



**UNIVERSIDADE FEDERAL ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Análise do Acoplamento Eletromagnético Entre Linhas de
Classes 72,5 kV e 15 kV que Compartilham A Mesma Torre.**

Luana Batista Moraes

Itajubá

01 de dezembro de 2017

Luana Batista Moraes

**Análise do Acoplamento Eletromagnético Entre Linhas de
Classes 72,5 kV e 15 kV que Compartilham A Mesma Torre.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Sistemas Elétricos e Energia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto - UNIFEI

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Piantini - USP

Itajubá

01 de dezembro de 2017

Luana Batista Moraes

Análise do Acoplamento Eletromagnético Entre Linhas de Classes 72,5 kV e 15 kV que Compartilham A Mesma Torre.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Itajubá, 01 de dezembro de 2017:

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto - UNIFEI
Orientador

Prof. Dr. Alexandre Piantini - USP
Coorientador

Prof. Dr. Gustavo Paiva Lopes - UNIFEI
Professor

Prof. Dr. Airton Violin - UNIFEI
Professor

Itajubá

01 de dezembro de 2017

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente à HVEX e em especial ao Guilherme Ferraz e ao Renato Capelini, pela oportunidade de trabalhar no projeto de Pesquisa e Desenvolvimento intitulado "Compartilhamento de Estruturas de Linhas de Subtransmissão Classes 72,5 e 145 kV e Redes de Distribuição Classes 15, 25 e 36,2 kV - Estudos Mecânicos, de Transitórios e Modelos para Validação Técnica e Econômica" que deu origem a esta dissertação .

Aos professores Gustavo Paiva Lopes e Airton Violin que trabalharam comigo diretamente nos estudos e simulações desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto no atendimento imediato das minhas dificuldades, nos momentos de orientação na formação de conceito e revisão desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Alexandre Piantini pelo apoio durante todo mestrado e pela disponibilidade de me ajudar e sanar todas as minhas dúvidas e em tudo que eu precisava.

Resumo

Com o crescimento da demanda de energia elétrica em áreas densamente povoadas e sua consequente falta de espaço para faixas de servidão exclusivas, o compartilhamento de estruturas entre linhas de transmissão e de distribuição tem se tornado uma solução comumente utilizada, especialmente em países emergentes. Essa prática tem grande potencial na redução de investimentos para a construção de um novo ramal de distribuição, uma vez que as estruturas de transmissão se encontram em operação. Entretanto, a diferença nos níveis de tensão entre as linhas compartilhadas pode resultar em transitórios eletromagnéticos de intensidade elevada, principalmente na distribuição em média e baixa tensão. Neste aspecto, a avaliação de curtos-circuitos e manobras de energização na linha de transmissão é de grande importância. Desta forma, esta dissertação tem como objetivo avaliar os efeitos do acoplamento eletromagnético entre as redes de transmissão, distribuição em média tensão e baixa tensão, instaladas em estruturas de aço do tipo monotubular, que operam em uma área urbana. O caso em questão compreende a linha de transmissão em 69 kV que interliga as subestações de Nova Friburgo e Conselheiro Paulino, ambas de propriedade do Grupo Energisa e localizadas no município de Nova Friburgo – RJ. A linha de transmissão em questão possui comprimento de 8,6 km e compartilha suas estruturas com a rede de distribuição de 11,4 kV em um trecho de 3,82 km, incluindo trechos seccionados da rede de baixa tensão em 220/127 V.

Palavras-chave: Transitórios de Manobra, Compartilhamento de Estruturas, Acoplamento Eletromagnético, Linhas Multicircuitos.

Abstract

With the increasing demand in densely populated areas and the consequent lack of space for exclusive transmission line corridors, sharing structures between sub transmission and distribution lines has become a commonly used solution, especially in emerging countries. This practice has great potential to reduce investment and maximize the use of active lines with little impact, since the core infrastructure is already built. Unlike the case of two transmission line circuits symmetrically placed in relation to the tower and operating with the same voltage level, for which the cause and effect relationship is the same for both circuits (i.e., the circuits influence one another in the same way), but when the sharing involves sub transmission and distribution lines the effects of one circuit over the other are different. The sub transmission line has a much greater influence on the distribution circuit than is affected by it. This dissertation will assess the effect of the electromagnetic coupling between a conventional 69 kV line and a spacer cable distribution line rated 11.4 kV sharing the same structures. In order to quantify the impact of the 69 kV line on the medium voltage (MV) network, simulations were performed using the software ATP (Alternative Transient Program) considering steady state conditions and the occurrence of faults on the high-voltage line.

Key-words: Switching Transient, Sharing of Structures, Electromagnetic Coupling, Multicircuit Power Lines.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Perfil de torre com quatro circuitos de dois níveis de tensão diferentes (medidas em mm) [1].	7
Figura 2 – Cálculo do distúrbio de qualidade de energia devido a linhas próximas. Adaptado de [2].	8
Figura 3 – Diagrama unifilar utilizado na análise. Adaptado de [3].	9
Figura 4 – Linhas de transmissão de 220 kV KLI – NIZ e 110 kV KLI – POL instalados no mesmo suporte [3].	10
Figura 5 – Modelo de torre da utilizado na modelagem da linha. Adaptado de [4].	11
Figura 6 – Torres multi-circuitos. Adaptado de [5].	12
Figura 7 – Instalação das linhas de 69 e 24 kV na mesma estrutura. Adaptado de [6].	13
Figura 8 – Diagrama do sistema modelado no software ATP-EMTP. Adaptado de [6].	14
Figura 9 – Resumo das sobretensões em sistemas elétricos [7].	15
Figura 10 – Forma de Onda de um Impulso Atmosférico [8].	17
Figura 11 – Foto de estrutura com compartilhamento de circuitos.	20
Figura 12 – LT compartilhada – módulo típico representado [9].	21
Figura 13 – Diagrama Unifilar do Sistema de Nova Friburgo [9].	22
Figura 14 – Configuração base do subsistema em 69 / 11,4 kV.	23
Figura 15 – Perfil da torre típica e principais distâncias [9].	24
Figura 16 – Fluxo de potência da região de Nova Friburgo.	26
Figura 17 – Espaçador Losangular Classe 15kV.	29
Figura 18 – Transformador 69 kV/11,4 kV da SE Julius Arp.	30
Figura 19 – Transformador 69 kV/11,4 kV da SE Conselheiro Paulino.	30
Figura 20 – Para-Raio de 69 kV Instalado na Subestação Julius Arp - Nova Friburgo.	32
Figura 21 – Carregamento da SE Conselheiro Paulino.	33
Figura 22 – Carregamento da SE Julius Arp.	33
Figura 23 – Representação de cargas no programa ATP.	36
Figura 24 – Representação dos transformadores.	37
Figura 25 – Dados típicos de capacitâncias parasitas de transformadores [10].	38
Figura 26 – Equivalente do sistema.	40
Figura 27 – Pontos de observação de tensões e correntes.	42
Figura 28 – Caso 1 – Tensão induzida na linha de BT.	43
Figura 29 – Caso 2 – Tensão nominal de operação na linha de BT.	44
Figura 30 – Caso 3 – Tensão induzida na linha de BT..	44
Figura 31 – Caso 4 – Tensão nominal de operação na linha de BT.	45
Figura 32 – Caso 5 – Tensão induzida na linha de MT.	46
Figura 33 – Caso 5 – Tensão induzida na linha de BT.	46

Figura 34 – Caso 6 – Tensão induzida na linha de MT.	47
Figura 35 – Caso 6 – Tensão induzida na linha de BT (V_0).	47
Figura 36 – Caso 1 – Tensão na MT em regime permanente – 11,41 kV rms.	49
Figura 37 – Caso 1 – Corrente na MT em regime permanente – 7,5 A rms.	49
Figura 38 – Caso 2 – Tensão induzida na MT desligada com a AT em regime.	50
Figura 39 – Caso 3 – Tensão induzida na MT desligada com a AT em regime.	50
Figura 40 – Caso 1 – Tensão na BT devido a energização em vazio da LT JAP – CPA, a partir de JAP.	51
Figura 41 – Caso 2 – Tensão na BT devido a energização em vazio da LT JAP – CPA, a partir de JAP, com instalação de para-raios na BT.	52
Figura 42 – Caso 2 – Energia absorvida pelo para-raios na BT devido a energização em vazio da LT JAP – CPA, a partir de JAP.	52
Figura 43 – Caso 3 – Tensão na BT devido a energização em vazio da LT JAP – CPA, a partir de CPA, com instalação de para-raios na BT.	53
Figura 44 – Caso 1 – Tensão na MT devido ao curto-circuito monofásico na barra de AT de CPA.	54
Figura 45 – Caso 1 – Tensão na BT devido ao curto-circuito monofásico na barra de AT de CPA.	54
Figura 46 – Caso 2 – Tensão na BT devido ao curto-circuito monofásico na barra de AT de CPA com a instalação de para-raios na BT.	55
Figura 47 – Caso 2 – Energia absorvida no para-raios da BT.	55
Figura 48 – Caso 3 – Tensão na BT devido ao curto-circuito monofásico na barra de AT da SE JAP.	56
Figura 49 – Caso 4 – Tensão na BT devido ao curto-circuito trifásico na barra de AT da CPA	56
Figura 50 – Caso 5 – Tensão na BT devido ao curto-circuito trifásico na barra de AT da SE JAP.	57
Figura 51 – Localização dos para-raios na rede BT.	58
Figura 52 – Caso 1 – Corrente no primeiro grampo de aterramento, na fase A, durante a instalação do aterramento na rede MT.	60
Figura 53 – Caso 2 – Tensão remanescente nas fases B e C após a instalação do 1º grampo de aterramento na fase A, com a chave fusível do transformador aberta.	60
Figura 54 – Caso 2 – Corrente no 1º grampo de aterramento, na fase A, durante a instalação do aterramento na rede MT, com a chave fusível do transformador aberta.	61
Figura 55 – Caso 3 – Corrente após o fechamento do 2º grampo de aterramento, na fase A, durante a instalação do aterramento na rede MT.	61
Figura 56 – Caso 4 – Interrupção (corte) de corrente durante a retirada do 1º grampo de aterramento da fase A.	62

Figura 57 – Caso 4 – Tensão no grampo durante a interrupção (corte) de corrente na retirada do 1º grampo de aterramento da fase A.	63
Figura 58 – Caso 5 – Interrupção (corte) de corrente durante a retirada do 1º grampo de aterramento, da fase A na MT, na presença de um curto monofásico na fase A na AT.	64
Figura 59 – Caso 5 – Tensão na rede BT durante a interrupção (corte) de corrente na retirada do 1º grampo de aterramento, da fase A na MT, na presença de um curto monofásico na fase A na AT.	64
Figura 60 – Caso 5 – Curto-circuito monofásico, na fase A, na barra AT de CPA, 5,0 kA rms, para a simulação da retirada do grampo de aterramento.	65
Figura 61 – Caso 6 – Posição dos aterramentos para o alimentador multiterrado.	66
Figura 62 – Caso 6 – Interrupção (corte) de corrente durante a retirada do 1º grampo de aterramento, da fase A na MT, na presença de um curto monofásico na fase A na AT estando a rede MT multiterrada.	67
Figura 63 – Caso 6 – Tensão no grampo durante a interrupção (corte) de corrente na retirada do 1º grampo de aterramento, da fase A na MT, na presença de um curto monofásico na fase A na AT, estando a rede multiterrada.	67

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tensão suportável normalizada de frequência fundamental de curta duração [8].	16
Tabela 2 – Condutor de fase da linha de alta tensão.	27
Tabela 3 – Características do cabo para-raios da linha de alta tensão.	27
Tabela 4 – Características do cabo de fase da linha de média tensão.	27
Tabela 5 – Dados do cabo mensageiro da rede de média tensão.	28
Tabela 6 – Características Elétricas Condutor da Rede Secundária.	28
Tabela 7 – Características Elétricas e Mecânicas do Isolador Fabricante Isoelectric. . .	28
Tabela 8 – Características do espaçadore classe 15 kV, conforme o fabricante.	29
Tabela 9 – Transformador da SE Julius Arp.	30
Tabela 10 – Transformador da SE Conselheiro Paulino.	31
Tabela 11 – Dados dos transformadores de distribuição.	31
Tabela 12 – Para-raios da rede de alta tensão.	31
Tabela 13 – Para-raios da rede de média tensão.	32
Tabela 14 – Estratificação do solo e especificação dos sistemas de aterramento das estruturasdaLD 69 kV Julius Arp – Conselheiro Paulino.	36
Tabela 15 – Dados das capacitâncias parasitas consideradas nas simulações.	37
Tabela 16 – Curva de atuação do para-raios de média tensão [11].	39
Tabela 17 – Tensões na rede BT devido ao curto-circuito monofásico na AT da SE CPA .	58
Tabela 18 – Características básicas do para-raios de BT.	58

Sumário

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Visão Geral	3
1.2	Objetivo	3
1.3	Motivação	3
1.4	Justificativa	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	Revisão da Literatura	5
2.1.1	Considerações	14
2.2	Sobretensões	15
2.2.1	Introdução	15
2.2.2	Sobretensão Temporária	16
2.2.3	Sobretensão Transitória	16
2.2.3.1	Sobretensão de Origem Atmosférica	17
2.2.3.2	Sobretensão Transitória de Manobra	17
3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	19
3.1	Dados utilizados para a montagem do equivalente.	25
3.1.1	Dados dos condutores da rede.	27
3.1.2	Isoladores e Espaçadores	28
3.1.3	Dados dos transformadores do sistema	29
3.1.4	Dados dos para-raios do sistema.	31
3.1.5	Dados de carregamento dos alimentadores.	32
4	METODOLOGIA	35
4.1	Software ATP-EMTP	35
4.2	Modelagem dos componentes do sistema	36
4.2.1	Cargas	36
4.2.2	Aterramento	36
4.2.3	Transformadores	37
4.2.4	Linhas	38
4.2.4.1	Linha Compartilhada	38
4.2.4.2	Demais linhas do sistema	39
4.2.5	Para-raios	39
4.2.6	Equivalente de rede	39

5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	42
5.1	Operação em Vazio	43
5.1.1	Caso 1	43
5.1.2	Caso 2	43
5.1.3	Caso 3	44
5.1.4	Caso 4	45
5.1.5	Caso 5	45
5.1.6	Caso 6	46
5.2	Operação em Regime Permanente	48
5.2.1	Caso 1	48
5.2.2	Caso 2	49
5.2.3	Caso 3	50
5.3	Energização da Linha de 69 kV	51
5.3.1	Caso 1	51
5.3.2	Caso 2	52
5.3.2.1	Caso 3	52
5.4	Operação sob Curto-Circuito	53
5.4.1	Caso 1	53
5.4.2	Caso 2	54
5.4.3	Caso 3	55
5.4.4	Caso 4	56
5.4.5	Caso 5	57
5.5	Controle das sobretensões transitórias na BT sob ação de curto-circuito na AT:	57
5.6	Procedimentos de aterramento na MT	59
5.6.1	Caso 1	59
5.6.2	Caso 2	60
5.6.3	Caso 3	61
5.6.4	Caso 4	62
5.6.5	Caso 5	63
5.6.6	Caso 6	65
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	69
6.1	Trabalhos Futuros	71
	REFERÊNCIAS	73

1 Introdução e Motivação da Dissertação

1.1 Visão Geral

O compartilhamento entre redes de subtransmissão e distribuição é uma solução bastante atrativa para a falta de espaço e a crescente demanda das grandes cidades, porém a proximidade entre circuitos com diferentes níveis de tensão causa um acoplamento eletromagnético que pode induzir sobretensões na linha de distribuição em média e baixa tensão diante de contingências como curto-circuito, energização da linha de alta tensão, chaveamento de banco de capacitores, rejeição de carga, etc.

As sobretensões induzidas na linha de distribuição oferecem risco à operação e vida útil dos equipamentos instalados nas redes de distribuição e também ao operador que realiza manutenção em linha viva ou com o alimentador em média tensão fora de operação. Além disso, as sobretensões transferidas para a rede de baixa tensão podem afetar os clientes residenciais no que diz respeito à segurança e danos em eletrodomésticos e demais equipamentos. Vê-se então a necessidade da avaliação de linhas com este tipo de configuração diante de transitórios que possam vir a surgir na rede.

1.2 Objetivo

Esta dissertação tem o objetivo de avaliar o acoplamento eletromagnético entre linhas de alta, média e baixa tensão que compartilham a mesma estrutura em um trecho de aproximadamente 4 quilômetros.

A avaliação será feita através da simulação de transitórios eletromagnéticos utilizando o software ATP-EMTP para a verificação dos níveis de sobretensão a que a rede de distribuição de média (11,4 kV) e baixa tensão (220V) estarão submetidas nos casos em que a rede de alta tensão (69 kV) é submetida a vários tipos de falta e condições de energização.

Esta linha é de propriedade da ENERGISA Group e está localizada em Nova Friburgo-RJ.

1.3 Motivação

As necessidades de crescimento de carga, de operação ou confiabilidade tendem a exigir a construção de novas linhas em média tensão, o que implica em uma interação com a sociedade local e seus agentes.

Uma solução contemplando corredores de subtransmissão (linhas com tensão 69 a 138 kV) e distribuição tem forte potencial para reduzir investimentos e maximizar o uso dos ativos,

com pouco impacto, uma vez que a infraestrutura principal já se encontra construída e em operação. Em geral, os projetos das redes de distribuição são desenvolvidos com a aplicação de técnicas, em geral empíricas. O uso de ferramentas computacionais permite um melhor conhecimento das falhas. Assim, modelos de construção de redes tradicionais podem ser avaliados obtendo-se índices de desempenho superiores aos atuais.

A principal motivação para este trabalho é a necessidade de se realizar os estudos envolvendo transitórios eletromagnéticos que possa vir a acometer a rede compartilhada de modo a propor uma solução para os problemas decorrentes do compartilhamento afim de que esta solução se torne viável sem comprometer a confiabilidade do sistema e a segurança dos consumidores.

1.4 Justificativa

Esta dissertação tem como principal justificativa a necessidade de avaliar a segurança em redes urbanas onde há a necessidade de recorrer a soluções que priorizem o conforto visual e a auto sustentabilidade. Neste caso o uso conjunto das infraestruturas existentes possui tanto apelo técnico, visual e econômico.

O compartilhamento de estruturas por linhas de diferentes níveis de tensão pode resultar em transferências de tensão associadas com eventos de manobra, ou ainda curto circuitos nas redes de alta tensão que acabam por induzir níveis de tensão em frequência industrial que precisam ser avaliados por questões de segurança aos operadores das concessionárias e a terceiros. As operações de manutenção envolvendo manobras de aterramento das redes de baixa tensão também podem gerar eventos perigosos. Todos estes fenômenos precisam ser corretamente investigados para garantir qualidade, segurança e qualidade de serviço.

Esta dissertação visa avaliar a linha de subtransmissão classe 72,5 kV que compartilha a mesma estrutura com as linhas de média e baixa tensão frente a transitórios de manobras utilizando o software ATP-EMTP.

Esta dissertação é resultado dos estudos desenvolvidos no P&D-5217-1515/2015 intitulado "Compartilhamento de Estruturas de Linhas de Subtransmissão Classes 72,5 e 145 kV e Redes de Distribuição Classes 15, 25 e 36,2 kV - Estudos Mecânicos, de Transitórios e Modelos para Validação Técnica e Econômica" realizado pela HVEX em conjunto com a Energisa.

2 Fundamentação Teórica

A existência de linhas com circuitos duplos em alta e extra alta tensão é um fato já antigo no setor elétrico mundial, uma vez que tal prática otimiza o espaço utilizado para a construção de novas linhas e a capacidade de transmissão é elevada de maneira bastante significativa, além de reduzir significativamente os custos na construção de novas redes [12].

Devido ao crescente aumento da demanda nos últimos anos e também a falta de espaço para a construção de novas linhas o compartilhamento de uma mesma estrutura por dois ou mais circuitos com diferentes níveis de tensão tem sido uma solução bastante utilizada. A proximidade entre esses circuitos pode causar vários problemas na rede como desbalanço de tensão, tensão residual de carga, sobretensão devido a manobras e descargas atmosféricas, o que traz a preocupação com relação a manutenção dessas linhas. Embora esses problemas não sejam novos no sistema elétrico, sua severidade tem aumentado além de níveis toleráveis quando comparados à aqueles vivenciados com redes convencionais. [5].

Mesmo nos casos em que são instalados circuitos de diferentes níveis de tensão em uma mesma torre de transmissão, essas redes estão geralmente afastadas das áreas urbanas, de modo que a interação eletromagnética entre os circuitos não se constitui em problemas para o nível de distribuição de energia. Ao se projetar linhas com compartilhamento entre circuito de alta tensão e redes de distribuição em média e baixa tensão, os consumidores estarão mais próximos destas interações eletromagnéticas e, portanto, um estudo detalhado deve ser desenvolvido.

2.1 Revisão da Literatura

Nesta seção serão apresentados alguns dos principais trabalhos relacionados ao compartilhamento de estruturas por linhas de diferentes níveis de tensão abordando os problemas que esta prática pode apresentar, bem como as respectivas soluções para tais problemas.

No trabalho de Yuwei He, Bengang Wei, Anfeng Jiang, Liming Wang e Zhengcai Fu (2014) [13] é discutida a dificuldade de se ter faixas de servidão suficientemente afastadas das redes de distribuição devido à rápida expansão do sistema elétrico chinês. Acrescentam-se também a necessidade, cada vez mais frequente, de se ter circuitos compartilhados entre alta e baixa tensão. O artigo analisa a indução de tensão, devido aos acoplamentos elétrico e magnético, de circuitos em extra-alta e ultra-alta tensão sobre circuito de baixa tensão instalados na mesma torre. Considerando circuitos em baixa tensão com extensão menor do que um quilômetro é relatado que a tensão induzida de circuito de 500 kV sobre circuito de 380 V é da ordem de 39 kV, em regime permanente, estando o circuito desconectado (resultado quase que exclusivamente devido ao acoplamento elétrico). Os resultados das simulações mostram também que para não

haver nenhuma indução, o circuito de 380 V teria que estar afastado do centro da torre em pelo menos cinquenta metros. O artigo chama a atenção sobre a necessidade de adoção de procedimentos de segurança durante a manutenção da rede de baixa tensão como, por exemplo, a utilização de equipamento para aterramento automático da rede. O artigo entretanto não analisa, por exemplo, as consequências para a rede de baixa tensão quando o circuito de 500 kV está operando em condições anormais, como sob curtos-circuitos e ou sob surtos atmosféricos ou de manobras.

No trabalho de Alexander Novitskiy e Dirk Westermann (2012) [14] discute-se a interação elétrica e magnética entre circuitos de extra-alta e de alta tensão em linhas multi-circuitos em regime permanente e na situação de ocorrência de curtos-circuitos à terra. O artigo é ilustrado com um exemplo de linha com dois circuitos em 380 kV e 50 Hz e dois circuitos bifásicos em 110 kV e 16,7 Hz. São mostrados resultados onde a alteração da posição das fases na torre para o circuito de 380 kV reduz as correntes induzidas nos circuitos de 110 kV. Concluiu-se que a otimização da posição dos circuitos na torre reduz os desequilíbrios no neutro do sistema (deslocamentos de neutros).

O trabalho de Guihong Feng, Yanxin Wang e Bingyi Zhang (2008) [15] trata da interferência eletromagnética ao longo de linhas com multi-circuitos. As intensidades dos campos elétricos e magnéticos são obtidas para mais de um arranjo físico entre fases com o objetivo de redução destes efeitos. O artigo mostra resultados para uma linha multi-circuito com dois circuitos em 500 kV e dois em 220 kV, onde uma otimização na posição dos condutores é analisada: circuitos na vertical (500 kV em cima e 220 kV em baixo) e circuitos em paralelo (220 kV interno e 500 kV externo). Considerando os limites de radiação de campo elétrico e campo magnético definidos pela legislação da China. O artigo sugere uma solução ótima de arranjo para atender tais limites. A análise de radiação eletromagnética torna-se mais importante quando se trata de linhas multi-circuitos em áreas povoadas (subtransmissão) onde o tráfego de pessoas é intenso e contínuo.

O trabalho dos autores Li Xiaolan, Du Zhongdong, Wen Jiqun, Chen Jiahong e Gu Shanqiang (2011) [1] avalia o desempenho frente a descargas atmosféricas de uma linha multi-circuito com dois circuitos em 220 kV (instalados na parte de cima) e dois circuitos em 500 kV (instalados na parte de baixo) em uma torre de 76 m de altura e altura de base de 27 metros, como indicado na Figura 1.

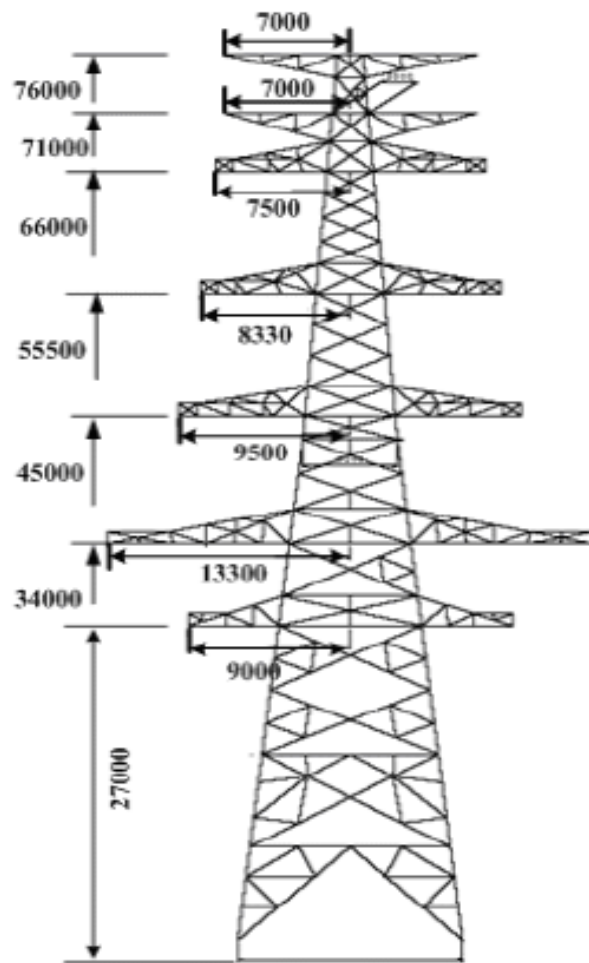


Figura 1 – Perfil de torre com quatro circuitos de dois níveis de tensão diferentes (medidas em mm) [1].

A avaliação do desempenho da blindagem da linha foi realizada com base no método eletrogeométrico revisado, onde a altura da estrutura a ser blindada também é levada em conta para se definir a distância de proteção. A conclusão foi a de que os circuitos de 220 kV possuem desempenho semelhante aos circuitos simples (da ordem de um desligamento por 100 km por ano) e que os circuitos de 500 kV possuem desempenho superior quando comparado com linha em circuito simples. O fato desses circuitos serem posicionados na parte inferior da torre e possuírem nível de isolamento superior em relação aos circuitos de 220 kV confere a eles uma proteção extra, isto é: quando um raio atingir uma torre ocorrerá um flashover no circuito de 220 kV e a elevação de tensão não será suficiente para provocar um flashover no circuito de 500 kV. Verifica-se ainda que outros aspectos tem influência no desempenho, tais como: resistência de aterramento das torres e ângulo de blindagem estabelecida pelo posicionamento dos cabos guardas da linha.

O trabalho de Genghui Zeng, Zexiang Cai, Minghui Huang e Zhiyao Liu (2008) [16] trata da indutância mútua entre circuitos na mesma faixa de passagem e na mesma torre, onde a

sequência zero é alterada pela indutância mútua e provoca erros na operação de relés para faltas a terra. O artigo discute situações onde as tensões dos circuitos são iguais ou diferentes e as implicações na sequência zero para faltas á terra em um dos circuitos e operação indevida no outro circuito. Propõe também medidas para reduzir os erros na operação de relés e também alternativas de proteção, como, por exemplo, a utilização proteção diferencial na linha por meio dos canais de fibra ótica existentes nos cabos guardas.

O Trabalho de Alexander Novitskiy, Irina Konotop e Dirk Westermann (2015) [2] trata dos problemas de qualidade de energia que ocorrem em redes de distribuição causados por linhas de transmissão próximas. Para o cálculo dos efeitos da indução devido à proximidade das linhas foi utilizado o software MATLAB/Simulink. Segmentos onde há compartilhamento de estrutura foram modelados como linha de parâmetros distribuídos considerando todos os condutores e a influência do solo. Para a simulação foi considerado uma linha de circuito duplo de 380 kV com dois cabos para-raios e uma linha de baixa tensão de 400 V. Foram considerados casos onde a distância que separa as duas linhas é de 60 metros e 120 metros, como mostra a Figura 2.

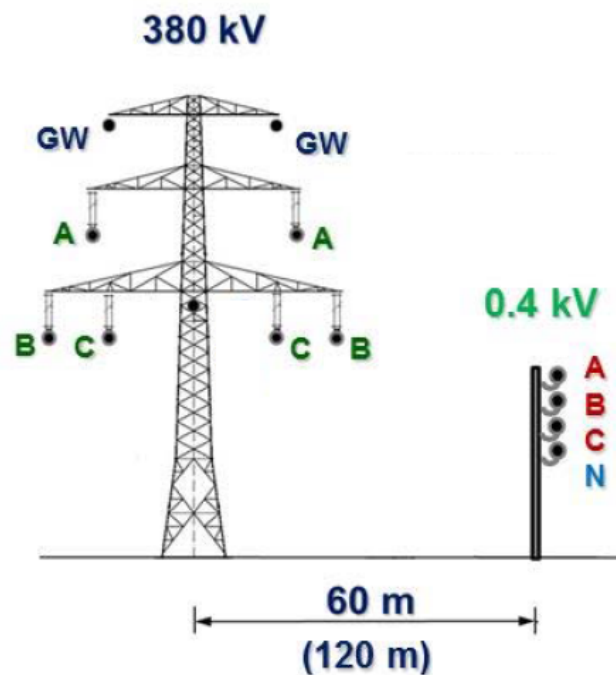


Figura 2 – Cálculo do distúrbio de qualidade de energia devido a linhas próximas. Adaptado de [2].

Foram considerados casos onde a linha de 380 kV está em operação normal, e em condições de faltas. Mostrou-se que linhas de extra alta tensão na mesma faixa de servidão de linhas de distribuição em baixa tensão podem violar os limites estabelecidos para qualidade de energia da rede no que diz respeito a desbalanço de tensão, também podendo causar danos à dispositivos eletrônicos conectados à baixa tensão.

O trabalho de W. Nowak, R. Tarko, A. Jaglarz e J. Kozió (2006) [3] analisa o acoplamento

indutivo e capacitivo entre duas linhas de transmissão sendo uma de 110 kV e outra de 220 kV construídas próximas, conforme a Figura 3.

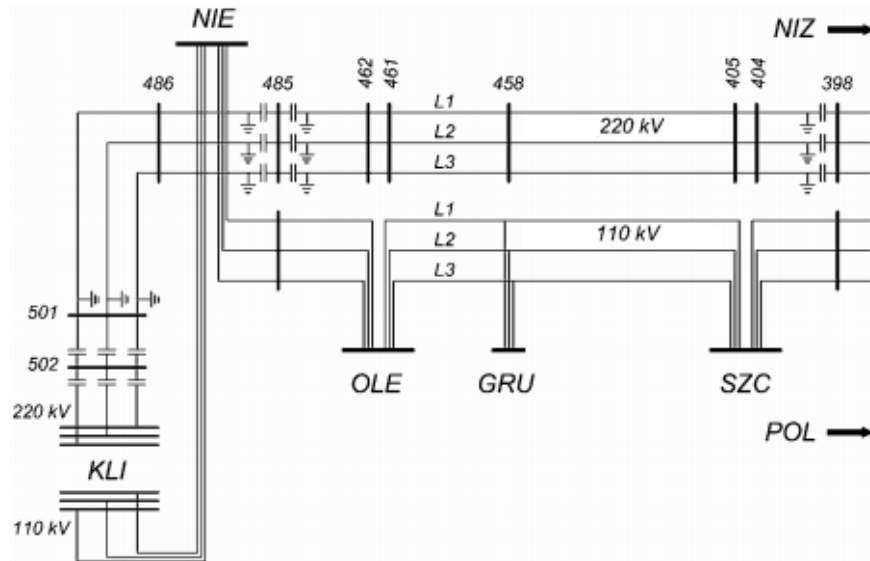


Figura 3 – Diagrama unifilar utilizado na análise. Adaptado de [3].

Sendo:

- 1) Tensão nominal do sistema de 110 kV entre as subestações KLI e POL;
- 2) Tensão Nominal de 220 kV entre as subestações KLI e NIZ;

Essas linhas de transmissão são conduzidas entre as torres números 485 and 398 nos mesmos suportes com a configuração de condutores mostrados na Figura 4.



Figura 4 – Linhas de transmissão de 220 kV KLI – NIZ e 110 kV KLI – POL instalados no mesmo suporte [3].

Para a estrutura mostrada na Figura 4 foi criado um modelo no software ATP-EMTP. Foram analisadas tensões e correntes induzidas no circuito 1 para o nível de tensão mais alto admitido pelo sistema (123 kV) com carga média anual no circuito 2. Nessas condições três casos foram analisados:

- Caso 1 – Aterramentos nos dois extremos da linha, nas torres 398 e 485;
- Caso 2 – Aterramento em um dos extremos da linha, na torre 398 ou 485;
- Caso 3 – Circuito 1 não aterrado.

Também foi simulado caso onde foi coletada a corrente induzida no circuito 1 (tendo ambos os extremos da linha aterrados) durante a ocorrência de diferentes tipos de faltas ocorrendo no circuito 2. Foram verificados níveis altos de tensão e corrente induzida nos casos simulados principalmente nos casos onde há falta monofásica e bifásica para terra ocorrendo no circuito 1. Os autores concluem que devido à possibilidade limitada de recuperar novos espaços para a construção de novas linhas, a questão da interferência devido ao acoplamento eletromagnético desempenhará um papel cada vez mais proeminente no futuro.

No trabalho de J. Li, Z. Wang, Z. Xia, T. Wang, W. Zeng, Y. Yan, Q. Yang, W. Li, C. Long, e H. Ren (2016) [4] é analisado uma linha com quatro circuitos de 500 kV/220 kV utilizado

o software ATP-EMTP para calcular e analisar a tensão e corrente induzidas em diferentes condições de operação da linha onde um circuito de 220 kV esta desenergizado e os outros três circuitos estão em operação normal. A figura 5 mostra o modelo de torre da linha analisada.

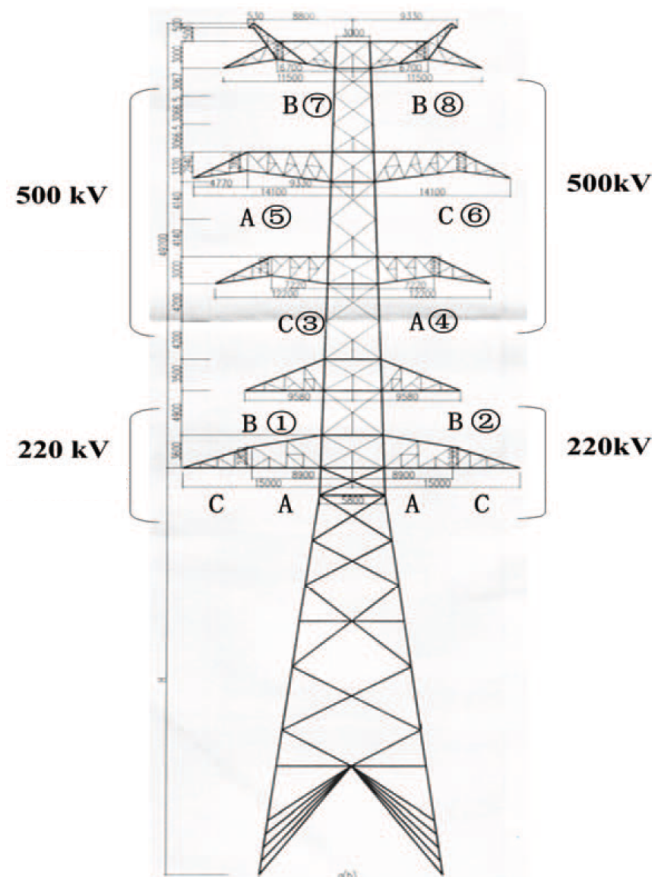


Figura 5 – Modelo de torre da utilizada na modelagem da linha. Adaptado de [4].

Nas simulações foram consideradas situações onde o circuito desenergizado é aterrado em ambas as extremidades, em apenas uma das extremidades da linha e o caso onde a linha não é aterrada. Chegou-se a conclusão de que a máxima tensão induzida alcança o valor de 80,4 kV sendo esta a condição onde a linha não está aterrada. Quando apenas uma das extremidades da linha se encontra aterrada a sobretensão registrada é de 9,89 kV. O caso em que ambas as extremidades da linha estão aterradas a máxima tensão induzida alcança o valor de 1,2 kV. Logo a manutenção da linha, embora desenergizada, deve ser feita considerando os procedimentos de manutenção em linha viva.

O trabalho de R.H. Brierley, A.S. Morched e T.E. Grainger (1991) [5] analisa várias configurações com mais de três circuitos de tensões nominais distintas localizadas na mesma torre. Configurações típicas de torres são mostrados na figura 6.

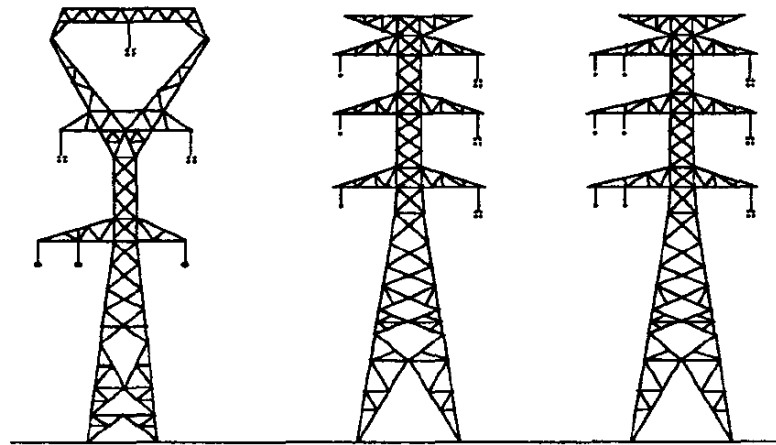


Figura 6 – Torres multi-circuitos. Adaptado de [5].

Vários problemas foram identificados, como por exemplo desbalanço de tensão, ferrorressonância, tensão residual na deenergização. Esses problemas foram analisados e soluções desenvolvidas para o arranjo de circuito considerado. Esses problemas embora não sejam novos no sistema elétrico tem a severidade aumentada quando comparados a aqueles vivenciados em linhas convencionais.

Embora as soluções a serem implementadas dependam da configuração do sistema chegou-se às seguintes conclusões:

- O uso de transposições para minimizar o efeito da indução;
- O número de locais onde os circuitos acoplados convergem e divergem devem ser minimizados;
- Uso de capacitores independentes por fase ou compensadores de potência reativa podem ser necessários para compensar o desbalanço de tensão na carga onde o arranjo ideal das fases não for suficiente;
- Medidas especiais como resistores de amortecimento podem ser necessários para reduzir incidentes de ferrorressonância em transformadores;
- Dispositivos de manobra para alta tensão podem ser necessários para desconectar cargas diante de situações de afundamento de tensão sustentada,

O trabalho de N. Rugthaicharoencheep, W. Thansiphaserth e A. Phayomhom [6] analisa a tensão nos isoladores de duas linhas, uma de tensão nominal de 69 kV e outra de 24 kV instaladas na mesma estrutura quando uma descarga atmosférica atinge o topo da estrutura e o meio do vão da linha de 69 kV, atingindo neste caso diretamente no cabo para-raios da rede de alta tensão. A estrutura analisada neste trabalho é a apresentada na Figura 7.

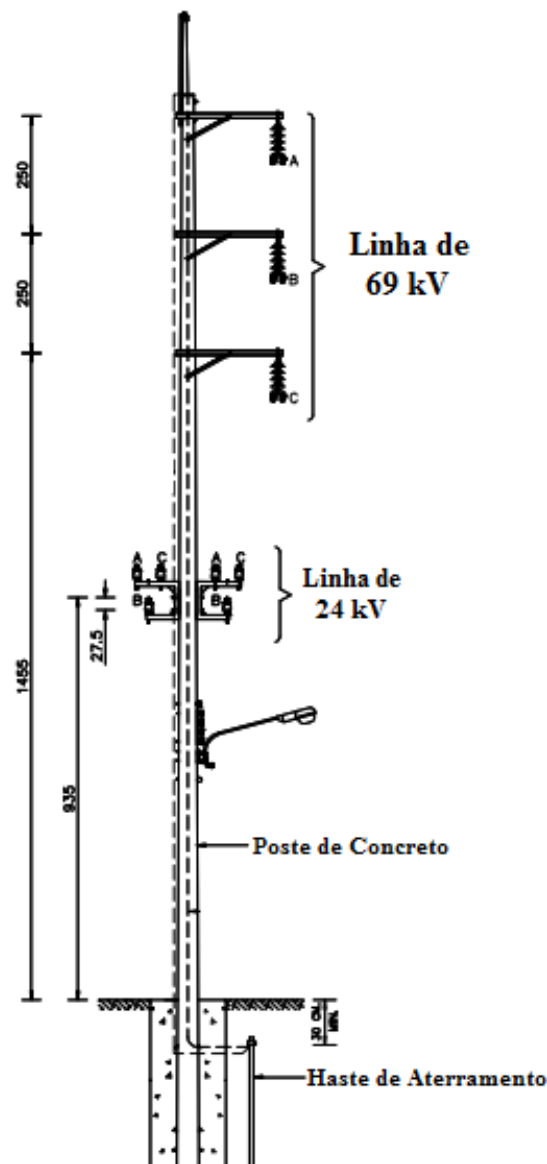


Figura 7 – Instalação das linhas de 69 e 24 kV na mesma estrutura. Adaptado de [6].

A linha analisada neste artigo é a que mais se assemelha a aquela estudada nesta dissertação, comparando com os outros trabalhos aqui analisados, porém difere em relação ao nível de tensão da rede de distribuição que no caso a ser analisado é de 11,4 kV e também envolve o compartilhamento com a linha de baixa tensão, havendo portanto uma preocupação maior com a influência que o acoplamento terá diretamente no consumidor que estará conectado na baixa tensão.

Para realizar as simulações os autores utilizaram o software ATP-EMTP considerando fenômenos envolvendo impulsos de frente rápidas para a modelagem dos componentes do sistema conforme Figura 8.

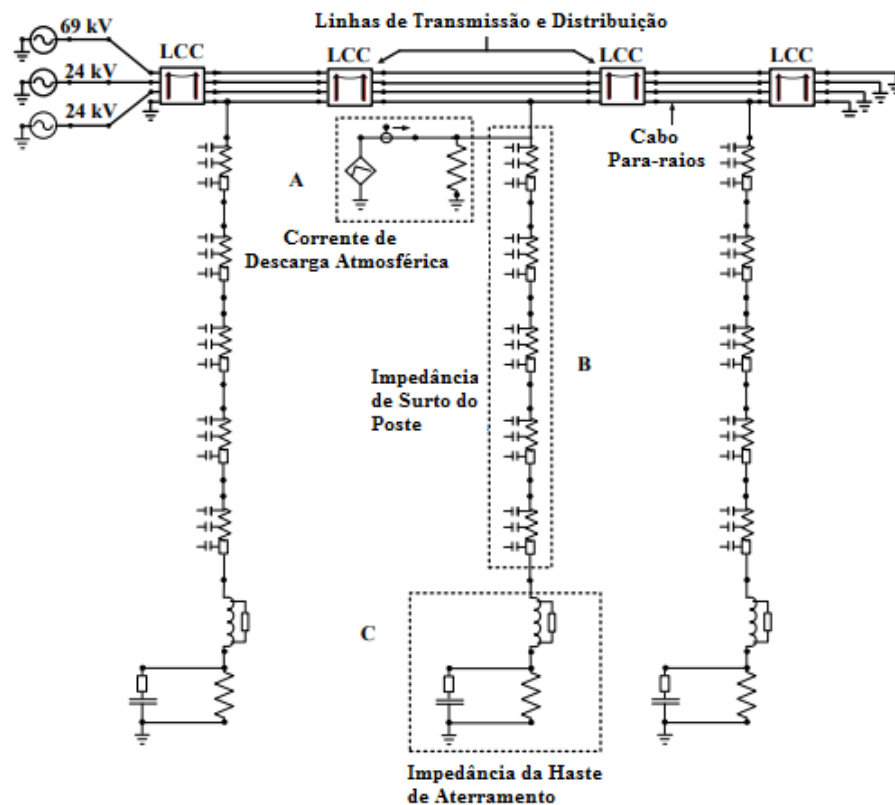


Figura 8 – Diagrama do sistema modelado no software ATP-EMTP. Adaptado de [6].

A performance da linha frente à descargas atmosféricas foi avaliada considerando duas formas de onda para o impulso de corrente a ser simulado $0.25/100 \mu s$ e $10/350 \mu s$. Os resultados obtidos das simulações indicaram que para ambas as formas de onda da corrente de descarga consideradas nas simulações a tensão nos isoladores da linha de 24 kV superou o nível de suportabilidade da linha causando disrupção nos isoladores, sendo que os maiores valores registrados aconteceram quando a descarga atingiu o meio do vão da linha de alta tensão.

2.1.1 Considerações

Tomando como base todos os trabalhos revisados até o presente momento conclui-se:

- Há poucas produções bibliográficas abordando compartilhamento de estruturas por linhas de diferentes níveis de tensão;
- Levando em consideração as obras publicadas, quase toda sua totalidade aborda linhas de alta e extra alta tensão, sendo raros os estudos envolvendo compartilhamento com linhas de distribuição;
- Poucos trabalhos abordam os estudos envolvendo transitórios de manobras.

2.2 Sobretensões

Define-se sobretensão como sendo um tensão variável no tempo, cujo valor de pico supera o valor de crista da tensão máxima do sistema [17].

As sobretensões chamadas de transitórias são aquelas causadas por condições semi-estacionárias. Cita-se como exemplo as excursões de tensão durante uma rejeição de carga, perda de compensação de reativo em linhas longas entre outro são resultantes de condições operativas anormais do sistema.

Existem ainda as sobretensões originadas de fenômenos de alta frequência e curta duração que são devidas a distúrbios no sistema de potência. O estudo destes distúrbios se configura num dos mais importantes objetos de análise transitória. Como consequência destes fenômenos há geração e propagação de surtos no sistema.

Estes surtos, originados por descargas atmosféricas ou por manobras, são ondas eletromagnéticas íngremes e de curta duração. [17].

2.2.1 Introdução

De forma geral, as sobretensões podem ser classificadas em dois grupos, sobretensões externas e internas. No entanto esta classificação não atende aos interesses relativos a especificação de equipamentos. Uma classificação mais adequada das sobretensões é feita com relação ao seu grau de amortecimento e com o seu tempo de duração. Sendo assim as sobretensões são classificadas de acordo com a Tabela 9 [17].

Classe	Baixa frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Forma da tensão					
Faixas de formas de tensão	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$	$5000 \mu\text{s} \geq T_{cr} > 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$f = 50 \text{ Hz}$ ou 60 Hz T_t^*	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_{cr} = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	*
Ensaio normalizado de tensão suportável	*	Ensaio de frequência fundamental de curta duração	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico	*

*) A ser especificado pela norma do respectivo equipamento.

Figura 9 – Resumo das sobretensões em sistemas elétricos [7].

2.2.2 Sobretensão Temporária

As sobretensões temporárias podem causar danos significativos aos equipamentos, dependendo de sua intensidade. Equipamentos elétricos são projetados para suportar sobretensões temporárias de curta duração sem sofrer danos imediatos, já que este tipo de sobretensão costuma ser comum nas redes elétricas. Entretanto, é importante considerar que, mesmo não causando danos imediatos, as sobretensões podem acelerar o processo de degradação dos materiais dielétricos que compõem o equipamento, reduzindo a sua vida útil.

Para efeitos de coordenação de isolamento, estas sobretensões são caracterizadas por uma forma senoidal, normalmente na frequência da rede e com duração de 0,03 segundos a 1 hora. Entretanto, existem casos particulares em que este tipo de sobretensão pode perdurar por horas, a exemplo da rede com sistema de aterramento ressonante. Neste caso, costuma-se sobredimensionar alguns componentes da rede ou definir fatores de sobretensões apropriados [8].

Um exemplo deste dimensionamento pode ser dado considerando transformadores de potencial para medição e proteção que podem ser definidos com fatores de sobretensão de 1,15 e 1,9 para operação contínua de acordo com a NBR 6855. As normas prevêem a ocorrência destas sobretensões, exigindo níveis mínimos que devem ser atendidos para a correta aplicação na rede. Estes níveis consideram a tensão máxima do equipamento. Alguns exemplos podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Tensão suportável normalizada de frequência fundamental de curta duração [8].

Tensão Máxima do Equipamento (kV rms)	Tensão Suportável (kV)
12	28
24	50
72,5	140
145	185
	230
	275
245	275
	325
	360
	395
	460

2.2.3 Sobretensão Transitória

Conforme citado anteriormente, são sobretensões de curta duração, oscilatórias ou não. Normalmente estão associadas com fenômenos passageiros e de alta intensidade, como descargas atmosféricas ou de manobra. Nestes casos, normalmente são definidos valores de sobretensão chamados de nível básico de isolamento – NBI, para as descargas atmosféricas e nível de impulso

de manobra – NIM, para os surtos de origem interna [8]. Essas sobretensões são caracterizadas por uma forma de onda impulsiva e unipolar definidas por um tempo de frente e de meia onda.

2.2.3.1 Sobretensão de Origem Atmosférica

A sobretensão atmosférica é uma solicitação causada por uma descarga atmosférica, ou por outra causa que tenha forma de onda semelhante àquela normatizada. Surtos atmosféricos são geralmente referidos como descargas geradas externamente e de curta duração [18].

As tensões suportáveis nominais sob impulsos atmosféricos são especificadas sob formas padrão. A forma padrão para este tipo de impulso é mostrado na Figura 10.

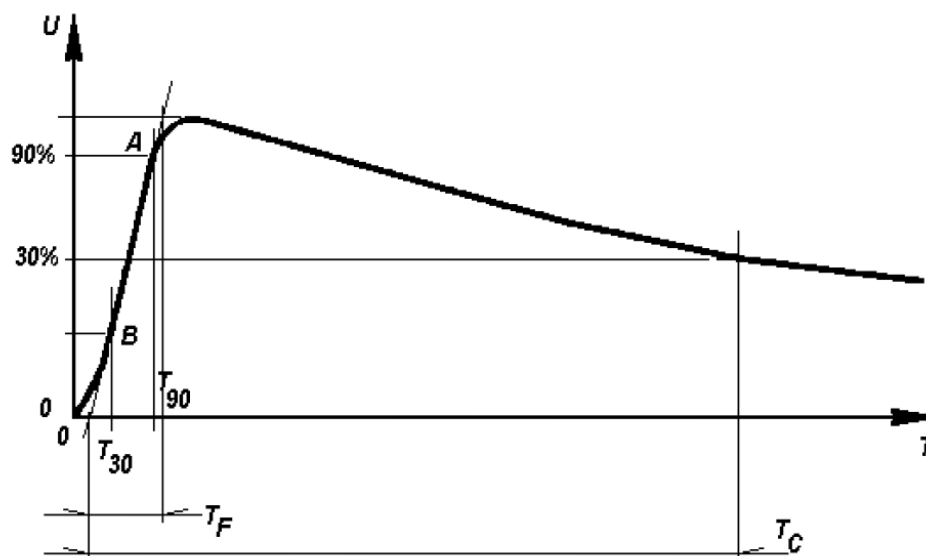


Figura 10 – Forma de Onda de um Impulso Atmosférico [8].

Onde:

T_F - Tempo virtual de frente do impulso de tensão (μs);

T_{30} Tempo real até 30% da amplitude na frente do impulso (μs);

T_{90} Tempo real até 90% da amplitude na frente do impulso (μs).

A forma de impulso atmosférico padrão é $1,2/50 \mu s$.

2.2.3.2 Sobretensão Transitória de Manobra

Foco do estudo desta dissertação, as sobretensões causadas por manobras na rede são caracterizadas por possuírem formas de onda com frente lenta e que podem ser originadas devido a operação de um equipamento de manobra ou uma falta no sistema, cujo tempo de frente da onda ocupa a faixa de 100 a 500 ms e com tempo de cauda de 2500 ms. Essas sobretensões em geral são fortemente amortecidas [19].

As sobretensões de frente lenta normalmente se originam de:

- Energização e religamento de linhas;
- Aplicação e eliminação de faltas;
- Rejeição de carga;
- Energização de transformadores;
- Chaveamento de correntes capacitivas e indutivas;

Normalmente, a forma de onda deste tipo de sobretensão depende dos parâmetros do sistema, da sua configuração e das condições em que o sistema se encontra no instante da manobra. Assim, para uma determinada condição de manobra pode-se obter diferentes valores de sobretensões, uma vez que esse valor dependerá não somente da dispersão nos instantes de fechamento do disjuntor, como também do instante da onda de tensão onde ocorreu o fechamento [19].

Esta variação nos valores de amplitude das sobretensões faz com que seja extremamente difícil prever o valor máximo de sobretensão que irá ocorrer para uma manobra específica. Daí vem o conceito de sobretensão de manobra estatística, uma vez que o exato instante de fechamento e abertura de chaves não pode ser determinado de maneira prévia, logo os sistemas são projetados considerando a probabilidade de ocorrência das sobretensões e sua distribuição no sistema.

A determinação das tensões de manobra é normalmente realizada através do uso de programas computacionais devido à complexidade nos cálculos envolvidos. A amplitude e a duração das sobretensões dependem dos parâmetros, da configuração e das condições em que o sistema se encontra no exato momento da manobra, por isso a mesma operação efetuada em um mesmo sistema, mas em momentos distintos, pode resultar em valores diferentes de sobretensão [20].

3 Descrição do Problema

Esta dissertação tem como principal objetivo a análise das sobretensões em linhas de distribuição em média (11,4 kV) e baixa tensão (220 V) que compartilham a mesma estrutura com uma linha de subtransmissão de 69 kV quando da ocorrência de transitórios de manobra na linha de subtransmissão.

A proximidade desses circuitos pode resultar em sobretensões de alta intensidade na distribuição em média e baixa tensão, oferecendo risco aos equipamentos instalados nas redes de distribuição e à equipe de manutenção.

Para os estudos faz-se necessário a modelagem de cada componente da rede para sua implementação no software de análise de transitórios. Nesta dissertação será utilizado o software ATP, por ser essa uma ferramenta amplamente utilizada para estudos de transitórios em sistemas elétricos de potência.

Após a modelagem serão considerados casos de regime permanente e transitórios devido a curto-circuitos e energização da linha de subtransmissão onde será feita a verificação se as sobretensões que irão aparecer nas linhas de distribuição oriundas dessas manobras na linha de subtransmissão representam risco para a integridade da rede, equipamentos instalados em média e baixa tensão, consumidores e a equipe de manutenção.

A linha foco desta pesquisa pertence à área de concessão da Energisa e está localizada em Nova Friburgo, RJ. A Figura 11 mostra foto da linha com o compartilhamento.



Figura 11 – Foto de estrutura com compartilhamento de circuitos.

Esta linha possui tensão nominal de 69 kV, interligando as subestações Conselheiro Paulino e Julius Arp e é formada por cerca de 122 estruturas de alta tensão possuindo um vão médio na área urbana de 70 metros. A distância média entre estrutura de alta tensão e o poste de média tensão é de 35 metros, conforme mostra a Figura 12.

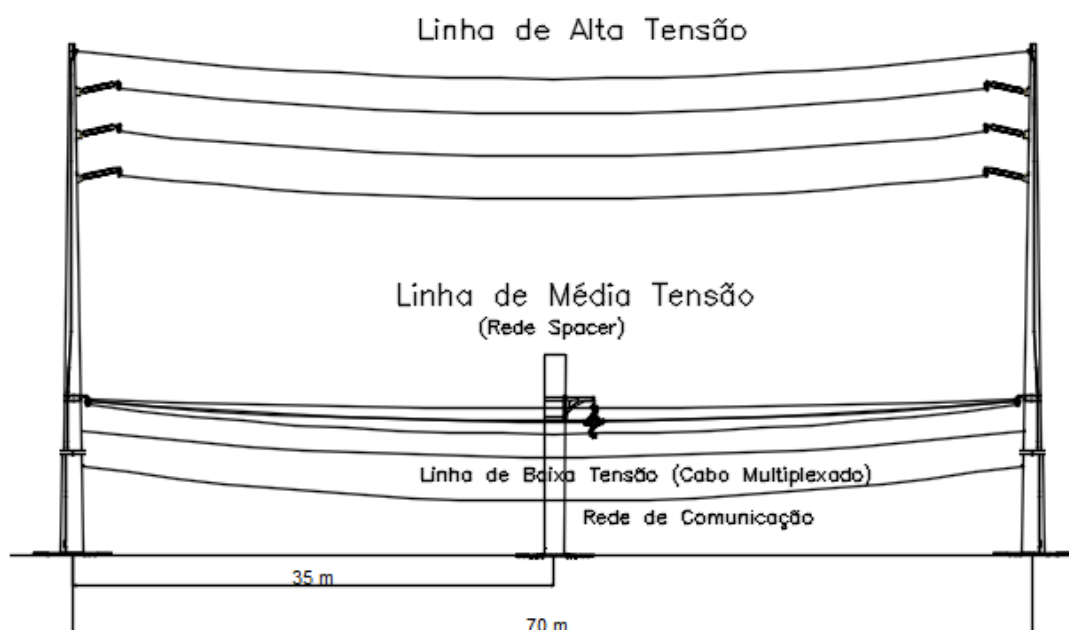


Figura 12 – LT compartilhada – módulo típico representado [9].

A figura 13 mostra o diagrama unifilar do sistema, já com os equivalentes a este associado. Mais detalhes sobre a modelagem será dada no Capítulo 3.

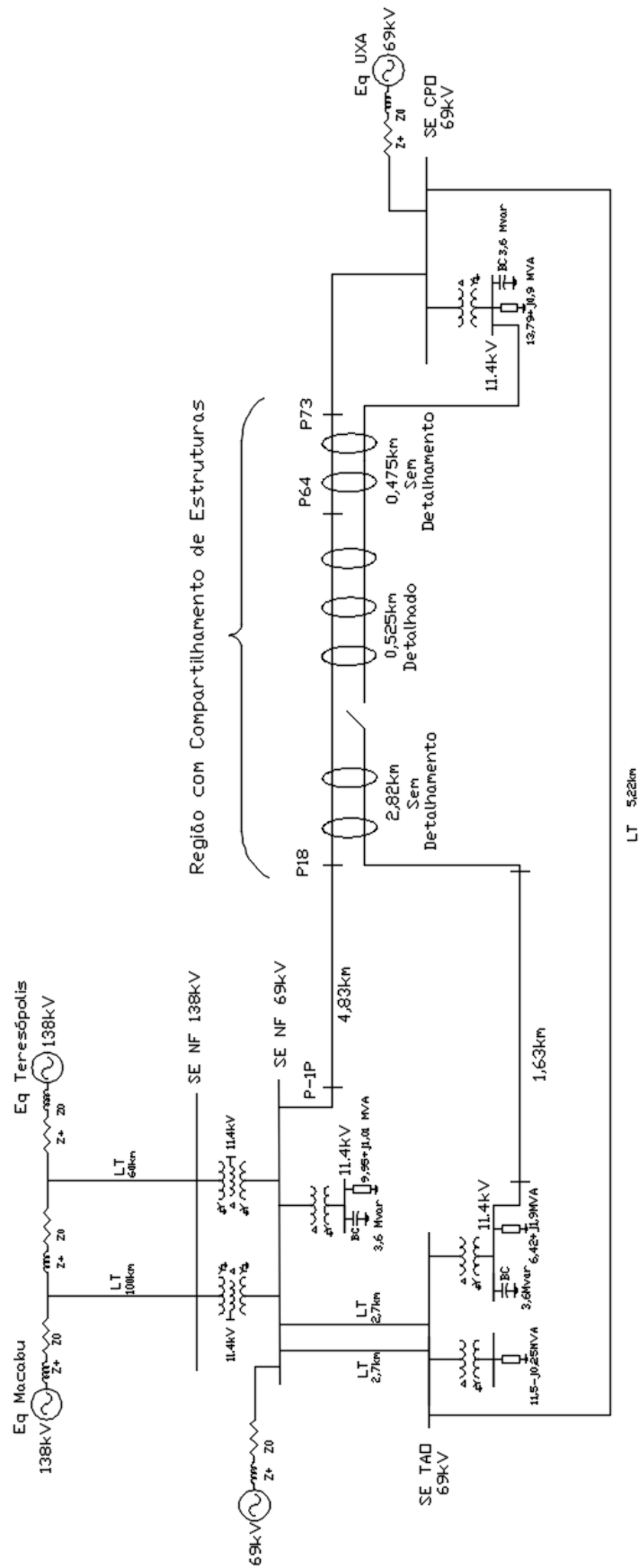


Figura 13 – Diagrama Unifilar do Sistema de Nova Friburgo [9].

O subsistema de interesse é representado pelas barras de 69 kV das subestações JAP (Julius Arp) e CPA (onselheiro Paulino) interligadas por linhas de curta distância. A linha de transmissão (LT) JAP – CPA é a região onde serão realizadas as simulações e observadas tensões e correntes, pois se trata de uma linha cujas estruturas possuem trechos compartilhando circuitos em alta tensão de 69 kV, em média tensão de 11,4 kV e em baixa tensão de 220/127 V. Esta LT possui comprimento aproximado de 8,6 km, sendo 4,8 km sem compartilhamento e 3,8 km com trechos compartilhados, definidos pelas estruturas P18 a P73. Para o presente estudo, uma parte da LT compartilhada (comprimento de 1,0 km, da estrutura P59 a P73) foi detalhada para a observação das tensões e correntes. O subsistema de 69 kV alimenta cargas em suas barras, de tal modo a caracterizar os fluxos de potência do ano de 2016 mostrado na Figura 14 abaixo.

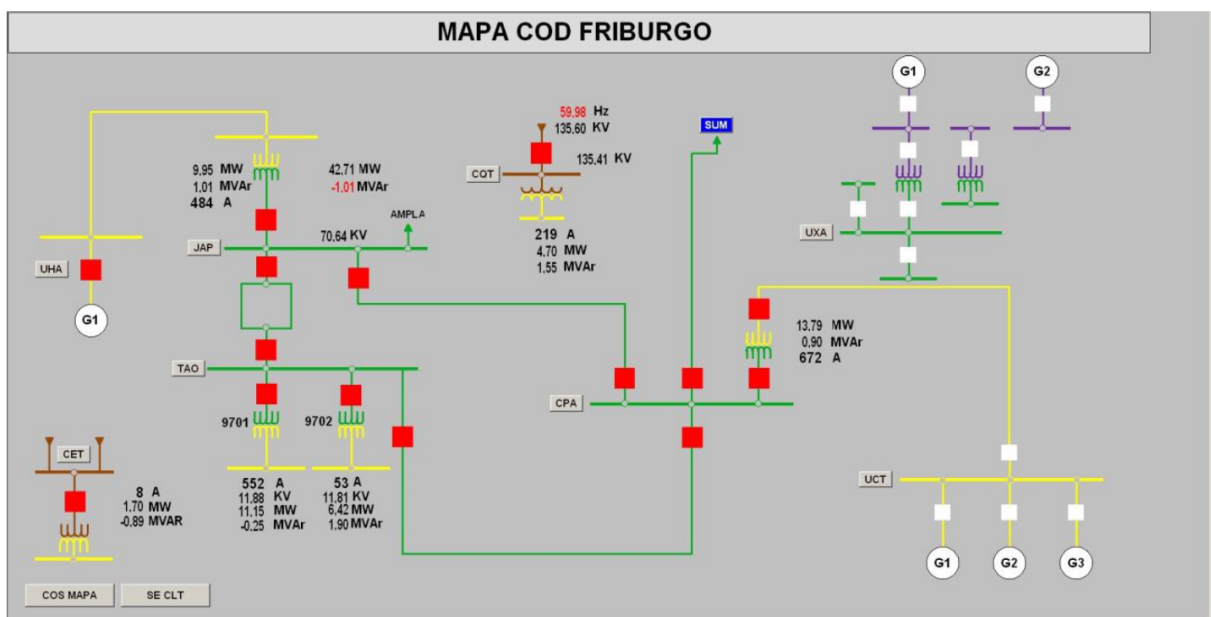


Figura 14 – Configuração base do subsistema em 69 / 11,4 kV.

Para isso foram tomados como base os arquivos do Sistema Interligado Nacional (SIN) relativos aos dados de rede rodados nos programas ANAFAS e ANAREDE.

ANAFAS é um programa computacional para cálculo de curtos-circuitos. Permite a execução automática de grande variedade de faltas e possui facilidades, como estudo automático de superação de disjuntores, obtenção de equivalentes de rede, redução de nível de curto em uma barra e cálculo automático da evolução dos níveis de curto, permitindo a geração de resultados orientados a pontos de falta ou de monitoração. Está integrado ao SAPRE (Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas), que dispõe de editor gráfico de diagramas unifilares, o que possibilita a interação direta sobre os elementos do diagrama e a fácil visualização de seus resultados [21]. Já o software ANAREDE (Análise de Redes Elétricas) é o mais utilizado no Brasil para análise de Sistemas Elétricos de Potência em regime permanente. Reúne programas de fluxo de potência, equivalente de redes, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão e de fluxo, e análise de segurança de tensão. [22]

3.1 Dados utilizados para a montagem do equivalente.

Os parâmetros elétricos do subsistema de 69 kV foram obtidos tomando como base os arquivos fornecidos pela Energisa dos programas ANAFAS e ANAREDE para o ano de 2016 conforme Figura 16.

Para complementar a modelagem foram utilizadas as informações obtidas do Grupo Energisa e os dados obtidos da visita técnica feita a Nova Friburgo dia 04 de agosto de 2016.

3.1.1 Dados dos condutores da rede.

Os itens a seguir detalham as características mecânicas e elétricas dos condutores utilizados na construção das linhas de alta, média e baixa tensão.

- Cabo de fase da linha de alta tensão está apresentada na Tabela 2

Tabela 2 – Conductor de fase da linha de alta tensão.

Cabo Conductor	Características
Tipo	T-CAA
Código	T-LINNET
Bitola	336,4 MCM
Formação	26/7
Diâmetro	18,29 mm
Peso Linear	0,6883 kg/m

- Cabo Para-Raios

O Cabo Para-Raio utilizado na linha de alta tensão é do tipo OPGW Centrum CM2.081.147.S24. Conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Características do cabo para-raios da linha de alta tensão.

Cabo Conductor	Características
Tipo	OPGW
Bitola	14,4
Formação	12 FO
Diâmetro	14,4 mm
Resistência DC	0,491 Ω/km
Peso Linear	0,700 kg/m

- Conductor da rede de média tensão

O condutor de fase da linha de média tensão possui as características indicadas na tabela 4.

Tabela 4 – Características do cabo de fase da linha de média tensão.

Seção Nominal (mm^2)	Diâmetro Nominal (mm)	Resistência DC (Ω/km)
185	16,15	0,164

- Cabo mensageiro da linha de média tensão

A Tabela 5 mostra as características do cabo mensageiro da rede de média tensão.

Tabela 5 – Dados do cabo mensageiro da rede de média tensão.

Diâmetro Nominal (mm)	Resistência DC (Ω/km)	Peso Unitário (kg/km)
0,95	3,73	407

- Condutor da rede de baixa tensão

A Tabela 6 mostra as características do cabo mensageiro da rede de baixa tensão.

Tabela 6 – Características Elétricas Condutor da Rede Secundária.

Construção (Fase/Neutro)	Reatância Indutiva	Corrente admissível no condutor de fase	Resistência elétrica no condutor de fase	Mensageiro	
				Corrente Admissível	Resistência Elétrica
mm^2	Ω/km	A	Ω/km	A	Ω/km
3x1x120+70	0,07185	224	0,3414	140	0,6320

3.1.2 Isoladores e Espaçadores

Os próximos itens detalham as características elétricas e mecânicas dos isoladores das redes de alta e média tensão.

- Isolador da linha de alta tensão

Atualmente estão sendo utilizados isoladores da Isoelectric conforme mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Características Elétricas e Mecânicas do Isolador Fabricante Isoelectric.

Tensão suportável a frequência industrial	A seco	kV	485
	Sob chuva	kV	405
Tensão suportável sob impulso atmosférico	Positivo	kV	740
	Negativo	kV	815
Distância de escoamento		mm	4200
Distância de arco a seco		mm	1380

- Espaçador da linha de média tensão

Atualmente se tem instalado na linha de média tensão o espaçador losangular com garras, fabricante PLP, conforme Figura 17 e Tabela 8 [23].

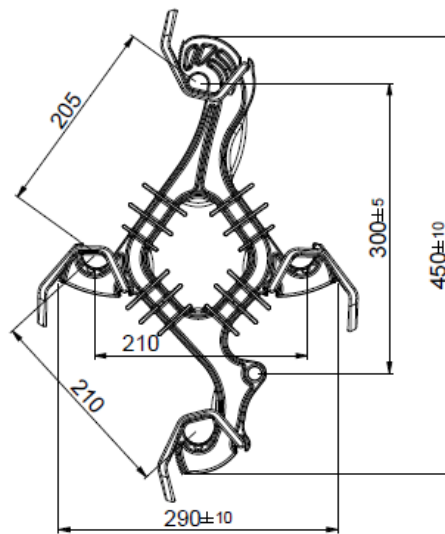


Figura 17 – Espaçador Losangular Classe 15kV.

Tabela 8 – Características do espaçadore classe 15 kV, conforme o fabricante.

Classe de tensão	15 kV
Massa aproximada do conjunto	0,604 kg
Nível básico de isolamento	110 kV
Tensão suportável na frequência industrial sob chuva	34 kV x 1 min.
Distância mínima de escoamento	300 mm
Tensão mínima de trilhamento	3 kV
Matéria Prima	Polietileno de alta densidade
Cor	Cinza

3.1.3 Dados dos transformadores do sistema

- As características dos transformadores em 69/11,4 kV estão mostradas nas Tabelas 9 e 10. As Figuras 18 e 19 mostram os transformadores instalados nas Subestações Julius Arp e Conselheiro Paulino, respectivamente. As fotos foram registradas durante a visita técnica à Nova Friburgo - RJ, realizada dia 04 de agosto de 2016.



Figura 18 – Transformador 69 kV/11,4 kV da SE Julius Arp.

Tabela 9 – Transformador da SE Julius Arp.

Fabricante	Toshiba
Fases	3
Frequência	60 Hz
Tensão	69/11,4kV
Tape	AT - 69 5% kV
	BT - 11,4 10% kV
Ligação	Dyn1
Impedância	9,42% (base 15MVA)
Potência	15/20/25MVA
Resfriamento	ONAN/ONAF/ONAF
NB (Nível Básico de Impulso)	AT-350 kV de crista
	BT - 110 kV de crista



Figura 19 – Transformador 69 kV/11,4 kV da SE Conselheiro Paulino.

Tabela 10 – Transformador da SE Conselheiro Paulino.

Fabricante	WEG
Fases	3
Frequência	60 Hz
Tensão	69/11,8kV
Tape	AT – 69 5% kV
	BT - 11,810% kV
Ligação	Dyn1
Impedância	14,57% (base 25MVA)
Potência	15/20/25MVA
Resfriamento	ONAN/ONAF/ONAF
NBI (Nível Básico de Impulso)	AT-350 kV de crista
	BT - 110 kV de crista

- Transformadores de distribuição.

A Tabela 11 mostra os parâmetros elétricos dos transformadores de distribuição considerados para a simulação.

Tabela 11 – Dados dos transformadores de distribuição.

UH/UL (kV)	S (MVA)	X (%)	X/R
11,4/0,22	0,075	3	6
11,4/0,22	0,1125	3	6

3.1.4 Dados dos para-raios do sistema.

- Os para-raios forma representados através de curvas V x I com base nas características das Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Para-raios da rede de alta tensão.

CARACTERISTICA ELÉTRICAS	
Tensão Nominal	60 kV
Corrente Nominal	10 kA
Capacidade de Absorção de Energia	5,1 kJ/kV
Máxima Tensão de Operação Contínua MCOV	48 kV
(Onda de 8x20 μ s) (10kA)	160 kV
(Frente de Onda 1 μ s)(10 kA)	164,8 kV
Corrente de Curta Duração	100 kA
Descarga de linha de Transmissão	Classe 2
Classe de Alívio de Sobre-Pressão	40 kA rms

Tabela 13 – Para-raios da rede de média tensão.

Aplicação Sistema 60 Hz (kV)	Tensão Nominal Eficaz (kV)	Corrente Nominal de Descarga Onda 8/20 μ s (kA)	Tensão Residual Máxima para a Corrente de Descarga (8/20 μ s)
11,4	10	10	36

A Figura 20 mostra o para-raios de 69 kV instalado na SE Julius Arp.



Figura 20 – Para-Raio de 69 kV Instalado na Subestação Julius Arp - Nova Friburgo.

3.1.5 Dados de carregamento dos alimentadores.

As cargas dos alimentadores do subsistema foram representadas por impedâncias constantes, como é usual em estudos com o programa ATP, baseado no carregamento em um determinado momento do dia, conforme Figuras 21 e 22.

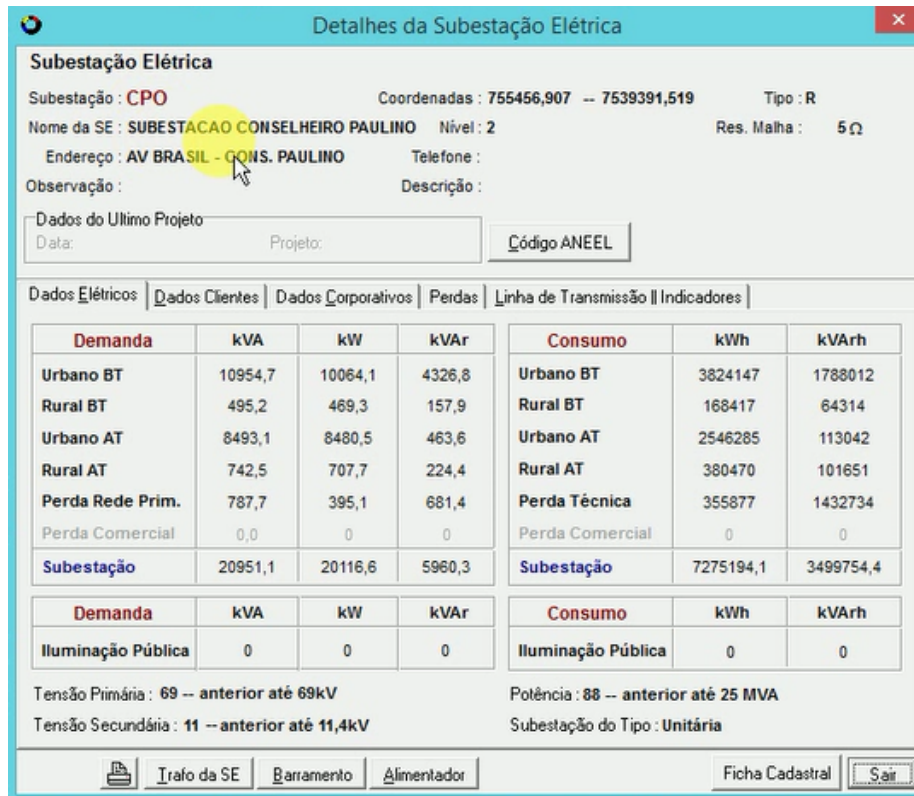


Figura 21 – Carregamento da SE Conselheiro Paulino.

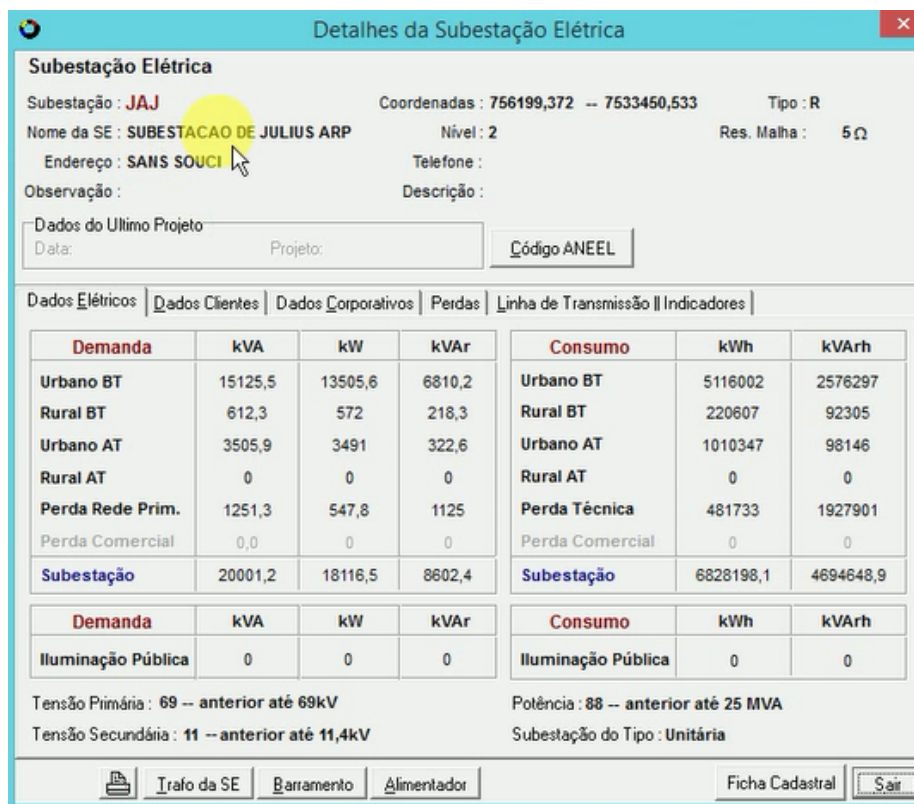


Figura 22 – Carregamento da SE Julius Arp.

As Figuras 21 e 22 mostram a interface do software de controle do carregamento das subestações utilizado pela Energisa contendo os valores de demanda de potência dos consumidores em tempo real.

Os dados apresentados neste capítulo servirão como base para a montagem do circuito equivalente a ser implementado no ATP para reproduzir da maneira mais precisa possível o comportamento do sistema frente à transitórios de manobra.

4 Metodologia

A análise das sobretensões devido à transitórios de manobra se baseia na modelagem de cada elemento da rede de interesse a fim de chegar a um circuito equivalente a ser implementado no software de análise de transitórios, onde neste caso será utilizado o ATP, de modo a reproduzir da maneira mais precisa possível a resposta do sistema real a este tipo de perturbação. Este capítulo irá apresentar, de maneira detalhada, como foi realizada a modelagem de cada componente da rede que está sendo estudada.

4.1 Software ATP-EMTP

O ATP (Alternative Transient Program) é um software dedicado para estudos eletromagnéticos. Por meio dele é possível modelar adequadamente os sistemas elétricos, reproduzindo o mais fiel possível a configuração elétrica real das redes, além de apresentar o diagrama unifilar em um ambiente gráfico (ATPDraw).

Ele possui recursos para modelar tanto os sistemas de transmissão como os de distribuição em uma mesma plataforma, permitindo as análises de transitórios eletromagnéticos para diferentes configurações operacionais. O ATP permite a simulação para redes polifásicas, utilizando a matriz de admitância de barras. A formulação matemática que constitui o programa é baseada, para elementos com parâmetros distribuídos, no método das características (método de Bergeron) e para parâmetros concentrados na regra de integração trapezoidal. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

Ao longo dos anos o programa sofreu inúmeras evoluções, dentre elas destacam-se as facilidades gráficas como o pré-processador gráfico e a aplicação PLOTXY, os quais permitem trabalhar utilizando somente o ambiente Windows. O ATP é uma ferramenta de grande flexibilidade e importância na realização de estudos de regime transitório ou permanente em sistemas de potência

A metodologia proposta neste trabalho consiste na modelagem e simulação por meio do software ATP do sistema mostrado na figura 13 diante de diferentes cenários, entre eles a aplicação de diferentes tipos de faltas e energização da linha de 69 kV a fim de avaliar a tensão que será induzida nas linhas de 11,4 kV e 220 V diante de tais contingências.

4.2.3 Transformadores

Para a representação dos transformadores de 69/11,4 kV foi utilizado o modelo na frequência fundamental com capacitâncias externas adicionais [24] apresentado na Figura 24.

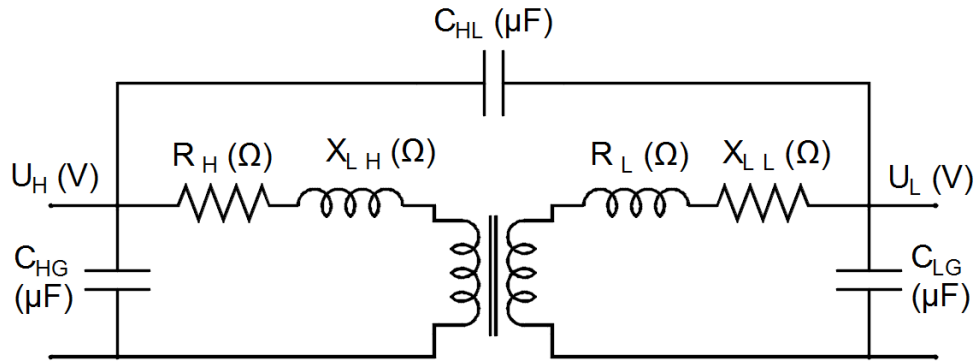


Figura 24 – Representação dos transformadores.

Onde:

- R_H é a resistência do lado de alta do transformador;
- X_{LH} é a reatância indutiva do lado de alta do transformador;
- R_L é a resistência do lado de baixa do transformador;
- X_{LL} é a reatância indutiva do lado de baixa do transformador;
- C_{HG} é a capacitância parasita da alta tensão para a terra;
- C_{HL} é a capacitância parasita entre enrolamentos (alta e baixa tensão);
- C_{LG} é a capacitância parasita da baixa tensão para a terra.

O bloco do ATP utilizado para a modelagem foi Transformador geral saturável, trifásico, com dois enrolamentos.

A Tabela 15 mostra os dados das capacitâncias parasitas utilizadas nas simulações.

Tabela 15 – Dados das capacitâncias parasitas consideradas nas simulações.

U_H/U_L (kV)	S (MVA)	X (%)	X/R	C_{HG} (nF)	C_{HL} (nF)	C_{LG} (nF)
69/11.4	25	14.6	30	3.5	10.3	12.6

Foram utilizados dados típicos de acordo com a potência do transformador baseado nos dados da Figura 25.

TABLE 14-6 Typical Capacitance of Transformers (Capacitance in nF)									
TRANSFORMER	CORE TYPE			SHELL TYPE			AUTOTRANSFORMERS		
	C_{hg}	C_{hl}	C_{lg}	C_{hg}	C_{hl}	C_{lg}	C_{hg}	C_{hl}	C_{lg}
1	1.2-14	1.2-17	3.1-16						
2	1.4-16	1-18	3-16						
5	1.2-14	1.1-20	5.5-17						
7	2.7-11	3.5-17	8-16						
10	4-7	4-11	8-18						
25	2.8-4.2	2.5-18	5.2-20	4-7	10-17	4-8	8-18	3.5-8	3-8
50	4-6.8	3.4-11	3-24	6-9	8-16	4-15	5.5-10	5.3-13	6-17
75	3.5-7	5.5-13	2.8-30	7-13	7-17	4-25	7-11	6-20	11-18
100	3.3-7	5-13	4-40	6-14	7-19	5-30	8.5-12	9-20	12-17
200				4.5-18	8-25	5-27	8-40	7-22	16-26
300				5.5-21	11-22	20-40	6-40	5-24	12-32
400				8-24	14-21	17-45	6-25	5-20	11-23
500				6.5-30	17-24	18-46	6-22	5-20	10-24
600				5-40	16-29	16-46	6-20	4.5-20	14-26
700				4-39	15-30	14-43	6-18	5-20	12-28
1000				4-41	11-30	6-54	6-12	7-23	16-30

Figura 25 – Dados típicos de capacitâncias parasitas de transformadores [10].

Para os transformadores de distribuição considerados foi utilizada a mesma modelagem, porém sem considerar as capacitâncias parasitas, uma vez que sua implementação não traz contribuições significativas aos resultados das simulações.

4.2.4 Linhas

4.2.4.1 Linha Compartilhada

No caso da linha foco da dissertação, onde há o compartilhamento propriamente dito foi utilizado a rotina "Line Parameters" do ATP, definido pelo componente chamado LCC. Para esta modelagem os seguintes aspectos foram considerados:

- Tem-se que definir o tipo de sistema, que neste caso se trata de uma linha aérea;
- Levou-se em consideração para a modelagem o efeito skin;
- Considerou-se o modelo de parâmetros distribuídos baseado no método de Bergeron. Este modelo utiliza os parâmetros geométricos e elétricos da LT, resistividade do solo e comprimento como dados de entrada, resultando assim nas matrizes de impedância e admitância da linha. O mesmo permite ainda modelar linhas transpostas, não transpostas, assimétricas, circuitos simples ou duplos, cabos para-raios, multicondutores, etc. As equações de Bergeron são então usadas para se calcular as relações entre as tensões e as correntes ao longo do tempo em ambos os terminais [25].
- Considerou-se blocos de 35 metros para a representação dos trechos da linha a ser estudada;
- Como se trata de uma análise de sobretensões devido a manobras e também em regime permanente, a frequência para a análise foi considerada 60 Hz;

4.2.4.2 Demais linhas do sistema

As demais linhas do sistema foram modeladas por parâmetros distribuídos através do bloco LINEZT_3 do ATP, onde as informações das impedâncias de sequência positiva e zero das linhas do sistema de interesse foram retirados do diagrama de impedâncias que podem ser obtidos do site da ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

As linhas foram modeladas de maneira distintas pois o bloco LINEZT_3 não nos dá acesso as fases para serem feitas as medições das sobretensões, logo esse bloco não pode ser utilizado para a modelagem do trecho onde há o compartilhamento uma vez que é essencial ter acesso à essas informações. No caso das demais linhas que fazem parte do sistema não há a necessidade de se ter acesso as medições nos condutores, logo optou-se por usar este bloco uma vez que é necessário fornecer apenas as informações das impedâncias de sequência positiva e zero, dados esses que são facilmente obtidos do diagrama de impedâncias no site da ONS, enquanto que o bloco LCC exige que se tenha as informações completas da geometria da linha bem como o tipo de material utilizado na fabricação dos cabos.

4.2.5 Para-raios

O para-raios de média tensão foram modelados através do MOV (Metal Oxide Resistor). A atuação do MOV é definida pela curva VxI do para-raios, como mostrado na Tabela 16:

Tabela 16 – Curva de atuação do para-raios de média tensão [11].

Corrente de descarga (kA)	Tensão Residual (kV)
1,5	27,0
3,0	29,5
5,0	31,5
10,0	36,0
20,0	41,5
40,0	53,0

4.2.6 Equivalente de rede

Um modelo de equivalente para o sistema original foi calculado retendo as barras da rede de interesse, onde há o compartilhamento entre linhas, e representando a contribuição da rede externa através de um equivalente de thevenin, ou seja, uma fonte de tensão seguida por uma impedância (sequência positiva e negativa).

Para calcular os equivalentes utilizou-se o software SAPRE, conforme Figura 26.

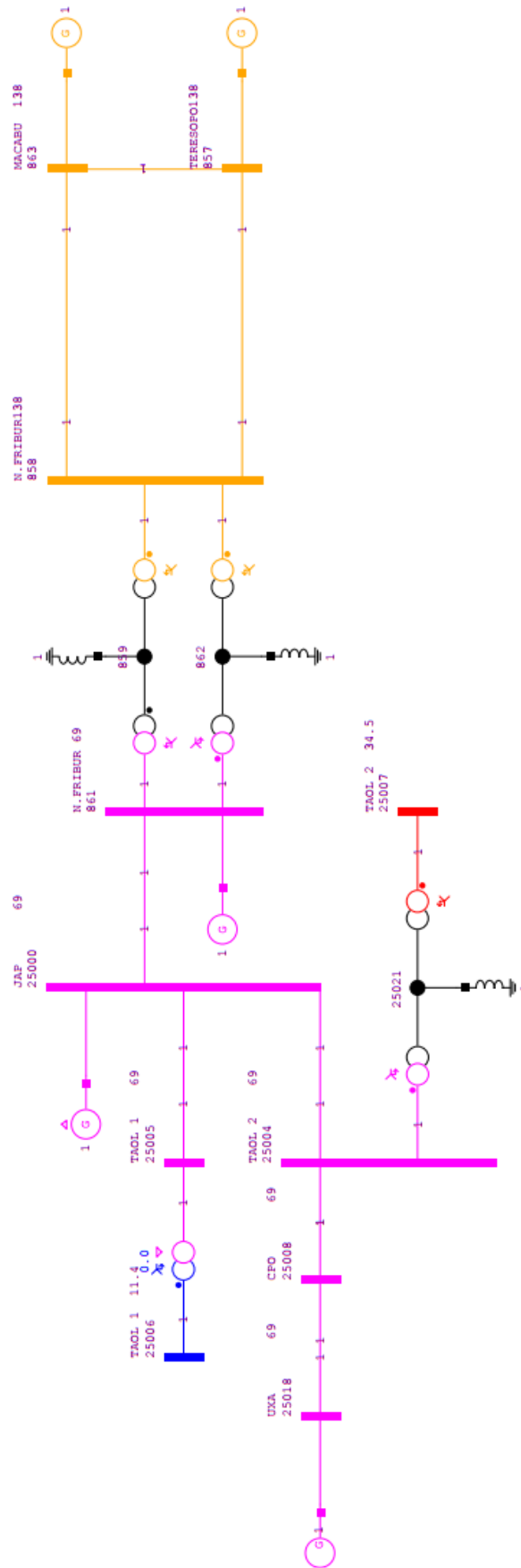


Figura 26 – Equivalente do sistema.

A partir dos dados dos equivalentes obtidos do SAPRE e também os dados de curto-circuito obtidos dos arquivos de extensão .ANA (que são abertos no programa ANAFAS) disponibilizados pela Energisa foi possível realizar a modelagem do sistema para ser simulado no ATP. Depois de modelado o sistema, foram aplicados diferentes tipos de curto-circuitos nas barras e comparado com os resultados obtidos do software ANAFAS para garantir que a modelagem esta correta.

5 Simulações e Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas, bem como os comentários pertinentes sobre cada resultado. Os resultados foram obtidos para a região da rede compartilhada alimentada pelo transformador de 112,5 kVA (nas proximidades da torre P59), como indicado na Figura 27. As simulações envolvem várias situações possíveis de ocorrerem ao longo da operação da rede compartilhada, conforme itens (1) a (5).

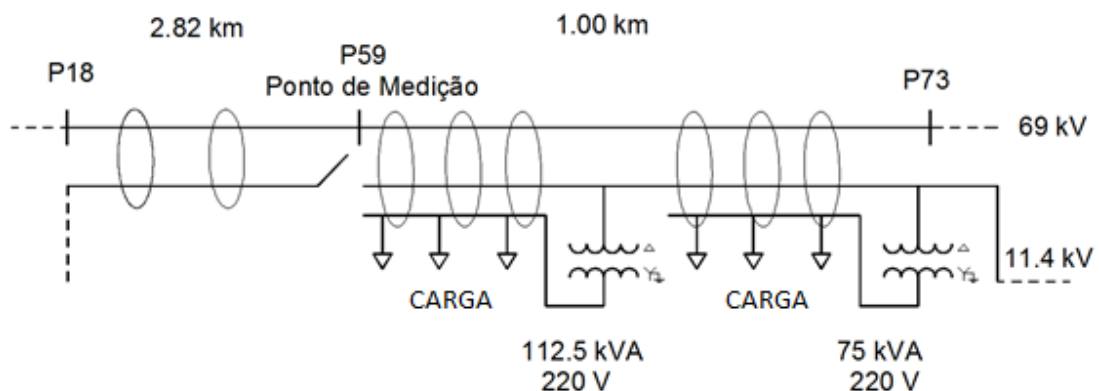


Figura 27 – Pontos de observação de tensões e correntes.

(1) Operação em Vazio: condição em que o subsistema 69 / 11,4 kV está sem carga, isto é, não há fluxo de potência na rede compartilhada;

(2) Operação em Regime Permanente: condição em que o subsistema 69 / 11,4 kV opera na condição de carga, com fluxos de potência e tensões na rede compartilhada dentro de limites usuais;

(3) Energização de linha: condição em que o subsistema se encontra em operação, em regime permanente, porém com a linha JAP – CPA de 69 kV desligada e que será energizada por um dos terminais, estando o outro em aberto. Nesta condição o alimentador de 11,4 kV (que compartilha as torres) está operando e alimentando as cargas normalmente;

(4) Operação sob curto-circuito: condição em que o subsistema se encontra em operação, em regime permanente, e ocorre um curto-circuito em um dos terminais da linha JAP – CPA de 69 kV com reflexos nas redes de MT e BT devido ao compartilhamento;

(5) Procedimentos de aterramento na MT: execução de procedimentos para o aterramento da rede de média tensão para a sua manutenção. Idem para a retirada de aterramentos ao final de manutenção.

5.1 Operação em Vazio

Para o sistema operando a vazio foram considerados seis cenários, que estão detalhados a seguir:

5.1.1 Caso 1

Trata-se do caso em que a linha de alta tensão (AT) está desenergizada, a linha de distribuição em média tensão (MT) está energizada e o transformador de distribuição está desconectado da rede. Nesta condição a rede de BT está “flutuando” e sob a ação do campo eletromagnético produzido pela MT energizada com tensão nominal de 11,4 kV, o que equivale a 9,32 kV de pico para as tensões de fase. Devido ao acoplamento entre as linhas há o aparecimento de uma tensão de 116 V de pico nas fases do circuito de BT (1,12 pu), como mostra a Figura 28, sendo o campo elétrico produzido pela MT o causador desta tensão, dado que ela está em vazio.

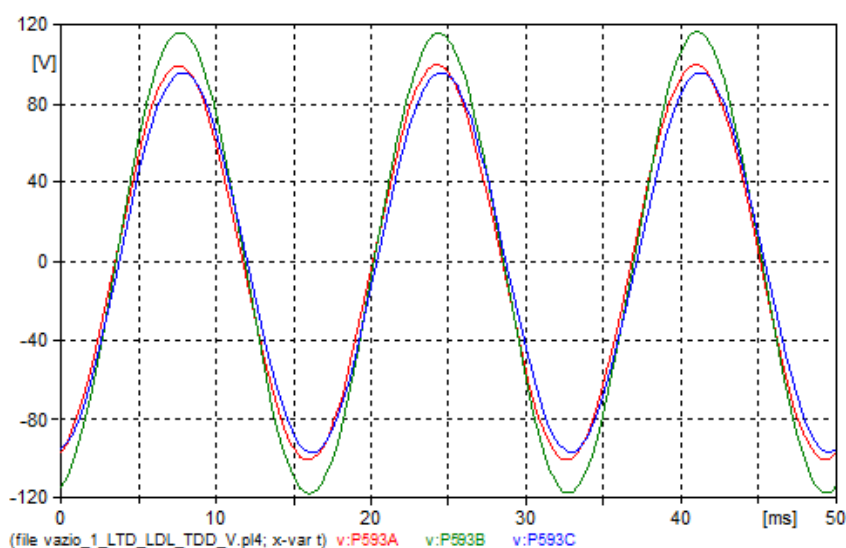


Figura 28 – Caso 1 – Tensão induzida na linha de BT.

5.1.2 Caso 2

É a situação em que a linha de AT está desenergizada, a linha de distribuição de MT está energizada e o transformador de distribuição está conectado na rede. Nesta condição a rede de BT possui referência de terra devido ao secundário do transformador conectado em estrela aterrado.

Com isso, a rede de MT está energizada, em vazio, com tensão nominal de 11,4 kV, o que equivale a 9,32 kV de pico, para as tensões de fase e, via transformador de distribuição energizado, a rede de BT é submetida à tensão nominal de 180 V de pico (1 pu), conforme mostra a Figura 29.

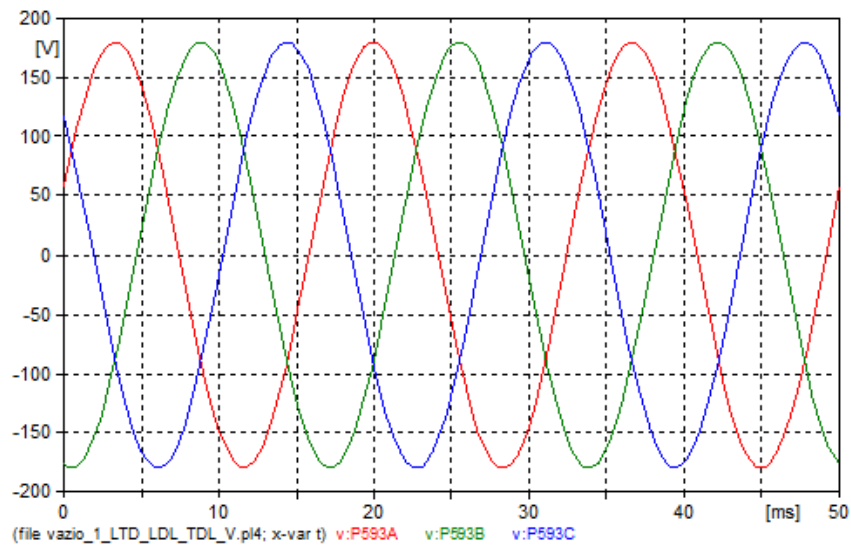


Figura 29 – Caso 2 – Tensão nominal de operação na linha de BT.

5.1.3 Caso 3

É o caso em que a linha de AT está energizada, a linha de distribuição de MT está energizada, o transformador de distribuição está desconectado e a rede de BT se encontra desenergizada. Nesta condição a rede de BT está “flutuando” sob a ação dos campos eletromagnéticos produzidos pela AT e MT energizadas com tensão nominal de 69 e 11,4 kV, resultando em 56,00 e 9,32 kV de pico para as tensões de fase respectivamente.

Devido ao acoplamento há o aparecimento de tensão de 227 V de pico nas fases do circuito de BT (1,26 pu), conforme mostra a Figura 30, sendo o campo elétrico resultante produzido pelas linhas de AT e MT o causador desta tensão, uma vez que elas estão em vazio.

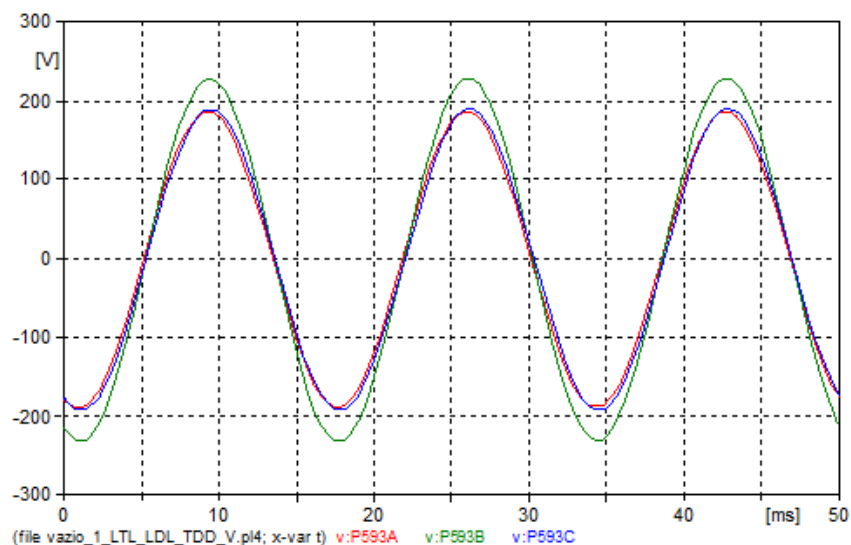


Figura 30 – Caso 3 – Tensão induzida na linha de BT..

5.1.4 Caso 4

É o caso em que a linha de AT está energizada, a linha de distribuição de MT está energizada e o transformador de distribuição está conectado na rede. Nesta condição a rede de BT possui referência de terra via secundário do transformador conectado em estrela aterrada. Assim, as redes de AT e MT estão energizadas, em vazio, com tensão nominal de 69 e 11,4 kV, respectivamente. Como o transformador está conectado à rede a BT é submetida à tensão nominal de 180 V de pico (1 pu) conforme mostra a Figura 31.

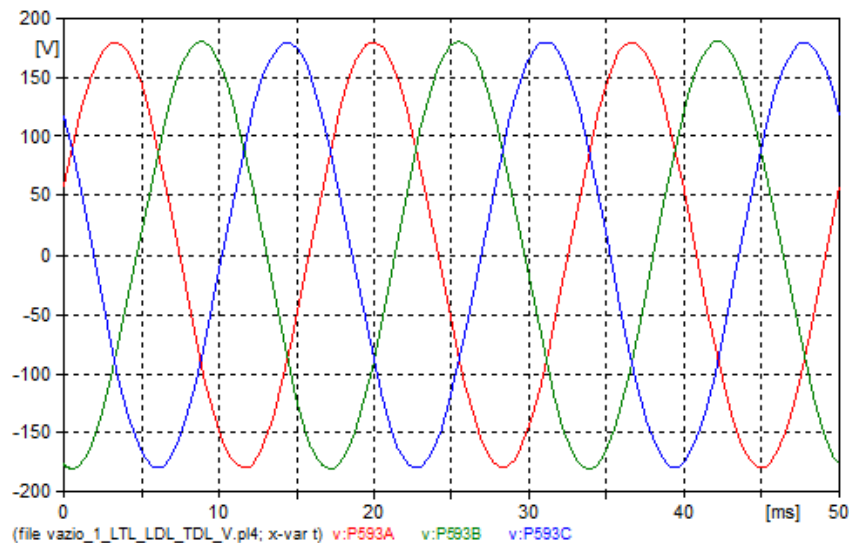


Figura 31 – Caso 4 – Tensão nominal de operação na linha de BT.

5.1.5 Caso 5

É o caso em que a linha de AT está energizada, a linha de distribuição de MT está desenergizada e o transformador de distribuição está desconectado da rede. Nesta condição as redes de MT e BT estão “flutuando” sob a ação do campo eletromagnético produzido apenas pela AT energizada com tensão nominal de 69 kV, o que equivale a 56,00 kV de pico para a tensão de fase da linha AT. O acoplamento entre as linhas provoca o aparecimento de tensão de 444 V de pico nas fases do circuito de MT, conforme Figura 32 e de 190 V de pico nas fases do circuito de BT (1,06 pu) de acordo com a Figura 33, sendo o campo elétrico resultante produzido pela AT o causador desta tensão, uma vez que ela está em vazio.

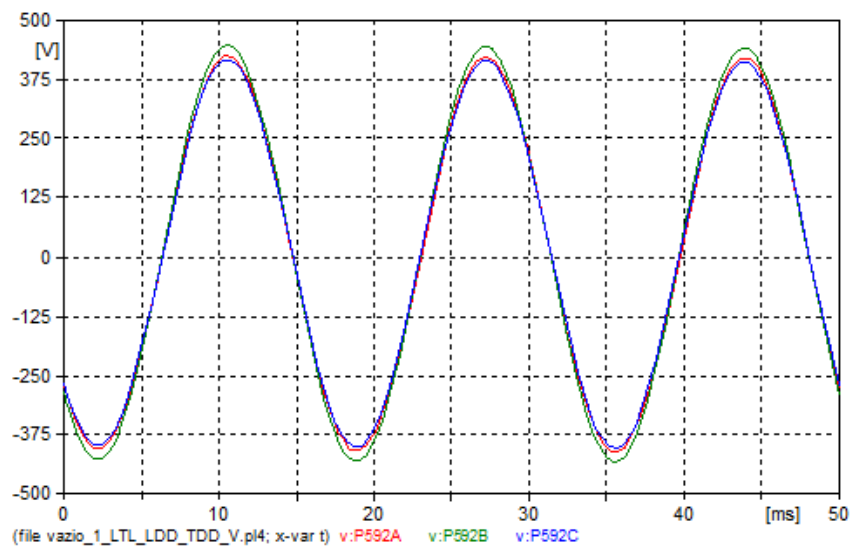


Figura 32 – Caso 5 – Tensão induzida na linha de MT.

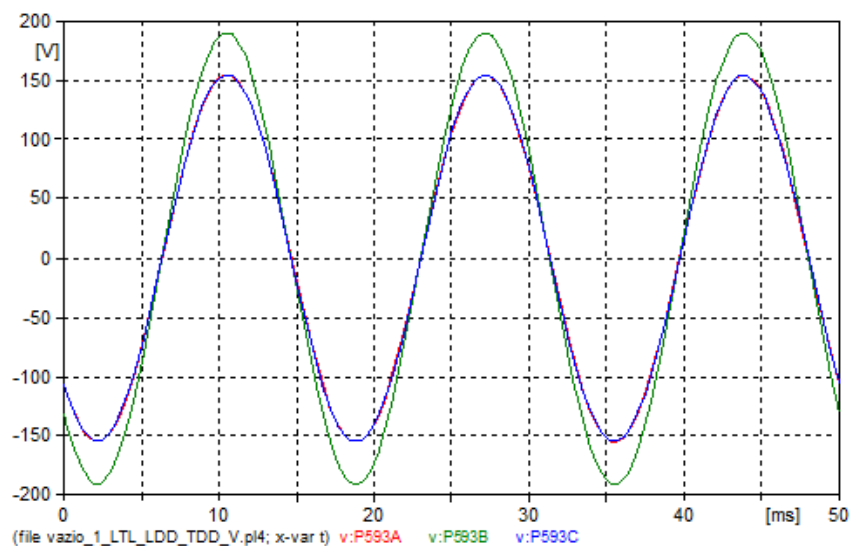


Figura 33 – Caso 5 – Tensão induzida na linha de BT.

5.1.6 Caso 6

Neste caso a linha de AT está energizada, a linha de distribuição de MT está desenergizada e o transformador de distribuição está conectado na rede, porém com as chaves abertas no lado da MT. Nesta condição a rede de MT está “flutuando” sob a ação do campo eletromagnético produzido pela AT energizada, em vazio, com tensão nominal de 69 kV, o que equivale a 56,00 kV de pico para a tensão de fase. A rede de BT também está sob a ação do mesmo campo, porém o secundário do transformador de distribuição fornece referência de terra a esta rede, uma vez que está conectado em estrela aterrado. Há então o aparecimento de tensão de 423 V de pico somente nas fases do circuito de MT, como mostra a Figura 34. Pelo fato da rede de BT estar

conectada à terra não há tensão devido ao campo elétrico produzido pela AT, como mostra a Figura 35.

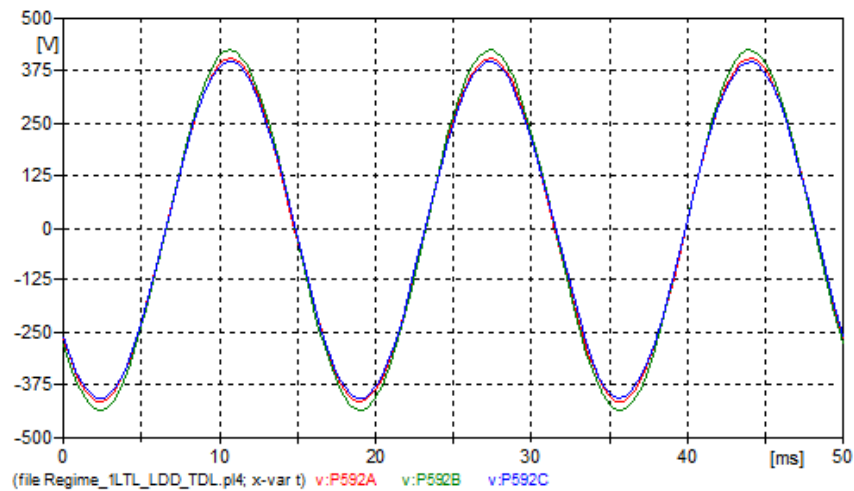


Figura 34 – Caso 6 – Tensão induzida na linha de MT.

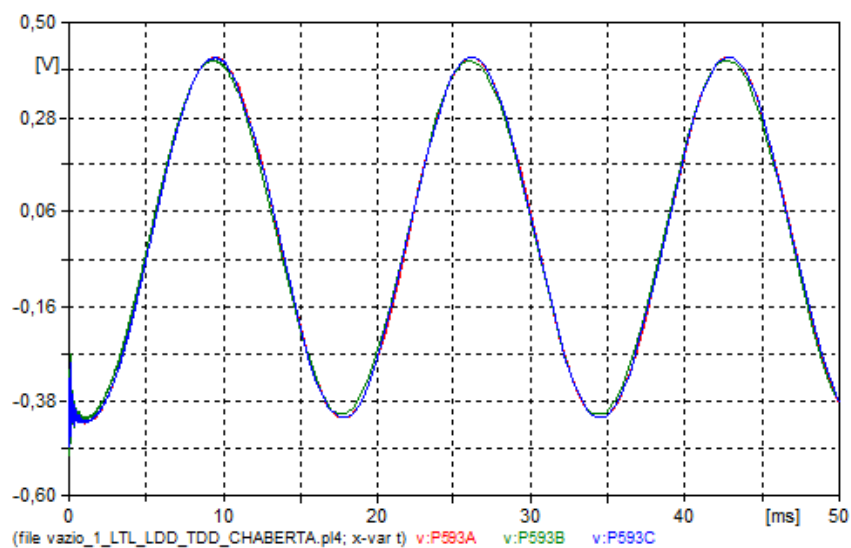


Figura 35 – Caso 6 – Tensão induzida na linha de BT (V 0).

Comentários sobre as simulações a vazio:

Os casos simulados, apresentados retratam as condições mais comuns de se ocorrer na condição das redes em vazio, com um ou mais circuitos energizados. Nestas situações a ação do campo elétrico por meio do acoplamento capacitivo entre os circuitos (capacitâncias mútuas) induz tensão nos demais circuitos que compartilham a mesma estrutura. Em um circuito de distribuição normal somente com as redes de MT e de BT, dependendo da condição, podem surgir tensões induzidas na BT devido ao acoplamento capacitivo entre estes, quando o circuito de MT está energizado em vazio (Caso 1). Quando o transformador de distribuição está conectado à rede, há referência de terra para o circuito secundário e a tensão nominal se impõe na BT (Caso

2). Para a situação em que transformador de distribuição está com as chaves abertas no primário, porém conectado no secundário, a tensão na rede BT é nula (Caso 6).

A presença de uma linha de alta tensão próxima aos circuitos de MT e BT acentua o efeito de acoplamento capacitivo e as tensões induzidas na rede de BT são ligeiramente mais elevadas (Caso 3). Em situações de manutenção na rede de MT, com o AT energizada em vazio, os níveis de tensão são ainda mais elevados (Casos 4 e 5).

A ação do campo elétrico da rede de AT se manifesta nas redes de MT e BT quando estas se encontram “flutuando”, isto é, ainda não foram aterradas através dos procedimentos usuais adotados pelas equipes de manutenção. Nesta fase, as equipes devem utilizar EPIs compatíveis com tensões da ordem de 500 V de pico, que podem ser induzidas devido ao campo elétrico, com a rede de AT energizada em vazio (sem que ocorra nenhum outro evento na rede AT).

5.2 Operação em Regime Permanente

Nesta condição operativa o sistema opera em carga com o cenário de 2016, no qual o fluxo de potência é de 6,95 MVA na linha de 69 kV que conecta as subestações Julius Arp e Conselheiro Paulino e de 148 kVA na rede de 11,4 kV (alimentador conectado na subestação Conselheiro Paulino),

Para as linhas operando em regime permanente foram considerados três casos, que são detalhados a seguir:

5.2.1 Caso 1

É a condição na qual as redes de AT, MT e BT estão energizadas operando em regime permanente com tensão de 56 kV de pico (68,59 kV rms fase-fase) na AT, 9,32 kV de pico (11,41 kV rms fase-fase) e 165 V de pico (117 V rms fase-neutro) na BT. Nesta condição, o sistema opera como o esperado, sem alteração no valor das tensões nominais de cada linha provocado pela proximidade entre os circuitos, conforme mostram as Figuras 36 e 37.

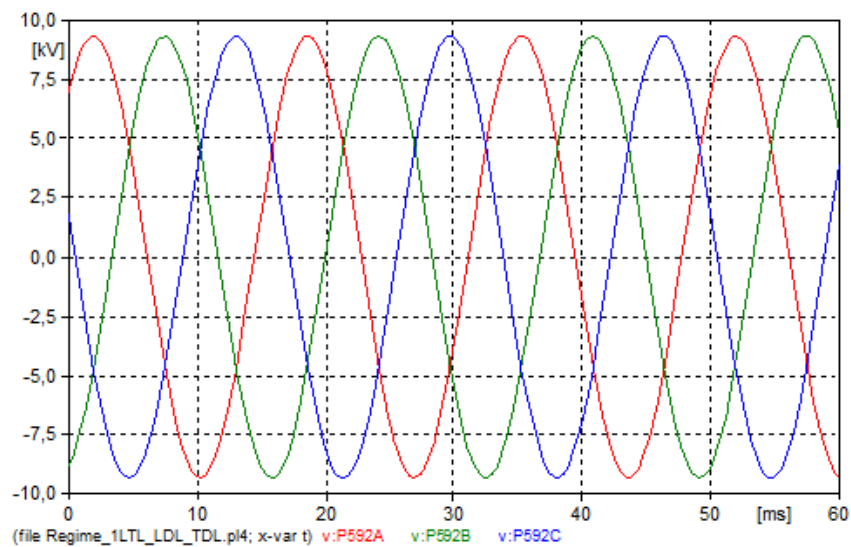


Figura 36 – Caso 1 – Tensão na MT em regime permanente – 11,41 kV rms.

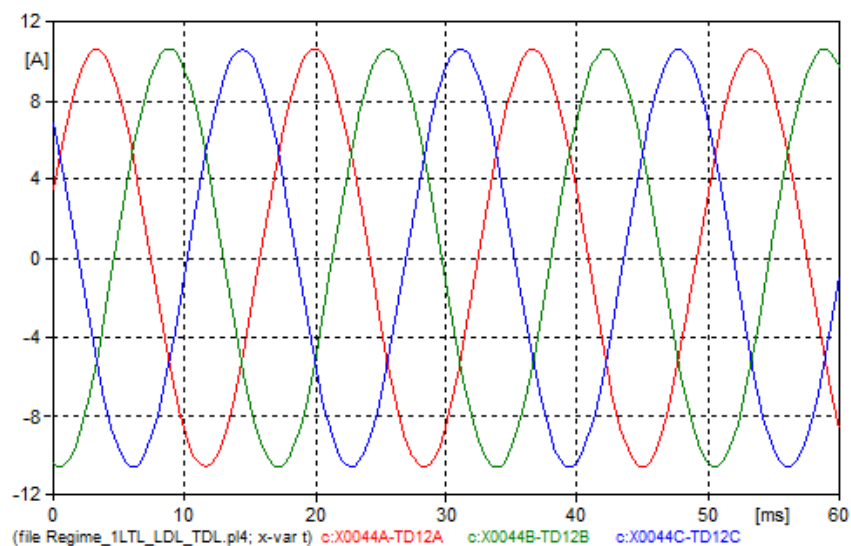


Figura 37 – Caso 1 – Corrente na MT em regime permanente – 7,5 A rms.

5.2.2 Caso 2

É o caso onde a rede de AT está energizada operando em regime permanente com tensão de 56 kV de pico (68,59 kV rms fase-fase) estando as redes de MT e de BT desenergizadas, com as chaves abertas do lado de MT dos transformadores de distribuição. Nesta condição, o acoplamento elétrico induz uma tensão na rede de MT por estar “flutuando” no valor de 423 V de pico, conforme a Figura 38, e não induz tensão na rede de BT por existir referência de terra via transformador de distribuição.

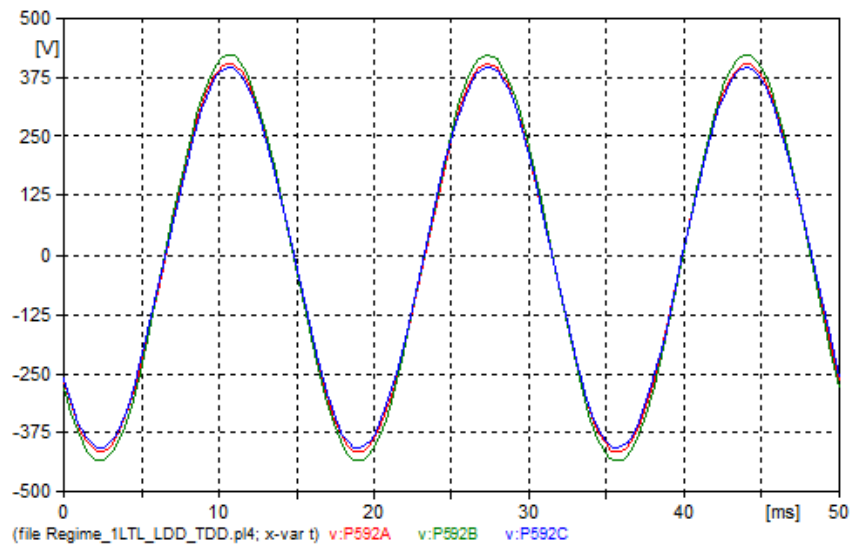


Figura 38 – Caso 2 – Tensão induzida na MT desligada com a AT em regime.

5.2.3 Caso 3

É o caso no qual a rede de AT está energizada operando em regime permanente com tensão de 56 kV de pico (68,59 kV rms fase-fase) na AT, estando as redes de MT e de BT desenergizadas, com as chaves fechadas do lado de MT dos transformadores de distribuição. Nesta condição, o acoplamento elétrico induz tensão na rede de MT por estar “flutuando”, no valor de 420 V, como mostra a Figura 39 de pico e não induz tensão na rede de BT devido à referência de terra via transformador de distribuição.

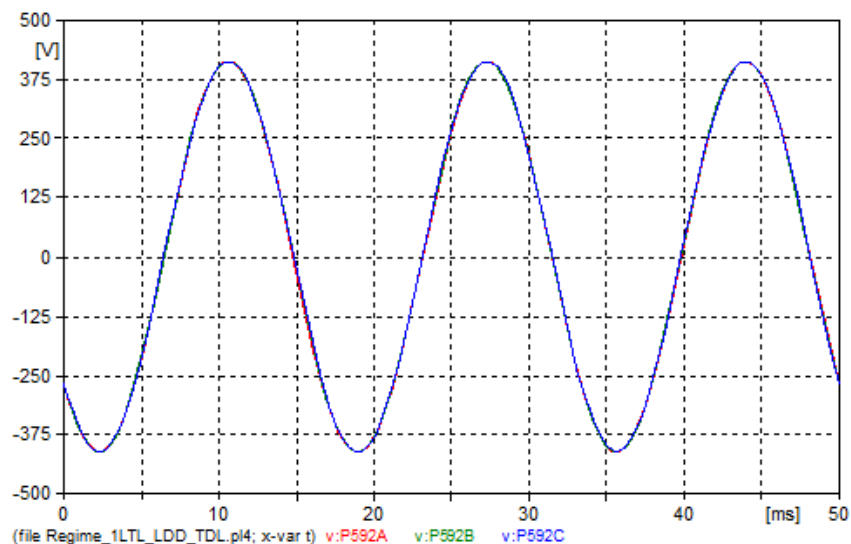


Figura 39 – Caso 3 – Tensão induzida na MT desligada com a AT em regime.

Comentários sobre as simulações realizadas estando a linha de alta tensão em regime permanente:

As simulações mostram que, em regime permanente, não se deve esperar sobretensões nas redes de MT e de BT devido ao acoplamento eletromagnético entre os circuitos de alta, média e baixa tensão. Nos casos simulados as tensões induzidas na rede de MT se devem ao campo elétrico da rede de AT, já que a rede de MT se encontra sem aterramento, “flutuando” no sistema.

5.3 Energização da Linha de 69 kV

Nesta seção são detalhadas as simulações realizadas envolvendo a energização da linha de alta tensão da rede compartilhada. Condição em que o subsistema se encontra em operação e em regime permanente, porém com a linha de 69 kV desenergizada e que será energizada por um dos terminais, estando o outro aberto.

Foram considerados três casos para a energização da AT, que estão especificados a seguir:

5.3.1 Caso 1

É o caso em que a linha de AT se encontra aberta nos dois terminais e é energizada a partir do fechamento do disjuntor na subestação JAP (Julius Arp), que será energizada a vazio. Durante a energização da AT, as redes de MT e BT estão ligadas e em operação normal. Durante a energização a tensão transitória máxima no terminal receptor (barramento de alta tensão da subestação CPA) é de 115 kV de pico (2,05 pu). Durante a manobra, a tensão na rede de MT se eleva para 10,70 kV de pico (1,15 pu) e a tensão na rede de BT alcança valores de pico de 1200 V. As elevações de tensão são eventos transitórios (duração de poucos milissegundos), com alto amortecimento. A Figura 40 mostra a tensão na BT.

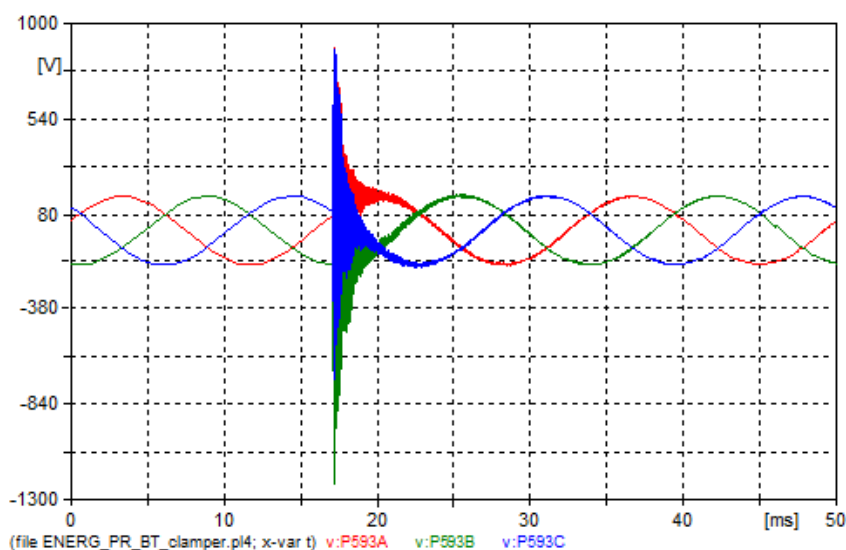


Figura 40 – Caso 1 – Tensão na BT devido a energização em vazio da LT JAP – CPA, a partir de JAP.

5.3.2 Caso 2

É a situação similar ao Caso 1, porém com a instalação de para-raios na rede de BT com o objetivo de reduzir as sobretensões transitórias. A instalação de para-raios ZnO ao longo da rede de BT (a cada 100 metros) reduz as sobretensões transitórias de 1200 V para 710 V de pico (valor máximo) nos pontos onde foi monitorada a tensão. A energia absorvida no processo é baixa (8 mJ), muito inferior à suportabilidade do para-raios que é de 692 J (MCOV = 280 V rms). As Figuras 41 e 42 mostram a tensão na BT após a instalação do para-raios e sua energia absorvida, respectivamente.

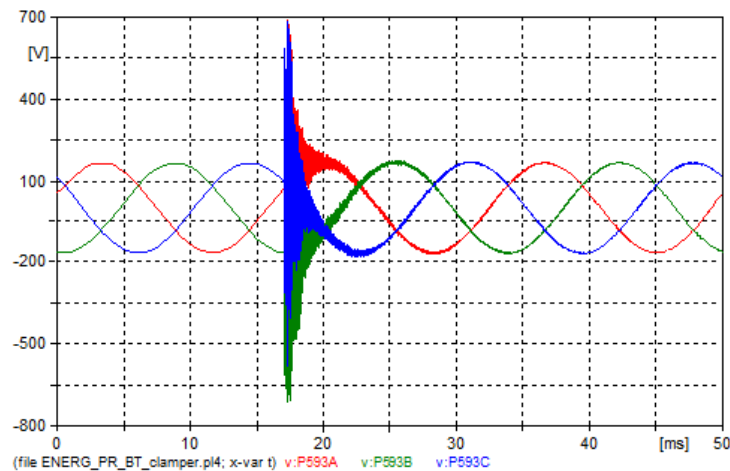


Figura 41 – Caso 2 – Tensão na BT devido a energização em vazio da LT JAP – CPA, a partir de JAP, com instalação de para-raios na BT.

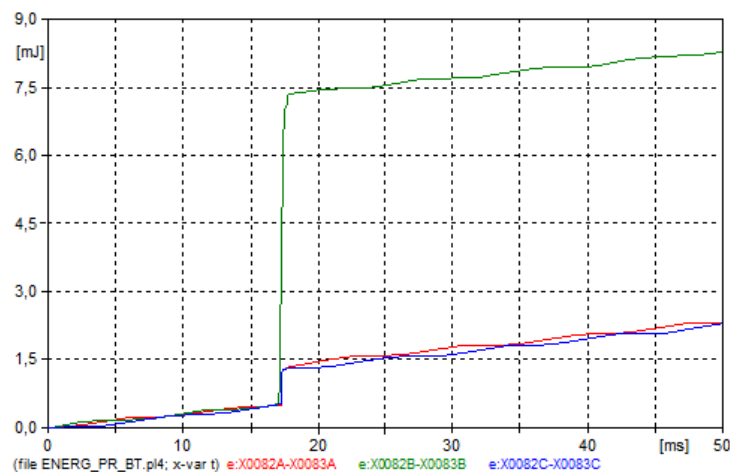


Figura 42 – Caso 2 – Energia absorvida pelo para-raios na BT devido a energização em vazio da LT JAP – CPA, a partir de JAP.

5.3.2.1 Caso 3

É o caso onde a energização da linha de AT é feita a partir de CPA (fechamento do disjuntor em CPA com o terminal receptor JAP aberto). Nestas condições, a máxima sobretensão

transitória na AT é de 1,79 pu, na MT é de 1,05 pu e na BT os níveis máximos alcançam 600 V de pico devido a limitação proporcionada pelos para-raios, como mostra a Figura 43 . O resultado, em comparação com o Caso 2, revela uma condição ligeiramente mais favorável de energização.

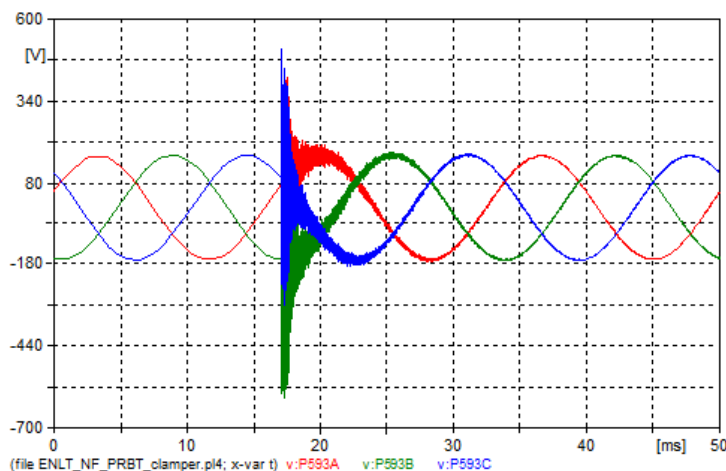


Figura 43 – Caso 3 – Tensão na BT devido a energização em vazio da LT JAP – CPA, a partir de CPA, com instalação de para-raios na BT.

Comentários sobre as simulações de energização da linha de alta tensão:

A linha de AT em 69 kV é uma linha curta e possui elevado amortecimento (típico do nível de tensão, logo não são esperadas sobretensões transitórias nesta linha. O estabelecimento de uma corrente de energização na linha de AT provoca o surgimento de tensões transitórias nas redes de MT e de BT, sendo que o campo magnético gerado é o principal fator para o surgimento destas tensões.

Na rede de BT, a instalação de para-raios ao longo do trecho compartilhado limita os valores de pico destas tensões transitórias, reduzindo os riscos para a rede de BT.

5.4 Operação sob Curto-Circuito

Neste caso foram aplicados diferentes tipos de curto-circuitos na linha de 69 kV da rede compartilhada. Para esta condição o subsistema se encontra em operação em regime permanente e ocorre um curto-circuito em um dos terminais da AT o que induz sobretensões nas redes de MT e BT devido ao compartilhamento.

Para as simulações envolvendo curto-circuitos foram considerados cinco casos distintos que estão detalhados a seguir:

5.4.1 Caso 1

É o caso na qual o sistema está operando em regime permanente, e as redes de AT, MT e BT estão energizadas. Em um dado instante ocorre um curto-circuito monofásico na barra AT da

subestação Conselheiro Paulino que possui valor igual 6400 A de pico (4,53 kA rms), fazendo com que a corrente na linha de AT se eleve (contribuição ao curto-circuito) e induza tensões nas redes de MT e de BT. Na linha de 69 kV as tensões temporárias nas fases sadias se elevam ligeiramente (1,03 pu) devido à configuração de aterramento do sistema (solidamente aterrado).

Na rede de MT, a sobretensão transitória máxima é de 19,5 kV de pico (2,09 pu) e na rede de BT o valor máximo é de 1950 V de pico, (medido na carga de 15 kVA mais distante do transformador da Figura 27). O fenômeno envolvido é o de uma variação brusca de corrente sobre uma indutância (mútua) produzindo uma tensão induzida. As Figuras 44 e 45 mostram a tensão na MT e BT no momento que ocorre um curto circuito na AT.

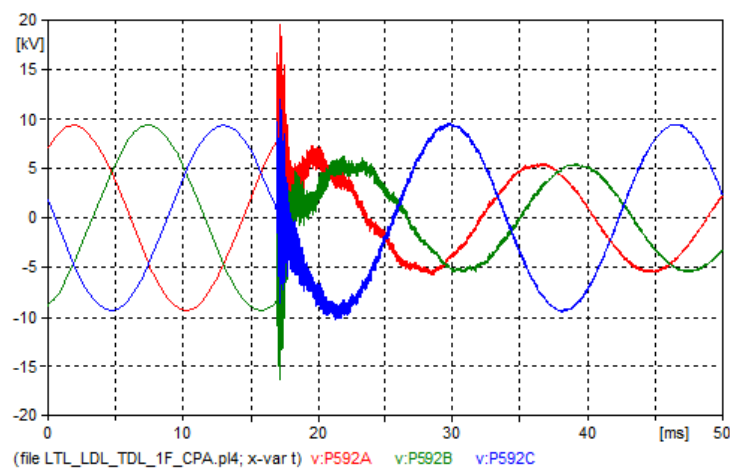


Figura 44 – Caso 1 – Tensão na MT devido ao curto-circuito monofásico na barra de AT de CPA.

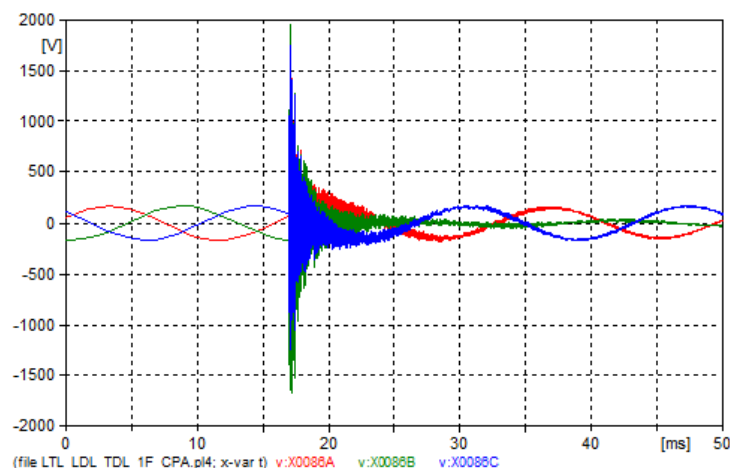


Figura 45 – Caso 1 – Tensão na BT devido ao curto-circuito monofásico na barra de AT de CPA.

5.4.2 Caso 2

É uma situação similar ao Caso 1, porém com a utilização de para-raios ZnO na rede de BT, instalados no final desta (estrutura P59) e também no transformador, com o objetivo de

reduzir a sobretensão transitória ao longo do trecho compartilhado. Esta sobretensão se reduz de 1950 V para 1060 V de pico, mostrando a eficácia do uso de para-raios nesta situação. Nesta condição, a energia absorvida pelos para-raios de baixa tensão é desprezível, pois houve atuação apenas para limitar os maiores picos da tensão. As Figuras 46 e 47 mostram a tensão na BT e a energia absorvida pelo para-raios no momento que ocorre o curto-circuito na AT.

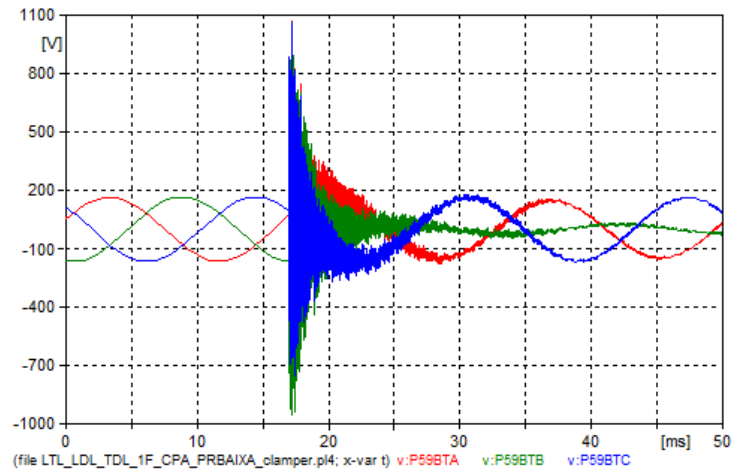


Figura 46 – Caso 2 – Tensão na BT devido ao curto-circuito monofásico na barra de AT de CPA com a instalação de para-raios na BT

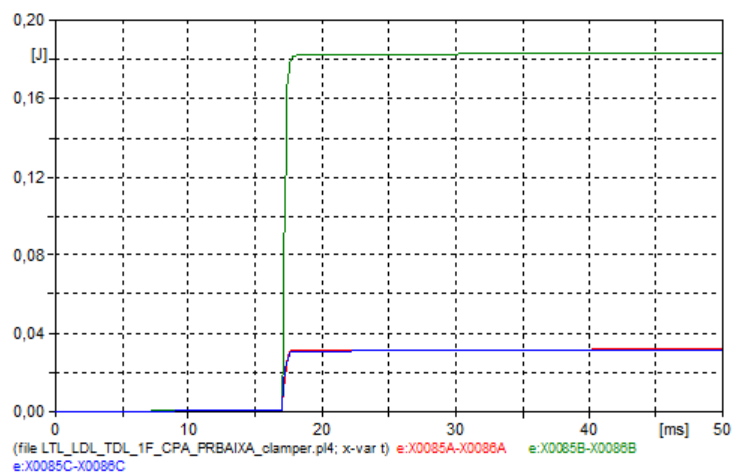


Figura 47 – Caso 2 – Energia absorvida no para-raios da BT.

5.4.3 Caso 3

É o caso onde ocorre um curto-circuito monofásico na barra de AT da subestação Julius Arp. Neste caso, a contribuição ao curto-circuito que flui na linha de AT de CPA para JAP é menor do que no Caso 1, embora a corrente de curto-circuito na barra da SE JAP seja maior (7940 A de pico). Assim, as tensões induzidas nas redes de MT e de BT são menores: 1,48 pu na MT e 1670 V de pico na BT, como mostrado na Figura 34.

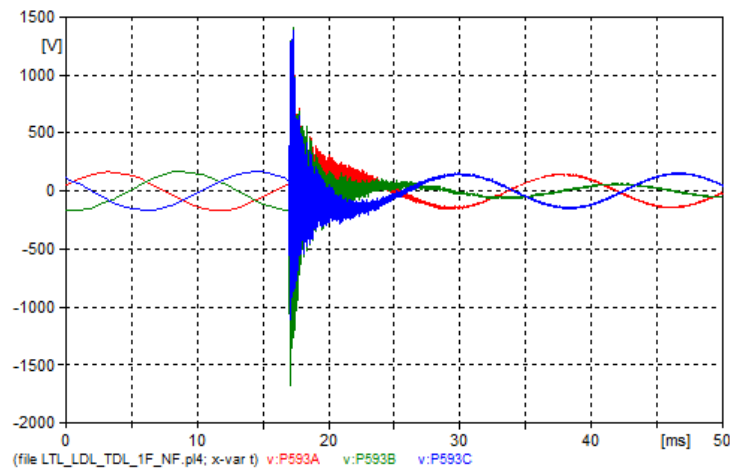


Figura 48 – Caso 3 – Tensão na BT devido ao curto-circuito monofásico na barra de AT da SE JAP.

Porém mesmo a tensão induzida na BT sendo menor, seu valor continua elevado sendo necessária a instalação de para-raios para limitar o pico de tensão

5.4.4 Caso 4

É o caso onde ocorre um curto-circuito trifásico na barra de AT da SE CPA, levando a tensão a zero nas três fases nesta barra. A rede de MT é alimentada pelo transformador conectado nesta barra. Como a sobretensão transitória que aparece nas redes de MT e de BT é uma sobreposição da tensão induzida à tensão a frequência industrial, a resultante é uma sobretensão menor em relação aos casos com ocorrência de curto-circuito monofásico. Embora o valor da corrente de curto-circuito trifásico seja maior do que os casos com curto-circuito monofásico, a redução da tensão nas três fases minimiza o resultado final, como mostrado na Figura 49.

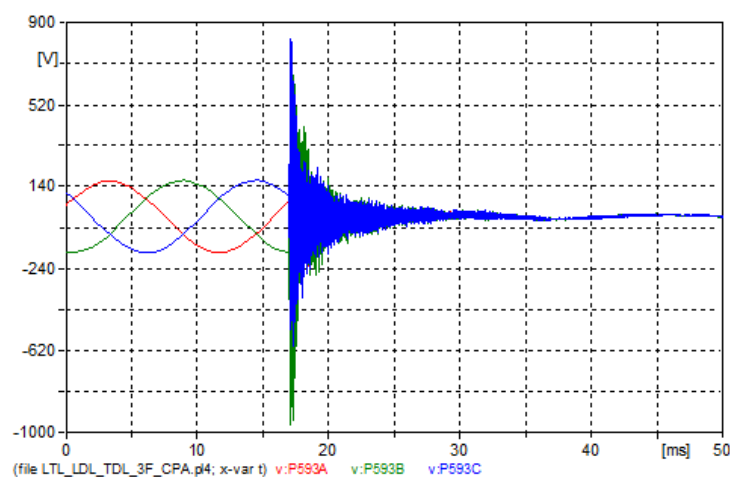


Figura 49 – Caso 4 – Tensão na BT devido ao curto-circuito trifásico na barra de AT da CPA

5.4.5 Caso 5

É o caso onde há a ocorrência de um curto-circuito trifásico é a barra de AT da SE JAP. Neste caso, as sobretensões transitórias nas redes de MT e de BT são ligeiramente maiores devido ao fato de o local de curto-circuito ser afastado da barra CPA que alimenta a rede de MT, e a tensão à frequência industrial possuir um valor baixo, porém não nulo. A Figura 50 mostra a tensão na BT quando ocorre um curto-circuito trifásica na AT.

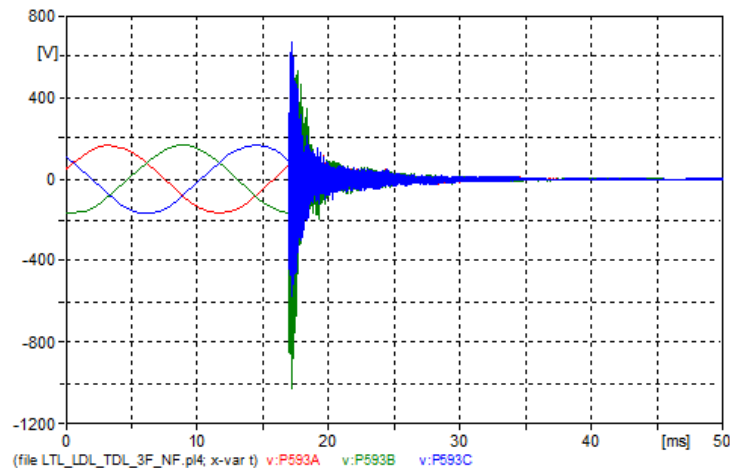


Figura 50 – Caso 5 – Tensão na BT devido ao curto-circuito trifásico na barra de AT da SE JAP.

Comentários sobre as simulações envolvendo curto-circuito na linha de alta tensão:

A elevação de tensão (máxima sobretensão transitória) nas redes de MT e de BT é mais crítica na ocorrência de curto-circuito monofásico na rede de AT, pois as tensões nas redes de MT e de BT são sobrepostas, sendo resultado da junção da tensão induzida com a tensão de frequência industrial, resultando em valores mais elevados quando comparado com os casos envolvendo a ocorrência de curto-circuito trifásico.

A utilização de para-raios na rede de BT limitou o nível de tensão na linha sem que a energia absorvida excedesse o limite o mesmo.

5.5 Controle das sobretensões transitórias na BT sob ação de curto-circuito na AT:

Neste item será avaliado o perfil da sobretensão transitória ao longo da rede de 210 metros da linha de BT, alimentada por um transformador de 112,5 kVA (instalado na posição 7 da figura 51). Este transformador alimenta seis consumidores, instalados nas posições de 2 a 7, sendo a posição 2 a mais distante do transformador. A posição 1 é o final da rede onde não há carga instalada, conforme Figura 51 a seguir.

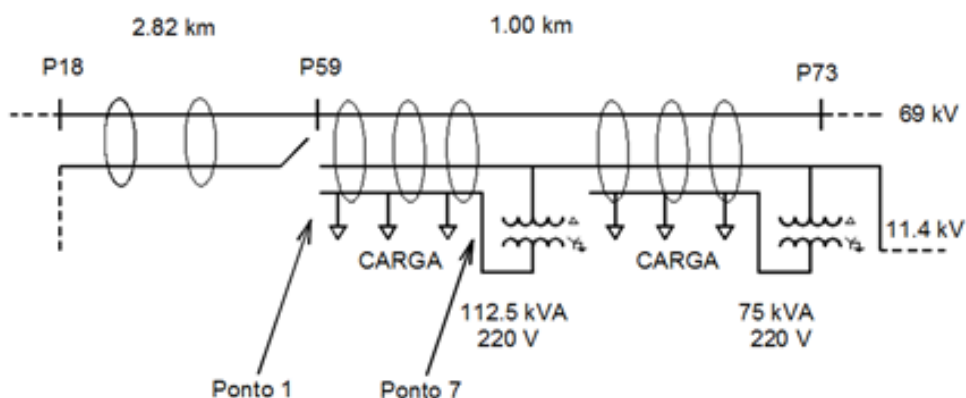


Figura 51 – Localização dos para-raios na rede BT.

Foram simulados três casos como descritos a seguir:

- Caso 1: sem para-raios na BT;
- Caso 2: com para-raios instalados no final da rede e junto ao transformador (posições 1 e 7);
- Caso 3: com para-raios instalados a cada 100 metros nas posições 1, 4 e 7.

A Tabela 17 mostra as tensões em todos os pontos de monitoramento (pontos do 1 ao 7 da Figura 51) para os casos 1, 2 e 3.

Tabela 17 – Tensões na rede BT devido ao curto-circuito monofásico na AT da SE CPA

Distâncias a partir do Transformador MT/BT (m)		210	175	145	105	70	35	0
Posições de medição na rede BT		1	2	3	4	5	6	7
Caso	Descrição	Sobretensão transitória na rede BT (Vp)						
1	Sem para-raios na BT	2300	1950	1440	1250	1050	800	600
2	Com PR no final da rede BT	1390	1060	910	890	785	620	525
3	Com PR a cada 100 m	1390	1050	870	712	670	570	520

O para-raios utilizado nestas simulações é para aplicação em redes de baixa tensão (resistor não linear de ZnO sem centelhador), e possui as características mostradas na Tabela 18.

Tabela 18 – Características básicas do para-raios de BT.

Para-raios para baixa tensão CLAMPER PRBT-RDS	
MCOV	280 (Vrms)
Corrente Nominal de Descarga	10 (kAp)
Nível de Proteção Nominal	<1300 (Vp)
Máxima Absorção de Energia	692 (J)

A partir da Tabela 17 pode-se tirar as seguintes conclusões:

O Caso 1 mostra a necessidade de controle das sobretensões transitórias que aparecem na rede de BT, uma vez que a magnitude das sobretensões ultrapassam o limite de 1000 V considerado para a BT.

O Caso 2 mostra que um conjunto de para-raios instalados no final do trecho (posição 1) e outro junto ao transformador limita as sobretensões transitórias, porém ainda permanece valores relativamente elevados.

O Caso 3 mostra a limitação das sobretensões transitórias e a melhoria no perfil de tensão ao longo da rede, sendo mais seguro a sua recomendação para a aplicação de forma generalizada na rede de BT, pois a cada 100 metros, a partir do transformador inclusive, seria instalado um conjunto de para-raios para o controle destas sobretensões.

Comentários sobre as simulações que analisam a instalação de para-raios na BT quando da ocorrência de um curto-circuito monofásico no barramento de alta tensão da subestação Conselheiro Paulino:

As sobretensões transitórias induzidas na rede de BT devido às ocorrências de curtos-circuitos monofásicos na rede de AT são bastante elevadas e haverá necessidade de atuar no seu controle de modo a limitá-las a valores compatíveis com a suportabilidade prevista para este nível de tensão, onde o limite máximo considerado para sobretensões na BT é de 1000 V.

5.6 Procedimentos de aterramento na MT

Neste item são simuladas situações onde há a abertura e fechamento da chave de aterramento (instalação e retirada do grampo de aterramento) na rede de MT com o objetivo de verificar as sobretensões e correntes que irão aparecer na linha quando ela está desenergizada e sob manutenção. No fechamento da chave, verifica-se a corrente capacitiva que se estabelece entre o grampo e a terra, bem como a tensão prévia existente. Na abertura da chave, provoca-se um corte de corrente verificando-se a tensão que se estabelece entre o grampo e a fase, bem como a corrente indutiva prévia existente.

Para avaliar as correntes e tensões nos grampos de aterramento no momento da manutenção da MT foram considerados seis casos, que estão detalhados abaixo:

5.6.1 Caso 1

É o caso em que a linha de transmissão está energizada e a linha de distribuição está desenergizada e será aterrada para a execução de manutenção na rede. É instalado o primeiro grampo de aterramento na fase A e flui pelo aterramento uma corrente capacitiva inferior a 4 A de pico, como mostrado na Figura 52. Neste caso, as tensões nas fases B e C vão a zero devido à presença do transformador que permaneceu conectado à rede.

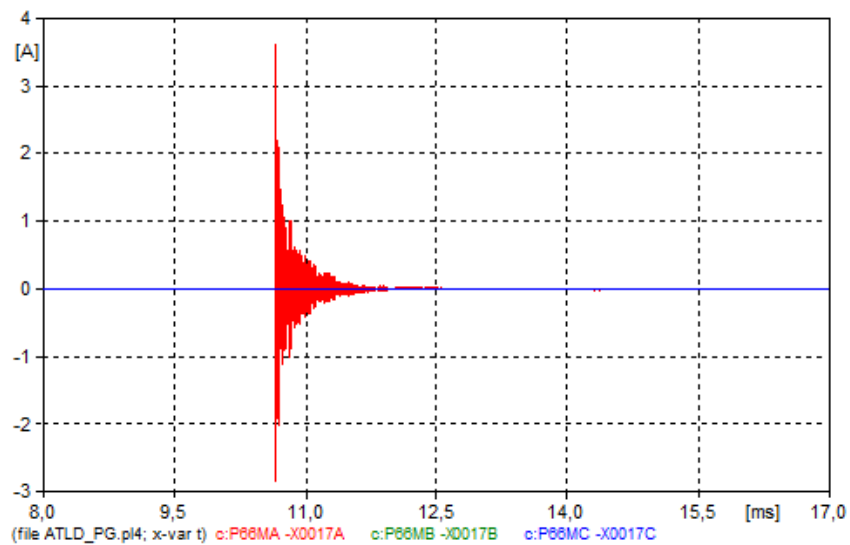


Figura 52 – Caso 1 – Corrente no primeiro grupo de aterramento, na fase A, durante a instalação do aterramento na rede MT.

5.6.2 Caso 2

É similar ao Caso 1, porém com o transformador de distribuição desligado (chave fusível aberta). A corrente capacitiva que flui no aterramento da fase A é de 1,6 A de pico e há tensão remanescente nas fases B e C é de 270 V de pico, que será posteriormente eliminada via instalação de grampos de aterramento nas fases B e C, como mostra as Figuras 53 e 54.

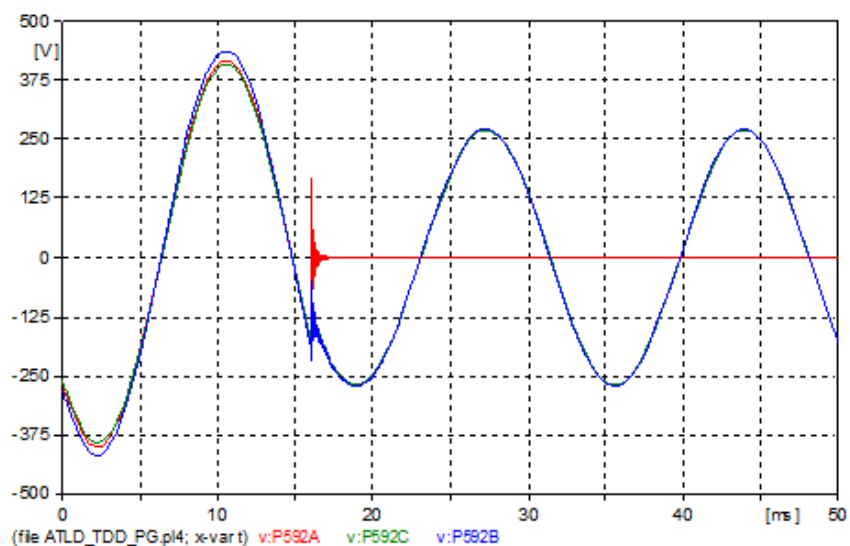


Figura 53 – Caso 2 – Tensão remanescente nas fases B e C após a instalação do 1º grupo de aterramento na fase A, com a chave fusível do transformador aberta.

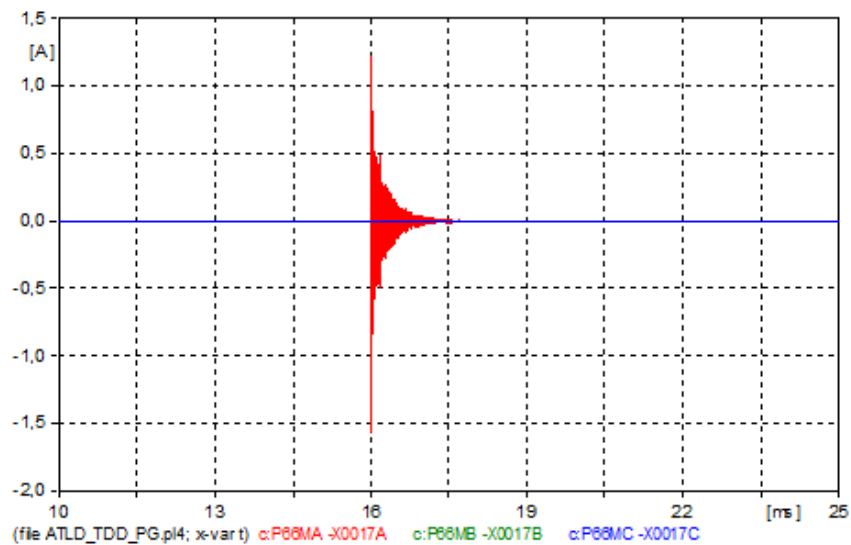


Figura 54 – Caso 2 – Corrente no 1º grampo de aterramento, na fase A, durante a instalação do aterramento na rede MT, com a chave fusível do transformador aberta.

5.6.3 Caso 3

É o caso em que o primeiro grampo foi instalado nas fases A, B e C de um terminal da MT e é instalado um segundo grampo na fase A do outro extremo do trecho. Nestas condições, flui para o sistema de aterramento via segundo grampo (fase A) uma corrente indutiva de 2,5 A de pico devido ao fechamento do circuito a terra, como mostra a Figura 55.

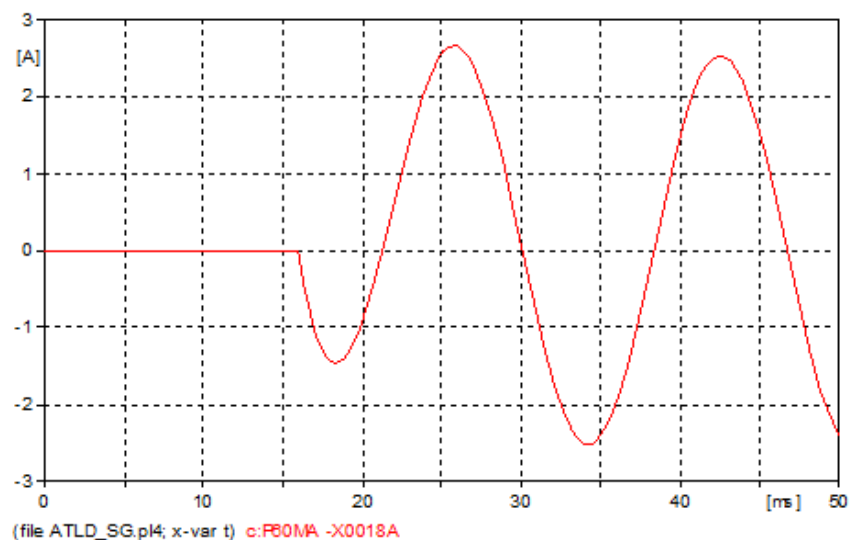


Figura 55 – Caso 3 – Corrente após o fechamento do 2º grampo de aterramento, na fase A, durante a instalação do aterramento na rede MT.

5.6.4 Caso 4

É o caso em que a linha de transmissão está energizada, a linha de distribuição está desenergizada e aterrada através de grampos de aterramento nas três fases em dois pontos, distantes de 420 metros. O transformador de distribuição está ligado à rede de MT. Devido ao aterramento da MT e o acoplamento com a linha de AT, flui uma corrente indutiva na rede de MT. Quando a manutenção na rede é concluída e esta é desaterrada há um corte de corrente fora de seu zero natural. A corrente interrompida tem característica indutiva e valor de 1,22 A de pico. A tensão que surge entre o grampo e a rede no momento da desconexão é de 350 V de pico. Nas fases B e C permanecem fluindo correntes indutivas de 1,65 A de pico que serão eliminadas pela remoção dos grampos de aterramento das fases B e C, como mostra as Figuras 56 e 57, a seguir.

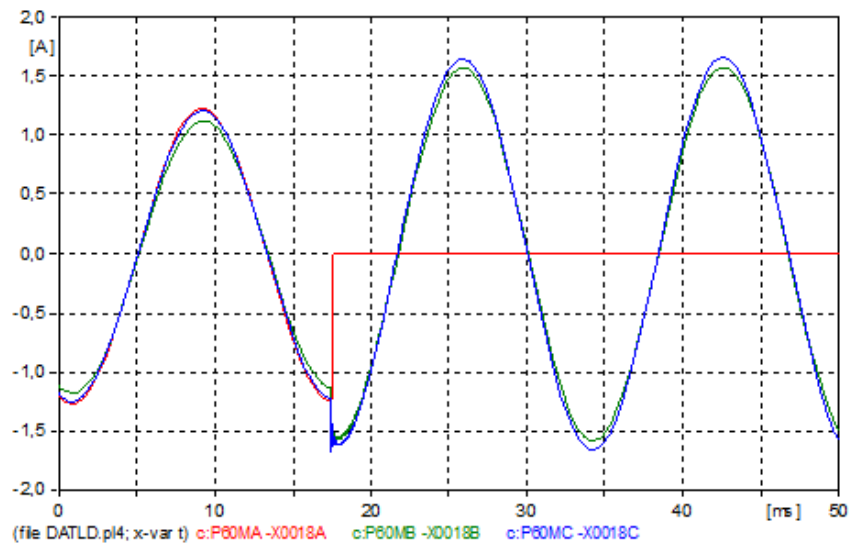


Figura 56 – Caso 4 – Interrupção (corte) de corrente durante a retirada do 1º grampo de aterramento da fase A.

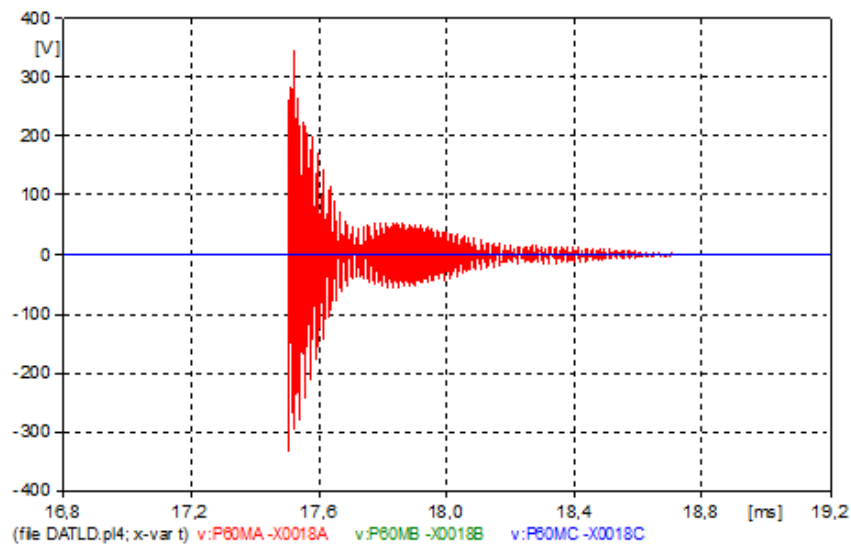


Figura 57 – Caso 4 – Tensão no grampo durante a interrupção (corte) de corrente na retirada do 1º grupo de aterramento da fase A.

5.6.5 Caso 5

No caso 5 a linha de transmissão se encontra em regime permanente e antes da remoção do 1º grupo de aterramento da fase A ocorre um curto-circuito monofásico na fase A na barra AT da SE CPA. No momento da retirada do grupo a linha de distribuição está aterrada nas duas extremidades e circula por suas fases um elevado valor de corrente induzida devido ao fluxo de curto-circuito.

Assim, a tensão transitória que aparece entre o grampo e a fase A durante a sua retirada é de 8000 V de pico e a corrente interrompida é de 30 A de pico, como mostra as Figuras 58 e 59. A tensão induzida na rede BT não é afetada pela remoção do aterramento na MT, como mostra a Figura 60.

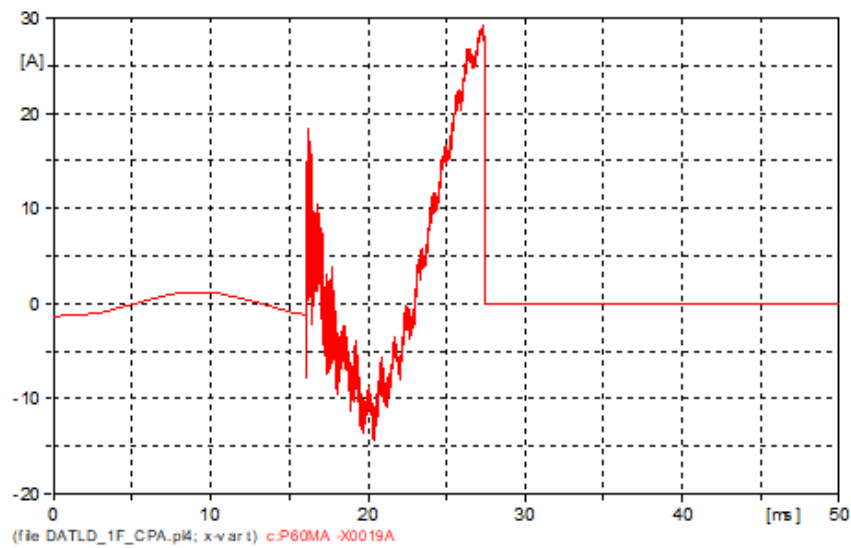


Figura 58 – Caso 5 – Interrupção (corte) de corrente durante a retirada do 1º grupo de aterramento, da fase A na MT, na presença de um curto monofásico na fase A na AT.

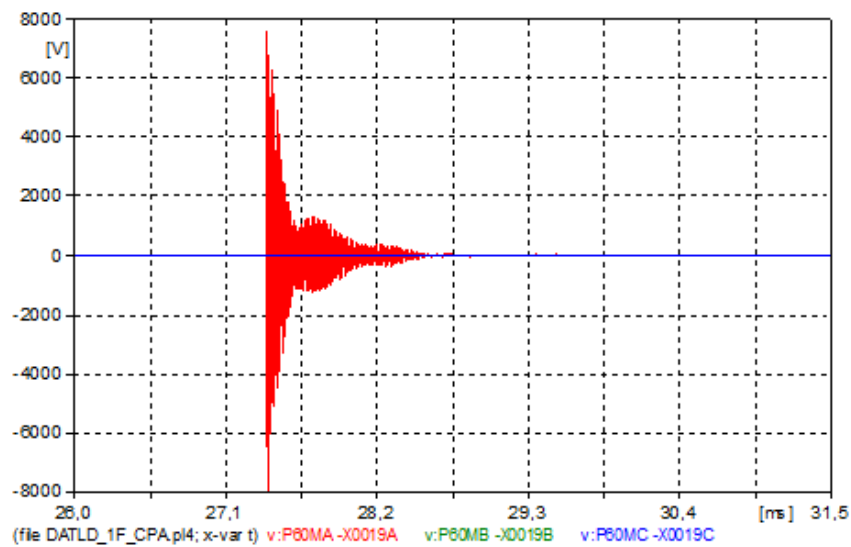


Figura 59 – Caso 5 – Tensão na rede BT durante a interrupção (corte) de corrente na retirada do 1º grupo de aterramento, da fase A na MT, na presença de um curto monofásico na fase A na AT.

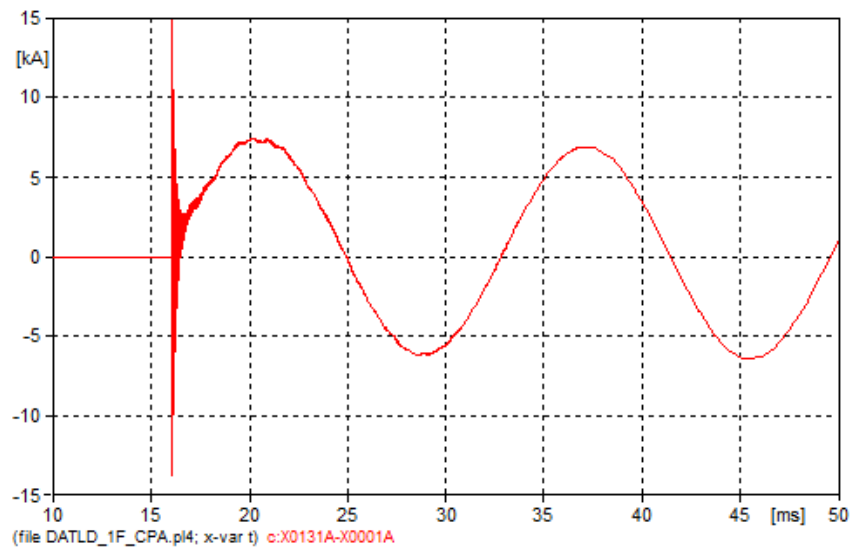


Figura 60 – Caso 5 – Curto-circuito monofásico, na fase A, na barra AT de CPA, 5,0 kA rms, para a simulação da retirada do grampo de aterramento.

5.6.6 Caso 6

O Caso 6 é semelhante ao Caso 5, porém a linha de distribuição está multiterrada: um grampo de aterramento nas três fases a cada 70 m ao invés de somente dois aterramentos nas extremidades distantes 420 m, conforme visualizado na Figura 61 a seguir. O valor da corrente interrompida não é alterado, mas a tensão sofre redução para 3500 V de pico entre o grampo e a fase A, que ainda é um valor muito elevado. As Figuras 62 e 63 ilustram o caso.

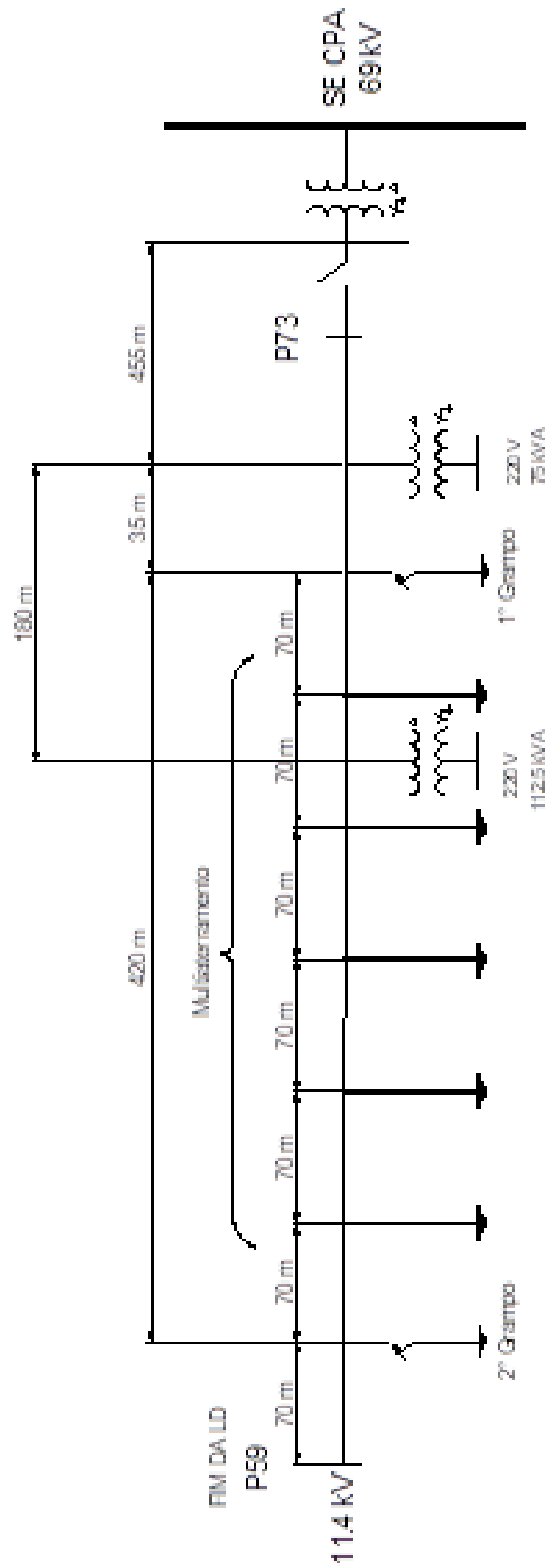


Figura 61 – Caso 6 – Posição dos aterramentos para o alimentador multiaterrado.

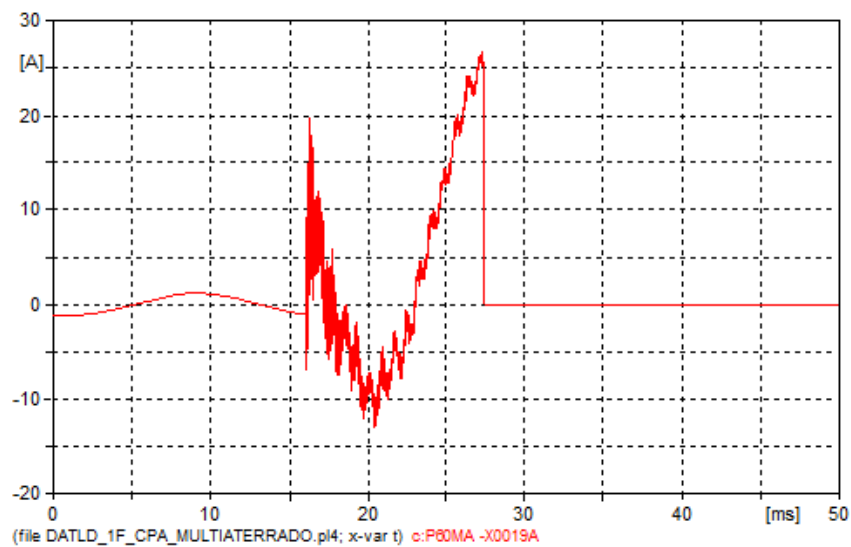


Figura 62 – Caso 6 – Interrupção (corte) de corrente durante a retirada do 1º grupo de aterramento, da fase A na MT, na presença de um curto monofásico na fase A na AT estando a rede MT multiterrada.

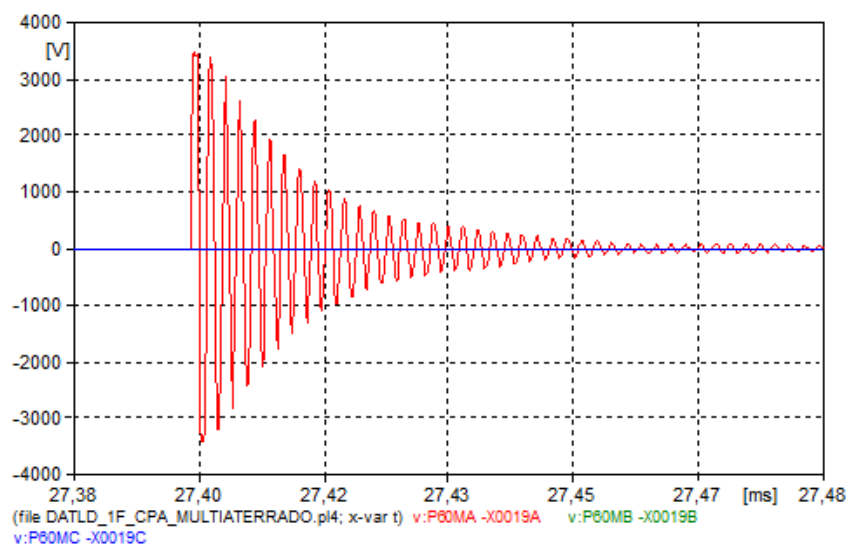


Figura 63 – Caso 6 – Tensão no grupo durante a interrupção (corte) de corrente na retirada do 1º grupo de aterramento, da fase A na MT, na presença de um curto monofásico na fase A na AT, estando a rede multiterrada.

Comentários sobre as simulações envolvendo os procedimentos de manutenção da linha de média tensão:

Durante a retirada de um alimentador de distribuição (média tensão) para a realização de manutenção, a instalação de grupo de aterramento poderá provocar um arco devido à carga capacitiva existente e também devido à tensão na rede. Ao instalar o grupo, a tensão é anulada e flui pelo aterramento instalado uma corrente capacitiva de baixo valor, da ordem de 4 A pico.

Uma vez que o alimentador se encontra aterrado em pelo menos dois pontos, a manutenção é realizada e há a necessidade da remoção do aterramento provisório instalado. Ao se retirar o primeiro grampo poderá surgir um arco devido à circulação de uma corrente indutiva de baixo valor (da ordem de 1,5 A pico) pela indução magnética provocada pela linha de alta tensão no alimentador aterrado. Na retirada do grampo uma tensão surge entre o grampo e a fase de baixo valor (da ordem de 350 V pico).

No momento da retirada do primeiro grampo de aterramento quando, imediatamente antes, ocorre um curto-circuito na linha de alta tensão as correntes e tensões que surgem no processo se elevam de modo acentuado, embora a probabilidade de se configurar esta situação seja muito baixa, já que um curto-circuito na linha de alta tensão seria eliminado, de modo geral, em um tempo inferior a um segundo. Neste sentido, podem-se discutir ações para reduzir esta probabilidade, como, por exemplo, realizar manutenções em períodos secos, bloquear provisoriamente ações de religamento da proteção, bloquear provisoriamente temporizações da proteção, etc.

Nas situações acima, com a utilização de ferramentas e equipamentos utilizados para se realizar manutenção em linha viva não se avista riscos para as equipes de manutenção durante o processo.

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

A partir das simulações e análises realizadas nesta dissertação é possível concluir que a utilização de uma mesma faixa de servidão para a passagem de vários circuitos instalados em estruturas compartilhadas possibilita vantagem econômica, sendo este procedimento também verificado em outros países. No entanto, a interação eletromagnética entre circuitos elétricos próximos deve ser estudada para garantir segurança para os consumidores, equipe de manutenção e a integridade da própria rede.

A proximidade entre circuitos elétricos gera campos elétricos e magnéticos que enlaçam os circuitos, provocando efeitos de um sobre o outro. Estes efeitos dependem basicamente dos níveis de tensão dos circuitos (para a formação dos campos elétricos), dos fluxos de correntes (para a formação dos campos magnéticos), bem como das distâncias envolvidas entre os circuitos, isto é, da geometria da linha que define as indutâncias e capacitâncias mútuas. Os resultados são tensões e correntes induzidas que, se ultrapassarem valores seguros, devem ser tomadas devidas providências para limitar este valor.

As simulações realizadas ao longo do trabalho abordaram as situações mais frequentes que podem ocorrer durante a operação e manutenção do sistema elétrico envolvendo uma rede compartilhada com alta, média e baixa tensão. Foram analisados os efeitos do circuito de alta tensão (em 69 kV) sobre os circuitos de média e baixa tensão (em 11,4 kV e 220 V respectivamente) nos trechos onde ocorre o compartilhamento de estruturas.

Nas simulações, onde os circuitos estão a vazio com a alta tensão energizada e a média e baixa tensão desenergizadas e sem aterramento (“flutuando”), são observadas tensões da ordem de 450 V e de 230 V (valores de pico fase-neutro) nestas redes respectivamente, nas piores configurações avaliadas. Assim, os equipamentos de proteção individual – EPI típicos, tais como luvas e botas evitam acidentes com as equipes de manutenção de redes. Nas simulações onde os circuitos estão operando em regime permanente as tensões nas linhas de média e baixa tensão estão próximas de 1,0 pu, sem riscos para a operação do sistema de distribuição, se nenhum evento adicional sobre o sistema estiver ocorrendo.

Nas simulações envolvendo energização da linha de alta tensão com as redes de média e baixa tensão operando em regime permanente foram observadas sobretensões com valores máximos de 115 kV, 10,7 kV e de 1,2 kV de pico nas fases da alta, média e baixa tensão, respectivamente, o que permanece dentro dos limites suportáveis por seus isolamentos, porém para a baixa tensão haverá necessidade da instalação de para-raios a fim de atenuar essa sobretensão. A instalação de para-raios na rede de baixa tensão, com característica típica encontrada no mercado, promove esta redução a valores da ordem de 700 V de pico.

Durante as simulações de curtos-circuitos na alta tensão estando o sistema previamente

operando em regime permanente, foram observadas elevações de tensões (sobretensões transitórias) máximas de 19,5 kV e de 1,95 kV de pico nas fases das redes de média e baixa tensão respectivamente. Para a média tensão, os valores encontrados são compatíveis com o isolamento da rede, porém para a baixa tensão haverá necessidade de atenuação dos valores observados (1950 V de pico). Neste caso, também a instalação de para-raios na rede de baixa tensão foram avaliada onde se observou uma redução nos níveis de sobretensões, limitando-os a valores da ordem de 1000 V, principalmente quando instalados ao longo da rede de baixa tensão, a cada 100 metros.

Durante as simulações com a linha de MT em manutenção foram avaliadas as sobretensões durante o processo de aterramento da rede e seu posterior retorno à operação. Devido ao acoplamento entre os circuitos os procedimentos de instalação e de remoção de grampos de aterramento para a manutenção da rede de média tensão podem implicar no surgimento de arcos elétricos devido ao estabelecimento de corrente capacitiva, durante a instalação e a retirada do primeiro grampo. Estando a rede em condições normais e sem ocorrências de curtos-circuitos, as tensões que surgem são da ordem de 450 V de pico. As correntes capacitivas, que se estabelecem no momento de se realizar o aterramento são da ordem de 4,0 A de pico e as correntes indutivas a serem interrompidas no momento da retirada do grampo de aterramento são menores do que 2,5 A de pico. Assim, os arcos elétricos esperados não são de elevada intensidade, logo é necessário que a equipe de manutenção use EPIs apropriados uma vez que arcos elétricos podem causar queimaduras.

Se a remoção do grampo for executada imediatamente após a ocorrência de um curto-circuito na alta tensão (no circuito com compartilhamento) a tensão que surgirá entre o grampo e a fase será elevada, da ordem de 8 kV pico e a corrente a ser interrompida será da ordem de 30 A de pico. Embora esse seja um evento de baixa probabilidade de ocorrência é necessário que seja tomada as devidas providências para garantir a segurança da equipe de manutenção uma vez que o arco resultante é de elevada intensidade, podendo causar danos aos equipamentos utilizados e riscos à equipe de manutenção. Diante dos resultados provenientes dos casos simulados é possível concluir que as tensões induzidas na linha de média tensão não irão ocasionar problemas aos equipamentos instalados na mesma, porém é necessário se atentar a segurança da equipe que irá realizar a manutenção nesta linha através da verificação dos equipamentos de proteção individual e revisão dos procedimentos de manutenção que devem suportar até o nível de tensão mais elevado verificado durante as análises.

Analisando as tensões induzidas na baixa tensão é possível concluir que através da instalação de para-raios na linha é possível limitar o valor das sobretensões induzidas na BT resguardando a rede [9].

Em resumo, com base nas simulações realizadas nesta dissertação, pode-se concluir que o compartilhamento de uma mesma estrutura por linhas de subtransmissão e distribuição em média e baixa tensão é aconselhável desde que se tome as devidas providências para resguardar

a própria rede e os consumidores de sobretensões em níveis perigosos, sendo que uma possível solução pode ser a instalação de para-raios na rede de BT.

Destaca-se a contribuição que este trabalho trará à comunidade acadêmica uma vez que a linha que foi objeto deste estudo é real e suas configurações, níveis de tensão e os tipos de estudos realizados diferem de todas as produções contidas na pesquisa bibliográfica do tema abordado. Ainda como principal contribuição este trabalho servirá como base para a criação de padrões de segurança a serem seguidos durante a manutenção das linhas de AT, MT e BT uma vez constatado a altas sobretensões que podem ser induzidas nestas linhas conforme apresentado nesta dissertação, garantindo assim a segurança da equipe de manutenção encarregada destas linhas.

6.1 Trabalhos Futuros

Dentre os principais trabalhos ainda a serem desenvolvidos destacam-se:

a) Avaliar esta mesma rede compartilhada tendo como foco agora a incidência de descargas atmosféricas diretas. Este próximo trabalho terá o objetivo de avaliar os níveis de tensão a que estarão submetidas as redes de média e baixa tensão quando uma descarga atmosférica incide no cabo para-raios da rede de 69 kV e também em uma de suas fases. Este estudo possui grande importância já que fenômenos decorrentes de descargas atmosféricas que venham a atingir a rede de alta tensão podem induzir tensões de magnitudes elevadas nas redes de média e baixa tensão que compartilham a mesma estrutura [26];

b) Execução de simulações adicionais envolvendo a elevação dos níveis de curtos-circuitos, visando a evolução e/ou alteração da topologia da rede de alta tensão. Este novo estudo tem o intuito de avaliar se em um cenário onde há a expansão do sistema, e o consequente aumento nos níveis de curto circuito, as sobretensões terão sua magnitude também elevada.

Como resultado desta dissertação foi realizada a publicação do artigo intitulado "Assessment of the Electromagnetic Coupling Between Lines of Different Voltages Sharing the Same Structures" apresentado no congresso internacional CIRED 2017 (International Conference on Electricity Distribution), ocorrido em junho de 2017 na Escócia, Reino Unido. [9].

Como uma avaliação inicial a respeito dos efeitos de descargas atmosféricas diretas atingindo linhas de diferentes níveis de tensão que compartilham a mesma estrutura, foram feitas simulações considerando descargas atmosféricas atingindo diretamente a linha de alta tensão, considerando a mesma linha estudada nesta dissertação. Esta análise gerou o artigo intitulado "Assessment of Lightning Overvoltages on Lines with Different Voltages Sharing the Same Structures" que foi apresentado no congresso internacional SIPDA (International Symposium on Lightning Protection), ocorrido em outubro de 2017 em Natal, Brasil [26]. Por se tratar de uma análise inicial os modelos utilizados nas simulações são mais simples, sendo necessário um

aprofundamento no tipo de análise e na modelagem dos componentes do sistema para trabalhos futuros.

Referências

- [1] L. Xiaolan, D. Zhongdong, W. Jiqun, C. Jiahong, and G. Shanqiang, “Research on lightning performance of quadruple circuit transmission line with dual voltage 500/220 kV on the same tower,” in *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.
- [2] A. Novitskiy, I. Konotop, and D. Westermann, “Power quality disturbances in distribution networks caused by the influence of nearby power lines,” in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE 15th International Conference on*, pp. 974–979, IEEE, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 8.
- [3] W. Nowak, R. Tarko, A. Jaglarz, and J. Koziol, “Analysis of overhead lines working conditions—case study of electromagnetic coupling effect,” in *Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau*, pp. 11–15, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 6, 8, 9 e 10.
- [4] J. Li, Z. Wang, Z. Xia, T. Wang, W. Zeng, Y. Yan, Q. Yang, W. Li, C. Long, and H. Ren, “Research for the maintenance way of partial outage on 500 kV/220 kV four-circuit mixed-voltage transmission lines on the same tower,” in *High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2016 IEEE International Conference on*, pp. 1–4, IEEE, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 6, 10 e 11.
- [5] R. Brierley, A. Morched, and T. Grainger, “Compact right-of-ways with multi-voltage towers,” *IEEE transactions on power delivery*, vol. 6, no. 4, pp. 1682–1689, 1991. Citado 4 vezes nas páginas 6, 5, 11 e 12.
- [6] N. Rugthaicharoencheep, W. Thansiphraerth, and A. Phayomhom, “Comparison voltage across insulator strings of 69 kV and 24 kV lines due to lightning strokes to top pole and mid span,” in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2012 47th International*, pp. 1–5, IEEE, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 6, 12, 13 e 14.
- [7] “Natureza das sobretensões, classificação dos isolamentos, efeitos das sobretensões sobre os isolamentos e princípios básicos de coordenação do isolamento.” <https://richardcoleon.files.wordpress.com/2011/12/capc3adtulo-1.pdf>, 2017. Acessado em 1 de setembro de 2017. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 15.
- [8] E. T. W. Neto, “Técnicas em alta tensão - teoria e prática,” 2016. Apostila. Citado 4 vezes nas páginas 6, 9, 16 e 17.
- [9] L. Moraes, G. Lopes, A. Violin, A. Piantini, G. Ferraz, J. Campos, R. Salustiano, R. Capelini, and E. Wanderley Neto, “Assessment of the electromagnetic coupling between lines of

- different voltages sharing the same structures,” *International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, pp. 1–5, 2017. Citado 6 vezes nas páginas 6, 21, 22, 24, 70 e 71.
- [10] J. C. Das, *Transients in electrical systems analysis recognition and mitigation*. McGraw-Hill Education, primeira edição ed., Junho 2010. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 38.
- [11] “Normal duty [3 kV - 36 kV rated] surge arresters.” <http://www.hubbellpowersystems.com/arresters/dist/normal>, 2017. Acessado em 25 de agosto de 2017. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 39.
- [12] S. Li and H. Lu, “Electric field calculation o double circuit compact overhead transmission line on same 550 kV towers,” in *High Voltage Engineering and Application, 2008. ICHVE 2008. International Conference on*, pp. 237–240, IEEE, 2008. Citado na página 5.
- [13] Y. He, B. Wei, A. Jiang, L. Wang, and Z. Fu, “Study on assessment and countermeasures of induced voltage on distribution lines under EHV/UHV transmission lines,” in *Power System Technology (POWERCON), 2014 International Conference on*, pp. 1582–1587, IEEE, 2014. Citado na página 5.
- [14] A. Novitskiy and D. Westermann, “Interaction of multi-circuit overhead transmission lines of different voltages located on the same pylons,” in *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2012*, pp. 1–4, IEEE, 2012. Citado na página 6.
- [15] G. Feng, Y. Wang, and B. Zhang, “Study on electromagnetic environment of multi-circuit transmission lines on same tower,” in *Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on*, pp. 1–5, IEEE, 2008. Citado na página 6.
- [16] G. Zeng, Z. Cai, M. Huang, and Z. Liu, “Analysis and countermeasures of misoperation of zero sequence pilot protection on circuit lines of same pole,” in *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*, pp. 1922–1926, IEEE, 2008. Citado na página 7.
- [17] G. M. F. Ferraz, “Coordenação de isolamento frente a impulso atmosférico na subestação São José do Rio Pardo – SE 138 kV/13,8 kV,” 2014. Relatório de Estudo de Caso. Citado na página 15.
- [18] M. L. B. Martinez, “Coordenação de isolamento,” 2014. Apostila. Citado na página 17.
- [19] “Natureza das sobretensões, classificação dos isolamentos, efeitos das sobretensões sobre os isolamentos e princípios básicos de coordenação do isolamento.” <https://richardcoleon.files.wordpress.com/2011/12/capc3adtulo-1.pdf>, 2011. Acessado em 25 de agosto de 2017. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

- [20] J. A. M. Jitsukawa, “Coordenação de isolamento de subestações isoladas a ar,” dezembro de 2010. Trabalho de Conclusão de Curso. Citado na página 18.
- [21] “Anafas - análise de faltas simultâneas.” <http://www.cepel.br/produtos/anafas-analise-de-faltas-simultaneas-1.htm>, 2017. Acessado em 8 de dezembro de 2017. Citado na página 23.
- [22] “Anarede - análise de redes elétricas.” <http://www.cepel.br/produtos/anarede-analise-de-redes-eletricas.htm>, 2017. Acessado em 8 de dezembro de 2017. Citado na página 23.
- [23] “Espaçador losangular com garras - 15 kV e 35 kV.” <http://www.plp.com.br/site/images/catalogo/distribuicao/Folder%20Espa%C3%A7ador%20-%20ECR-15%20e%20ECR-35.pdf>, 2015. Acessado em 25 de agosto de 2017. Citado na página 28.
- [24] G. F. Azzi, “Modelagem de transformadores de potência para estudos de tensão de restabelecimento transitória,” dezembro de 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Citado na página 37.
- [25] F. O. Passos, “Solução para localização de faltas em linhas de transmissão não transpostas baseada em sincrofasores e algoritmo genético,” fevereiro de 2010. Tese de Mestrado. Citado na página 38.
- [26] L. Moraes, G. Lopes, A. Violin, A. Piantini, G. Ferraz, J. Campos, R. Salustiano, R. Capelini, and E. Wanderley Neto, “Assessment of lightning overvoltages on lines with different voltages sharing the same structures,” *International Symposium on Lightning Protection (SIPDA)*, pp. 1–5, 2017. Citado na página 71.