



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS DO ESPÍRITO SANTO FERNANDES

**ANÁLISE DA MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO EM LINHAS
DE TRANSMISSÃO EM ULTRA-ALTA-TENSÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador - Bahia

2020

ANÁLISE DA MANOBRA DE ENERGIZAÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO EM ULTRA-ALTA-TENSÃO

LUCAS DO ESPÍRITO SANTO FERNANDES

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Moreira

Orientador: Prof. Dr. Milton Elvis Zevallos Alcahuaman

Salvador - Bahia

2020

F363 Fernandes, Lucas do Espírito Santo.
Análise da manobra de energização em linhas de
transmissão em ultra-alta-tensão / Lucas do Espírito Santo
Fernandes. – Salvador, 2020.
96 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Moreira.
Coorientador: Prof. Dr. Milton Elvis Zevallos Alcahuaman.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia.
Escola Politécnica, 2020.

1. Linhas elétricas - transmissão. 2. Energia elétrica. 3.
Energização. I. Moreira, Fernando Augusto. II. Alcahuaman,
Milton Elvis Zevallos. III. Universidade Federal da Bahia. IV.
Título.

CDD.: 621.319

Lucas do Espírito Santo Fernandes

"Análise da Manobra de Energização em Linhas de Transmissão em Ultra-Alta-Tensão".

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em: 02 de Outubro de 2020.

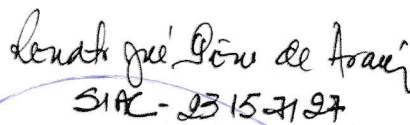
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fernando Augusto Moreira
Orientador/UFBA

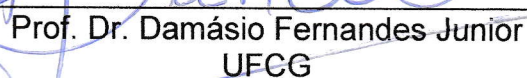


Prof. Dr. Milton Elvis Zevallos Alcahuaman
Orientador/UFBA



SAC-2315-7127

Prof. Dr. Renato José Pino de Araújo
UFBA



Prof. Dr. Damásio Fernandes Junior
UFCG

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua maravilhosa Graça e misericórdia que me sustentam a todo momento.

Aos meus Pais, Roque Fernandes da Silva e Sueli Pereira do Espirito Santo. Por todo incentivo e ajuda em todos momentos, e pelo ardo esforço que tiveram para que eu pudesse ter o suporte necessário para a conclusão desta etapa.

A minha noiva Maria Menezes Vaz de Queiroz por estar ao meu lado nessa longa jornada, me apoiando e incentivando a todo momento.

Ao Prof. Ph.D. Fernando Augusto Moreira, pela oportunidade que me deu de realizar este trabalho. Pelo apoio, disponibilidade e paciência que me possibilitaram a conclusão deste projeto.

Ao Prof. Milton Elvis Zevallos Alcahuaman, pela ajuda durante a pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo suporte financeiro.

Resumo

O desafio de transportar grandes blocos de energia a longas distâncias com baixo custo e elevada eficiência, tem atraído diversos estudos para a área da transmissão a partir de 1000 kV. Neste trabalho é realizada uma análise da manobra de energização em linhas de UAT (Ultra Alta Tensão), para linhas com níveis de tensão entre 1000 kV e 1200 kV, e de comprimento acima de 900 km. Esta análise busca conhecer os níveis de sobretensões transitórias mais severas, procurando métodos para mitigar essas perturbações nas manobras de energização das linhas. Além das análises das sobretensões, o trabalho também comparou diferentes arranjos de compensação para a linha, definindo assim a que apresentou o melhor resultado dentre elas. As sobretensões transitórias foram analisadas por meio de estudos de transitórios eletromagnéticos, que devido a sua complexidade foram executados com auxílio do programa computacional PSCAD (*Power System Computer Aided Design*). Ao final é apresentada uma comparação entre três métodos de supressão dessas sobretensões: a utilização de para-raios, resistor de pré-inserção e por último o chaveamento controlado. No trabalho foram constatados os casos mais severos e os pontos onde ocorreram as maiores sobretensões. Neste estudo é proposta a aplicação de uma metodologia em quatro etapas para uma análise da redução das sobretensões oriundas da manobra de energização em linhas de transmissão de UAT.

Palavras-chave: Energização de linhas de transmissão; Linhas de transmissão longas; PSCAD; Sobretensões transitórias; Transmissão em ultra alta tensão (UAT).

Abstract

The challenge of transporting large blocks of energy over long distances with low cost and high efficiency has attracted several studies for the transmission area above 1000 kV. In this work an analysis of the energization switching in UHV (Ultra High Voltage) lines is performed, for lines with voltage levels between 1000 kV and 1200 kV, and lengths above 900 km. This analysis seeks to know the levels of the most severe transient overvoltages, looking for methods to mitigate these disturbances in the energization switching of the lines. In addition to the analysis of overvoltages, the work also compared different compensation arrangements for the line, thus defining the one that presented the best result among them. The transient overvoltages were analyzed through studies of electromagnetic transients which, due to their complexity, were executed with the PSCAD (Power System Computer Aided Design) software. At the end, a comparison is made between three methods for the suppression of these overvoltages: the use of surge arresters, pre-insertion resistor, and finally the controlled switching. In this work, the most severe cases and the locations where the greatest overvoltages occurred were determined. In this study it is proposed the application of a methodology in four stages for an analysis of the decrease of overvoltages resulting from the energization switching of UHV transmission lines.

Keywords: Transmission line energization; Long transmission lines; PSCAD; Transient overvoltages; Ultra high voltage transmission (UHV).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 . Evolução dos níveis de tensão dos sistemas de transmissão em CA no mundo.	20
Figura 2. Diagram Unifilar sistema Jindongnan-Nanyang-Jingmen 1000 kV.	21
Figura 3. Subestação do sistema piloto de 1100 kV na China	22
Figura 4. Seção de linha de teste de circuito único da base de teste UAT CA no Wuhan High Voltage Research Institute.	23
Figura 5. Estação Nacional de teste Bina 1200 kV, localizada na Índia.	24
Figura 6. Transmissão no Japão: (a) linhas em 1000 kV; (b) Estação de testes de equipamentos UAT CA.	25
Figura 7. Sistema Interligado Nacional (Horizonte 2024)	27
Figura 8. Mapa de potencial eólico no Nordeste.....	29
Figura 9. Custos em função da potência máxima transmitida para diferentes distâncias.....	31
Figura 10. Forma de onda típica de um transitório de manobra	36
Figura 11. Nível de corrente versus a duração de um transitório impulsivo	37
Figura 12. Transitório Oscilatório.....	37
Figura 13. Sobretensões de manobra e impulso atmosférico típicas	39
Figura 14. Onda padronizada de impulso atmosférico	40
Figura 15. Representação do impulso atmosférico	40
Figura 16. Circuito equivalente de um elemento infinitesimal de uma linha de transmissão ..	42
Figura 17. Linha de transmissão com para-raios instalados nos extremos de cada trecho de linha.....	49
Figura 18. Circuito simplificado do resistor de pré-inserção.	52
Figura 19. Princípio de funcionamento da compensação série	54
Figura 20. Diagrama Unifilar sistema de compensação em série na transmissão.....	55
Figura 21. Limite de potência da linha de transmissão.....	56
Figura 22. Torre Guyed V para linha de transmissão em 1150 kV.	59
Figura 23. Raio externo dos subcondutores.	59
Figura 24. Quadripolo típico de linha e transmissão	60
Figura 25. Unifilar Caso 1 com compensação série alocada no início do trecho B-C da linha.	61
Figura 26. Unifilar Caso 2 com compensação série alocada no fim do trecho B-C da linha...	61
Figura 27. Unifilar Caso 3 com compensação série alocada nos terminais do Trecho B-C. ...	61

Figura 28. Unifilar Caso 4 com compensação série alocada no início do Trecho A-B e final do Trecho C-D.....	61
Figura 29. Casos de compensação para uma linha de 900 km	63
Figura 30. Casos de compensação para uma linha de 1000 km	64
Figura 31. Casos de compensação para uma linha de 1200 km	64
Figura 32. Topologia de compensação definida para os estudos.	65
Figura 33. Energização do Trecho A-B da linha de 900 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão subestação B.....	67
Figura 34. Energização do Trecho B-C da linha de 900 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão subestação C.....	68
Figura 35. Energização do Trecho C-D da linha de 900 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão subestação D.....	68
Figura 36. Energização do Trecho A-B da linha de 1000 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão subestação B.....	69
Figura 37. Energização do Trecho B-C da linha de 1000 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão subestação C.....	69
Figura 38. Energização do Trecho C-D da linha de 1000 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão subestação D.....	70
Figura 39. Energização do Trecho A-B da linha de 1200 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão subestação B.....	70
Figura 40. Energização do Trecho B-C da linha de 1200 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão subestação C.....	71
Figura 41. Energização do Trecho C-D da linha de 1200 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão subestação D.....	71
Figura 42. Energização do Trecho A-B da linha de 900 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão subestação B.....	72
Figura 43. Energização do Trecho B-C da linha de 900 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão subestação C.....	73
Figura 44. Energização do Trecho C-D da linha de 900 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão subestação D.....	73
Figura 45. Energização do Trecho A-B da linha de 1000 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão subestação B.....	74
Figura 46. Energização do Trecho B-C da linha de 1000 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na	

subestação B; (b) Sobretensão subestação C.....	74
Figura 47. Energização do Trecho C-D da linha de 1000 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão subestação D.....	75
Figura 48. Energização do Trecho A-B da linha de 1200 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão subestação B.....	75
Figura 49. Energização do Trecho B-C da linha de 1200 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão subestação C.....	76
Figura 50. Energização do Trecho C-D da linha de 1200 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão subestação D.....	76
Figura 51. Energização do Trecho A-B da linha de 900 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão subestação B.....	77
Figura 52. Energização do Trecho B-C da linha de 900 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão subestação C.....	78
Figura 53. Energização do Trecho C-D da linha de 900 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão subestação D.....	78
Figura 54. Energização do Trecho A-B da linha de 1000 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão subestação B.....	79
Figura 55. Energização do Trecho B-C da linha de 1000 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão subestação C.....	79
Figura 56. Energização do Trecho C-D da linha de 1000 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão subestação D.....	80
Figura 57. Energização do Trecho A-B da linha de 1200 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão subestação B.....	80
Figura 58. Energização do Trecho B-C da linha de 1200 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão subestação C.....	81
Figura 59. Energização do Trecho C-D da linha de 1200 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão subestação D.....	81
Figura 60. Linha de transmissão com para-raios instalados nos extremos de cada trecho da linha.....	82
Figura 61. Energia absorvida pelo para-raios instalados ao final do trecho A-B em cada fase (A, B e C) da linha de transmissão.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estimativa da evolução física do sistema de transmissão do SIN - Linhas de transmissão	28
Tabela 2. Estimativa da evolução física do sistema de transmissão do SIN - Transformação.	28
Tabela 3. Parâmetros físicos da Torre e do condutor.....	58
Tabela 4. Parâmetro elétricos da linha teste	60
Tabela 5. Ganho de tensão para os casos propostos em uma linha de 900 km	62
Tabela 6. Ganho de tensão para os casos propostos em uma linha de 1000 km	62
Tabela 7. Ganho de tensão para os casos propostos em uma linha de 1200 km	63
Tabela 8 . Ganho de Tensão da linha com 50 % da compensação série variando o nível de compensação shunt para os diferentes valores de comprimento de 900 km a 1200 km.....	65
Tabela 9. Valores de sobretensão transitória nos trechos de linha para um nível de tensão de 1000 kV e comprimentos de 900 km, 1000km e 1200 km. Valores calculados para uma tensão base de 816,5 kV.	67
Tabela 10. Valores de sobretensão transitória nos trechos de linha para um nível de tensão de 1150 kV e comprimentos de 900 km, 1000km e 1200 km, valores calculados para uma tensão base de fase de 939 kV	72
Tabela 11. Valores de sobretensão transitória nos trechos de linha para um nível de tensão de 1200 kV e comprimentos de 900 km, 1000km e 1200 km, valores calculados para uma tensão base de fase de 979,8 kV	77
Tabela 12. Sobretensões máximas para uma linha com nível de tensão de 1000 kV e comprimento de 900 km, para os diferentes métodos de mitigação.	84
Tabela 13. Sobretensões máximas para uma linha com nível de tensão de 1200 kV e comprimento de 1200 km, com para-raios localizados no início e final de cada trecho de linha.	85
Tabela 14. Eficiência da compensação série em função do comprimento da linha e de seu ponto de aplicação. Adaptada de: (ANDERSON; FARMER, 1996).	86

LISTA DE ACRÔNIMOS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

EAT – Extra Alta Tensão

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

RPI – Resistor de Pré-inserção

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SIL - Surge Impedance Loading

SIN - Sistema Interligado Nacional

UAT – Ultra Alta Tensão

UHE - Usina Hidroelétrica

ZnO - Óxido de Zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

C – Capacitância

I – Corrente injetada no trecho infinitesimal da linha de transmissão

ΔI – Corrente injetada pelos elementos transversais

G – Condutância

L - Indutância

R – Resistência longitudinal da linha de transmissão

V – Tensão na entrada do elemento infinitesimal da linha

Δz – comprimento do elemento infinitesimal da linha de transmissão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Relevância e motivação da pesquisa.....	15
1.2. Objetivos da dissertação	17
1.3. Contribuições	18
1.4. Organização da dissertação	18
1.5. Publicação.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	20
2.1. Histórico	20
2.1.1. HISTÓRICO NO MUNDO	20
2.1.2. HISTÓRICO NO BRASIL	26
2.2. Estado da arte	31
2.3. Resumo do capítulo 2	34
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	35
3.1. Transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão	35
3.2. Sobretensão nas linhas	38
3.2.1. Sobretensão de manobra	38
3.2.2. Sobretensões atmosféricas.....	39
3.3. Propagação de ondas eletromagnéticas em Linhas de Transmissão	41
3.4. Modelo de Linhas de Transmissão com comprimento Finito	45
3.5. Quadripolo Equivalente	47
3.6. Principais métodos de supressão das sobretensões	48
3.8. resumo do capítulo 3.....	57
4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	58
4.1. DEFINIÇÃO DA TOPOLOGIA DE COMPENSAÇÃO	58
4.2. NÍVEL DE COMPENSAÇÃO SHUNT.....	65
4.3. ENERGIZAÇÃO DA LINHA.....	66
4.4. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS PARA SUPRESSÃO DA SOBRETENSÃO	81
4.4.1. PARA-RAIOS.....	82
4.4.2. RESISTOR DE PRÉ-INserção	83
4.4.3. CHAVEAMENTO CONTROLADO	83
4.4.4. RESULTADOS OBTIDOS	84

4.4.5.	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	86
5.	CONCLUSÕES	89
6.	REFERÊNCIAS	91

1. INTRODUÇÃO

1.1. RELEVÂNCIA E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

A demanda por energia elétrica continua crescendo de forma significativa no Brasil e no mundo e, mais recentemente, com uma forte preocupação ambiental. Com a expansão dos grandes centros industriais e um número crescente de instalações de geração localizadas longe dos centros de carga, é bastante importante o estudo de novas tecnologias para transmissão de grandes blocos de energia.

Em um projeto de P&D estratégico da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) com título “Alternativas não convencionais para Transmissão de Energia Elétrica em Longas Distâncias” (JARDINI, 2012) foi realizada uma avaliação econômica dos sistemas de corrente alternada e corrente contínua. Na pesquisa, conclui-se que, nas condições brasileiras, transmissão em UAT CA (Ultra Alta Tensão Corrente Alternada) é mais econômica para distâncias até 1300 km e que para essas distâncias e a transmissão de potências de 3000 a 4000 MW, a tensão nominal mais adequada é o 1000 kV.

As linhas de transmissão UAT podem transmitir um grande bloco de energia elétrica em uma longa distância, reduzir o número de linhas de circuito, diminuir a perda de energia elétrica e são adequadas para a construção de grandes redes de energia. Especialmente, a transmissão UAT CA serve para interconectar grandes redes de energia (SHU, 2009).

Desde 2009, está em operação comercial na China a primeira linha de 1000 kV em corrente alternada, interligando as subestações de Jingdongnan, Nanyang e Jingmen. Após esta experiência, pesquisadores chineses conduziram estudos para aperfeiçoamento dos sistemas e as características de desempenho frente ao efeito corona em linhas de 1000 kV compactas (XIE et al., 2013). Em 2013, também na China, foi colocado em operação comercial o primeiro circuito duplo em UAT, 1000 kV CA, interligando as subestações Huainan, Zhebei e Shanghai. (BORIN, 2015)

No Brasil, país com dimensões continentais onde existe uma considerável distância entre geração e os principais centros consumidores, a geração de energia elétrica vem sendo expandida de forma significativa devido ao crescimento principalmente da geração eólica e solar, localizadas em grande parte na região Nordeste do país. Esse

aumento exigirá a transmissão de grandes blocos de energia elétrica por longas distâncias, devido à localização dos principais centros consumidores estarem na região Sudeste do país. Nesse sentido, o 1000 kV é bastante promissor para a transmissão da energia a partir do Nordeste para o Sudeste.

A transmissão em UAT é uma tecnologia que vem sendo desenvolvida em países de grande extensão territorial ou grande demanda de energia como a China e a Rússia e chega ao Brasil de forma mais marcante, com a exploração de potenciais hidroelétricos em locais remotos, a exemplo da UHE (Usina Hidroelétrica) de Belo Monte.

Os resultados de pesquisas indicam que as linhas de transmissão em UAT podem transmitir grandes blocos de energia elétrica a longas distâncias; reduzir o número de linhas de circuito e a faixa de passagem, reduzir as perdas de energia elétrica, etc. Especialmente, a transmissão UAT CA serve para interconectar grandes redes de energia. Os resultados obtidos nesses estudos demonstram que há grandes desafios na tecnologia de transmissão em UAT CA, mas que podem ser superados. A tecnologia está atualmente disponível e aguardando aplicações comerciais. (HUANG D., 2008)

Em um sistema de transmissão de energia elétrica, certamente ocorrerão sobretensões em certos pontos do sistema o que dificilmente pode ser evitado. Entretanto, amplitudes podem ser limitadas para que sejam compatíveis com os níveis de isolamento dos equipamentos do sistema. Por este motivo, faz-se necessário estudos dos desempenhos das linhas frente a perturbações de manobras, como é o caso da energização, trazendo abordagens tradicionais e novas que busquem soluções cada vez mais eficientes com a finalidade de diminuir os efeitos das sobretensões nos sistemas de transmissão. Nesse sentido, a avaliação precisa do desempenho dos sistemas de potência frente a sobretensões torna-se uma missão prioritária para pesquisadores que buscam melhorar a proteção dos sistemas, a diminuição dos custos de projeto, a identificação de sistemas vulneráveis e seus impactos efetivos.

Estas sobretensões que ocorrem nos sistemas de potência podem ser originadas de forma interna ou externa. A incidência de descargas atmosféricas nos condutores de linhas de transmissão ou em suas proximidades podem originar sobretensões transitórias de elevada amplitude que se propagam ao longo da linha, estas sobretensões são classificadas como de origem externa. Já as sobretensões de origem interna ocorrem devido às

manobras (energização, religamento, rejeição de carga) ou faltas no sistema.

As sobretensões de manobra são classificadas como sobretensões com frentes de onda lentas (ZANETTA, 2003). Relacionadas a eventos como energização e reenergização de linhas, ocorrência de faltas a terra e manobra no transformador sem carga (GU, 2012).

As sobretensões de manobra devido à energização e reenergização da linha são fatores de controle para projetos de coordenação de isolamento de linhas de 1000 kV na China. A principal medida para controlar as sobretensões é a utilização de disjuntores com resistores de pré-inserção. Na China, os resistores de pré-inserção de 600 Ω são comumente usados com tempo de pré-inserção de $9,5 \pm 1,5$ ms (GU, 2012).

Para qualquer sistema elétrico, a coordenação de isolamento e proteção contra sobretensão são as questões mais críticas a serem abordadas (ANDREW, 1999). A Coordenação de Isolamento é um critério de projeto para qualquer equipamento elétrico que permite o projeto de um isolamento para o equipamento de forma a minimizar interrupções durante condições de regime permanente e também minimizar danos em caso de sobretensões transitórias e isso é feito de forma econômica. Definindo-se assim também as distâncias de isolamento adequadas às sobretensões esperadas para o sistema, levando assim em consideração a característica de possíveis equipamentos protetores (CONCEIÇÃO, 2016).

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Esta pesquisa tem como objetivo principal a análise das sobretensões transitórias frente a manobras de energização em linhas de UAT com níveis de tensão entre 1000 kV e 1200 kV, e comprimentos acima dos 900 km. No estudo foi considerada a inserção da compensação série e shunt na linha de transmissão onde, em uma das etapas do estudo, a porcentagem de compensação shunt da linha foi sendo modificada com objetivo de definir o valor ideal a fim de manter as sobretensões em regime permanente da linha dentro dos limites aceitáveis pelas regulamentações.

Buscando conhecer os níveis de sobretensões transitórias mais severas, foram aplicados métodos (para-raios, resistor de pré-inserção e chaveamento controlado) com objetivo de suprimir essas perturbações nas manobras de energização das linhas e comparar os resultados obtidos entre os métodos, destacando aquele que apresentou o

maior controle frente as sobretensões ocorridas.

1.3. CONTRIBUIÇÕES

Neste trabalho entende-se como umas das maiores contribuições a metodologia proposta para a análise da redução das sobretensões transitórias em linhas UAT. São propostas quatro etapas no estudo. A primeira, um estudo da topologia de compensação da linha, onde foram estudados cinco casos diferentes dos arranjos para a compensação série e em derivação da linha. Na segunda etapa é feita a definição do percentual da compensação em derivação da linha, através da simulação da linha para vários níveis de compensação *shunt* e diferentes comprimentos. Na terceira etapa são simuladas as manobras de energização para os diferentes níveis de tensão e comprimento da linha, observando os casos mais severos e os pontos da linha onde eles ocorrem. Na quarta e última etapa, são comparados três métodos para supressão das sobretensões ocorridas na linha destacando aquele que apresentou melhor resultado.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Além do capítulo introdutório onde é apresentada a relevância e motivação do tema trabalhado, a presente dissertação é composta por 4 capítulos, conforme descrito a seguir:

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica tratando sobre a experiência mundial e nacional da tecnologia de transmissão em Ultra Alta Tensão em corrente alternada (UAT CA), o estado da arte trazendo os trabalhos recentes sobre o tema que possuem ligação com o tema tratado neste trabalho e ao final uma breve conclusão do que foi visto no capítulo.

No capítulo 3 é apresentado um breve resumo sobre transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão, sobretensões em linhas, propagação de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão e sobre os principais métodos de supressão das sobretensões transitórias.

No capítulo 4 é discutido o processo das simulações computacionais realizadas no trabalho, apresentando as etapas de simulação e os resultados obtidos. Dentre essas etapas estão: A definição da topologia de compensação, o nível de compensação *shunt*, a simulação da energização da linha e a comparação dos métodos de mitigação das sobretensões.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros que circundam o tema estudado.

1.5. PUBLICAÇÃO

A partir do presente trabalho foi produzido um artigo com título: Análise da Manobra de Energização em Linhas de Transmissão em Ultra-Alta-Tensão. O artigo foi submetido e aprovado no evento XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA). No artigo produzido estão reunidos os principais resultados obtidos neste trabalho, através da explanação da linha teste utilizada e as etapas de todo estudo. Foram apresentadas as sobretensões transitórias ocorridas na manobra de energização dos diferentes níveis de tensão (1000 kV – 1200 kV) e para os comprimentos de linha propostos (acima dos 900 km).

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. HISTÓRICO

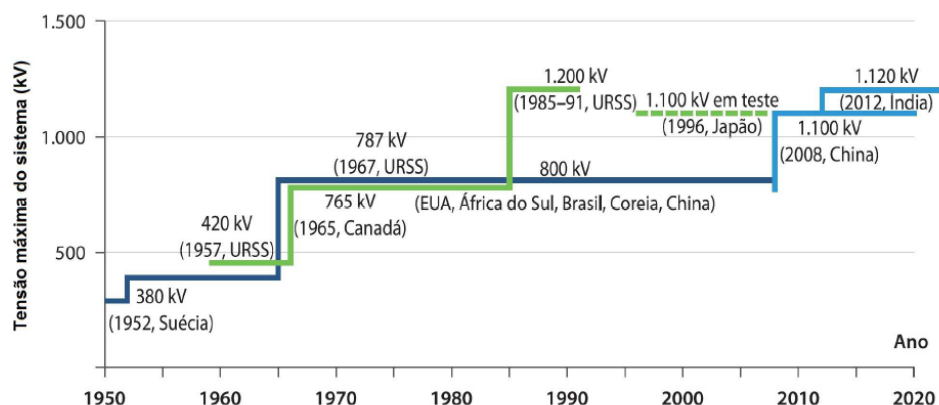
Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a literatura pertinente a transmissão de energia elétrica em UAT para o embasamento do trabalho feito, apresentado também um histórico da transmissão em UAT no âmbito mundial e no Brasil.

2.1.1. HISTÓRICO NO MUNDO

A fim de atender o crescimento da carga de energia, realizar a transmissão de energia de longa distância e aumentar a capacidade de transmissão de potência, a antiga União Soviética, Japão, Estados Unidos da América (EUA), Itália, Canadá e Brasil começaram os estudos sobre a relevante tecnologia de transmissão UAT nas décadas de 1960 e 1970. (HUANG D., 2008)

As principais experiências nesta modalidade de transmissão em UAT encontram-se em países como: China, Rússia, Índia e Japão. A Figura 1 é ilustrada a evolução dos níveis de tensão dos sistemas de transmissão em corrente alternada no mundo.

Figura 1 . Evolução dos níveis de tensão dos sistemas de transmissão em CA no mundo.



Fonte: (JARDINI, 2011, p. 57)

A. Experiência na China

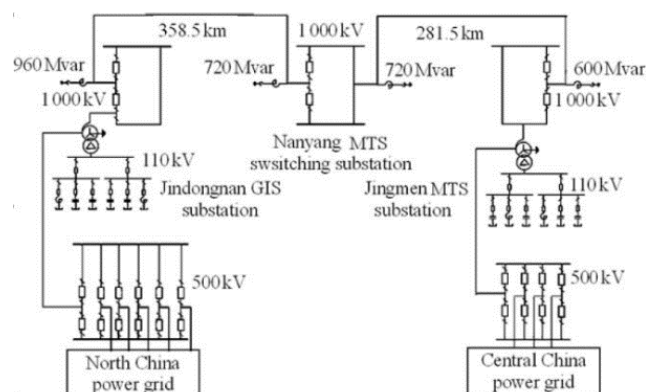
Segundo HUANG D. (2008), desde 1986 a pesquisa de transmissão em UAT foi incluída nos megaprojetos de pesquisa científica na China. Podendo ser citados alguns projetos que vem sendo desenvolvidos ao longo dos anos, como no ano de 1990 uma

demonstração de transmissão de longa distância e nível de tensão estruturada pelo Conselho do Ministério do Estado do Projeto Importância; um estudo de viabilidade da transmissão CA de 1000 kV estruturada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia da China. No ano de 1994 foi feita uma pesquisa de uma linha teste em UAT CA, no ano de 1997 foi desenvolvido um estudo dos efeitos no ambiente da linha de transmissão UAT CA e a geração de onda de comutação de frente longa usando equipamento de teste de frequência de energia, estruturado pelo Ministério da Indústria de Energia da China. Alguns mais recentes como o estudo de viabilidade econômica da transmissão CA de 1000 kV no ano de 2004 e a aplicação de nível de tensão mais alto na Southern Power Grid estruturada pela China Southern Power Grid Corporation. Estes são alguns dos diversos projetos de pesquisa realizados ao longo dos anos na China sobre a transmissão UAT.

O projeto de teste e demonstração de 1000 kV CA Jindongnan-Nanyang-Jingmen, patrocinado pela SGCC estabeleceu a fundação na cidade de Changzhi, província de Shanxi, China, em 19 de agosto de 2006. A linha tem as funções de demonstração, teste e operação comercial, e era prevista para ser colocada em operação em 2008 (HUANG D., 2008).

Em janeiro de 2009, o projeto piloto Jindongnan – Nanyang – Jingmen 1000 kV iniciou a operação comercial. A linha possui um comprimento de 640 km, com tensão nominal de 1000 kV e tensão máxima operativa de 1100 kV. O projeto foi inteiramente desenvolvido, projetado e construído na China. Na Figura 2 está indicado o diagrama unifilar do sistema.

Figura 2. Diagram Unifilar sistema Jindongnan-Nanyang-Jingmen 1000 kV.



Fonte: (CIGRÉ WG B3.29, 2013).

O sistema estudado substitui interligações em 500 kV e mostrou-se uma boa alternativa do ponto de vista técnico e econômico, pois apresentou uma certa melhoria na estabilidade do sistema se considerado em paralelo com a transmissão em corrente contínua de ± 800 kV. Neste projeto as usinas a carvão e hidroelétricas, que se localizam no Nordeste e Oeste da China, foram conectadas aos centros de carga localizados nas regiões Leste e Central (JARDINI, 2011). Na Figura 3 é apresentado um exemplo de subestação de 1100 kV na China.

Figura 3. Subestação do sistema piloto de 1100 kV na China



Fonte: (BORIN, 2015).

Após o sistema piloto, a China já colocou em operação mais de 6000 km de linhas em 1100 kV. Em 2012, foram construídos mais dois sistemas UAT CA – circuito duplo de 1100 kV – projeto Huainan – Shanghai, com extensão de 656 km (LIU, 2014). Na Figura 4 são ilustradas estruturas de testes de transmissão em UAT na China. Esse sistema representava a maior tensão operativa do mundo em sistema UAT CA e com a maior capacidade, conectando as regiões norte e central da China. Atualmente este sistema foi superado por uma grande rede de alta capacidade em 1200 kV CA na Índia.

Figura 4. Seção de linha de teste de circuito único da base de teste UAT CA no *Wuhan High Voltage Research Institute*.



Fonte: (HUANG D., 2008)

B. Experiência na Índia

Em 2011 a demanda de energia encontrada na Índia era em torno dos 157 GW. Segundo estudos até 2025 está previsto um crescimento dessa demanda alcançando valores em torno dos 600 GW (SILVEIRA, 2017). Para que o país atenda a demanda prevista deverão ser implantadas fontes de geração em locais distantes dos grandes centros de carga, sendo necessário uma ampliação do sistema de transmissão existente.

Para ampliação do sistema de transmissão da Índia foi considerada a construção de linhas de 400 kV e de cerca de 9000 km de linhas de 745 kV. Junto a isso foi projetada a inserção de um sistema de 1200 kV. A alternativa de 1200 kV CA foi considerada devido as extremas dificuldades de transmissão dos grandes blocos de energia das fontes remotas de geração para os centros de carga. (JARDINI, 2011)

Na tentativa de aumentar sua capacidade de transmissão, a Índia avançou para níveis de tensão alternada de UAT para transmissão de energia. Devido a tecnologia não estar comercialmente disponível em todo o mundo, o setor elétrico indiano uniu forças para o desenvolvimento dessa tecnologia. Para atingir esse objetivo, foi estabelecida uma estação de teste nacional de 1200 kV UAT CA sob um modelo único de colaboração público-privada da Power Grid Corp. da Índia Ltd. (POWERGRID) em parceria com os fabricantes de equipamentos da Índia e o Instituto Central de Pesquisa de Energia.

A subestação de teste nacional de 1200 kV está localizada geograficamente no coração da Índia - em Bina, no estado de Madhya Pradesh. A subestação de teste consiste em duas baias de 1200 kV e uma linha de transmissão - uma linha de circuito único com 1100 km de comprimento e uma linha de circuito duplo com 800 km de comprimento - com uma tensão nominal de 1150 kV e uma tensão operacional máxima de 1200 kV. Na Figura 5, é apresentada uma foto da Subestação de Teste Nacional comissionada no ano de 2016 na Índia (SECTOR ELECTRICIDAD, 2016).

Figura 5. Estação Nacional de teste Bina 1200 kV, localizada na Índia.



Fonte: Adaptado de (SECTORELECTRICIDAD, 2016)

C. Experiência na Rússia

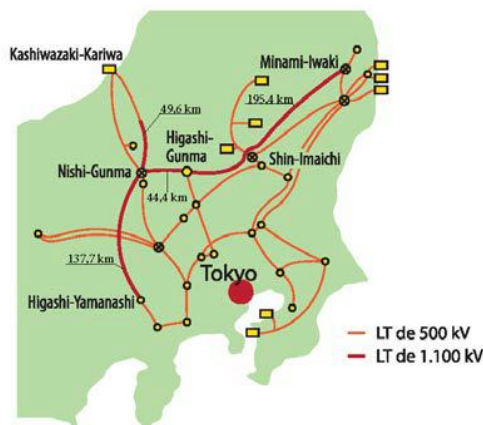
A Rússia foi o primeiro país a construir um sistema em transmissão UAT CA no ano de 1985. O sistema de 1150 kV da Rússia, foi projetado com o objetivo de transportar grandes blocos de energia, provenientes da exploração das reservas de carvão da Sibéria para a região central. Constituído de duas linhas Ekibastuz – Kokchetav (500 km) e Kokchteva – Kustanay (400 km), em circuito simples. O sistema operou por cerca de dois anos no nível de tensão de 1150 kV e depois passou a operar em 525 kV, isso ocorreu por conta da dissolução da antiga União Soviética, que interrompeu em parte a operação das interligações regionais e uma grande crise econômica, que provocou forte retração na demanda de energia. Neste cenário, a transmissão em UAT se tornou ineficiente e passou a operar em tensão reduzida, 500 kV. (CIGRÉ WG A3.22, 2008).

D. Experiência no Japão

Desde o início da década de 70 a empresa japonesa *Tokyo Electric Power Company* (TEPCO) tem desenvolvido trabalhos com a tecnologia UAT, em uma tentativa de encontrar soluções para aumentar a capacidade de sua rede de transmissão em 500 kV, então existente. A maior parte da pesquisa foi conduzida pelo Instituto Central de Pesquisa da Indústria de Energia Elétrica (CRIEP), em associação com empresas de energia. A empresa japonesa TEPCO decidiu investir em uma alternativa de transmissão em 1100 kV. Em 1999 já havia construído linhas de 1100 kV em circuito duplo, com uma capacidade de transmissão de 3 a 4 vezes a capacidade das linhas em 500 kV existentes. São compostas por uma seção de 240 km na rota do Leste para Oeste e outra seção de 190 km do Norte para o Sul, totalizando 430 km. No entanto, em grande parte da operação comercial, as linhas operaram em 500 kV, em decorrência da demanda de carga do sistema (LIU, 2014; BORIN, 2015).

A Figura 6 são mostradas as linhas de transmissão de 1100 kV construídas pela TEPCO e a subestação piloto em SF₆, instalada para investigações preliminares.

Figura 6. Transmissão no Japão: (a) linhas em 1100 kV; (b) Estação de testes de equipamentos UAT CA.



(a)



(b)

Fonte: (BORIN, 2015)

E. Experiência na Itália

Em 1970, a Itália iniciou estudos na área de UAT. O nível de tensão de 1050 kV CA

se tornou uma alternativa para o planejamento da expansão do seu sistema de transmissão. Em outubro de 1985, o projeto foi concluído e utilizado para testes em 1.050 kV até o final de 1997. O sistema em UAT estudado possuía duas linhas e se mostrou uma solução confiável e com viabilidade econômica. A partir disso foram iniciadas diversas pesquisas e estudos referentes ao tema, com implantação de laboratórios e linha teste. O projeto foi interrompido, tendo em vista que o crescimento da demanda foi bem inferior ao esperado, e as novas tecnologias de geração indicaram como alternativa mais adequada o uso de fontes de médio porte distribuídas, ao invés de fontes localmente concentradas e de elevada capacidade. Cabe destacar que a demanda previa quatro usinas nucleares, com capacidade de 4.000 MW cada uma, a serem conectadas aos grandes centros de carga localizados a distâncias relativamente curtas, de cerca de 250 km (CIGRÉ WG A3.22, 2008; SILVEIRA, 2017).

2.1.2. HISTÓRICO NO BRASIL

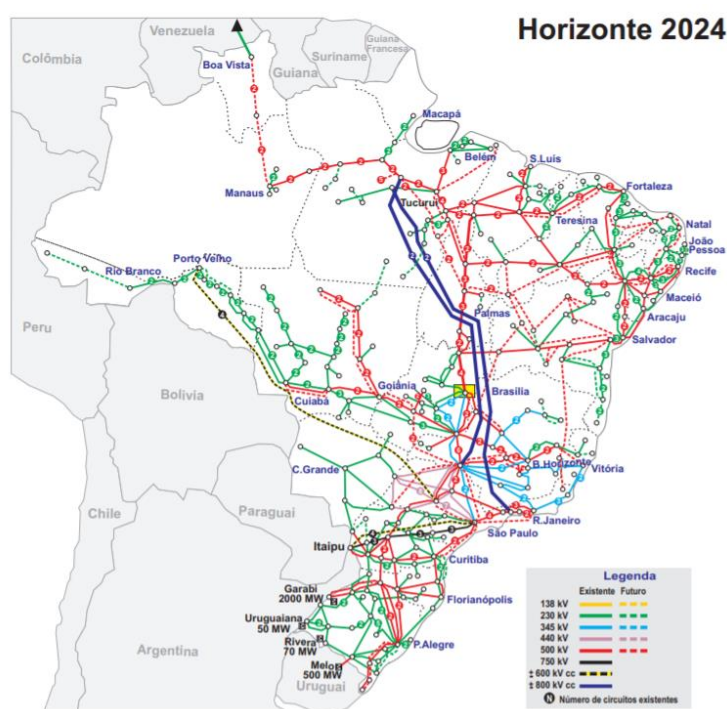
Desde 1978, o Brasil é associado à ENEL, na Itália, B.C. HYFRO, no Canadá, para um programa conjunto de pesquisa e desenvolvimento UAT AC. A pesquisa básica em sistemas UAT CC 800 kV em 1987– 1995 foi realizada e alguns equipamentos foram projetados e fabricados no Brasil. Desde então, o trabalho de design continuou dentro da ABB (combinado com ASEA / Suécia e BBC Brown Boveri / Suíça desde 1988). Vários estudos e reuniões confirmaram que 800 kV UAT CC é um nível de tensão viável. A linha de transmissão de Itaipu 600 kV, 6300 MW está operando a 600 kV desde 1984, Brasil, que é o sistema de transmissão CC de maior tensão e capacidade do mundo, e o desenho e implementação deste projeto foi um esforço conjunto da ASEA / Suécia e ASEA / Brasil (HUANG D. et al, 2009).

O objetivo da pesquisa em linhas de transmissão acima de 1000 kV no Brasil era a necessidade de transmissão de um bloco de potência da ordem de 20 000 MW da Bacia Amazônica para os centros de carga em distâncias na faixa de 1500–2500 km. Instalações de pesquisa e teste foram construídas no instituto de pesquisa CEPEL em Adrianópolis, Brasil, e estão em operação desde de 2008 com o laboratório de UAT (AT5) (CEPEL, 2020).

Para fazer frente ao crescimento da carga, de forma segura, econômica e com respeito à legislação ambiental, o Brasil dispõe de grande potencial energético, com destaque para

as fontes renováveis de energia (potenciais hidráulicos, eólico, de biomassa e solar). Leilões realizados até abril de 2019 resultaram na contratação de novos projetos para ampliação da capacidade instalada, agregando nova oferta ao sistema. O Sistema Interligado Nacional (SIN) conta com um acréscimo de 14.000 MW de capacidade instalada já contratada, dos quais aproximadamente 50% será de fontes renováveis (EPE, 2019). O crescimento da geração eólica e fotovoltaica na região Nordeste do país, tem motivado novos estudos para expansão da interligação Nordeste – Sudeste, de forma que seja possível escoar a energia elétrica gerada pelos novos empreendimentos até os principais centros de carga do Sistema Interligado Nacional (SIN). O sistema de transmissão brasileiro no horizonte 2024 está ilustrado na Figura 7.

Figura 7. Sistema Interligado Nacional (Horizonte 2024)



Fonte: Adaptado de (ONS, 2020)

Conforme a Figura 7, o SIN é constituído principalmente por linhas de transmissão CA com níveis de 500 kV e 230 kV. Também são encontrados os níveis de 345kV, 440kV e níveis mais altos de 750kV. Para o sistema de transmissão CC são encontradas linhas de ± 600 kV e ± 800 kV.

As Tabela 1 e 2 mostram a previsão de expansão para o sistema de transmissão no

horizonte de 2029, considerando o comprimento das linhas e capacidade de transformação segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (EPE, 2019).

Tabela 1. Estimativa da evolução física do sistema de transmissão do SIN - Linhas de transmissão

Tensão	±800 kV	750 kV	±600 kV	500 kV	440 kV	345 kV	230 kV	TOTAL
	km							
Existente em jun/2019	4.168	2.683	12.816	51.791	6.758	10.319	59.097	147.632
Estimativa dez/2019	9.046	2.683	12.816	52.827	6.800	10.327	59.920	154.419
Evolução 2020-2029	2.920	0	0	28.146	228	1.526	16.179	48.998
Evolução 2020-2024	0	0	0	20.735	122	1.294	9.644	31.795
Evolução 2025-2029	2.920	0	0	7.411	106	232	6.534	17.203
Estimativa 2029	11.966	2.683	12.816	80.973	7.028	11.853	76.098	203.417

Fonte: Adaptado de (EPE, 2019)

Tabela 2. Estimativa da evolução física do sistema de transmissão do SIN - Transformação

Tensão	750kV	500kV	440kV	345kV	230kV	TOTAL
	MVA					
Existente em jun/2019	24.897	174.156	30.082	52.445	103.626	385.206
Estimativa dez/2019	24.897	181.416	30.082	53.145	106.552	396.092
Evolução 2020-2029	0	85.052	5.773	16.102	54.334	161.262
Evolução 2020-2024	0	56.886	2.750	9.269	30.628	99.533
Evolução 2025-2029	0	28.166	3.023	6.833	23.706	61.728
Estimativa dez/2029	24.897	266.468	35.855	69.247	160.886	557.354

Fonte: Adaptado de (EPE, 2019)

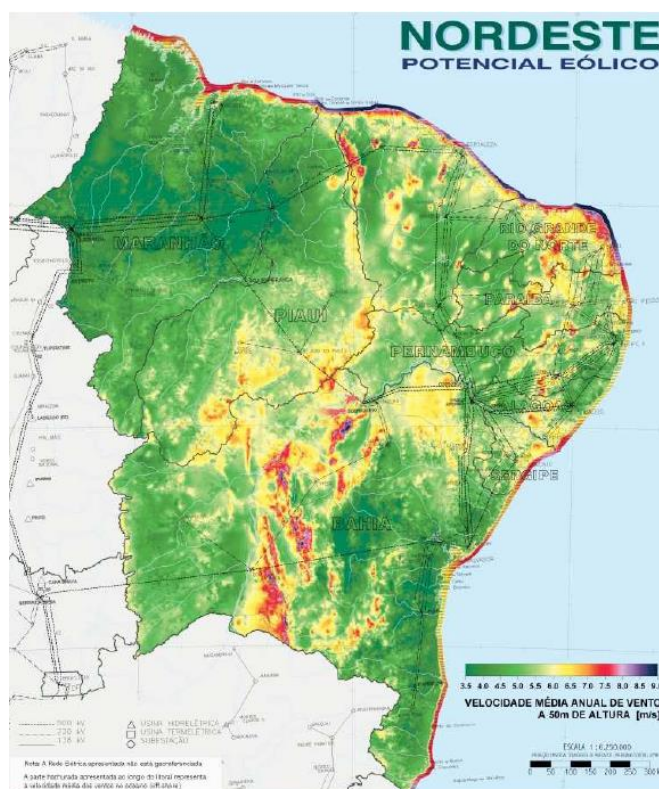
Estão programados para os anos de 2025 a 2029 investimentos para expansão da geração, com destaque para as obras referenciais relativas ao Bipolo Graça Aranha – Silvânia, prevista para o ano de 2027, com vista a promover maior folga para expansões futuras de geração nas regiões N/NE, bem como proporcionar maior segurança e flexibilidade ao sistema interligado (EPE, 2019).

O Brasil detém 10% dos recursos hídricos mundiais e está entre o grupo de países em que a produção de eletricidade é largamente proveniente de usinas hidrelétricas. A importância da hidroeletricidade no Brasil tem base no vasto potencial de energia hidráulica. Em maio de 2019, o SIN contava com uma capacidade instalada de cerca de 164 GW, com participação das diversas fontes de geração. Deste montante cerca de 60 % é proveniente das UHEs (EPE, 2019; BORIN, 2015).

A geração hidrelétrica ainda representa um elemento importante de ampliação de oferta de energia elétrica no SIN. A maior parte do potencial ainda a aproveitar encontra-se na região Norte e traz consigo uma série de desafios, principalmente de caráter ambiental, para sua utilização na expansão da oferta de energia elétrica (EPE, 2019).

A oferta eólica tem se mostrado extremamente competitiva, em termos de preço de energia, frente às demais tecnologias candidatas a expansão. O país possui extensas áreas com um potencial muito promissor para o aproveitamento eólico. Segundo estudos feitos pelo Ministério de Minas e Energia (MME), o litoral nordestino e o centro da Bahia são os locais onde os ventos possuem maior velocidade média, sendo estes os locais de grandes investimentos em construções dos parques eólicos do país. Esta observação pode ser vista na Figura 8.

Figura 8. Mapa de potencial eólico no Nordeste.



Fonte: (MME, 2020).

A fonte eólica é o recurso com maior participação na expansão da matriz energética para o atendimento à demanda de energia mensal, com 21000 MW de capacidade instalada adicional, além do montante já contratado que se encontra em processo de

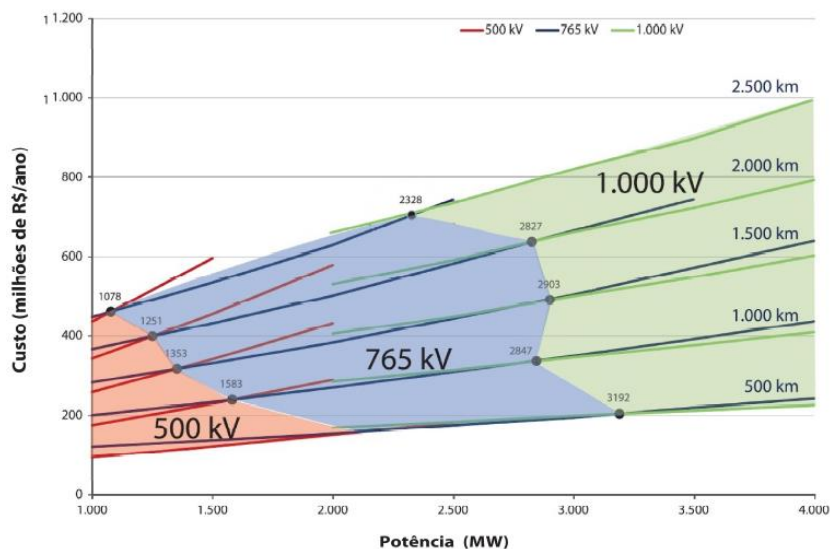
implantação. Essa evolução eleva sua participação para, aproximadamente, 17% da capacidade instalada do SIN em 2029. Junto a ela está a tecnologia solar fotovoltaica, que apresenta 7.000 MW de oferta centralizada indicativa adicional. Essas duas fontes são responsáveis não só por manter o perfil sustentável do sistema elétrico como também, contribuir para redução de custos de operação no futuro (EPE, 2019).

A tecnologia solar fotovoltaica vem confirmando a expectativa de queda dos preços no Brasil com uma velocidade surpreendentemente alta, como pôde ser visto nos últimos leilões. O Brasil possui um grande potencial energético para exploração de energia fotovoltaica, pois tem parte de seu território localizado na região inter-tropical proporcionando um aproveitamento solar maior durante todo o ano. A região Nordeste apresenta altas médias anuais de irradiação solar global incidente na superfície. Nesta se destaca a região norte da Bahia, próximo à fronteira com o estado do Piauí (SILVEIRA, 2017).

Neste contexto de crescimento da injeção de potência no sistema elétrico brasileiro, onde uma quantidade significativa dessa energia é proveniente dos parques eólicos localizados na região Nordeste, essa energia deve ser transportada para os principais centros consumidores localizados na parte sudeste do país, logo alternativas tecnológicas como linhas de potência naturalmente elevada, a transmissão em corrente contínua, linhas com maior número de condutores por fase e linhas de transmissão em UAT constituem opções reais com potencial de redução do custo unitário da energia transportada.

Segundo estudo feito por (SANTOS, 2014), para as condições brasileiras de longo prazo (2024), foi demonstrado que, a transmissão EAT (Extra Alta Tensão) CA seria mais econômica para distâncias inferiores a 1200 km. O sistema de 1000 kV seria melhor para potências maiores do que 3000 MW, como mostrado na Figura 9. Para transmissões de energia de aproximadamente 1500 MW, um sistema de 500 kV CA seria mais adequado. Usar um sistema de transmissão de 765 kV (cuja melhor faixa de transmissão vai de 1500 MW → 3000 MW) para transportar a potência futura concentrada na região NE seria um pequeno passo para alterar a tensão da rede. Portanto, a alternativa de 1000 kV aparece como uma tecnologia promissora para transmitir a energia eólica e solar gerada na região (JARDINI, 2016).

Figura 9. Custos em função da potência máxima transmitida para diferentes distâncias.



Fonte: Adaptado de (JARDINI, 2016).

A inserção de uma linha em 1000 kV seria uma modalidade pioneira de transmissão no Brasil. Na pesquisa de (SILVEIRA, 2017), foi escolhida uma alternativa de transmissão em 1000 kV CA (Tensão máxima de 1100 kV) ligando o sul do Ceará até a região central de Minas Gerais, passando pela região central da Bahia. A linha funciona como um corredor para escoamento dos potenciais eólicos e fotovoltaicos da região Nordeste para a região Sudeste do país. O estudo mostra que o sistema de 1000 kV aparece como uma alternativa tecnicamente vantajosa e menos onerosa. O estudo comparou o sistema com algumas alternativas, um sistema de transmissão em corrente alternada em 500 kV com dois circuitos, um sistema em corrente alternada em 500 kV com três circuitos e um sistema de transmissão multiterminal em corrente contínua em ± 600 kV utilizando conversores VSC (*Voltage Source Converter*). A alternativa de referência em 1000 kV apresentou custos menores que as demais em todas as análises.

2.2. ESTADO DA ARTE

Nesta seção encontra-se uma documentação sobre o que foi realizado no campo de estudo sobre transmissão em ultra alta tensão bem como a análise de energização de linhas e transitórios em linhas de transmissão e os efeitos das sobretensões transitórias em sistemas UAT.

Em (GU, 2012) são apresentados requisitos de sobretensão e coordenação de

isolamento de sistemas de transmissão CA de 1000 kV na China. Com base no projeto de transmissão em circuito único, que está em operação desde 2009, e nos projetos planejados de transmissão em circuito duplo, são apresentados o controle de sobretensão temporária e sobretensões de comutação e a determinação da tensão nominal de para-raios de óxido metálico. Avaliou-se que a duração das sobretensões temporárias desempenha um papel importante na determinação da tensão nominal do para-raios de óxido metálico (MOA) e do nível de isolamento do equipamento. Na China, um método de ligação para abrir os polos dos disjuntores na extremidade de envio e recebimento é adotado, o que significa que os disjuntores em ambas as extremidades serão abertos de forma síncrona se um deles for aberto por qualquer motivo. Este método é eficiente para encurtar a duração da sobretensão temporária e reduzir a energia absorvida pelo para-raios. A diferença máxima de tempo de chaveamento entre os disjuntores em ambas as extremidades geralmente pode ser controlada dentro de 0,2 s, e a duração das sobretensões não será superior a 0,5s, mesmo se o disjuntor em uma das extremidades não for aberto e a proteção de backup for acionada.

A sobretensão transitória merece uma maior atenção para os disjuntores isolados a gás (GIS) dos sistemas de 1000 kV. Geralmente, quanto mais alta for a tensão nominal do sistema, menor será a relação entre a tensão suportável do impulso do equipamento e a tensão nominal do sistema. Por exemplo, a crista da sobretensão transitória nos equipamentos GIS nos sistemas de 1000 kV são duas vezes maior do que a de GIS em sistemas 500 kV, entretanto, a tensão suportável de impulso do equipamento GIS 1000 kV é apenas 1,55 vezes maior do que o equipamento GIS 500 kV. Portanto, sobretensões transitórias podem ser mais prejudiciais a equipamentos GIS de 1000 kV do que equipamentos GIS de 500 kV (GU,2012).

Em (JARDINI, 2016) são discutidos os modelos e os resultados da energização e religamento, bem como a coordenação do isolamento de uma linha de 1000 kV em estudo no Brasil. Os meios para reduzir as sobretensões, como o uso de resistores de fechamento / abertura e comutação sincronizada, são examinados e comparados. Além disso, as diretrizes gerais para a definição da geometria do topo da torre são fornecidas em termos de folga mínima, risco de falha durante a energização da linha, religamento monopolar e tripolar.

Em (HE, 2010) é feito um estudo sobre métodos de supressão de transitórios em

linhas de UAT CA na China, onde diferentes para-raios são avaliados como medidas alternativas para eliminar resistores de fechamento em sistemas de 1000 kV de ultra-alta tensão. Dois tipos de para-raios com menor tensão residual são introduzidos para suprimir sobretensões de manobra. O desempenho desses para-raios em diferentes condições de operação também é analisado, é mostrado que os resistores de fechamento em sistemas UAT CA podem ser eliminados após a aplicação de para-raios adequados e a adoção de certas medidas de distribuição.

Utilizar resistores de pré-inserção em disjuntores é uma medida eficaz para controlar sobretensões de manobra em sistemas de transmissão de energia de extra-alta tensão ou ultra-alta tensão. Os resistores de pré-inserção podem absorver energia excessiva durante os processos transitórios do sistema e suprimir as sobretensões de manobra. Assim, em sistemas UAT, resistores de pré-inserção, juntamente com para-raios, são adotados para controlar sobretensões transitórias de manobras. No entanto, o resistor de pré-inserção tem duas deficiências notáveis. Primeiro, geralmente é muito caro. Para um disjuntor, o resistor de pré-inserção é responsável por uma parte significativa do seu custo final. Em segundo lugar, o resistor de pré-inseção tem uma taxa de falha mais alta do que outros componentes, portanto, a confiabilidade de todo o sistema é reduzida. Em (HE, 2012) foi relatado que o mau funcionamento dos resistores de fechamento é a causa dominante de falha do disjuntor. Portanto, os sistemas de energia estavam inclinados a eliminar os resistores de fechamento. Esta também é uma meta para os sistemas UAT, onde o custo e a dificuldade de construção são dois grandes obstáculos ao seu desenvolvimento.

A sobretensão da linha de transmissão de 1000 kV é mais séria do que as linhas gerais de alta tensão. A técnica do uso da diminuição do nível de proteção dos para-raios de alto desempenho pode reduzir o nível de isolamento do equipamento, sendo uma das sugestões na coordenação do isolamento. A sobretensão é a questão-chave da tecnologia de transmissão UAT 1000 kV e também é o fator decisivo do projeto de transmissão em UAT. Como os isoladores da linha de transmissão UAT podem suportar margens baixas de sobretensão, a sobretensão podem causar a quebra do isolamento. As perdas econômicas combinadas causadas no sistema de energia são muito grandes (PIAO, 2017).

Em (SILVEIRA, 2017) é apresentada uma solução de transmissão em corrente alternada para linhas de 1000 kV, que se mostrou mais econômica na transmissão de potências superiores a 3.500 MW e distâncias de 1400 km. Neste trabalho foi analisado

o escoamento da energia das regiões Norte e Nordeste para a região Sudeste devido ao crescimento dos empreendimentos de geração eólica. No trabalho foi escolhida a alternativa em 1000 kV CA com tensão máxima de 1100 kV, interligando o sul do Ceará até a região central de Minas Gerais, passando pela região central da Bahia.

Em (HUANG, 2008) foi feito um histórico do desenvolvimento, ao longo de vinte anos, da transmissão em ultra alta tensão (UAT CA) na China. Muitas conquistas foram alcançadas na China no campo da tecnologia UAT CA, visto que a prática da transmissão UAT CA é muito necessária devido a suas vantagens na transmissão em longas distâncias.

Em (XUAN, 2016) é realizado um estudo sobre a utilização de bancos fixos de capacitor série em linhas de transmissão UAT. O trabalho investiga os transitórios ocorridos através das manobras de fechamento dos bancos de capacitores nas linhas. A técnica de compensação de capacitância em série pode melhorar a capacidade de transmissão da linha de transmissão e a estabilidade das redes de energia, amplamente utilizada na transmissão de eletricidade de longa distância e grande capacidade. Capacitores série fixos foram aplicados no projeto de expansão UAT CA Jindongnan-nanyang-jinmen. Os capacitores série fixos são compostos por uma plataforma de compensação em série, disjuntor by-pass, seccionador by-pass e seccionador em série. Os resultados da simulação mostram que diminuir a capacitância nominal dos bancos pode reduzir a amplitude da corrente de impulso transiente de forma eficaz, a confiabilidade sob o estado transiente será melhorada.

2.3. RESUMO DO CAPÍTULO 2

Neste capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema da transmissão de energia em UAT, abordando um histórico dos avanços tecnológicos no mundo e no Brasil, assim como os trabalhos recentes sobre o tema. Como pode ser visto a transmissão em UAT é um tema discutido em todo mundo com suas vantagens e desafios sendo analisados. As sobretensões transitórias ocorridas no sistema assim como os diversos métodos para supressão de tais sobretensões, a utilização de bancos de capacitores séries em UAT bem como os transitórios nestes bancos, foram temas vistos em trabalhos neste capítulo que possuem ligação com o tema deste trabalho.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Transitório eletromagnético é a resposta elétrica que se origina em decorrência de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica (MARTINHO, 2009).

Os sistemas elétricos são sujeitos a ocorrência dos transitórios eletromagnéticos cada vez que ocorrem mudanças nos chaveamentos de natureza normal ou anormal. Quando as mudanças em um sistema elétrico são decorrentes de distúrbios transitórios, o sistema responde a esses distúrbios, em geral, por elevações na magnitude da tensão e/ou corrente que pode ser várias vezes maior do que o correspondente valor nominal, com duração menor do que poucos ciclos (< 50 ms) (LEÃO, 2001).

No planejamento e operação do sistema elétrico as simulações de transitórios eletromagnéticos são fundamentais. No caso de estudos de planejamento, a avaliação de fenômenos rápidos é determinante para o dimensionamento adequado dos equipamentos, que são sujeitos a surtos de tensão de origens diversas. No âmbito da operação, a análise de transitórios eletromagnéticos é decisiva tanto para a investigação de uma série de problemas no sistema quanto para a definição de medidas de operação através dos estudos pré-operacionais (VALERO, 2007).

O transitório eletromagnético pode acontecer em qualquer sistema elétrico, seja de baixa, média ou alta tensão. Normalmente possuem um intervalo de tempo de duração muito pequeno, porém é de extrema importância a análise dos fenômenos transitórios, pois nessas circunstâncias, os equipamentos elétricos são submetidos a condições muito severas que podem ultrapassar suas capacidades nominais (HAFFNER, 2007).

Os transitórios de tensão e corrente são classificados como impulsivos e oscilatórios. Estes termos refletem sua forma de onda transitória. Estes transitórios se apresentam como a categoria de perturbação responsável pela maioria dos desligamentos não programados do sistema, acarretando prejuízos pela danificação de equipamentos e interrupção no suprimento de energia (LEÃO, 2001).

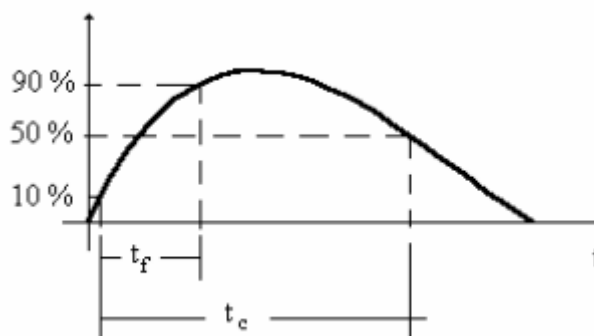
Quanto ao tempo de duração os fenômenos transitórios podem ser definidos como:

- **Temporários:** Duração relativamente longa com pequena amplitude, cerca de 1,5

pu. Normalmente originadas internamente devido a rejeição de carga, curto-circuito trifásico, fenômenos não lineares e Efeito Ferranti.

- **Manobras:** Mais rápidos que os temporários, porém com amplitudes maiores, entre fases ou fase-terra até 3,5 ou 4,5 pu. Com um tempo de frente de onda (t_f) variando de 100 a 500 μ s e o tempo de cauda (t_c) variando de 2000 a 3000 μ s. Originados por energização e religamento de linhas, chaveamento de capacitores e reatores, aplicação e eliminação de falta, rejeição de carga. Na Figura 10 é ilustrada a forma de onda de um transitório de manobra.

Figura 10. Forma de onda típica de um transitório de manobra



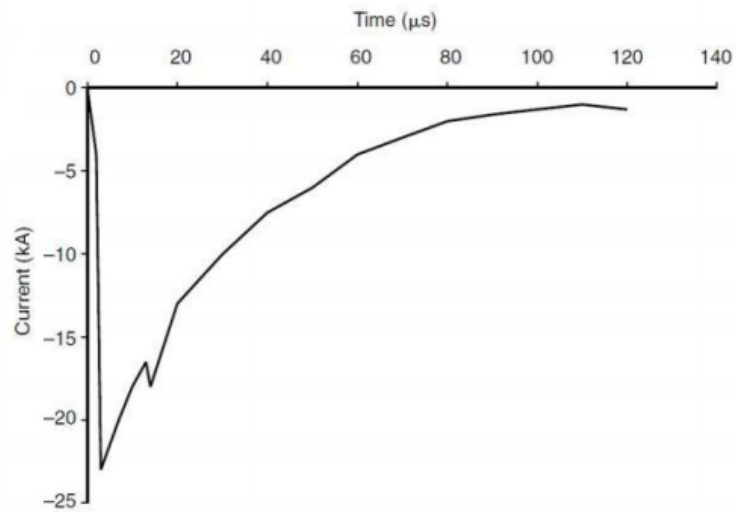
Fonte: ZANETTA, 2003

- **Atmosférica:** Duração na ordem de μ s e grandes amplitudes. O tempo de frente (t_f) varia de 1 a 20 μ s e o tempo de cauda (t_c) até 50 μ s.

Algumas referências dividem o transitório em dois grupos, o transitório impulsivo e o transitório oscilatório, sendo o transitório impulsivo os que ocorrem devido às descargas atmosféricas e os transitórios oscilatórios ocasionados por algumas manobras.

No transitório impulsivo, temos variações bruscas de corrente e/ou tensão causadas por descargas atmosféricas. Os impulsos causados são unidirecionais, ou seja, polaridade positiva ou negativa como ilustra a Figura 11 a seguir.

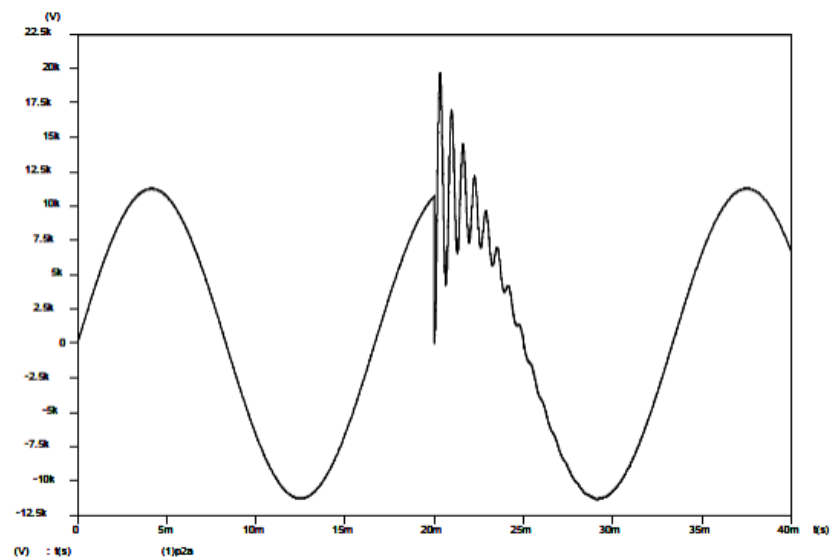
Figura 11. Nível de corrente versus a duração de um transitório impulsivo



Fonte: ZANETTA, 2003

O transitório oscilatório, tem sua origem em um número maior de causas, diferente do impulsivo. Podendo ser causado, como por exemplo, pela energização do sistema, corte de cargas indutivas, eliminação de faltas, e pelo chaveamento de banco de capacitores. Na Figura 12 é mostrado um transitório oscilatório.

Figura 12. Transitório oscilatório



Fonte: (ZANETTA, 2003).

Nos transitórios oscilatórios, como ilustrado na Figura 12, as polaridades positiva e negativa da onda mudam rapidamente. O conteúdo espectral de um transitório oscilatório pode ser dividido em oscilações de alta (0,5–5MHz), média (5–500kHz) e baixa frequência (< 5kHz). Estas faixas de frequência de espectro definem o tipo de perturbação a qual o sistema de potência foi submetido. Os transitórios oscilatórios cuja a frequência principal é alta são típicos de resposta do sistema a incidência de um transitório impulsivo, como causadas por descargas atmosféricas. Os transitórios de média e baixa frequência são tipicamente de origem interna, causadas por manobra de chaveamento (LEÃO, 2001).

3.2. SOBRETENSÃO NAS LINHAS

Em um sistema de transmissão de energia elétrica, certamente ocorrerão sobretensões em certos pontos do sistema o que dificilmente pode ser evitado, assim como sua total supressão é extremamente difícil, entretanto, suas amplitudes podem ser limitadas para que sejam compatíveis com os níveis de isolamento dos equipamentos do sistema. Por este motivo faz-se necessário estudos do comportamento das linhas frente a perturbações de manobras, como é o caso da energização, trazendo abordagens tradicionais e novas que busquem soluções cada vez mais eficientes com a finalidade de diminuir os efeitos das sobretensões nos sistemas de transmissão (VALERO, 2007).

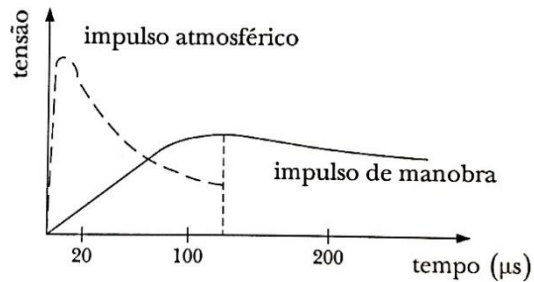
As sobretensões que ocorrem num sistema de potência têm sua origem devido a alguma modificação estrutural ocorrida no sistema como chaveamento, curtos-circuitos, etc. Sua duração é definida pelo tempo em que o sistema sai de um ponto de equilíbrio para outro. Durante esse período de acomodação entre essas duas situações, ocorre um transitório, que normalmente gera sobretensão ou eventualmente, sobrecorrente no sistema.

3.2.1. SOBRETENSÃO DE MANOBRA

As sobretensões de manobra são classificadas como sobretensões com frentes de onda lentas, sendo também conhecidas como de origem interna, pois são originadas por alterações internas da rede (ZANETTA, 2003).

A forma de onda de uma sobretensão de manobra tem um período de frente de onda mais lento do que uma sobretensão de impulso atmosférico, como ilustra a Figura 13.

Figura 13. Sobretensões de manobra e impulso atmosférico típicas



Fonte: (ZANETTA, 2003).

Devido à grande influência que as sobretensões de manobra causam na coordenação de isolamento de sistemas elétricos caracterizados por linhas de transmissão em alta tensão, os estudos mitigatórios relacionados aos meios para reduzir estas sobretensões são de extrema importância para o setor elétrico.

Tradicionalmente, são utilizados disjuntores com resistores de pré-inserção para a redução de sobretensões de manobra em linhas de transmissão (LTs). O uso de resistores de pré-inserção, apesar de ser um método efetivo, apresenta uma aceitação de sua tecnologia que tende a diminuir devido ao alto custo de implementação e manutenção. A busca por alternativas para redução de sobretensões de manobra é alvo de pesquisas e discussões na comunidade científica do setor elétrico, dentre estas alternativas destacam-se as técnicas de chaveamento controlado.

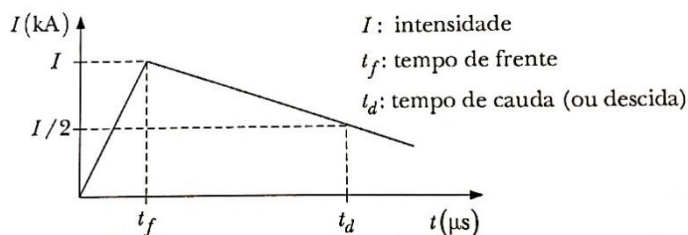
3.2.2. SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS

Essas sobretensões podem ser classificadas como de origem externas, pois resultam de uma interação entre a natureza e o sistema de potência, sendo também denominadas de sobretensões com frentes de onda rápidas. São sobretensões de curta duração, com frente de onda relativamente rápidas (alguns μs) e tempos de decaimento na ordem de 100 μs a 300 μs . A suportabilidade do isolamento, para as sobretensões atmosféricas, é denominada de tensão nominal suportável a impulso atmosférico, ou também chamada de tensão crítica de descarga (ZANETTA, 2003).

Através da Figura 14 podemos ter uma ideia dos tempos envolvidos em um fenômeno dessa natureza. O tempo de frente, a taxa de crescimento e o tempo de descida são fatores importantes no comportamento das sobretensões e também das solicitações

elétricas aos equipamentos.

Figura 14. Onda padronizada de impulso atmosférico

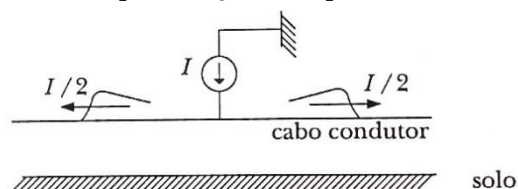


Fonte: (ZANETTA, 2003).

O tempo de cauda (t_c) do raio, ou de descida, é definido como sendo o intervalo de tempo em que o valor da corrente atinge a metade do seu valor de crista, tempo este importante para verificações de solicitações de energia em equipamentos como os para-raios.

O fenômeno da descarga atmosférica em uma linha de transmissão do sistema de potência, pode ser representado razoavelmente, admitindo-se a descarga representada pela aplicação de um gerador de corrente no ponto de queda do raio, como ilustra a Figura 15.

Figura 15. Representação do impulso atmosférico



Fonte: (ZANETTA, 2003).

Existe uma série de estudos referentes a linhas de transmissão com relação ao seu desempenho frente a surtos atmosféricos. Esses estudos abordam diversos fatores como: distância entre os condutores, coeficientes de acoplamento, posicionamento dos cabos-guarda, isolamento dos condutores, entre outros. Outro fator analisado também com relação ao fenômeno de surtos atmosféricos nas linhas de transmissão é o local e o tipo de queda.

As descargas atmosféricas nas linhas de transmissão podem ocorrer no meio do vão

entre duas torres ou na própria torre. São consideradas quedas diretas, quando a descarga atinge o próprio condutor, e quedas indiretas, quando a descarga atinge o cabo-guarda. As linhas também são afetadas por quedas de raios no solo, próximas as estruturas. Nesse caso as sobretensões resultantes nas linhas são chamadas sobretensões induzidas (ZANETTA, 2003).

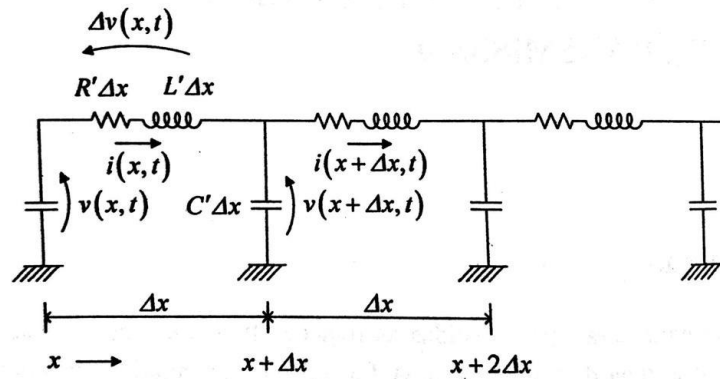
3.3. PROPAGAÇÃO DE ONDAS ELETROMAGNÉTICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Ao contrário da análise de circuitos com dimensão reduzida, em que a distância entre os diferentes componentes do circuito pode ser desprezada e elementos como a resistência, capacitância e indutância são tratados como elementos concentrados, em linhas de transmissão, as distâncias entre carga e fonte são normalmente grandes, de modo que o tempo de propagação da onda nas linhas de transmissão é considerável e torna-se necessária a análise da propagação de ondas eletromagnéticas nestas linhas, para efeito de estudo de transitórios eletromagnéticos.

As manobras de energização provocam sobretensões temporárias que embora sejam de curta duração podem provocar danos aos equipamentos do sistema ou ainda ocasionar falhas de isolamento. Após a manobra de energização surgem ondas viajantes que proporcionam a elevação da tensão em vários pontos da linha de transmissão. Se durante a energização a linha estiver com seu terminal aberto, a elevação do nível de tensão poderá dobrar de valor devido aos fenômenos de reflexão em descontinuidades (ARAÚJO, 2005).

Para um melhor entendimento do efeito da energização em linhas de transmissão, serão apresentadas de forma sucinta as equações que regem o fenômeno da propagação de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão. Uma linha de transmissão pode ser pensada como uma infinidade de trechos de comprimento muito pequeno Δx tais como o mostrado na Figura 16.

Figura 16. Circuito equivalente de um elemento infinitesimal de uma linha de transmissão



Fonte: (ZANETTA, 2006).

Considerando uma linha de transmissão com parâmetros distintos (R' , L' e C') por unidade de comprimento e segmento da linha com comprimento Δx . A variação da tensão e da corrente ao longo da linha estão representadas nas equações (1) e (2):

$$v(x, t) - v(x + \Delta x, t) = R' \Delta x \cdot i(x, t) + L' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \Delta x \quad (1)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = C' \Delta x \frac{\partial v(x + \Delta x, t)}{\partial t} \quad (2)$$

A partir das equações (1) e (2) aplicando a Transformada de Laplace, supondo condições iniciais nulas, é possível chegar as equações (3) e (4).

$$V(x, s) - V(x + \Delta x, s) = R' \Delta x \cdot I(x, s) + sL' \Delta x \cdot I(x, s) \quad (3)$$

$$I(x, s) - I(x + \Delta x, s) = sC' \Delta x \cdot V(x + \Delta x, s) \quad (4)$$

Fazendo as devidas manipulações matemáticas nas equações mostradas até aqui, é possível chegar à equação (5) e (6), que definem a propagação de ondas eletromagnéticas de tensão e corrente em uma linha de transmissão.

$$\frac{\partial^2 V(x, s)}{\partial x^2} = (R' + sL')(sC') \cdot V(x, s) \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, s)}{\partial x^2} = (sC')(R' + sL') \cdot I(x, s) \quad (6)$$

Definindo $\gamma(s) = \sqrt{(R' + sL').(sC')}$ a equação de propagação de ondas da tensão ($V(x, s)$) possui duas possíveis soluções: uma correspondente a uma onda que se propaga no sentido positivo do eixo x , e uma que se propaga no sentido negativo de x . À medida que o tempo passa, um ponto com uma determinada amplitude trafega no sentido positivo do eixo x (onda progressiva). Pode-se fazer o raciocínio inverso para a onda regressiva. As equações (7) e (8) demonstram as duas soluções para a equação de onda da tensão e da corrente.

$$V(x, s) = V^+(x, s)e^{-\gamma(s).x} + V^-(x, s).e^{\gamma(s).x} \quad (7)$$

$$I(x, s) = \frac{1}{Z_c(s)} (V^+(x, s)e^{-\gamma(s).x} - V^-(x, s).e^{\gamma(s).x}) \quad (8)$$

Como solução, no domínio do tempo, apresenta-se a equação (9) a seguir, onde os termos V_0^+ e V_0^- são as amplitudes das ondas progressiva e regressiva, respectivamente. O parâmetro α é a constante de atenuação e β a constante de fase, esses dois parâmetros são melhor definidos a seguir. A composição das ondas regressiva e progressiva dá origem à tensão em cada ponto da linha de transmissão. Da mesma forma, a corrente elétrica será formada a partir da composição das ondas regressiva e progressiva de corrente em cada ponto.

$$V(x, t) = V_0^+ e^{-\alpha x} \cos(\omega t - \beta x) + V_0^- e^{\alpha x} \cos(\omega t + \beta x) \quad (9)$$

As equações (7) e (9) sugerem que a tensão na linha resulta da decomposição de duas ondas eletromagnéticas que viajam à velocidade (v), em sentidos opostos. Podemos então definir a velocidade da propagação da onda eletromagnética em uma linha de transmissão através da equação (10). A velocidade da onda é da ordem de grandeza da velocidade da luz no vácuo ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$), porém nunca pode ser superior a esta.

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

A constante de propagação de uma onda numa linha de transmissão é composta por uma parte real α , chamada de constante de atenuação, e uma parte imaginária β , chamada de constante de fase, como está representado pela equação (11).

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (11)$$

Caso a linha seja ideal, o parâmetro α não existe. Isso ocorre, pois, este termo corresponde à atenuação do sinal ao longo da linha devido às suas perdas. Observe que na equação (9), ele é responsável por diminuir a amplitude da onda, à medida que esta trafega ao longo do eixo z . Já o termo β está ligado à frequência da onda, quando a linha não possui perdas temos que a constante de propagação se resume somente à constante de fase, como na equação (12).

$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{LC} = j\frac{\omega}{v} \quad (12)$$

A constante β também pode ser representada como na equação (13):

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (13)$$

A equação de onda sugere a existência de ondas de tensão e corrente que se propagam na linha. Estas se relacionam por meio de um parâmetro da linha denominado impedância característica (Z_c). Quando estas ondas estão submetidas a uma mudança de meio, ou seja, quando alcançam um meio cuja impedância característica é diferente, ocorrem modificações nas grandezas elétricas da linha. Isto ocorre porque proporcionalidade entre as ondas de tensão e corrente não pode ser violada (AQUINO et. al., 2001).

A impedância característica da linha pode ser definida para casos considerando linhas não-ideais pela equação (14). Para linhas ideais, isto é, onde os elementos resistivos longitudinais e transversais são desprezados, obtém-se a denominada impedância de surto apresentada pela equação (15).

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (14)$$

$$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (15)$$

Com a impedância característica, define-se o conceito de potência característica de uma linha (P_0) como sendo a potência dissipada por uma carga de valor igual à impedância característica. Em linhas ideais, ela é igual ao SIL ("*Surge Impedance*

Loading"), dado pela equação (16). Este conceito também nos fornece o valor da potência transmitida pela linha na situação em que ela não consome ou fornece potência reativa ao resto do sistema. Para uma carga leve, a corrente nos indutores é baixa, e, portanto, os capacitores fornecem um valor de energia reativa superior ao que é consumido pela linha. No cenário inverso, em carga pesada, a indutância longitudinal consome potência reativa em excesso, fazendo com que a linha demande potência reativa do sistema. O cenário intermediário em que há equilíbrio de potência reativa, é quando a linha transmite uma potência igual a seu SIL.

$$P_0 = \frac{U_0^2}{Z_s}, \quad (16)$$

onde U_0 é o valor da tensão na linha e Z_s é a impedância de surto da linha definida pela equação (15).

3.4. MODELO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPRIMENTO FINITO

Com objetivo de formular um modelo para uma linha de transmissão de comprimento finito em regime permanente senoidal, fazendo assim as devidas manipulações matemáticas nas equações (7) e (8) a fim de simplificá-las ainda mais, é possível chegar as equações (17) e (18).

$$V(x, s) = V^+(x, s)e^{-\gamma \cdot x} + V^-(x, s) \cdot e^{+\gamma \cdot x} \quad (17)$$

$$I(x, s) = \frac{1}{Z_c} (V^+(x, s)e^{-\gamma \cdot x} - V^-(x, s) \cdot e^{+\gamma \cdot x}) \quad (18)$$

Considerando uma linha com comprimento finito, suas condições de contorno nas extremidades são conhecidas e dadas pelos fasores de correntes e tensões.

Assumindo uma linha com comprimento finito, na qual V_s e I_s são as tensões e corrente do lado emissor, ou lado fonte e V_r e I_r são as tensões e correntes no lado receptor.

Para o lado emissor, em $z = 0$, as condições de contorno são: $V(0) = V_s$ e $I(0) = I_s$.

Então:

$$V_s = V^+ + V^-, \quad (19)$$

$$I_s = \frac{V^+}{Z_c} - \frac{V^-}{Z_c},$$

ou:

$$Z_c I_s = V^+ - V^-. \quad (20)$$

Somando-se (19) e (20), será obtida a componente progressiva V^+ :

$$V^+ = \frac{V_s + Z_c I_s}{2}. \quad (21)$$

Agora, subtraindo-se (19) de (20), têm-se:

$$V^- = \frac{V_s - Z_c I_s}{2}. \quad (22)$$

Reescrevendo então a equação (17):

$$V(x) = \frac{1}{2} [(V_s + Z_c I_s) e^{-\gamma x} + (V_s - Z_c I_s) e^{+\gamma x}] \quad (23)$$

Reagrupando os termos nas variáveis V_s e I_s , têm-se:

$$V(x) = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} V_s - Z_c \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} I_s, \quad (24)$$

que pode ser reescrita como:

$$V(x) = \cosh(\gamma x) V_s - Z_c \sinh(\gamma x) I_s \quad (25)$$

No lado receptor, para $x = l$, as condições de contorno são: $V(l) = V_r$ e $I(l) = I_r$, que se substituídas na equação (25), fornecem:

$$V_r = \cosh(\gamma l) V_s - Z_c \sinh(\gamma l) I_s. \quad (26)$$

Reescrevendo a equação (18):

$$I(x) = \frac{1}{2Z_c} [(V_s + Z_c I_s) e^{-\gamma x} - (V_s - Z_c I_s) e^{+\gamma x}], \quad (27)$$

ou:

$$I(x) = \frac{1}{2Z_c} [-(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})V_s + (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})Z_c I_s], \quad (28)$$

$$I(x) = -\frac{\sinh(\gamma x)}{Z_c} V_s + \cosh(\gamma x) I_s. \quad (29)$$

Desse modo, no ponto $x = l$, têm-se:

$$I_r = -\frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c} V_s + \cosh(\gamma l) I_s. \quad (30)$$

Colocando-se as equações (26) e (30) na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & -Z_c \sinh(\gamma l) \\ -\frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c} & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Ou, na forma mais tradicional, invertendo-se a matriz:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c} & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}. \quad (32)$$

3.5. QUADRIPOLO EQUIVALENTE

Com base na equação (32), é estabelecido o modelo de um quadripolo equivalente de uma linha de transmissão, definido pelas constantes A, B, C e D:

$$A = \cosh(\gamma l),$$

$$B = Z_c \sinh(\gamma l),$$

$$C = \frac{\sinh(\gamma l)}{Z_c},$$

$$D = \cosh(\gamma l).$$

Dadas as condições de simetria da linha de transmissão, $A=D$.

A relação entre as tensões e as correntes em uma linha de transmissão com comprimento finito l , na forma de um quadripolo:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}. \quad (33)$$

Para uma linha em vazio, ou seja, sem carga no lado receptor, portanto com $I_r = 0$, logo:

$$V_s = AV_r. \quad (34)$$

O termo A representa a relação de tensões entre o lado emissor e o lado receptor da linha, ou o inverso do ganho de tensão em vazio (ZANETTA, 2006).

$$A = \frac{V_s}{V_r}. \quad (35)$$

3.6. PRINCIPAIS MÉTODOS DE SUPRESSÃO DAS SOBRETENSÕES

A energização de linhas de transmissão são manobras cuja amplitude dos transitórios é influenciada pela configuração do sistema bem como pelas características dos equipamentos. Tradicionalmente as sobretensões transitórias que surgem através desta manobra são limitadas por métodos convencionais. No caso estes métodos consistem na aplicação de resistores de pré-inserção nos disjuntores, muitas vezes associados a para-raios de óxido metálico em ambos os terminais da linha. O uso de resistores de pré-inserção, apesar de ser um método efetivo, apresenta uma aceitação de sua tecnologia com tendência a diminuir devido ao alto custo de implementação e manutenção.

Neste trabalho, com o interesse da comparação da influência de cada método na supressão da sobretensão transitória nas linhas, foi proposta a aplicação dos métodos isoladamente. Usualmente, os para-raios sempre estarão presentes na infraestrutura das linhas de transmissão, para qualquer método utilizado. Aqui o único modelo em que não foram considerados a instalação de para-raios ao longo da linha foi no método considerado como chaveamento controlado.

3.6.1. PARA-RAIOS

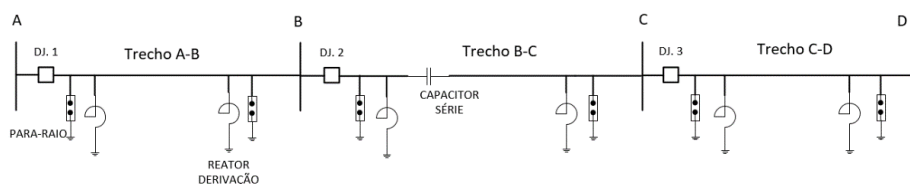
A limitação eficiente das sobretensões ao longo da linha por para-raios é possível mediante a utilização de para-raios com alta capacidade de dissipação de energia. Como alternativas aos resistores de pré-inserção o uso de para-raios em linhas de transmissão oferece menor custo, facilidade na manutenção e a possibilidade destes poderem se situar

ao longo da linha em pontos selecionados para obter o controle requerido do perfil de sobretensão (VALERO, 2007).

Os para-raios são, basicamente, resistores não lineares que fornecem um caminho de baixa impedância para a corrente de surto e que limitam os níveis de sobretensões a valores compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos que protegem (GIAROLA, 2016).

A eficiência dos dispositivos para-raios em mitigar os níveis de sobretensão transitória se deve a sua característica não linear. Entretanto, seus limites de absorção de energia não podem ser excedidos. Nos casos em estudo foram utilizados para-raios nos dois extremos de cada trecho da linha como mostra a Figura 17. Nas próximas seções serão detalhados dos dados da linha de estudo.

Figura 17. Linha de transmissão com para-raios instalados nos extremos de cada trecho de linha.



Fonte: Autor.

Os dados dos para-raios utilizados para simulação foram extraídos do manual de equipamentos da ABB para um para-raios do modelo TEXLIM T-C. O para-raios possui uma tensão nominal fase-terra em rms de 588 kV. Segundo o fabricante, qualquer para-raios com uma tensão de operação contínua maior ou igual à tensão real do sistema dividida por $\sqrt{3}$ pode ser utilizado, logo estes para-raios foram escolhidos para o sistema em 1000 kV que possui tensão nominal fase-terra de 578 kV. Conforme manual, estes para-raios possuem um limite de absorção de energia no valor de 15 kJ/kV (ABB, 2019).

Resistores de pré-inserção em disjuntores, juntamente com para-raios, são comumente adotados para controlar sobretensões de manobra em sistemas de extra-alta-tensão (EAT) e sistemas de UAT. Se os resistores de fechamento forem eliminados e apenas os para-raios forem utilizados, pode ser difícil atingir os níveis aceitáveis de sobretensão. Nos sistemas UAT, o requisito é ainda mais rigoroso, tornando mais difícil a eliminação dos resistores de pré-inserção. Uma das técnicas que pode ser utilizada é a

redução do nível de proteção dos para-raios, o que pode ser alcançado pela redução da tensão residual dos para-raios. Além disso, a distribuição de para-raios ao longo da linha de transmissão é outra maneira de fazer uso dos mesmos para o controle de sobretensões de manobra (J. HE, 2012). No sistema de UAT na China, a tensão nominal dos para-raios é selecionada como 828 kV após considerações cuidadosas (GU. D, 2006). Valores estes que serão utilizados como referência para o projeto.

As principais características elétricas dos para-raios são:

I. Tensão Nominal

As sobretensões temporárias exercem um fator extremamente importante na seleção da tensão nominal dos para-raios de ZnO, uma vez que todos os níveis de tensão entre os terminais dos para-raios acima da sua tensão e operação contínua são considerados como uma sobretensão temporária para os para-raios. Diferentes projetos de para-raios podem apresentar diferentes tensões nominais para uma mesma tensão de operação contínua. Segundo o critério de determinação que estabelece a condição mínima de suportabilidade a sobretensões temporárias para uma duração de 10 segundos, durante o ensaio de ciclo de operação o para-raios deve ter capacidade para suportar uma sobretensão temporária de valor igual ou superior a sua tensão nominal por um tempo de 10 segundos (FRANCO, 2011).

A tensão nominal de um para-raios é definida como o maior valor eficaz de tensão fase-terra, à frequência industrial (60 Hz), que o para-raios pode suportar seguramente durante sobretensões temporárias estabelecidas nos ensaios de ciclo de operação (GIAROLA, 2016).

II. Nível de Proteção

Os níveis de proteção para para-raios de Óxido de Zinco (ZnO), sem nenhum tipo de centelhador em série, são definidos somente pelas tensões residuais que aparecem através de seus terminais durante a sobretensão transitória. As tensões residuais dependem da forma e do valor das correntes de condução. Centelhadores são dispositivos de proteção que se baseiam na rigidez dielétrica do ar do ambiente. Eram amplamente utilizados para proteção junto aos para-raios de carboneto de silício. Ao passar dos anos com um conhecimento mais avançado dos resistores de óxido metálico, denominados de para-

raios de Óxido de Zinco (ZnO), os centelhadores foram sendo descartados devido a elevada não linearidade na característica “tensão x corrente” dos elementos de ZnO, associadas à sua estabilidade térmica e a sua elevada capacidade de absorção de energia para sobretensões temporárias e transitórias (MOURA, 2020).

III. Capacidade de absorção de Energia

Os para-raios de Óxido de Zinco são mais suscetíveis a períodos de condução mais longos e mais frequentes durante as sobretensões se comparados aos para-raios convencionais por causa da ausência de centelhadores. Como estão permanentemente conectados ao sistema elétrico estão sempre conduzindo correntes que variam de 10^{-3} a 10^2 ampères, dependendo da amplitude da sobretensão transitória. A capacidade de absorção de energia tem que ser adequadamente especificada de forma a evitar consequências sérias aos equipamentos do sistema elétrico, incluindo os próprios para-raios de óxido metálico (VALERO, 2007).

A capacidade de absorção de energia de um para-raios está ligada a característica construtiva de suas pastilhas de óxido de zinco. Os para-raios de ZnO normalmente possuem capacidade de absorção de energia na faixa de 2 a 7 kJ/kV de sua tensão nominal (ZANETTA, 2003).

3.6.2. RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO

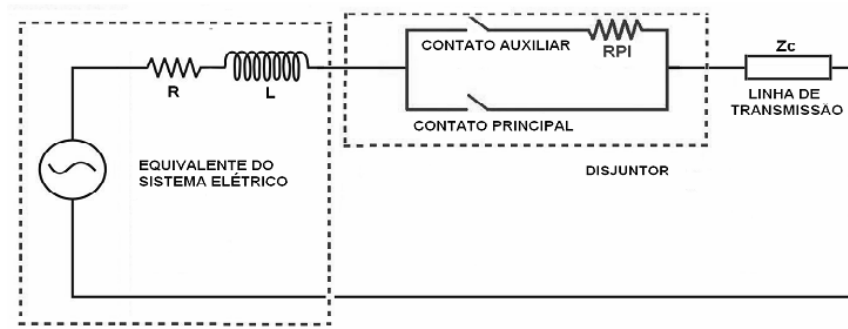
Os resistores de pré-inserção (RPI) em disjuntores, são um dos mais utilizados meios para se reduzir a amplitude das sobretensões transitórias geradas por manobras de chaveamento de linhas de transmissão. São instalados em paralelo com as câmaras dos disjuntores, um resistor para cada câmara.

A utilização dos resistores de pré-inserção com a finalidade de reduzir os níveis de sobretensão transitória consiste em uma energização em duas etapas. Na primeira etapa o fechamento é feito com o resistor inserido em série com o sistema criando assim um divisor de tensão. Com isso a tensão aplicada à linha é reduzida a um valor bem abaixo da tensão nominal. Na segunda etapa o resistor de pré-inserção é curto-circuitado e assim a tensão nominal é aplicada a linha (VIDIGAL, 2010).

O arranjo da atuação do resistor de pré-inserção, ilustrado na Figura 18, é tal que quando a linha de transmissão é inicialmente energizada fecha-se o contato auxiliar que

insere o resistor em série entre a fonte e a linha de transmissão. Ao inserir o resistor a tensão que seria imposta sobre a linha é dividida entre a linha e resistor. Após um breve período de tempo fecha-se o contato principal, curto-circuitando desta forma o resistor e trazendo para a linha a tensão plena da fonte.

Figura 18. Circuito simplificado do resistor de pré-inserção.



Fonte: (VALERO, 2007).

O valor do resistor de pré-inserção é normalmente especificado como próximo ao módulo da impedância característica da linha, e o tempo de ajuste para que o resistor de pré-inserção seja curto-circuitado deve ser maior que duas vezes o tempo de propagação da onda viajante até a extremidade remota da linha (VALERO, 2007).

Um outro fator que deve ser levado em conta no dimensionamento do resistor é a quantidade de energia dissipada. O aumento no valor do resistor, causa a diminuição da corrente que circula por ele, levando-o a absorver menos energia. Deve-se, portanto, selecionar um resistor igual àquele correspondente ao valor ótimo e que atenda as condições pré-determinadas de máxima sobretensão permitida e de energia dissipada (VALERO, 2007).

3.6.3. CHAVEAMENTO CONTROLADO

O método do chaveamento controlado consiste em fechar cada polo do disjuntor no instante em que cada tensão fase-terra passa pelo zero. Dessa forma os transitórios provocados por manobras podem ser consideravelmente reduzidos.

Os componentes principais de um chaveamento controlado são o disjuntor e o sincronizador propriamente dito. O sincronizador (ou controlador) é um dispositivo eletrônico que permite realizar a operação da manobra de energização em um ponto ótimo

da forma de onda de tensão. O princípio básico de funcionamento do sincronizador é reconhecer o padrão do seu sinal de referência e, prever o ponto ótimo da onda de tensão para a manobra do disjuntor (VALERO, 2007).

3.7. COMPENSAÇÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Em sistemas elétricos de potência, observa-se que um aumento no consumo de potência reativa há um declínio no valor da tensão na linha. Dessa forma, a relação entre potência reativa e tensão se caracteriza pela necessidade de equilíbrio (balanço) entre níveis de potência reativa solicitada pela carga e o nível de tensão na barra alimentadora.

Os problemas de subtensões e sobretensões podem ser resolvidos introduzindo no sistema mecanismos para o controle da tensão. Isso se dá, geralmente, por meio do ajuste da compensação reativa, ou seja, através da injeção e/ou absorção de reativos na rede.

I. *Compensação em Derivação*

A compensação em derivação tem por objetivo reduzir o efeito da capacitância shunt das linhas de transmissão através de reatores em derivação que absorvem energia reativa de sinal oposto. Empregam-se reatores indutivos para compensar as reatâncias capacitivas naturais das linhas. Neste tipo de compensação procura-se, principalmente, a redução do *Efeito Ferranti*, que é responsável pelo aumento da tensão no terminal receptor da linha em relação ao terminal emissor, quando a linha opera em vazio ou com baixa carga. O processo da utilização de reatores *shunt* na linha tem por funcionalidade também a diminuição do comprimento elétrico da linha, fazendo com que a linha se comporte como uma linha curta. Neste trabalho definiu-se que seriam alocadas em ambas as extremidades dos trechos da linha reatores indutivos, que serão dimensionados detalhadamente mais adiante.

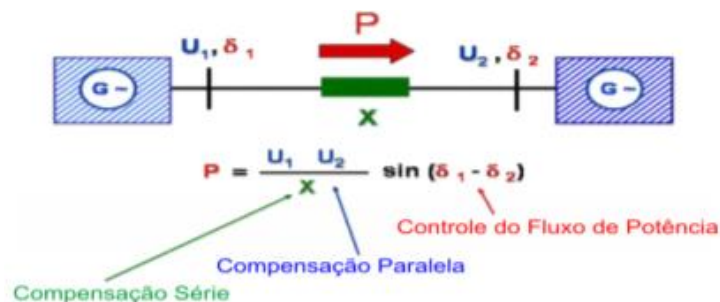
O *Efeito Ferranti* (E_f) é o aumento da tensão ao longo da linha onde a tensão de regime no terminal receptor da linha de transmissão é maior que no ponto inicial, trazendo assim problemas ao seu desempenho. O valor da sobretensão ocasionada pelo *Efeito Ferranti* nas linhas de transmissão pode ser calculada através da equação (36):

$$E_f = \frac{V_{SAÍDA EM ABERTO}}{V_{ENTRADA}} = \frac{1}{\cosh(\gamma.l)} \quad (36)$$

II. Compensação em Série

A reatância indutiva e a resistência, parâmetros série das linhas de transmissão, são os responsáveis pelas grandes quedas de tensão nas linhas, logo a compensação série eleva a estabilidade da rede através da redução da reatância indutiva da linha de transmissão, que é responsável pelo ângulo de potência da linha. São utilizados bancos de capacitores instalados em série com a linha de transmissão de forma a compensar a reatância indutiva da linha (LIMA et al. 2012). Elevando desta forma sua capacidade de transmissão nos regimes permanente e dinâmicos, conforme Figura 19, onde (U_1, δ_1) e (U_2, δ_2) representam respectivamente o módulo e o ângulo das tensões nas barras da fonte e da carga.

Figura 19. Princípio de funcionamento da compensação série



Fonte: LIMA, et al. 2012.

Estudos sobre estabilidade estática mostram que, se os parâmetros do regulador forem escolhidos corretamente, e no sistema de transmissão não ocorrer oscilação espontânea, o limite de potência e a estabilidade de operação serão altos. A análise da estabilidade transitória mostra que, quando há uma grande perturbação, no gerador ocorrerá um movimento brusco causado por seu torque de desequilíbrio. Quando a oscilação do ângulo relativo dos geradores exceder o limite determinado, o gerador perderá a sincronização e se tornará instável. Portanto, o princípio geral de melhorar a estabilidade e a capacidade da transmissão pode ser listado: Por um lado, melhorando tensão nos terminais do gerador, reduzindo a reatância do sistema e melhorando a tensão do sistema, o limite de potência do sistema de transmissão será elevado. Por outro lado, melhorando a estabilidade transitória, reduzindo a potência de desequilíbrio no eixo do rotor do gerador, reduzindo a aceleração relativa do rotor, a amplitude de oscilação do gerador será minimizada. Portanto, a tecnologia de compensação em série pode ser usada

para compensar parte da impedância série da linha de transmissão, diminuir a diferença de ângulo das extremidades da linha, reduzir a distância elétrica e aumentar o torque síncrono para otimizar a distribuição da corrente, melhorar o balanço de potência reativa, reduzir perda do sistema e, em seguida, melhorar a capacidade de transmissão e a estabilidade de operação (LIU, 2010).

Na Figura 20 é ilustrado um diagrama unifilar de um sistema de transmissão simplificado com compensação série:

Figura 20. Diagrama Unifilar sistema de compensação em série na transmissão



Fonte: (LIU, 2010).

Quando não há dispositivos de compensação em série na linha de transmissão e a resistência é ignorada, a potência de transmissão pode ser expressa pela equação (37):

$$P = \frac{U_1^* U_2^*}{X_L} \sin \delta = P_m^* \sin \delta \quad (37)$$

Onde,

$\delta = (\delta_1 - \delta_2)$ é a diferença angular das barras;

U_1^* e U_2^* tensões das barras;

P_m^* limite de potência de estabilidade do sistema de transmissão.

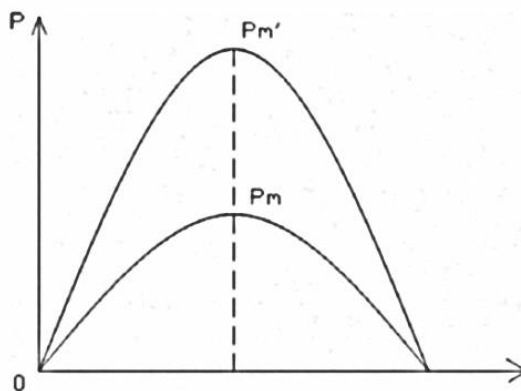
Considerando o elemento de compensação série da linha de transmissão, a potência de transmissão pode ser expressa pela equação (38):

$$P = \frac{U_1^* U_2^*}{(X_L - X_C)} \sin \delta = P_m'^* \sin \delta \quad (38)$$

O fluxo de potência do sistema de energia está em função da impedância da linha de transmissão, das amplitudes de tensão das extremidades da linha e da fase entre duas tensões das barras. A adição de capacitor na linha de transmissão pode compensar a queda de tensão do circuito causada pela reatância da linha e melhorar a estabilidade estática.

Com a redução da fase inicial, a estabilidade transitória também pode ser melhorada, como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21. Limite de potência da linha de transmissão



Fonte: (LIU, 2010).

Quando a compensação série é usada na linha de transmissão, embora a capacidade de transmissão possa ser melhorada, a característica de tensão do sistema de energia e linha de transmissão também é afetada. Devido à capacitância e indutância, ambos são dispositivos de armazenamento de energia, quando seu estado de trabalho muda causado pela operação e falha, haverá um processo de transição. No processo de transição, uma sobretensão que é várias vezes maior que a tensão de alimentação será produzida causando condições danosas ao sistema. Portanto, no sistema de transmissão UAT CA, a sobretensão operacional é um dos fatores mais importantes que afetam diretamente o nível de isolamento, o desempenho do sistema e o custo de fabricação (LIU, 2010).

Compensação série é um eficiente mecanismo para reduzir a reatância da linha e, assim, aumentar a transferência de potência do sistema, promovendo benefícios tanto econômicos quanto ambientais. Não obstante, ela apresenta alguns aspectos técnicos desfavoráveis (associados a graus de compensação mais elevados) de grande complexidade, os quais impõem limites à sua aplicação. Dentre as adversidades decorrentes da compensação série destacam-se:

- Ressonância subsíncrona;
- Inversões de tensão e de corrente;

- Tensões de restabelecimento transitórias intensificadas;
- Desequilíbrio entre impedâncias de fase; e
- Efeitos transitórios associados a manobras nos bancos.

Neste estudo os bancos de capacitores série foram dimensionados para compensar 50% da reatância série de toda a linha. Foi feito um estudo da melhor topologia para alocação do banco de capacitor série para diferentes casos. Esta comparação será melhor detalhada no capítulo seguinte.

3.8. RESUMO DO CAPÍTULO 3

Neste capítulo foram vistos os temas ligados ao estudo da energização de uma linha em ultra alta tensão, pôde ser visto que manobras de energização provocam sobretensões temporárias que embora sejam de curta duração podem provocar danos aos equipamentos do sistema ou ainda ocasionar falhas de isolamento. Após a manobra surgem ondas viajantes que proporcionam a elevação da tensão em vários pontos da linha de transmissão e os métodos vistos para supressão das sobretensões como a utilização de para-raios ao longo da linha, utilização de resistor de pré-inserção ou o método do chaveamento controlado, apresentam efeitos consistentes na supressão dos níveis de sobretensão na linha.

4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

4.1. DEFINIÇÃO DA TOPOLOGIA DE COMPENSAÇÃO

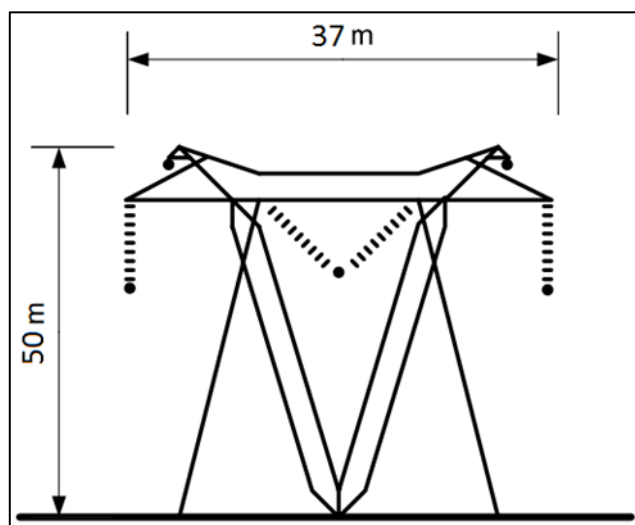
A. Considerações sobre a Linha

A metodologia aplicada aos estudos consiste em definir inicialmente o arranjo da compensação série e em derivação ao longo da linha de transmissão. Com o intuito de estudar um sistema consolidado e com parâmetros reais, foram utilizados os parâmetros elétricos da linha russa Ekibastuz-Kokchetav-Kustanai de 900 km dividida em três trechos (com 300 km cada) e quatro subestações, com um nível de tensão de 1000 kV (EPRI, 2005). Para esta linha de transmissão foi utilizada uma torre do tipo Guyed V com a configuração flat dos feixes de condutores. Na Tabela 3 estão descritos os dados das distâncias entre os condutores utilizados na torre, como também as características do condutor. As dimensões da torre e sua forma, podem ser vistos na Figura 22, bem como os dados e ilustração do condutor na Figura 23 (RODRIGUES, 2016).

Tabela 3. Parâmetros físicos da Torre e do condutor

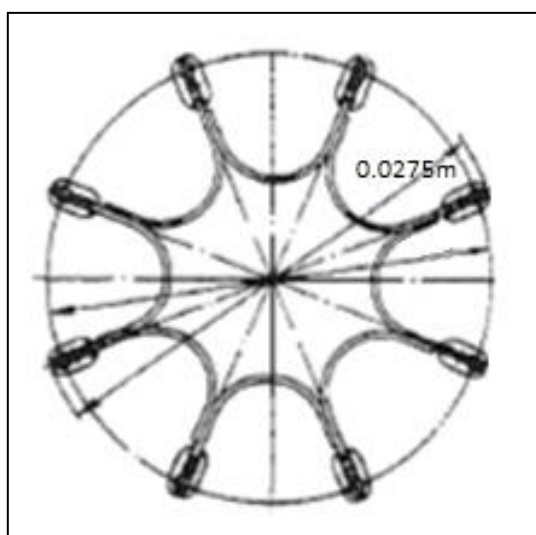
POSICIONAMENTO DE TORRE/CONDUTOR/PARA RAIOS			
Altura dos condutores (m)	Espaçamento horizontal entre condutores (m)	Altura relativa entre cabos para-raios e condutores (m)	Vão entre cabos para raios (m)
36,0	18,5	14,0	33,8
DADOS DO CONDUTOR			
Raio externo (m)	Altura do conductor no meio do vão (m)	Número de subcondutores	Configuração do feixe
0,0275	24,0	8	simétrica

Figura 22. Torre Guyed V para linha de transmissão em 1150 kV.



Fonte: (RODRIGUES, 2016).

Figura 23. Raio externo dos subcondutores.



Fonte: (RODRIGUES, 2016).

Nos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, o controle de reativo, em geral, é feito com a ajuda de dispositivos conectados à rede, que tenham a característica de gerar e/ou absorver reativos (REZENDE, 2013). Os parâmetros elétricos da linha foram obtidos por um algoritmo desenvolvido no MATLAB e os dados estão representados na Tabela 4 (RODRIGUES, 2016). A linha considerada possui uma potência natural de 4723,21 MVA e impedância de surto de 280 Ω .

Tabela 4. Parâmetro elétricos da linha teste

SEQUÊNCIA ZERO	SEQUÊNCIA POSITIVA
$Z_0 = 0.248 + j1.125 \, \Omega/\text{km}$	$Z_+ = 0.0095 + j0.34 \, \Omega/\text{km}$
$Y_0 = j2.689 \, \text{S}/\text{km}$	$Y_+ = j \, 4.349 \, \text{S}/\text{km}$

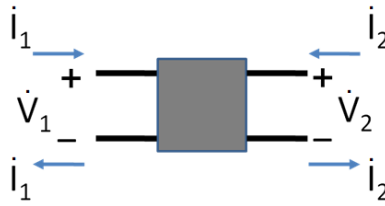
Nesta parte do trabalho foi utilizada a representação da linha por um quadripolo, que é amplamente utilizado, pelas características de simplicidade de cálculo e versatilidade que oferecem. Para o caso estudado, a linha se comporta como linha longa devido a sua extensão física.

O modelo ABCD, ilustrado na Figura 24, é definido a partir das equações de tensão e corrente como segue:

$$\dot{V}_1 = A\dot{V}_2 + B\dot{I}_2 \quad (39)$$

$$\dot{I}_1 = C\dot{V}_2 + D\dot{I}_2 \quad (40)$$

Figura 24. Quadripolo típico de linha e transmissão



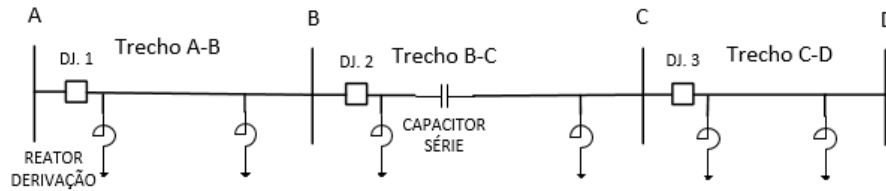
Fonte: Autor.

B. Estudo da topologia da compensação série

O primeiro ponto analisado foi a topologia da compensação série da linha. Foi definido um valor de compensação série de 50 % da reatância série total da linha. Foram estudados quatro casos com topologias diferentes. Para o Caso 1 foi considerado que a compensação série estaria localizada no início do Trecho B-C da linha de transmissão, como mostrado na Figura 25. No Caso 2, a compensação série foi alocada ao final do Trecho B-C da linha, como mostrado na Figura 26. Outro caso analisado foi o Caso 3. Neste a compensação série foi alocada nos terminais do Trecho B-C da linha com metade da compensação total por terminal, como está ilustrado na Figura 27. E por último foi analisado o Caso 4. Neste a compensação série foi alocada nos extremos da linha de transmissão, com metade da compensação total para cada terminal como ilustrado na Figura 28. A compensação *shunt* foi alocada nos terminais de cada trecho da linha de

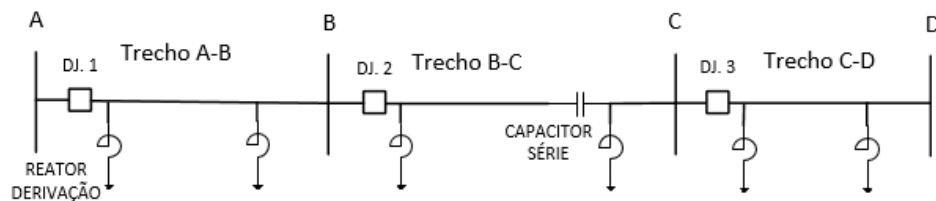
transmissão, tendo o seu nível de compensação variado de 70 % a 100 % da reatância *shunt* total da linha.

Figura 25. Unifilar Caso 1 com compensação série alocada no início do trecho B-C da linha.



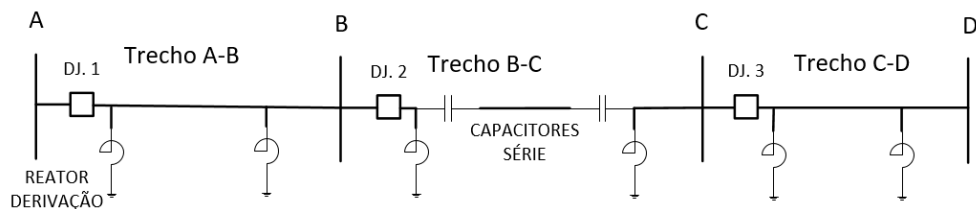
Fonte: Autor.

Figura 26. Unifilar Caso 2 com compensação série alocada no fim do trecho B-C da linha.



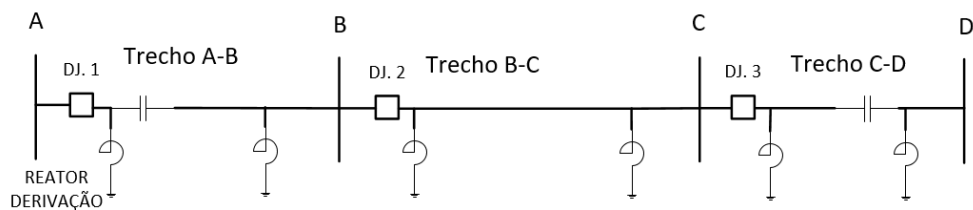
Fonte: Autor.

Figura 27. Unifilar Caso 3 com compensação série alocada nos terminais do Trecho B-C.



Fonte: Autor.

Figura 28. Unifilar Caso 4 com compensação série alocada no início do Trecho A-B e final do Trecho C-D.



Fonte: Autor.

Para a definição da topologia entre os casos estudados, foi analisado o ganho de tensão no terminal receptor da linha de transmissão em regime permanente. Como não há normas vigentes atuais no Brasil que regulem os limites de sobretensão em regime permanente para classes de UAT, foi definido como limites os valores pré-estabelecidos para sobretensões nos níveis de 765 kV (maior nível de tensão normatizado). Por norma o valor limite de sobretensão em regime permanente é de 1,046 pu (ONS, 2018).

Com o programa MATLAB foi calculada a rede a partir dos seus quadripolos correspondentes e calculados os ganhos de tensão em regime permanente para os quatro casos propostos juntamente com um caso em que não há compensação série, o qual foi denominado nas análises de Caso Shunt.

As simulações buscaram analisar as modificações dos casos juntos com as variações nos níveis de compensação shunt da linha e o comprimento da linha. Os resultados estão expostos nas Tabelas 5 a 7.

Tabela 5. Ganho de tensão para os casos propostos em uma linha de 900 km

Ganho para Linha com Compensação Reativa								
Sistema Convencional		Ganho de Tensão sem Compensação	Ganho de Tensão com Compensação					
L (km)	casos	V_2/V_1	Compens. 70%	Compens. 80%	Compens. 85%	Compens. 90%	Compens. 95%	Compens. 100%
900	shunt	2,180	1,209	1,132	1,096	1,062	1,030	1,000
	1		1,126	1,068	1,041	1,015	0,990	0,966
	2		1,213	1,146	1,115	1,085	1,057	1,029
	3		1,168	1,106	1,077	1,049	1,023	0,997
	4		1,169	1,106	1,077	1,049	1,023	0,997

Tabela 6. Ganho de tensão para os casos propostos em uma linha de 1000 km

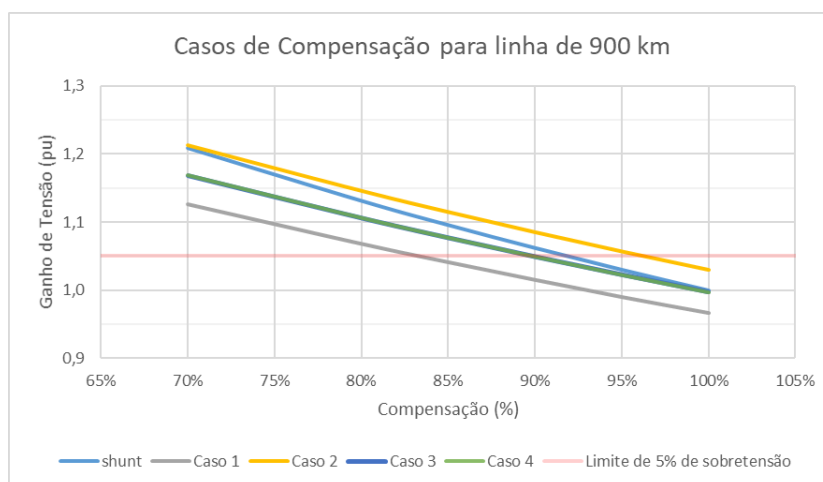
Ganho para Linha com Compensação Reativa								
Sistema Convencional		Ganho de Tensão sem Compensação	Ganho de Tensão com Compensação					
L (km)	casos	V_2/V_1	Compens. 70%	Compens. 80%	Compens. 85%	Compens. 90%	Compens. 95%	Compens. 100%
1000	shunt	2,876	1,268	1,166	1,120	1,078	1,038	1,000
	1		1,167	1,090	1,055	1,021	0,990	0,960
	2		1,277	1,185	1,143	1,104	1,067	1,033
	3		1,220	1,136	1,098	1,062	1,028	0,996
	4		1,217	1,134	1,096	1,060	1,026	0,994

Tabela 7. Ganho de tensão para os casos propostos em uma linha de 1200 km

Ganho para Linha com Compensação Reativa								
Sistema Convencional		Ganho de Tensão sem Compensação	Ganho de Tensão com Compensação					
L (km)	casos	V_2/V_1	Compens. 70%	Compens. 80%	Compens. 85%	Compens. 90%	Compens. 95%	Compens. 100%
1200	shunt	8,844	1,426	1,254	1,181	1,115	1,055	1,000
	1		1,279	1,151	1,095	1,044	0,997	0,953
	2		1,432	1,274	1,206	1,144	1,087	1,035
	3		1,351	1,210	1,149	1,092	1,041	0,993
	4		1,355	1,221	1,162	1,107	1,057	1,011

Para uma melhor análise dos dados obtidos através das simulações no programa MATLAB, representados pelas tabelas acima, foram construídos alguns gráficos que relacionam os casos e o ganho de tensão calculado para cada nível de compensação. Na Figura 29 é ilustrado o gráfico dos dados obtidos das simulações no MATLAB para uma linha de 900 km.

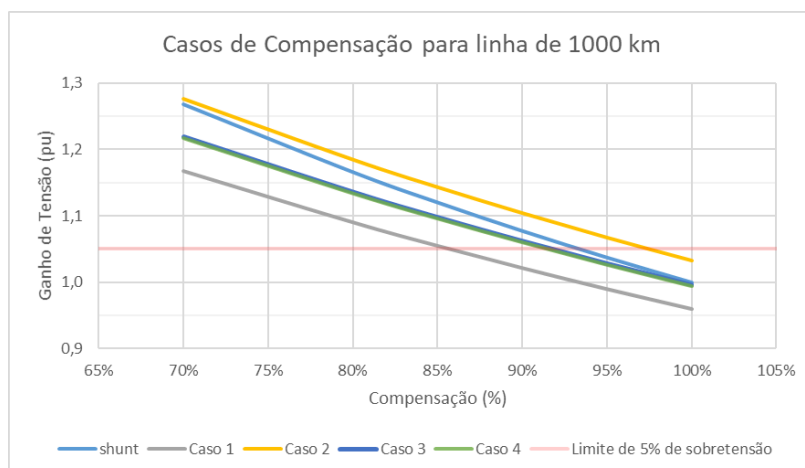
Figura 29. Casos de compensação para uma linha de 900 km



Fonte: Autor.

Na Figura 30 é ilustrado o gráfico dos dados simulados em MATLAB para uma linha com 1000 km.

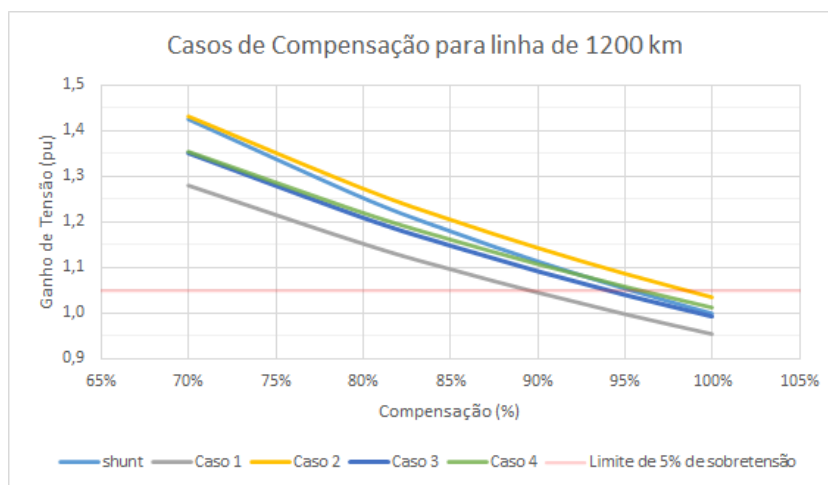
Figura 30. Casos de compensação para uma linha de 1000 km



Fonte: Autor.

Na Figura 31 é apresentado o gráfico resultante dos dados obtidos para a simulação dos casos em MATLAB para uma linha de 1200 km.

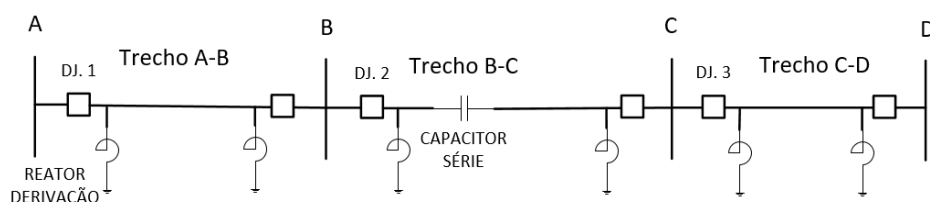
Figura 31. Casos de compensação para uma linha de 1200 km



Fonte: Autor.

A partir das análises dos resultados obtidos pelas simulações no programa MATLAB dos casos propostos, foi escolhida a topologia do Caso 1, por apresentar os melhores resultados, se comparado aos outros casos, dentro das variações de comprimento da linha e nível de compensação *shunt*. O Caso 1 apresenta os menores ganhos de tensão para cada nível de compensação *shunt* da rede simulada. Na Figura 32 é apresentada a topologia definida para o estudo das energizações da linha.

Figura 32. Topologia de compensação definida para os estudos.



Fonte: Autor.

4.2. NÍVEL DE COMPENSAÇÃO SHUNT

O software Matlab foi utilizado para definir o nível de compensação *shunt* da linha de transmissão. Foi analisado no software três diferentes comprimentos de linha com variações dos valores percentuais de compensação *shunt* dos trechos da linha, seguindo a topologia definida no item anterior.

Os valores de tensão representados na Tabela 8 foram obtidos das simulações no software. Onde analisou-se a sobretensão em regime permanente da linha para a variação do nível de compensação *shunt*, fixado o valor de compensação série de 50% da reatância série total da linha.

Tabela 8. Ganho de Tensão da linha com 50 % da compensação série variando o nível de compensação *shunt* para os diferentes valores de comprimento de 900 km a 1200 km.

Elevação da Tensão do lado Emissor para Linha com Compensação Reativa							
Sistema Convencional	Elevação da Tensão sem Compensação	Elevação da Tensão com Compensação					
L (km)	V_2/V_1	Compens. 70%	Compens. 80%	Compens. 85%	Compens. 90%	Compens. 95%	Compens. 100%
900	2,180	1,126	1,068	1,041	1,015	0,985	0,966
1000	2,876	1,167	1,090	1,055	1,021	0,990	0,982
1200	8,844	1,279	1,151	1,095	1,044	0,997	0,987

A partir dos dados obtidos através da simulação da energização da linha para os diferentes níveis de comprimento e variando assim também os níveis de compensação *shunt*, foi determinado que o nível de compensação *shunt* adotado para a linha de transmissão seria o de 90 %. Pois, para tal nível de compensação os valores de sobretensão, em regime permanente, estão dentro do limite estabelecido em projeto (± 5 % de sobretensão em regime permanente). Como não há normas vigentes no Brasil que regulem os limites de sobretensão em regime permanente para classes de tensões iguais ou superiores a 1000 kV, foi definido como limites os valores pré-estabelecidos para

sobretensões nos níveis de 765 kV (maior nível de tensão normalizado). Por norma o valor limite de sobretensão em regime permanente é de 1,046 em pu (ONS, 2018).

4.3. ENERGIZAÇÃO DA LINHA

A fim de estudar as sobretensões que ocorrem ao longo da linha de transmissão no instante da energização dos trechos de linha, foram utilizados os resultados obtidos nos itens anteriores e através do programa PSCAD foi modelada a linha de transmissão com base no método de Bergeron, para os diferentes níveis de tensão e valores de comprimento total da linha.

Simulando a manobra de energização através de uma distribuição estatística nos tempos de fechamento dos disjuntores, com o intuito de analisar os casos mais adversos e plotar as formas de ondas de tais casos. Foram analisadas 100 amostras com um tempo médio de fechamento de 70 ms e um desvio padrão de 1 ms.

A manobra de energização nesta linha de transmissão foi feita por trechos. Definido o intervalo de tempo de fechamento do primeiro trecho, o trecho seguinte foi fechado após um intervalo de tempo escolhido para que fosse feito após o regime permanente do trecho a montante ser alcançado. Sendo assim foram definidos os tempos de fechamentos dos disjuntores DJ2 e DJ3 sendo, 0,7 s e 1,4 s respectivamente, sendo que para o disjuntor DJ1 foi feito o chaveamento estatístico mencionado anteriormente.

4.3.1. Energização da linha de 1000 kV

A energização da linha foi feita a partir da extremidade inicial de cada trecho de linha, variando sistematicamente o instante de fechamento dos disjuntores e considerando inicialmente uma linha de transmissão com um nível de tensão de 1000 kV e variando o seu comprimento. Os comprimentos de linha são divididos em três trechos igualmente espaçados, diferente somente para a linha de 1000 km, que tem seus trechos da seguinte forma: Trecho A-B e Trecho B-C com 300 km cada, e o Trecho C-D com 400 km. A Tabela 9 ilustra as sobretensões máximas, em módulo, encontradas para cada trecho da linha.

Tabela 9. Valores de sobretensão transitória nos trechos de linha para um nível de tensão de 1000 kV e comprimentos de 900 km, 1000km e 1200 km. Valores calculados para uma tensão base de 816,5 kV.

Trecho	Subestação	Pico de Sobretensão (pu*)		
		Comprimento da Linha		
		900 (km)	1000 (km)	1200 (km)
A-B	A	1,568	1,567	1,488
	B	2,333	2,315	2,430
B-C	B	1,839	1,758	2,003
	C	1,933	1,813	1,763
C-D	C	1,552	1,594	1,477
	D	1,774	2,034	1,583

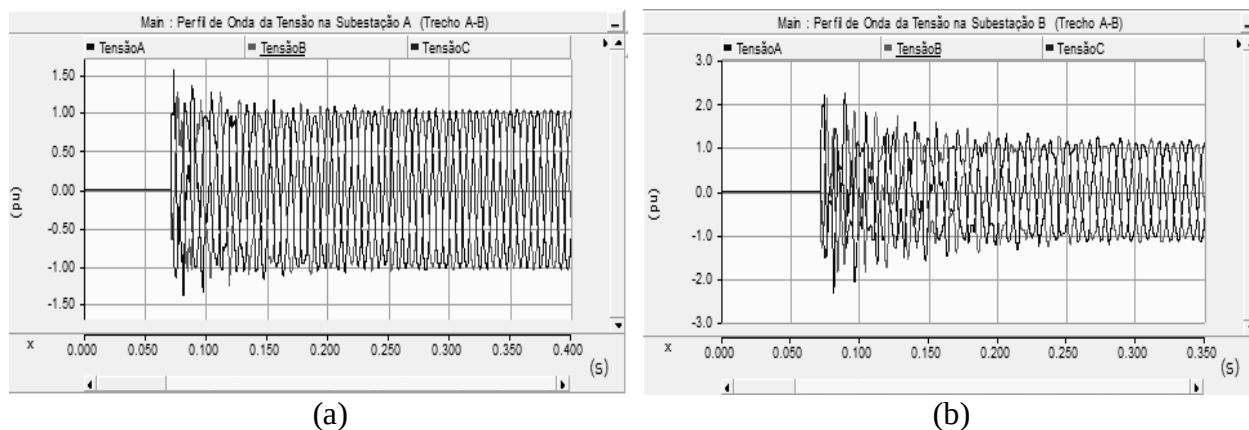
$$*V_{base} = 816,5 \text{ kV}$$

Pode-se observar, com base nos resultados da Tabela 9, que os maiores valores de sobretensões transitórias ocorrem no final da seção A-B quando a linha é energizada através da subestação A. Para os três comprimentos totais de linha, este é o ponto onde ocorrem os maiores valores de sobretensões transitórias devido a manobra de energização da linha.

A. Linha 1000 kV e 900 km

A Figura 33 descreve o comportamento da onda de tensão para o Trecho A-B nas subestações A e B, onde podem ser observadas as sobretensões na linha oriunda da manobra de energização do trecho, considerando o nível de tensão de 1000 kV e um comprimento total da linha de 900 km.

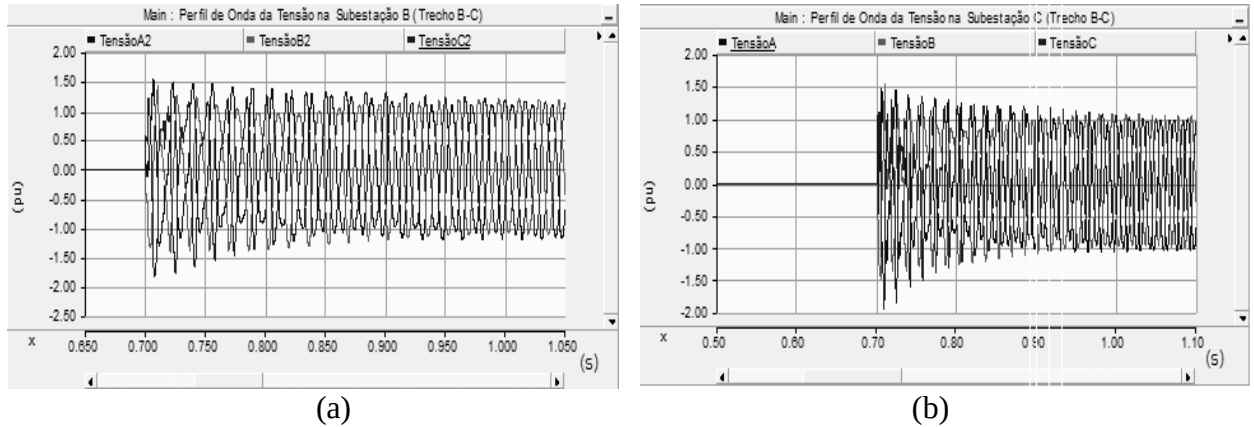
Figura 33. Energização do Trecho A-B da linha de 900 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão na subestação B.



Fonte: Autor.

O comportamento da onda de tensão para energização do Trecho B-C da linha nas subestações B e C podem ser observadas na Figura 34.

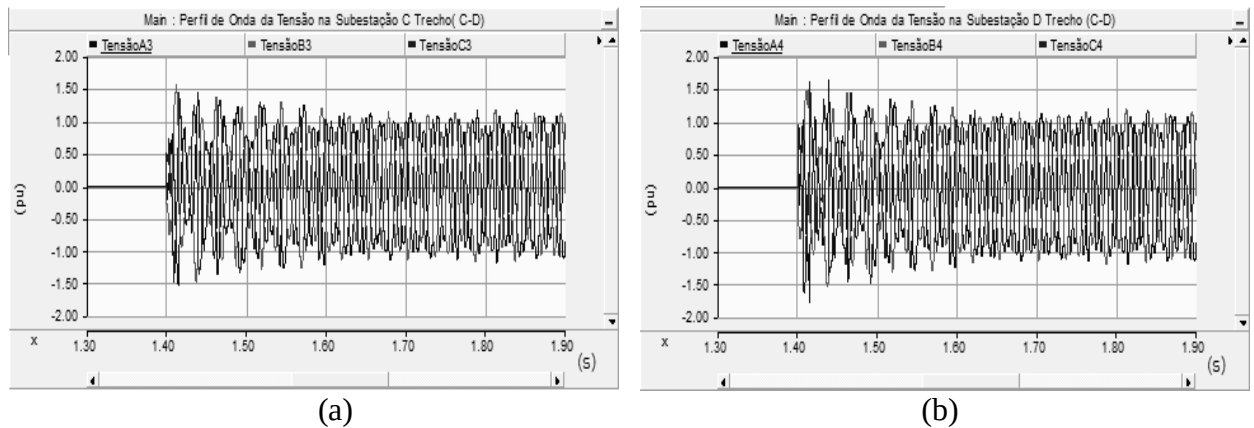
Figura 34. Energização do Trecho B-C da linha de 900 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão na subestação C.



Fonte: Autor.

Para energização do Trecho C-D, o comportamento da onda de tensão nas subestações C e D estão ilustradas na Figura 35.

Figura 35. Energização do Trecho C-D da linha de 900 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão na subestação D.



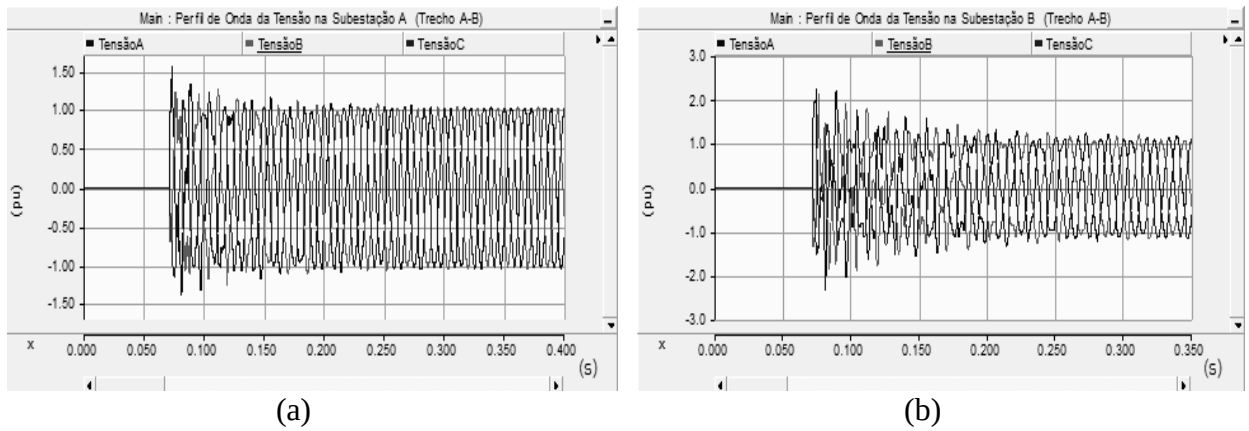
Fonte: Autor

B. Linha 1000 kV e 1000 km

A Figura 36 descreve o comportamento da onda de tensão no Trecho A-B nas subestações A e B, onde podem ser observadas as sobretensões na linha oriunda da manobra de energização do trecho, considerando o nível de tensão de 1000 kV e um

comprimento total da linha de 1000 km.

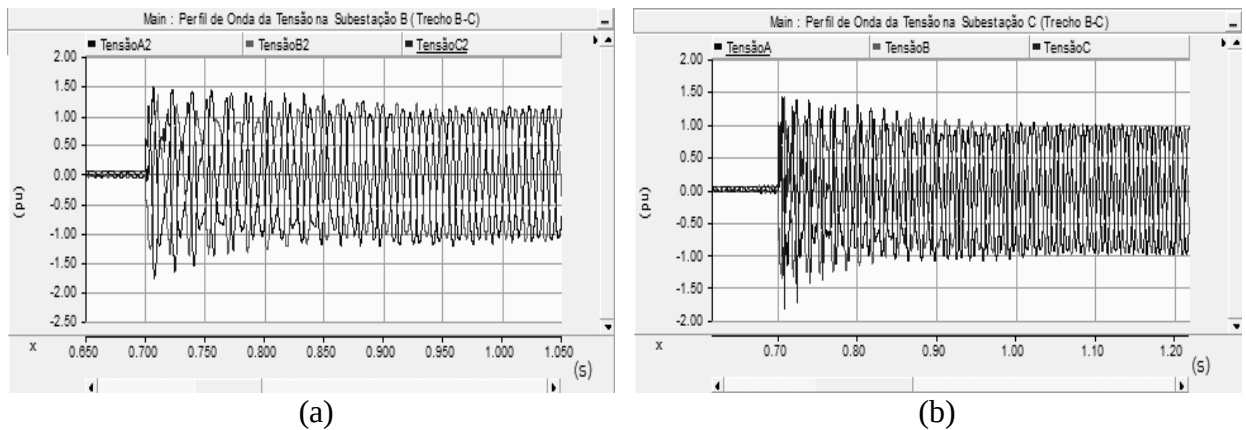
Figura 36. Energização do Trecho A-B da linha de 1000 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão na subestação B.



Fonte: Autor.

Na Figura 37 está ilustrado o comportamento da onda de tensão para energização do Trecho B-C da linha nas subestações B e C.

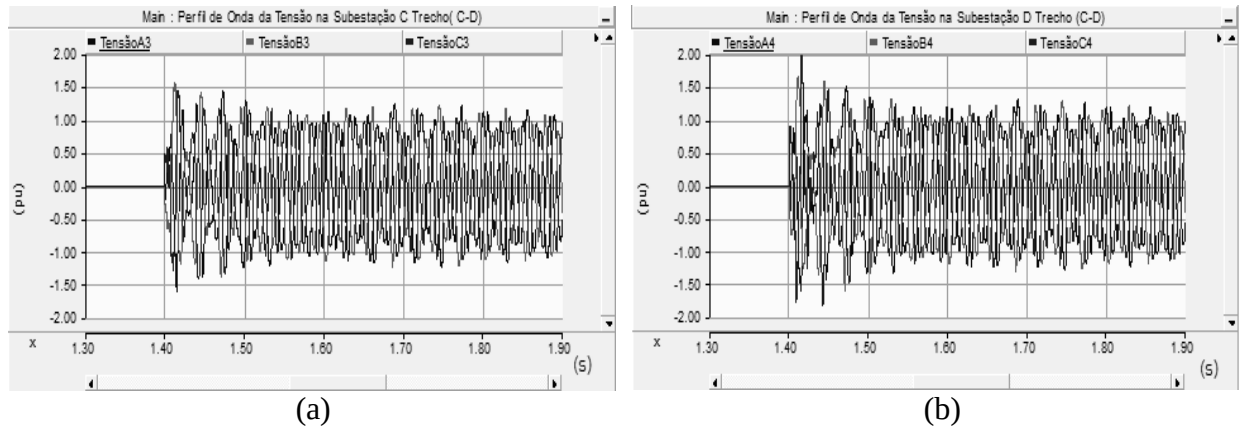
Figura 37. Energização do Trecho B-C da linha de 1000 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão na subestação C.



Fonte: Autor.

Para energização do Trecho C-D da linha, o comportamento da onda de tensão nas subestações C e D estão representadas na Figura 38.

Figura 38. Energização do Trecho C-D da linha de 1000 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão na subestação D.

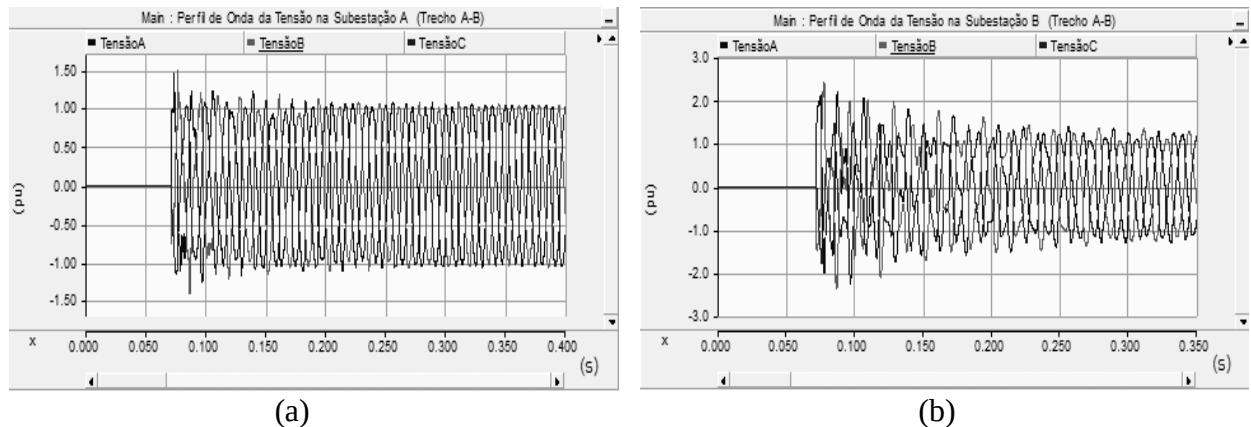


Fonte: Autor.

C. Linha 1000 kV e 1200 km

Considerando a linha de transmissão com nível de tensão de 1000 kV e comprimento total da linha de 1200 km, na Figura 39 pode ser observado o comportamento da onda de tensão no Trecho A-B nas subestações A e B, onde há sobretensões na linha oriundas da manobra de energização do trecho.

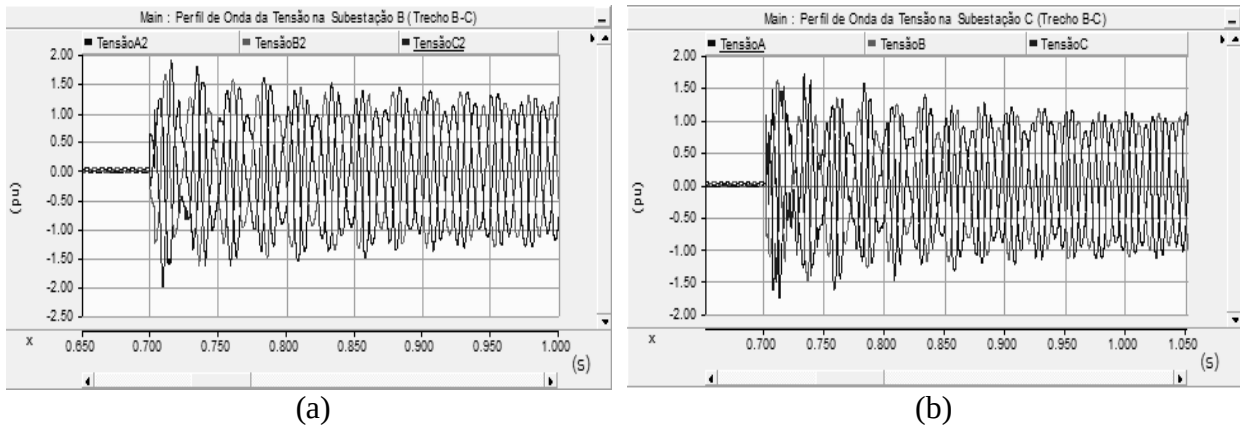
Figura 39. Energização do Trecho A-B da linha de 1200 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão na subestação B.



Fonte: Autor.

Na Figura 40 estão ilustradas as sobretensões nas subestações B e C oriundas da energização do Trecho B-C da linha de transmissão.

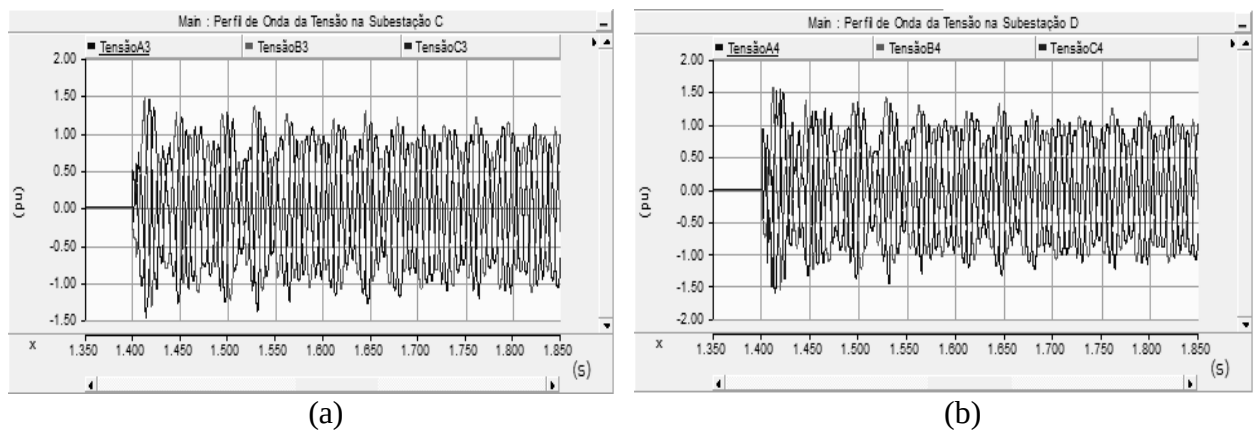
Figura 40. Energização do Trecho B-C da linha de 1200 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão na subestação C.



Fonte: Autor.

Para energização do Trecho C-D da linha, o comportamento da onda de tensão nas subestações C e D estão representadas na Figura 41.

Figura 41. Energização do Trecho C-D da linha de 1200 km em 1000 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão na subestação D.



Fonte: Autor.

4.3.2. Energização da linha de 1150 kV

Modificando o nível de tensão para 1150 kV e com a mesma variação de comprimento da linha, o resultado das sobretensões máximas encontradas ao longo da linha é apresentado na Tabela 10.

Assim como as simulações anteriores, para um nível de tensão de 1000 kV, o comportamento das sobretensões transitórias é semelhante, sendo o final do primeiro trecho A-B da linha o ponto onde são encontrados os maiores valores das sobretensões.

Tabela 10. Valores de sobretensão transitória nos trechos de linha para um nível de tensão de 1150 kV e comprimentos de 900 km, 1000km e 1200 km, valores calculados para uma tensão base de fase de 939 kV

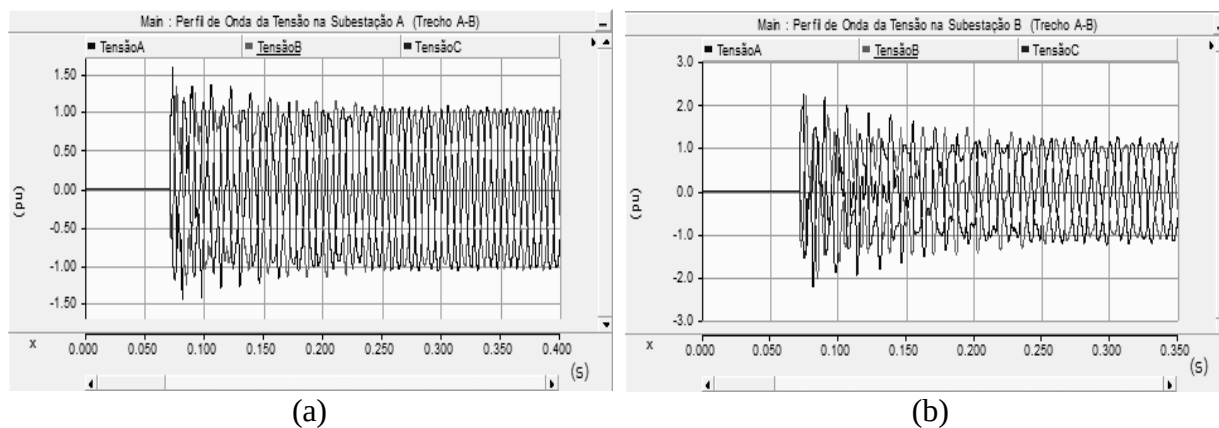
Trecho	Subestação	Pico de Sobretensão (pu*)		
		Comprimento da Linha		
		900 (km)	1000 (km)	1200 (km)
A-B	A	1,571	1,567	1,491
	B	2,234	2,230	2,621
B-C	B	1,861	1,775	1,956
	C	1,947	1,856	1,781
C-D	C	1,544	1,598	1,496
	D	1,753	2,033	1,595

$$*V_{base} = 939 \text{ kV}$$

A. Linha 1150 kV com 900 km

A Figura 42 descreve o comportamento da onda de tensão para o Trecho A-B nas subestações A e B, onde podem ser observadas as sobretensões na linha oriunda da manobra de energização do trecho, considerando o nível de tensão de 1150 kV e um comprimento total da linha de 900 km.

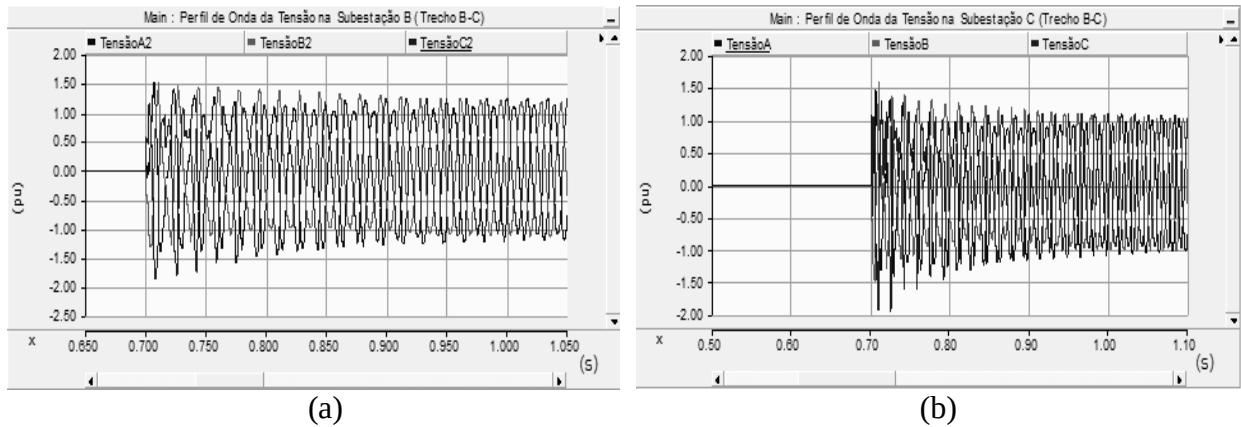
Figura 42. Energização do Trecho A-B da linha de 900 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão na subestação B.



Fonte: Autor.

Na Figura 43 estão ilustradas as sobretensões nas subestações B e C oriundas da energização do Trecho B-C da linha de transmissão.

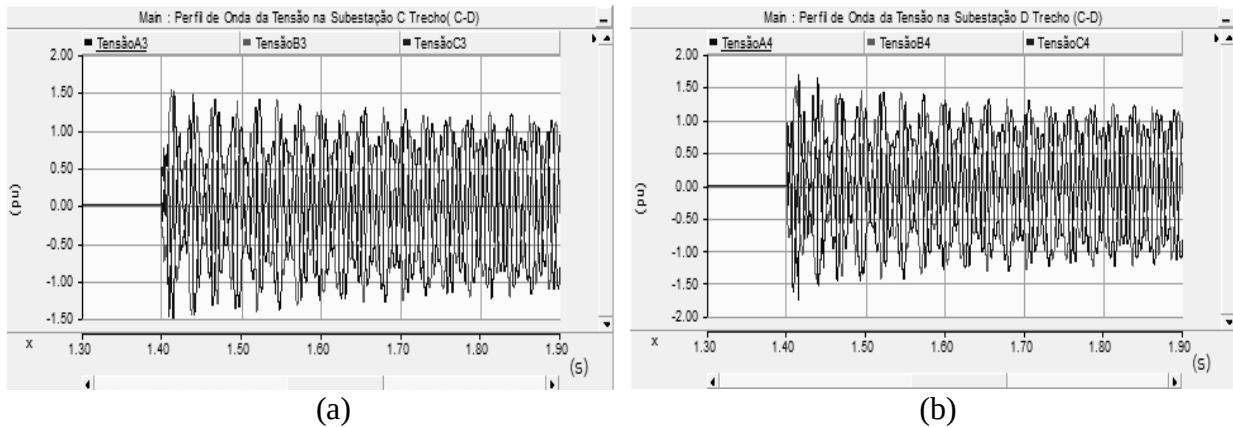
Figura 43. Energização do Trecho B-C da linha de 900 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão na subestação C.



Fonte: Autor.

Para energização do Trecho C-D da linha, o comportamento da onda de tensão nas subestações C e D estão representadas na Figura 44.

Figura 44. Energização do Trecho C-D da linha de 900 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão na subestação D.

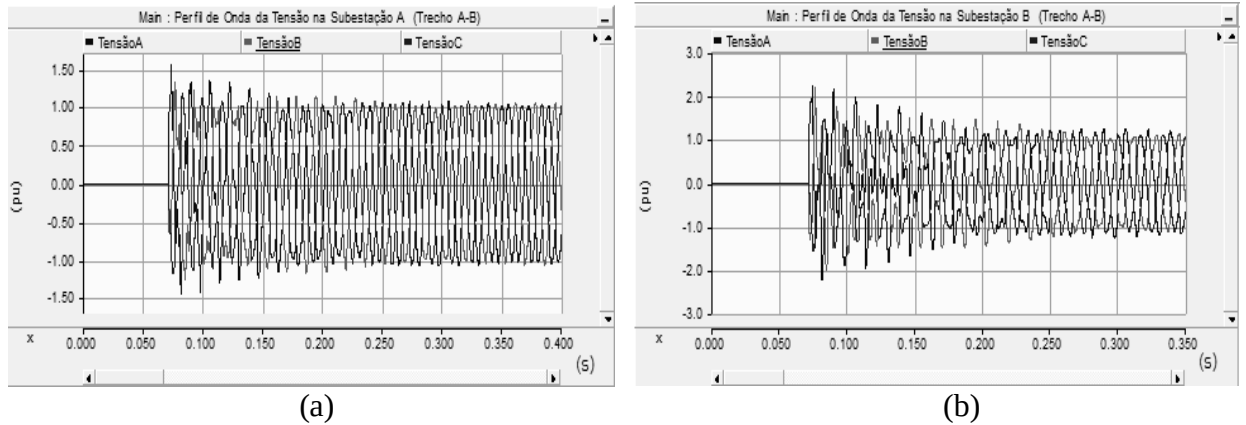


Fonte: Autor.

B. Linha 1150 kV com 1000 km

Na Figura 45 podem ser observadas as sobretensões nas subestações A e B para energização do Trecho A-B da linha, para um nível de tensão de 1150 kV e comprimento total de 1000 km.

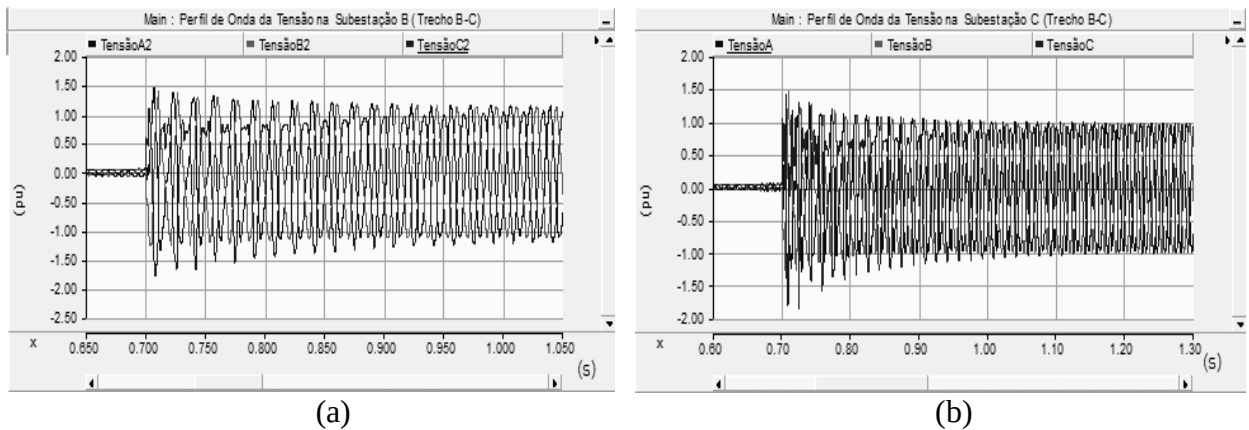
Figura 45. Energização do Trecho A-B da linha de 1000 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão na subestação B.



Fonte: Autor.

Na Figura 46 estão ilustradas as sobretensões nas subestações B e C oriundas da energização do Trecho B-C da linha de transmissão.

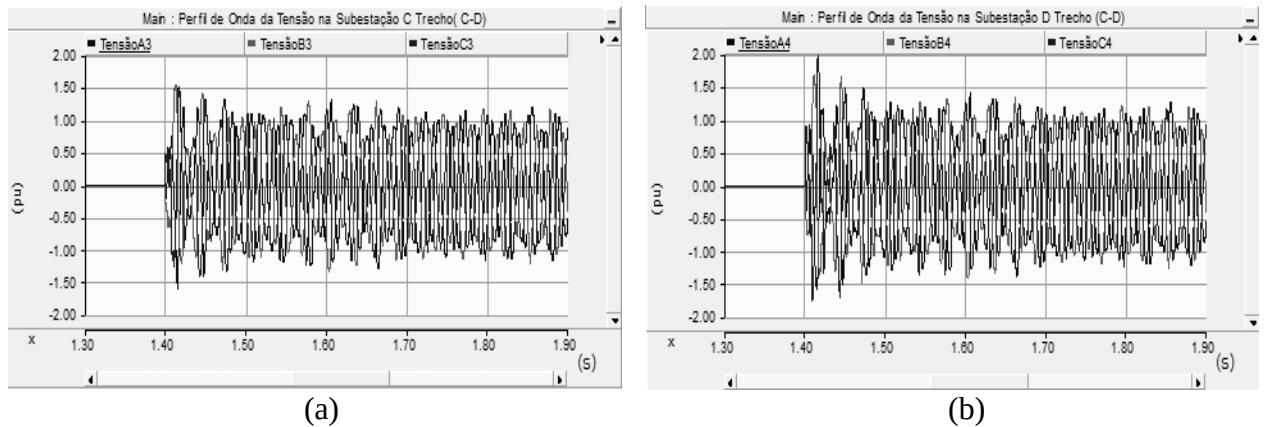
Figura 46. Energização do Trecho B-C da linha de 1000 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão na subestação C.



Fonte: Autor.

Para energização do Trecho C-D da linha, o comportamento da onda de tensão nas subestações C e D estão representadas na Figura 47 a seguir.

Figura 47. Energização do Trecho C-D da linha de 1000 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão na subestação D.

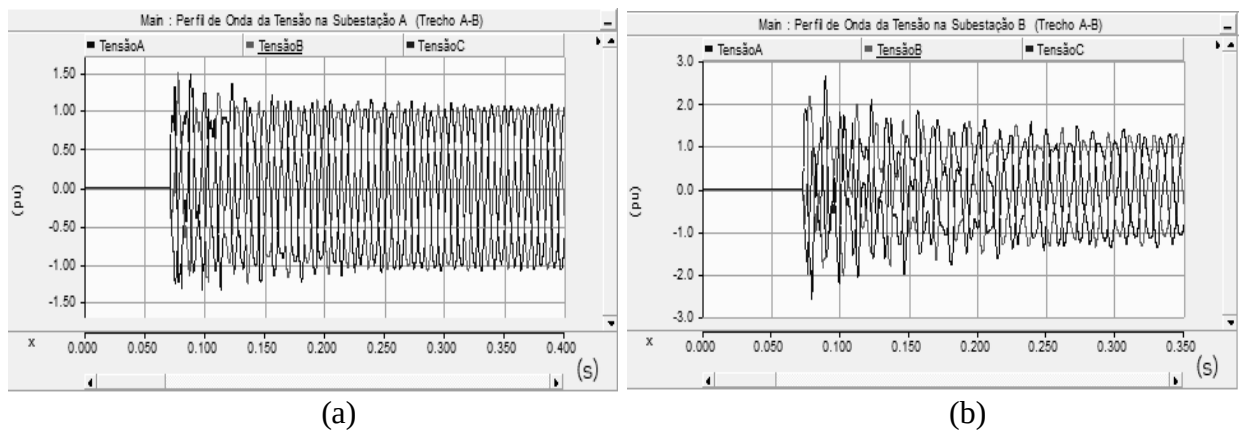


Fonte: Autor.

C. Linha de 1150 kV com 1200 km

Na Figura 48 podem ser observadas as sobretensões nas subestações A e B para energização do Trecho A-B da linha, para um nível de tensão de 1150 kV e comprimento total de 1200 km.

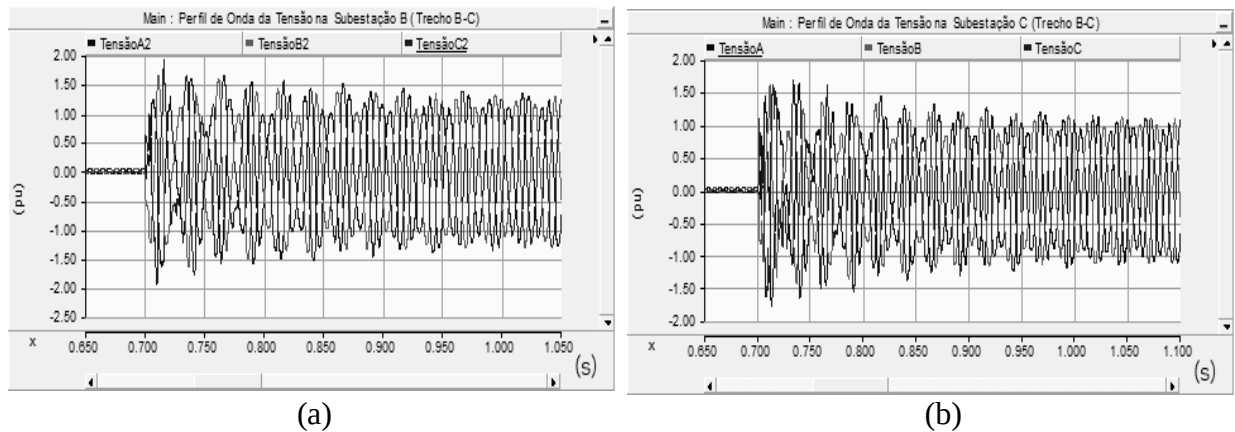
Figura 48. Energização do Trecho A-B da linha de 1200 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão na subestação B.



Fonte: Autor.

Na Figura 49 estão ilustradas as sobretensões nas subestações B e C oriundas da energização do Trecho B-C da linha de transmissão.

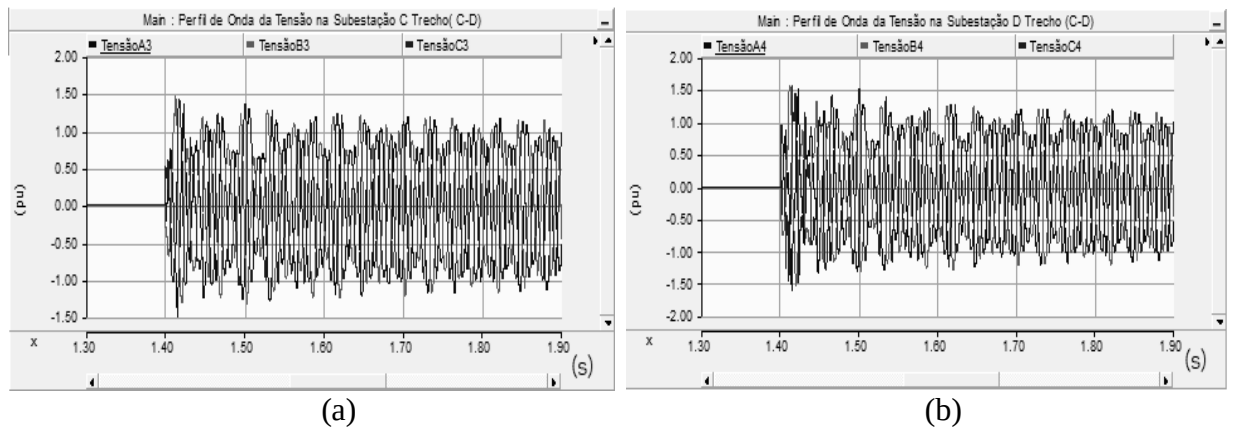
Figura 49. Energização do Trecho B-C da linha de 1200 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão na subestação C.



Fonte: Autor.

Para energização do Trecho C-D da linha, o comportamento da onda de tensão nas subestações C e D estão representadas na Figura 50 a seguir.

Figura 50. Energização do Trecho C-D da linha de 1200 km em 1150 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão na subestação D.



Fonte: Autor.

4.3.3. Energização da Linha de 1200 kV

Para um nível de tensão de 1200 kV e considerando as mesmas variações do comprimento da linha, as sobretensões máximas encontradas seguem o mesmo padrão encontrado nos resultados anteriores, como ilustrado na Tabela 11.

Tabela 11. Valores de sobretensão transitória nos trechos de linha para um nível de tensão de 1200 kV e comprimentos de 900 km, 1000km e 1200 km, valores calculados para uma tensão base de fase de 979,8 kV

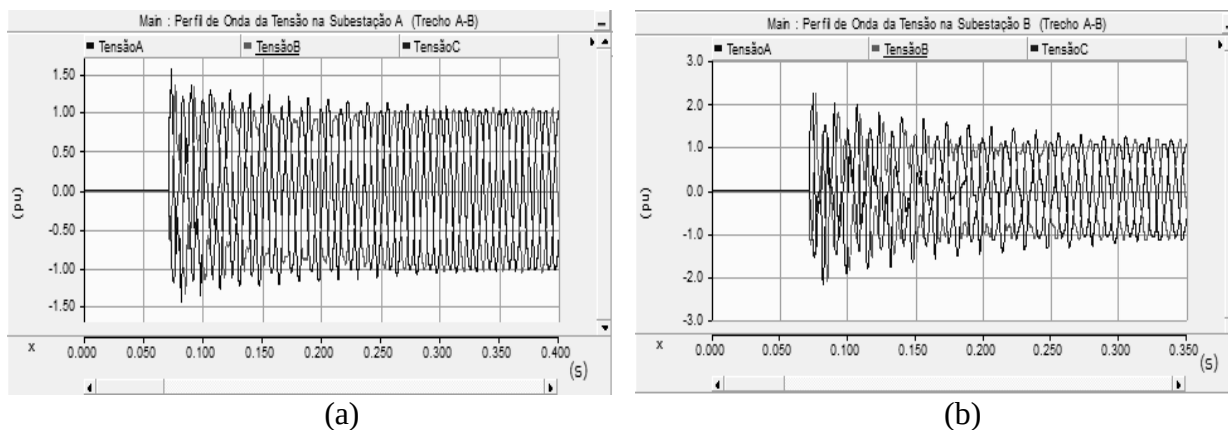
Trecho	Subestação	Pico de Sobretensão (pu*)		
		Comprimento da Linha		
		900 (km)	1000 (km)	1200 (km)
A-B	A	1,562	1,558	1,533
	B	2,222	2,215	2,661
B-C	B	1,856	1,769	1,942
	C	1,954	1,854	1,782
C-D	C	1,541	1,589	1,480
	D	1,734	2,018	1,575

$$*V_{base} = 979,8 \text{ kV}$$

A. Energização Linha 1200 kV com 900 km

A Figura 51 descreve o comportamento da onda de tensão para o Trecho A-B nas subestações A e B, onde podem ser observadas as sobretensões na linha oriunda da manobra de energização do trecho, considerando o nível de tensão de 1200 kV e um comprimento total da linha de 900 km.

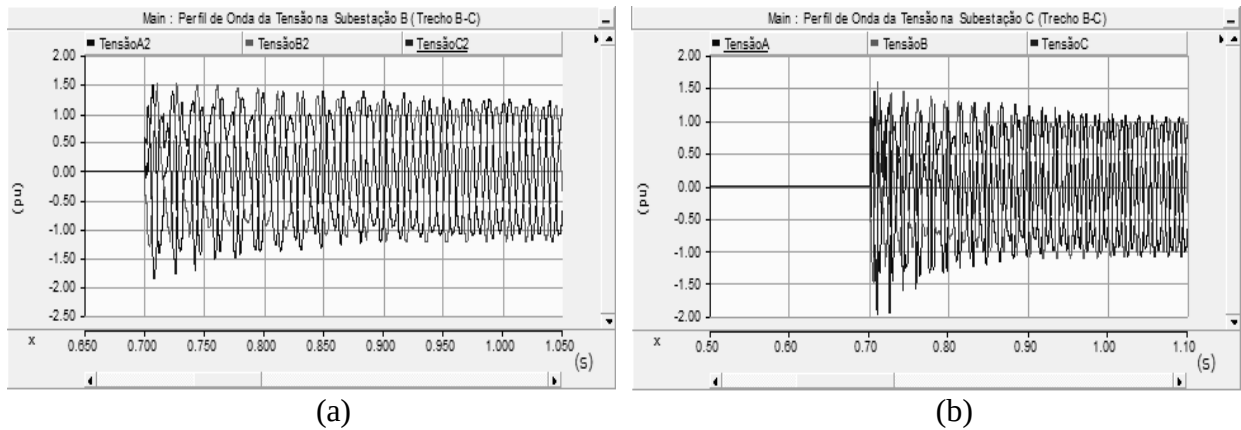
Figura 51. Energização do Trecho A-B da linha de 900 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão na subestação B.



Fonte: Autor.

Na Figura 52 estão ilustradas as sobretensões nas subestações B e C oriundas da energização do Trecho B-C da linha de transmissão.

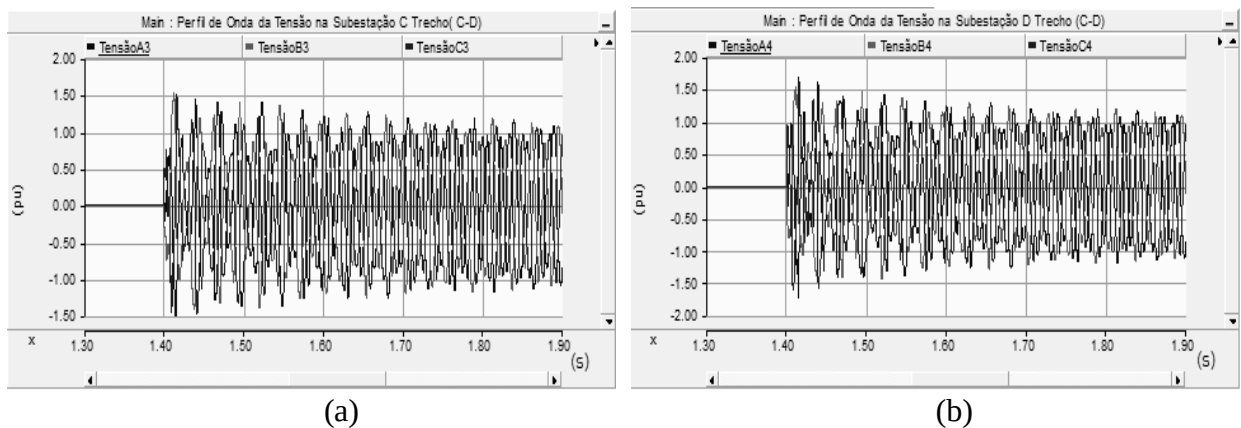
Figura 52. Energização do Trecho B-C da linha de 900 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão na subestação C.



Fonte: Autor.

Para energização do Trecho C-D da linha, o comportamento da onda de tensão nas subestações C e D estão representadas na Figura 53 a seguir.

Figura 53. Energização do Trecho C-D da linha de 900 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão na subestação D.

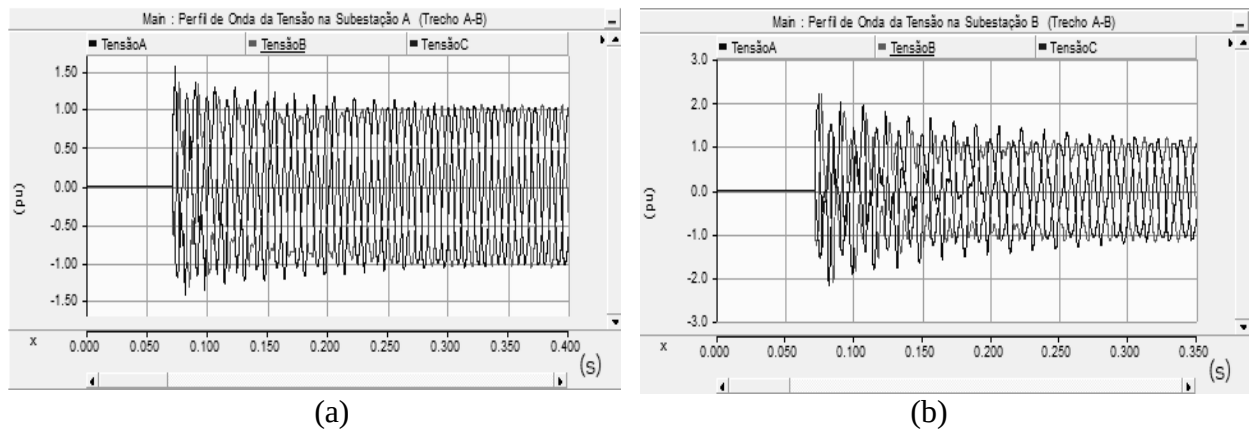


Fonte: Autor.

B. Energização da Linha de 1200 kV com 1000 km.

Na Figura 54 podem ser observadas as sobretensões nas subestações A e B para energização do Trecho A-B da linha, para um nível de tensão de 1200 kV e comprimento total de 1000 km.

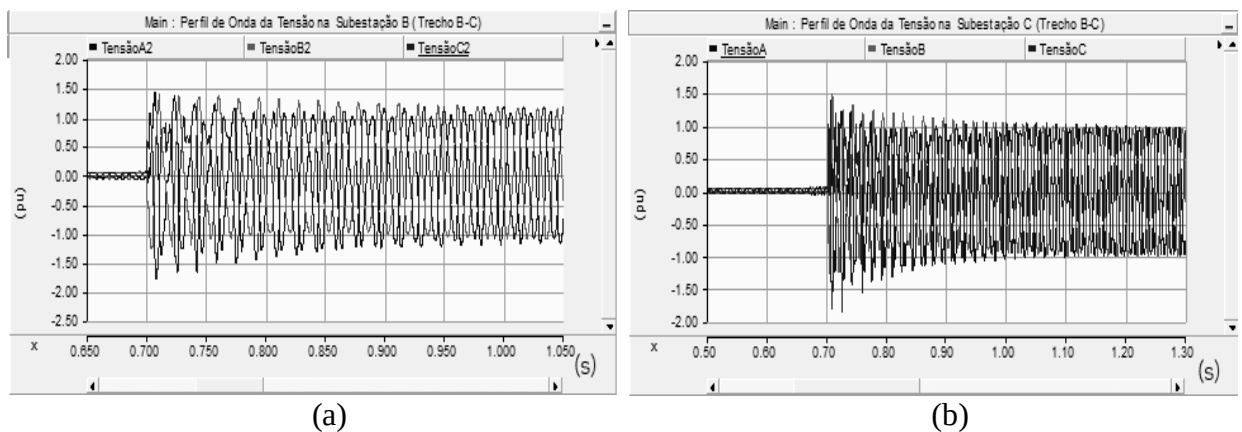
Figura 54. Energização do Trecho A-B da linha de 1000 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão na subestação B.



Fonte: Autor.

Na Figura 55 estão ilustradas as sobretensões nas subestações B e C oriundas da energização do Trecho B-C da linha de transmissão.

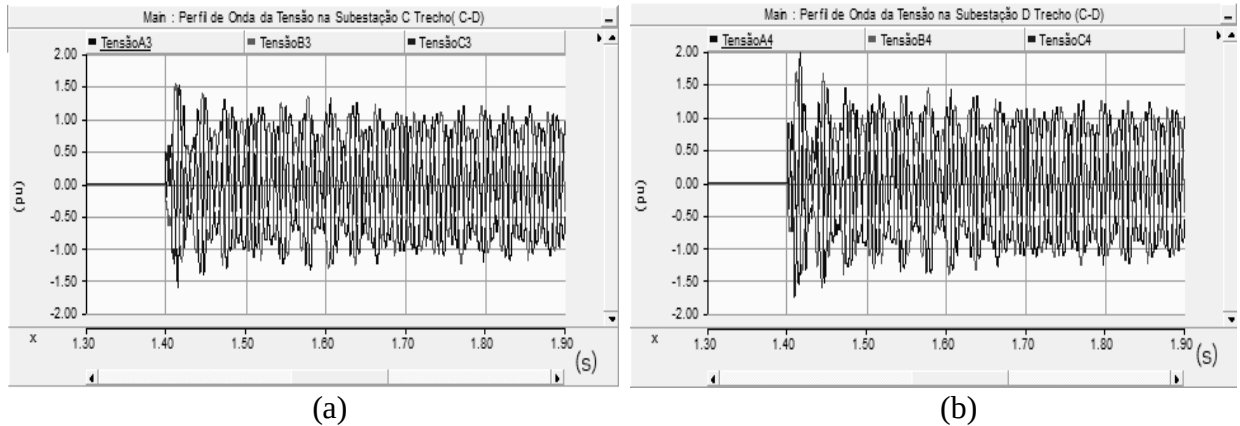
Figura 55. Energização do Trecho B-C da linha de 1000 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão na subestação C.



Fonte: Autor.

Para energização do Trecho C-D da linha, o comportamento da onda de tensão nas subestações C e D estão representadas na Figura 56 a seguir.

Figura 56. Energização do Trecho C-D da linha de 1000 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão na subestação D.

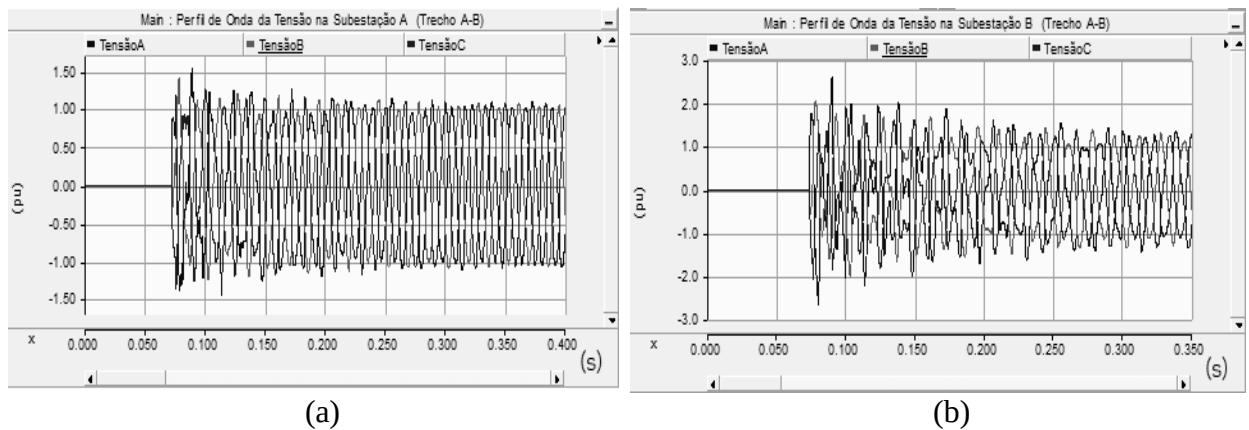


Fonte: Autor.

C. Energização da Linha de 1200 kV com 1200 km.

Na Figura 57 podem ser observadas as sobretensões nas subestações A e B para energização do Trecho A-B da linha, para um nível de tensão de 1200 kV e comprimento total de 1200 km.

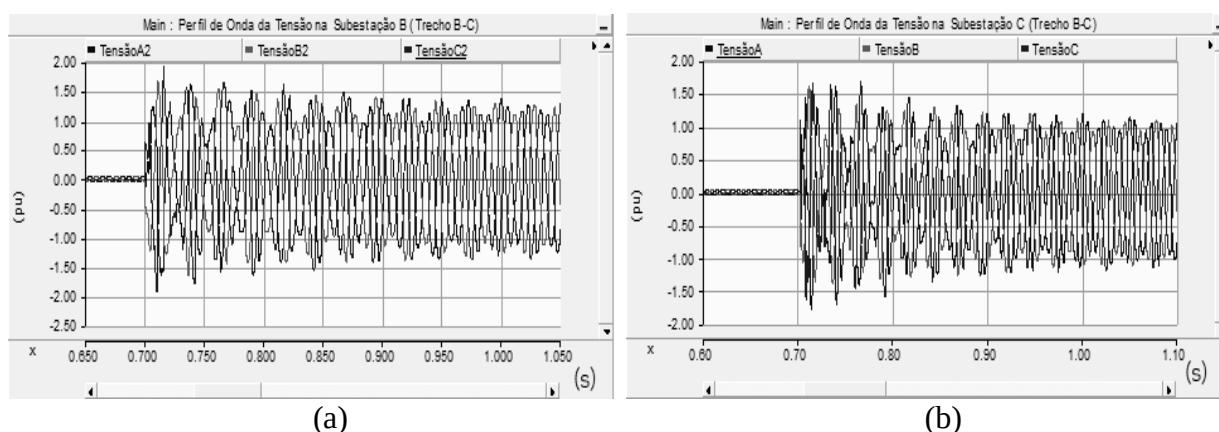
Figura 57. Energização do Trecho A-B da linha de 1200 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação A; (b) Sobretensão na subestação B.



Fonte: Autor.

Na Figura 58 estão ilustradas as sobretensões nas subestações B e C oriundas da energização do Trecho B-C da linha de transmissão.

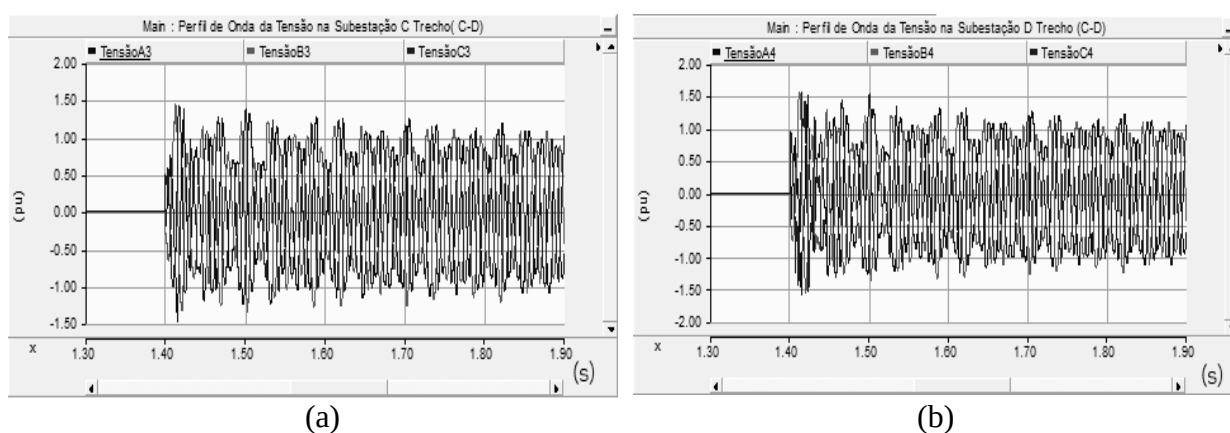
Figura 58. Energização do Trecho B-C da linha de 1200 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação B; (b) Sobretensão na subestação C.



Fonte: Autor.

Para energização do Trecho C-D da linha, o comportamento da onda de tensão nas subestações C e D estão representadas na Figura 59 a seguir.

Figura 59. Energização do Trecho C-D da linha de 1200 km em 1200 kV: (a) Sobretensão na subestação C; (b) Sobretensão na subestação D.



Fonte: Autor.

4.4. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS PARA SUPRESSÃO DA SOBRETENSÃO

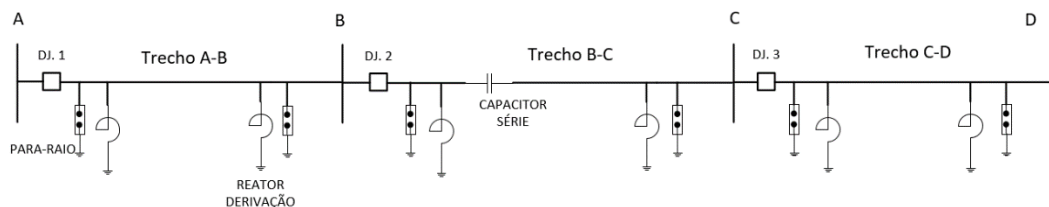
Após simulação das manobras de energização na linha de transmissão e observados os resultados obtidos na seção anterior, buscou-se analisar o efeito de métodos para mitigação das sobretensões transitórias ocorridas na linha. Fazendo assim uma comparação entre os resultados obtidos para cada método. Os métodos analisados foram, a inserção de para-raios nas extremidades de cada trecho de linha, a inserção de resistores de pré-inserção nos disjuntores e por último o chaveamento controlado.

4.4.1. PARA-RAIOS

Conforme mencionado anteriormente, os para-raios são, basicamente, resistores não lineares que fornecem um caminho de baixa impedância para a corrente de surto e que limitam os níveis de sobretensões a valores compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos que protegem (GIAROLA, 2016).

A eficiência dos dispositivos para-raios em mitigar os níveis de sobretensão transitória se deve a sua característica não linear. Entretanto, seus limites de absorção de energia não podem ser excedidos. Nos casos em estudo foram utilizados para-raios nos dois extremos de cada trecho da linha como mostra a Figura 60.

Figura 60. Linha de transmissão com para-raios instalados nos extremos de cada trecho da linha



Fonte: Autor.

Os dados dos para-raios utilizados para simulação foram extraídos do manual de equipamentos da ABB para um para-raio do modelo TEXLIM T-C. O para-raios possui uma tensão nominal em rms de 588 kV. Conforme manual, estes para-raios possuem um limite de absorção de energia no valor de 15 kJ/kV (ABB, 2019).

Os para-raios juntamente com os resistores de pré-inserção em disjuntores, são comumente adotados para controlar sobretensões de manobra em sistemas de extra-alta-tensão (EAT) e sistemas de UAT. Se os resistores de fechamento forem eliminados e apenas os para-raios forem utilizados, pode ser difícil atingir os níveis aceitáveis de sobretensão. Nos sistemas UAT, o requisito é ainda mais rigoroso, tornando mais difícil a eliminação dos resistores de fechamento. Uma das técnicas que pode ser utilizada é a redução do nível de proteção dos para-raios, o que pode ser alcançado pela redução da tensão residual dos para-raios. Além disso, a distribuição de para-raios ao longo da linha de transmissão é outra maneira de fazer uso dos mesmos para o controle de sobretensões de manobra (HE et al, 2012). No sistema de UAT na China, a tensão nominal dos para-raios é selecionada como 828 kV após considerações cuidadosas (GU et al, 2006). Valores

estes que serão utilizados como referência neste trabalho.

4.4.2. RESISTOR DE PRÉ-INSERÇÃO

A utilização dos resistores de pré-inserção com a finalidade de reduzir os níveis de sobretensão transitória consiste em uma energização em duas etapas. Na primeira etapa o fechamento é feito com o resistor inserido em série com o sistema criando assim um divisor de tensão. Com isso a tensão aplicada à linha é reduzida a um valor bem abaixo da tensão nominal. Na segunda etapa o resistor de pré-inserção é curto-circuitado e assim a tensão nominal é aplicada a linha (VIDIGAL, 2010).

Conforme previamente discutido, o valor do resistor de pré-inserção é normalmente especificado como próximo ao módulo da impedância característica da linha, e o tempo de ajuste para que o resistor de pré-inserção seja curto-circuitado deve ser maior que duas vezes o tempo de propagação da onda viajante até a extremidade remota da linha (VALERO, 2007).

Para as simulações de energização da linha com resistores de pré-inserção foi assumido neste trabalho um valor para o resistor de pré-inserção de $280\ \Omega$, instalado no disjuntor DJ. 1, valor este igual ao módulo da impedância característica da linha, e um tempo de ajuste para curto-circuito do resistor de 9 ms. Não foi considerada a inserção de resistores de pré-inserção nos disjuntores DJ.2 e DJ.3.

4.4.3. CHAVEAMENTO CONTROLADO

Como já mencionado no item de revisão bibliográfica, o método do chaveamento controlado consiste em fechar cada polo do disjuntor no instante em que cada tensão fase-terra passa pelo zero. Dessa forma os transitórios provocados por manobras podem ser consideravelmente reduzidos. Foi considerada a aplicação do método de uma forma representativa, onde foi analisado o comportamento do sinal referência e escolhidos os tempos de fechamento do disjuntor DJ.1 da linha de transmissão.

Os componentes principais de um chaveamento controlado são o disjuntor e o sincronizador propriamente dito. O sincronizador (ou controlador) é um dispositivo eletrônico que permite realizar a operação da manobra de energização em um ponto ótimo da onda de tensão. O princípio básico de funcionamento do sincronizador é reconhecer o padrão do seu sinal de referência e, prever o ponto ótimo da onda de tensão para a

manobra do disjuntor (VALERO, 2007; DANTAS et al., 2014).

4.4.4. RESULTADOS OBTIDOS

Dos resultados obtidos através das simulações de energização da linha feita no item anterior, foram escolhidos dois casos para simulação e comparação dos métodos de mitigação da sobretensão transitória. A primeira escolha foi o sistema inicialmente simulado da linha russa com comprimento de 900 km e nível de tensão de 1000kV, e o segundo caso escolhido foi para o modelo que apresentou a maior sobretensão transitória ao longo dos trechos de linha, sendo escolhido o caso da linha com nível de tensão de 1200 kV e comprimento de 1200 km (maior sobretensão máxima). A partir dos resultados simulados foram construídas tabelas, com intuito de uma melhor visualização dos efeitos nas sobretensões para cada método e facilidade para a análise futura dos dados.

O resultado das simulações dos métodos de inserção dos para-raios, resistores de pré-inserção e chaveamento controlado para uma linha com nível de tensão de 1000 kV e comprimento de 900 km, está representado na Tabela 12.

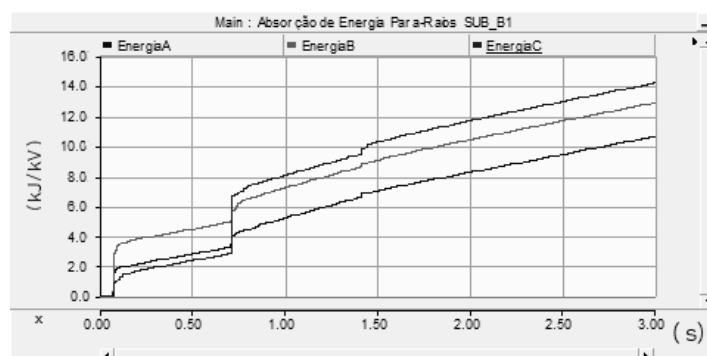
Tabela 12. Sobretensões máximas para uma linha com nível de tensão de 1000 kV e comprimento de 900 km, para os diferentes métodos de mitigação.

Pico de Sobretensão (pu*)				
Trecho	Subestação	Métodos de Mitigação		
		PARA-RAIOS	RESISTOR DE PRÉ-INserção	CHAVEAMENTO CONTROLADO
A-B	A	1,403	1,208	1,218
	B	1,439	1,387	1,756
B-C	B	1,439	1,286	1,399
	C	1,392	1,161	1,401
C-D	C	1,379	1,196	1,523
	D	1,392	1,236	1,543

$$*V_{base} = 816,5 \text{ kV}$$

Para o método utilizando somente os para-raios ao longo da linha, a energia absorvida pelos para-raios ficou dentro dos limites estabelecidos considerando o tempo de ocorrência dos transitórios. Sendo os para-raios instalados ao final do trecho A-B, os que tiveram os maiores valores de energia absorvida. Na Figura 61 é apresentado o gráfico da energia absorvida nos para-raios instalados no final do trecho A-B, onde o valor de energia absorvida pelo para-raios, em um tempo representativo entre a ocorrência do transitório e o sistema retornar ao regime permanente, ilustrado na Figura 33, os valores estão abaixo dos 15 kJ/kV.

Figura 61. Energia absorvida pelo para-raios instalados ao final do trecho A-B em cada fase (A, B e C) da linha de transmissão.



Fonte: Autor.

Nota-se, através da Figura 61, que a cada energização de trecho de linha, há um ganho em degrau na energia absorvida pelo para-raios, devido a modificação no comprimento da linha, interferindo assim na curva de energia absorvida pelo para-raios.

O resultado das simulações dos métodos de inserção dos para-raios, resistores de pré-inserção e chaveamento controlado para uma linha com nível de tensão de 1200 kV e comprimento de 1200 km, é apresentada na Tabela 13.

Tabela 13. Sobretensões máximas para uma linha com nível de tensão de 1200 kV e comprimento de 1200 km, com para-raios localizados no início e final de cada trecho de linha.

Pico de Sobretensão (pu*)				
Trecho	Subestação	Métodos de Mitigação		
		PARA-RAIOS	RESISTOR DE PRÉ-INserÇÃO	CHAVEAMENTO CONTROLADO
A-B	A	1,587	1,352	1,350
	B	1,713	1,652	2,122
B-C	B	1,688	1,416	1,576
	C	1,646	1,251	1,484
C-D	C	1,476	1,197	1,484
	D	1,563	1,244	1,535

$$*V_{base} = 979,8 \text{ kV}$$

Dos resultados obtidos, nota-se que de forma semelhante à simulação da linha de 900 km com nível de tensão de 1000 kV, o método que apresenta melhor resultado nesse caso é o resistor de pré-inserção.

Para a simulação da linha com nível de tensão de 1200 kV e comprimento de 1200 km, foi necessário estimar os valores da curva de tensão versus corrente para os para-raios, pois não foram encontrados dados para construção da curva de tensão versus corrente em nenhum manual de fabricantes comerciais para esta classe de tensão, logo o

ajuste foi feito tomando como base os dados da curva do para-raios da ABB utilizados anteriormente fazendo assim um ajuste nos valores da curva de tensão versus corrente proporcionais à mudança da classe de tensão, afim de atenderem aos valores do sistema requerido.

4.4.5. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS

No capítulo anterior foram demonstradas as simulações feitas em cada etapa do trabalho, bem como os resultados obtidos para cada simulação. Inicialmente discutiu-se a topologia de compensação da linha e pôde ser visto que, se comparado os casos propostos de topologia, aquele que apresentou melhor resultado, segundo aos níveis de sobretensão em regime permanente, foi o Caso 1, em que consideramos a inserção do capacitor série no início do Trecho B-C da linha.

Do estudo feito por (GONÇALVES, 2007) analisa-se que o compensador série pode ser instalado no centro ou nas extremidades da linha de transmissão. Ao se representar a linha compensada a partir de suas constantes generalizadas (A, B, C e D), verifica-se que a compensação é mais efetiva quando situada no centro da linha, uma vez que neste caso é obtida a máxima transferência de potência. Com efeito, para uma mesma transferência de potência, um compensador localizado no centro da linha necessita de um montante menor de potência reativa do que aquele localizado em uma das extremidades.

Dado que a eficiência da compensação série é determinada em função do comprimento da linha de transmissão, a diferença entre a instalação no centro da linha (arranjo mais eficaz) para a compensação em seus terminais aumenta para linhas mais extensas, como pode ser visto na Tabela 14.

Tabela 14. Eficiência da compensação série em função do comprimento da linha e de seu ponto de aplicação. Adaptada de: (ANDERSON; FARMER, 1996).

Comprimento da linha [km]	Eficiência da compensação nos terminais da linha [%]	Eficiência da compensação no centro da linha [%]	Diferença percentual entre cada arranjo [%]
400	86,9	93,5	7,59
500	79,9	89,9	12,52
600	71,4	85,7	20,03
700	62,2	80,9	30,06
800	51,2	77,6	51,56
900	39,7	69,9	76,07
1000	27,5	63,8	132,00

Apesar das vantagens, a instalação de bancos de capacitores em um ponto ao longo da linha distante de alguma subestação, exige sistemas complementares de transmissão

de dados para envio dos sinais de controle e proteção. Devido a localização distante das instalações da subestação, a compensação em um ponto ao longo da linha se torna uma instalação economicamente mais onerosa. Devido a isso, no presente trabalho foi escolhida a instalação do banco próxima a subestação B.

Com relação ao nível de compensação *shunt*, para os comprimentos de linha analisados e as determinadas variações da tensão, são mostrados na Tabela 8 o ganho de tensão da linha para os diferentes níveis de compensação reativa em derivação. Segundo esta tabela a partir de um nível de compensação de 90 % os ganhos de tensão ficam abaixo dos 1,046 pu ($\pm 5\%$ de sobretensão) para todos os casos propostos, valor aceitável para diminuir consideravelmente o Efeito Ferranti.

No processo da energização da linha, foi utilizado o método da energização por trechos por ser um método usualmente utilizado entre as distribuidoras de energia elétrica. Os resultados obtidos pela simulação da manobra demonstram que os maiores valores de sobretensões transitórias ocorrem no primeiro trecho de linha, a seção A-B, quando a linha é energizada através da subestação A. Os maiores níveis são encontrados ao final do trecho na subestação B, como pode ser visto nas Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11. Onde foram encontrados valores desde aproximados 2,2 pu. chegando a valores acima dos 2,6 pu. Este padrão foi encontrado para os diferentes níveis de tensão e valores de comprimento de linha.

No processo da comparação de métodos para supressão das sobretensões transitórias oriundas da manobra de energização da linha, dos resultados apresentados na Tabela 6 observa-se que os três métodos apresentam reduções significativas nas sobretensões transitórias. Pode-se observar, segundo as Tabela 12 e Tabela 13, que para o caso da energização da linha de transmissão com 90 % da compensação *shunt* e 50 % de compensação serie, a utilização de para-raios nas extremidades de cada trecho de linha apresentam um bom desempenho na redução das sobretensões. Para o caso de uma linha com tensão de 1000 kV e comprimento de 900 km foi alcançado um nível de sobretensão ao fim do Trecho A-B de 1,439 pu. Para a linha com nível de tensão de 1200 kV e comprimento de 1200 km, foi alcançado um valor de sobretensão de 1,713 pu, também ao final do trecho A-B, local onde foram observados os maiores níveis de sobretensão. O resistor de pré-inserção apresenta neste caso um melhor desempenho, se comparado aos outros dois métodos. Alcançando sobretensões ao final do Trecho A-B para a linha de

1000 kV e 900 km de 1,387 pu. e para a linha de 1200 kV e 1200 km de 1,652. No entanto, o resistor de pré-inserção tem duas restrições importantes. Primeiro, geralmente é muito caro. Para um disjuntor, o resistor de fechamento é responsável por uma parcela significativa do custo total. Segundo, o resistor de pré-inserção tem uma taxa de falha mais alta do que outros componentes, portanto a confiabilidade de todo o sistema é reduzida (HE et al. 2012). O chaveamento controlado reduziu os valores de sobretensão no fim do Trecho A-B para os casos da linha de 1000 kV com 900km e 1200 kV com 1200 km para 1,756 pu. e 2,122, respectivamente.

Da análise da absorção da energia pelos para-raios, observou-se que dentro do período da ocorrência da sobretenção até o momento em que a tensão volta ao regime (extinção da sobretenção transitória), o valor de energia absorvido pelos para-raios instalados ao final do Trecho A-B da linha é inferior ao limite estabelecido pelo fabricante de 15 kJ/kV.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita uma análise de sensibilidade de uma linha de transmissão em um sistema UAT, observando as modificações nos valores das sobretensões transitórias para a manobra de energização devido a variação dos níveis de tensão e do comprimento da linha, que foram variados de 1000 a 1200 kV e de 900 a 1200 km, respectivamente. Analisa-se assim também ao final, alguns métodos de mitigação para essa sobretensão transitória ocorrida.

O desenvolvimento e o uso da ultra-alta-tensão são inevitáveis. Existem muitos limites no ambiente de aplicação, fabricação de equipamentos e design de linha, mas ao mesmo tempo os benefícios que isso traz não podem ser ignorados. Pode melhorar a potência de transmissão, reduzir a queda de tensão da linha, melhorar a qualidade da tensão e melhorar a estabilidade do sistema. Assim, podemos aplicá-lo de maneira adequada e também prestar atenção aos problemas que possam ocorrer. A sobretensão da transmissão UAT é mais séria, podendo ser limitada pelo uso de métodos como para-raios, resistor de pré-inserção em disjuntores e chaveamento controlado, entre outros métodos que não foram destacados neste trabalho.

No estudo desenvolvido é definida uma topologia de compensação da linha onde utiliza-se uma porcentagem de compensação série de 50% da reatância série de toda linha e uma porcentagem de compensação em derivação de 90% da admitância em derivação da linha. Estes níveis de compensação mostraram-se eficientes, mantendo os valores de sobretensão em regime permanente dentro dos limites estabelecidos em norma.

Encontrou-se uma maior influência nas modificações dos valores de sobretensão transitórias oriundas da manobra de energização das linhas devido a alteração no seu comprimento, do que em relação aos níveis de tensão. A configuração de linha que apresentou menores sobretensões em pontos críticos foi para uma linha com comprimento de 900 km e nível de tensão de 1000 kV, já a configuração que apresentou maiores sobretensões em pontos críticos foi à linha com comprimento de 1200 km e nível de tensão de 1200 kV, onde foram realizados os estudos dos métodos para mitigação para tais sobretensões.

A partir dos resultados obtidos nas simulações, pode se afirmar que na manobra de energização do sistema estudado, o método que apresentou melhor resultado foi o resistor

de pré-inserção, que apesar de muito efetivo, apresenta altos custos de implementação e manutenção.

Os requerimentos de energia dos para-raios devido ao transitório de energização de linhas de transmissão são consideravelmente menores do que a capacidade térmica permitida segundo norma IEC e manual do fabricante, porém a tensão máxima de operação do sistema e as sobretensões temporárias devem ser cuidadosamente consideradas para a especificação dos para-raios.

Este estudo analisa algumas condições de comprimento e nível de tensão, porém os resultados apresentados neste estudo não devem ser generalizados. Cada sistema deve ser estudado de forma específica e com suas particularidades já que muitos parâmetros influem nas sobretensões transitórias de chaveamento, como a configuração da linha, comprimento da linha, resistividade do solo, grau de compensação em derivação, características dos para-raios e outros.

Para continuação e aprofundamento dos estudos elaborados, sugerem-se as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Avaliar comportamento das linhas longas em Ultra Alta Tensão para diferentes níveis de carga;
- Avaliar efeitos das manobras de energização nos bancos de capacitores em série nas linhas em UAT;
- Análise da energização da linha de transmissão sob condições de falta;
- Avaliação das sobretensões provocadas pelas manobras de rejeição de carga e religamento em linhas de UAT;
- Avaliar comportamento das linhas UAT para energização dos transformadores;
- Avaliar sobretensões transitórias oriundas de surtos atmosféricos em linhas em UAT.

6. REFERÊNCIAS

ABB. **High Voltage Surge Arrester – Buyer’s guide**. [Online], Disponível em: <http://new.abb.com/pt>. Acesso em: 17 out. 2019.

ANDREW. R. H., **Insulation Coordination for power systems**, Taylor & Francis group, LLC, 1999.

ANDERSON, P. M.; FARMER, R. G. **Series Compensation of Power Systems**. Encinitas, California, EUA: PBLSH! Inc., 1996.

AQUINO, A. F. C. et al. **Modelagem e visualização de surtos em linhas de transmissão**. XVI SNPTEE. Campinas-SP. 2001.

ARAUJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagneticos em Sistemas de Energia**. 1. ed. Editora UFMG, 2005.

BORIN, P. O. F. **Influência de Feixes de Condutores em Linhas de Transmissão UAT CA**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade de Brasília, Brasília. 2015.

CEPEL – Centro de Pesquisa em Engenharia Elétrica – ELETROBRÁS. Laboratorio de Ultra-Alta-Tensão. Disponível em: http://cepel.br/pt_br/laboratorios-e-centros/menu/laboratorio-de-ultra-alta-tensao-externo.htm. Acesso em: 15.09.2020.

CIGRÉ WG A3.22, 2008. **TB 362: Technical Requirements for Substation Equipment Exceeding 800 kV**, s.l.: Cigré.

CONCEIÇÃO, R. G. et al. **Transmissão de energia elétrica em ultra alta tensão: o Complexo Hidrelétrico Belo Monte**. Revista Eletrônica Teccen, 2016 Jan./Jun.; 09 (1): 66-74.

DANTAS, K. M. C.; NEVES, W. L. A. and FERNANDES, D. "An Approach for Controlled Reclosing of Shunt-Compensated Transmission Lines," in IEEE

Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 3, pp. 1203-1211, June 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2289394.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Energia 2019- Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-52/topico-89/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202019.pdf>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2020.

EPRI. **AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above**, 3º ed. Electric power research institute (EPRI), Palo Alto, California. 2005.

FRANCO, J. L. et al. **Análise do Comportamento dos Para-raios de Óxido de Zinco (zno) sem Centelhadores Frente às sobretensões temporárias em função da quantidade de energia absorvida**. XXI SNPTTE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Florianopolis, SC, 2011.

GIAROLA B. N. **Análise da influência de para-raios nas sobretensões atmosféricas por descarga direta em linhas de transmissão considerando a variação dos parâmetros do solo com a frequência**. Dissertação Mestrado- Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del-Rei. 2016.

GONÇALVES, D. N. **Desempenho do Relé de Distância em Linhas de Transmissão Compensadas com TCSC**. 150 p. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, setembro 2007.

GU, D.; ZHOU, P.; XIU, M.; WANG, S.; DAI, M.; LOU, Y. **Study on overvoltage and insulation coordination for 1000 kV AC transmission system**. Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering, v. 32, p. 1-6, 2006.

GU, D.; ZHOU, P.; XIU, M.; DAI, M.; LOU, Y.; HE, H. **Overvoltage and insulation coordination for 1000 kV AC transmission system in China**. Euro. Trans. Electr. Power 2012.

HAFFNER, S. **Introdução aos Transitórios Eletromagnéticos.** Apostila
Transitório Eletromagnético – Universidade do Estado de Santa Catarina.
Disponível em: http://slhaffner.phpnet.us/transitorios_eletromagneticos/transitorios01.pdf. Acesso em: 11 de Setembro de 2019.

HE, J.; LI, C.; HU, J.; ZENG, R.; YUAN, J. **Elimination of Closing Resistors for Breakers in 1000-kV UHV System by Surge Arresters.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 27, no. 4, p. 2168-2175, 2012.

HUANG, D. ;RUAN J. ; YU S., **Overview of the recent developments of ultra high voltage AC transmission in China**, 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, 2008, pp. 1-9 .

HUANG, D. et al, **Ultra High Voltage Transmission in China: Developments, Current Status and Future Prospects**, in Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 3, pp. 555-583, March 2009, doi: 10.1109/JPROC.2009.2013613.

JARDINI, J. A. et al. **Alternativas não convencionais para a transmissão de energia elétrica – estado da arte.** Brasília: Goya, p. 447, 2011.

JARDINI, J. A. et al. **Electromagnetic Transients in a 1000 kV System.** IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA). Morelia, México, 2016.

JARDINI, J. A. et al. **Alternativas não convencionais para a transmissão de energia elétrica – estado da arte.** Brasília: Goya, p. 365, 2012.

LEÃO, R. P. S.; ALBUQUERQUE, I. C. **Simulação da Resposta ao Transitório de Chaveamento em Sistemas de Potência Usando PSPICE.** XVI SNPTEE, Campinas, São Paulo, 2001.

LIMA, M. C.; ALVES, F. R.; OLIVEIRA, A. L.; SILVA, L. P., LEMES, M. N.; SIEMENS, R. Q. **Aplicação de Bancos de Capacitores Série na Transmissão CA de Longa Distância: o Exemplo da Interligação Tucuruí – Macapá – Manaus.** SBSE, Goiânia, 2012.

LIU, Q. et al. **Studies on series compensation of UHV transmission line.** International Conference on Power System Technology, Hangzhou, p. 1-5, 2010.

LIU, Z. **Ultra-High Voltage AC/DC Grids.** 1. ed. Waltham: Academic Press. 2014.

MARTINHO, E. **Distúrbios da Energia Elétrica – qualidade de energia, conceitos, cuidados, soluções, normalização.** São Paulo: Érica, 2009. p. 140.

MOURA, G. C.; DIAS, J. G.; JUNIOR, P. A. M. **A Evolução dos Para-Raios.** Revista Pensar Engenharia. Disponível em : <http://revistapensar.com.br/engenharia/edicoes-anteriores/edi=6>. Acesso em: 15 de setembro de 2020.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: 07 de fevereiro de 2020.

ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Submódulo 23.3 Diretrizes e Critérios para Estudos Elétrico. 2018. Disponível em: <http://ons.org.br/>. Acesso em: 10 mai. 2020.

PIAO, J. **Discussion on the Problems of 1000kV UHV Transmission.** 7th International Conference on Education, Management, Information and Mechanical Engineering, 2017.

REZENDE, P. H. O.; SANTILHO, F. P.; VASCONSELOS, L. E.; SILVA, T. V. **Compensação de reativos em linhas de transmissão utilizando compensadores estáticos fixos.** XI CEEL, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

RODRIGUES, M. V. S.; ALCAHUAMAN, M. E. Z. **Características de uma Linha de Transmissão de Energia Elétrica em Ultra-Alta-Tensão**. 68ª Reunião Anual da SBPC. Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB). Porto Seguro, Bahia. 2016.

SANTOS, M. L. et al. **Power Transmission over Long Distances: Economic Comparison between HVDC and Half-Wavelength Line**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 29, no. 2, p. 502-509, Apr 2014. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2274333

SECTOR ELECTRICIDAD. 2016. Disponível em: <http://www.sectorelectricidad.com/15370/entra-en-servicio-2da-fase-del-sistema-1200kv-de-la-india-con-equipos-fabricados-en-el-mismo-pais/>. Acesso em: 20 de janeiro 2020.

SHU, Y.; HUANG, D.; HU, Y. **Construction of UHV Demonstration and Test Projects in China**, 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Wuhan, 2009, pp. 1-7, doi: 10.1109/APPEEC.2009.4918237.

SILVEIRA, P. O. **Planejamento de sistemas de transmissão em área com fonte de geração intermitente, apoiado no uso de tecnologias avançadas**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. p. 98.

VALERO, P. M. **Análise comparativa de técnicas de controle de sobretensões transitórias nas manobras de energização e religamento de linhas de transmissão**. Dissertação Mestrado em Engenharia Elétrica- Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2007.

VIDIGAL, R. F. **Análise do comportamento de uma linha de um pouco mais de meio comprimento de onda sob diferentes condições de operação em regime permanente e durante a manobra de energização**. Dissertação Mestrado- UNICAMP, Campinas, 2010.

XIE, X. et al. **Study on parameters design and corona characteristics test equivalent of grading rings for 1000kV UHV AC compact transmission line**, 2013

Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Shenzhen, 2013, pp. 638-642, doi: 10.1109/CEIDP.2013.6748236.

XUAN, L. et al. **UHV Capacitance Voltage Transformer Suitable for Series Compensation Platform**. China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2016), Xi'na, 2016.

ZANETTA, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. 1. ed. São Paulo: Edusp, 2003. v. 1, p. 420.

ZANETTA, L. C. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência**. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2006. v. 1, p. 312.