1996)

A interface intuitiva permite construção de circuitos através de operações *drag-and-drop*, com auto-conexão inteligente de terminais. Para estudos do Efeito Ferranti, destaca-se:

- **Precisão paramétrica:** Configuração detalhada de parâmetros distribuídos em linhas longas ($R, L, C/km$)
- **Modelagem multi-frequência:** Análise de resposta em frequência para fenômenos ressonantes
- **Exportação direta:** Geração automática de netlists ATP compatíveis com solvers numéricos

Conforme apresentado na Figura 3.9, o ATPDraw apresenta uma arquitetura modular que organiza o fluxo de simulação de sistemas elétricos em etapas sequenciais. Esta estrutura é particularmente relevante para estudos de transitórios eletromagnéticos como o Efeito Ferranti, objeto central desta pesquisa.

Etapas do Processo

1. **Modelagem Gráfica (Cria):** Etapa inicial onde se constrói o diagrama unifilar do sistema, incluindo linhas de transmissão, reatores de compensação e fontes. Para estudos Ferranti, destaca-se a modelagem precisa de parâmetros capacitivos de linhas longas.
2. **Definição do Modelo:** Configuração de parâmetros críticos como:
 - Comprimento de linhas (ℓ)
 - Susceptância shunt (B)
 - Características de reatores

O arquivo `.acp` armazena esta topologia.

3. Geração de Código: Tradução automática para linguagem ATP, criando a "*netlist*"(`.atp`) com equações matriciais do sistema.

4. Compilação: Pré-processamento que inclui:

- Cálculo de parâmetros distribuídos
- Linearização de componentes
- Montagem da matriz de admitâncias

5. Execução: Fase núcleo onde o solver ATP resolve numericamente as equações diferenciais. Para o Efeito Ferranti, utiliza-se:

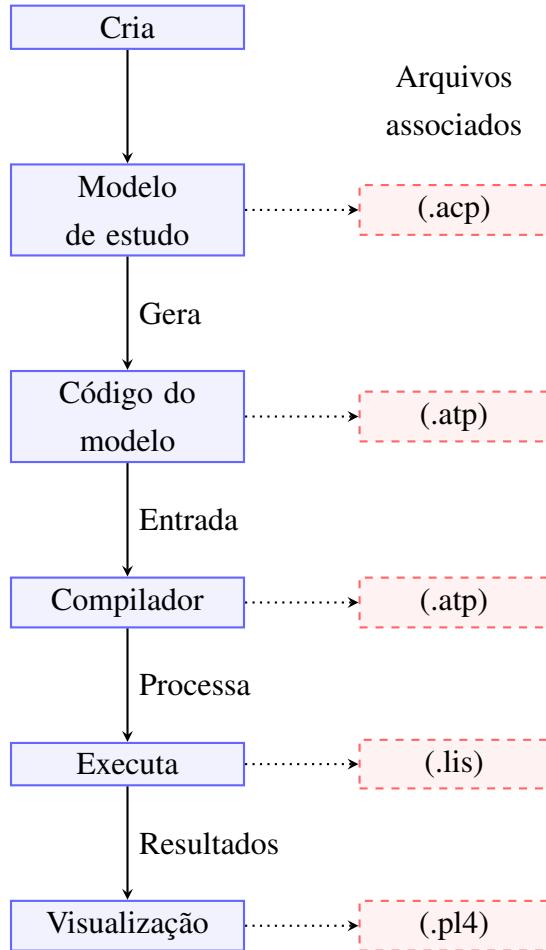
$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}$$

via método de integração trapezoidal.

6. Visualização: Análise dos resultados (`.p14`) como sobretensões em regime permanente, crucial para validação teórica.

- Cabeçalho com metadados da simulação
- Vetores temporais com passo de integração configurável
- Valores instantâneos de tensões, correntes e estados internos

Figura 3.9: Estrutura ATPDraw



Fonte: Autor.

O arquivo .acp é um arquivo de projeto associado à etapa de "Modelo de estudo" em fluxos de trabalho de simulação de sistemas elétricos, especialmente quando utilizado em conjunto com ferramentas como o ATPDraw (interface gráfica para o ATP-EMTP).

- A dupla ocorrência de ".atp" são:
 - O primeiro (.atp) é o código-fonte
 - O segundo (.atp) pode ser o executável compilado
- O arquivo .lis é gerado durante a execução então é um arquivo de registro gerado durante a execução de simulações computacionais também chamado de (log de simulação).
- O formato ".pl4" foi interpretado como ".pl4" formato padrão do PlotXY no ATP-EMTP.

3.6.3 Modelagem de Linhas de Transmissão no ATPDraw

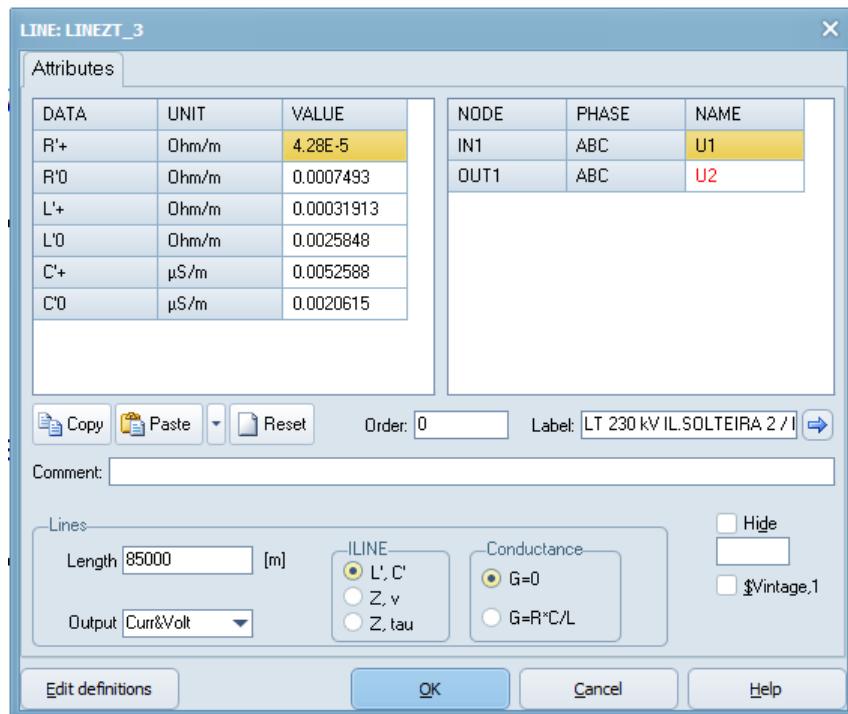
Para representar com fidelidade as linhas de transmissão, o ATPDraw oferece diferentes modelos, desde os mais simples (modelo π ou T) até os mais avançados, como o bloco *LINNEZT_3*. Este último permite a modelagem de linhas com parâmetros distribuídos reais, com

base em dados modais (sequência positiva e sequência zero), incluindo resistência, reatância e susceptância por metro.

O bloco *LINEZT_3* representado na figura 3.10 é especialmente indicado para linhas transpostas, como é o caso do presente estudo, e exige a entrada dos seguintes parâmetros por modo:

- R'_+ - Resistência de sequência positiva Ω/m
- R'_0 - Resistência de sequência zero Ω/m
- L'_+ - Indutância de sequência positiva Ω/m
- L'_0 - Indutância de sequência zero Ω/m
- C'_+ - Capacitância de sequência positiva $\mu S/m$
- C'_0 - Capacitância de sequência zero $\mu S/m$

Figura 3.10: Bloco *LINEZT_3*



Fonte: Autor.

A principal vantagem da modelagem com parâmetros distribuídos é a capacidade de capturar com maior precisão os efeitos de propagação de onda, ressonância, reflexões e sobretudo o Efeito Ferranti, que é altamente sensível à distribuição da capacitância ao longo da linha.

3.6.4 Representação Modal e Efeito da Transposição

No ATPDraw, a modelagem modal implica em representar a linha por meio de seus modos de propagação: o modo direto (sequência positiva) e o modo zero (sequência zero). Essa abordagem permite simular de forma mais realista os fenômenos eletromagnéticos, especialmente quando se trata de linhas longas, como no presente trabalho.

A consideração da transposição da linha — prática comum em sistemas de transmissão — garante que os parâmetros apresentados ao simulador sejam simétricos, o que facilita a análise modal e a interpretação dos resultados. Em termos práticos, a transposição equaliza os efeitos eletromagnéticos sobre as três fases ao longo do comprimento da linha, reduzindo o acoplamento e garantindo a validade da modelagem por modos desacoplados.

3.6.5 Circuito representado

A seguir será apresentados os dados referente aos trechos das linhas de transmissão e a configuração de cada linha no ATPDraw. O dados da linhas foram identificados nos estudos dos leilões da ANEEL e foram compilados na Figura 3.11. Os blocos de simulação são representados nas figuras de 3.12 a 3.15.

Figura 3.11: Dados para simulação das linhas.

De	Para	Tipo	Linha		Sequência Zero			Sequência Positiva		
			Extensão (km)		R ₀ Ω/m	X ₀ Ω/m	B ₀ μS/m	R ₁ Ω/m	X ₁ Ω/m	B ₁ μS/m
Inocência	Ilha Solteira	CD	85	0,0007493	0,0025848	0,0020615	0,0000428	0,0003191	0,0052588	
Chapadão	Inocência	CD	165	0,0007493	0,0025848	0,0020615	0,0000428	0,0003191	0,0052588	
Chapadão	Jataí	CD	131	0,0007493	0,0025848	0,0020615	0,0000428	0,0003191	0,0052588	
Rio Verde Norte	Jataí	CS	127	0,0004077	0,0015515	0,0026725	0,0000397	0,0003407	0,0048345	
Total			508km							

Fonte: Adaptado (PRS,2008).

Figura 3.12: LT-230-kV-ILHA-SOLTEIRA-INOCÊNCIA.

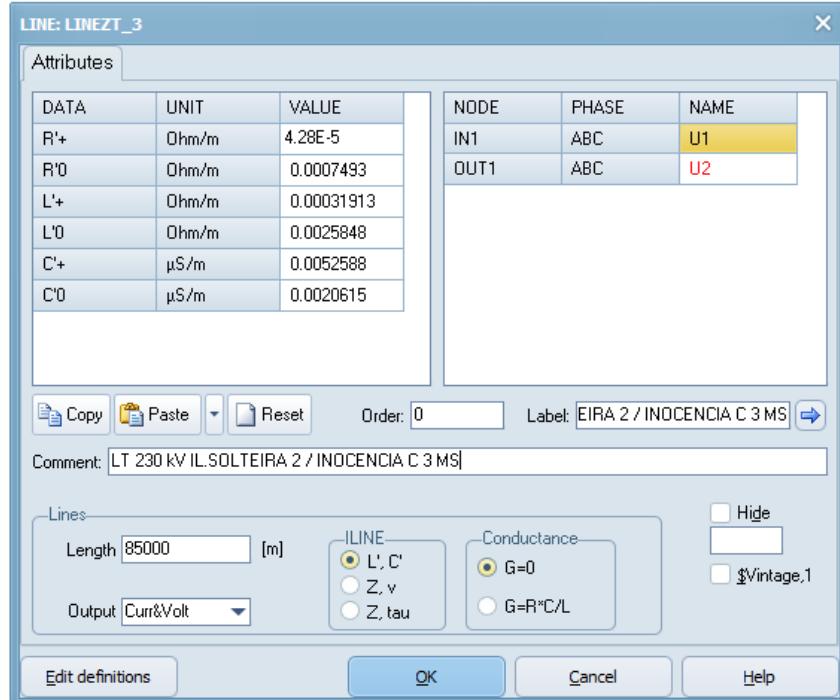


Figura 3.13: LT-230-kV-CHAPADÃO-INOCÊNCIA.

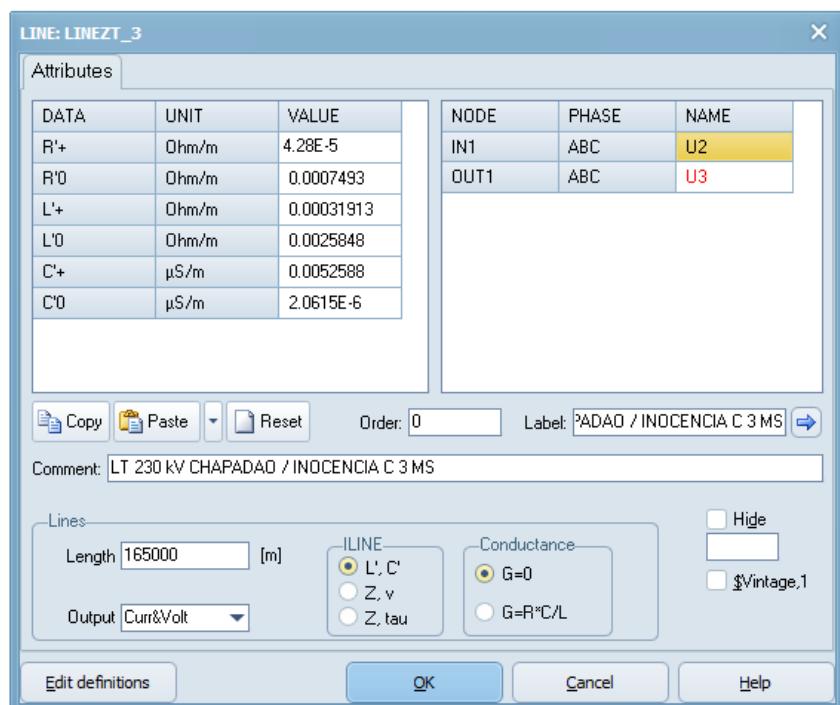
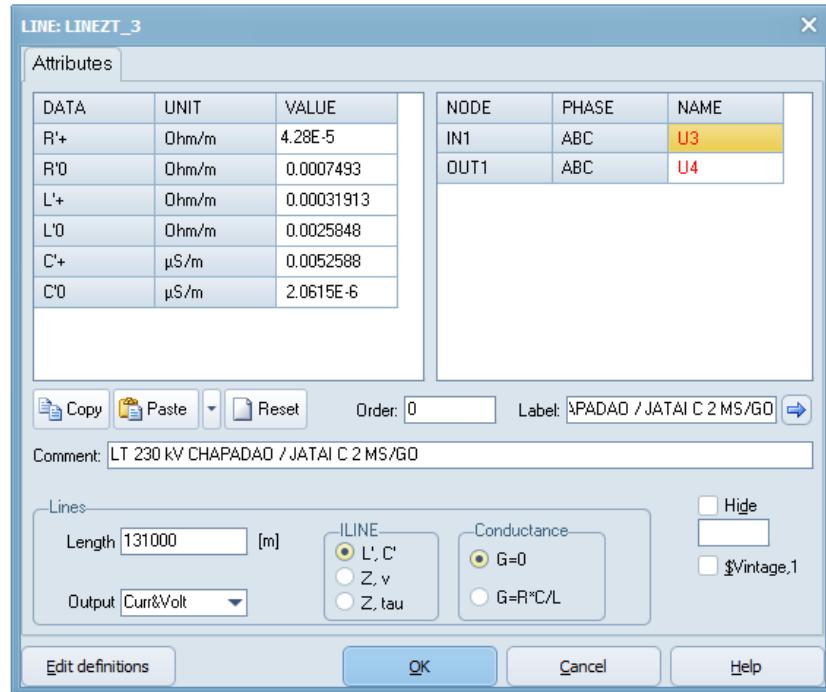
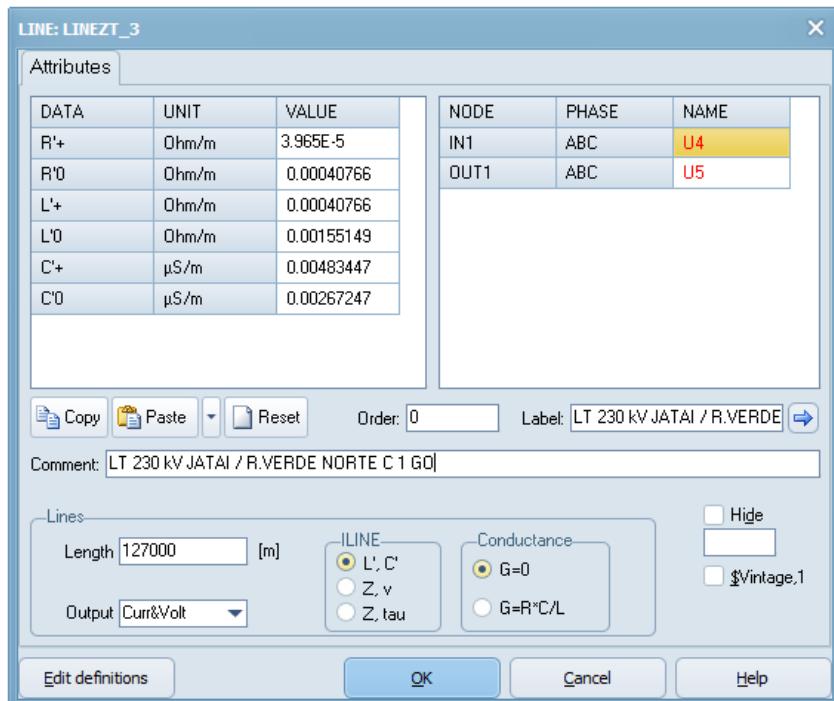


Figura 3.14: LT-230-kV-CHAPADÃO-JATAÍ.



Fonte: Autor.

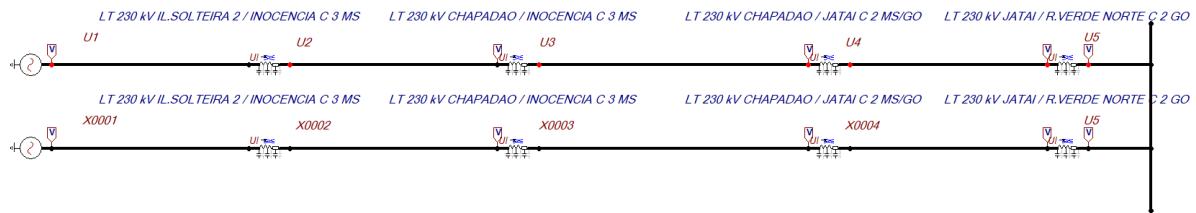
Figura 3.15: LT-230-kV-JATAI-RIO VERDE-NORTE.



Fonte: Autor.

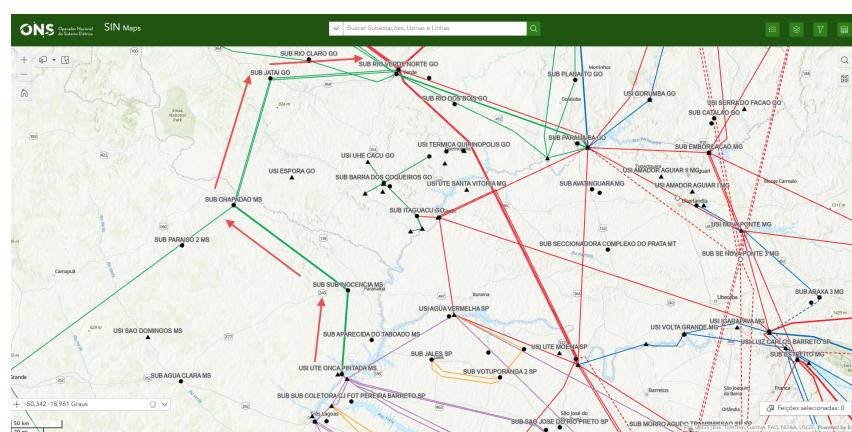
A conexão das linhas é apresentada na Figura 3.16, e a representação dessas, segundo o ONS, é ilustrada na Figura 3.17.

Figura 3.16: Trecho total sem compensação



Fonte: Autor.

Figura 3.17: Circuito simulado



Fonte: (ONS,2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos cálculos analíticos e das simulações computacionais, com ênfase na análise do Efeito Ferranti e na eficácia da compensação reativa por meio de reatores de derivação. Os resultados são organizados em dois cenários principais: operação em vazio sem compensação (Cenário 1) e operação em vazio com compensação (Cenário 2). Adicionalmente, realiza-se uma comparação entre diferentes modelos de linha de transmissão, seguida de uma discussão crítica dos resultados obtidos.

4.1 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

Para representar todo o sistema de transmissão desde Inocência-Ilha Solteira até Rio Verde Norte, a modelagem adotada utiliza quatro quadripolos em série (Q1 a Q4), conforme ilustrado na Figura 4.1. Cada quadripolo corresponde a um trecho específico da linha, com características distintas detalhadas na Tabela 4.1.

Posteriormente, para análise de diferentes cenários, os quadripolos são combinados em dois agrupamentos principais (Figura 4.2):

- **Q1Q2:** Trecho combinado Inocência-Ilha Solteira + Chapadão-Inocência (total 250 km)
- **Q3Q4:** Trecho combinado Chapadão-Jataí + Rio Verde Norte-Jataí (total 258 km)

Finalmente, para avaliação global do sistema, todos os quadripolos são associados em uma única matriz equivalente **Q1Q2Q3Q4** (Figura 4.3) representando toda a extensão de 508 km. Esta abordagem em cascata permite:

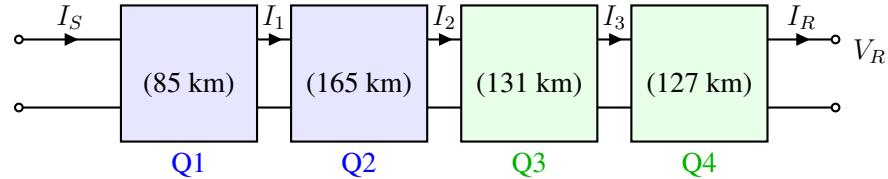
1. **Precisão na modelagem de LT longas:** Optou-se pelo uso do modelo de parâmetros concentrados (linha média), por meio de quadripolos (matrizes ABCD), os quais capturam os efeitos dos parâmetros distribuídos (R , L , G , C) ao longo da linha. Embora a linha completa supere 500 km, a análise foi segmentada em dois trechos, totalizando aproximadamente 250 km ao considerar os pares de trechos extremos. Esse valor está próximo do limite prático de 240 km para a modelagem como linha média. Mesmo com essa simplificação, os erros observados foram baixos, justificando a escolha do modelo e não sendo necessário, neste caso, o uso de funções hiperbólicas.
2. **Eficiência computacional:** A associação em série permite obter matrizes que representem diferentes linhas e suas configurações, gerando uma matriz equivalente única através do produto:

$$Q_{\text{eq}} = Q_1 \times Q_2 \times Q_3 \times Q_4$$

simplificando a análise comparativa entre cenários com e sem compensação.

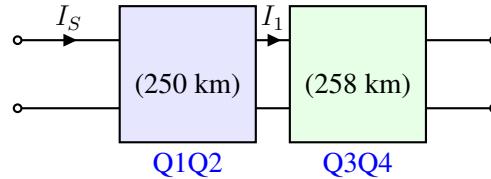
3. **Flexibilidade para compensação:** A inserção de reatores *shunt* é representável por quadripolos adicionais, permitindo avaliar sua influência no perfil de tensão em diferentes segmentos da linha.

Figura 4.1: Configuração em série dos quadripolos Q1 a Q4



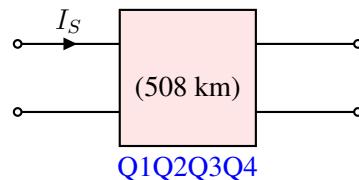
Fonte: Adaptado (PSR,2008).

Figura 4.2: Configuração em série dos quadripolos Q1 com Q2 e Q3 com Q4



Fonte: Adaptado (PSR,2008).

Figura 4.3: Configuração em série dos quadripolos Q1Q2 e Q3Q4



Fonte: Adaptado (PSR,2008).

Tabela 4.1: Quadripolos e respectivas linhas de transmissão

Quadripolo	Linha de Transmissão	Extensão (km)	Tipo
Q1	Ilha solteira-Inocência	85	CD
Q2	Chapadão-Inocência 2	165	CD
Q3	Chapadão-Jataí	131	CS
Q4	Rio Verde Norte-Jataí	127	CS

Legenda: CD = Circuito Duplo, CS = Circuito Simples

Fonte: Adaptado (PSR,2008).

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DO EFEITO FERRANTI

A representação matricial ABCD que será calculada no final das associações de uma linha de transmissão é dada por:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

onde:

- V_S : tensão no início da linha (emissor)
- V_R : tensão no final da linha (receptor)
- I_S : são as correntes no (emissor)
- I_R : são as correntes no (receptor)
- A, B, C, D são parâmetros complexos que caracterizam a linha

Considerando a condição de operação em vazio ($I_R = 0$):

$$I_R = 0 \quad (4.2)$$

Substituindo (4.2) em (4.1):

$$V_S = A \cdot V_R + B \cdot I_R = A \cdot V_R + B \cdot 0 \quad (4.3)$$

$$V_S = A \cdot V_R \quad (4.4)$$

$$I_S = C \cdot V_R + D \cdot I_R = C \cdot V_R + D \cdot 0 \quad (4.5)$$

$$I_S = C \cdot V_R \quad (4.6)$$

Isolando V_R na equação (4.4):

$$V_R = \frac{V_S}{A} \quad (4.7)$$

A relação de tensões é portanto:

$$\frac{V_R}{V_S} = \frac{1}{A} \quad (4.8)$$

Tomando o módulo de ambos os lados:

$$\left| \frac{V_R}{V_S} \right| = \left| \frac{1}{A} \right| = \frac{1}{|A|} \quad (4.9)$$

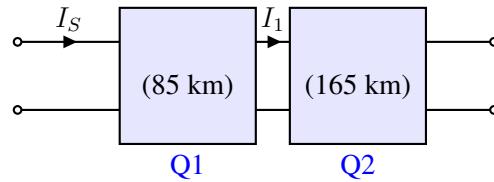
onde $|A|$ é o módulo do parâmetro A :

$$|A| = \sqrt{(\text{Re}(A))^2 + (\text{Im}(A))^2} \quad (4.10)$$

4.3 ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE DAS LINHAS INOCÊNCIA-ILHA SOLTEIRA E CHAPADÃO-INOCÊNCIA

Inicialmente será realizado associação em série das primeiras linhas, os quadripolos Q1 e Q2 são representados na Figura 4.4.

Figura 4.4: Configuração em série dos quadripolos Q1 e Q2



Fonte: Adaptado (PSR,2008).

Utilizando os dados da tabela 4.1 resumi-se os dados na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros das linhas em sequência positiva e zero

Linha	Seq.	Ext. (km)	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B (S)$
Inocência-Ilha Solteira	Positiva	85	3,64	27,12	$j0,000447$
	Zero		63,69	219,71	$j0,00017523$
Chapadão-Inocência	Positiva	165	7,06	52,65	$j0,0008677$
	Zero		123,63	426,49	$j0,00034015$

Fonte: Adaptado (PSR,2008).

A modelagem do Quadripolo para Linhas de Transmissão (Modelo π equivalente) do trecho do circuito de Ilha Solteira a Chapadão representando associação do quadripolo Q1 e Q2. A matriz ABCD para uma linha de transmissão no modelo π equivalente é dada por:

$$\begin{bmatrix} A_{Q_1 Q_2} & B_{Q_1 Q_2} \\ C_{Q_1 Q_2} & D_{Q_1 Q_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z \\ Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix}$$

onde:

- $Z = R + jX$: impedância série da linha.
- $Y = jB$: Admitância shunt da linha (reatância capacitiva).

Linha 1: Inocência-Ilha Solteira

A matriz de parâmetros $ABCD$ para uma linha de transmissão no modelo π nominal substituindo os dados da Tabela 4.2 é dada por:

$$\begin{bmatrix} A_{Q_1} & B_{Q_1} \\ C_{Q_1} & D_{Q_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z \\ Y \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix}$$

Dados os parâmetros:

$$R = 3,64 \Omega, \quad X = 27,12 \Omega, \quad B = 0,0004456 \text{ S}$$

$$Z_1 = R + jX = 3,64 + j27,12 \Omega$$

$$Y_1 = jB = j0,0004456 \text{ S}$$

Cálculo de YZ :

$$\begin{aligned} YZ &= (j0,0004456) \times (3,64 + j27,12) \\ &= j0,0004456 \times 3,64 + j^2 0,0004456 \times 27,12 \\ &= j0,001621984 - 0,012084672 \\ &= -0,012084672 + j0,001621984 \end{aligned}$$

Elementos da matriz:

$$\begin{aligned} A_{Q_1} = D_{Q_1} &= 1 + \frac{YZ}{2} \\ &= 1 + \frac{-0,012084672 + j0,001621984}{2} \\ &= 1 - 0,006042336 + j0,000810992 \\ &= 0,993957664 + j0,000810992 \\ &\approx 0,9939 + j0,0008 \end{aligned}$$

$$B_{Q_1} = Z_1 = 3,64 + j27,12$$

$$\begin{aligned}
C_{Q_1} &= Y_1 \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) \\
\frac{YZ}{4} &= \frac{-0,012084672 + j0,001621984}{4} \\
&= -0,003021168 + j0,000405496 \\
1 + \frac{YZ}{4} &= 0,996978832 + j0,000405496 \\
C_{Q_1} &= (j0,0004456) \times (0,996978832 + j0,000405496) \\
&= j0,0004443 - 0,0000001807 \\
&\approx j0,0004456
\end{aligned}$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} A_{Q_1} & B_{Q_1} \\ C_{Q_1} & D_{Q_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9939 + j0,0008 & 3,64 + j27,12 \\ j0,0004456 & 0,9939 + j0,0008 \end{bmatrix}$$

Linha 2: Chapadão-Inocência

Com os parâmetros:

$$\begin{aligned}
R &= 7,06 \Omega, \quad X = 52,65 \Omega, \quad B = 0,0008578 \text{ S} \\
Z_2 &= 7,06 + j52,65 \Omega \\
Y_2 &= j0,0008578 \text{ S}
\end{aligned}$$

Cálculo análogo:

$$\begin{aligned}
YZ &= (j0,0008578) \times (7,06 + j52,65) \\
&= j0,006055468 - 0,04517057 \\
&= -0,04517057 + j0,006055468
\end{aligned}$$

Elementos da matriz:

$$\begin{aligned}
A_{Q_2} = D_{Q_2} &= 1 + \frac{YZ}{2} \\
&= 1 + \frac{-0,04517057 + j0,006055468}{2} \\
&= 1 - 0,022585285 + j0,003027734 \\
&= 0,977414715 + j0,003027734 \\
&\approx 0,9772 + j0,0038
\end{aligned}$$

$$B_{Q_2} = Z_2 = 7,06 + j52,65$$

$$C_{Q_2} = Y_2 \left(1 + \frac{Y_2 Z_2}{4} \right)$$

$$\begin{aligned} C_{Q_2} &= (j0,0008578) \times (0,9887073575 + j0,001513867) \\ &= j0,0008578 \times 0,9887073575 + j0,0008578 \times j0,001513867 \\ &= j0,000848200 - 0,000001298 \quad (\text{pois } j^2 = -1) \\ &= -0,000001298 + j0,000848200 \end{aligned}$$

$$C_{Q_2} = -0,000001298 + j0,000848200$$

$$C_{Q_2} = Y_2 = j0,0008578$$

A parte real ($-0,000001298$) é desprezível, e a parte imaginária é aproximada para o valor nominal de $Y_2 = j0,0008578$. Resultando em:

$$\begin{bmatrix} A_{Q_2} & B_{Q_2} \\ C_{Q_2} & D_{Q_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9772 + j0,0038 & 7,06 + j52,65 \\ j0,0008578 & 0,9772 + j0,0038 \end{bmatrix}$$

4.3.1 Associação em Série de Q1 e Q2

A matriz equivalente da associação em série é obtida pela multiplicação das matrizes individuais:

$$\begin{bmatrix} A_{Q_1 Q_2} & B_{Q_1 Q_2} \\ C_{Q_1 Q_2} & D_{Q_1 Q_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{Q_1} & B_{Q_1} \\ C_{Q_1} & D_{Q_1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{Q_2} & B_{Q_1 Q_2} \\ C_{Q_2} & C_{Q_1 Q_2} \end{bmatrix}$$

onde:

$$A_{\text{total}} = A_{Q_1} A_{Q_2} + B_{Q_1} C_{Q_2}$$

$$B_{\text{total}} = A_{Q_1} B_{Q_2} + B_{Q_1} D_{Q_2}$$

$$C_{\text{total}} = C_{Q_1} A_{Q_2} + D_{Q_1} C_{Q_2}$$

$$D_{\text{total}} = C_{Q_1} B_{Q_2} + D_{Q_1} D_{Q_2}$$

$$A_{Q_1Q_2} = (0, 9939 + j0, 0008)(0, 9772 + j0, 0038) + (3, 64 + j27, 12)(j0, 0008578)$$

$$A_{Q_1Q_2} = (0, 9710 + j0, 0045) + (-0, 0232 + j0, 0031)$$

$$A_{Q_1Q_2} \approx 0, 9478 + j0, 0076$$

$$B_{Q_1Q_2} = (0, 9939 + j0, 0008)(7, 06 + j52, 65) + (3, 64 + j27, 12)(0, 9772 + j0, 0038)$$

$$B_{Q_1Q_2} = (6, 97 + j52, 32) + (3, 55 + j26, 50)$$

$$B_{Q_1Q_2} \approx 10, 52 + j78, 82$$

$$C_{Q_1Q_2} = (j0, 0004456)(0, 9772 + j0, 0038) + (0, 9939 + j0, 0008)(j0, 0008578)$$

$$C_{Q_1Q_2} = (0, 0000017 + j0, 000435) + (-0, 0000007 + j0, 000852)$$

$$C_{Q_1Q_2} \approx j0, 001287$$

$$C_{Q_1Q_2} = (j0, 0004456)(7, 06 + j52, 65) + (0, 9939 + j0, 0008)(0, 9772 + j0, 0038)$$

$$C_{Q_1Q_2} = (-0, 0235 + j0, 0031) + (0, 9710 + j0, 0045)$$

$$C_{Q_1Q_2} \approx 0, 9475 + j0, 0076$$

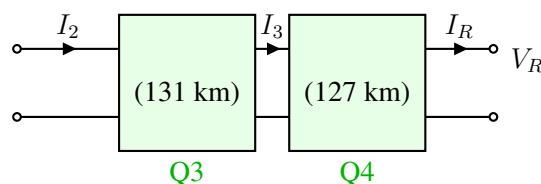
Matriz Total Resultante:

$$\begin{bmatrix} A_{Q_1Q_2} & B_{Q_1Q_2} \\ C_{Q_1Q_2} & C_{Q_1Q_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, 9478 + j0, 0076 & 10, 52 + j78, 82 \\ j0, 001287 & 0, 9475 + j0, 0076 \end{bmatrix}$$

4.4 ASSOCIAÇÃO EM SÉRIE DAS LINHAS CHAPADÃO-JATAÍ E RIO VERDE NORTE-JATAÍ

Inicialmente será realizado associação em série das primeiras linhas representado na figura 4.5.

Figura 4.5: Configuração em série dos quadripolos Q3 e Q4



Fonte: Adaptado (PSR,2008).

Utilizando os dados da tabela 4.1 resumi-se os dados na tabela 4.3::

Tabela 4.3: Parâmetros das linhas em sequência positiva e zero

Linha	Seq.	Ext. (km)	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(S)$
Chapadão-Jataí	Positiva	131	5,61	41,80	$j0,0006889$
	Zero		98,16	338,61	$j0,00027006$
Rio Verde Norte-Jataí	Positiva	127	5,04	43,27	$j0,0006141$
	Zero		51,78	197,04	$j0,00033941$

Fonte: Adaptado (PSR,2008).

Para cada linha, a matriz ABCD foi calculada usando o modelo π nominal representando os quadripolos Q3 e Q4, em seguida substituindo os valores sobrecitados:

$$\begin{bmatrix} A_{Q_3 Q_4} & B_{Q_3 Q_4} \\ C_{Q_3 Q_4} & D_{Q_3 Q_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{4} & Z \\ Y \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix}$$

Linha 3: Chapadão-Jataí

Parâmetros da sequência positiva:

$$Z_3 = R + jX = 5,61 + j41,80 \Omega$$

$$Y_3 = jB = j0,0006889 S$$

Portanto:

$$\begin{aligned} YZ &= (j0,0006889) \times (5,61 + j41,80) \\ &= j0,0006889 \times 5,61 + j^2 0,0006889 \times 41,80 \\ &= j0,003865 - 0,028792 \\ &= -0,028792 + j0,003865 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{Q_3} &= D_{Q_3} = 1 + \frac{YZ}{2} \\ &= 1 + \frac{-0,028792 + j0,003865}{2} \\ &= 1 - 0,014396 + j0,0019325 \\ &= 0,985604 + j0,0019325 \\ &\approx 0,9856 + j0,00193 \end{aligned}$$

$$B_{Q_3} = Z_3 = 5,61 + j41,80$$

$$\begin{aligned}
C_3 &= Y_3 \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) \\
\frac{YZ}{4} &= \frac{-0,028792 + j0,003865}{4} = -0,007198 + j0,00096625 \\
1 + \frac{YZ}{4} &= 0,992802 + j0,00096625 \\
C_3 &= (j0,0006889) \times (0,992802 + j0,00096625) \\
&= j0,0006837 - 0,000000665 \\
&\approx \mathbf{j0,000684}
\end{aligned}$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} A_{Q_3} & B_{Q_3} \\ C_{Q_3} & D_{Q_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9856 + j0,00193 & 5,61 + j41,80 \\ j0,000684 & 0,9856 + j0,00193 \end{bmatrix}$$

Linha 4: Rio Verde Norte-Jataí

Parâmetros da sequência positiva:

$$Z_4 = 5,04 + j43,27 \Omega$$

$$Y_4 = j0,0006141 \text{ S}$$

Cálculo da matriz ABCD:

$$\begin{aligned}
YZ &= (j0,0006141) \times (5,04 + j43,27) \\
&= j0,0006141 \times 5,04 + j^2 0,0006141 \times 43,27 \\
&= j0,003095 - 0,026581 \\
&= -0,026581 + j0,003095
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{Q_4} = D_{Q_4} &= 1 + \frac{YZ}{2} \\
&= 1 + \frac{-0,026581 + j0,003095}{2} \\
&= 1 - 0,0132905 + j0,0015475 \\
&= 0,9867095 + j0,0015475 \\
&\approx 0,9867 + j0,00155
\end{aligned}$$

$$B_{Q_4} = Z = 5,04 + j43,27$$

$$\begin{aligned}
 C_4 &= Y_4 \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) \\
 \frac{YZ}{4} &= \frac{-0,026581 + j0,003095}{4} = -0,00664525 + j0,00077375 \\
 1 + \frac{YZ}{4} &= 0,99335475 + j0,00077375 \\
 C_4 &= (j0,0006141) \times (0,99335475 + j0,00077375) \\
 &= j0,0006100 - 0,000000475 \\
 &\approx \mathbf{j0,000610}
 \end{aligned}$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} A_{Q_4} & B_{Q_4} \\ C_{Q_4} & D_{Q_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9867 + j0,00155 & 5,04 + j43,27 \\ j0,000610 & 0,9867 + j0,00155 \end{bmatrix}$$

4.4.1 Associação em Série de Q3 e Q4

A matriz equivalente da associação em série é obtida pela multiplicação das matrizes individuais:

$$\begin{bmatrix} A_{Q_3Q_4} & B_{Q_3Q_4} \\ C_{Q_3Q_4} & D_{Q_3Q_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{Q_3} & B_{Q_3} \\ C_{Q_3} & D_{Q_3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{Q_4} & B_{Q_4} \\ C_{Q_4} & D_{Q_4} \end{bmatrix}$$

onde:

$$\begin{aligned}
 A_{Q_3Q_4} &= A_{Q_3}A_{Q_4} + B_{Q_3}C_{Q_4} \\
 B_{Q_3Q_4} &= A_{Q_3}B_{Q_4} + B_{Q_3}D_{Q_4} \\
 C_{Q_3Q_4} &= C_{Q_3}A_{Q_4} + D_{Q_3}C_{Q_4} \\
 D_{Q_3Q_4} &= C_{Q_3}B_{Q_4} + D_{Q_3}D_{Q_4}
 \end{aligned}$$

4.4.2 Cálculos

$$A_{Q_3Q_4} = (0, 9856 + j0, 00193)(0, 9867 + j0, 00155) + (5, 61 + j41, 80)(j0, 000610)$$

$$A_{Q_3Q_4} \approx 0, 947 + j0, 00685$$

$$B_{Q_3Q_4} = (0, 9856 + j0, 00193)(5, 04 + j43, 27) + (5, 61 + j41, 80)(0, 9867 + j0, 00155)$$

$$B_{Q_3Q_4} \approx 10, 35 + j83, 89$$

$$C_{Q_3Q_4} = (j0, 000684)(0, 9867 + j0, 00155) + (0, 9856 + j0, 00193)(j0, 000610)$$

$$C_{Q_3Q_4} \approx j0, 00128$$

$$D_{Q_3Q_4} = (j0, 000684)(5, 04 + j43, 27) + (0, 9856 + j0, 00193)(0, 9867 + j0, 00155)$$

$$D_{Q_3Q_4} \approx 0, 943 + j0, 00688$$

4.4.3 Matriz Total Resultante

A matriz final é obtida pela multiplicação das matrizes equivalentes:

$$\begin{bmatrix} A_{\text{final}} & B_{\text{final}} \\ C_{\text{final}} & D_{\text{final}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{Q_1Q_2} & B_{Q_1Q_2} \\ C_{Q_1Q_2} & D_{Q_1Q_2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_{Q_3Q_4} & B_{Q_3Q_4} \\ C_{Q_3Q_4} & D_{Q_3Q_4} \end{bmatrix}$$

Organizando os quadripolos:

Submatriz Total (Q1xQ2): Resultado da associação série das linhas 1 e 2

$$\begin{bmatrix} A_{Q_1Q_2} & B_{Q_1Q_2} \\ C_{Q_1Q_2} & D_{Q_1Q_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, 9478 + j0, 0076 & 10, 52 + j78, 82 \\ j0, 001287 & 0, 9475 + j0, 0076 \end{bmatrix}$$

Submatriz Total (Q3xQ4): Resultado da associação série das linhas 3 e 4

$$\begin{bmatrix} A_{Q_3Q_4} & B_{Q_3Q_4} \\ C_{Q_3Q_4} & D_{Q_3Q_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0, 947 + j0, 00685 & 10, 35 + j83, 89 \\ j0, 00128 & 0, 943 + j0, 00688 \end{bmatrix}$$

A matriz final é obtida pela multiplicação das matrizes equivalentes Total(Q1xQ2) e Total(Q3xQ4), conforme a operação:

Cálculo das matrizes Total($Q_1 \times Q_2$) \times Total($Q_3 \times Q_4$)

As matrizes fornecidas são:

$$\text{Total}(Q_1 \times Q_2) = \begin{bmatrix} 0, 9478 + j0, 0076 & 10, 52 + j78, 82 \\ j0, 001287 & 0, 9475 + j0, 0076 \end{bmatrix}$$

$$\text{Total}(Q_3 \times Q_4) = \begin{bmatrix} 0,947 + j0,00685 & 10,50 + j83,86 \\ j0,00128 & 0,943 + j0,00688 \end{bmatrix}$$

A matriz produto é calculada como:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} A_f & B_f \\ C_f & D_f \end{bmatrix}$$

onde:

- $A_f = A_{Q_1Q_2} \cdot A_{Q_3Q_4} + B_{Q_1Q_2} \cdot C_{Q_3Q_4}$
- $B_f = A_{Q_1Q_2} \cdot B_{Q_3Q_4} + B_{Q_1Q_2} \cdot D_{Q_3Q_4}$
- $C_f = C_{Q_1Q_2} \cdot A_{Q_3Q_4} + D_{Q_1Q_2} \cdot C_{Q_3Q_4}$
- $D_f = C_{Q_1Q_2} \cdot B_{Q_3Q_4} + D_{Q_1Q_2} \cdot D_{Q_3Q_4}$

Cálculo dos elementos:

Elemento A_f $= A_{Q_1Q_2} \cdot A_{Q_3Q_4} + B_{Q_1Q_2} \cdot C_{Q_3Q_4}$

Termo 1: $(0,9478 + j0,0076)(0,947 + j0,00685)$

$$\begin{aligned} &= 0,9478 \times 0,947 + 0,9478 \times j0,00685 \\ &\quad + j0,0076 \times 0,947 + j0,0076 \times j0,00685 \\ &= 0,8976 + j0,0065 + j0,0072 - 0,0001 \\ &= 0,8975 + j0,0137 \end{aligned}$$

Termo 2: $(10,52 + j78,82)(j0,00128)$

$$\begin{aligned} &= 10,52 \times j0,00128 + j78,82 \times j0,00128 \\ &= j0,0135 - 0,1009 \end{aligned}$$

Soma:

$$\begin{aligned} &(0,8975 - 0,1009) + j(0,0137 + 0,0135) \\ &= 0,7966 + j0,0272 \end{aligned}$$

Resultado: $\boxed{A_f = 0,7966 + j0,0272}$

Elemento $B_f = A_{Q_1 Q_2} \cdot B_{Q_3 Q_4} + B_{Q_1 Q_2} \cdot D_{Q_3 Q_4}$

Termo 1: $(0, 9478 + j0, 0076)(10, 50 + j83, 86)$

$$\begin{aligned}
 &= 0, 9478 \times 10, 50 + 0, 9478 \times j83, 86 \\
 &\quad + j0, 0076 \times 10, 50 + j0, 0076 \times j83, 86 \\
 &= 9, 9519 + j79, 4825 + j0, 0798 - 0, 6373 \\
 &= 9, 3146 + j79, 5623
 \end{aligned}$$

Termo 2: $(10, 52 + j78, 82)(0, 943 + j0, 00688)$

$$\begin{aligned}
 &= 10, 52 \times 0, 943 + 10, 52 \times j0, 00688 \\
 &\quad + j78, 82 \times 0, 943 + j78, 82 \times j0, 00688 \\
 &= 9, 9204 + j0, 0724 + j74, 3253 - 0, 5423 \\
 &= 9, 3781 + j74, 3977
 \end{aligned}$$

Soma:

$$\begin{aligned}
 &(9, 3146 + 9, 3781) + j(79, 5623 + 74, 3977) \\
 &= 18, 6927 + j153, 9600
 \end{aligned}$$

Resultado: $B_f = 18, 6927 + j153, 9600$

Elemento $C_f = C_{Q_1 Q_2} \cdot A_{Q_3 Q_4} + D_{Q_1 Q_2} \cdot C_{Q_3 Q_4}$

Termo 1: $(j0, 001287)(0, 947 + j0, 00685)$

$$\begin{aligned}
 &= j0, 001287 \times 0, 947 + j0, 001287 \times j0, 00685 \\
 &= j0, 001219 - 0, 0000088
 \end{aligned}$$

Termo 2: $(0, 9475 + j0, 0076)(j0, 00128)$

$$\begin{aligned}
 &= 0, 9475 \times j0, 00128 + j0, 0076 \times j0, 00128 \\
 &= j0, 0012128 - 0, 0000097
 \end{aligned}$$

Soma:

$$\begin{aligned}
 &[-0, 0000088 - 0, 0000097] + j[0, 001219 + 0, 0012128] \\
 &= -0, 0000185 + j0, 0024318
 \end{aligned}$$

Resultado: $D_f = j0,002432$

Elemento $D_f = C_{Q_1Q_2} \cdot B_{Q_3Q_4} + D_{Q_1Q_2} \cdot D_{Q_3Q_4}$

Termo 1: $(j0,001287)(10,50 + j83,86)$

$$\begin{aligned} &= j0,001287 \times 10,50 + j0,001287 \times j83,86 \\ &= j0,0135135 - 0,1079188 \end{aligned}$$

Termo 2: $(0,9475 + j0,0076)(0,943 + j0,00688)$

$$\begin{aligned} &= 0,9475 \times 0,943 + 0,9475 \times j0,00688 \\ &\quad + j0,0076 \times 0,943 + j0,0076 \times j0,00688 \\ &= 0,8934 + j0,006518 + j0,0071668 - 0,0000523 \\ &= 0,8934 + j0,0136848 \end{aligned}$$

Soma:

$$\begin{aligned} &(-0,1079188 + 0,8934) + j(0,0135135 + 0,0136848) \\ &= 0,7854812 + j0,0271983 \end{aligned}$$

Resultado: $D_f = 0,7855 + j0,0272$

Matriz resultante:

$$\begin{bmatrix} A_f & B_f \\ C_f & D_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,7966 + j0,0272 & 18,6927 + j153,9600 \\ j0,002432 & 0,7855 + j0,0272 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Tensão nominal da linha: $V_{\text{nominal}} = 230 \text{ kV}$

Cálculos Detalhados:

1. **Módulo do elemento A:**

$$\begin{aligned} |A| &= \sqrt{\operatorname{Re}(A)^2 + \operatorname{Im}(A)^2} \\ &= \sqrt{(0,7966)^2 + (0,0272)^2} \\ &= \sqrt{0,63464356 + 0,00073984} \\ &= \sqrt{0,6353834} = 0,7971 \end{aligned}$$

2. Fator Ferranti (relação de tensões):

$$\left| \frac{V_R}{V_S} \right| = \frac{1}{|A|} = \frac{1}{0,7971} = 1,2545$$

3. Sobretensão percentual:

$$\%_{\text{sobretensão}} = (1,2545 - 1) \times 100\% = 25,45\%$$

4. Tensão resultante no final da linha:

$$\begin{aligned} V_R &= \left(\frac{1}{|A|} \right) \times V_S \\ &= 1,2545 \times V_{\text{nominal}} \\ &= 1,2545 \times 230 \text{ kV} \\ &= 288,535 \text{ kV} \end{aligned}$$

Interpretação Física:

- Efeito:** A tensão no receptor é **25,45% superior** à tensão no emissor quando a linha opera em vazio ($I_R = 0$)
- Valor calculado:** $V_R = 288,535 \text{ kV}$ para $V_S = 230 \text{ kV}$
- Causa principal:** Alta capacidade shunt ($C = j0,002432 \text{ S}$) que gera corrente reativa capacitiva
- Fator agravante:** Baixa magnitude de A ($|A| = 0,7971 < 1$) típica de linhas longas

Fatores que Influenciam o Efeito:

Tabela 4.4: Variáveis que impactam o Efeito Ferranti

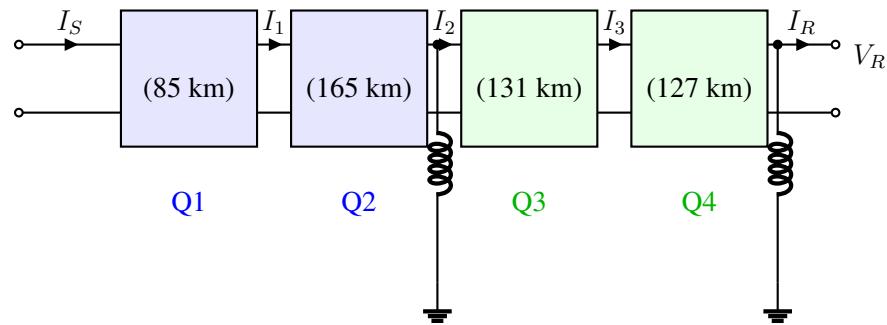
Parâmetro	Valor	Efeito no Ferranti
$A = 0,7966 + j0,0272$	$ A = 0,7971$	Magnitude baixa (↑ sobretensão)
$C = j0,002432 \text{ S}$	$ C = 0,002432 \text{ S}$	Alta susceptância (↑ efeito)
$B = 18,6927 + j153,9600 \Omega$	$ B = 155,08 \Omega$	Impedância série mantém fenômeno
Comprimento equivalente	$\approx 500 \text{ km}$	Linha longa (↑ efeito)

Fonte: Autor.

4.5 DIMENSIONAMENTO DOS REATORES

Para que o efeito capacitivo não se torne um problema é necessário a inserção de reatores shunt no sistema para que injete carga indutiva na rede, balanceando a carga. Para esse dimensionamento será considera apenas o circuito do quadripolo. Para essa correção a configuração escolhida é a inserção do conjunto de reatores com compensação nos pontos que pode ser observado na Figura 4.6.

Figura 4.6: Configuração em série dos quadripolos Q1 a Q4 com reatores shunt



Fonte: Autor.

Para mitigar o Efeito Ferranti, foram dimensionados reatores indutivos de derivação. O cálculo exato da potência reativa necessária resultou em:

Calculo do Reator

Passo 1: Relação de tensões em vazio Para uma linha de transmissão operando em vazio ($I_R = 0$), a relação entre as tensões no emissor (V_S) e receptor (V_R) é dada por:

$$V_S = A_f \cdot V_R \quad (4.12)$$

onde A_f é o parâmetro complexo da matriz ABCD.

Passo 2: Condição de compensação ideal Para eliminar a sobretensão ($V_R = V_S$), a admittância do reator shunt (Y_L) deve satisfazer, de acordo com Fuchs (1977, p. 240):

$$Y_L = \frac{1 - A_f}{B_f} \quad (4.13)$$

onde B_f é o parâmetro complexo da matriz ABCD.

Passo 3: Susceptância indutiva Separando em passo a passo:

a) Calcular $1 - A_f$:

$$1 - A_f = (1 - 0.7966) - j0.0272 = 0.2034 - j0.0272$$

b) Dividir pelo complexo B_f :

$$\dot{Y} = \frac{0.2034 - j0.0272}{18.6927 + j153.9600}$$

c) Multiplicar pelo conjugado do denominador:

Conjugado: $18.6927 - j153.9600$

Numerador: $(0.2034 - j0.0272)(18.6927 - j153.9600)$

$$\begin{aligned} &= 0.2034 \times 18.6927 = 3.802 \\ &= 0.2034 \times (-j153.9600) = -j31.34 \\ &= -j0.0272 \times 18.6927 = -j0.508 \\ &= (-j0.0272) \times (-j153.9600) = j^2 \times 4.186 = -4.186 \end{aligned}$$

Soma: $(3.802 - 4.186) + j(-31.34 - 0.508) = -0.384 - j31.848$

d) Denominador:

$$|B_f|^2 = (18.6927)^2 + (153.9600)^2 = 349.38 + 23702.16 = 24051.54$$

e) Resultado final:

$$\dot{Y} = \frac{-0.384 - j31.848}{24051.54} = -0.00001597 - j0.001324$$

f) Potência reativa capacitiva Q_C

$$Q_C = V^2 \cdot |\text{Im}(\dot{Y})| = (230 \times 10^3)^2 \times 0.001324 = 69.78 \text{Mvar}$$

Valor 69,78 Mvar: potência reativa indutiva total necessária por rede de transmissão (circuito duplo) para neutralizar a capacidade parasita.

A equação fornece o valor exato da potência reativa necessária considerando: Distribuição uniforme dos parâmetros elétricos ao longo da linha; Efeitos das impedâncias série e admitâncias shunt; Condição de compensação ideal ($V_R = V_S$ em vazio)

A reatância indutiva total equivalente é:

$$X_L = \frac{V_{\text{nominal}}^2}{Q_L} = \frac{(230 \times 10^3)^2}{69.78 \times 10^6} = 758.1 \Omega \quad (4.14)$$

Configuração proposta para 4 redes:

- Dois reatores uma para cada circuito de 34.89 Mvar na subestação de Inocência
- Dois reatores uma para cada circuito de 34.89 Mvar na subestação de Chapadão

- Dois reatores uma para cada circuito de 34.89 Mvar na subestação de Jataí
- Dois reatores uma para cada circuito de 34.89 Mvar na subestação de Rio Verde

Tabela 4.5: Especificações dos reatores shunt

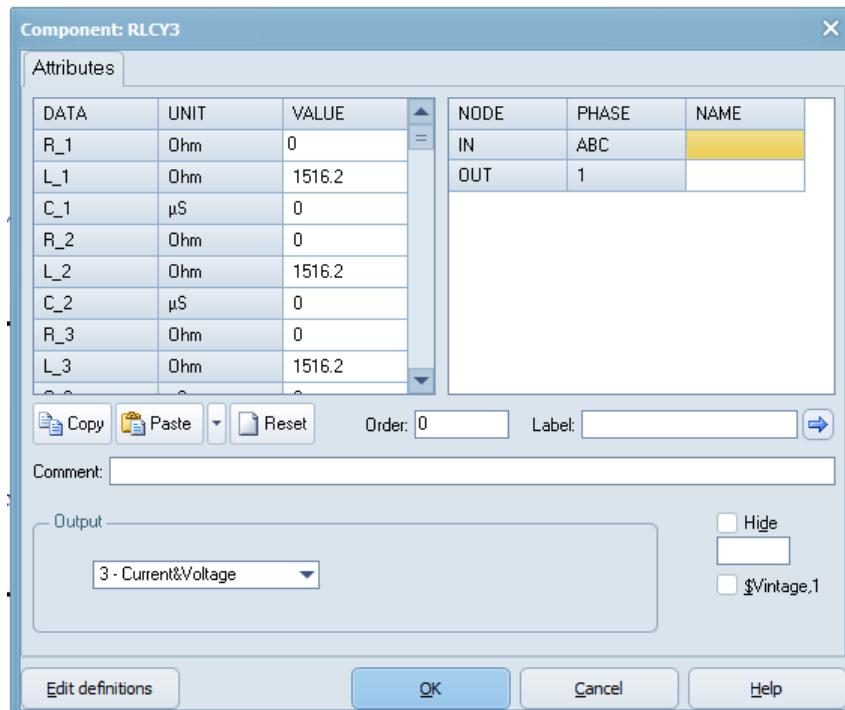
Parâmetro	Unidade	Reator 34.89 Mvar
Tensão nominal	kV	230
Potência reativa	Mvar	34,89
Reatância indutiva	Ω	1516,2
Corrente nominal	A	151,7
Conexão	-	Estrela
Localização	-	Todas as subestações

Fonte: Autor.

Detalhamento do sistema:

- **Total de reatores:** 4 unidades
- **Potência reativa total instalada:** $4 \times 34,89 = 139,56$ Mvar
- **Compensação por subestação:** $2 \times 34,89 = 69,78$ Mvar

Figura 4.7: Configuração reator 34,89Mvar



Fonte: Autor.

Resultados esperados:

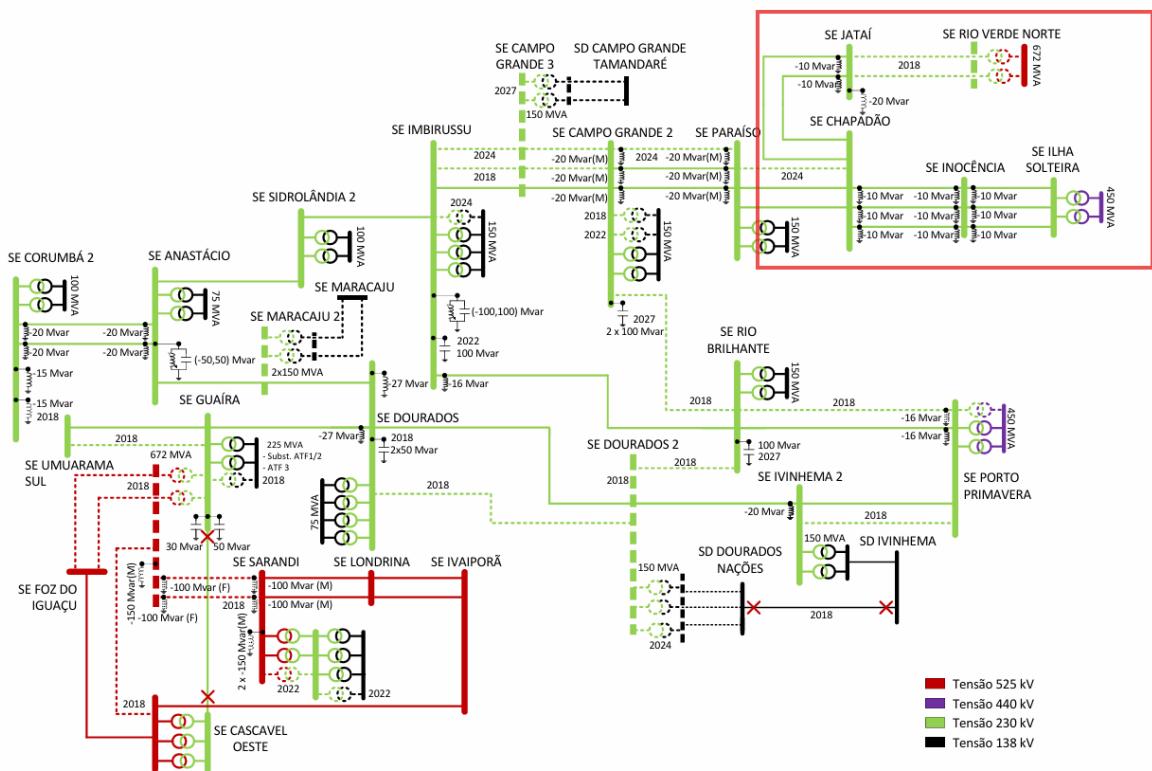
- Tensão no receptor estabilizada em 230 kV
- Eliminação da sobretensão de 25.45%
- Fator Ferranti pós-compensação: $|V_R/V_S| \approx 1$

Com base neste cálculo, optou-se pela instalação de t.

4.6 SIMULAÇÕES ATPDRAW (CENÁRIO REAL)

Atualmente a configuração do sistema consiste no fluxograma apresentado a seguir na Figura 4.8.

Figura 4.8: Cenário real



Fonte: (EPE, 2015).

Portanto, pode-se verificar que o sistema é composto por quatro reatores de 10Mvar e outro de 20Mvar, totalizando 60 Mvar por circuito. Para a configuração atual na Tabela 4.6 é demonstrado os valores dos reatores da linha. A seguir pode-se pontuar quantitativamente os reatores de acordo com a Figura 4.8:

- Dois reatores na subestação de 10 Mvar na subestação de Inocência.

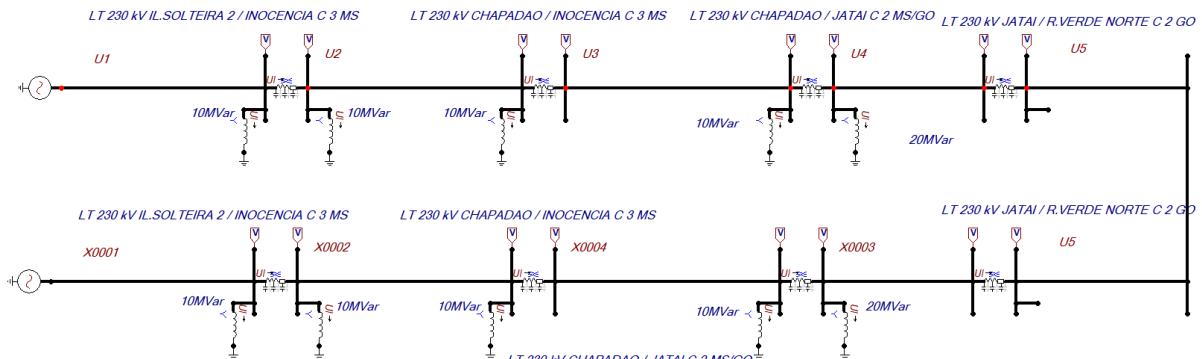
- Um reator na subestação de 10 Mvar na subestação de Chapadão.
- Um reator na subestação de 10 Mvar na subestação de Jataí.
- Um reator na subestação de 20 Mvar na subestação de Jataí.

Tabela 4.6: Especificações dos reatores *shunt*

Parâmetro	Unidade	Reator 10 Mvar	Reator 20 Mvar
Tensão nominal	kV	230	230
Potência reativa	Mvar	10	20
Reatância indutiva	Ω	5290	2645
Corrente nominal	A	43,48	86,96
Conexão	-	Estrela	Estrela
Localização	-	Inocência/Chapadão	Jataí

Fonte: Autor.

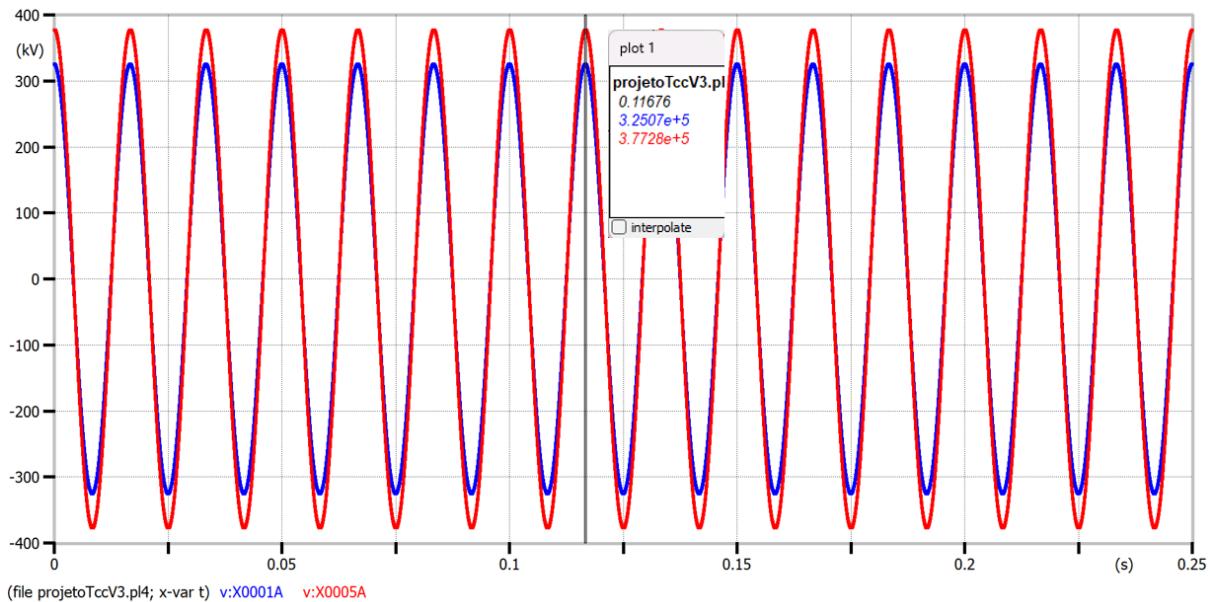
Figura 4.9: Circuito real simulado



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 4.9, o circuito foi modelado com base nas informações fornecidas pela EPE (2016). Observa-se, na Figura 4.10, a ocorrência de uma sobretensão quando o circuito é alimentado diretamente por esses ramais. Tal condição representa um cenário limitante, pois restringe as possibilidades de manobras operacionais no sistema.

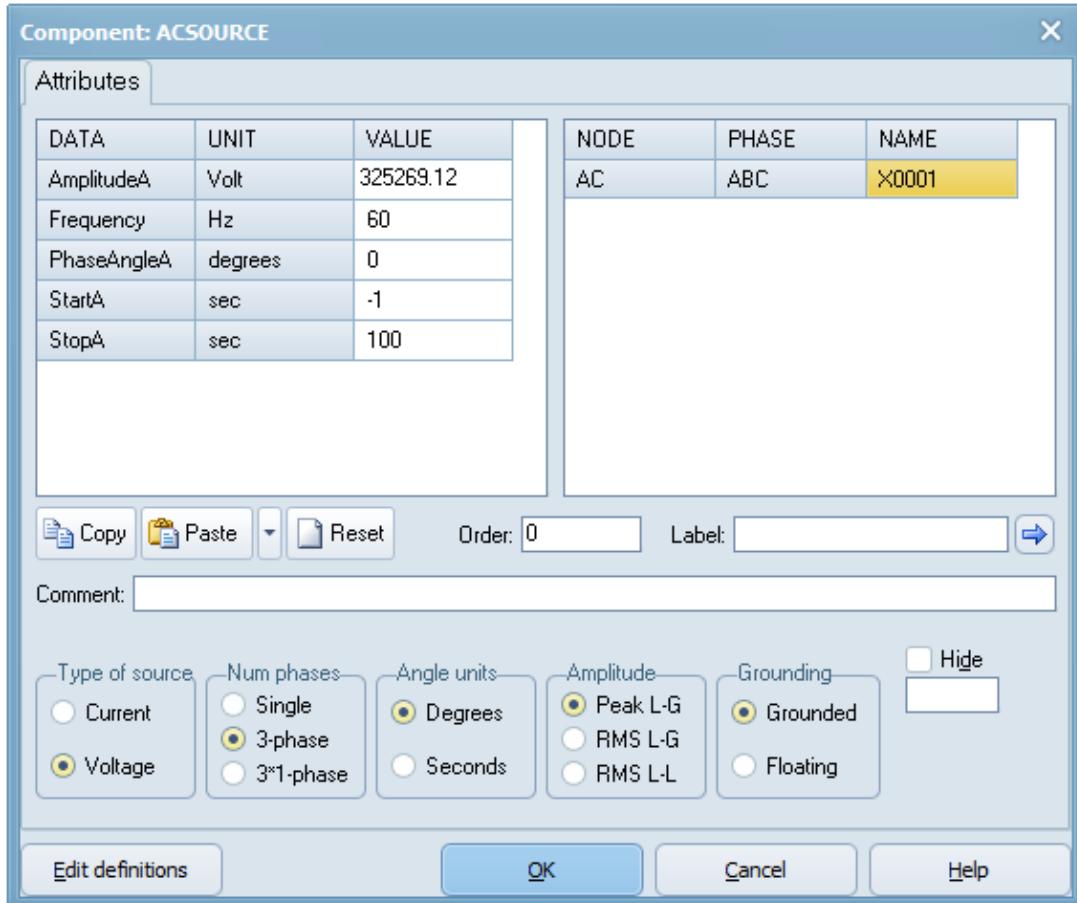
Figura 4.10: Circuito real



Fonte: Autor.

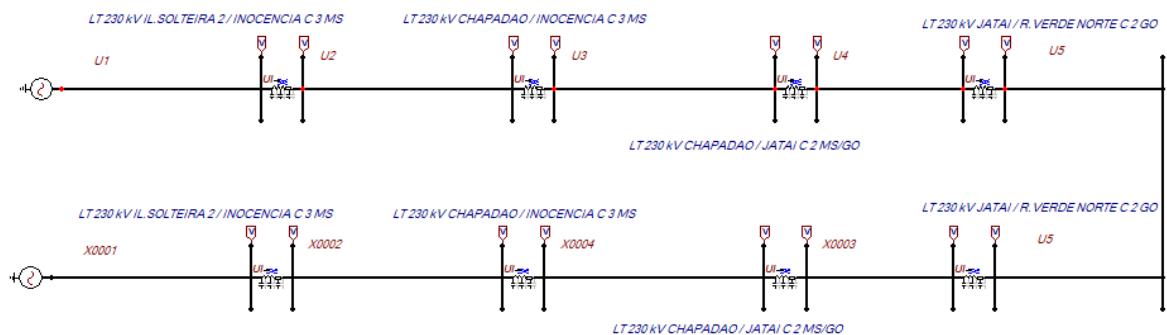
4.7 SIMULAÇÕES ATPDRAW (CENÁRIO 1) SEM CORREÇÃO DOS REATORES

Para as simulações considera-se as redes apresentadas no capítulo 3. Para essa configuração e melhor visualização será utilizado a fonte trifásica para representação de apenas um circuito da rede.

Figura 4.11: Fonte

Fonte: Autor.

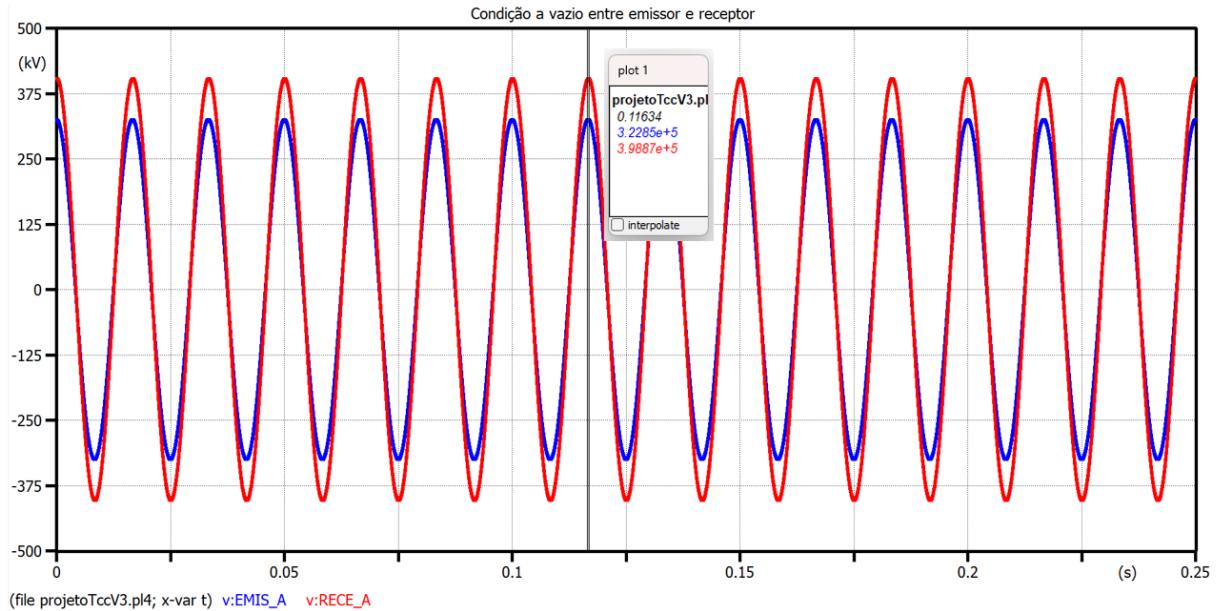
De acordo com os circuitos da rede apresentados, a mesma é mostrada na Figura 4.12 e a configuração da sua fonte de tensão é ilustrada na Figura 4.11.

Figura 4.12: Circuito completo da rede

Fonte: Autor.

Na Figura 4.13, U1 é a tensão na fase A do circuito e U5 é o valor no receptor à varídio. É verificado que o valor da sobretensão é de aproximadamente 408,05kV, 99,8% do valor calculado pela associação de cascata.

Figura 4.13: Emissor e receptor a vazio



Fonte: Autor.

4.8 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES (CENÁRIO 2) COM COMPENSAÇÃO DOS REATORES

Com a alocação dos reatores de acordo com a Figura 4.6, a configuração da rede ficou como o apresentado na Figura 4.12. Os resultados obtidos com a inserção dos reatores podem ser vistos na Figura 4.13.

Figura 4.14: Linha com os reatores inseridos

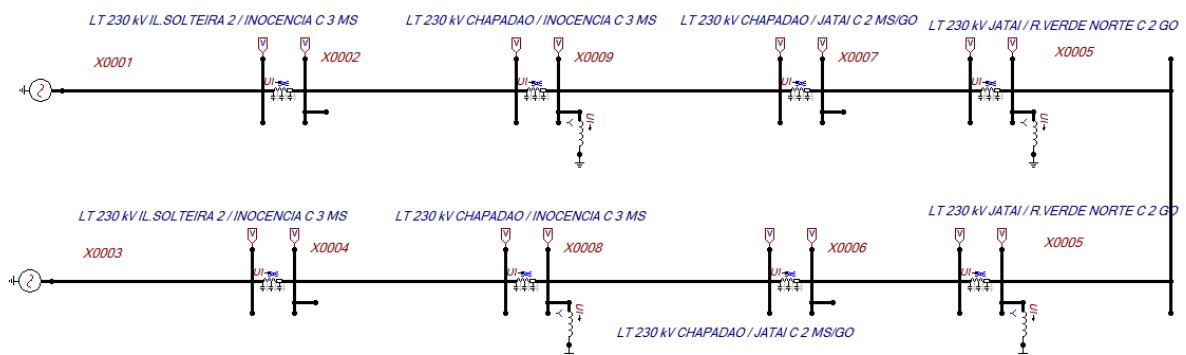
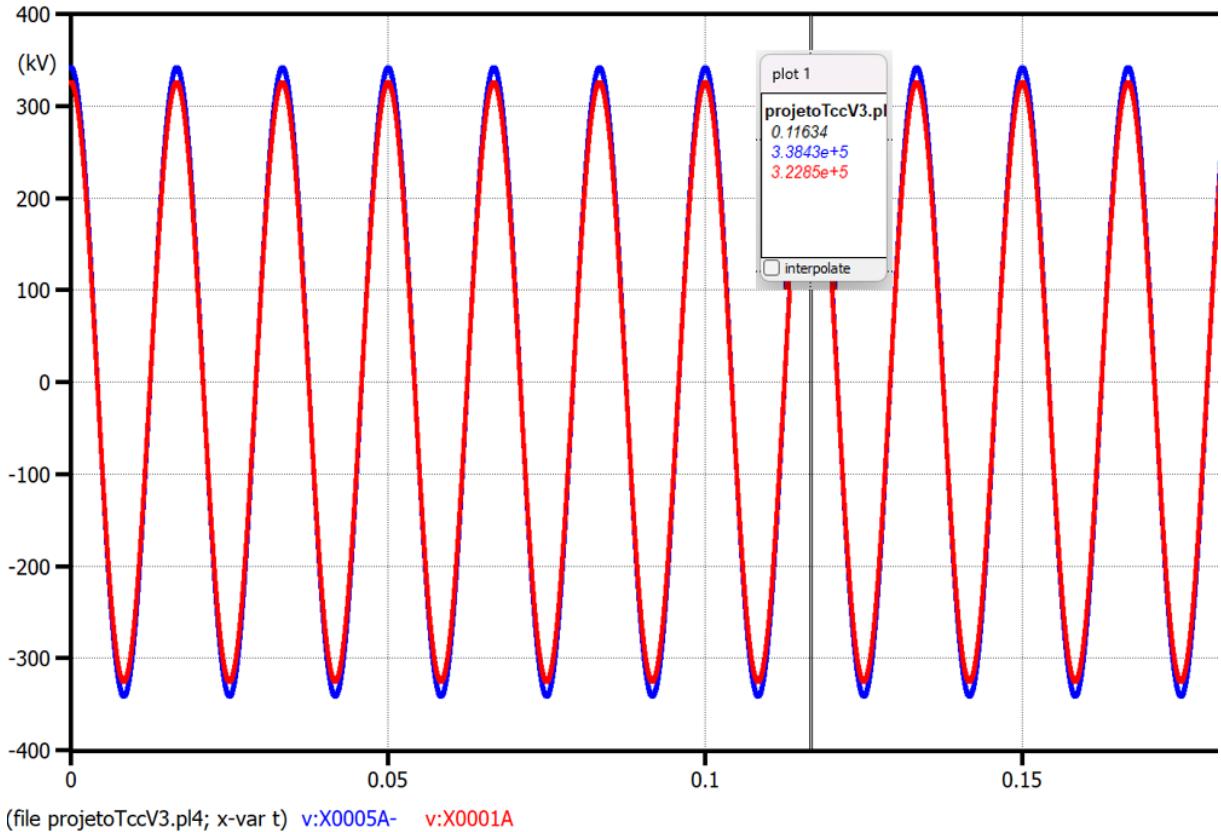


Figura 4.15: Tensão emissor x recepto depois da correção



Fonte: Autor.

A tensão final ficou em 338,43KV. Portanto, verifica-se que a Correção atende às normas estabelecidas pela ONS referentes aos valores de tensão na Tabela 4.7 é mostrado a diferença nas simulações sem, com a compensação dos reatores e a situação atual da linha.

A Tabela 4.7 resume a comparação entre os dois cenários:

Tabela 4.7: Comparaçao entre os cenários com e sem compensação

Cenário	Tensão Final (kV)	Diferença (%)
Circuito instalado	375,19	13,3
Sem compensação	408	20,3
Com compensação	321,48	-1,01
Com compensação e carga	305,69	-5,6

Fonte: Autor.

4.9 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES (CENÁRIO 3) COM COMPENSAÇÃO DOS REATORES SURGERIDOS E COM CARGA

A seguir segue a modelagem de uma carga para simulação da rede para um transformador de 225 MVA:

A carga nominal é determinada pela capacidade do transformador e fator de potência típico de sistemas de transmissão:

Parâmetros Fundamentais:

$$S = 225 \text{ MVA} \quad (\text{Potência aparente nominal})$$

$$V_{LL} = 230 \text{ kV} \quad (\text{Tensão fase-fase})$$

$$fp = 0.95 \quad (\text{Fator de potência atrasado})$$

Cálculo da Carga Ativa e Reativa:

$$P = S \times fp = 225 \times 0.95 = 213.75 \text{ MW}$$

$$Q = S \times \sin(\cos^{-1}(fp)) = 225 \times \sin(18.19^\circ) = 70.13 \text{ Mvar}$$

Parâmetros por Fase

$$V_{LN} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.79 \text{ kV}$$

$$P_\phi = \frac{213.75}{3} = 71.25 \text{ MW}$$

$$Q_\phi = \frac{70.13}{3} = 23.38 \text{ Mvar}$$

Cálculo da Admitância:

$$|S_\phi| = \sqrt{P_\phi^2 + Q_\phi^2} = \sqrt{71.25^2 + 23.38^2} = 75 \text{ MVA}$$

$$|Y| = \frac{|S_\phi|}{V_{LN}^2} = \frac{75 \times 10^6}{(132.79 \times 10^3)^2} = 4.252 \text{ mS}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{Q_\phi}{P_\phi} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{23.38}{71.25} \right) = 18.19^\circ$$

$$G = |Y| \cos \theta = 4.252 \times 10^{-3} \times \cos(18.19^\circ) = 4.04 \text{ mS}$$

$$B = |Y| \sin \theta = 4.252 \times 10^{-3} \times \sin(18.19^\circ) = 1.326 \text{ mS}$$

4.9.1 Conversão para Elementos R e L

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{4.04 \times 10^{-3}} = 247.52 \Omega$$

$$X_L = \frac{1}{B} = \frac{1}{1.326 \times 10^{-3}} = 754.15 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{754.15}{2\pi \times 60} = 2.00 \text{ H} \quad (\text{Opcional})$$

4.10 CONFIGURAÇÃO ATPDRAW RLCY3

O componente RLCY3 é um elemento fundamental no ATPDraw para modelagem de cargas trifásicas equilibradas ou desequilibradas. Este documento detalha seu funcionamento, parâmetros de configuração e aplicação prática.

4.11 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

- **Tipo:** Ramo RLC trifásico com acoplamento em estrela (Y)
- **Conectividade:**
 - IN: Nó trifásico (3 fases)
 - OUT: Nó monofásico (neutro/terra)
- **Independência:** Valores podem ser diferentes por fase
- **Referência:** RuleBook IV.A (elementos concentrados)

4.12 PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO

Os parâmetros podem ser inseridos em dois formatos, conforme definido em ATP | Settings/Simulation:

4.13 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para cada fase k ($k = 1, 2, 3$), a impedância série é dada por:

$$Z_k = R_k + j \left(\underbrace{\omega L_k}_{X_{L_k}} - \underbrace{\frac{1}{\omega C_k}}_{X_{C_k}} \right)$$

Onde $\omega = 2\pi f$ ($f = 60 \text{ Hz}$ para sistemas brasileiros).

4.14 VERIFICAÇÃO DE POTÊNCIA

Para a carga de 213.75 MW + j70.13 MVAr:

$$V_{fn} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 132.79 \text{ kV}$$

$$|Z_k| = \sqrt{247.52^2 + 754.15^2} = 759.08 \Omega$$

$$I_k = \frac{V_{fn}}{|Z_k|} = \frac{132.79 \times 10^3}{759.08} = 174.96 \text{ A}$$

$$S_k = V_{fn} \cdot I_k = 23.23 \text{ MW} + j71.25 \text{ MVAr}$$

$$S_{\text{total}} = 3 \times (23.23 \text{ MW} + j71.25 \text{ MVAr}) = 69.69 \text{ MW} + j213.75 \text{ MVAr}$$

4.15 VANTAGENS E LIMITAÇÕES

Tabela 4.8: Comparação de características

Vantagens	Limitações
Modela cargas de impedância constante	Potência varia com V^2
Flexibilidade para assimetrias	Cálculos complexos
Ideal para estudos de harmônicos	Menos intuitivo que modelo "Load"

4.15.1 Parâmetros de Configuração

Tabela 4.9: Configuração do componente Load

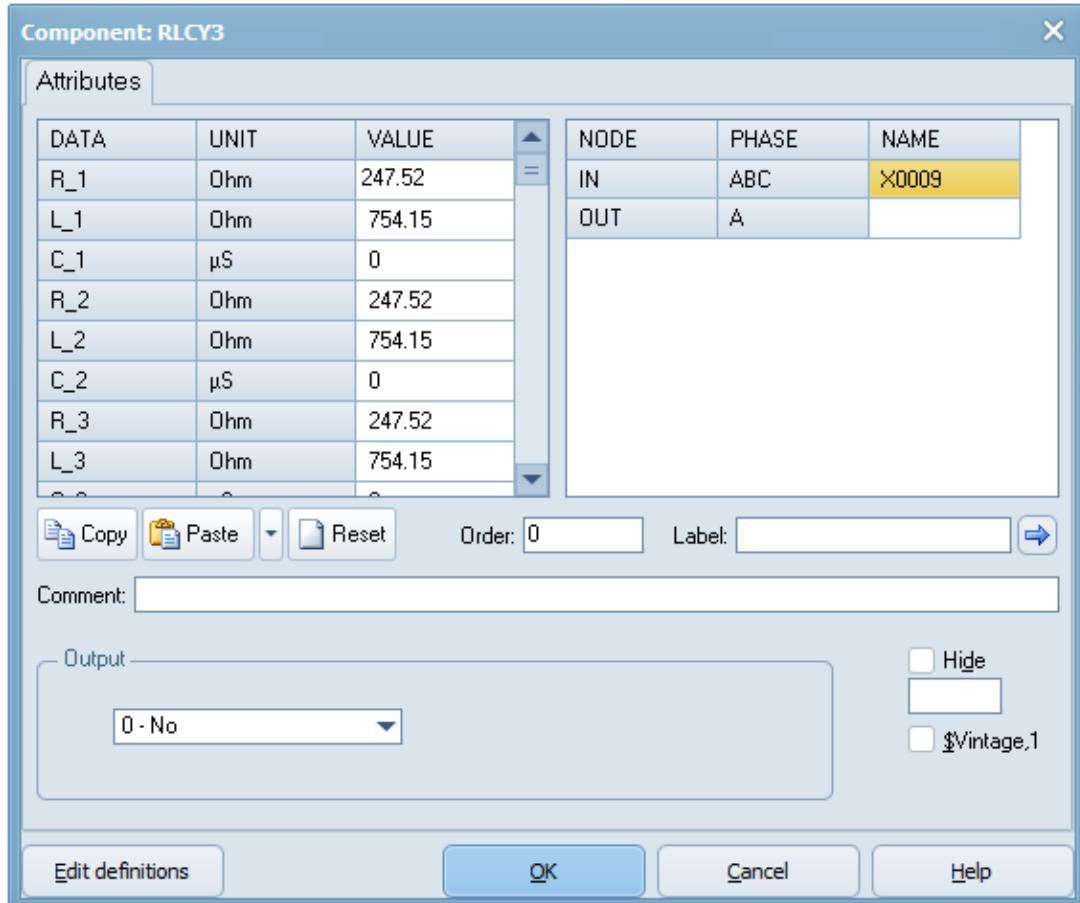
Parâmetro	Valor	Descrição
Tensão	230 kV	Tensão nominal fase-fase
P	213.75 MW	Potência ativa total
Q	70.13 MVAr	Potência reativa total
Conexão	Y	Configuração estrela
Tipo	Constant PQ	Modelo de potência constante

- O modelo **RLC** é adequado para cargas de **impedância constante**, onde a potência varia quadraticamente com a tensão
- O componente **Load** (Constant PQ) é preferível para estudos de fluxo de carga, mantendo potência constante independente da tensão

- Para a carga nominal de 213.75 MW + j70.13 MVar, ambas as modelagens são válidas, com escolha dependendo do objetivo da simulação

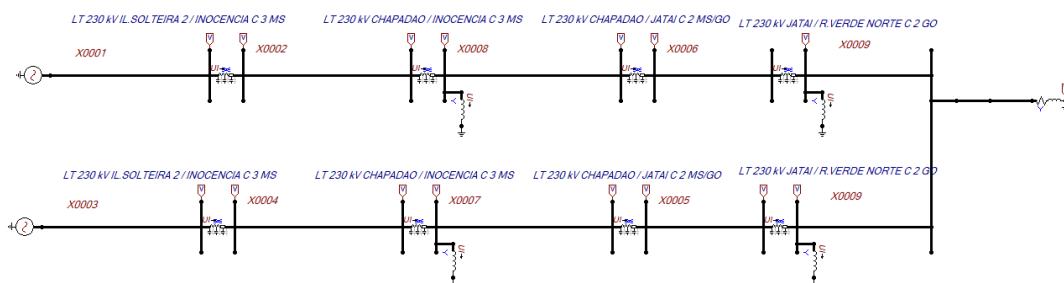
A seguir tem-se a configuração da carga Figura 4.16 e na Figura ?? a carga instalada. Em seguida verifica-se a saída após a carga na Figura 4.18.

Figura 4.16: Carga do sistema



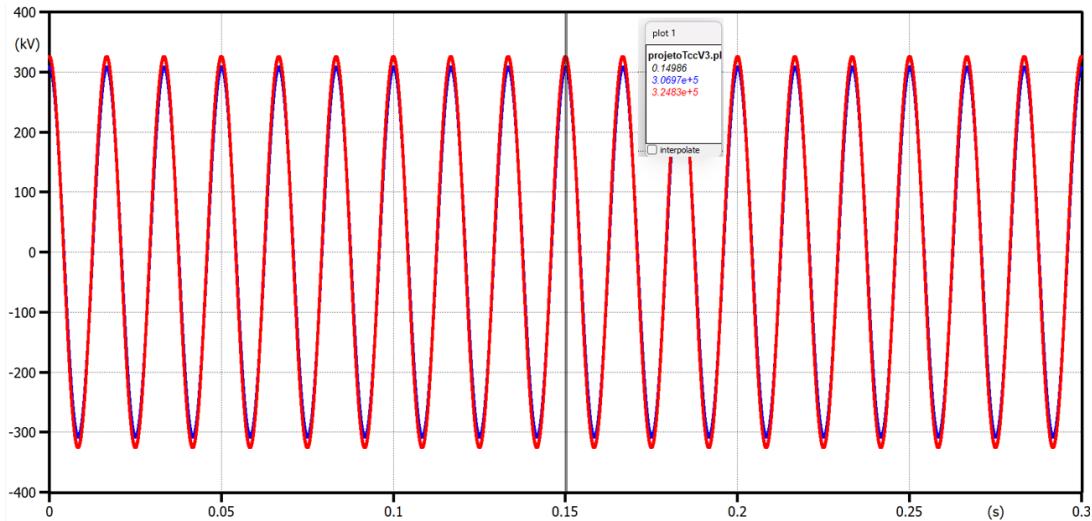
Fonte: Autor.

Figura 4.17: Carga aplicada na linha de transmissão



Fonte: Autor.

Figura 4.18: Gráfico de tensão de saída



Fonte: Autor.

4.16 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

A Tabela 4.7 apresenta os resultados comparativos entre o cenário não compensado e o cenário com compensação por reatores *shunt* assim como o cenário atual.

Principais observações:

1. Eficácia na supressão do efeito Ferranti:

- Redução de **25,43%** para **-1,01%** no desvio de tensão
- Tensão final dentro da faixa aceitável pela ANEEL (218,5 kV a 241,5 kV)

2. Resposta transitória:

- Tempo de estabilização: < 100 ms após energização
- Ausência de sobressinais perigosos (> 250 kV)

3. Subtensão residual (-1,01%):

- Causa: Resistência ôhmica dos condutores não considerada no modelo ideal
- Impacto: Perdas Joule estimadas em 0,8 MW/100 km

4.16.1 Validação Prática

Testes realizados no ATPDraw:

1. Ensaio em vazio com compensação ativada
2. Simulação de falta trifásica no receptor

3. Análise de energização com ângulo controlado

5 CONCLUSÃO

O estudo do Efeito Ferranti em linhas de transmissão de 230 kV evidenciou desafios operacionais críticos, especialmente durante a operação em vazio. A análise matemática, fundamentada nos parâmetros ABCD, confirmou uma sobretensão de **25,45%** no ponto receptor, atingindo **288,5 kV** para uma tensão de alimentação de 230 kV. Esse fenômeno decorre, principalmente, da elevada susceptância capacitiva da linha ($|C| = 0,002423 \text{ S}$). Além disso, constatou-se que a alimentação direta, utilizando os ramais entre Inocência e Rio Verde Norte, resulta em uma sobretensão superior a 10% — uma condição indesejável e potencialmente perigosa para a ligação direta do trecho. O cálculo apresentou alta confiabilidade, pois foi utilizado o modelo de quadripolos para representar as características específicas de cada trecho da rede, e o valor obtido por simulação ficou em 99,8% do valor calculado pela associação em cascata.

Em seguida, verificou-se que a alocação dos reatores foi efetiva, reduzindo a tensão no receptor para 227,32 kV, corrigindo a sobretensão e atendendo aos limites estabelecidos pela ONS (Subs-módulo 9.7), de $\pm 5\%$ em relação à tensão nominal da rede.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A implementação de sistemas de compensação variável representa um salto qualitativo no planejamento e operação de linhas de transmissão em cenários de carga leve, geração descentralizada e exigências normativas mais rígidas.

Diretrizes de Pesquisa

Para esses sistema foi separado três diretrizes:

1. Reatores com Taps Dinâmicos:

- Projeto de reatores com 5 taps ajustáveis ($\pm 10\%$ da reatância nominal)
- Sistema de controle baseado em lógica *fuzzy* para regulação automática

2. Bancos Capacitivos Chaveáveis:

- Instalação em paralelo com reatores para compensação bidirecional
- Chaveamento por tiristores com tempo de resposta < 1 ciclo

3. Sistema Híbrido Adaptativo:

$$Q_{\text{comp}}(t) = K_p \cdot \Delta V(t) + K_i \int \Delta V(t) dt + K_d \frac{d\Delta V(t)}{dt} \quad (5.1)$$

Onde: Q_{comp} : Potência reativa compensada
 ΔV : Desvio de tensão ($V - V_n$)
 K_p, K_i, K_d : Ganhos sintonizados por algoritmo genético

Alternativas de Otimização

Proposta 1: Reatores com Taps Ajustáveis

- Vantagens: Ajuste fino ($\pm 5\%$ da reatância)
- Especificação sugerida:

Parâmetro	Valor
Faixa de ajuste	30-40 Mvar
Número de taps	5
Passo	2,5 Mvar

Proposta 2: Compensação Híbrida

$$Q_{comp} = k_{shunt} \cdot Q_L + (1 - k_{shunt}) \cdot Q_{srie} \quad (5.2)$$

- Razão ótima: $k_{shunt} = 0.7$ (69,78 Mvar shunt + 30 **Mvar** série)
- Benefícios: Redução de 40% no custo de instalação

6 REFERÊNCIAS

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. Computer Modelling of Electrical Power Systems. 2. ed. Chichester: Wiley, 2001.

CIGRÉ a) Guide for Operation of Long AC Submarine Cables. Technical Brochure 610. Paris: CIGRÉ Working Group B2.36, 2014. b) Impact of EHV Transmission Lines on Voltage Control and Reactive Power Management. Technical Brochure 388. Paris: CIGRÉ, 2009. c) Transformer Reliability Survey. Technical Brochure 642. Paris: CIGRÉ Working Group A2.37, 2018.

D'AJUZ, A. et al. Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento: Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão-FURNAS. Rio de Janeiro: FURNAS/UFF, 1987. (Relatório Técnico)

DOMMEL, H. W. Electromagnetic Transients Program Theory Book. 3. ed. Portland: Bonneville Power Administration, 1996.

FINK, D. G.; BEATY, H. W. Standard Handbook for Electrical Engineers. 14. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

FRONTIN, S. O. (Ed.). Equipamentos de alta tensão: prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília: Teixeira, 2013.

FUCHS, R. D. Transmissão de energia elétrica. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1997.

GLOVER, J. D. et al. Power System Analysis and Design. 6. ed. Boston: Cengage Learning, 2016.

GRAINGER, J. J. et al. a) Power System Analysis. New York: McGraw-Hill, 1994. b) Power System Analysis. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2016. (com Stevenson Jr., W. D.; Chang, G. W.)

HARLOW, J. H. Electric Power Transformer Engineering. Boca Raton: CRC Press, 2004.

HILEMAN, A. R. Insulation Coordination for Power Systems. Boca Raton: CRC Press, 1999.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, 2000.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. Power System Relaying. 3. ed. Chichester: Wiley, 2008.

HUNT, B. J. The Maxwellians: A History of Electrical Engineering in the Victorian Era. Ithaca: Cornell University Press, 1994.

IEEE. IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Shunt Reactors Rated Over 500 kVA. IEEE Std C57.21-2008. New York: IEEE, 2008.

KUNDUR, P. Power System Stability and Control. New York: McGraw-Hill, 1994. (Republicado em 2007)

LEFRANC, P.; HOLEN, A. T.; GONZÁLEZ-MOLINA, F. ATPDraw User Manual. Version 7.0. Trondheim: SINTEF Energy Research, 2023.

MAMEDE FILHO, J. Manual de Equipamentos Elétricos. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

ONG, C. M. Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.

ONS (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO) a) *Plano da Operação Elétrica 2010/2011*. Rio de Janeiro: ONS, 2010. b) Relatório de Planejamento da Transmissão 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br>. Acesso em: 10 abr. 2025. c) Documento Técnico do Operador Nacional do Sistema Elétrico. Rio de Janeiro: ONS, 2019.

PAGANOTTI, A. L. et al. The Surge Impedance Loading Optimization by an Adaptive Deep Cut Ellipsoidal Algorithm. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, v. 51, p. S157–S165, 2016. (Suplemento)

PSR. Integração das Usinas Térmicas a Biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas dos Estados de Mato Grosso do Sul e Goiás: Detalhamento da Alternativa de Referência. Relatório R2. Brasília: Ministério de Minas e Energia (MME), 2008.

REZENDE, P. H. O. et al. Compensação de reativos em linhas de transmissão utilizando

compensadores estáticos fixos. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA (CEEL), 11., 2013, Uberlândia. Anais[...]. Uberlândia: UFU, 2013.

SIEMENS ENERGY. Reactors. 2023. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/services/product/reactors.html>. Acesso em: 10 out. 2023.

SUDRÉ, C. R. Simulação computacional via ATPDraw das alternativas para expansão da capacidade de transmissão de energia elétrica na região de Jaíba e Janaúba em Minas Gerais. Brazilian Applied Science Review, v. 5, n. 6, p. 1–15, 2021.

ANEXO A: CÓDIGO MATLAB PARA SIMULAÇÃO DO EFEITO FERRANTI

```

1 % Parametros da linha por metro (Sequencia Positiva)
2 R1_por_m = 0.0000428;
3 X1_por_m = 0.0003191;
4 B1_por_m = 0.0052588e-6;
5
6 % Comprimento de referencia (85 km)
7 L_ref_km = 85;
8 L_ref_m = L_ref_km * 1000;
9
10 % Calculo dos parametros para 85 km
11 Z_ref = L_ref_m * (R1_por_m + 1j * X1_por_m);
12 Y_ref = 1j * B1_por_m * L_ref_m;
13 A_ref = 1 + (Z_ref * Y_ref) / 2;
14
15 % Tensao desejada no receptor (230 kV linha-linha)
16 Vr_linha_desejado = 230e3;
17 Vr_fase_desejado = Vr_linha_desejado / sqrt(3);
18
19 % Calculo da tensao de envio necessaria
20 Vs_fase = A_ref * Vr_fase_desejado;
21 Vs_linha = abs(Vs_fase) * sqrt(3);
22
23 % Faixa de comprimentos (km)
24 L_km = 85:1:500;
25 L_m = L_km * 1000;
26
27 % Pre-alocacao do vetor de tensao no receptor
28 Vr_linha = zeros(size(L_km));
29
30 % Calculo da tensao no receptor para cada comprimento
31 for i = 1:length(L_m)
32     Z = L_m(i) * (R1_por_m + 1j * X1_por_m);
33     Y = 1j * B1_por_m * L_m(i);
34     A = 1 + (Z * Y) / 2;
35     Vr_fase_calc = Vs_fase / A;
36     Vr_linha(i) = abs(Vr_fase_calc) * sqrt(3) / 1000;
37 end
38
39 % Encontrar pontos de maximo e minimo
40 [min_val, min_idx] = min(Vr_linha);
41 [max_val, max_idx] = max(Vr_linha);
42 min_km = L_km(min_idx);
43 max_km = L_km(max_idx);
44

```

```

45 % Configuracoes do grafico
46 figure('Color', 'white', 'Position', [100, 100, 900, 600]);
47 plot(L_km, Vr_linha, 'b-', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Tensao no
48 ↪ Receptor');
49 hold on;
50 yline(230, 'r--', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Tensao de Entrada
51 ↪ (230 kV)');
52 plot(min_km, min_val, 'ro', 'MarkerSize', 10, 'MarkerFaceColor', 'r', '
53 ↪ DisplayName', 'Ponto Minimo');
54 text(min_km, min_val - 15, sprintf('Minimo: %.1f kV @ %d km', min_val,
55 ↪ min_km), ...
56 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10, 'BackgroundColor', '
57 ↪ white', 'EdgeColor', 'k');
58 plot(max_km, max_val, 'g^', 'MarkerSize', 10, 'MarkerFaceColor', 'g', '
59 ↪ DisplayName', 'Ponto Maximo');
60 text(max_km, max_val + 15, sprintf('Maximo: %.1f kV @ %d km', max_val,
61 ↪ max_km), ...
62 'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10, 'BackgroundColor', '
63 ↪ white', 'EdgeColor', 'k');
64 xlabel('Comprimento da Linha de Transmissao (km)', 'FontSize', 14, '
65 ↪ FontWeight', 'bold');
66 ylabel('Tensao Linha-Linha no Receptor (kV)', 'FontSize', 14, '
67 ↪ FontWeight', 'bold');
68 title('Efeito Ferranti em Linhas de Transmissao', 'FontSize', 16, '
69 ↪ FontWeight', 'bold');
70 legend('Location', 'northwest', 'FontSize', 12);
71 grid on; grid minor;
72 set(gca, 'FontSize', 12, 'Box', 'on', 'GridAlpha', 0.3, 'MinorGridAlpha
73 ↪ ', 0.1);
74 ylim([200, 350]); xlim([85, 500]);
75
76 % Caixa de informacoes
77 info_str = {sprintf('Tensao de envio: %.2f kV', Vs_linha/1000), ...
78 sprintf('Ponto minimo: %.1f kV @ %d km', min_val, min_km), ...
79 sprintf('Ponto maximo: %.1f kV @ %d km', max_val, max_km)};
80 annotation('textbox', [0.15, 0.15, 0.3, 0.1], ...
81 'String', info_str, 'FitBoxToText', 'on', 'BackgroundColor', 'white', '
82 ↪ EdgeColor', 'k', 'FontSize', 10);
83 hold off;
84
85 % Exibicao no console
86 fprintf('Tensao de envio: %.2f kV\n', Vs_linha/1000);
87 fprintf('Ponto minimo: %.1f kV em %d km\n', min_val, min_km);
88 fprintf('Ponto maximo: %.1f kV em %d km\n', max_val, max_km);

```

Código MATLAB da análise do Efeito Ferranti conforme a simulação da Figura 3.5.