

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* FORMIGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Gabriel Alves Parreira

**DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PERANTE EVENTO DE
BACKFLASHOVER EMPREGANDO CURVA V-T SINCRONIZADA COM AS
ONDAS VIAJANTES**

Formiga

2024

GABRIEL ALVES PARREIRA

**DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PERANTE EVENTO DE
BACKFLASHOVER EMPREGANDO CURVA V-T SINCRONIZADA COM AS
ONDAS VIAJANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Formiga, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof^o. Dr. André Roger Rodrigues

Formiga

2024

Parreira, Gabriel Alves

P259d Desempenho de linhas de transmissão perante evento de backflashover empregando curva V-t sincronizada com as ondas viajantes / Gabriel Alves Parreira – Formiga : IFMG, 2024.
103p. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. André Roger Rodrigues

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus*
Formiga.

1. Descargas atmosféricas. 2. Desempenho elétrico de linhas de transmissão. 3. Curva V-t sincronizada. 4. Backflashover. 5. Coordenação de isolamento. I. Rodrigues, André Roger. II. Título.

CDD 621.3

GABRIEL ALVES PARREIRA

Desempenho de linhas de transmissão perante evento de *backflashover* empregando curva V-t sincronizada com as ondas viajantes.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: 12 de junho de 2024.

Nota: 95

BANCA EXAMINADORA



Prof. André Roger Rodrigues, Dr. (Orientador)



Prof. Alcides Farias Andrade, Me.



Prof. Patrick Santos de Oliveira, Dr.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo.

Quero agradecer à minha família, em especial ao meu pai Onício e minha mãe Valéria, além de meus irmãos, pelo apoio incondicional e compreensão durante os momentos dedicados ao meu estudo. Sem eles, essa graduação não seria possível.

Ao meu orientador, Dr. André Roger Rodrigues, pela orientação valiosa, paciência e incentivo ao longo deste processo. Suas sugestões, conselhos e *feedbacks* foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também aos demais professores da instituição pela disponibilidade em compartilhar seus conhecimentos e por suas contribuições durante o curso, seja nas disciplinas, projetos e fora da sala de aula, que me prepararam tão bem para a chegada deste momento.

Aos colegas de curso, que compartilharam ideias, experiências e momentos únicos, obrigado por enriquecerem este percurso acadêmico.

Por fim, agradeço ao IFMG Campus Formiga e às pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste sonho de me tornar engenheiro. Este momento não seria possível sem o apoio e colaboração de cada um de vocês.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma modelagem computacional desenvolvida para representar as características de suportabilidade elétrica de cadeias de isoladores de sistemas de transmissão de energia elétrica. Para isso, é empregada a curva tensão *versus* tempo (curva V-t) sincronizada com as ondas viajantes de tensão e de corrente de surto nas linhas de transmissão. A motivação do estudo é avaliar se o uso da curva V-t tradicional tanto para análises de desempenho elétrico de linhas de transmissão quanto para projetos de coordenação de isolamento das mesmas, subestima a suportabilidade dos arranjos isolantes. Como consequência, os resultados de estudos empregando a curva V-t contribuem para o aumento desnecessário da quantidade de isoladores que compõem as cadeias e, por consequência, dos custos dos sistemas de isolamento. O modelo de curva V-t sincronizada foi desenvolvido utilizando-se a linguagem *MODELS* no *ATPDraw* com intuito de criar um único modelo capaz de gerar a curva V-t sincronizada com as ondas viajantes estabelecidas no sistema de transmissão, ou seja, no exato instante de tempo em que a sobretensão atmosférica solicita a cadeia de isoladores. Os estudos computacionais foram realizados considerando um trecho de linha de 500 kV da LT São Gonçalo do Pará - Outro Preto 2, formado por três vãos, durante um evento de *backflashover*. Os estudos têm o propósito de avaliar o desempenho elétrico tanto do isolamento da torre atingida pela descarga elétrica quanto das torres adjacentes, alterando suas resistências de pé de torre. Os resultados obtidos com emprego da modelagem permitiram a determinação da corrente crítica de descarga e do valor da sobretensão disruptiva destacando a importância da representação da suportabilidade elétrica das cadeias de isoladores utilizando a curva V-t sincronizada com ondas viajantes em substituição à tradicional curva V-t simples.

Palavras-chave: Descargas atmosféricas, Desempenho elétrico de linhas de transmissão, Curva V-t sincronizada, *Backflashover*, Coordenação de Isolamento.

ABSTRACT

This work aims to present a computational modeling developed to represent the electrical supportability characteristics of insulator chains in electric power transmission systems. Therefore, the volt-time curve (V-t curve) is used, synchronized with the traveling waves of voltage and surge current in the transmission lines. This study intends to evaluate whether the use of the V-t curve to analyze the electrical performance of transmission lines besides insulation coordination projects, underestimates the supportability of the insulating arrangements. Hence, the obtained results using the V-t curve contribute to the nonessential increase in the number of insulators that make up the chains and, consequently, the costs of the insulation systems. The synchronized V-t curve model was developed using the MODELS language available in ATPDraw in order to create creating a single model capable of generating the V-t curve synchronized with the traveling waves established in the transmission system, that is, at the exact instant of time in which atmospheric overvoltage stresses the insulator chain. The computational studies were carried out considering 500 kV overhead transmission line from São Gonçalo do Pará - Outro Preto 2, consisting of three spans, during a backflashover event. The studies aim to evaluate the lightning performance of the insulation chains of both the target tower besides adjacent towers, changing the ground resistances. The obtained results performed using the model allowed the determination of the critical stroke current besides the disruptive overvoltage, highlighting the relevance to represent the insulation strength using the V-t curve synchronized with traveling waves instead of the traditional simple V-t curve.

Keywords: Lightning Strikes, Transmission lines lightning performance, Synchronized V-t Curve, Backflashover, Insulation Coordination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de incidências de descargas atmosféricas no biênio 2018/2019.....	15
Figura 2 - Campo induzido entre nuvem e solo pelo carregamento da nuvem.....	21
Figura 3 - Tipos de descargas atmosféricas.....	22
Figura 4 - <i>Flashover</i> com canal de descarga horizontal e vertical.....	25
Figura 5 - Arco elétrico contornando os discos de uma cadeia de isoladores.....	25
Figura 6 - Linha blindada atingida por descarga atmosférica.....	27
Figura 7 - Mecanismo de ruptura de isolamento por <i>backflashover</i>	28
Figura 8 - Curvas V-t para tempos de corte diferentes.....	29
Figura 9 - Obtenção da Curva V-t.....	30
Figura 10 - Registros de disrupções em diferentes instantes de tempo para impulso padrão...	32
Figura 11 - Curva V-t para cadeia de isoladores com 3 discos de vidro submetidos a impulso de tensão padrão.....	33
Figura 12 - <i>Model Lynce</i> : Fonte de corrente elétrica com forma de onda do tipo dupla exponencial $1,2 \times 50 \mu\text{s}$	36
Figura 13 - Forma de onda biexponencial gerada pelo <i>model Lynce</i>	38
Figura 14 - Perfil da torre modelada neste estudo.....	40
Figura 15 - Parâmetro elétricos, mecânicos e geométricos dos cabos utilizados na rotina LCC para modelagem da LT.....	41
Figura 16 - Sistema elétrico simulado.....	42
Figura 17 - Desenvolvimento da fase de <i>Leader</i> até a ocorrência da disrupção.....	43
Figura 18 - Comportamento de curva V-t no sistema implementado.....	44
Figura 19 - Curva V-t obtida na literatura.....	45
Figura 20 – Sistema de controle TACS que representa a disrupção sobre a cadeia de isoladores das fases A, B e C da Torre 2.....	46
Figura 21 - <i>Model</i> que gera a curva sincronizada das torres do sistema modelado.....	47
Figura 22 - Curvas V-t sincronizadas das torres 1, 2, 3 e 4.....	49
Figura 23 – Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 com disrupção na cadeia da fase C da torre 2 - Caso 1: torres com resistência de 30Ω e curva V-t.....	51

Figura 24 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia das fases A e C da torre 2 com todas - Caso 1: torres com resistência de 30 Ω e curva V-t.....	53
Figura 25 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 4 para disrupção da cadeia das fases A e C da torre 2 – Caso 1: todas as torres com resistência de 30 Ω e curva V-t.....	54
Figura 26 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 utilizando a curva sincronizada. Caso 1.2: Torres com resistência de pé de 30 Ω e Curva V-t sincronizada.....	56
Figura 27 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 utilizando a curva sincronizada. Caso 1.2: Torres com resistência de 30 Ω e curva V-t sincronizada.....	57
Figura 28 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia das fases A e C da torre 2 utilizando a curva sincronizada. Caso 1.2: torres com resistência de 30 Ω e curva V-t sincronizada.....	58
Figura 29 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 4 para disrupção da cadeia das fases A e C da torre 2 -. Caso 1.2: Torres com resistência de 30 Ω e Curva V-t sincronizada.....	59
Figura 30 – Sobretensões nas torres quando a torre da descarga tem sua resistência de pé elevada a 60 Ω com a corrente crítica de 175,245 kA.....	61
Figura 31 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 108,972 kA - Caso 2.1: torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t.....	62
Figura 32 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção das cadeias das fase A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 108,972 kA.- Caso 2.1: torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t.....	63
Figura 33 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 - Caso 2.1: torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t.....	64
Figura 34 - Sobretensões nas fases C das torres com a corrente crítica de 175,245 kA – Caso 2.2 - torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.....	65
Figura 35 - Sobretensões nas fases A, B e C das torres 2 e 3 quando a torre da descarga tem sua resistência de pé elevada a 60 Ω e não há disrupção. Utilizando o <i>model</i> com a curva sincronizada.....	67
Figura 36 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 109,862 kA – Caso 2.2 - torre de descarga com	

resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.....	68
Figura 37 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 109,879 kA – Caso 2.2 - torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.....	69
Figura 38 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 109,879 kA – Caso 2.2 - torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.....	70
Figura 39 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,245 kA – Caso 3.1 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t.....	71
Figura 40 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupções das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,489 kA – Caso 3.1 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t.....	72
Figura 41 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 4 para disrupções nas cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,489 kA – Caso 3.1 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t.....	73
Figura 42 - Sobretensões atmosféricas nas torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,790 kA – Caso 3.2 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.....	74
Figura 43 - Sobretensões atmosféricas nas torres 2 e 3 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,828 kA – Caso 3.2 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.....	75
Figura 44 - Sobretensões atmosféricas nas torres 1, 2 e 4 para disrupção nas cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,828 kA – Caso 3.2 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.....	76
Figura 45 - Sobretensões atmosféricas nas torres 2 e 4 para disrupção nas cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 175,245 kA – Caso 4.1 - torre 4 com resistência de 60 Ω e curva V-t.....	77
Figura 46 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2, 3 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 175,245 kA – Caso 4.1 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t.....	78

Figura 47 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 4 para caso onde não há disrupção com a corrente crítica ajustada para 175,206 kA – Caso 4.2 – torre 4 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.....	79
Figura 48 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 175,714 kA – Caso 4.2 - torre 4 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.....	80
Figura 49 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 3 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 175,714 kA – Caso 4.2 – torre 4 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos (V,t) obtidos a partir do ensaio com tensão impulsiva padrão.....	31
Tabela 2 - Parâmetros das formas de onda produzidas pela fonte tipo 15 do <i>ATPDraw</i> e pelo <i>Model Lynce</i> implementado.....	39
Tabela 3 - Dados geométricos e elétricos dos condutores e do cabo guarda.....	40
Tabela 4 - Parâmetros de desempenho elétrico do caso 1.2 para disrupção na fase C da Torre 2.....	56
Tabela 5 - Parâmetros de desempenho elétrico do caso 1.2 para disrupção nas fases A e C da Torre 2.....	58
Tabela 6 - Parâmetros de desempenho elétrico do caso 2.1 com corrente de 175,245 kA.....	61
Tabela 7 - Parâmetros de desempenho elétrico do caso 2.1 para disrupção nas fases A e C da Torre 2.....	63
Tabela 8 - Parâmetros de desempenho elétrico do caso 2.2 com a curva sincronizada com corrente de 175,245 kA.....	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATPDraw – Interface gráfica de pré-processamento desenvolvida para o *software ATP/EMTP*.

CC - Corrente contínua.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais.

CIGRÈ - International Council on Large Electric Systems.

ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica.

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

LCC - *Line Constant, Cable Constants and Cables Parameters.*

LT - Linha de Transmissão.

MODELS - Linguagem de programação para *software ATP/ATPDraw*.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

SIN - Sistema Interligado Nacional

TACS: Transient Analysis Control System.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Motivação.....	16
1.2. Objetivos.....	18
2.1.1. <i>Objetivos específicos</i>	18
1.3. Estrutura do Trabalho.....	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1. Descargas atmosféricas.....	21
2.1.1. <i>Incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão</i>	23
2.1.2. <i>Flashover</i>	24
2.1.3. <i>Backflashover</i>	26
2.1.4. <i>Curva V-t</i>	29
3. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO.....	34
3.1 - Modelagem da descarga atmosférica.....	34
3.2 - Modelagem do sistema de transmissão de energia elétrica.....	39
3.3 - Modelagem do sistema de controle que representa a disrupção.....	43
3.3.1 - <i>Curva V-t</i>	43
3.3.2 - <i>Sistema de controle que representa a disrupção representado com elementos da rotina TACS</i>	45
3.3.3 - <i>Criação do model que produz a curva V-t sincronizada com as ondas viajantes na linha de transmissão</i>	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1. Caso 1: Todas as torres com resistência de aterramento igual a 30 Ω :.....	52
4.1.1 - <i>Caso 1.1: Torres com resistência de 30 Ω e suportabilidade elétrica representada por Curva V-t</i> :.....	52
4.1.2 - <i>Caso 1.2: Torres com resistência de 30 Ω e suportabilidade elétrica representada por Curva V-t sincronizada</i> :.....	55
4.2. Caso 2 - Torre da descarga com resistência de terra igual a 60 Ω e torres adjacentes	

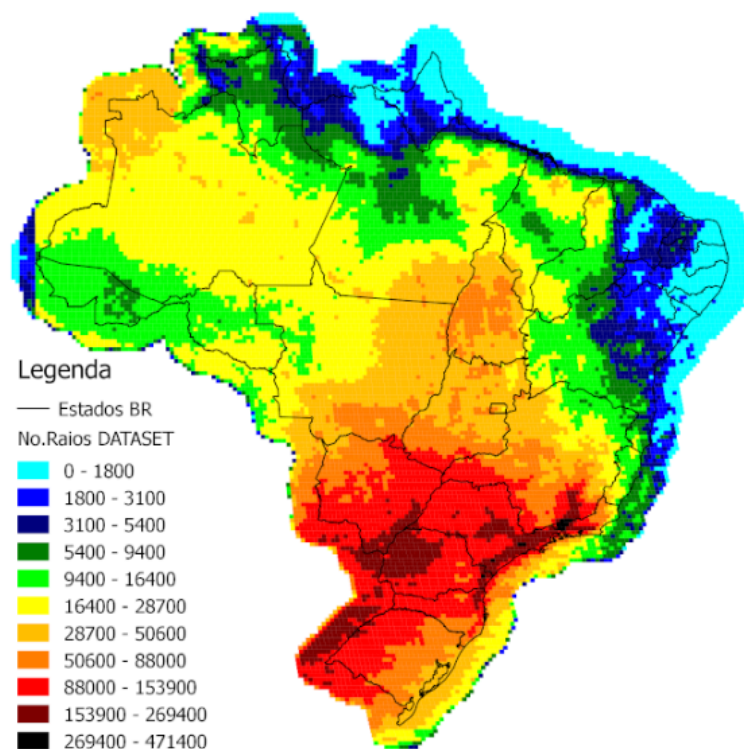
com resistência de terra de 30 Ω	60
4.2.1 – Caso 2.1: torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva <i>V-t</i>	60
4.2.2 - Caso 2.2: torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva <i>V-t</i> sincronizada:.....	64
4.3. Caso 3 - Torre à direita da torre de incidência da descarga com resistência de aterramento igual a 60 Ω :.....	70
4.3.1 - Caso 3.1: torre 3 à direita com resistência de 60 Ω e curva <i>V-t</i>	70
4.3.2 - Caso 3.2: torre à direita com resistência de 60 Ω e curva <i>V-t</i> sincronizada.....	73
4.4. Caso 4 - Torre 4 distante dois vãos à esquerda com resistência de 60 Ω :.....	76
4.4.1 - Caso 4.1: torre 4 à esquerda com resistência de 60 Ω e curva <i>V-t</i>	76
4.4.2 - Caso 4.2: torre 4 à esquerda com resistência de 60 Ω e curva <i>V-t</i> sincronizada:.....	78
5. CONCLUSÕES.....	82
5.1. Propostas de trabalhos futuros.....	82
REFERÊNCIAS.....	84
APÊNDICE	88

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de transmissão de energia elétrica desempenham um papel crucial no avanço econômico e tecnológico das sociedades contemporâneas. Como resultado da crescente necessidade de energia elétrica ao longo dos anos, esses sistemas têm sido objeto de consideráveis investimentos, levando a uma expansão exponencial (TEIXEIRA, 2022). Esse fenômeno tem transformado sistemas elétricos isolados de pequena escala em redes interconectadas de grande porte.

Descargas atmosféricas representam uma ameaça significativa, tanto para esses sistemas de transmissão de energia quanto para sistemas de distribuição, e são um tema muito relevante na indústria de energia no planejamento da expansão dos sistemas elétricos. Isso porque esses eventos podem resultar em diversos prejuízos técnicos e financeiros. De acordo com o INPE, o país com maior incidência de raios no mundo é o Brasil, com cerca de 50 milhões de descargas anualmente (PINTO JUNIOR, *et al.*, 2015). A Figura 1 mostra o mapa do biênio 2018/2019 em relação com o número de incidências de descargas atmosféricas que ocorreram neste período.

Figura 1 - Mapa de incidências de descargas atmosféricas no biênio 2018/2019.



Fonte: Extraído de (INPE, 2024).

Devido a sua vasta extensão territorial, o Brasil tem diferentes concentrações de raios em diferentes regiões. Isso motiva ainda mais a necessidade em utilizar dados relativos à densidade das descargas atmosféricas que correspondem aos locais em que será implantada a linha de transmissão, além de obter os parâmetros da corrente de descarga de retorno através de medições na região, tornando o sistema elétrico mais seguro e confiável.

A vulnerabilidade das linhas de transmissão às descargas atmosféricas é uma preocupação constante das concessionárias, pois está diretamente relacionada ao seu comprimento, configuração e valores de resistividade do solo onde estão implantadas, nível cerâmico, aspectos geográficos e climáticos, além da silhueta das torres e topologia dos condutores das fases e para-raios (OLIVEIRA, 2018). As descargas atmosféricas podem causar danos significativos aos equipamentos e estruturas das linhas, resultando em cortes de energia, elevados custos de reparação e manutenção. De acordo com o ELAT (INPE), estima-se que 50% das interrupções globais no fornecimento sejam causadas por descargas atmosféricas. O setor elétrico brasileiro registrou perdas anuais de cerca de 600 milhões de reais em 2011, respondendo por 60% das perdas causadas pelas emissões. Segundo a CEMIG (2011), as estatísticas mostram que as emissões atmosféricas são responsáveis por cerca de 65% das interrupções nas linhas de transmissão no país.

Esses argumentos destacam a necessidade de desenvolver pesquisas e estudos que visem melhorar o desempenho de sistemas de transmissão de energia em geral, a fim de minimizar os efeitos negativos das interrupções causadas por raios.

1.1. Motivação

As cadeias de isoladores são equipamentos principais de linhas de distribuição e transmissão de energia elétrica e que devem ser projetados com intuito de prover um sistema de isolamento elétrico que possa ser confiável e apropriado para suportar ocorrências de danos originados por sobretensões atmosféricas. É definido por Hileman (1999), que um projeto de coordenação de isolamento é o processo no qual são selecionados equipamentos segundo as suas características elétricas, tal como a rigidez dielétrica, além de características mecânicas para aplicação nos sistemas elétricos, com o intuito de mitigar as chances de ocorrerem danos técnicos e financeiros no sistema implementado.

Esse tipo de análise é realizada com a utilização de métodos e modelos eletromagnéticos capazes de determinar a máxima sobretensão suportada pelas cadeias de isolamento utilizadas nas linhas de transmissão. O uso desses métodos e modelos

eletromagnéticos permite plotar uma curva característica de tensão versus tempo (denominada curva V-t), a qual relaciona o valor da tensão no momento da disrupção no arranjo isolante e o intervalo de tempo durante o qual o dispositivo isolante em estudo fica submetido a esta tensão. Os pontos que formam a curva V-t de um arranjo isolante são obtidos através de testes de laboratório, realizados através da aplicação de impulsos de tensão no isolador ou no arranjo isolante que são produzidos por um gerador de alta tensão, com o intuito de registrar as amplitudes das tensões que ultrapassam a rigidez dielétrica, sendo também registrado o tempo necessário para que o distúrbio ocorra (OLIVEIRA, 2021).

A motivação para a realização do estudo contido neste trabalho é comprovar que o uso simples da curva V-t, tanto para análises de desempenho elétrico de linhas de transmissão quanto para projetos de coordenação de isolamento, subestima a suportabilidade dos arranjos isolantes, o que pode levar a falhas no sistema elétrico e colocar em risco a confiabilidade e a segurança da infraestrutura elétrica. Além disso, um sistema de transmissão de energia modelado utilizando a suportabilidade dielétrica de suas cadeias de isoladores com base na curva V-t pode apresentar um custo maior que o necessário, visto que, o uso da curva V-t não sincronizada para representar a suportabilidade dielétrica dos arranjos isolantes da LT conduz a um sobredimensionamento das cadeias de isoladores, exigindo quantidade de discos de isoladores superior à quantidade realmente necessária. Por outro lado, a utilização de uma curva V-t gerada em sincronia com o instante de tempo em que as cadeias começam a ser estressadas pela sobretensão, a análise do sistema isolante torna-se mais real e precisa, podendo ser modelada de forma consonante com a realidade.

Devido a importância do SEP e o seu alto custo, a realização de estudos computacionais voltados à avaliação do desempenho elétrico de LTs perante sobretensões que causam o *backflashover* requer o desenvolvimento de modelos capazes de reproduzir com precisão os esforços elétricos aos quais os arranjos isolantes ficam.

Trabalhos relacionados com estes estudos, como os de Rodrigues (2017) e Teixeira (2022) utilizam a curva V-t para representar a suportabilidade elétrica das cadeias de isoladores, sendo que a curva de suportabilidade é gerada no instante de tempo igual a zero, ou seja, no início da simulação e começa então a decair ao longo do tempo, representando a redução da tensão disruptiva com o tempo de exposição a esta sobretensão. Ocorre que esta geração da curva V-t no instante de tempo igual a zero consiste em um erro de modelagem que não reflete o que ocorre no fenômeno real.

Quando uma linha de transmissão é atingida por raios nas torres ou nos cabos pára-raios, decorre um intervalo de tempo até que a sobretensão começa a solicitar os isoladores, de forma que a suportabilidade elétrica do arranjo isolante permanece com valor máximo nominal até o instante de tempo em que a sobretensão atinge os isoladores. A partir deste momento é que a curva V-t deve ser gerada para computar o intervalo de tempo durante o qual os isoladores ficam submetidos às sobretensões atmosféricas e então determinar se o arranjo isolante vai resistir aos esforços elétricos ou se ocorrerá a disrupção por *backflashover*. Desta forma, uma modelagem computacional mais fiel ao fenômeno real requer que a curva V-t somente seja produzida a partir do instante de tempo no qual a sobretensão atinge as cadeias de isoladores.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal analisar e comparar o desempenho elétrico de uma LT com o uso da curva V-t tradicional com a curva V-t sincronizada com as ondas viajantes em arranjos de cadeias de isoladores em sistemas de transmissão e apontar os benefícios obtidos. Para tanto, foram realizadas simulações computacionais de sistemas de transmissão empregando estratégias de modelagem capazes de representar com a maior precisão e realismo possível o comportamento de LTs atingidas por descargas atmosféricas associado ao fenômenos de *backflashover*. Foram avaliados o desempenho elétrico dos arranjos isolantes tanto da torre atingida pela descarga elétrica quanto das torres adjacentes. Outrossim, foi determinada a corrente crítica de descarga e o valor da sobretensão disruptiva quando a suportabilidade elétrica das cadeias de isoladores é representada pela curva V-t simples e pela curva V-t sincronizada com ondas viajantes.

2.1.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Investigar o desempenho elétrico em um sistema de transmissão de energia elétrica perante sobretensões atmosféricas utilizando diferentes valores de resistência de pé de torre, com o intuito de avaliar a influência das torres adjacentes àquela atingida pela descarga atmosférica.

- Avaliar o impacto de correntes de descarga de retorno para fontes de frente rápida e frente mais lenta, tomando por base o impulso padrão 1,2x50 μ s definido pelo IEEE (IEEE STD 1243-1997, 1997) e a fonte *surge type 15* do *ATPDraw*.

1.3. Estrutura do Trabalho

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) está dividido em 4 capítulos, os quais estão descritos resumidamente a seguir:

Capítulo 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

O objetivo deste capítulo é apresentar uma fundamentação teórica sobre os conceitos que serão abordados no decorrer de todo o trabalho. Serão apresentadas características fundamentais sobre as descargas atmosféricas, linhas de transmissão, além da curva de tensão versus tempo.

Capítulo 3 - MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA

Este capítulo tem como finalidade abordar a modelagem computacional desenvolvida para simular a linha de transmissão, o fenômeno da disrupção e a forma de onda da corrente de descarga que será utilizada no estudo. Estas simulações foram realizadas utilizando-se o *software ATPDraw* e suas funcionalidades, tais como dispositivos da rotina TACS e a linguagem *MODELS*.

Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção tem por objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos por meio dos estudos computacionais desenvolvidos. Para tanto, foram realizados quatro estudos de caso, nos quais foram alterados os valores de resistência de pé de torre das torres do sistema de transmissão modelado com o intuito de observar o impacto nas magnitudes das sobretensões estabelecidas na LT. Foram feitos estudos com o uso da curva V-t e também com a curva V-t sincronizada, permitindo elaborar uma análise comparativa que comprove as vantagens em se empregar a curva sincronizada para representar a características de suportabilidade elétrica das cadeias de isoladores em sistemas de transmissão de energia.

Capítulo 5 - CONCLUSÕES

Por fim, este capítulo expõe as conclusões gerais sobre os resultados obtidos neste trabalho, salientando a importância do bom dimensionamento de um sistema de transmissão de energia e os benefícios obtidos quanto ao uso da curva V-t sincronizada com as ondas viajantes. Por fim, são indicadas sugestões para continuidade da investigação acerca da utilização da curva V-t sincronizada em estudos de desempenho elétrico de linhas de transmissão e de coordenação de isolamento.

APÊNDICE A - Estudo da variação estatística da frente da corrente de descarga

Neste APÊNDICE serão reproduzidos os casos 1 e 2 da seção de resultados utilizando a fonte *surge type 15* do *ATPDraw*. Esta análise tem como foco comparar os efeitos de correntes de descarga com frentes rápidas e lentas no desempenho elétrico de LTs, empregando fontes de descarga de retorno com tempos de frente diferentes.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo tem como objetivo demonstrar e explicar os conceitos e requisitos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. São abordados de maneira objetiva os temas relacionados a linhas de transmissão, sobretensões atmosféricas e a modelagem computacional utilizando o *software ATPDraw* empregando a curva V-t e a curva V-t sincronizada.

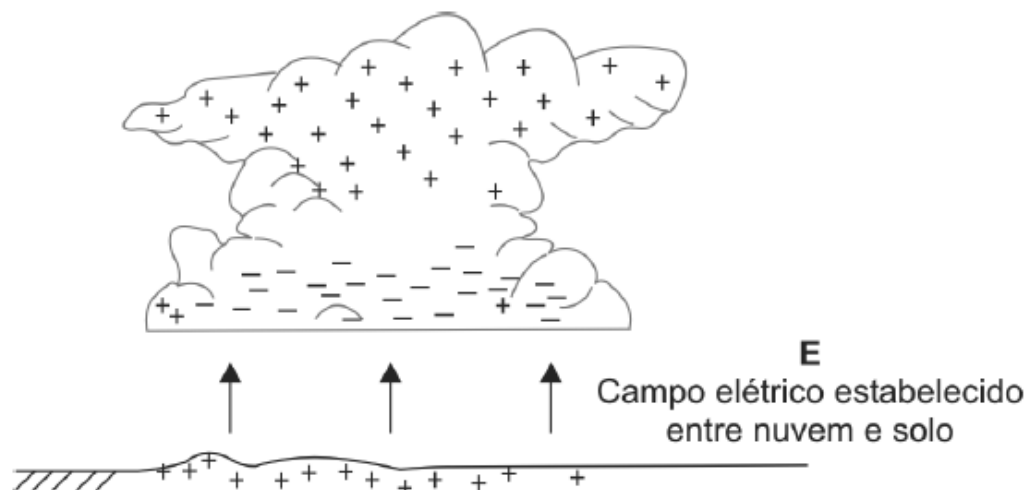
2.1. Descargas atmosféricas

Descargas atmosféricas são um fenômeno meteorológico que envolve a liberação súbita e intensa de eletricidade estática acumulada na atmosfera. Isso ocorre devido à formação de cargas elétricas positivas e negativas nas nuvens durante tempestades, resultando em uma diferença de potencial elétrico significativa.

Quando essa diferença se torna grande o suficiente, ocorre um rompimento dielétrico no ar, seja dentro da própria nuvem, no solo ou em suas proximidades (COORAY, 2014). No momento em que o campo elétrico produzido pelas cargas da nuvem ultrapassa a rigidez dielétrica do ar, aproximadamente 3 MV/m, ocorre a descarga, promovendo a movimentação dos elétrons de cargas negativas para outra região com cargas positivas.

Na Figura 2, podemos ver a formação de cargas na nuvem, que, nesta situação, tem sua base carregada de cargas negativas induzindo cargas positivas no solo, gerando um forte campo entre ambos.

Figura 2 - Campo induzido entre nuvem e solo pelo carregamento da nuvem

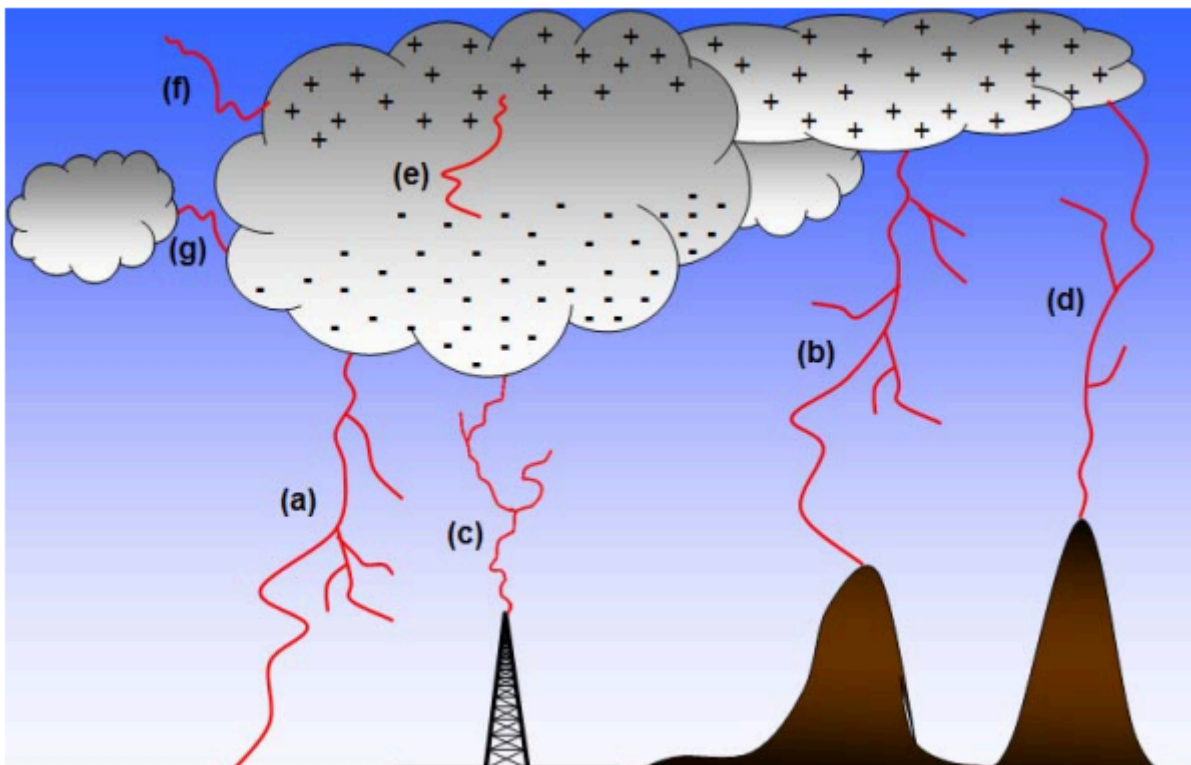


Fonte: Extraída de (VISACRO, 2005)

Segundo Rakov (2003), cada descarga envolve um *leader* (líder) descendente e um *return stroke* (golpe de retorno) ascendente. As primeiras descargas são iniciadas por líderes “escalados”, enquanto os golpes subsequentes são iniciados por líderes “escalados por degraus de progressão”. A partir da polaridade observada da carga que atingiu o solo e da direção de propagação do líder inicial, pode-se identificar tipos diferentes de descargas atmosféricas.

Em seu estudo, Romero (2007) classificou os diversos tipos de descargas em: descargas nuvem-solo positiva e negativa, descargas solo-nuvem positiva e negativa, descargas entre nuvens, descargas intranuvem e descargas no ar. A figura 3 ilustra de forma didática esses tipos de descargas que ocorrem na natureza, onde: (a) nuvem-solo negativa, (b) nuvem-solo positiva, (c) solo-nuvem negativa, (d) solo-nuvem positiva, (e) intranuvem, (f) descarga para o ar, (g) entre nuvens.

Figura 3 - Tipos de descargas atmosféricas



Fonte: Extraída de (ROMERO, 2007)

De acordo com Pinto Junior (2000), raios com polaridade negativa são os que acontecem com maior frequência ao redor do mundo, com cerca de 90% das ocorrências. Já raios com polaridade positiva não são tão comuns, acontecendo geralmente em regiões de montanhas e picos, com ocorrência próxima aos 10%.

Os picos de correntes de descarga de retorno tem amplitudes elevadas, resultando na terra em correntes de valor médio entre 30 kA e 40 kA. Já correntes com picos superiores a 200 kA são raras, correspondendo a menos de 0,1% dos casos (PINTO JUNIOR, *et al.*, 2000).

2.1.1. Incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão

A grande extensão das linhas de transmissão e sua altura considerável em relação ao solo resultam em uma área de exposição bastante abrangente. Isso aumenta consideravelmente a probabilidade de ocorrerem descargas diretas nas próprias linhas. Essa questão ganha ainda mais relevância nos sistemas elétricos de potência do Brasil, no qual as fontes geradoras de energia, como as usinas hidrelétricas, estão muito distantes dos principais centros de consumo (VISACRO, 2005). Como resultado, o sistema de transmissão brasileiro se estende por longas distâncias, o que, por sua vez, aumenta consideravelmente a possibilidade de desligamento dessas linhas devido a sobretensões de origem atmosférica, que solicitam eletricamente os arranjos isolantes.

O guia IEEE (1997) explica que a altura da estrutura metálica influencia no desempenho do sistema elétrico. Quanto maior a altura da torre, maior a quantidade de descargas atmosféricas que a atingem. Além disso, a característica da blindagem dos condutores também deve ser alterada, por causa da altura de instalação.

Após ser atingida por uma descarga de origem atmosférica, a LT é sujeita a uma corrente elétrica de elevada magnitude com um tempo de subida até o valor de pico muito curto, da ordem de alguns microssegundos, diferentemente de uma falha típica no sistema elétrico. Segundo o estudo de Filho (2013):

[..] na eventual incidência de uma descarga atmosférica nos cabos pára-raios da linha, as ondas de corrente e tensão propagam-se por esses cabos e o fluxo da corrente de retorno é direcionado para o solo através da torre e do aterramento. Além disso, são geradas tensões induzidas que se propagam nos condutores das fases, normalmente posicionados abaixo dos cabos de blindagem. (FILHO, 2013. pg 36)

Almeida Júnior (2016) trata dos surtos atmosféricos que atingem sistemas elétricos classificando-os de duas formas: descargas diretas e descargas indiretas. Descargas diretas são definidas como aquelas que atingem os cabos-fase ou pára-raios, ou até mesmo na própria torre. Já as descargas indiretas não atingem diretamente as estruturas de transmissão e

distribuição, geralmente atingindo o solo próximo às mesmas, causando também danos em equipamentos elétricos e eletrônicos.

Após uma análise na literatura, observa-se que as descargas indiretas não geram sobretensões nas cadeias de isoladores da rede elétrica o suficiente para que ocorra uma disrupção (SALARI FILHO, 2006), portanto, não sendo alvo de estudos de desempenho de sistemas de transmissão de energia elétrica.

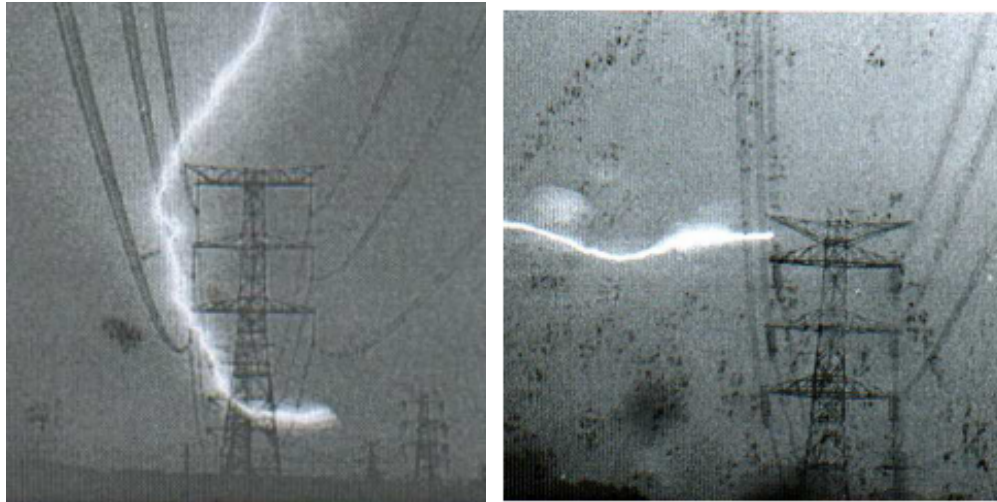
As descargas ao atingirem a estrutura da LT, tem sua corrente em grande parte propagada, ao longo da mesma. A parcela da corrente refletida para o alto da torre e a parcela transmitida para o solo dependem da impedância de aterramento da torre. Estas ondas de corrente que sofrem reflexão no alto da torre e no sistema de aterramento geram sobretensões nas estruturas e ao longo dos cabos de blindagem, podendo causar disrupção no sistema elétrico. Esses mecanismos de ocorrência da disrupção nas cadeias de isoladores podem ser classificados em *Flashover* e *Backflashover*.

Por todos os fatores apresentados anteriormente, são feitos estudos computacionais de desempenho de LTs, com o objetivo de determinar-se a confiabilidade da linha de transmissão e a máxima sobretensão para que ocorra a disrupção do arranjo isolante, de forma a dimensionar uma cadeia de isoladores com o melhor custo-benefício possível, mantendo o sistema seguro e eficaz.

2.1.2. *Flashover*

O *flashover* é um evento onde ocorre um arco elétrico de alta intensidade entre os condutores da linha ou entre um condutor e a terra. Segundo Visacro (2005), isso acontece quando a sobretensão na linha atinge um nível crítico, superando a rigidez dielétrica da cadeia de isoladores. *Flashovers* podem causar interrupções no fornecimento de energia, danificar equipamentos e até mesmo representar riscos à segurança pública, uma vez que podem gerar incêndios e explosões. A Figura 4 ilustra um fenômeno que ocorre em uma torre com circuito duplo, dois cabos pára-raios e disposição vertical de fases chamado de *flashover*.

Figura 4 - *Flashover* com canal de descarga horizontal e vertical.



Fonte: Adaptado de (HILEMAN, 1999).

Hileman (1999) cita que elevados valores de sobretensão são capazes de romper o arranjo isolante, formando um arco elétrico entre o condutor e a estrutura da torre. Esse arco em geral contorna os discos de isoladores em um arco superficial ou, mais raramente, rompe a estrutura do disco. A Figura 5 ilustra este fenômeno da interrupção em isoladores.

Figura 5 - Arco elétrico contornando os discos de uma cadeia de isoladores.



Fonte: Adaptado de (RODRIGUES, 2017)

Algumas linhas de transmissão possuem cabos para-raios fixados nas mísulas localizadas nas porções/partes mais elevadas das torres com a finalidade de captar os raios,

impedindo que atinjam os cabos das fases, caso não existissem estes cabos de blindagem. Estes cabos são tecnicamente instalados nas torres utilizando métodos de coordenação de isolamento de forma a reduzir a um valor aceitável a probabilidade de ocorrência de eventos do tipo *flashover*.

Estudos sobre a variação da quantidade de cabos pára-raios de LTs utilizando o *software ATPDraw* foram realizados por Assis *et al* (2013). Estes cabos foram inseridos de forma paralela às cadeias de isoladores, de acordo com as impedâncias de aterramento. Este processo serve para definir a quantidade adequada do número de cabos pára-raios, para que o projeto atenda a demanda de projetos específicos para um melhor desempenho da linha.

Apesar destas técnicas de tentar mitigar esses efeitos, pode-se ocorrer ainda uma disrupção ao longo do perímetro de contorno do arranjo isolante, originando uma falta do tipo curto-circuito, o que é chamado de *backflashover*.

2.1.3. Backflashover

Fenômeno no qual serão aprofundadas as investigações neste trabalho, o *backflashover* é um tipo de *flashover* que ocorre devido a incidência de descargas na estrutura metálica das torres ou nos cabos de blindagem. Isso acontece quando uma linha de transmissão é atingida por uma descarga atmosférica, e a sobretensão gerada pela descarga é tão intensa que supera a rigidez dielétrica do arranjo isolante, criando um arco elétrico entre a estrutura metálica da torre e os cabos-fases, configurando assim um curto-circuito do tipo fase-terra.

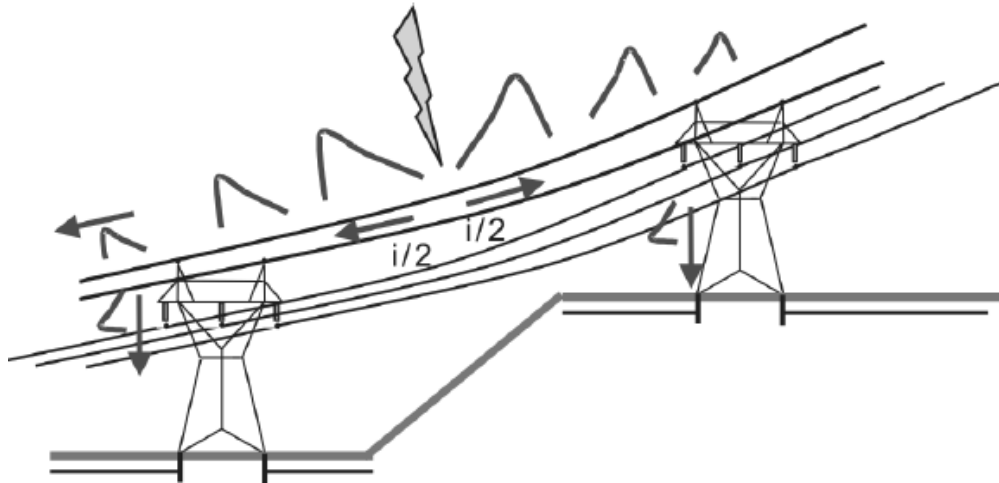
Gatta *et al* (2005) propuseram simulações de descargas atmosféricas diretas em LT's de alta tensão utilizando do *software ATP-EMTP*, que inclui a simulação de processos de disrupção em cadeias de isoladores com o modelo de progressão líder proposto pelo *CIGRÉ*. Investigou-se as faixas de sobretensão que causaram o evento de *backflashover* em uma linha com tensão de 161 kV-50 Hz.

Em sua pesquisa, Cunha (2010) afirma que, dentre os fatores que mais influenciam os desligamentos causados pelo fenômeno de *backflashover*, o mais recorrente é o elevado valor de resistência de aterramento.

Assim como um sistema de aterramento das linhas de transmissão bem dimensionado pode mitigar as ocorrências de *backflashover*, a instalação de cabos de blindagem protege os condutores das fases da ação do surto atmosférico. Quando a corrente de surto atinge os cabos de blindagem ao longo de um vão, esta se divide em duas frentes de

onda de correntes que se propagam em sentidos opostos, em direção às torres adjacentes ao ponto de descarga, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Linha blindada atingida por descarga atmosférica.



Fonte: Extraído de (VISACRO, 2005).

Ao atingir uma torre, a corrente de surto é conduzida até o solo por meio da estrutura metálica da torre. Uma segunda parcela da corrente de surto atmosférico é conduzida para o vão posterior à torre atingida em direção à torre adjacente à jusante. Segundo Rodrigues (2017), este fenômeno pode se estender por até 5 torres à esquerda e/ou à direita do ponto de incidência.

A terceira parcela da corrente de surto é gerada por reflexão ocorrida na torre, quando a sobretensão atinge o solo e volta propagando em direção ao ponto de descarga atmosférica com amplitude proporcional ao coeficiente de reflexão estabelecido pela relação entre a impedância de aterramento da torre e impedância de surto (CUNHA, 2010). As equações 2.1 e 2.2 modelam aproximadamente o comportamento da onda de sobretensão refletida no solo:

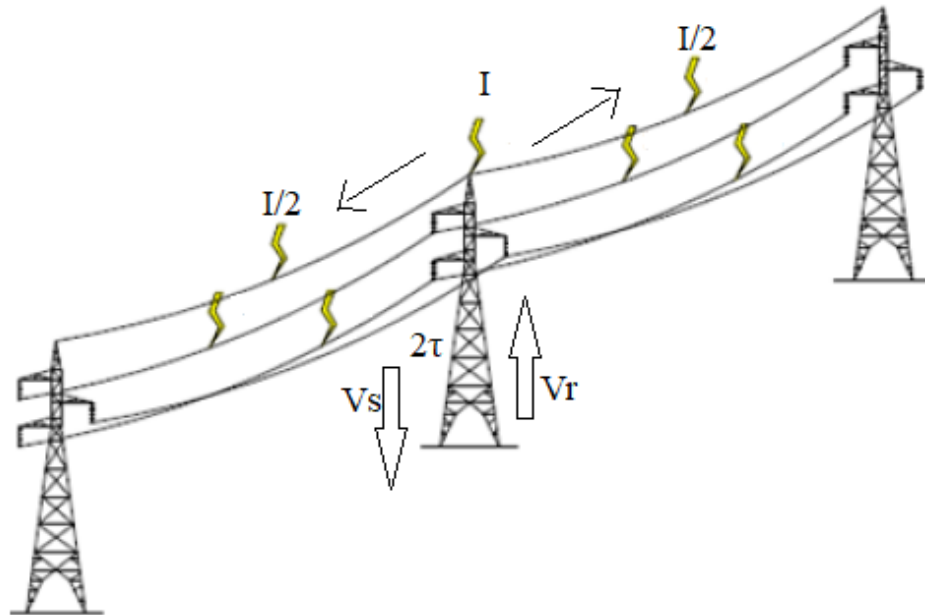
$$\Gamma = \frac{Z_G - Z_T}{Z_G + Z_T} \quad (2.1)$$

$$V_R = V_i \cdot \Gamma \quad (2.2)$$

Onde V_i e V_R são as ondas de tensão incidente e refletida respectivamente e Z_G e Z_T são a impedância de surto da torre e a impedância de aterramento, respectivamente.

Na Figura 7, está representado um evento de *backflashover*, onde a descarga I atingiu a torre central.

Figura 7 - Mecanismo de ruptura de isolamento por *backflashover*.



Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2018).

A onda de sobretensão estabelecida na torre V_T é dada pelo produto da impedância de surto da torre pela amplitude da corrente de descarga. A amplitude da sobretensão que solicita a cadeia de isoladores é obtida pela soma das parcelas da tensão incidente V_s , produzida pela parcela da corrente de descarga $I/2$, que desce pela torre e posteriormente é refletida no sistema de aterramento, retornando ao ponto de ancoragem da cadeia de isoladores. Quando a onda de tensão incidente V_s propaga pela torre até alcançar o sistema de aterramento, surge uma onda de tensão refletida V_r que propaga em direção ao alto da torre. O tempo de propagação ao longo da torre representa-se por τ .

No momento em que a onda de tensão incidente atinge o sistema de aterramento e encontra um coeficiente de reflexão igual a zero, a onda incidente é totalmente transmitida à terra, sem que haja uma sobretensão refletida em direção aos arranjos isolantes. Entretanto, se a impedância de pé de torre for menor que a impedância de surto da torre, a onda de tensão refletida adquire polaridade contrária àquela da sobretensão incidente, devido ao coeficiente de reflexão se tornar menor que zero. Para um coeficiente de reflexão positivo, a sobretensão também é refletida, porém com a mesma polaridade da onda de tensão incidente no sistema de aterramento (VISACRO, 2005).

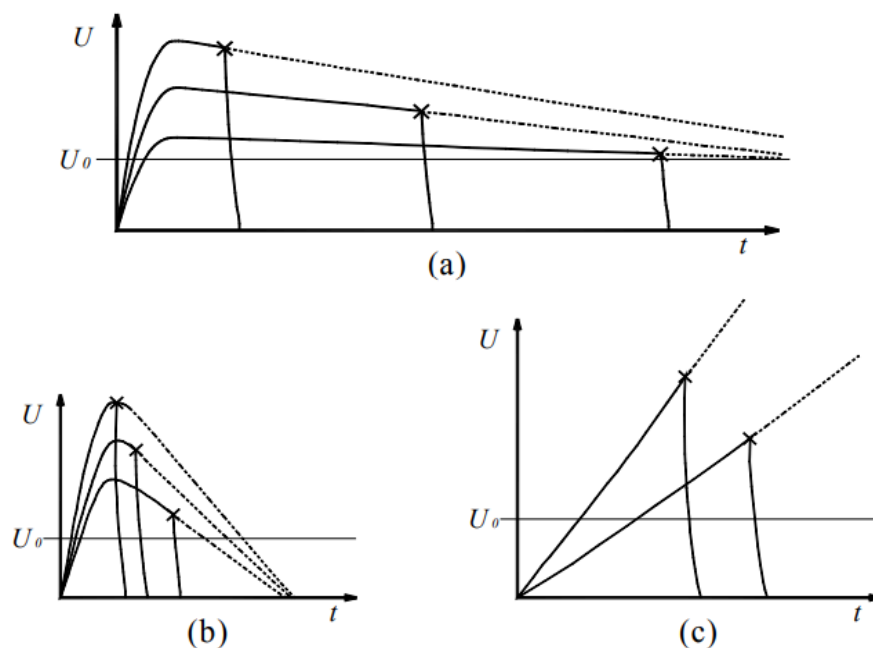
Rodrigues (2017) e Rodrigues *et al* (2014) mostram outros fatores que contribuem para a ocorrência de disrupção por *backflashover*, como por exemplo a forma de onda da corrente de descarga e a quantidade de discos que compõem a cadeia de isoladores.

2.1.4. Curva V-t

Tensões aplicadas gradativamente a arranjos isolantes podem resultar em descargas disruptivas. Porém essa disrupção só ocorre quando o limite de suportabilidade de tensão é extrapolado. Já tensões com frente rápida mostram que essa disrupção ocorre com amplitudes mais elevadas (LOPES, 2016).

Ainda de acordo com Lopes (2016), uma vez que essa amplitude na tensão é aumentada, esse intervalo de tempo diminui, consoante com o que está exposto na Figura 8 (a) e (b) para tempos de corte na região de cauda e na Figura 8 (c) para instantes de corte na região de frente.

Figura 8 - Curvas V-t para tempos de corte diferentes.



Fonte: Extraído de (LOPES, 2016)

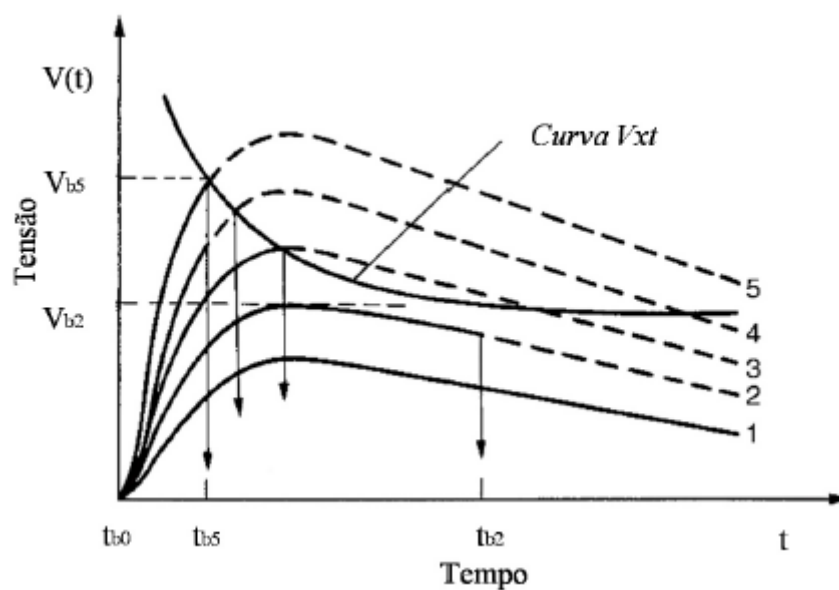
Observando a figura acima, pode-se notar que disrupções para elevadas amplitudes de sobretensão ocorrem dentro de intervalos de tempo mais curtos. Essa relação de tensão e tempo para a ocorrência da disrupção é representada graficamente pela curva V-t (tensão de pico x tempo de disrupção).

Em seu estudo, Faria (2017) define o procedimento para obter a curva (V,t) da seguinte maneira:

[...] o procedimento experimental para obtenção da Curva V-t ocorre através da aplicação de impulsos de tensão variando e registrando o valor de pico da tensão de impulso ou tensão de disrupção, se a ruptura da isolação ocorrer na região de frente da forma de impulso. Adicionalmente, também é anotado o tempo correspondente ao ponto inicial até o instante de ocorrência do colapso de tensão. (FARIA, 2017. pg 42)

Tal afirmação está ilustrada na Figura 9, onde o impulso aplicado em “1” não foi suficiente para causar a disrupção do sistema isolante. Já em “2”, a disrupção ocorreu na cauda do impulso, no tempo t_{b2} . Na forma de onda “5”, a disrupção ocorre na frente da forma onda, no instante de tempo t_{b5} .

Figura 9 - Obtenção da Curva V-t.



Fonte: Extraído de (FARIA, 2017).

Em seu trabalho, Rodrigues (2017) realizou ensaios de suportabilidade em arranjos de isoladores, submetendo-os a tensões positivas com formas de onda normalizadas e não normalizadas com o objetivo de obter a curva V-t experimentalmente. Os ensaios foram realizados com aplicação de impulsos com forma de onda do tipo $1,05 \times 50 \mu s$ produzida por um gerador de impulsos.

Após correções meteorológicas, Rodrigues (2017) realizou o ensaio aplicando a forma de onda padrão para levantamento da característica tensão-tempo. Os valores das tensões disruptivas estão corrigidos pelos fatores calculados na Tabela 1 e também pela relação de tensão do divisor capacitivo (1089 V) do gerador de impulsos.

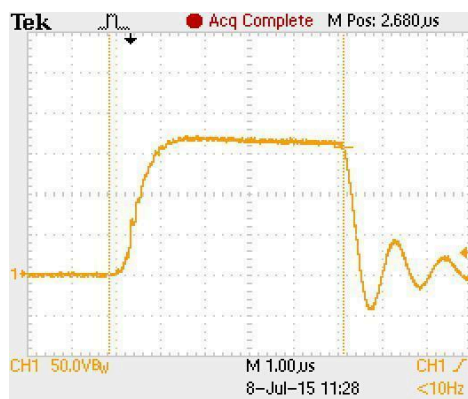
Tabela 1 - Pontos (V,t) obtidos a partir do ensaio com tensão impulsiva padrão.

Pontos selecionados		Correção atmosférica Vst [kV]	Correção por Divisor Capacitivo (x 1,089 kV)
V [kV]	t [μ s]		
170	5,28	183,603	199,944
178	3,90	192,243	209,353
182	3,20	196,563	214,057
196	2,54	211,683	230,523
208	2,04	224,644	244,637
222	1,88	239,764	261,103
230	1,60	248,404	270,512
248	1,48	267,844	291,682

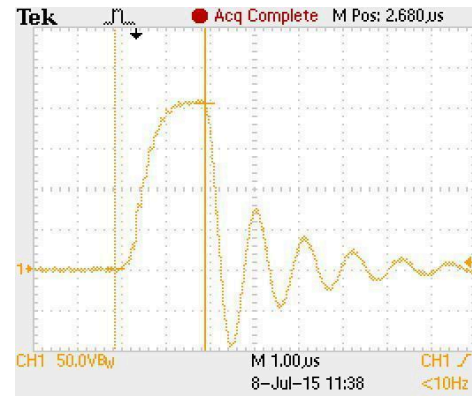
Fonte: Adaptada de (RODRIGUES, 2017)

A Figura 10 apresenta alguns oscilogramas extraídos do ensaio, nas quais mostram a ocorrência da disrupção em diferentes instantes de tempo, para ilustrar o experimento realizado por Rodrigues (2017).

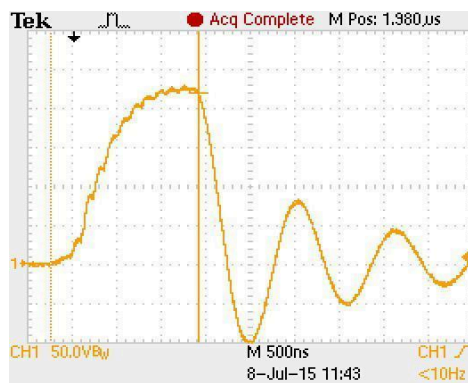
Figura 10 - Registros de interrupções em diferentes instantes de tempo para impulso padrão.



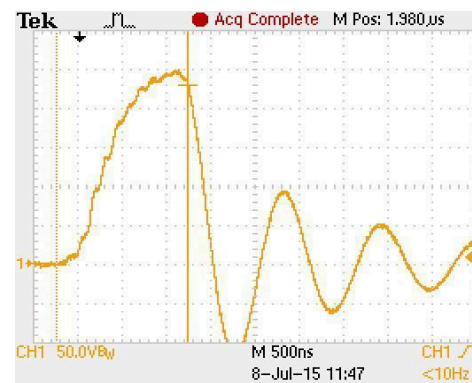
(a) $V=170$ kV e $t = 5.28\mu\text{s}$



(b) $V=208$ kV e $t = 2.04\mu\text{s}$



(c) $V=228$ kV e $t = 1.66\mu\text{s}$

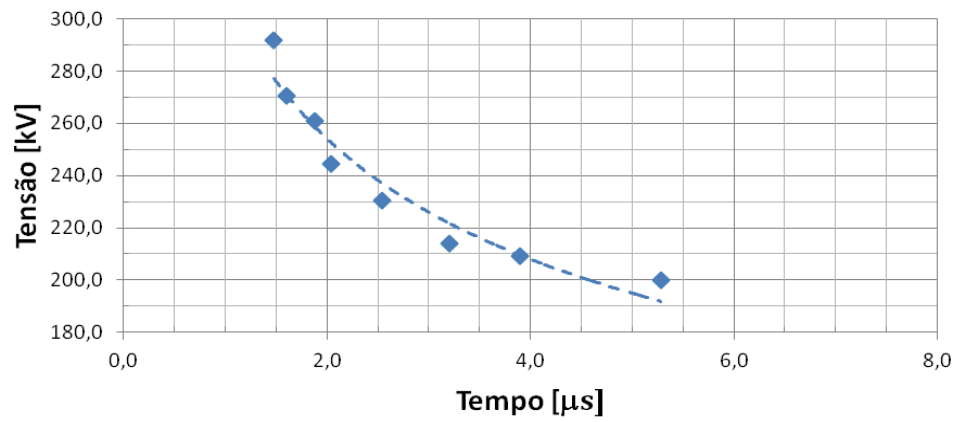


(d) $V=248$ kV e $t = 1.48\mu\text{s}$

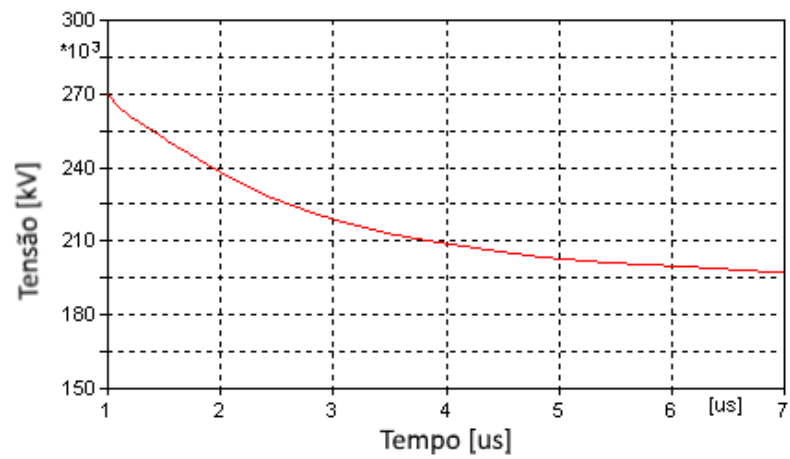
Fonte: Extraída de (RODRIGUES, 2017)

A curva V-t que foi obtida experimentalmente está apresentada na Figura 11 (a) para impulso com polaridade positiva. A Figura 11 (b) apresenta a curva V-t prevista pelo método de Efeito Disruptivo.

Figura 11 - Curva V-t para cadeia de isoladores com 3 discos de vidro submetidos a impulso de tensão padrão.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de (RODRIGUES, 2017)

As demais características e deduções matemáticas sobre a curva V-t, tal como a curva V-t sincronizada estão detalhadas na seção 3 deste documento.

3. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O propósito deste capítulo é descrever a modelagem computacional dos elementos que constituem o sistema de transmissão em investigação. O sistema elétrico modelado é composto por uma linha de transmissão com uma tensão operacional de 500 kV, com base nos dados da LT São Gonçalo do Pará - Ouro Preto 2, onde foram modelados 3 vãos e 4 torres com especificações eletromecânicas obtidas através de consulta ao mapa do SIN (ONS, 2023).

O sistema isolante da linha foi representado considerando cadeias de isoladores composta por 26 isoladores do tipo padrão, com comprimento de 14,605 cm (D'AJUZ, 1987), totalizando 3,8 metros de comprimento da cadeia. Outrossim, foi feita uma modelagem de um sistema de controle que simula a disrupção que pode ocorrer nas cadeias de isoladores por meio da representação da rigidez dielétrica dos arranjos isolantes com base na curva de suportabilidade elétrica V-t. A fonte de corrente de descarga de retorno que foi modelada computacionalmente, produz uma forma de onda do tipo dupla exponencial com impulso atmosférico padrão com forma $1,2 \times 50 \mu\text{s}$.

3.1 - Modelagem da descarga atmosférica

As tensões originadas por correntes de descarga de retorno variam muito seus parâmetros de amplitude, tempos de frente e tempos de cauda. As formas de onda das correntes de descarga podem sofrer variações estatísticas nos seus parâmetros quanto aos valores de pico, tempo de frente e tempo de cauda. Tais variações são probabilísticas e estão relacionadas à composição das nuvens, quantidade de carga elétrica envolvida, presença de poluição na atmosfera entre diversos outros fatores. Sendo assim, diferentes formas de onda de corrente de descarga produzem sobretensões específicas tanto na magnitude quanto no perfil de onda, que solicitam eletricamente os arranjos isolantes das linhas (RODRIGUES, 2017).

A forma de onda padrão de corrente de descarga tem seu valor de pico alcançado em $1,2 \mu\text{s}$ e logo após, lentamente diminui até a metade do valor máximo. Este tempo de cauda leva aproximadamente $50 \mu\text{s}$. Esta forma de onda contempla a recomendação do *IEEE (IEEE STD 1243-1997, 1997)* para representação do impulso atmosférico padrão de tensão do tipo $1,2 \times 50 \mu\text{s}$.

Para este trabalho, o modelo fonte de corrente de descarga de retorno implementado computacionalmente produz uma forma de onda do tipo dupla exponencial. Dentre as funcionalidades do software *ATPDraw* já existe disponível uma fonte desse tipo. Trata-se da fonte *Surge type 15*. Para o uso correto deste elemento do circuito, é necessário que o usuário calcule as constantes de tempo (∞_1 e ∞_2) que determinam a exponencial crescente e decrescente, além de outras variáveis tais como o fator de amplitude, definido pela equação (3.4).

A obtenção destas constantes necessita de cálculos complexos sendo necessário o emprego de métodos numéricos para solução de sistemas de equações não-lineares (RODRIGUES, 2017). Além disso, o tempo de frente da fonte contida no software é menor do que aquele estabelecido para o impulso padrão citado anteriormente. Por isso, Rodrigues (2017) desenvolveu um novo componente para simular essas descargas com características de amplitude, tempo de frente e de cauda, além da derivada máxima da frente de onda, empregando a linguagem *MODELS* do *ATPDraw*. Este modelo de fonte de corrente de descarga do tipo biexponencial foi utilizado para representar a corrente de descarga neste trabalho.

A linguagem *MODELS* tem associação com a interface do *ATPDraw* e foi empregada neste trabalho tanto para a modelagem da fonte de descarga quanto no *model* aqui desenvolvido para reproduzir a curva sincronizada. A *MODELS* é uma linguagem que tem base em um conjunto de ferramentas de simulação para representar e estudar sistemas variantes no tempo (DUBÉ, 1996a). Essa funcionalidade proporciona ao usuário modelar sistemas elétricos e dispositivos de controle não encontrados em suas bibliotecas, a partir de programação.

Foi então criado um novo componente, chamado de *Model Lynce* (em homenagem ao professor honorário Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, orientador de Rodrigues (2017)), o qual recebe os valores de tempo de frente e de tempo de cauda em [μ s], além da magnitude da corrente elétrica de surto [A]. A Figura 12 mostra a interface do componente criado em que o usuário adiciona os dados de entrada, além do ícone gráfico do modelo.

Figura 12 - *Model Lynce*: Fonte de corrente elétrica com forma de onda do tipo dupla exponencial 1,2x50 μs.

MODEL: DUPLAEXP

DATA	VALUE
TFRENT	1.2
TCAUDA	50
VCR	20000

NODE	PHASE	NAME
FSURTO	1	BIEXPO

Order: 0 Label:

Comment:

Models

Model file: Use As: Hide Lock

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com os dados inseridos pelo usuário, o *Model Lynce* calcula os valores das constantes de tempo (∞_1 e ∞_2) em função do tempo de crista e do tempo de cauda informados, aplicando as equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$x = \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \quad (3.1)$$

$$\alpha_1 = \frac{\ln(2 - \frac{1}{(1-x)})}{TFRENT - TCAUDA} \quad (3.2)$$

$$\alpha_2 = \frac{\ln(x)}{TFRENT} + \alpha_1 \quad (3.3)$$

Sendo ∞_1 e ∞_2 as constantes de tempo; X a razão entre essas constantes; $TFRENT$ o tempo de frente de onda em [μs] e $TCAUDA$ o tempo de cauda em [μs].

Em seguida é calculado o fator de correção da amplitude da corrente elétrica, utilizando a equação (3.4).

$$A_0 = \frac{VCR}{\exp(\alpha_1 \cdot TFRENT) - \exp(\alpha_2 \cdot TFRENT)} \quad (3.4)$$

Onde A_0 é o valor inicial do fator de correção do valor de crista da corrente elétrica e VCR é o valor de crista da forma de onda da corrente.

Posteriormente, o *model* Lynce calcula os valores dos instantes de tempo nos quais a amplitude da corrente elétrica atinge 30% (variável X30) e 90% (variável X90) do valor de crista. Registra-se esses respectivos instantes de tempo com as variáveis T30 e T90. As equações (3.5), (3.6), (3.7) e (3.8) foram utilizadas para estes cálculos.

$$X30 = \exp(\alpha_1 \cdot T30) \quad (3.5)$$

$$X90 = \exp(\alpha_1 \cdot T90) \quad (3.6)$$

$$T30 = \frac{\ln(X30 - 0,3 \cdot \frac{VCR}{A_0})}{\alpha_2} \quad (3.7)$$

$$T90 = \frac{\ln(X90 - 0,9 \cdot \frac{VCR}{A_0})}{\alpha_2} \quad (3.8)$$

Após esse procedimento, é realizado um novo cálculo do $TFRENT$, utilizando a equação 3.9, agora levando em consideração os parâmetros $T30$ e $T90$, encontrados nas equações 3.7 e 3.8.

$$TFRENT = TFRENT + (0,6 \cdot TFRENT \cdot (1E - 6) - (T90 - T30)) \quad (3.9)$$

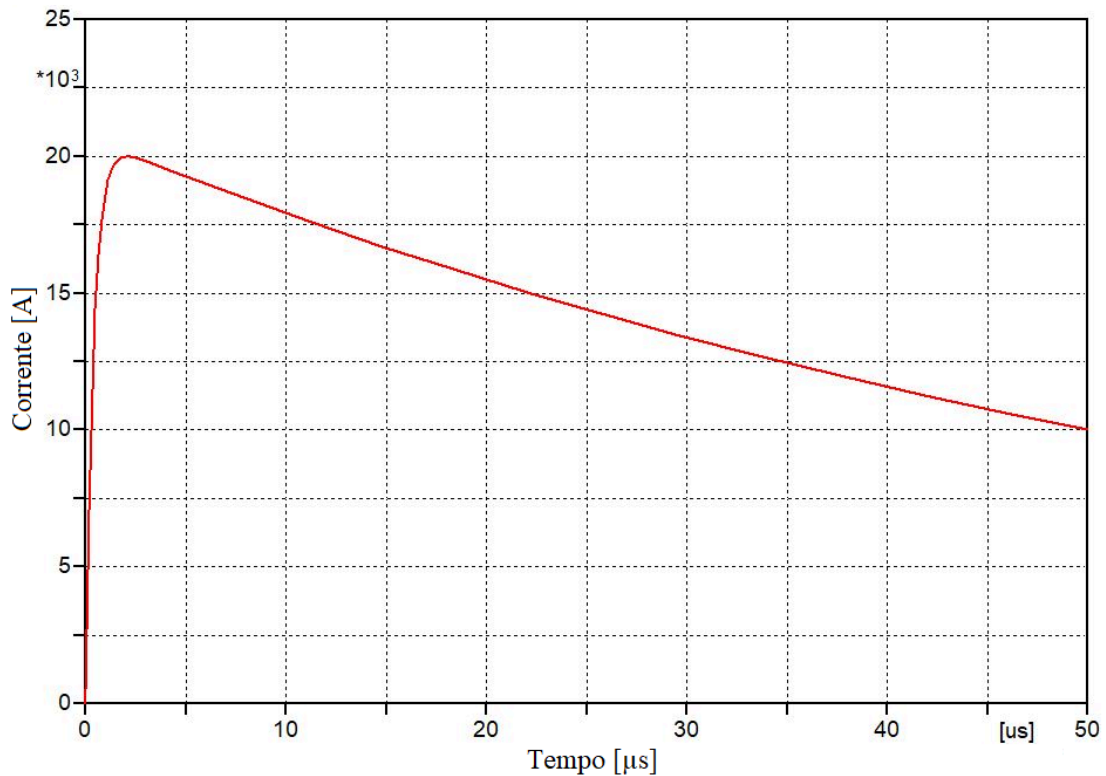
Com o novo tempo de frente obtido, é calculado um novo valor do fator de correção da amplitude (A_1), utilizando-se a equação (3.4). Esse passo é feito para obter o valor de crista que o usuário deseja.

Com todos os valores registrados, utilizando a equação (3.10), o *model* Lynce calcula a corrente de surto com forma de onda do tipo dupla exponencial, com os dados informados conforme a figura 13.

$$FSURTO = A_1 \cdot (\exp(\alpha_1 \cdot t) - \exp(\alpha_2 \cdot t)) \quad (3.10)$$

Onde $FSURTO$ é a amplitude da corrente de descarga com a forma de onda do tipo exponencial dupla e A_1 é o novo fator de correção do valor de crista. Na Figura 13, pode-se ver a forma de onda gerada.

Figura 13 - Forma de onda biexponencial gerada pelo *model Lynce*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme dito anteriormente, a principal diferença entre a fonte tipo 15 do ATP e o *model Lynce* é o tempo de frente. Como pode-se notado por análise dos valores contidos na Tabela 2, embora essa diferença não pareça ser relevante, visto que são microssegundos, uma análise dos parâmetros característicos revela um erro percentual de mais de 47% no tempo de frente obtido pela fonte *Surge Type 15* do *ATPDraw* em relação ao tempo correto calculado pela fonte de corrente *model Lynce*. Tais discrepâncias são muito relevantes em estudos de desempenho elétrico de linhas de transmissão de energia e de coordenação de isolamento.

Tabela 2 - Parâmetros das formas de onda produzidas pela fonte tipo 15 do *ATPDraw* e pelo *model Lynce* implementado.

Parâmetros Característicos	Fonte <i>Surge type 15</i>	<i>Model Lynce</i>
T_{pico} [μs]	1.173	2.054
T_{frente} [μs]	0.631	1.204
T_{cauda} [μs]	50.204	50.000

Fonte: Adaptada de (Rodrigues, 2017)

Entretanto, a forma de onda da corrente elétrica produzida pelo *model Lynce* reproduz os parâmetros característicos de uma função exponencial dupla de acordo com a definição do IEEE com exatidão.

Com o intuito de comparação entre as fontes de corrente de retorno, no APÊNDICE A, foram realizadas simulações com os Casos 1 e 2 da seção de RESULTADOS com a Fonte *Surge type 15* do *ATPDraw*, mostrando o comportamento do sistema elétrico simulado com a utilização da fonte de corrente de descarga com frente rápida.

3.2 - Modelagem do sistema de transmissão de energia elétrica

A modelagem do sistema elétrico feita utilizando o *software ATPDraw* contém cinco vãos e quatro torres nas quais os parâmetros elétricos e geométricos dos cabos e torres foram obtidos através da pesquisa de Soares (2015).

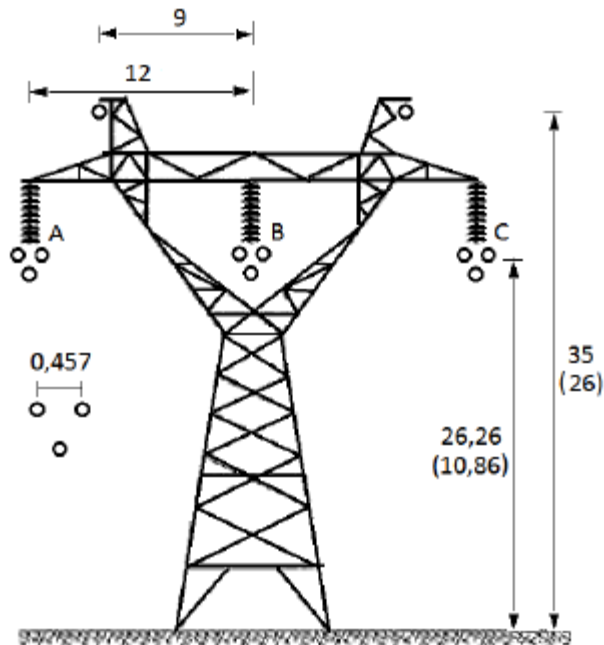
A LT escolhida para a simulação foi a LT São Gonçalo do Pará - Ouro Preto 2, localizada no estado de Minas Gerais e pertencente à CEMIG, possui tensão operacional de 500 kV em circuito simples. Entretanto, com o propósito de investigar o comportamento das sobretensões de origem atmosférica, a linha será considerada desenergizada neste trabalho pois não consta no escopo desta pesquisa investigar os efeitos das tensões de regime permanente no desempenho elétrico da LT.

O modelo computacional da linha trifásica foi representado com três condutores por fase do tipo RUDDY 900 MCM, espaçados a 60° entre si e espaçados por 0,457 metros. As distâncias entre os cabos das fases é de 12 metros e entre os cabos pára-raios é de 9 metros. O tipo de cabo-guarda utilizado para realizar as simulações foi o EHS 3/8" (SOARES, 2015).

Na Figura 14 é mostrada a geometria da torre modelada no *ATPDraw* e suas dimensões de altura. Todos os componentes da estrutura da torre já citados anteriormente, tais

como cabos-fase, pára-raios e cadeia de isoladores estão posicionados de acordo com a figura 14, abaixo.

Figura 14 - Perfil da torre modelada neste estudo.



Fonte: Adaptada de (SOARES, 2015)

Os demais dados relativos à geometria dos cabos e às especificações elétricas dos cabos da LT mostradas na Tabela 3, tais como raio interno e externo foram inseridos no módulo *LCC* (Line Constant, Cable Constants and Cables Constants) do *ATPDraw*, como é mostrado na Figura 15, bem como na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados geométricos e elétricos dos condutores e do cabo guarda.

Tipo do cabo	RUDDY 900	EHC 3/8"
Tipo	MCM	Classe C
Flechas [m]	25,67	30,71
Diâmetro Interno [cm]	0,3167	0
Diâmetro Externo [cm]	1,437	0,5555
Resistência em CC [Ω]	0,0633	3,276

Fonte: Elaborada pelo autor

No componente LCC foram inseridos, na ordem mostrada na Figura 16 os cabos das fases (de #1 à #3) e os cabos para-raios (#4 e #5). Essa informação é muito relevante,

visto que, apesar do ícone do *LCC* mostrado na Figura 16 mostrar os cabos para-raios na parte superior e os condutores das fases na parte inferior, a inserção de dados deve ser feita na ordem mostrada na Figura 15. A alteração de ordem na disposição destes dados no *LCC* altera a forma com que a LT recebe a descarga de origem atmosférica, fazendo com que atinja as fases B e C, ao invés dos cabos guarda, de acordo com a modelagem representada pelo usuário no *ATPDraw*.

Figura 15 - Parâmetros elétricos, mecânicos e geométricos dos cabos utilizados na rotina LCC para modelagem da LT

Line/Cable Data: C:\ATP\project\lcc\GAB_300M_2400_250.alc

	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0.3167	1.437	0.0633	-12	26.26	25.67	45.7	60	3
2	2	0.3167	1.437	0.0633	0	26.26	25.67	45.7	60	3
3	3	0.3167	1.437	0.0633	12	26.26	25.67	45.7	60	3
4	4	0	0.5555	3.276	-9	35	30.71	0	0	1
5	5	0	0.5555	3.276	9	35	30.71	0	0	1

Buttons: Add row, Delete last row, Insert row copy, Move (up/down), OK, Cancel, Import, Save As, Run ATP, View, Verify, Edit icon, Help

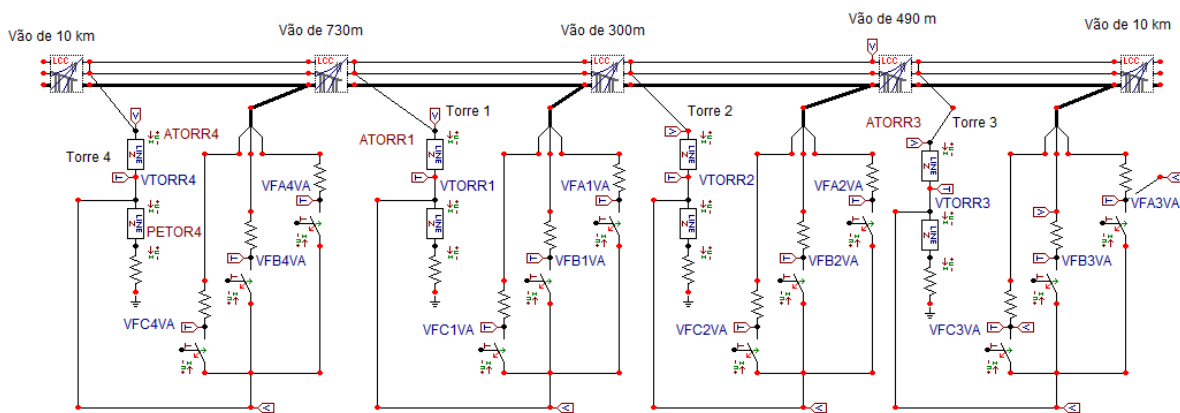
Fonte: Elaborada pelo autor.

Utilizando o modelo *JMarti* disponível no *ATPDraw*, o *software* calcula os parâmetros da LT, considerando a dependência dos parâmetros elétricos da LT (RODRIGUES, 2017). Para tanto, foram utilizados 10 Hz como frequência inicial e 250 kHz como frequência da matriz de transformação, recomendado por (GATTA, *et al* 2005). A resistividade do solo, assim como feito por Soares (2015), foi configurada em 2400 $\Omega \cdot m$. Vale ressaltar que no Brasil, há grande variação nos valores de resistividade elétrica do solo

devido à grande variedade de tipos de solos e suas composições. Desta forma, foi utilizado um valor médio dentre aqueles identificados na revisão bibliográfica, mas lembrando que no Brasil há medições que indicaram valores de resistividade de solo de até $5000 \Omega \cdot m$ (VISACRO, 2005).

Na Figura 16 pode-se ver a disposição das torres e dos vãos que constituem o sistema de transmissão modelado na interface gráfica do *ATPDraw*. Da esquerda para direita, temos respectivamente: torre 4, torre 1, torre 2 e torre 3, sendo a torre 2 atingida pela descarga atmosférica.

Figura 16 - Sistema elétrico simulado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema é composto por cinco vãos, com comprimentos obtidos através de medições no mapa do SINDAT (ONS, 2023), sendo os três vãos centrais com comprimentos de 730 m, 300 m e 490 m respectivamente. Para tal fim, os vãos das extremidades com comprimentos de 10 km têm como função impedir que sejam consideradas sobretensões refletidas em outras torres adjacentes neste estudo referentes ao terceiro vão à esquerda e ao segundo vão à direita., limitando a janela de observação aos efeitos das 4 torres e 3 vãos modelados. Desta forma as sobretensões que se propagam nos vãos com comprimentos de 10 km não terão influência nos resultados de estudos de desempenho de linhas perante o fenômeno de *backflashover* investigado neste estudo.

A modelagem de torres de transmissão foi realizada utilizando um modelo de uma linha de transmissão curta com a impedância de sua estrutura constante e aterrada por um resistor no pé da torre, de acordo com os estudos de Laforest (1981).

Em sua pesquisa, Yamada *et al* (1995) estimaram que a impedância da torre pode ser dividida em duas partes, com base em medições em uma torre de uma LT de 500 kV. Sabendo disso, as torres foram modeladas como dois trechos de LT monofásicas, conectadas

em série, com alturas de 26,26 m (altura onde as cadeias de isoladores estão posicionadas) e 8,74 m (diferença entre a posição dos cabos-guarda à cadeia de isoladores).

A velocidade de propagação das ondas na torre foi definida em 255 m/ μ s. Esse valor tem como base estudos experimentais de Zanetta Júnior (2003) que demonstraram que essa propagação que desce pela torre é inferior à velocidade da luz, tendo um valor médio de 85% do valor da velocidade da luz.

3.3 - Modelagem do sistema de controle que representa a disrupção

Uma disrupção é um processo físico que cria um arco que contorna o isolamento de uma cadeia com isoladores em série de uma linha de distribuição/transmissão (TEIXEIRA, 2022). Se a sobretensão aplicada à cadeia de isoladores exceder o valor da tensão suportável representada pela curva de suportabilidade do conjunto de isoladores de disco de vidro, a disrupção irá ocorrer. A Figura 17 ilustra este fenômeno da disrupção em isoladores por um arco elétrico.

Figura 17 - Desenvolvimento da fase de *Leader* até a ocorrência da disrupção.



Fonte: Extraído de (RODRIGUES, 2017)

Essa metodologia é frequentemente aplicada em sistemas elétricos, eletrônicos e de comunicações para compreender como eventos de transientes, como surtos de tensão e picos, podem afetar o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos.

3.3.1 - Curva *V-t*

A suportabilidade elétrica das cadeias de isoladores foi modelada com base na curva de Tensão *versus* Tempo (HILEMAN, 1999), ou Curva *V-t*. Tal abordagem está

baseada na rigidez dielétrica da cadeia de isoladores quando solicitada por um impulso de tensão atmosférico. Nesta curva são considerados tanto a amplitude da sobretensão quanto o tempo durante o qual o arranjo isolante fica submetido ao impulso. A Curva V-t é descrita pela Equação (3.11), que foi obtida através de tratamentos estatísticos, uma vez que é determinada a partir de procedimentos experimentais e específica para isoladores do tipo disco (HILEMAN, 1999).

$$V(t) = 400 * W + \frac{710 * W}{t^{0,75}} \quad (3.11)$$

Onde:

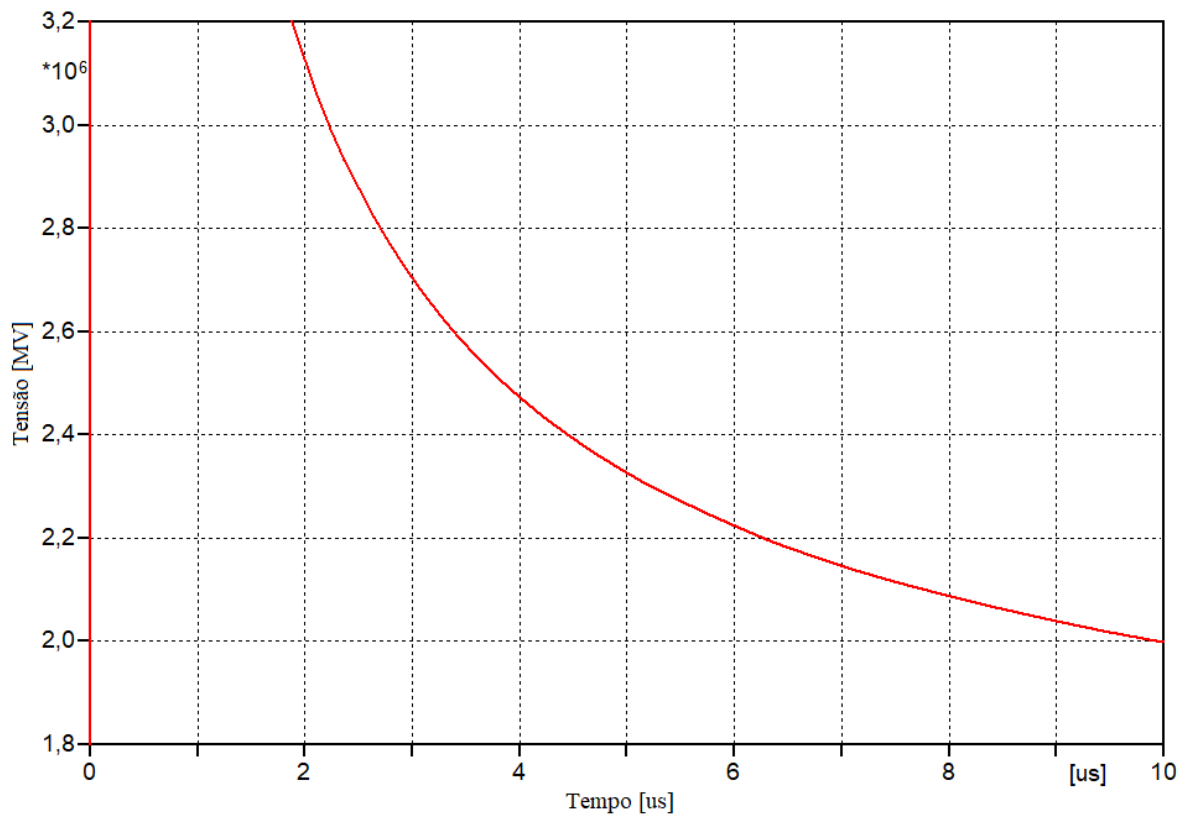
V : tensão à qual cadeia de discos isolantes é submetida [kV];

t : é o instante de tempo quando ocorre a disrupção [μ s];

W : é comprimento da cadeia de isoladores [m];

O sistema implementado será composto por 26 isoladores do tipo padrão, com comprimento de 14,605 cm (D'AJUZ, 1987), totalizando 3,8 metros. A forma de onda da curva V-t simulada está exposta na Figura 18.

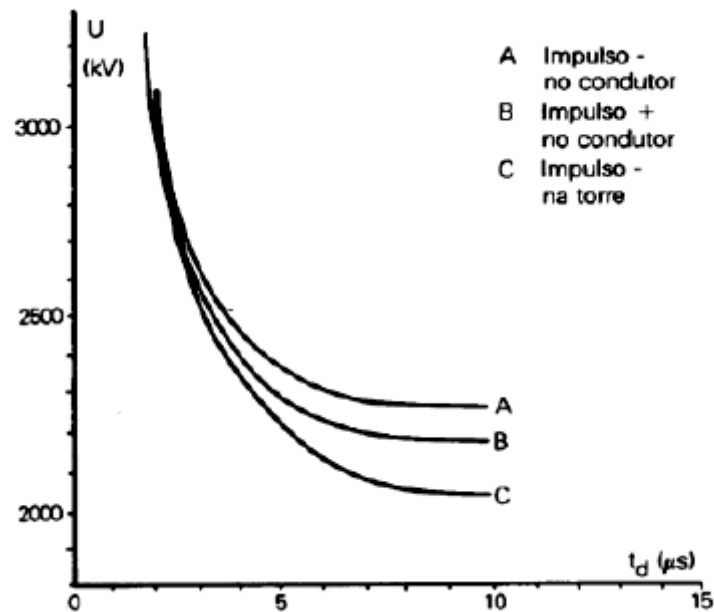
Figura 18 - Comportamento da curva V-t no sistema implementado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparando a figura anterior com a curva produzida por Hileman (1999) para fins de validação, pode-se notar a curva implementada utilizando a equação (3.11) e o software *ATPDraw* possui similaridade com àquela encontrada na literatura, conforme o exemplo exposto na Figura 19.

Figura 19 - Curva V-t obtida na literatura.



Fonte: Adaptada de (HILEMAN, 1999).

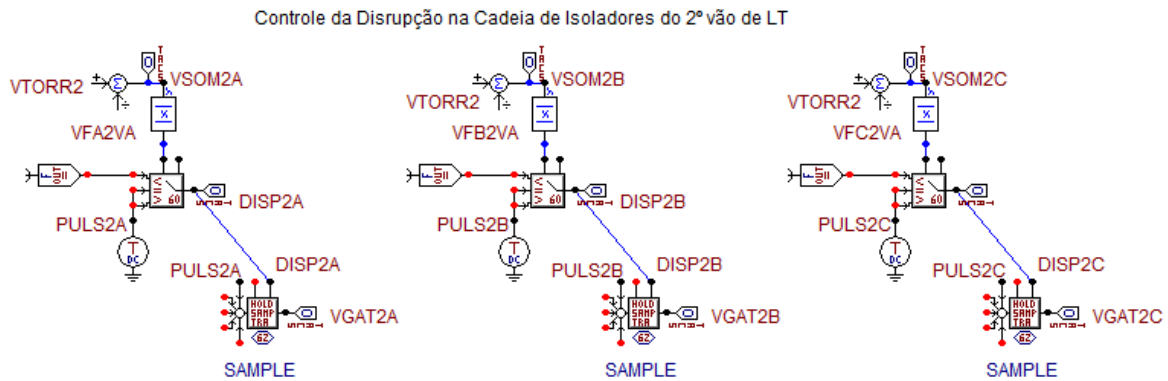
3.3.2 - Sistema de controle que representa a disrupção representado com elementos da rotina TACS

Conforme mostrado na Figura 20, estes são os dispositivos de controle contidos na *TACS* do *ATPDraw* que serão empregados para implementar a modelagem computacional do fenômeno da disrupção. A rotina *TACS* (*Transient Analysis of Control Systems*) permite o uso de vários dispositivos de processamento para representar um sistema de controle.

Neste trabalho, os dispositivos mostrados na Figura 20 foram utilizados para implementar um sistema de controle que representa o arco elétrico de contornamento de uma cadeia de isoladores. Os dispositivos foram associados de forma a compor um sistema que comanda uma chave controlada que quando estiver fechada representa a ocorrência da disrupção na cadeia de isoladores, configurando uma situação de curto-circuito entre a fase e a terra por meio da torre. Portanto, o sistema de transmissão trifásico modelado que é composto por quatro torres requer um total de doze sistemas de controle implementados.

A Figura 20 expõe os sistemas de controle que representam a disrupção para cada uma das três fases da Torre 2.

Figura 20 – Sistema de controle TACS que representa a disrupção sobre a cadeia de isoladores das fases A, B e C da Torre 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A lógica utilizada para o funcionamento do sistema de controle que comanda a chave TACS é simples e está descrita em três passos a seguir, utilizando como exemplo, a fase A da Torre 2, representada na Figura 20:

- I. Primeiro, é calculado o módulo da sobretensão aplicada à cadeia de isoladores desta fase, que no caso, consiste na sobretensão aplicada à chave TACS colocada entre a Torre 2 (nó VTORR2 na Figura 20) e os condutores da fase A (neste caso, nó VFA2VA na Figura 20). A diferença entre as magnitudes de tensão nestes dois nós é aplicada nas entradas do dispositivo somador (VSOM2A) mostrado na Figura 20. Neste caso, este dispositivo atuará como subtrator fornecendo como saída os valores instantâneos da sobretensão imposta à cadeia de isoladores da LT, ou no caso da modelagem, a sobretensão imposta à chave TACS do sistema de controle;
- II. Um dispositivo comparador tipo 60 da TACS analisa na sua entrada a cada passo de integração o módulo da sobretensão comparando-o com a tensão suportável pela cadeia de isoladores determinada pela curva V-t. Quando o valor da sobretensão (VSOM2A) for superior ou igual ao ponto (V, t) da curva de suportabilidade no respectivo instante de tempo, é gerado um pulso auxiliar denominado DISP2A) com amplitude igual ou superior a 1.
- III. O pulso gerado é aplicado ao dispositivo 62, *Sample&Track*, que tem como objetivo registrar o instante de tempo em que o pulso DISP2A é gerado, fornecendo também o instante de tempo de ocorrência da disrupção. Assim, o dispositivo 62, ao registrar o

instante de tempo no qual a sobretensão ultrapassou a suportabilidade da cadeia, produz um pulso denominado VGAT2A que comanda o fechamento da chave TACS, ligando o cabo de fase à torre. Esta ação representa um curto-circuito fase-terra, causando a disrupção, ao ligar eletricamente o condutor da fase à Torre 2.

A lógica descrita anteriormente também é a mesma aplicada pelos sistemas de representação das disrupturas das fases A, B e C das Torres 1, 2, 3 e 4.

3.3.3 - Criação do model que produz a curva V-t sincronizada com as ondas viajantes na linha de transmissão.

Estudos de desempenho elétrico de linhas de transmissão realizados com emprego da curva V-t para representar a suportabilidade das cadeias de isoladores das torres como observado em (TEIXEIRA, 2022) e (RODRIGUES; *et al*, 2014) não levam em consideração o instante de tempo no qual a sobretensão começa a solicitar a cadeia de isoladores, uma vez que a onda viajante de sobretensão proveniente de descarga atmosférica leva um determinado tempo para chegar aos arranjos isolantes das torres adjacentes. Nestes estudos a curva V-t de suportabilidade dos isoladores de todas as torres é gerada no instante de tempo igual a zero, no início da simulação computacional, fazendo com que a suportabilidade elétrica da cadeia seja menor do que o seu valor nominal no instante de tempo no qual a sobretensão começa a estressar os isoladores. Desta forma, a rigidez dielétrica das cadeias de isoladores dos vãos mais distantes do local de incidência da descarga atmosférica é subestimada e apresenta menor suportabilidade à sobretensão atmosférica no exato momento em que é estressada eletricamente. Esta limitação da modelagem computacional também resulta em maior ocorrência de disrupções do que na realizada quando comparada com a situação real.

Com a finalidade de resolver essa questão, foram conduzidas pesquisas que proporcionaram desenvolvimento de um *model* apresentado na Figura 21, utilizando a linguagem *MODELS* do *ATPDraw* para produzir a curva V-t no exato instante de tempo em que as sobretensões alcançam as cadeias de isoladores.

Figura 21 - *Model* que gera a curva sincronizada das torres do sistema modelado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O *model* programado tem como função gerar a curva de suportabilidade V-t somente quando a sobretensão chegar à cadeia de isoladores de cada torre, ou seja, uma curva sincronizada com as ondas viajantes de sobretensão nos cabos guarda da LT. Uma vez que a suportabilidade é representada para cada uma das quatro torres do sistema de transmissão, são necessárias quatro curvas de suportabilidade distintas. O código que rege o funcionamento do *model* está mostrado no Apêndice A e sua lógica de operação pode ser descrita de forma reduzida da seguinte maneira:

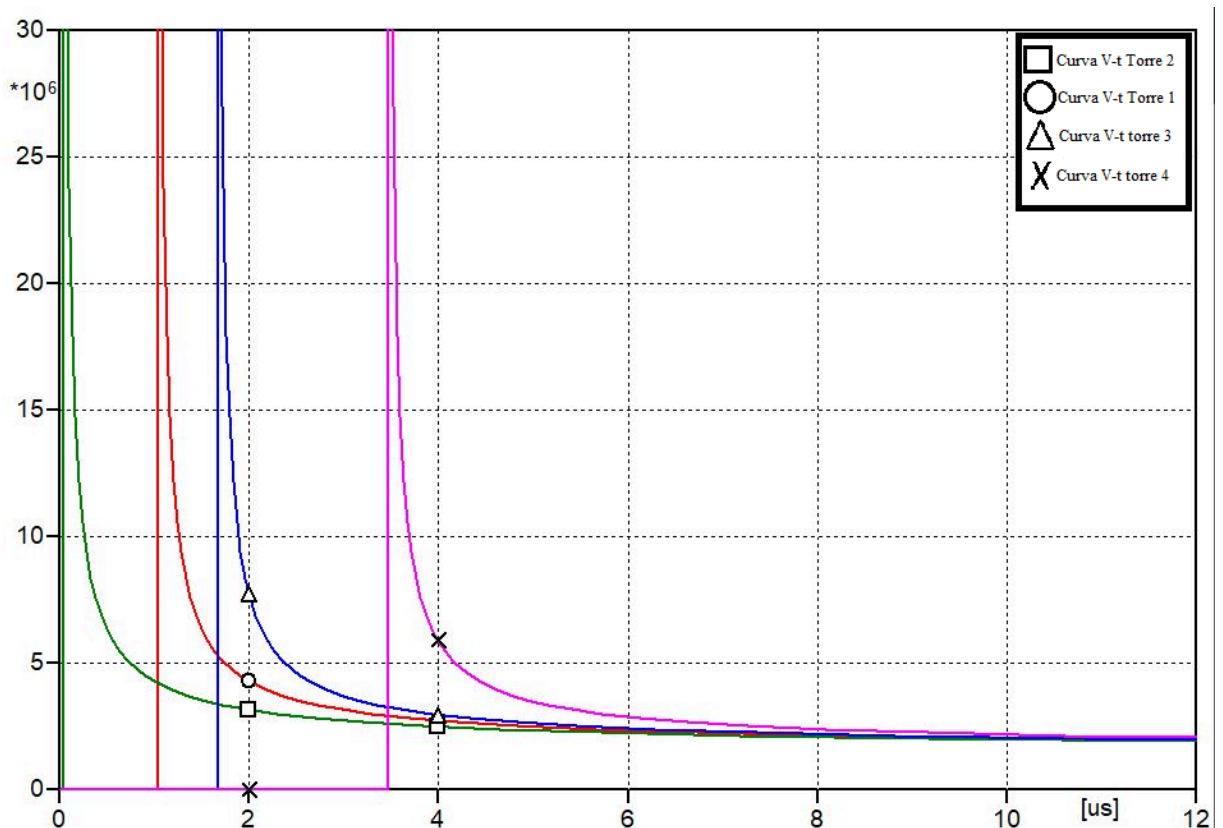
- I. Cada *model* recebe como dados de entrada a tensão de sua respectiva torre, estabelecida no ponto de fixação da cadeia de isoladores na torre. Estas são as tensões nos nós VTORR1 ou VTORR2 ou VTORR3 ou VTORR4, representados no circuito da Figura 21. Além da tensão das torres, o *model* recebe as tensões instantâneas das fases A, B e C de cada torre (por exemplo, VFA2VA, VFB2VA e VFC2VA são as tensões nos cabos das fases A, B e C, respectivamente para a torre 2). A partir deste ponto, a lógica de funcionamento do *model* segue o mesmo princípio de funcionamento do sistema que representa a disrupção, descrito no item 3.3.2. Se o módulo da sobretensão na torre é maior que zero somado a uma variável denominada *MARGIN* (inicializada com valor zero), então soma-se um passo de integração ($1E^{-8}$) à variável DELTT1. A variável DELTT1 é responsável por registrar o instante de tempo em que a onda viajante chega à cadeia de isoladores.
- II. A partir disso, a equação (3.11) é utilizada para gerar a curva V-t. Nela, a variável DELTT1 substitui a variável “t” (instante de tempo quando ocorre a disrupção).
- III. Com isso, o *model* começa a monitorar as sobretensões que chegam à cadeia de isoladores. No momento em que a variável VSOM1A for igual ou maior do que a tensão suportável definida pela curva V-t, então VGAT1A que é aplicado à chave TACS, comandando seu fechamento, representando a disrupção ao longo da cadeia de isoladores. Quando isso acontece, a variável de disrupção TRUP1A é registrada como tempo *T* (tempo do processamento da simulação) e a variável VRUP1A registra a amplitude da sobretensão no momento da disrupção em VSOM1A.

O procedimento de coordenação mostrado acima também é o mesmo implementado para as fases A, B e C das torres 1, 2, 3 e 4.

Para fins de validação, um cálculo da onda viajante na LT pode ser feito, usando como exemplo o sistema modelado na Figura 21. A torre 1 está a 300 m da torre da descarga, ou seja, quando o surto atmosférico atingir a torre 2, a onda viajante percorrerá 300 m pelo

cabo-guarda até chegar à torre 1. Sendo a velocidade de propagação no condutor considerada a mesma velocidade da luz no vácuo, ou seja, $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ (ALMEIDA, 2017), a onda chegará na torre 1 em $1 \mu\text{s}$. Observando a Figura 21, onde estão plotadas as curvas geradas em sincronismo, percebe-se que a curva foi gerada exatamente no instante de $1,03 \mu\text{s}$. A pequena diferença entre o instante de geração da curva e o valor calculado pode ser justificado devido a diferença de altura de $8,74 \text{ m}$ entre o cabo para-raio e a cadeia de isoladores. Esta altura não foi considerada no código do *model* para produzir a curva V-t por representar uma diferença insignificante neste estudo. A Figura 22 abaixo ilustra como ficaram as curvas produzidas pelo respectivo *model* em cada torre do sistema de transmissão, considerando que a Torre 3 está distante 1030 m à esquerda da torre atingida pela descarga. Já a torre 4 está distante 490 m da torre central do sistema de transmissão, atingida pela descarga atmosférica.

Figura 22 - Curvas V-t sincronizadas das torres 1, 2, 3 e 4.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir do desenvolvimento dos modelos computacionais supracitados, torna-se possível realizar estudos de desempenho elétrico do sistema de transmissão perante sobretensões atmosféricas utilizando tanto a curva V-t quanto a curva V-t sincronizada para representar a suportabilidade elétrica das cadeias de isoladores. Ambas as modelagens da

suportabilidade elétrica dos isoladores utilizam a chave TACS mostrada na Figura 20 para representar a ocorrência da disrupção.

No capítulo 4 são apresentados os resultados de estudos de casos com o intuito de comprovar a eficiência da utilização da curva sincronizada para representar a suportabilidade dielétrica dos arranjos isolantes do sistema de transmissão modelado, além de uma análise comparativa empregando os resultados obtidos com o uso da curva V-t tradicional.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo mostrar e discutir os resultados dos estudos de casos feitos computacionalmente utilizando o *software ATPDraw*, analisando o impacto das sobretensões atmosféricas no trecho de linha de transmissão modelado. A partir destes, será possível avaliar o uso da curva V-t sincronizada com as ondas viajantes comparando-a com a curva V-t simples, apresentando análises sobre as principais diferenças e vantagens sobre a precisão observada nos resultados.

Foram determinadas as correntes críticas para que ocorra uma disrupção, que tem sua escala definida pelo *software* em 1 A. A partir disso, foram anotados os valores dessas sobretensões disruptivas e o instante em que o fenômeno ocorreu, com a finalidade de comparar o desempenho elétrico da LT quando são empregados cada um dos dois modelos de curva V-t.

Para tanto, foram realizados quatro estudos de caso considerando também diferentes valores de resistência de aterramento para as torres do sistema simulado. Estes estudos também visam identificar a influência da resistência de aterramento das torres adjacentes à torre atingida pela descarga para o evento de *backflashover*. Em todas as simulações, a LT está desenergizada, com a finalidade de observar apenas os efeitos e consequências das sobretensões de origem atmosférica.

Em todos os casos estudados, a fonte de corrente que simula a descarga atmosférica de retorno foi aplicada à torre 2. Os estudos de caso foram assim definidos:

- I. Caso 1: Todas as torres com resistência de pé de torre igual a 30 Ω ;
- II. Caso 2: Torre 2 com resistência de pé de torre igual a 60 Ω e as demais iguais a 30 Ω ;
- III. Caso 3: Torre 3 com resistência de pé de torre igual a 60 Ω e as demais iguais a 30 Ω .
- IV. Caso 4: Torre 4 com resistência de pé de torre igual a 60 Ω e as demais iguais a 30 Ω .

A justificativa para a simulação dos quatro casos é que, em uma linha de transmissão real, nunca se sabe em qual torre ocorrerá a incidência da descarga atmosférica, por isso, é importante saber se, tanto as cadeias de isoladores quanto o sistema de aterramento estão corretamente dimensionados, quer seja na torre onde ocorreu a incidência de descarga ou nas torres adjacentes. Neste sentido, os estudos de casos determinados procuram assegurar

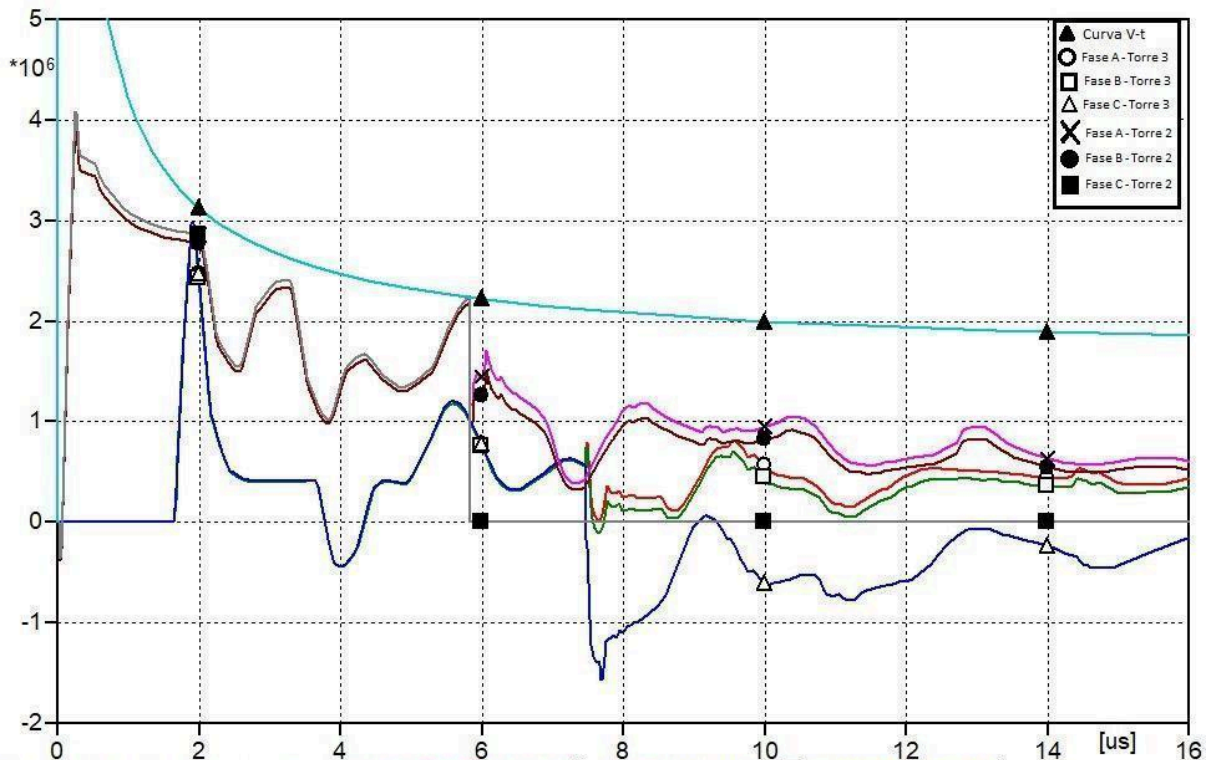
que o que o projeto de coordenação de isolamento da LT está de acordo com os níveis de sobretensões previstas de forma a mitigar a ocorrência de desligamentos.

4.1. Caso 1: Todas as torres com resistência de aterramento igual a 30Ω :

4.1.1 - Caso 1.1: Torres com resistência de 30Ω e suportabilidade elétrica representada por Curva V-t:

No primeiro estudo de caso, as 4 torres do sistema possuem resistência de aterramento de 30Ω . Através de sucessivas simulações foi determinada a corrente crítica de descarga de 175,206 kA para que ocorra uma disrupção, no instante de tempo de 5,83 μ s, quando uma sobretensão disruptiva de 2,2393 MV acomete a cadeia de isoladores da fase C da torre 2. A Figura 23 apresenta o gráfico da curva V-t e as formas de onda das sobretensões nas fases A, B e C das torres 2 e 3 após o impacto do surto atmosférico.

Figura 23 – Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 com disrupção na cadeia da fase C da torre 2 - Caso 1: torres com resistência de 30Ω e curva V-t.



Fonte: Elaborada pelo autor

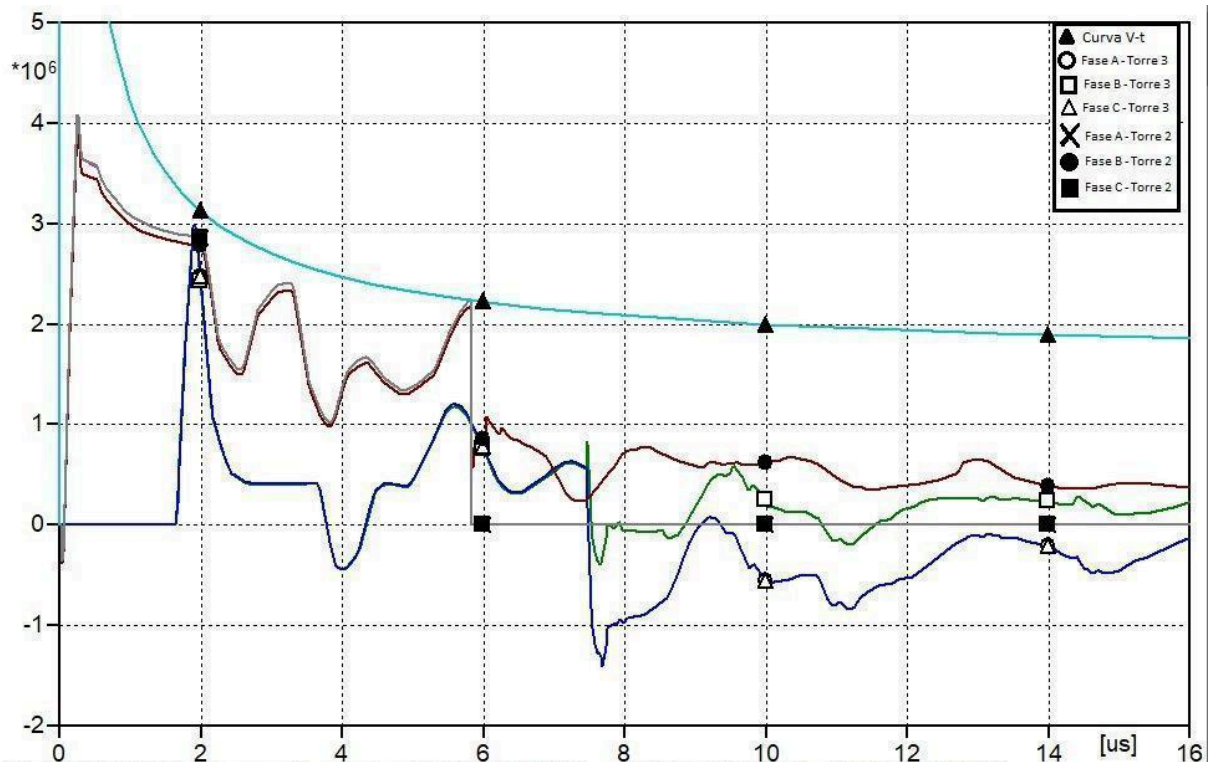
Devido a geometria da LT, que pode ser observado na Figura 14 que possui os condutores de fase na mesma altura, as fases A e C experimentaram sobretensões com valores praticamente iguais e ligeiramente superiores à sobretensão na fase B. A configuração

geométrica dos cabos fase localizados a mesma altura, faz com que nos condutores da fase B central, os campos magnéticos produzidos pelas correntes nos condutores das fases externas sejam contrários, reduzindo assim as parcelas de indutâncias mútuas para a fase B quando comparadas às indutâncias mútuas dos cabos das fases externas. Este é o motivo da sobretensão na fase B central ter amplitude ligeiramente inferior às sobretensões nas fases A e C externas.

No instante da disrupção, nota-se um afundamento brusco nas sobretensões das fases A e B da torre 2. Com a ocorrência do curto-circuito ao longo da cadeia de isoladores da fase C para a terra, o sistema trifásico fica desequilibrado, fazendo com que as formas de onda das sobretensões nas outras fases sofram alterações bruscas.

Outra constatação é que um aumento na amplitude da corrente crítica para 175,245 kA, provoca também a disrupção na cadeia de isoladores da fase A, ou seja, uma diferença de apenas 39 A (0,022% da corrente crítica de descarga que causa disrupção apenas na fase C) é suficiente para promover disrupções tanto na fase A quanto na fase C da torre 2. Observa-se também na Figura 24 que há um afundamento brusco na sobretensão da fase B, no instante de tempo de 5,83 μ s em que ocorreu a disrupção nas fases adjacentes.

Figura 24 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia das fases A e C da torre 2 com todas - Caso 1: torres com resistência de 30 Ω e curva V-t.

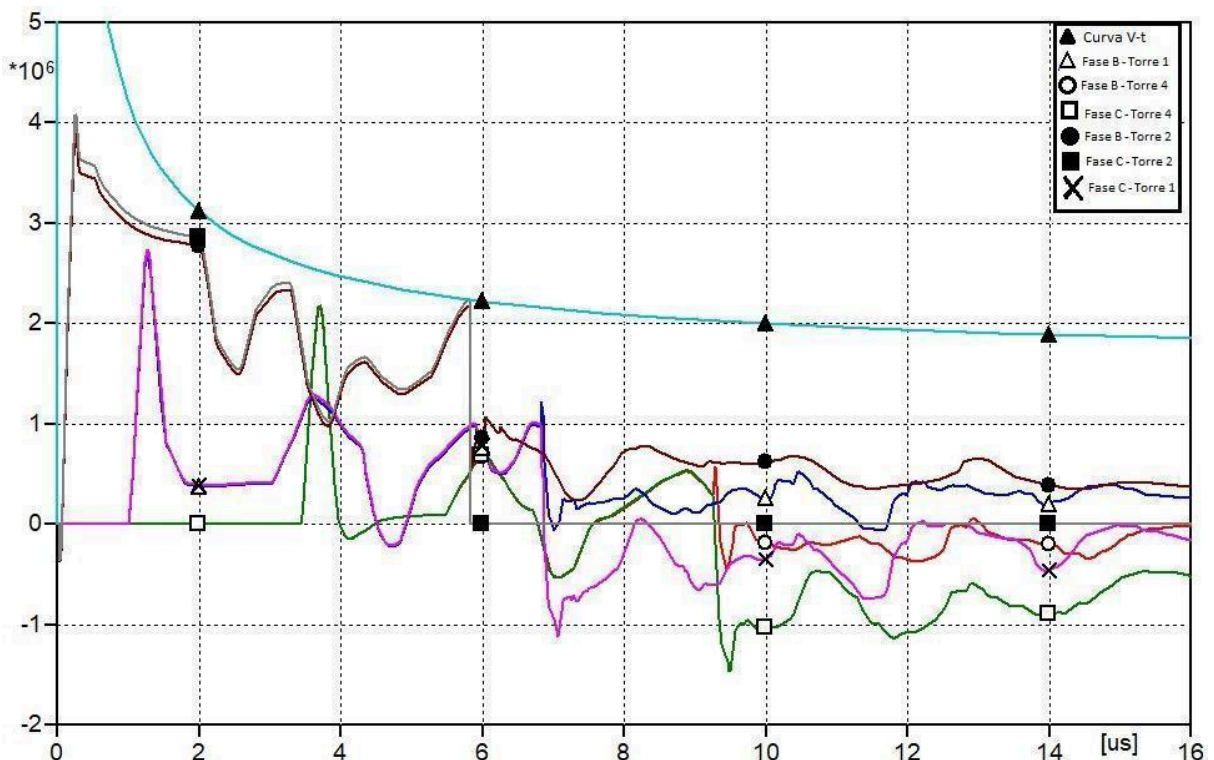


Fonte: Elaborada pelo autor

Para a análise das torres 1 e 4, a fase A não foi inserida no gráfico devido a limitação da quantidade máxima de 8 curvas que podem ser plotadas simultaneamente com o programa *PLOTXY* usado pelo *software ATPDraw*. Há de se ressaltar que, como foi dito anteriormente, devido ao perfil da torre, as sobretensões nas fases A e C apresentaram valores praticamente iguais para este sistema. Dessa forma, foram analisadas somente as sobretensões nas fases B e C das torres 1 e 4.

Aplicando o mesmo valor de corrente de surto da figura anterior, pode-se notar que em um primeiro momento, as amplitudes das sobretensões nas fases das torres 1 e 4 foram inferiores à suportabilidade elétrica representada pela curva V-t, não ocorrendo disrupção. As baixas amplitudes de sobretensões nestas torres 1 e 4 adjacentes à torre 2 que sofreu a descarga decorre do baixo valor de resistência de aterramento de pé de torre considerado neste caso. Um baixo valor resistência de aterramento reduz significativamente a parcela de sobretensão refletida no sistema de aterramento da torre e que propaga na torre subindo em direção à cadeia de isoladores, mitigando assim, as sobretensões que produzem o desligamento por *backflashover*. A Figura 25 mostra os resultados.

Figura 25 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 4 para disrupção da cadeia das fases A C da torre 2 – Caso 1: todas as torres com resistência de 30Ω e curva V-t



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise das formas de onda de sobretensões também evidencia um comportamento de elevação das sobretensões nas fases B das torres em relação às sobretensões das fases C, após a ocorrência da disrupção na fase C da torre 2.

Ressalta-se que nos instantes de tempo iguais a $6,82 \mu\text{s}$ e $9,25 \mu\text{s}$ ocorreram afundamentos nas sobretensões, o que fez com que as diferenças de amplitude nas fases B e C, que até então eram valores muito próximos, aumentassem consideravelmente. Essas oscilações na amplitude das sobretensões são decorrentes das propagações das ondas viajantes nos condutores da LT e das múltiplas reflexões ocorridas quando as ondas de sobretensões atingem as torres adjacentes.

4.1.2 - Caso 1.2: Torres com resistência de 30Ω e suportabilidade elétrica representada por Curva V-t sincronizada:

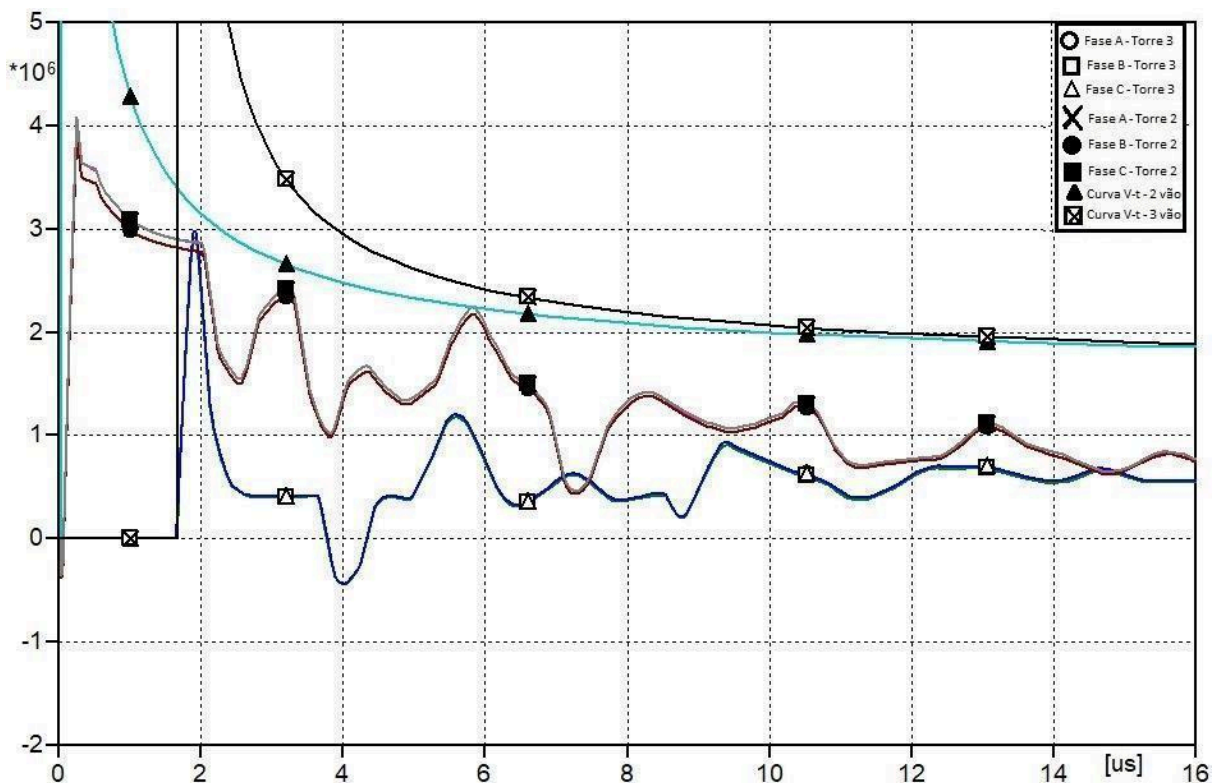
Neste estudo de caso é utilizado o mesmo sistema considerado no Caso 1.1 onde todas as torres estão com resistência de aterramento igual a 30Ω porém a suportabilidade elétrica das cadeias de isoladores é agora representada empregando-se a curva V-t sincronizada com as ondas viajantes, por meio do emprego do *model* descrito no Capítulo 3.

Ao aplicar a mesma corrente crítica de descarga de $175,245 \text{ kA}$ registrada no Caso 1.1 anterior, percebe-se, observando a Figura 26, que não houve disrupção em nenhuma fase. Nesta figura estão plotadas as formas de onda de tensões nas fases A, B e C das torres 2 e 3, além das curvas V-t sincronizadas com suas respectivas sobretensões nas torres, sendo a “Curva V-t - 2 vão” representando a torre 2 e a “Curva V-t - 3 vão” representando a torre 3.

No instante de tempo de $5,83 \mu\text{s}$ quando ocorreram as disrupções nas fases A e C da torre 2 no Caso 1.1, a tensão disruptiva foi de $2,2428 \text{ MV}$, valor superior em $3,5 \text{ kV}$ em relação a tensão disruptiva definida pela curva não sincronizada para o mesmo instante de tempo, que foi de $2,2393 \text{ MV}$.

Portanto, podemos inferir que o uso da curva V-t não sincronizada para representar a suportabilidade elétrica dos arranjos isolantes da LT pode conduzir a um sobredimensionamento das cadeias de isoladores, exigindo quantidade de discos de isoladores superior à quantidade realmente necessária. Tal fato resulta ainda no aumento de custo do sistema de isolamento da LT.

Figura 26 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 utilizando a curva sincronizada. Caso 1.2: Torres com resistência de pé de 30 Ω e Curva V-t sincronizada



Fonte: Elaborada pelo autor

Quanto à dinâmica do fenômeno de *backflashover*, podemos afirmar que esta diferença nas tensões disruptivas definidas por uso da curva V-t sincronizada e não-sincronizada será ainda mais relevante para o caso de correntes de descarga com frentes de onda mais rápidas, pois para instantes de tempo inferiores a 10 μ s as diferenças entre as amplitudes das curvas de suportabilidade são crescentes para instantes de tempo inferiores, notadamente para correntes críticas de descarga com frentes de onda com tempos inferiores a 3,5 μ s como pode ser observado na Figura 26.

Para que a sobretensão atinja a suportabilidade da curva V-t, a amplitude da corrente crítica foi aumentada para 175,525 kA, uma diferença de aproximadamente 319 A em relação aos 175,206 kA do Caso 1.1. Na tabela 4 estão expostos os valores de disrupção.

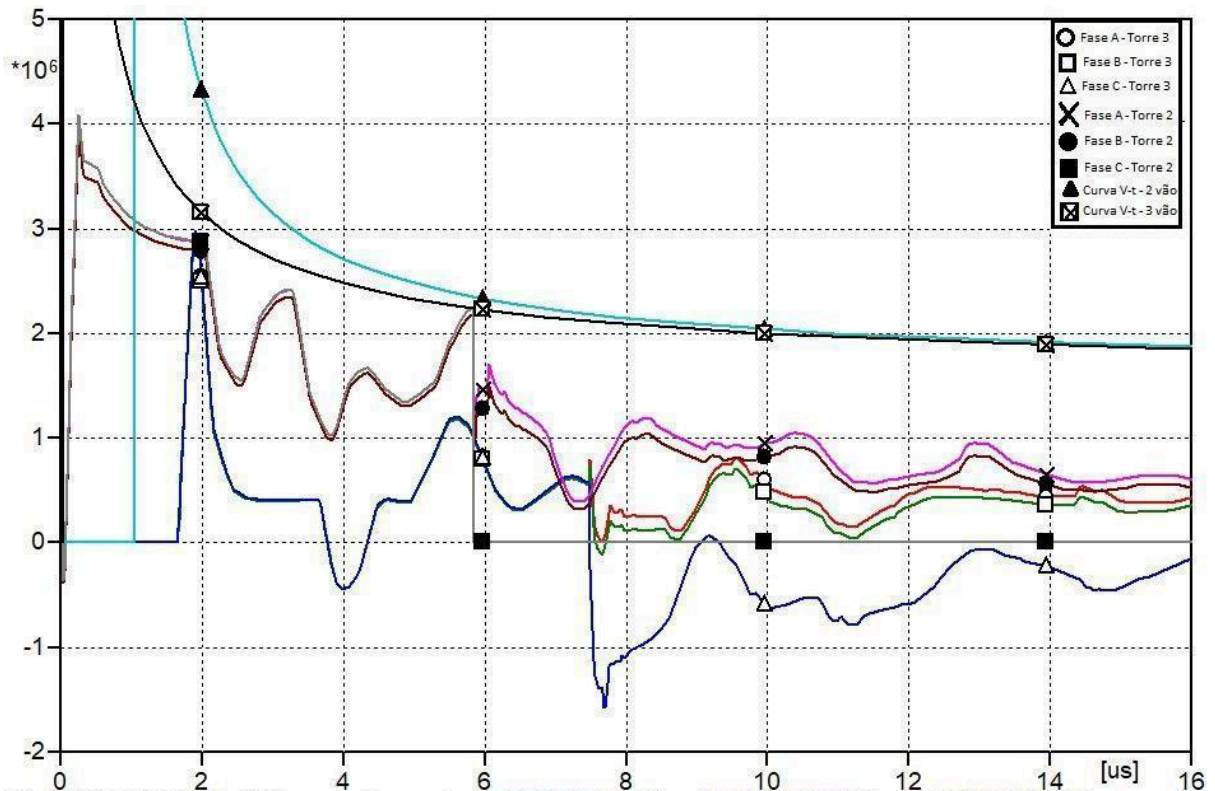
Tabela 4 - Parâmetros de desempenho elétrico do caso 1.2 para disrupção na fase C da Torre 2

Corrente crítica [kA]	Instante de tempo [μ s]	Sobretensão Fase C [MV]
175,525	5,83	2,2428

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se notar que, no Caso 1.1, o mesmo valor de sobretensão fez com que ocorresse a disrupção nas fases A e C, enquanto que no caso 1.2 ocorreu apenas na fase C. A Figura 27, onde foram plotados os mesmos itens da Figura anterior, mostra que o *backflashover* ocorreu na fase C da torre 2.

Figura 27 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 utilizando a curva sincronizada. Caso 1.2: Torres com resistência de 30 Ω e curva V-t sincronizada.



Fonte: Elaborada pelo autor

Quando a corrente de descarga é aumentada para 175,714 kA, também ocorre a disrupção da cadeia de isoladores da fase A da mesma torre, fazendo com que ocorra um curto fase-fase-terra. Uma diferença de 469 A em relação a mesma situação com curva não-sincronizada. Já em relação a disrupção somente na sobretensão da fase C, a diferença foi de aproximadamente 189 A.

Na tabela 5 estão exibidos os valores de disrupção para que ocorra a disrupção em ambas as fases.

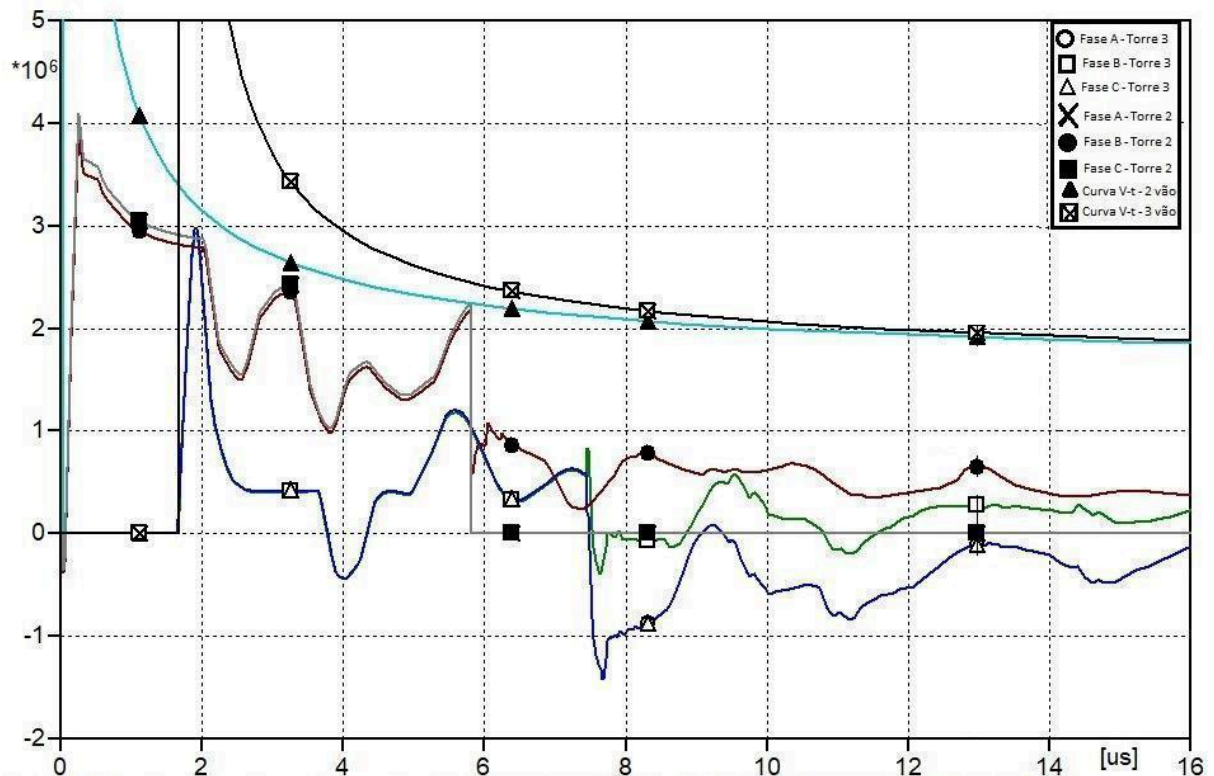
Tabela 5 - Parâmetros de desempenho elétrico do caso 1.2 para disrupção nas fases A e C da Torre 2

Corrente crítica [kA]	Instante de tempo [μ s]	Sobretensão Fase A [MV]	Sobretensão Fase C [MV]
175,714	5,81	2,245	2,2447

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 28 pode-se ver o momento em que ocorre o *backflashover* nas fases A e C e o conseqüente afundamento de sobretensão da fase B.

Figura 28 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia das fases A e C da torre 2 utilizando a curva sincronizada. Caso 1.2: torres com resistência de 30 Ω e curva V-t sincronizada.



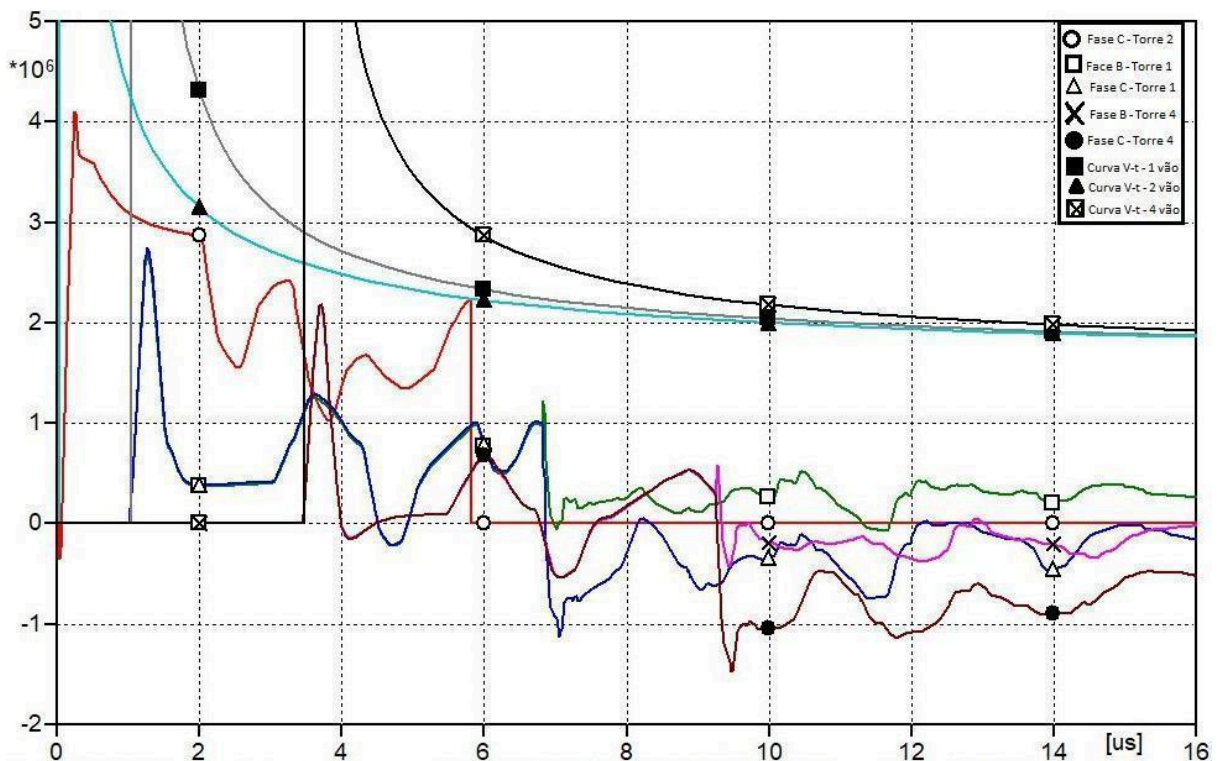
Fonte: Elaborada pelo autor

Um ponto importante a se destacar, tanto na Figura 27 quanto na 28 é que as sobretensões nas cadeias de isoladores da torre 3 se aproximam da curva de suportabilidade dielétrica (representada nas cores verde e azul) reproduzida para as cadeias de isoladores da torre 2. Como a curva V-t da torre 3 foi gerada a partir do instante de tempo de 1 μ s, quando a onda viajante de sobretensão alcança as cadeias de isoladores desta torre, a análise correta para este caso é comparar as amplitudes das sobretensões com a curva V-t (em preto) gerada

para a torre 3. Portanto, como descrito no capítulo 3, a utilização do *model* criado para gerar a curva V-t sincronizada permite a reprodução da suportabilidade dielétrica específica para os arranjos isolantes de cada torre do sistema de transmissão.

Na Figura 29 foram inseridas as sobretensões das fases B e C das torres 1, 2 e 4, além das curvas sincronizadas para cada torre respectivamente, onde a “Curva V-t - 1 vão” representa a torre 1, a “Curva V-t - 2 vão” representando a torre 2 e a “Curva V-t - 4 vão” representando a torre 4.

Figura 29 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 4 para disrupção da cadeia das fases A e C da torre 2 -. Caso 1.2: Torres com resistência de 30Ω e Curva V-t sincronizada.



Fonte: Elaborada pelo autor

É notório a diferença de tempo do início da geração da curva V-t das torres adjacentes em relação à torre da descarga observados neste caso quando comparados ao Caso 1.1 quando foi utilizada a curva V-t não sincronizada. A curva V-t da torre 4, por exemplo, que anteriormente era gerada a partir de 0s, começou a ser gerada em $3,47 \mu\text{s}$, aumentando significativamente o valor de suportabilidade das cadeias de isoladores dessa torre e reproduzindo de maneira fiel e precisa a característica dielétrica ou propriedade dielétrica real.

Fazendo uma análise da relação entre a curva V-t sincronizada gerada para torre mais distantes em relação à curva V-t não sincronizada, percebe-se que, quanto maior a distância da torre adjacente até a torre atingida pela descarga, maior será a diferença entre os

valores de tensão suportável definidos pela curva V-t e pela curva V-t sincronizada, tendo valores muito superiores nesta do que naquela. Portanto para um sistema de transmissão em que as resistências de aterramento estejam com valores apropriados, a disrupção em torres adjacentes à torre atingida pela descarga somente ocorre para amplitudes muito elevadas de correntes críticas. No caso deste estudo, para que isso ocorra, seriam necessárias amplitudes de corrente de descarga superiores a 240 kA.

4.2. Caso 2 - Torre da descarga com resistência de terra igual a 60 Ω e torres adjacentes com resistência de terra de 30 Ω

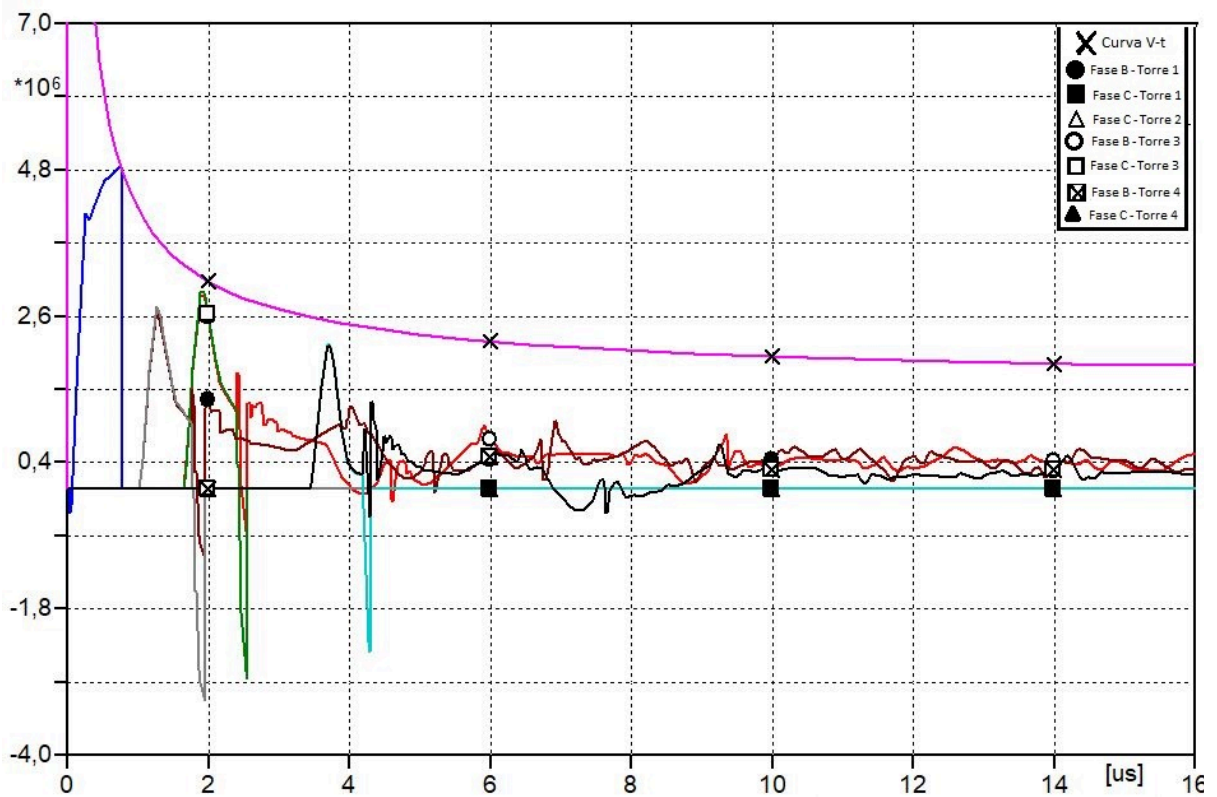
Neste segundo estudo de caso, a resistência de aterramento da torre 2 foi alterada para 60 Ω , e as demais foram mantidas com valor de 30 Ω . Portanto, avalia-se a influência da elevação da resistência de aterramento da torre 2, atingida pela descarga nas amplitudes das sobretensões atmosféricas que pode causar o *backflashover*, em comparação aos resultados do caso anterior

4.2.1 – Caso 2.1: torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t

Aplicando a mesma corrente crítica do caso 1.1, cujo valor foi de 175,245 kA, temos que a sobretensão nas cadeias de isoladores de todas as torres atingiu a suportabilidade dielétrica definida pela curva V-t, causando disrupção nas fases A e C de todas as 4 torres, conforme pode ser observado na Figura 30.

Devido ao limite de 8 curvas, foram plotadas as formas de onda de tensão para as fases B e C das torres 1, 2 e 3 e a fase C da torre 4, além da curva V-t.

Figura 30 – Sobretensões nas torres quando a torre da descarga tem sua resistência de pé elevada a 60Ω com a corrente crítica de 175,245 kA.



Fonte: Elaborada pelo autor

Na torre 2 atingida pela descarga, a disrupção ocorreu em tempo inferior a $1 \mu\text{s}$ quando a sobretensão atingiu a amplitude de 4,8516 MV na cadeia da fase C. Já nas demais torres, as sobretensões disruptivas apresentaram polaridades negativas, no intervalo de tempo entre $1,95 \mu\text{s}$ e $4,29 \mu\text{s}$, com amplitudes entre 3,1807 MV e 2,449 MV, respectivamente. Os valores detalhados encontram-se na tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de desempenho elétrico do caso 2.1 com corrente de 175,245 kA.

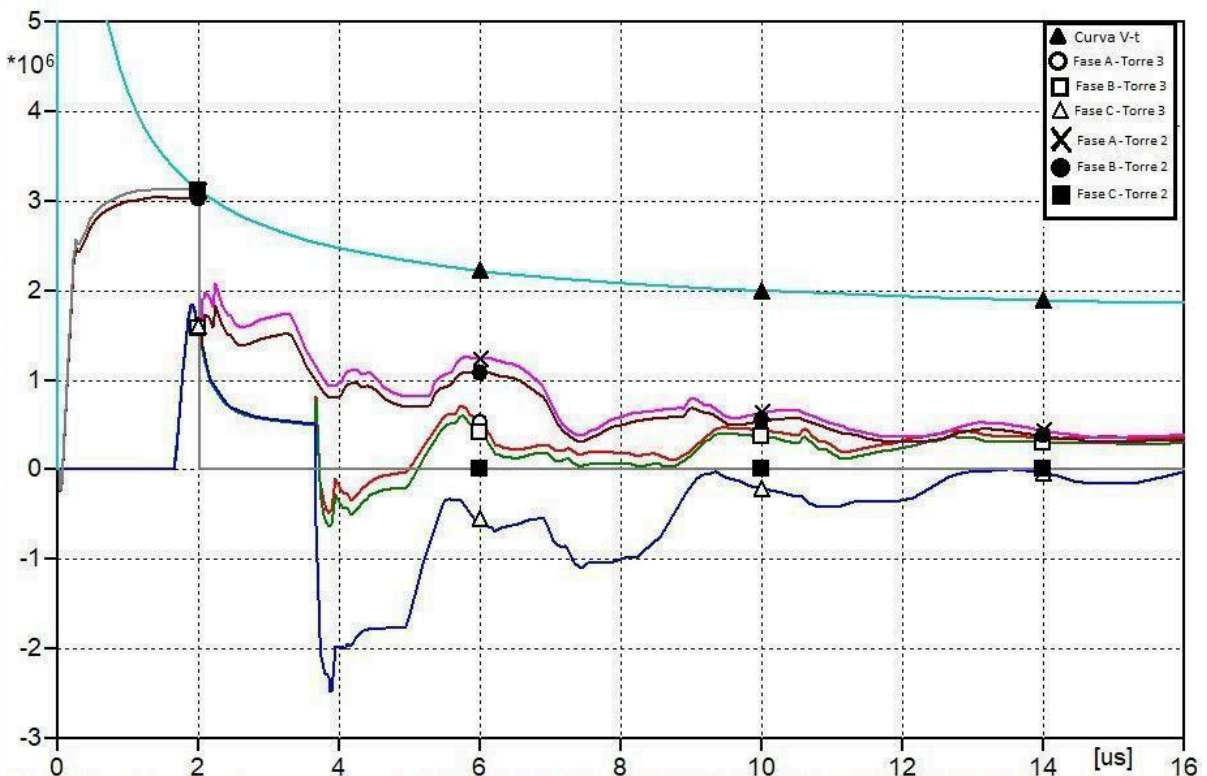
Torre	Instante de tempo [μs]	Sobretensão Fase A [MV]	Sobretensão Fase C [MV]
1	1,95	-3,1802	-3,1807
2	0,76	4,8508	4,8516
3	2,55	-2,8563	2,8568
4	4,29	-2,4485	-2,449

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para este caso, a corrente crítica de descarga foi reduzida para 108,972 kA quando a cadeia de isoladores da fase C da torre 2 é submetida a uma sobretensão de 3,1176 MV no instante de tempo 2,00 μ s, conforme mostrado na Figura 31. Nesta figura estão também plotadas as formas de onda das sobretensões nas fases A, B e C das torres 2 e 3.

Pode-se afirmar que, com a elevação da resistência de aterramento da torre atingida pela descarga de 30 Ω para 60 Ω , os valores de corrente crítica de descarga admitidos são consideravelmente menores, uma vez que, no Caso 1.1 (em que o sistema de aterramento está com valores apropriados de resistência elétrica), a corrente crítica foi de 175,206 kA, uma diferença superior a 66 kA em relação aos 108,972 kA do Caso 2.1.

Figura 31 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 108,972 kA - Caso 2.1: torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t.



Fonte: Elaborada pelo autor

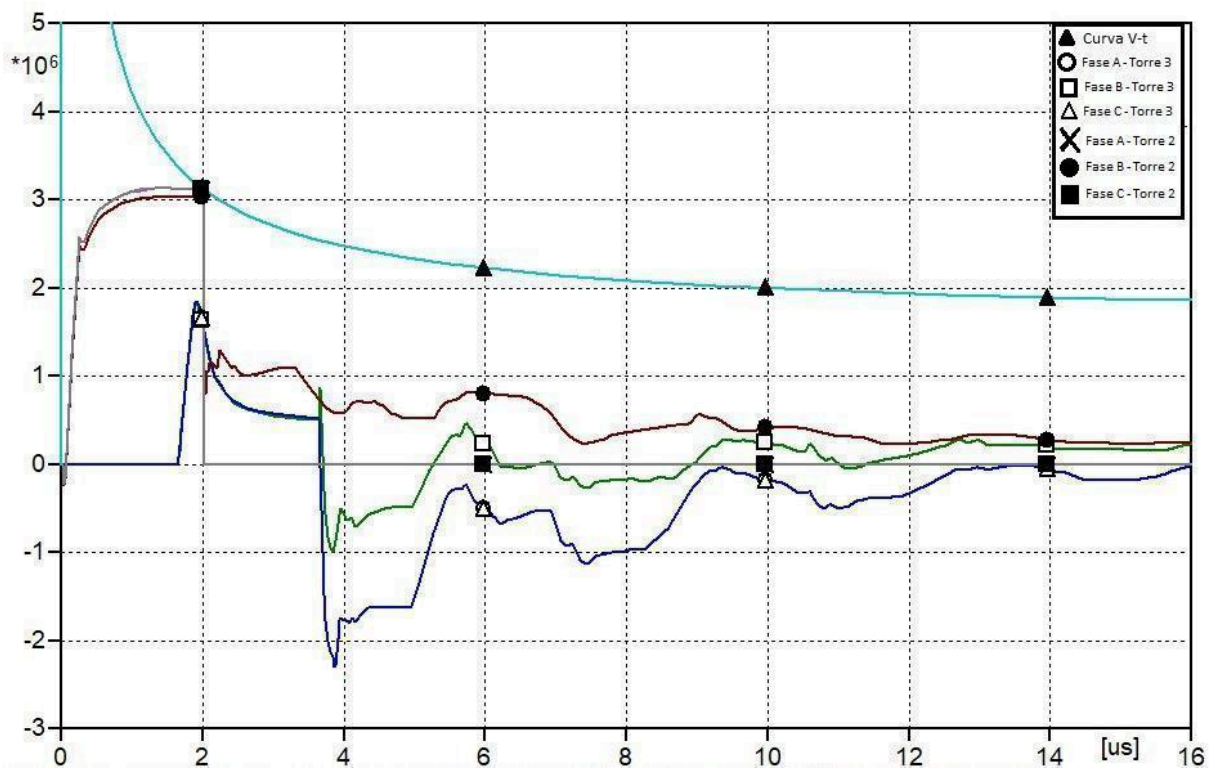
Um aumento de apenas 16 [A] na amplitude da corrente crítica, alcançando 108,988 kA promove a disrupção também na fase A como pode ser observado na Figura 32 abaixo, onde estão plotadas todas as fases das torres 2 e 3. Na tabela 7 estão expostos os valores de disrupção referentes a essa configuração.

Tabela 7 - Parâmetros de desempenho elétrico do caso 2.1 para disrupção nas fases A e C da Torre 2.

Corrente crítica [kA]	Instante de tempo [μ s]	Sobretensão Fase A [MV]	Sobretensão Fase C [MV]
108,988	2,01	3,1171	3,1175

Fonte: Elaborada pelo autor.

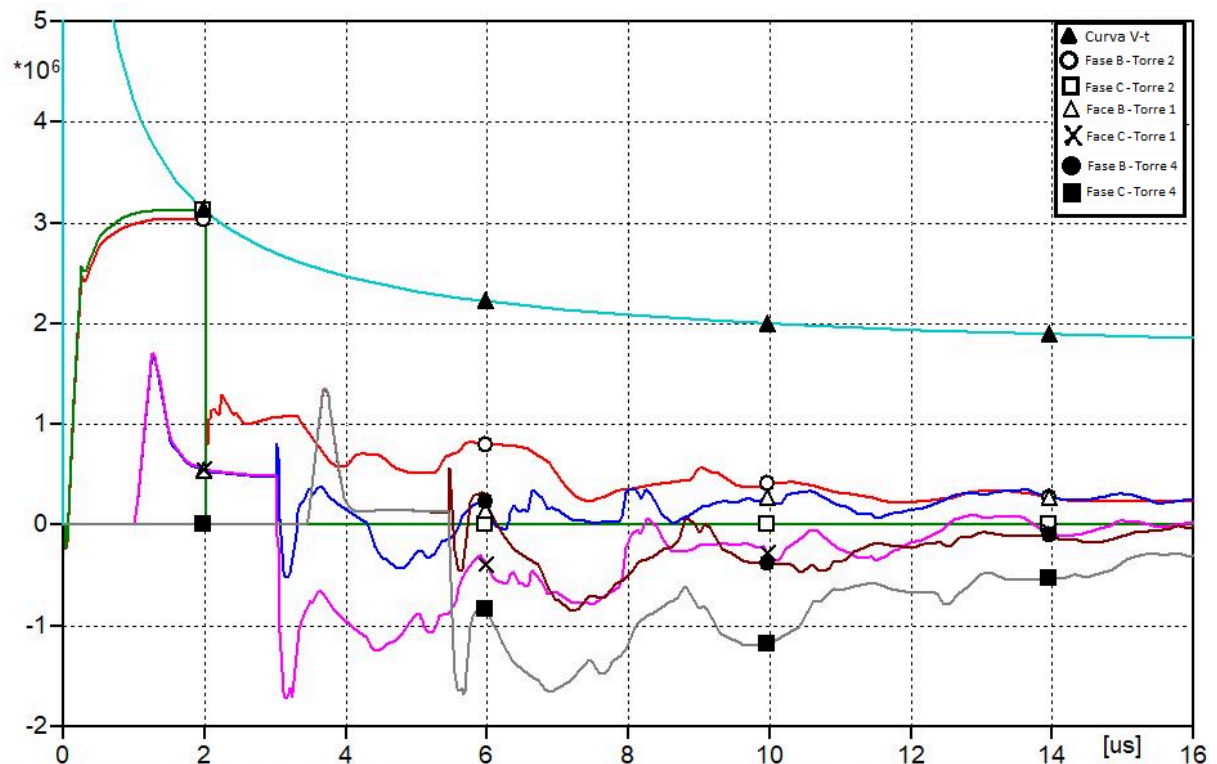
Figura 32 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção das cadeias das fase A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 108,998 k.- Caso 2.1: torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t.



Fonte: Elaborada pelo autor

Na Figura 33, onde estão plotadas as curvas de sobretensão das torres 1, 2 e 4, nota-se que as amplitudes de sobretensão não chegaram próximas aos limites de suportabilidade estabelecidos pela curva V-t.

Figura 33 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 - *Caso 2.1*: torre de descarga com resistência de 60Ω e curva V-t.



Fonte: Elaborada pelo autor

Apesar de não ocorrer disrupção nas torres 1 e 4, as oscilações que ocorreram no Caso 1.1, também ocorreram aqui, porém com amplitudes inferiores visto que as amplitudes das correntes de descarga reduziram muito. As oscilações citadas anteriormente ocorreram nos instantes de $3,16 \mu\text{s}$ e $5,67 \mu\text{s}$, respectivamente. O alto valor de resistência de aterramento na torre da descarga em relação às torres adjacentes provocou, além da elevação das sobretensões atmosféricas, a alteração na amplitude das referidas oscilações de tensão nestes instantes de tempo nas torres à esquerda. Fato é que não houve mudança nos tempos de ocorrência destas oscilações, uma vez que estão determinados pelas ondas viajantes no sistema de transmissão. Mas as amplitudes das sobretensões refletidas e transferidas sofreram elevações nos tempos registrados para este caso devido ao aumento da resistência de pé da torre 2.

4.2.2 - *Caso 2.2: torre de descarga com resistência de 60Ω e curva V-t sincronizada:*

Neste caso a curva V-t foi substituída pela curva V-t sincronizada gerada pelo *model* implementado. Realizando o mesmo passo feito anteriormente, no Caso 2.1, ao

aplicarmos uma corrente crítica de descarga com amplitude de 175,245 kA identificada no Caso 1.1, porém agora com a configuração do Caso 2.1, houve disrupção nas cadeias das fases A e C de todas as torres, porém agora, com amplitudes bem maiores que anteriormente, como pode ser visto comparando as Tabelas 6 e 8. Na Tabela 8 mostra os valores de disrupção no caso apresentado referentes à curva V-t sincronizada.

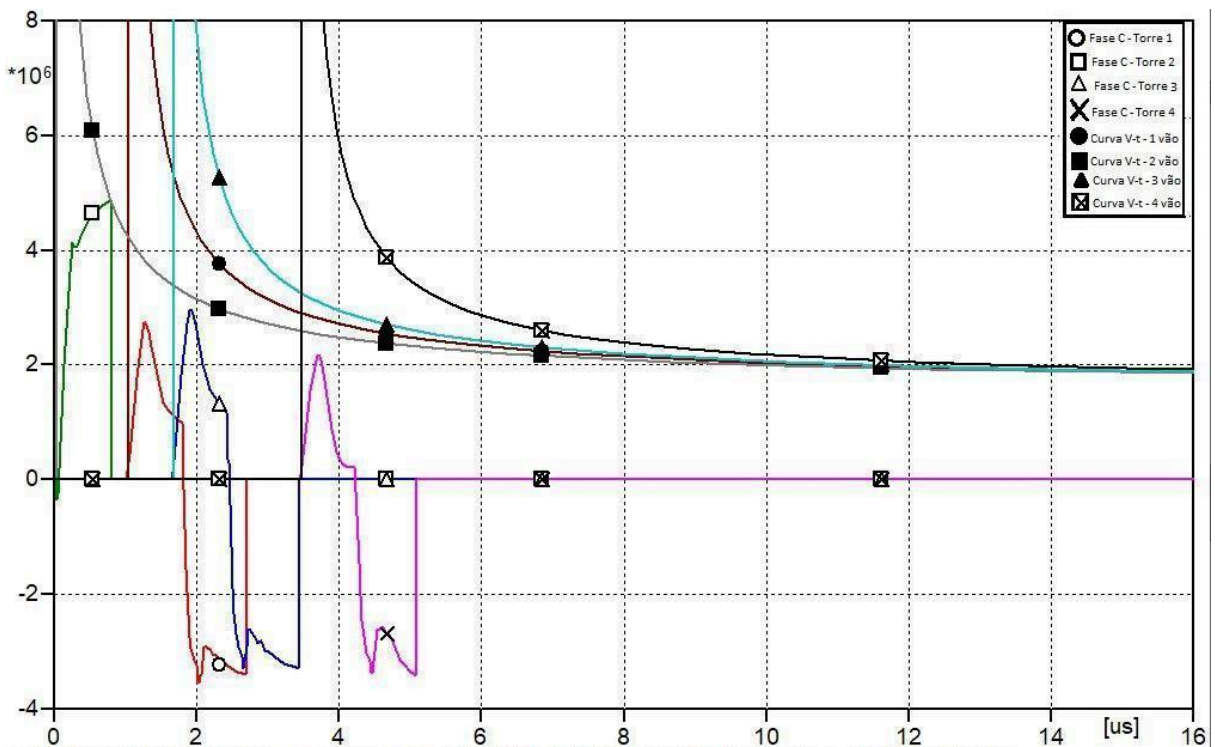
Tabela 8 - Parâmetros de desempenho elétrico do caso 2.2 com a curva sincronizada com corrente de 175,245 kA.

Torre	Instante de tempo [μs]	Sobretensão Fase A [MV]	Sobretensão Fase C [MV]
1	2,69	-3,3857	-3,3863
2	0,79	4,8715	4,8722
3	3,43	-3,2888	-3,2949
4	5,07	-3,4237	-3,4242

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como já é evidenciado que as fases A e C têm valores de amplitude muito próximos, o gráfico da Figura 34 mostra apenas as sobretensões nas fases C das torres.

Figura 34 - Sobretensões nas fases C das torres com a corrente crítica de 175,245 kA – Caso 2.2 - torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um ponto a se destacar na Figura 34, é que a disrupção na torre 1 ocorre em 2,69 μ s quando a sobretensão na cadeia da fase C atinge o valor de 3,3863 MV. Porém, no instante de tempo de 2,03 μ s, a sobretensão da torre 1 atinge um valor de 3,5313 MV com polaridade negativa. Ou seja, como já evidenciado no Capítulo 2, em tempos menores de estresse devido a sobretensão, valores maiores são admitidos pelas cadeias de isoladores.

Outro ponto importante, é que nesse mesmo instante (2,03 μ s), a amplitude da sobretensão da torre 1 ultrapassa a da torre 2, podendo levar o leitor mais desatento a concluir que deveria ter ocorrido a disrupção, ao comparar com a curva V-t (representada pela cor cinza na Figura 34) mais próxima deste pico de sobretensão. Entretanto esta curva V-t refere-se a suportabilidade elétrica das cadeias de isoladores da torre 2 e não para a torre 1. Portanto, com o uso do *model*, as sobretensões em cada torre são comparadas com a curva V-t para os arranjos isolantes da respectiva torre.

A disrupção na fase C da torre 2 ocorre no instante de 0,78 μ s com sobretensão de 4,8722 MV, valor superior em 20,6 kV aos 4,8516 MV registrados para o caso onde foi utilizada a curva V-t não sincronizada (Tabela 6).

Nas demais torres, além da amplitude de sobretensão atingir valores maiores que no Caso 2.1, o tempo para que ocorresse a disrupção foi maior.

Na torre 1, por exemplo, a sobretensão atingiu um valor de 3,3863 MV no instante de 2,69 μ s. No mesmo caso, com a curva V-t simples, a sobretensão no momento da disrupção foi de 3,1807 MV no instante de 1,95 μ s. Ou seja, a cadeia de isoladores suportou uma sobretensão 206,6 kV maior por 0,73 μ s. Este valor de diferença de 206,6 kV é muito relevante, uma vez que cada isolador suportou em média, 130,28 kV. Ou seja, uma diferença de 2 isoladores por cadeia, representando um custo significativo no preço do sistema de isolamento da LT.

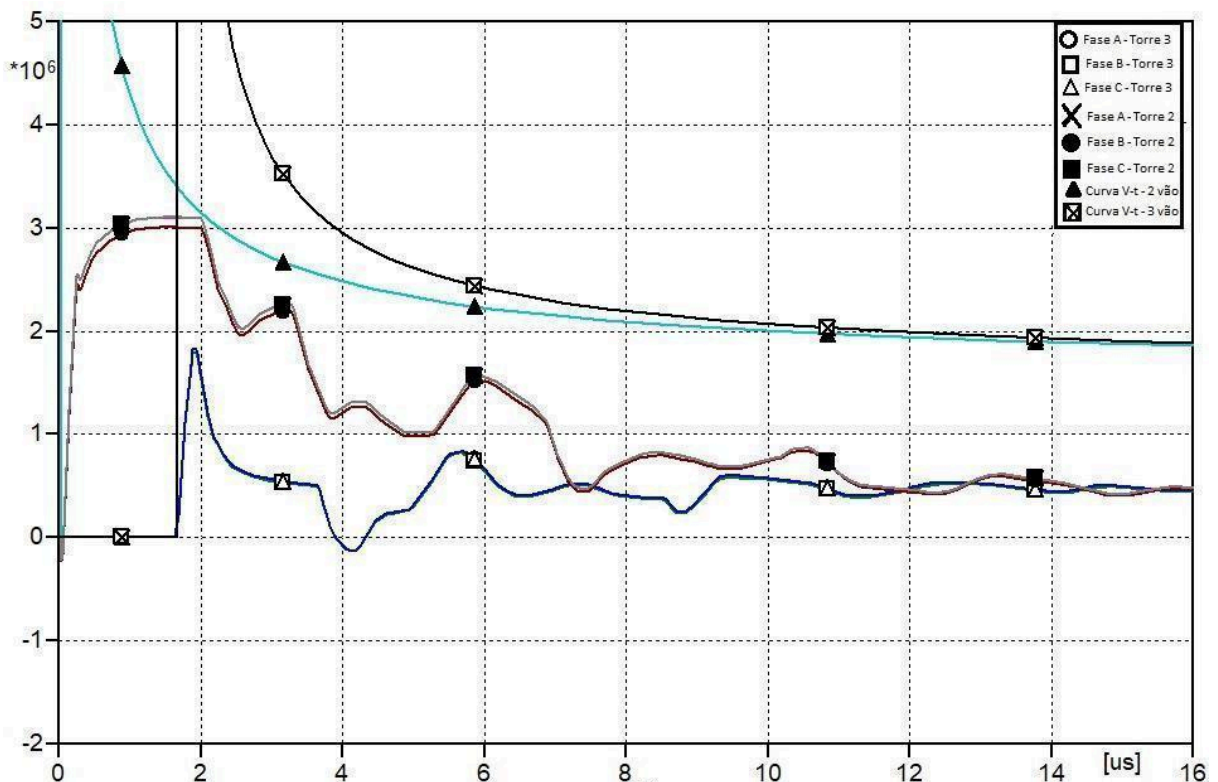
Observando o efeito na torre 3, essa diferença também se torna bem relevante. Na curva V-t simples, o rompimento na fase C acontece com uma sobretensão de 2,8568 MV no instante de 2,55 μ s. Com o uso do *model* com a curva V-t sincronizada com as ondas viajantes, esse valor chegou a 3,2949 MV no instante de 3,43 μ s. Em outras palavras, uma diferença de 438,1 kV e uma diferença temporal de 0,88 μ s.

Para a torre 4, a diferença é maior ainda. Onde com uso do sistema TACS que gera a curva V-t, a sobretensão atingiu uma amplitude com polaridade negativa na disrupção de 2,449 MV em 4,29 μ s. No sistema com uso da Curva V-t sincronizada a sobretensão atingiu a magnitude de 3,4242 MV em 5,07 μ s. Uma discrepância de 975,2 kV em 0,78 μ s.

Portanto, analisando as sobretensões nas fases C das torres no sistema com a curva V-t sincronizada, pode-se comprovar que o uso da curva V-t simples tende a sobredimensionar os arranjos isolantes da linha de transmissão, principalmente quando se trata de sistemas de aterramento com valores elevados de resistência e a torre é submetida a sobretensão de grandes amplitudes.

Em seguida, aplicando a corrente crítica na qual foi submetida a torre 2 no caso 4.2.1 com a curva V-t não sincronizada, cujo valor é de 108,988 kA, observa-se que, diferente da primeira análise, não há disrupção. Na Figura 35 pode-se ver que as fases A e C atingiram o limiar de suportabilidade no instante de 2,00 μ s. Neste gráfico encontram-se as 3 fases das torres 2 e 3, além das curvas sincronizadas de ambas.

Figura 35 - Sobretensões nas fases A, B e C das torres 2 e 3 quando a torre da descarga tem sua resistência de pé elevada a 60 Ω e não há disrupção. Utilizando o *model* com a curva sincronizada.



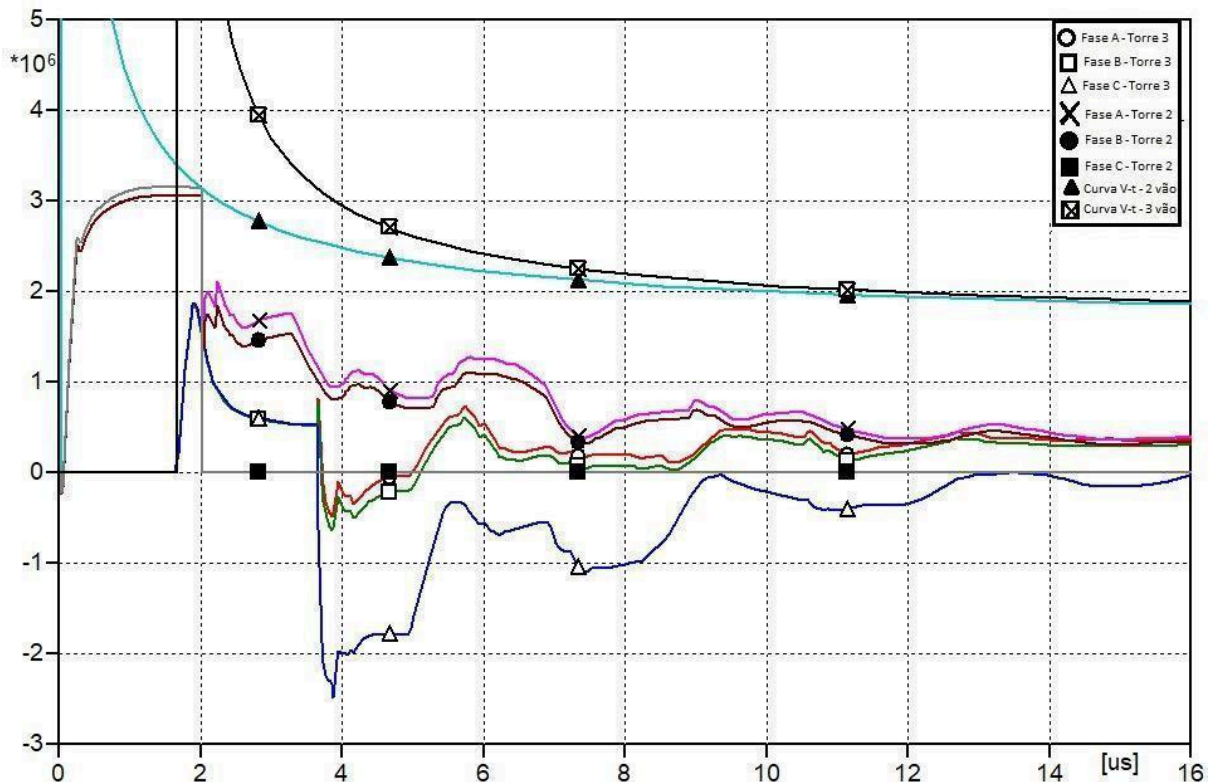
Fonte: Elaborada pelo autor.

Como não há disrupção e oscilações nas tensões da LT, as fases A e C mantêm seus valores iguais e ligeiramente maiores que a fase B.

Em seguida, quando ajusta-se a corrente para que ocorra a primeira disrupção, encontra-se o valor de 109,862 kA. Essa amplitude de corrente rompe a fase C da torre 2 em

2,01 μ s com valor de 3,1425 MV. O gráfico da Figura 36 expõe o momento da disrupção, onde estão plotados as 3 fases das torres 2 e 3, bem como as curvas de sobretensão sincronizadas.

Figura 36 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 109,862 kA – Caso 2.2 - torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.

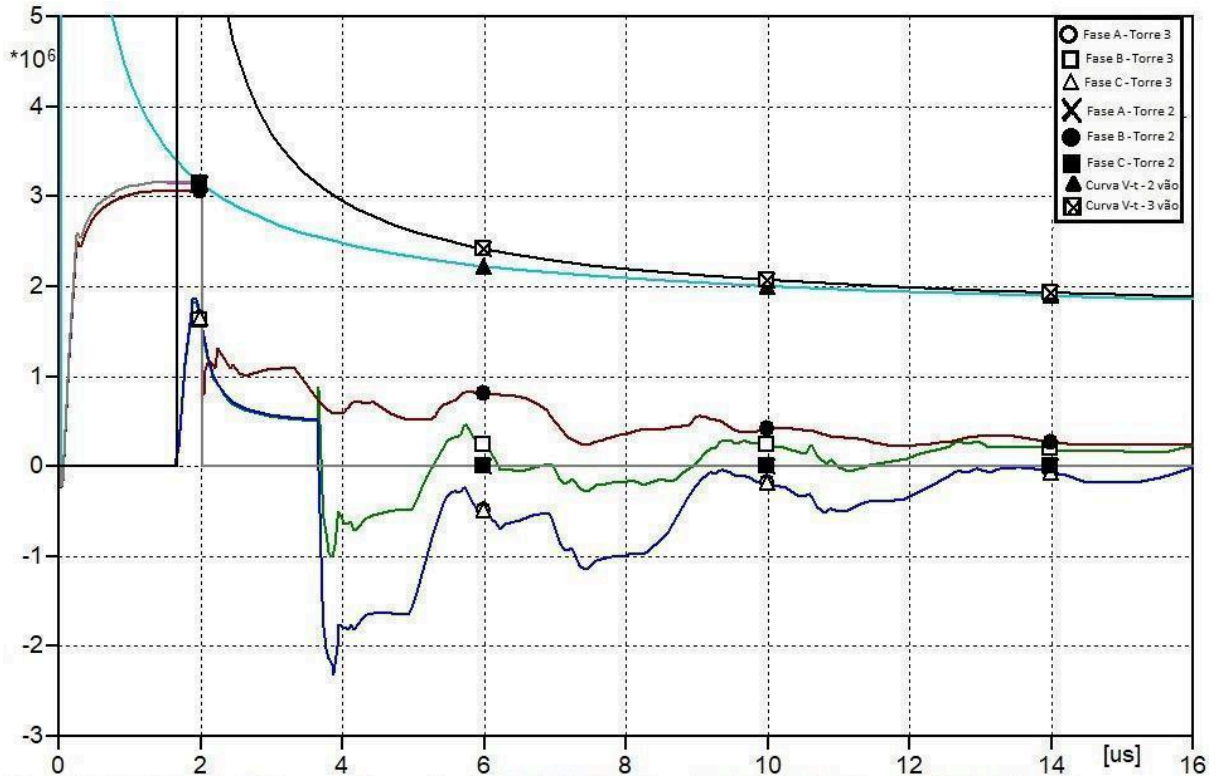


Fonte: Elaborada pelo autor

A diferença de amplitude na corrente de surto é de 890 A em relação a curva não sincronizada. Embora a disrupção tenha ocorrido no mesmo instante, na curva V-t a sobretensão foi de 3,1176 MV. Já na curva sincronizada, foi de 3,1425 MV, uma diferença de 24,9 kV.

Para que ocorra a disrupção tanto na fase A quanto na fase C, a corrente é aumentada para 109,879 kA. Na Figura 37, onde estão plotadas as curvas de sobretensão das 3 fases das torres 2 e 3, é representado o comportamento dessas sobretensões com o impacto atmosférico e a geração da curva sincronizada com as ondas viajantes.

Figura 37 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 109,879 kA – Caso 2.2 - torre de descarga com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.



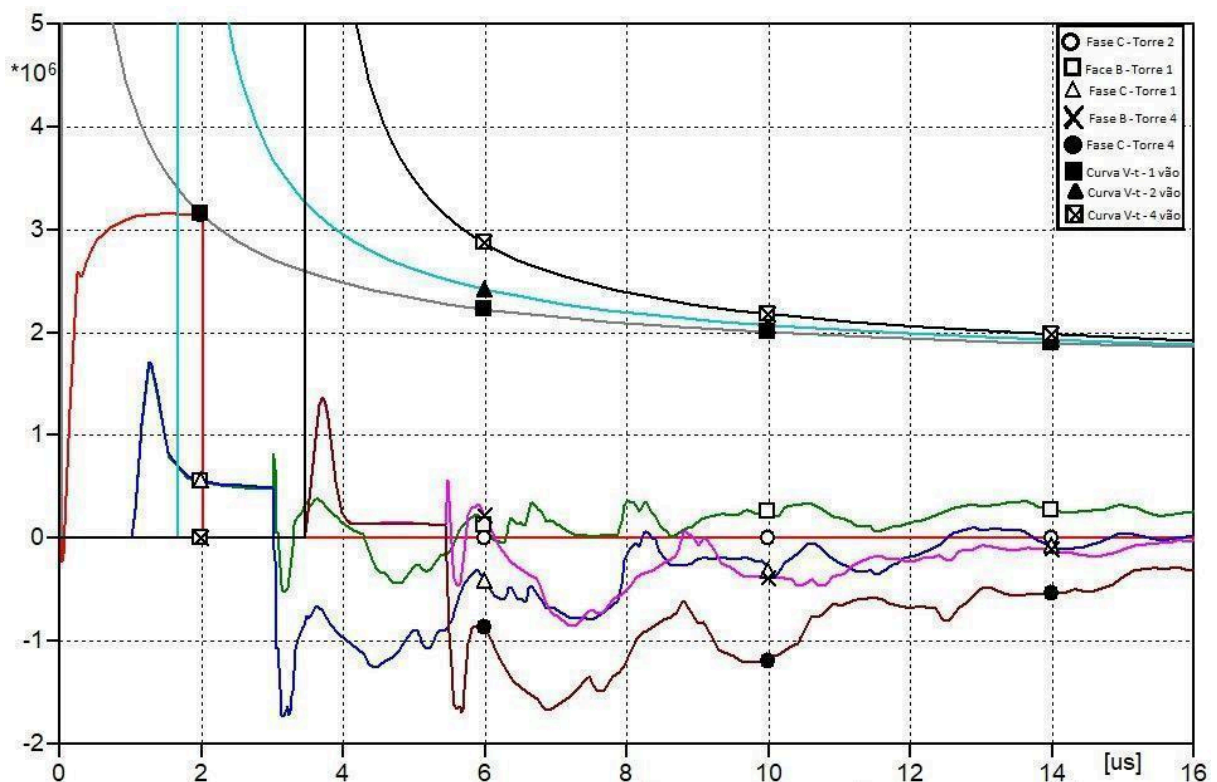
Fonte: Elaborada pelo autor

O pico com polaridade negativa na sobretensão da fase C da torre 3, que outrora com a curva V-t simples havia atingido um valor próximo ao da suportabilidade dielétrica da cadeia de isoladores, agora com a curva V-t sincronizada, ficou relativamente distante. No instante de tempo 3,87 μs , a sobretensão, representada pela cor azul no gráfico da Figura 37, atingiu um valor de -2,3146 MV, enquanto no mesmo momento, a suportabilidade, curva na cor preta no gráfico, tinha amplitude de 3,0891 MV. Na curva não sincronizada, na Figura 32, esses valores de sobretensão e suportabilidade foram respectivamente 2,2935 MV e 2,4971 MV no instante de 3,64 μs . Ou seja, com a curva V-t simples, a sobretensão ficou a aproximadamente 200 kV da suportabilidade, já com a curva V-t sincronizada, esse *gap* foi de 774,5 kV.

Analisando as torres 1 e 4, percebe-se que os resultados obtidos aplicando a corrente de 109,879 kA foram próximos ao do caso 1, onde as amplitudes de sobretensão não chegaram perto dos valores limiares de suportabilidade. Uma vez que as resistências de aterramento de ambas estão bem dimensionadas em relação a torre da descarga, e que, a curva V-t de ambas as torres, sendo gerada em sincronia com o momento em que a sobretensão

atmosférica atinge em suas cadeias de isoladores, faz com que a suportabilidade elétrica seja maior, como explicado anteriormente. Na Figura 38, pode-se ver as sobretensões das fases B e C das torres 1, 2 e 4. Além disso, também foram plotadas, como dito anteriormente, as curvas geradas de forma síncrona com a chegada da onda viajante nas torres 1, 2 e 4.

Figura 38 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 109,879 kA – Caso 2.2 - torre de descarga com resistência de 60Ω e curva V-t sincronizada.



Fonte: Elaborada pelo autor

4.3. Caso 3 - Torre à direita da torre de incidência da descarga com resistência de aterramento igual a 60Ω

Neste caso, a resistência de aterramento da torre 3 foi alterada para 60Ω . Tanto a resistência de pé de torre da torre 2 quanto das demais foram mantidas com o valor de 30Ω .

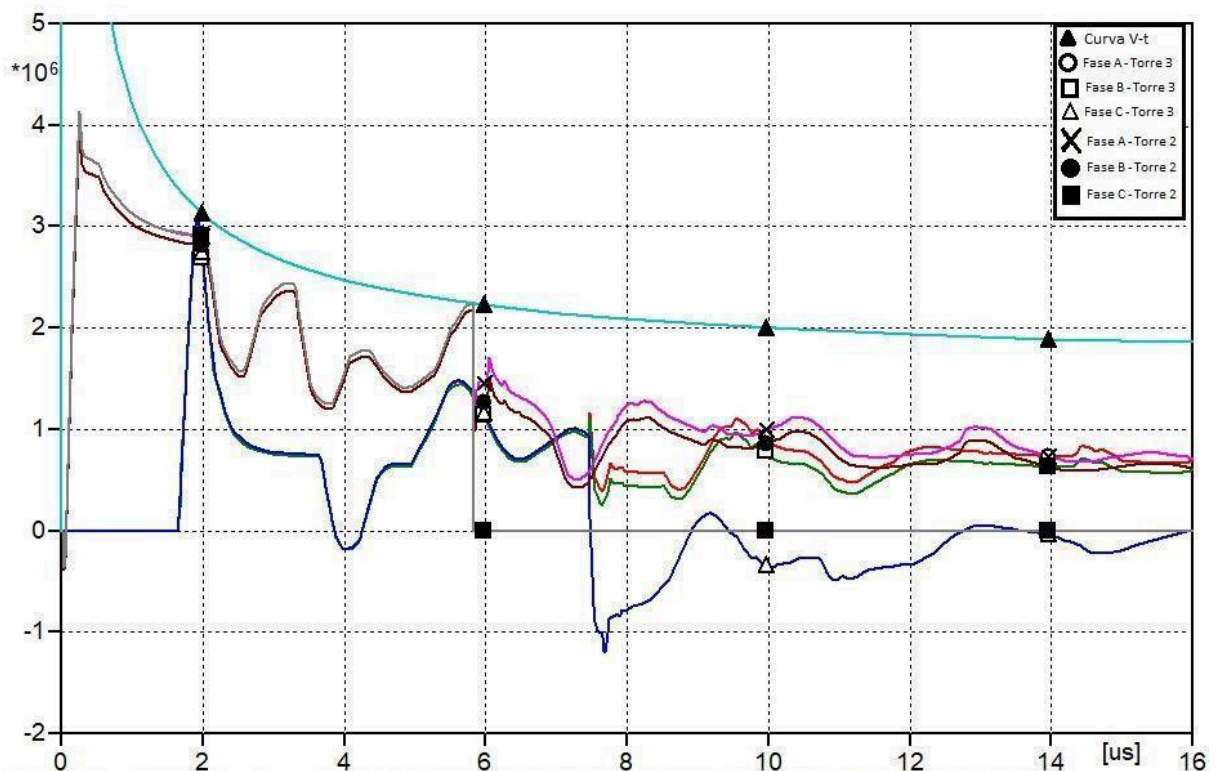
4.3.1 - Caso 3.1: torre 3 à direita com resistência de 60Ω e curva V-t.

Neste caso a disrupção foi representada pela curva V-t produzida pelo sistema de controle com dispositivos da TACS controlando a chave que representa a disrupção. Quando aplicada a corrente de descarga de retorno com amplitude de 175,245 kA obtida no Caso 1.1,

não houve disrupção. Para que a mesma ocorra, a amplitude da corrente crítica teve que ser aumentada para de 177,452 kA, uma diferença de aproximadamente 2000 A.

A disrupção ocorreu em 5,82 μ s na cadeia da fase C da torre 2 para tensão disruptiva com amplitude de 2,2386 MV. Na Figura 39, onde estão as curvas de sobretensão por tempo referentes às três fases das torres 2 e 3, e a curva V-t gerada.

Figura 39 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,452 kA – Caso 3.1 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t.

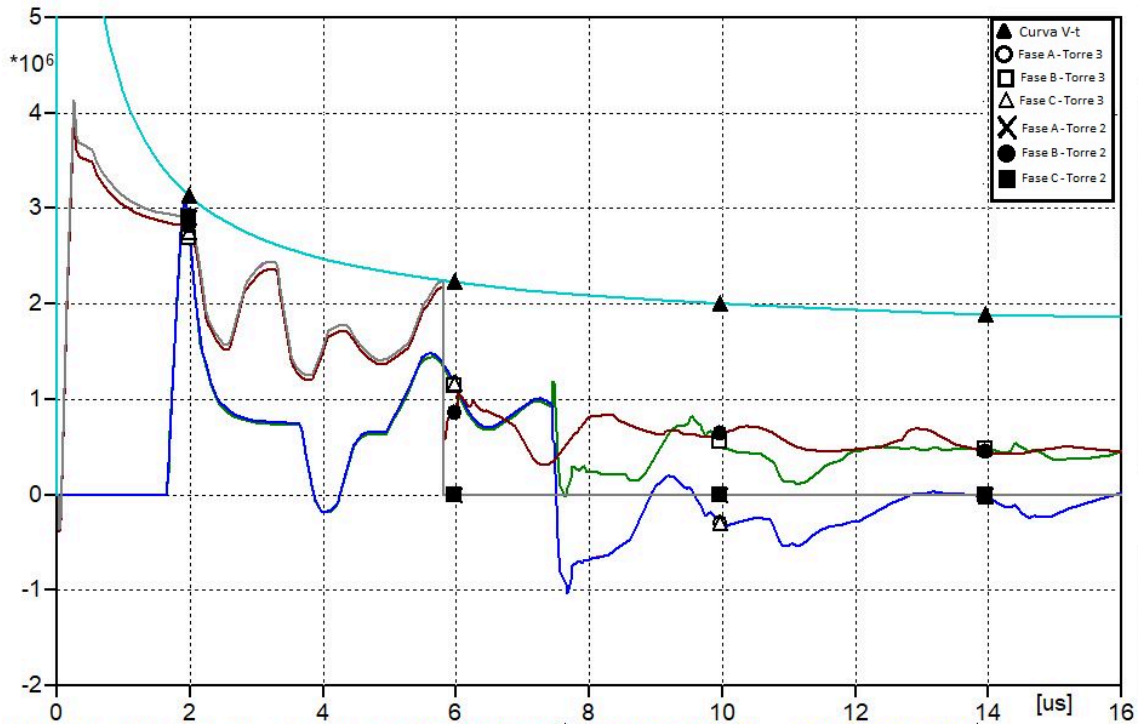


Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando a corrente de descarga é aumentada para 177,489 kA, há disrupção tanto na fase A quanto na fase C da torre 2, como é visto na Figura 40. Uma diferença de 244 A em relação a Figura 39.

Observando a figura anterior, nota-se que as sobretensões da torre 3 chegaram próximas aos limites de suportabilidade da curva V-t. O pico da fase C chegou a um módulo de 3,082 MV no instante de tempo igual a 1,92 μ s. No mesmo instante de tempo, a suportabilidade da curva era de 3,1729 MV.

Figura 40 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 3 para disrupções das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,489 kA – Caso 3.1 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t.

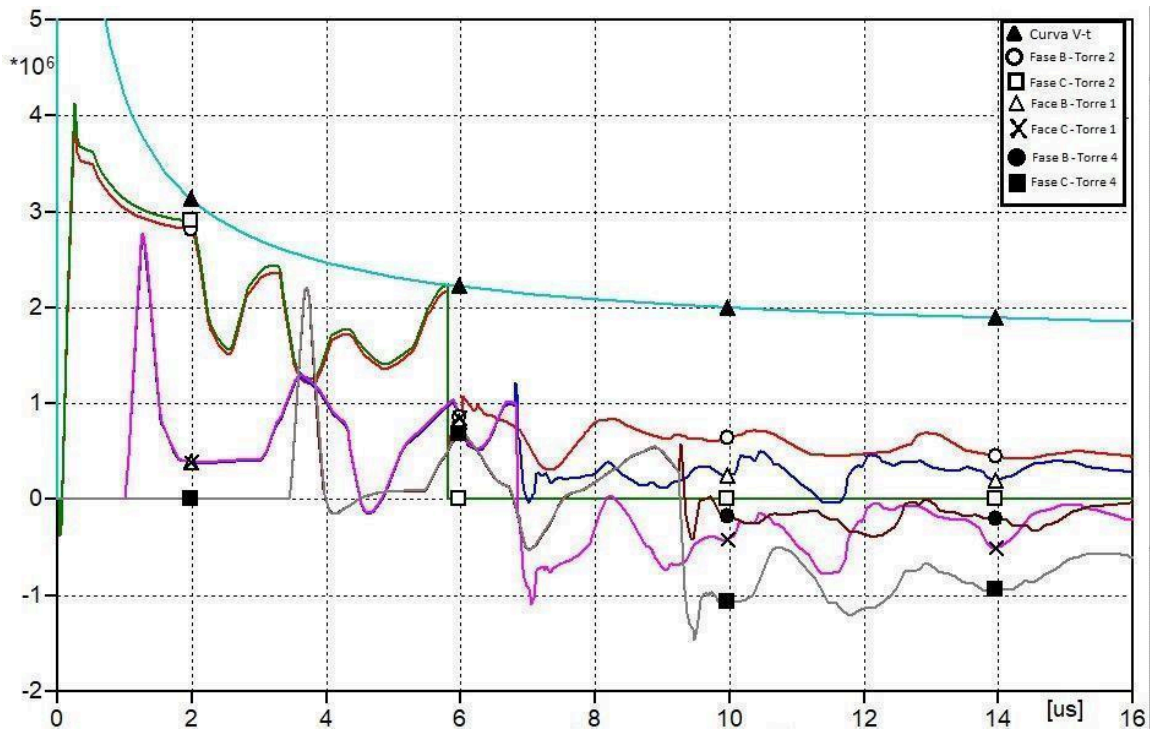


Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez que a curva V-t não é gerada em sincronia com o instante de tempo no qual a sobretensão atinge a cadeia de isoladores da Fase C, no caso 3 a curva V-t limita a sobretensão na Fase C ao mesmo valor da torre 2. Com o uso da curva V-t sincronizada, a suportabilidade nesse instante será consideravelmente maior como é mostrada no Caso 3.2.

Fazendo a análise das sobretensões nas Torres 1 e 4, para o mesmo valor de corrente de descarga, observa-se que o comportamento das curvas foi muito próximo do caso 1.1. Na Figura 41, estão as curvas das fases B e C das torres 1, 2 e 4, além da curva V-t.

Figura 41 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 4 para disrupções nas cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,489 kA – Caso 3.1 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t.



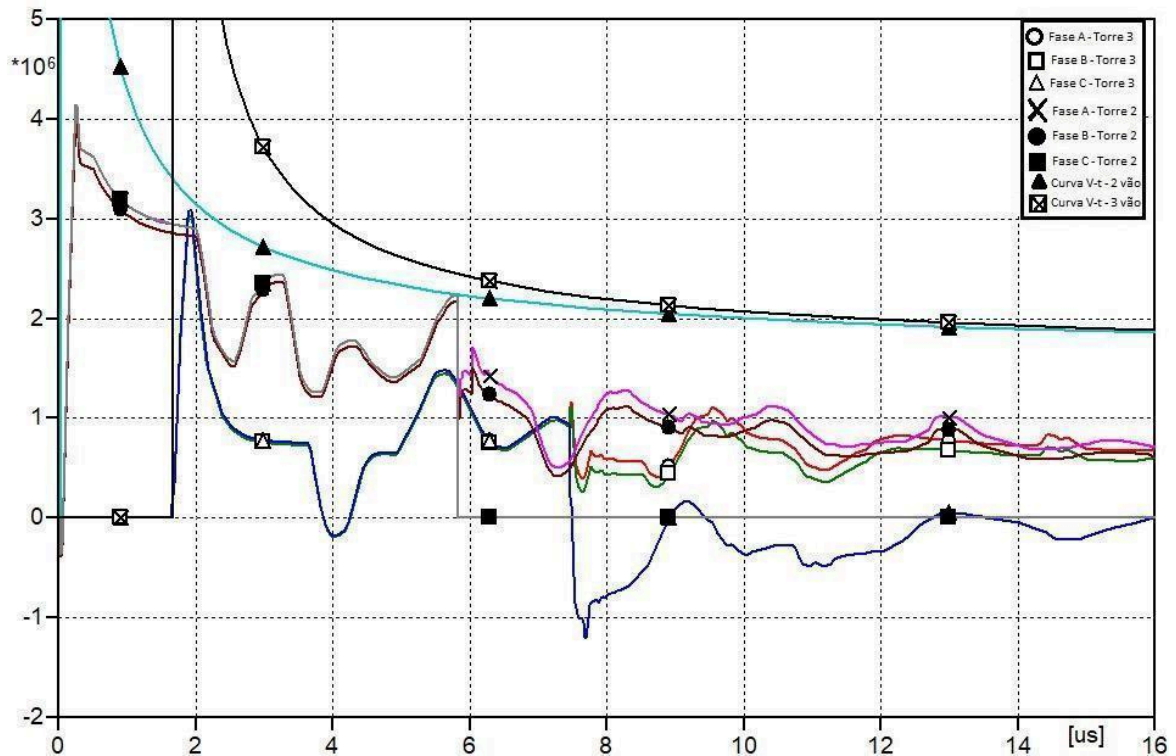
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3.2 - Caso 3.2: torre à direita com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.

Utilizando o *model* para gerar a curva V-t sincronizada e aplicando a mesma amplitude de corrente crítica de descarga do Caso 3.1 anterior (177,489 kA) temos que não houve nenhuma disrupção. É necessário aumentar a mesma para 177,790 kA, ou seja, uma acréscimo de 338 A.

As formas de onda das sobretensões nas fases A, B e C das torres 2 e 3 e as suas respectivas curvas V-t sincronizadas estão plotadas na Figura 42, onde observa-se que a disrupção novamente ocorre na fase C da torre 2 em 5,82 μ s para sobretensão de 2,2438 MV, o que representa uma elevação de 5,2 kV em relação a curva que não é gerada em sincronia para o mesmo caso..

Figura 42 - Sobretensões atmosféricas nas torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,790 kA – Caso 3.2 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.

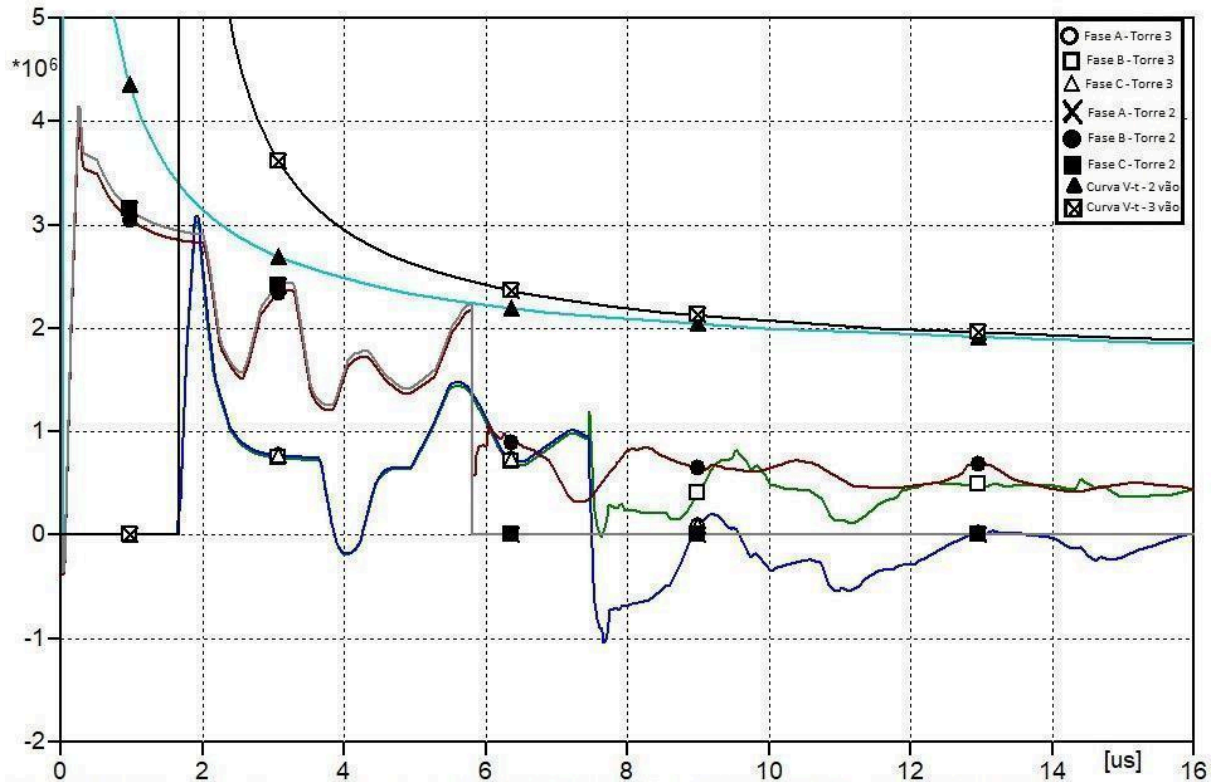


Fonte: Elaborada pelo autor.

Como dito no caso 3.1, com a curva de suportabilidade simples, as fases A e C da torre 3 atingiram o limiar de suportabilidade devido a curva ser gerada de forma não sincronizada com a onda que atinge as cadeias de isoladores. Porém, neste caso utilizando a curva V-t sincronizada, tal fato não ocorreu. O pico máximo de sobretensão nessa torre foi de 3,0864 MV no tempo de 1,92 μ s, e a suportabilidade nesse instante era de 9,1511 MV, quase 3 vezes maior. Ou seja, a suportabilidade que outrora estava no limiar de disrupção com a curva V-t simples, agora, de forma sincronizada, está distante do valor máximo de tensão com essas configurações.

Com um pequeno aumento de 28 A na corrente de descarga, ocorre-se a disrupção tanto da fase A quanto da C, obtendo o valor de corrente crítica de 177,828 kA. O gráfico da Figura 43 conta com as sobretensões nas cadeias das fases das torres 2 e 3 e suas respectivas curvas V-t sincronizadas.

Figura 43 - Sobretensões atmosféricas nas torres 2 e 3 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,828 kA – Caso 3.2 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.

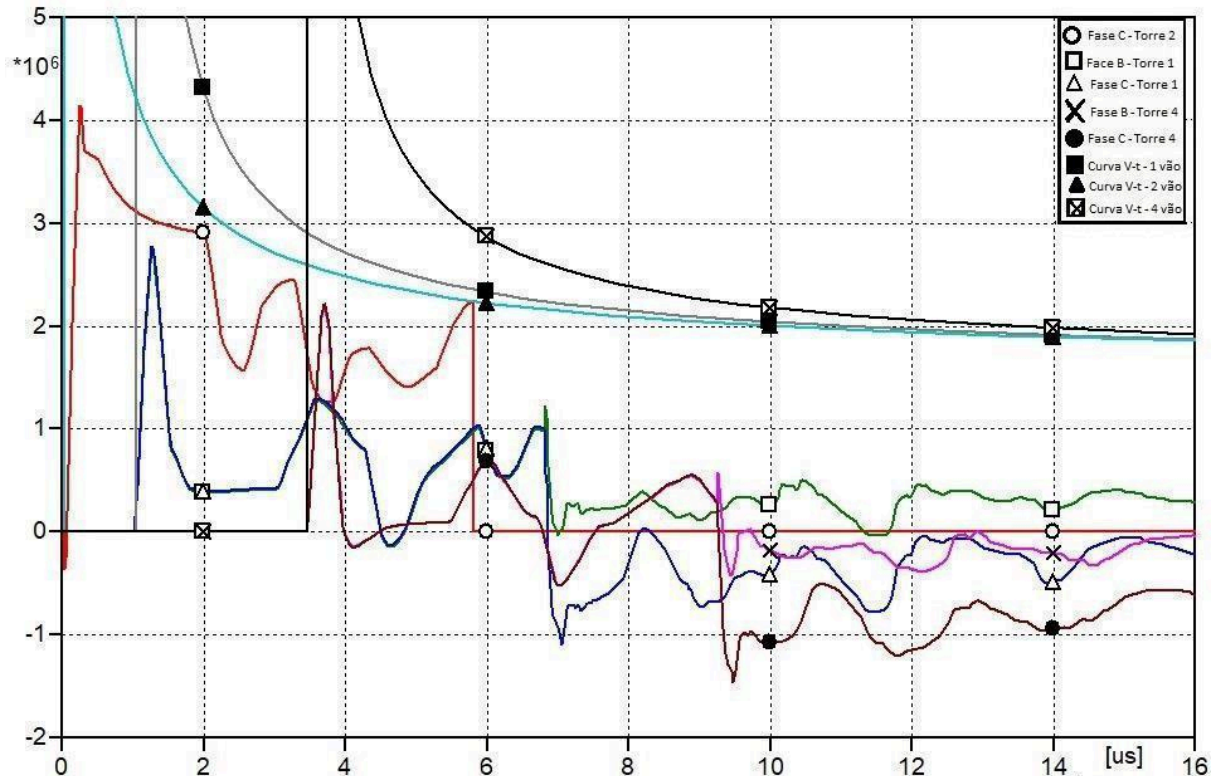


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para finalizar o caso 3, analisando as torres 1 e 4, percebe-se que o impacto foi baixo, assim como nos casos 1.2 e 2.2. Na Figura 44, estão inseridas as curvas de sobretensão das fases B e C das torres 1, 2 e 4, além das curvas V-t geradas de forma síncrona com a onda viajante que atinge nas cadeias de isoladores.

Observa-se que não ocorreram disrupções nas torres adjacentes a descarga, uma vez que a torre onde foi incidida o surto atmosférico está com sua resistência de pé de torre com valor adequado.

Figura 44 - Sobretensões atmosféricas nas torres 1, 2 e 4 para disrupção nas cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 177,828 kA – Caso 3.2 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4. Caso 4 - Torre 4 distante dois vãos à esquerda com resistência de 60 Ω

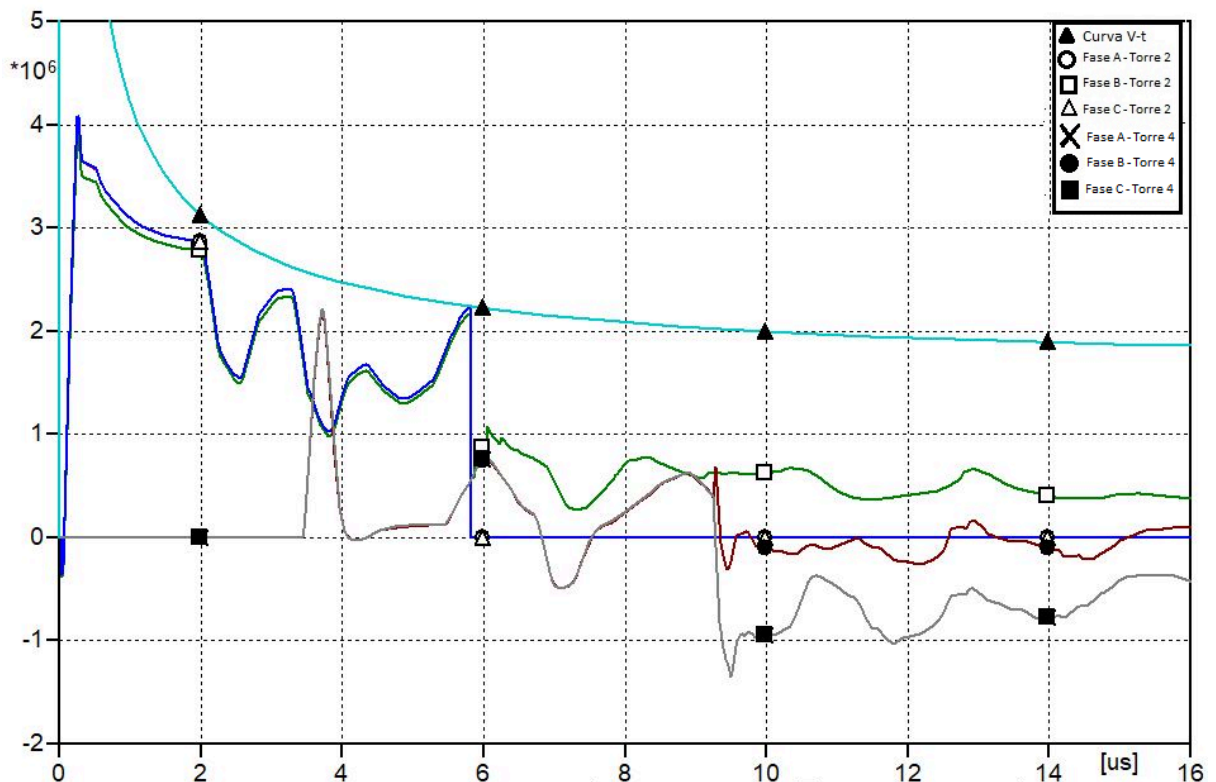
Neste caso, a resistência de aterramento da torre 4 foi alterada para 60 Ω . A torre 3 retornou para o valor de 30 Ω , e as demais torres mantiveram sua resistência de aterramento em 30 Ω . Este estudo investiga a influência da elevação da resistência de aterramento de uma torre distante dois vãos (sendo um vão com 300 m e outro com 730 m) em relação à torre da descarga.

4.4.1 - Caso 4.1: torre 4 à esquerda com resistência de 60 Ω e curva V-t.

Os valores de corrente crítica e tensão de disrupção são os mesmos do caso 1.1, ou seja, quando o surto atinge 175,206 kA, há um rompimento na cadeia isolante da fase C da torre 2, com amplitude de sobretensão igual a 2,2388 MV no instante de tempo 5,82 μ s. Aumentando a corrente de descarga para 175,245 kA, a disrupção acontece tanto na cadeia da fase A quanto em na fase C. Na Figura 45, onde estão mostradas as tensões nas três fases das

torres 2 e 4, juntamente com a curva V-t, sendo ainda possível identificar o momento em que ocorre a disrupção nas cadeias de isoladores das 2 fases referidas.

Figura 45 - Sobretensões atmosféricas nas torres 2 e 4 para disrupção nas cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 175,245 kA – Caso 4.1 - torre 4 com resistência de 60 Ω e curva V-t.

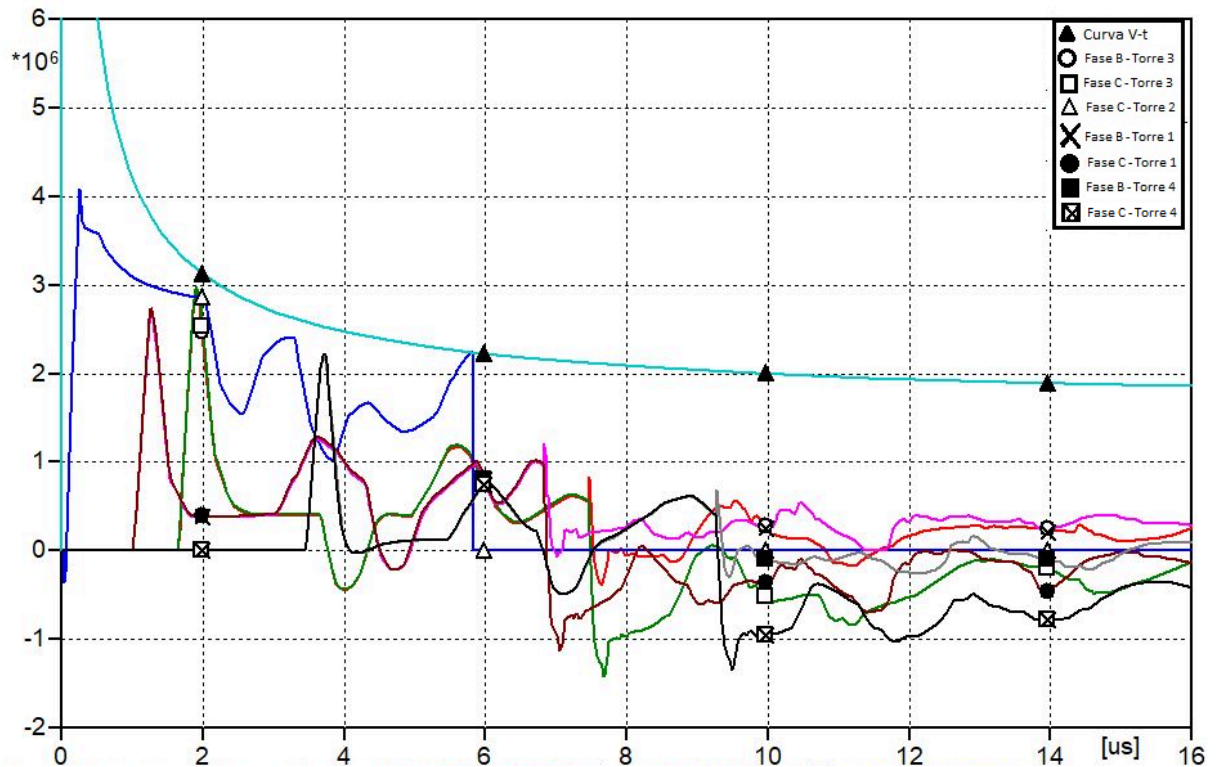


Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como em outros casos, há um afundamento de sobretensão na fase C da torre 4 no instante de 9,25 μ s. Porém, dessa vez essa oscilação atinge o valor negativo de 1,3482 MV. No caso 1, por exemplo, a fase C atingiu a amplitude de -1,4687 MV nesse instante de tempo, uma atenuação na amplitude da sobretensão de mais de 120 KV neste caso. Porém em nenhum dos dois exemplos, esses valores chegaram perto do limiar de suportabilidade.

A análise das sobretensões para as demais torres, permite observar resultados bem próximos daqueles obtidos no caso 1.1. Na Figura 46, estão plotadas as formas de onda de sobretensão nas fases B e C das torres 1, 3 e 4, além da sobretensão na fase C da torre 2 e da curva de suportabilidade V-t.

Figura 46 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2, 3 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 175,245 kA – Caso 4.1 - torre 3 com resistência de 60 Ω e curva V-t.



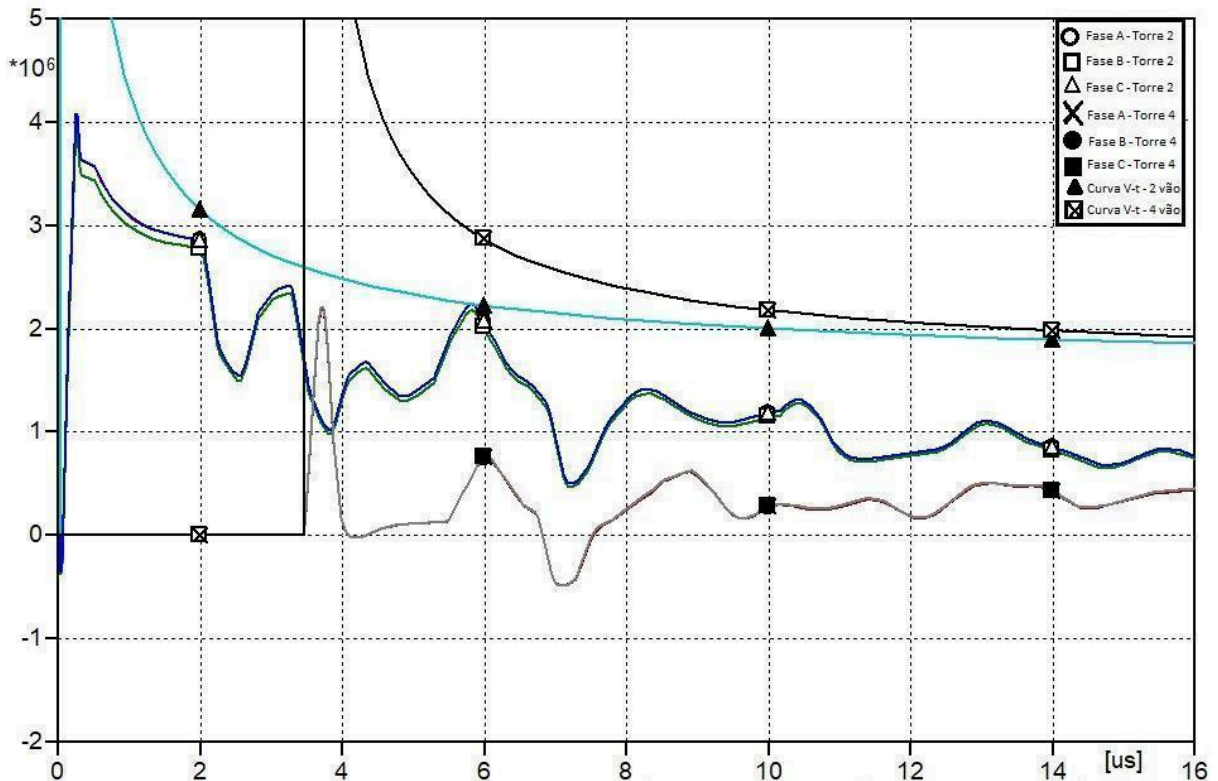
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.2 - Caso 4.2: torre 4 à esquerda com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.

Utilizando o *model* para gerar a curva de suportabilidade dielétrica sincronizada com as sobretensões e repetindo os ensaio feito com a curva não-sincronizada, temos que, quando a corrente crítica anteriormente aplicada na LT, no caso 4.1, de 175,206 kA, não há disrupção. Como é visto na Figura 47, a sobretensão das fases A e C da torre 2 ficaram próximas ao limiar da suportabilidade, porém não houve disrupção.

No instante de tempo de 5,82 μ s a tensão na fase C atingiu uma amplitude de 2,2393 MV e a fase A um valor de 2,239 MV. Neste mesmo instante, a suportabilidade era de 2,2438 MV. Ou seja, o uso da curva sincronizada permitiu a torre suportar 4,5 kV a mais que na configuração com a curva V-t simples.

Figura 47 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 4 para caso onde não há disrupção com a corrente crítica ajustada para 175,206 kA – Caso 4.2 – torre 4 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.

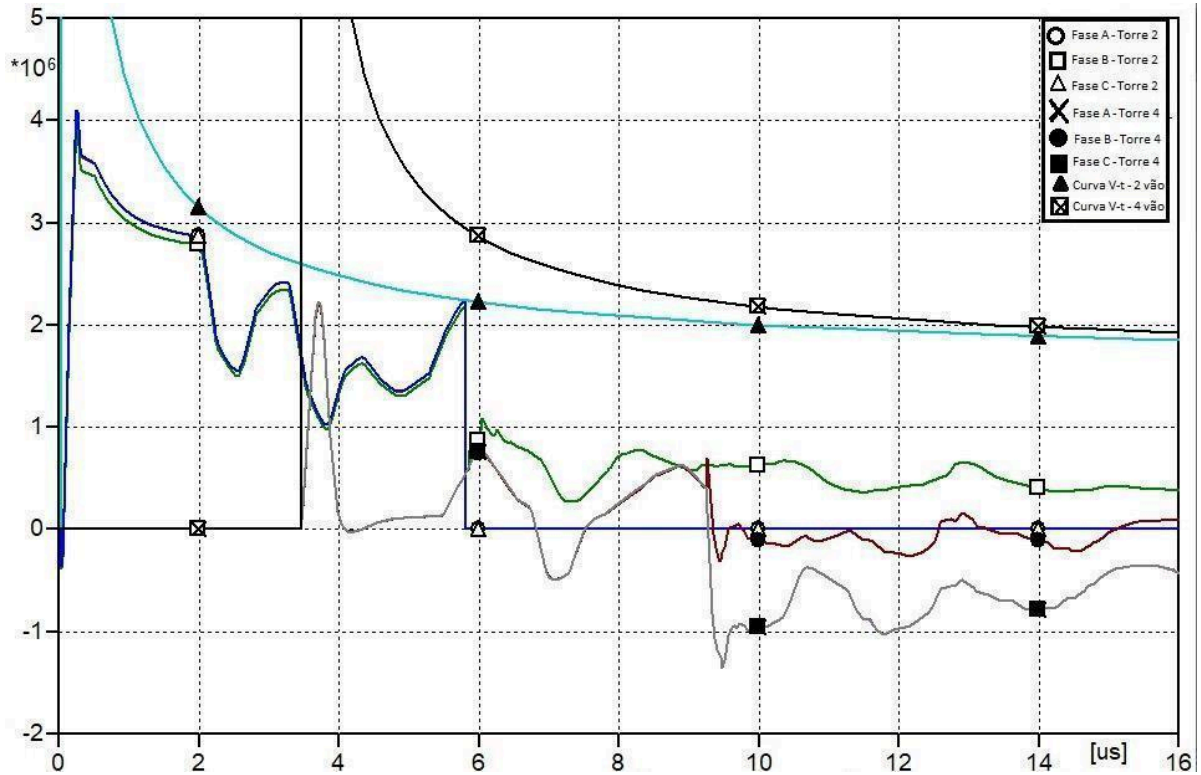


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para que haja o *backflashover*, a corrente foi aumentada para 175,714 kA. Nesta configuração, houve disrupção nas cadeias de isoladores das fases A e C da torre 2, como é visto na Figura 48, onde estão plotadas as curvas de sobretensão das fases A, B e C das torres 2 e 4.

Analisando as sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores das Torres 1 e 3 em relação a torre da descarga, percebe-se que a torre 3 atingiu um valor próximo ao limiar de suportabilidade da torre 2. Como se trata de um caso onde a curva de suportabilidade está sendo gerada em sincronia com o momento em que a onda viajante chega na cadeia de isoladores, a suportabilidade dielétrica dos arranjos isolantes das torres 2 e 3 são diferentes. Isso faz com que, como na Figura 45, onde a curva V-t das torres 2 e 3 é a mesma, a sobretensão que a cadeia de isoladores da torre 3 suporta seja extremamente subdimensionada. Tal constatação também foi descrita no caso 3.2.

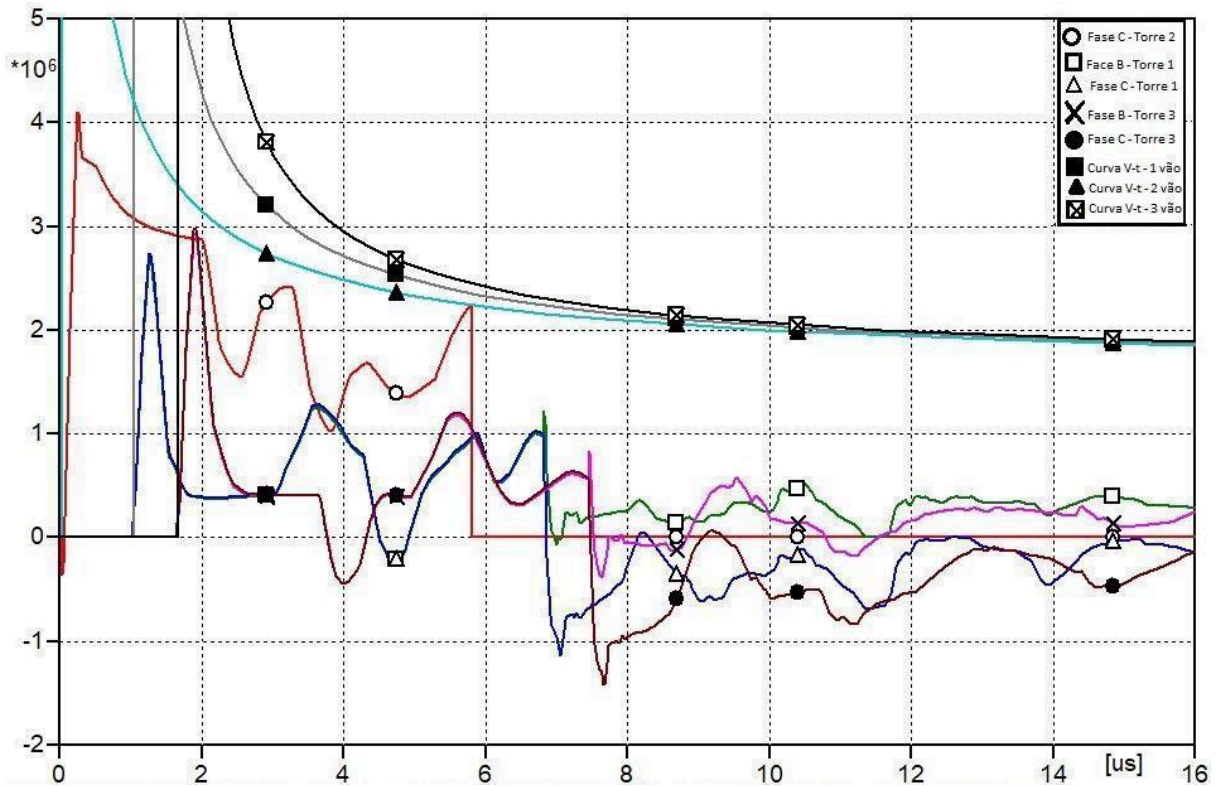
Figura 48 - Sobretensões atmosféricas das torres 2 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 175,714 kA – Caso 4.2 - torre 4 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 49, estão apresentadas as curvas de sobretensão nas torres 1 e 3 com suas fases e as curvas V-t de cada vão respectivo.

Figura 49 - Sobretensões atmosféricas das torres 1, 2 e 3 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com a corrente crítica ajustada para 175,714 kA – Caso 4.2 – torre 4 com resistência de 60 Ω e curva V-t sincronizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, com o caso 4, pode-se notar que, como a torre está a mais de 1000 m de onde ocorreu a descarga, mesmo com sua resistência de pé de torre com valor dobrado em relação ao Caso 1.1, a influência no desempenho da LT foi muito baixa e quase imperceptível. Para que ocorra uma disrupção em uma torre a essa distância, a corrente crítica deverá ser muito alta, ou, como no caso 2, um aumento significativo de resistência de pé de torre na torre da descarga.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou estudos de desempenho de linhas de transmissão levando em conta a suportabilidade elétrica representada através da curva V-t e da curva V-t sincronizada com as ondas viajantes. Para tanto, foi desenvolvido um modelo utilizando a linguagem *MODELS* do *software ATPDraw* que sincroniza o instante de geração da curva V-t com o exato momento em que as sobretensões iniciam o estresse elétrico das cadeias de isoladores, de forma a reproduzir de forma mais precisa e confiável a suportabilidade elétrica das cadeias de isoladores a partir do exato momento em que estas são atingidas pelas sobretensões.

Altos valores de resistência de pé de torre, seja na torre atingida pela descarga, seja nas torres adjacentes, provocam sobretensões de altas amplitudes, podendo provocar o fenômeno do *backflashover*. Utilizar a curva V-t sincronizada nesse estudo possibilita ao projetista uma visão mais precisa de como coordenar os projetos de isolamento de sistemas elétricos de alta tensão.

Como contribuição principal deste trabalho, os resultados obtidos permitem concluir que o uso da curva V-t não sincronizada subestima a suportabilidade elétrica dos arranjos isolantes podendo levar a um sobredimensionamento da quantidade de discos que compõem uma cadeia de isoladores, aumentando os custos do sistema de isolamento elétrico do empreendimento de transmissão.

Além disso, foi observado que o emprego da curva V-t simples pode levar a resultados de baixo desempenho elétrico da linha de transmissão que não condizem com a rigidez dielétrica real dos arranjos isolantes. Assim, o *model* desenvolvido para implementar a curva V-t de forma sincronizada com o momento em que as sobretensões solicitam as cadeias de isoladores, constitui um relevante aprimoramento para a realização de estudos computacionais de desempenho elétrico de linhas de transmissão considerando a característica real da suportabilidade dielétrica dos arranjos isolantes.

5.1. Propostas de trabalhos futuros.

Para trabalhos futuros, seria de grande relevância implementar o uso da curva V-t sincronizada em um sistema em regime permanente e observar o comportamento das sobretensões de origem atmosférica na LT energizada.

Outro estudo de relevância seria utilizar outras fontes de descarga de retorno com tempos de frente e cauda diferentes deste trabalho, tais como a onda de uma corrente de descarga atmosférica foi recomendado pelo (CIGRÈ, 1991), ou correntes de descargas reais tal como a corrente do tipo pico duplo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA JÚNIOR, Afonso Bernardino de. **Contribuições aos estudos computacionais de ressarcimento por danos elétricos devido a descargas atmosféricas diretas e indiretas.** 2016. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2016.150> .

ALMEIDA, A. R. **O Uso de Análise de Componentes Independentes na Extração de Características dos Sinais Transitórios de Falhas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica.** 2017. 97 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Fortaleza, 2017.

ASSIS, Sandro de Castro; EDINO, B. Giudice Filho; COUTINHO, Roberto Márcio; ALMEIDA, João Henrique Magalhães; TEIXEIRA, André Matias Nunes; FRANCO, Jorge Luiz de;. **Metodologia de Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas Considerando Pára-Raios de ZnO.** Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÈ. Foz do Iguaçu-PR. Brasil. 19 a 23 de maio de 2013.

BERARDO, Benício Luiz. **Estudo do aterramento dos pés de torre de linha de transmissão frente às descargas atmosféricas.** 2012. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2012.

CIGRÈ - INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS. STUDY COMMITTEE 33 (OVERVOLTAGES AND INSULATION 95 COORDINATION). WORKING GROUP 01. **Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines.** Paris: CIGRÉ, Brochure n° 63, 1991.

CEMIG. Revista P&D - **Informativo do Programa de Gestão Estratégica de Tecnologia da CEMIG**, n. n° 07, pp. pg. 34, 2011.

COORAY, V. **The lightning flash.** 2.ed. London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2014.

CUNHA, L. V. **Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Influência do Efeito Corona na Ruptura a Meio de Vão.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de

Minas Gerais. Belo Horizonte. Julho 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8MCHLM>.

D'AJUZ, Ary, **Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - aplicação em sistemas de potência de alta tensão**. FURNAS. Niterói. Universidade Federal Fluminense/EDUFF. Rio de Janeiro, 1987.

DUBÉ, L. **MODELS in ATP**: Language manual. February 1996a.

FARIA, Gabriel Henrique de. **Estudo do Comportamento Dielétrico de Equipamentos de Manobra em Média Tensão Frente a Impulsos Não Padronizados**. 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017. DOI: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/833>.

FILHO, R. E. de Souza. **Avaliação de metodologias para análise de desempenho de linhas de transmissão frente descargas atmosféricas**. Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte - MG, 2013. DOI: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-9AKJ39>.

GATTA, F.M.; GERI, A.; LAURIA S. **Backflashover simulation of HV transmission lines with concentrated tower grounding**, Electric Power Systems Research. v. 73, n.3, pp. 373–381, March 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2004.08.011>

HILEMAN, A. R. **Insulation Coordination for Power Systems**. New York: Basel, 1999. pp. 767 ISBN:0-8247-9957-7. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420052015>.

IEEE - THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, **Guide for improving the lightning performance of transmission lines**. IEEE Std. 1243-1997, New York, United States of America, June, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.1997.84660>.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Incidência de descargas no Brasil**. Disponível em: <https://encurtador.com.br/ktO09>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2024.

LAFORST, J. J. **Transmission-line reference book**. 345 kV and above. General Electric Co., Pittsfield, MA (USA). Large Transformer Div.; General Electric Co., Schenectady, NY (USA). Electric Utility Systems Engineering Dept., 1981.

LOPES, G. P. **Modelagem Estatística do Efeito Disruptivo para Isoladores de Média Tensão**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

OLIVEIRA, A. L., **Predição da suportabilidade elétrica de isoladores de linhas de distribuição de energia elétrica utilizando método DE e *leader progression model***. 64p. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Elétrica. IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Formiga, 2021.

OLIVEIRA, Arlison Júnior de. **Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas sob uma perspectiva probabilística**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del-Rei. São João del-Rei, 2018.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS CADASTRAIS DO SIN**. Disponível em: <https://sig.ons.org.br/app/sinmaps> Acesso em: 26 de abril de 2023.

PINTO JUNIOR, O.; ZEPKA, G. S.; CARDOSO, I.; SARAIVA, A. C. **A 24 - Hour Lightning Forecast System in Brazil**. Journal of Aerospace Technology and Management. p. 396-397. 2015. v. 7. Disponível em: <https://doi.org/10.5028/jatm.v7i4.561>

PINTO JUNIOR., O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2000.

RAKOV, Vladimir A.; UMAN, Martin A. **Lightning: physics and effects**. Cambridge university press, 2003.

RODRIGUES, André Roger. **Influência da corrente de descarga atmosférica e dos modelos para caracterização da suportabilidade de isoladores no fenômeno de *backflashover***. 2017. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

RODRIGUES, A. R.; GUIMARÃES, G. C.; CHAVES, M.L.R.; BOAVENTURA, W. C. **Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas aplicada à Coordenação de Isolamento**. SBSE, Foz do Iguaçu-PR, 2014.

ROMERO, F. **Avaliação do comportamento dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas nuvem-terra** . 2007. 155 f. Dissertação de mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SALARI FILHO, J.C. **Efeito das descargas atmosféricas no desempenho de linhas de transmissão – modelagens no domínio do tempo e da frequência**. Tese de doutorado, Coordenação de Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, 2006.

SOARES, Vitor Silva, **Cálculo da potência natural em linhas de transmissão de energia elétrica**. Trabalho de conclusão de curso. Colegiado do Departamento de Engenharia Elétrica do CEFET-MG, Belo Horizonte, 2015.

TEIXEIRA, Luiz Fernando Pereira, **Análise computacional da influência dos modelos de resistência de aterramento no desempenho elétrico de linhas de transmissão perante sobretensões atmosféricas**. 97p. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Elétrica. IFMG - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Formiga, 2022.

VISACRO, S. **Descargas Atmosféricas: uma Abordagem de Engenharia**. São Paulo: Art Liber, 2005.

YAMADA T.; MOCHIZUKI, A.; SAWADA, J.; ZAIMA, E.; KAWAMURA,T.; AMETANI, A.; ISHII, M.; KATO, S. **Experimental evaluation of UHV tower model for lightning surge analysis**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 1, p. 392–402, [S.l.],1995. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.368374> .

ZANETTA JÚNIOR, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas Elétricos de Potência**. 638 p. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

APÊNDICE A - Estudo da variação estatística da frente da corrente de descarga

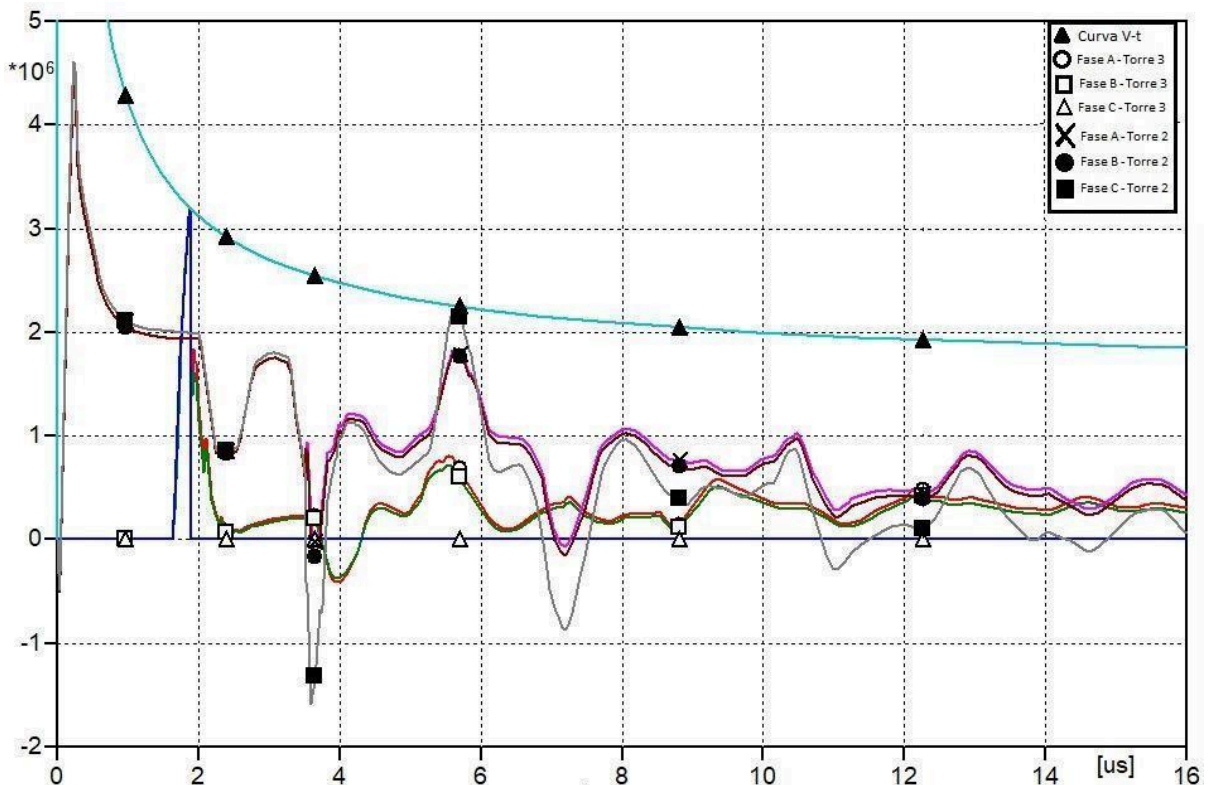
Neste APÊNDICE serão reproduzidos os casos 1 e 2 da seção de resultados utilizando a fonte *surge type 15* do *ATPDraw*. Esta análise tem como foco comparar fontes de corrente para representar a descarga de retorno com diferentes tempos de frente de onda. Como dito no Capítulo 3 deste, a fonte disponível no software tem tempo de frente de $0,637 \mu\text{s}$, já a fonte *Model Lynce*, desenvolvida por Rodrigues (2017) tem o tempo do impulso padrão tipo $1,2 \times 50 \mu\text{s}$.

1) Caso 1: Todas as torres com resistência de aterramento igual a 30Ω :

A.1. Torres com resistência de 30Ω e suportabilidade representada por Curva V-t:

Na primeira configuração, as quatro torres do sistema são configuradas com a mesma resistência de aterramento: 30Ω . Ajustando a amplitude da corrente crítica para $127,077 \text{ kA}$, a disrupção ocorre em $1,88 \mu\text{s}$, com uma sobretensão da cadeia de isoladores da fase C da torre 3 de $3,1992 \text{ MV}$. Na Figura A.1 estão as curvas de sobretensão das fases A, B e C das torres 2 e 3.

Figura A.1 - Sobretensões impostas às torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 3 com todas as torres com resistência de pé com 30Ω .



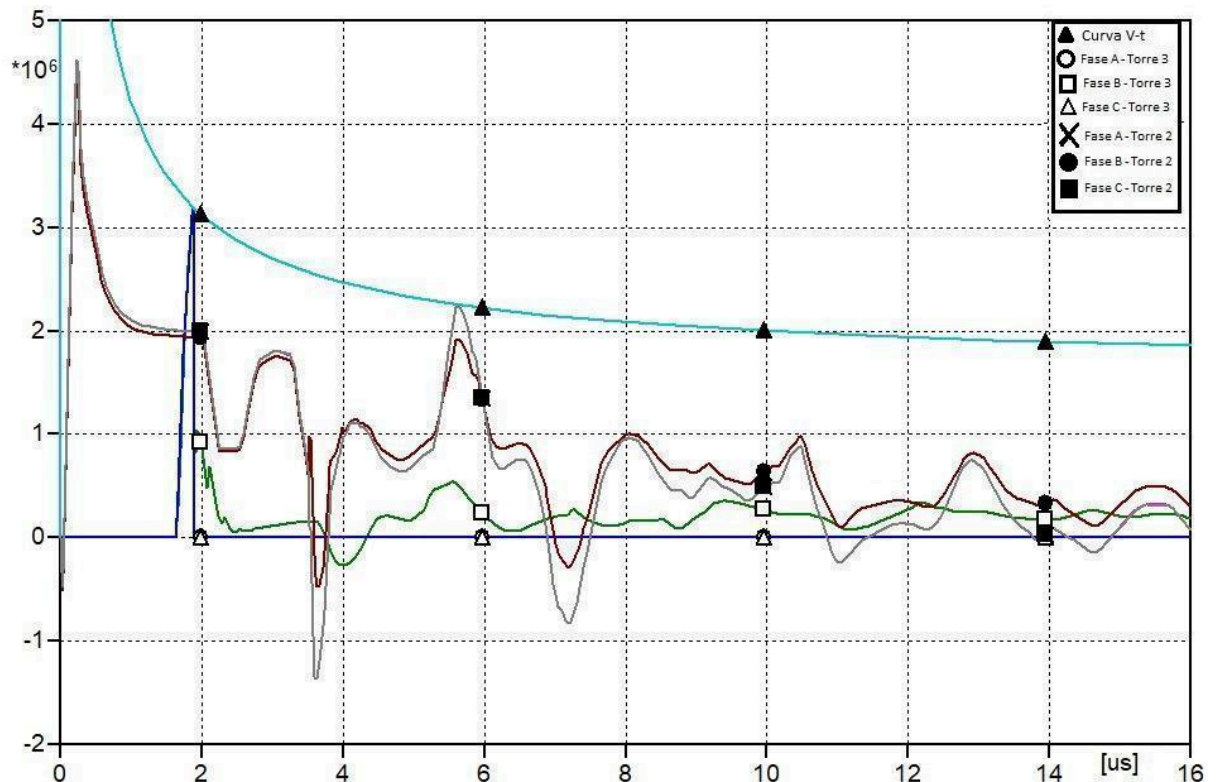
Fonte: Elaborada pelo autor

Quando ocorre a disrupção, há um afundamento nas tensões A e B, como é visto na figura A.1. Como explicado nos casos do capítulo 4, devido a geometria da torre, sobretensões das fases A e C ficaram com valores praticamente iguais e ligeiramente maiores que a tensão da fase B.

No caso 1.1, do capítulo 4, onde a configuração de sistemas de aterramento foi a mesma que da figura A.1 acima, a disrupção havia ocorrido no arranjo isolante da fase C da torre 2, agora, com a fonte de frente rápida, a disrupção ocorreu na fase C da torre 3. A frente rápida fez com que a onda viajante que chegou à torre 3 causasse a disrupção, uma vez que tem que superar um valor inferior de tensão disruptiva determinada pela curva V-t simples

Aumentando a magnitude da corrente para 127,096 kA, ocorre-se a disrupção também da cadeia de isoladores da fase A da torre 3, como é visto na Figura A.2. Ou seja, um aumento de 19 A provocou a disrupção. Pode-se afirmar que, quando uma descarga atmosférica dessa magnitude atinge essa LT, a probabilidade de ocorrerem disrupções em ambas as fases é muito grande.

Figura A.2 - Sobretensões impostas às torres 2 e 3 para disrupção nas cadeias das fases A e C da torre 3 com todas as torres com resistência de pé com 30Ω



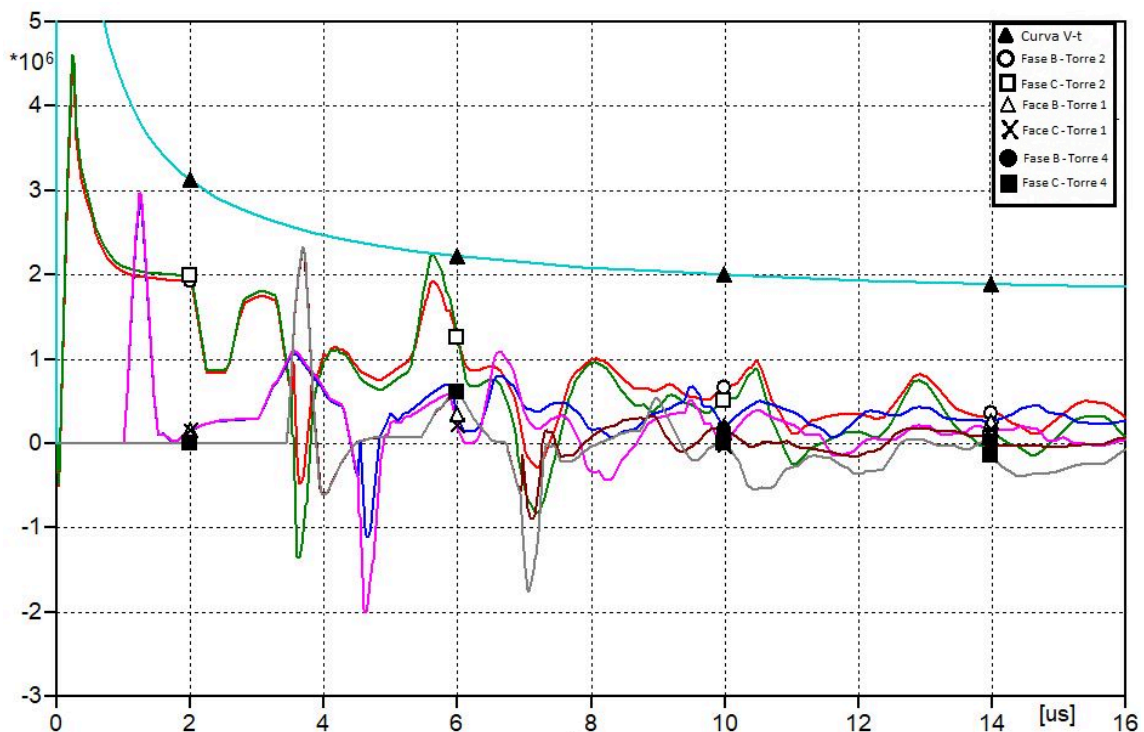
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a figura acima, ressalta-se que no instante de tempo de 5,63 μs , a sobretensão na fase C da torre 2, atinge uma amplitude de 2,2384 MV, sendo que, neste momento, a suportabilidade definida pela curva V-t era de 2,2576 MV.

Em ambas as figuras anteriores ocorreu das sobretensões nas fases da torre 2 atingirem amplitudes maiores que 4,5 MV. Como se trata de uma fonte de corrente de descarga de frente rápida, a frente de onda dessas sobretensões ficaram abaixo dos limites de suportabilidade da curva V-t. Comparando com os gráficos gerados utilizando a fonte de corrente *Model Lynce*, que tem tempo de frente de 1,2 μs , mesmo com uma corrente crítica superior em até 50 kA, a amplitude da sobretensão nos primeiros microssegundos foi menor.

Analisando a descarga e suas reflexões para as demais torres, pode-se notar que na torre 4, teve uma amplitude de 2,3405 MV no instante de tempo de 3,68 μs , próximo do limite de suportabilidade, que nesse momento era de 2,5347 MV. Na Figura A.3, estão expostas as curvas de sobretensão das fases B e C das torres 1, 2 e 4, bem como a curva de suportabilidade das mesmas.

Figura A.3 - Sobretensões impostas às torres 1, 2 e 4 com todas as torres com resistência de pé com 30 Ω .



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o uso da curva sincronizada, essa proximidade entre suportabilidade e sobretensão na torre 4 não aconteceria. Uma vez que, a curva de suportabilidade da cadeia de

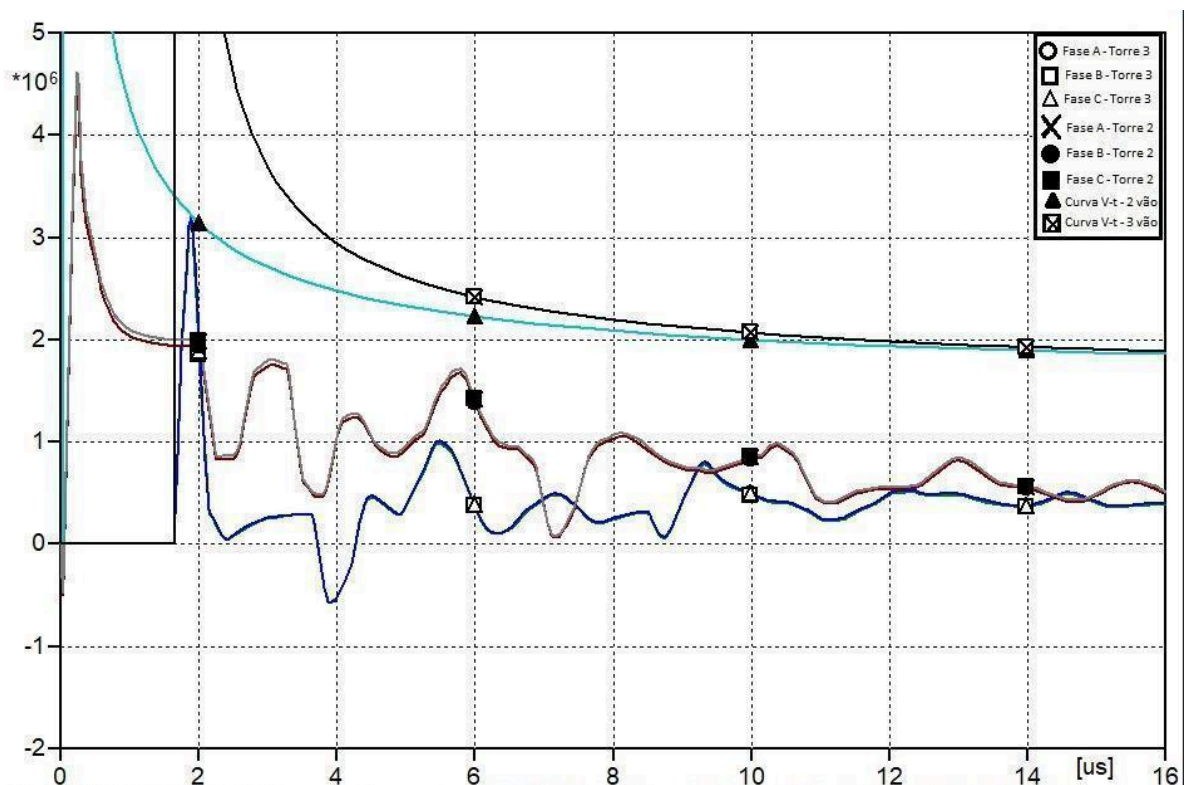
isoladores da torre 4 seria gerada a partir do instante em que a sua cadeia começa a ser estressada eletricamente pela sobretensão proveniente da onda viajante, como justificado nos casos estudados anteriormente, a suportabilidade no instante em que houve essa aproximação seria relativamente maior, como será mostrado abaixo, onde será implementada a curva V-t sincronizada.

A.2 - Torres com resistência de 30 Ω e suportabilidade representada por Curva V-t sincronizada:

Neste caso, serão mantidos os mesmos valores de resistência de aterramento que no caso 1.1, porém, agora a curva de suportabilidade será sincronizada com as ondas viajantes provenientes das sobretensões atmosféricas.

Com o mesmo valor de corrente crítica aplicado na simulação representada pela figura A.4, de 127,096 kA, observa-se que não há disrupção em nenhuma das torres analisadas. Na Figura A.4, abaixo, estão plotadas as formas de onda provenientes de descargas atmosféricas nas fases das torres 2 e 3, bem como as curvas de suportabilidade dessas torres.

Figura A.4 - Sobretensões impostas às torres 2 e 3 utilizando a curva sincronizada. Todas as torres com resistência de pé de 30 Ω .

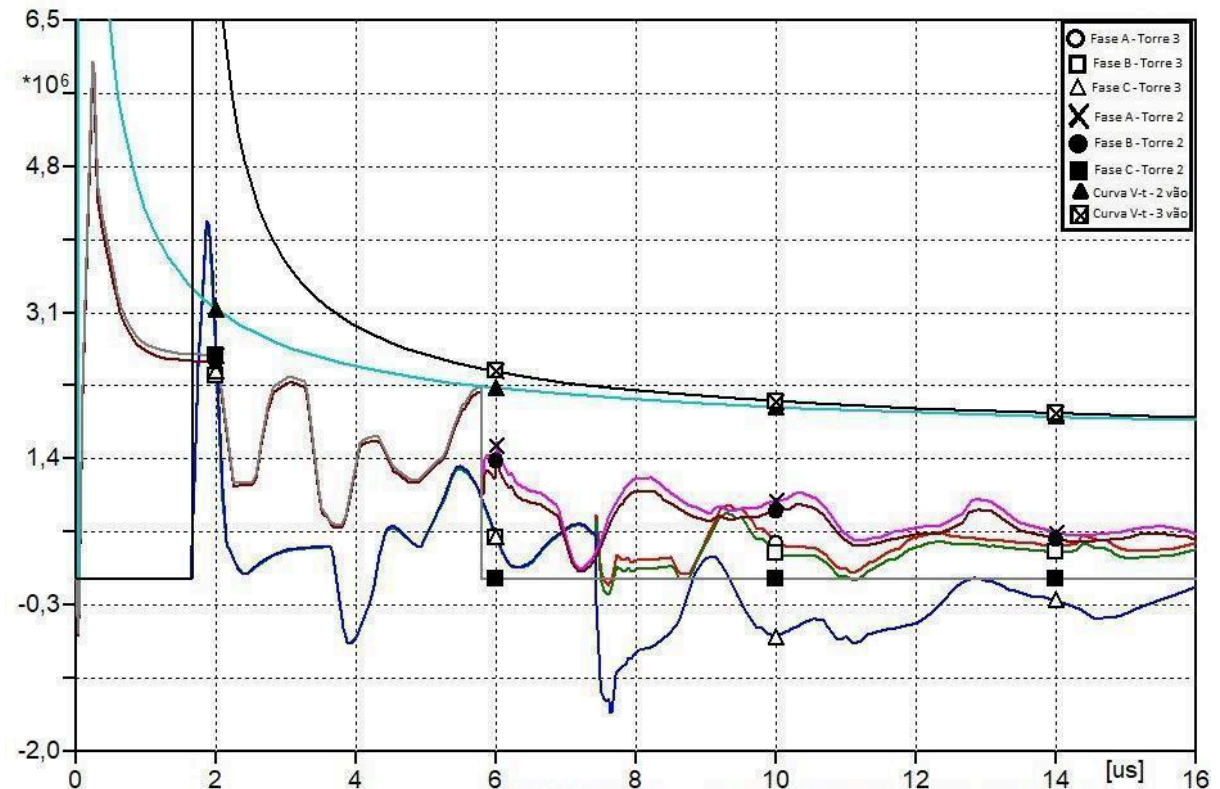


Fonte: Elaborada pelo autor

No instante de maior amplitude, a sobretensão da fase C da torre 3 atingiu o valor de 3,1992 MV, porém a suportabilidade nesse instante na curva V-t era de 9,8189 MV, uma diferença de quase três vezes. O uso da curva V-t sincronizada permitiu, em um mesmo sistema, onde anteriormente havia ocorrido uma disrupção, uma suportabilidade muito grande.

Ajustando a corrente crítica para que ocorra uma disrupção, a amplitude necessária foi de 165,704 kA, o que representa um aumento de quase 40 kA. Observando a Figura A.5, a sobretensão da fase C, porém, desta vez da torre 2, atingiu a suportabilidade com uma amplitude de 2,2466 MV no instante de tempo de 5,78 μ s.

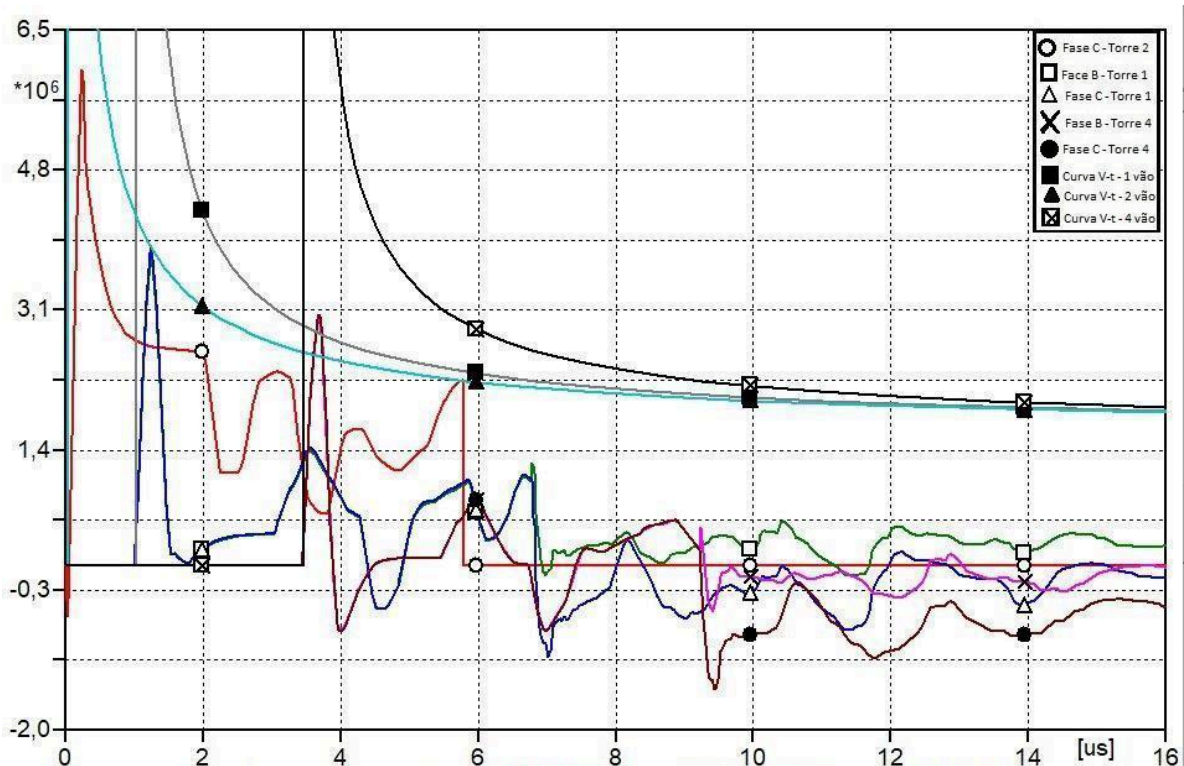
Figura A.5 - Sobretensões impostas às torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 utilizando a curva sincronizada. Todas as torres com resistência de pé de 30 Ω .



Fonte: Elaborada pelo autor.

Outra constatação é que aumentando a amplitude da corrente para 165,730 kA, provoca também a disrupção na cadeia de isoladores da fase A da torre 2. Uma diferença de 26 A em relação ao rompimento isolado da fase C. Na Figura A.6, pode-se ver o comportamento das sobretensões após o impacto do surto atmosférico. No gráfico abaixo estão expostas as curvas de suportabilidade das torres 2 e 3, bem como as sobretensões de suas fases.

Figura A.7 - Sobretensões impostas às torres 1, 2 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 utilizando a curva sincronizada. Todas as torres com resistência de pé de 30 Ω .



Fonte: Elaborada pelo autor.

2) Caso 2 - Torre da descarga com resistência de terra igual a 60 Ω :

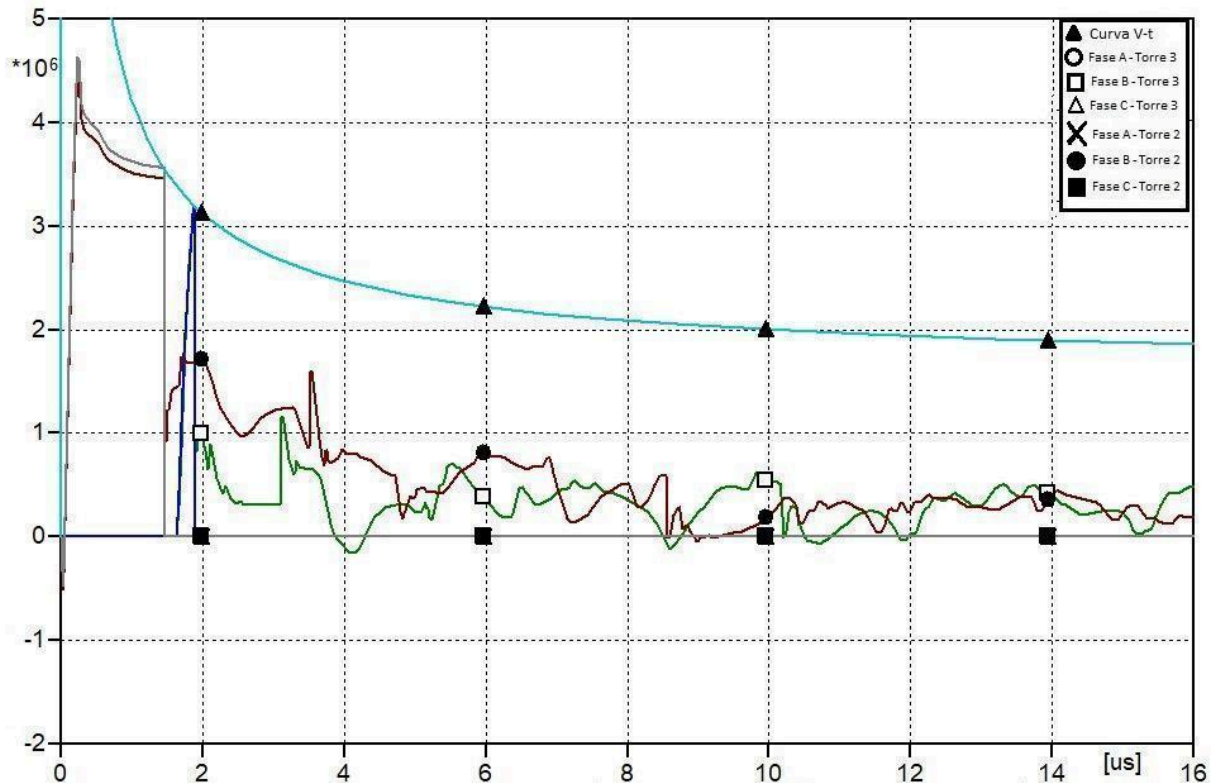
B.1 - Torre da descargas com resistência de 60 Ω e suportabilidade representada por Curva V-t:

Neste segundo caso, a resistência de aterramento da torre 2 foi alterada para 60 Ω , e as demais foram mantidas em 30 Ω .

Aplicando a mesma corrente crítica do caso 1.1, ou seja, 127,096 kA temos um rompimento nas cadeias de isoladores das fases A e C das torres 2, 3 e 4. Na Figura A.8, onde estão as formas de onda das sobretensões nas fases das torres 2 e 3, além da curva de suportabilidade.

A sobretensões nas fases A e C da torre 2 atingem um valor de 3,5591 MV no momento da disrupção, no instante de tempo 1,46 μ s. Na torre 3 os valores de sobretensão de disrupção e tempo são os mesmos do caso 1: no instante de 1,88 μ s, com uma sobretensão cadeia de isoladores das fases A e C com amplitude de 3,1992 MV.

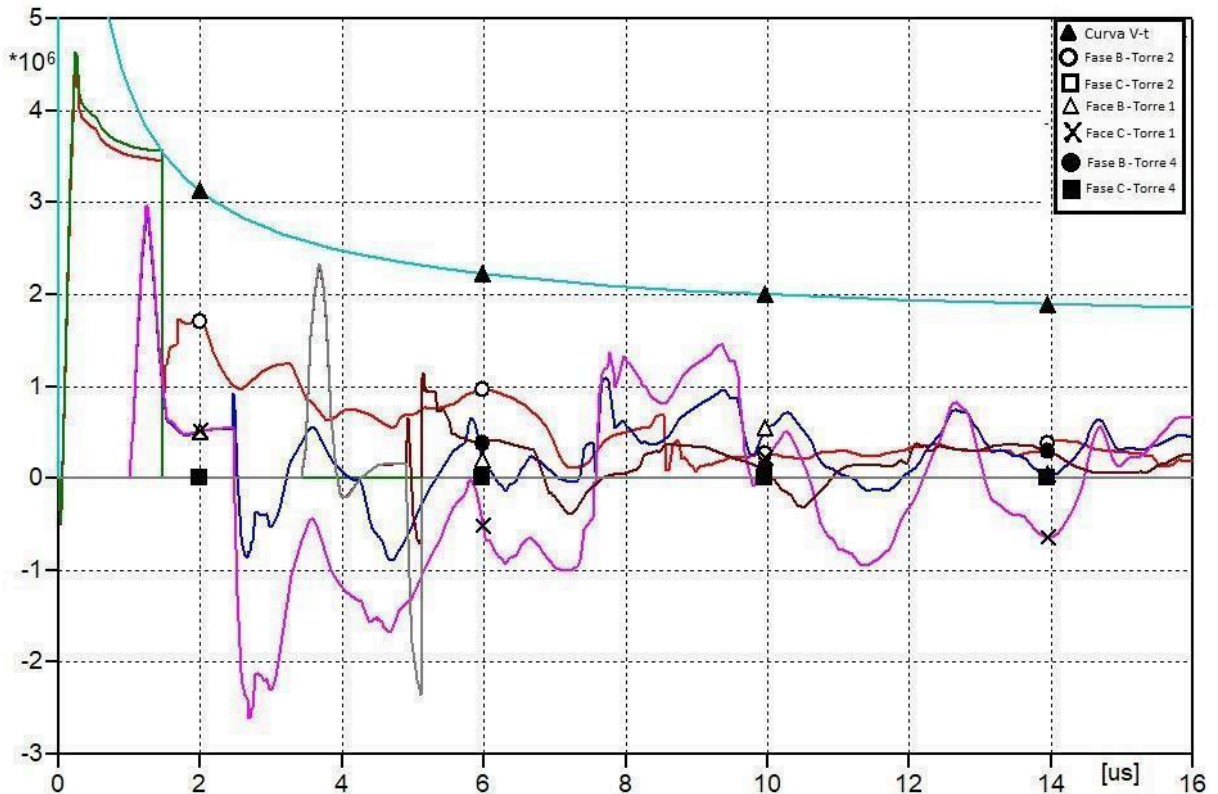
Figura A.8 - Sobretensões impostas às torres 2 e 3 para disrupção das cadeias das fases A e C das torres 2 e 3 com resistência de pé da torre 2 igual a 60Ω quando a corrente crítica é igual a $127,096 \text{ kA}$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando o impacto da descarga atmosférica nas torres 1 e 4, em relação a torre 2, que teve sua resistência de pé de torre dobrada de valor, no instante de $5,11 \mu\text{s}$ ocorreu uma disrupção com polaridade negativa na cadeia de isoladores das fases A e C da torre 4, que atingiu uma amplitude de sobretensão de $-2,3618 \text{ MV}$. Devido ao limite de curvas definido pelo *software ATP* ser de apenas 8, foram plotadas as fases B e C das torres 1, 2 e 4, além da da curva V-t, no gráfico da Figura A.9.

Figura A.9 - Sobretensões impostas às torres 1, 2 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C das torres 2 e 4 com resistência de pé da torre 2 igual a 60Ω quando a corrente crítica é igual a $127,096 \text{ kA}$.

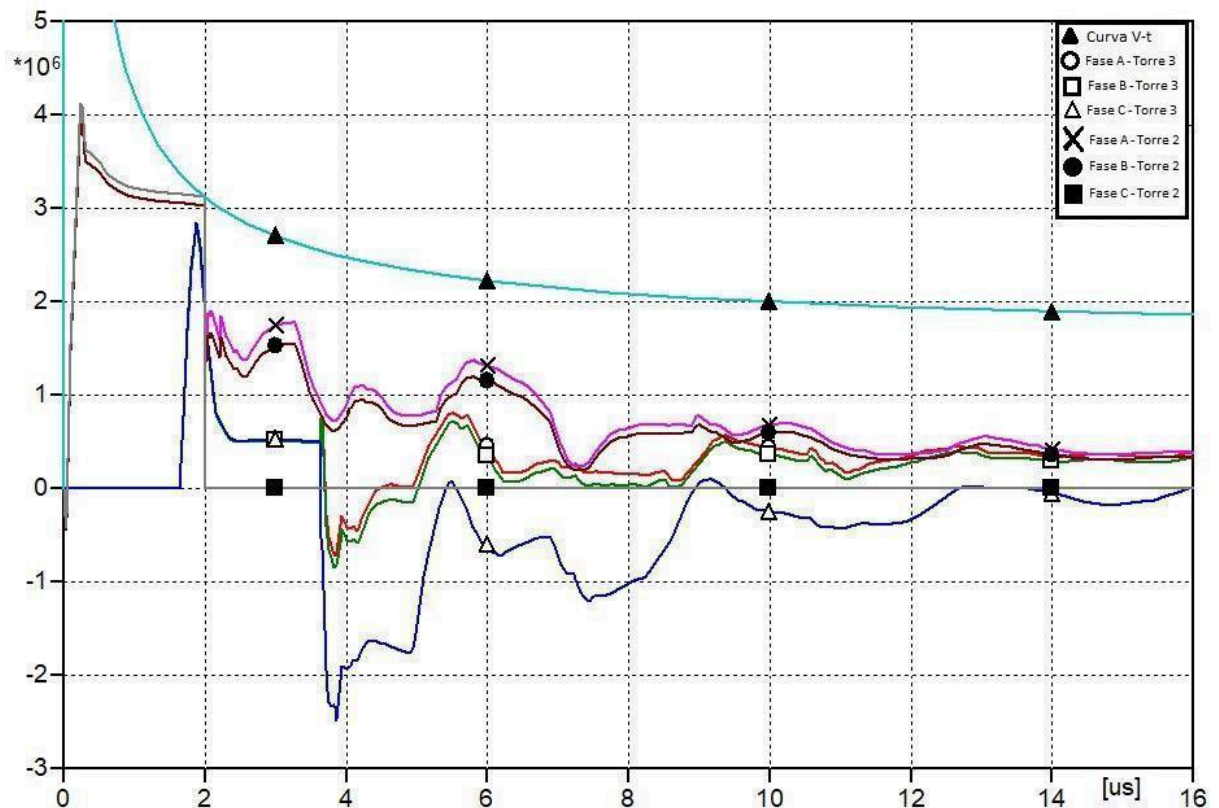


Fonte: Elaborada pelo autor.

Ajustando a corrente crítica para o menor valor onde há ocorrência de disrupção, quando a amplitude da mesma atinge um valor de $112,993 \text{ kA}$, a disrupção ocorre em $2,00 \mu\text{s}$ com uma sobretensão na cadeia de discos isolantes da fase C da torre 2 com magnitude de $3,1232 \text{ MV}$.

Na Figura A.10, onde estão expostas as curvas de sobretensão das fases das torres 2 e 3, bem com a curva de suportabilidade dos arranjos isolantes. Pode-se ver que, no instante de tempo igual a $3,86 \mu\text{s}$, a sobretensão da face C da torre 3 atingiu uma amplitude com polaridade negativa de $2,482 \text{ MV}$, concomitantemente, a suportabilidade nesse exato momento era de $2,499 \text{ MV}$.

Figura A.10 - Sobretensões impostas às torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 com resistência de pé da torre 2 igual a 60Ω .

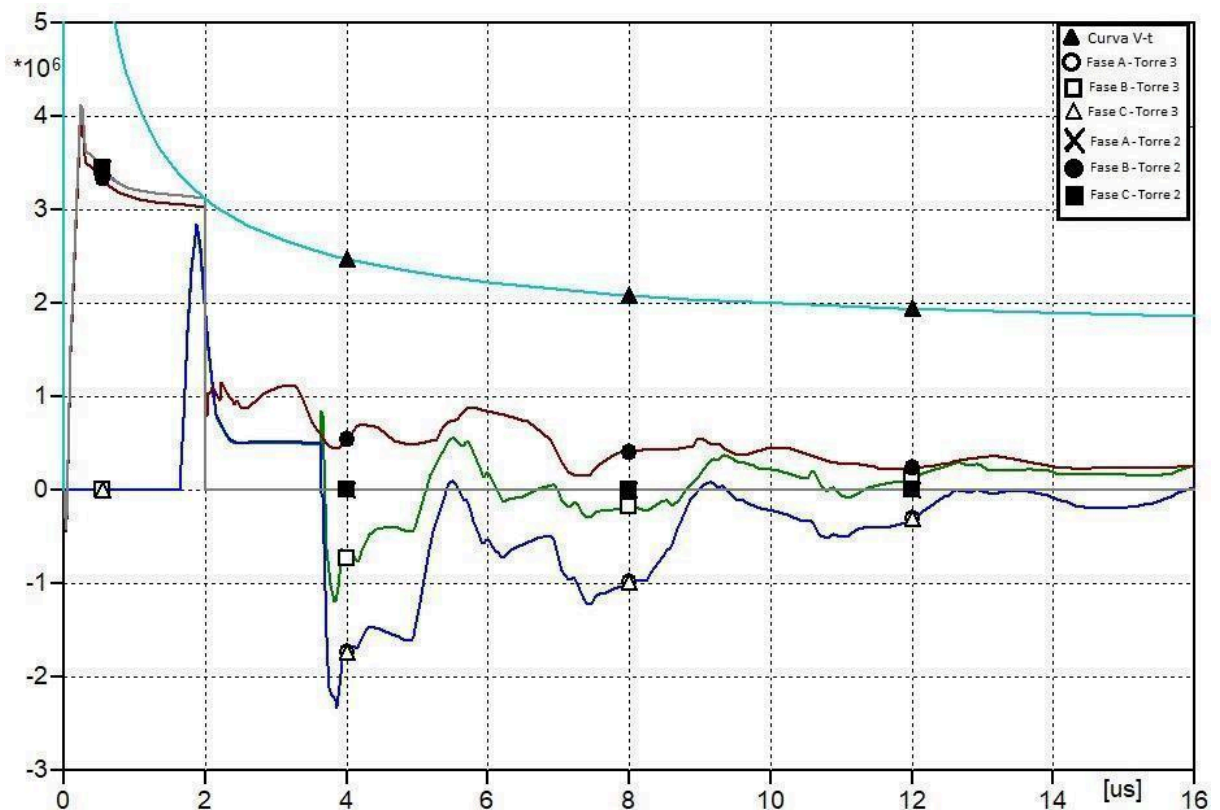


Fonte: Elaborada pelo autor

Com um aumento de apenas 17 A, fazendo com que a corrente crítica obtenha magnitude de 113,010 kA há ocorrência de disrupção também na fase A da torre 2, no mesmo instante. Na Figura A.11, abaixo, pode-se ver o impacto que o rompimento de duas cadeias de isoladores trouxe ao sistema.

A sobretensão do arranjo isolante da fase C da torre 3, que outrora, no instante de $3,86 \mu\text{s}$ havia chegado ao limiar da suportabilidade, com a disrupção de ambas as fases, chegou a um valor com menor amplitude, sendo o afundamento dessa tensão anteriormente causado pela oscilação de sobretensão da fase A da torre 2.

Figura A.11 - Sobretensões impostas às torres 2 e 3 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com resistência de pé da torre 2 igual a 60Ω .

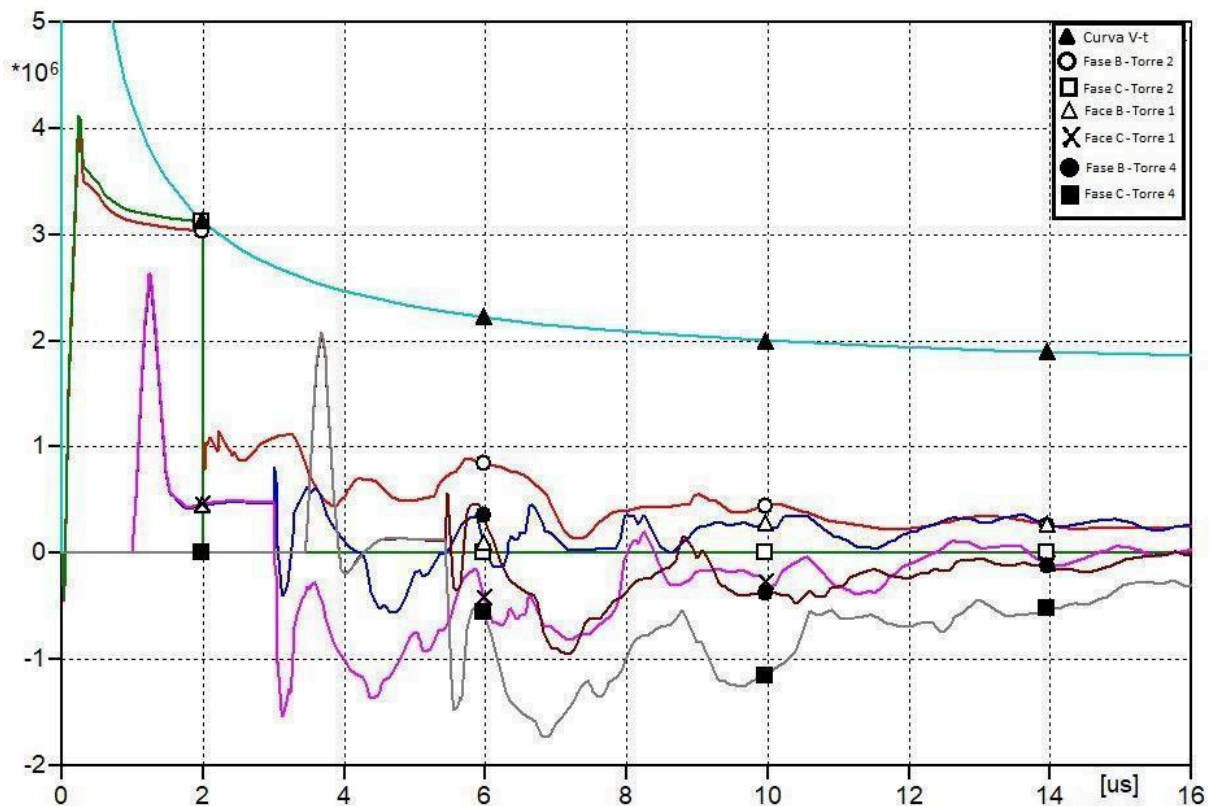


Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando as Torres 1 e 4, através da Figura A.12, pode-se notar que novamente a amplitude das sobretensões não se aproximaram da curva de suportabilidade elétrica. A alteração da resistência de pé na torre da descarga trouxe pouco impacto, se compararmos com o impacto nas torres 2 e 3.

Mesmo utilizando a curva V-t simples, as magnitudes de sobretensão nos arranjos isolantes não chegaram próximos aos limiares da suportabilidade. Quando a análise for feita utilizando a curva V-t sincronizada com as ondas viajantes, essas discrepâncias se tornarão maiores ainda, comprovando que, para que o impacto da onda de sobretensão tenha efeito agravante nas torres adjacentes à descarga, a corrente crítica deve ser extremamente alta.

Figura A.12 - Sobretensões impostas às torres 1, 2 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com resistência de pé da torre 2 igual a 60Ω .



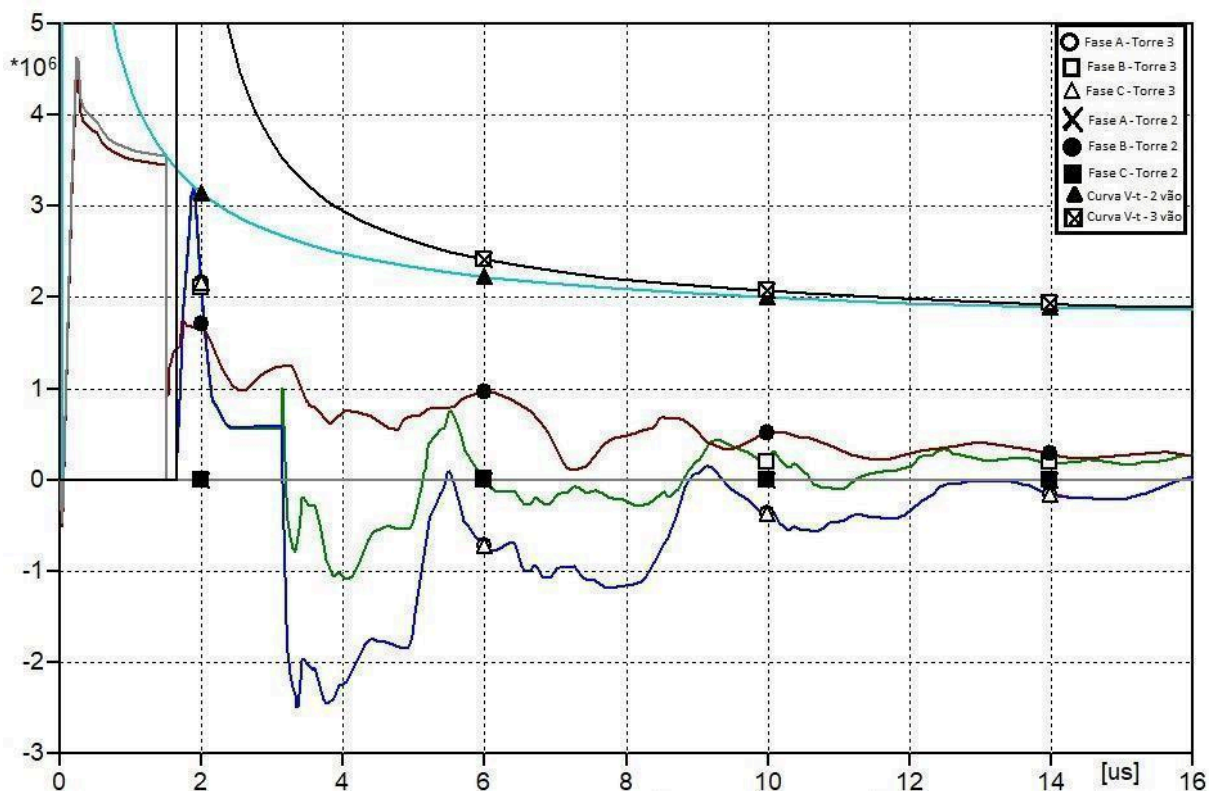
Fonte: Elaborada pelo autor.

B.2 - Torre da descargas com resistência de 60Ω e suportabilidade representada por Curva V-t sincronizada:

Neste estudo, serão utilizadas as curvas de suportabilidade sincronizadas com o momento em que a onda viajante chega à cadeia de isoladores e começa a stressá-la. Para tanto, aplicando a corrente de $127,096 \text{ kA}$, outrora aplicada à torre 2 no caso 2.1, causando a disrupção nas torres 2, 3 e 4 com a suportabilidade sendo definida pela curva V-t, agora acontece apenas na torre 2. A sobretensão da fase C da torre 2 atinge o ponto da curva com amplitude de $3,5513 \text{ MV}$ no instante de $1,49 \mu\text{s}$.

Observando a Figura A.13, onde estão plotadas as curvas de sobretensão das fases A, B e C das torres 2 e 3, bem como suas suportabilidades definidas pelas curvas sincronizadas, é possível ver o momento da disrupção. As sobretensões da torre 3, que outrora haviam causado o *backflashover*, neste caso com o uso da curva V-t sincronizada não determinaram disrupção, uma vez que a suportabilidade dielétrica possui amplitude 3 vezes superior ao valor do caso em que foi usada a curva V-t simples.

Figura A.13 - Sobretensões impostas às torres 2 e 3 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com resistência de pé da torre 2 igual a 60Ω quando a corrente crítica é igual a $127,096 \text{ kA}$ utilizando a curva sincronizada.

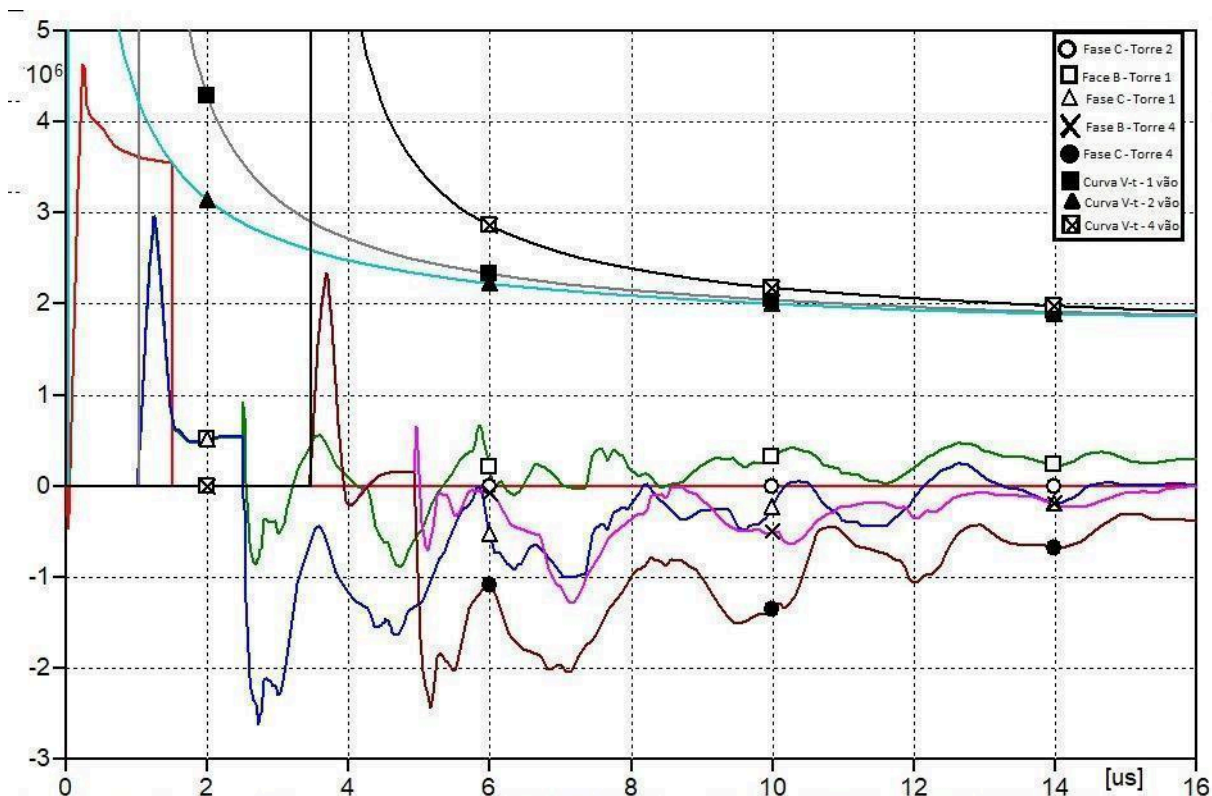


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na torre 4, onde anteriormente, no caso 2.1 havia ocorrido uma disrupção com polaridade negativa, causada pelas sobretensões que viajam pela LT, agora, com a curva de suportabilidade sendo gerada somente quando a onda de choque chega a cadeia de isoladores, essa disrupção não aconteceu.

As amplitudes de sobretensão das fases C das torres 1 e 4, que estão expostas na Figura A.14, junto com suas curvas V-t sincronizadas, são relativamente mais altas, se compararmos ao caso 1.1, onde a resistência de pé de torre era de 30Ω . A elevação em 100% da resistência de aterramento provocou, além da elevação das sobretensões atmosféricas, a alteração na amplitude das oscilações de tensão nas ondas viajantes nas torres à esquerda da descarga..

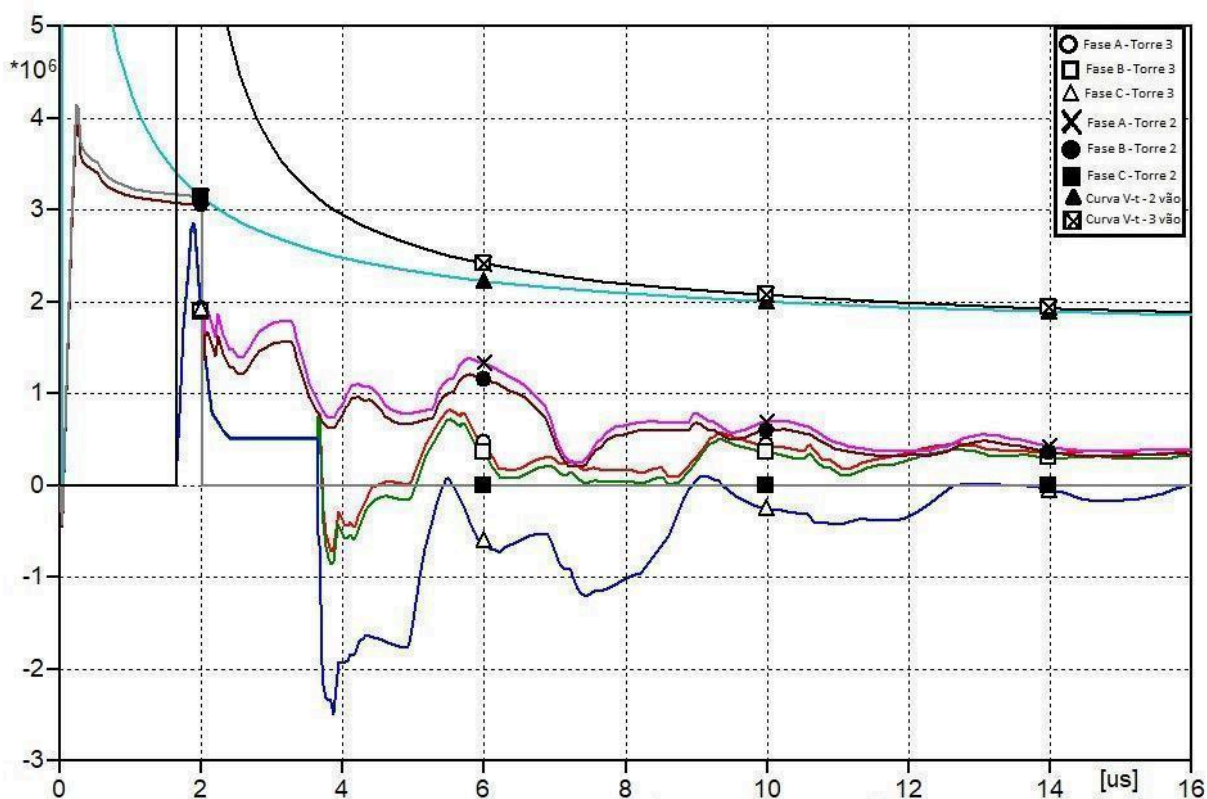
Figura A.14 - Sobretensões impostas às torres 1, 2 e 4 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com resistência de pé da torre 2 igual a 60Ω quando a corrente crítica é igual a $127,096 \text{ kA}$ utilizando a curva sincronizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ajustando a corrente para o valor crítico, encontra-se uma amplitude de corrente de $113,698 \text{ kA}$. Comparando essa magnitude com o caso 2.1, houve uma diferença de 705 A . Ou seja, a curva V-t sincronizada possibilitou um aumento de mais de 700 A de suportabilidade à cadeia isolante da fase C da torre 2. Essa disrupção ocorreu no instante de tempo de $2,00 \mu\text{s}$, com uma amplitude de sobretensão de $3,1426 \text{ MV}$. A Figura A.15, expõe as curvas sincronizadas com as torres 2 e 3, bem como suas sobretensões em suas fases.

Figura A.15 - Sobretensões impostas às torres 2 e 3 para disrupção da cadeia da fase C da torre 2 com resistência de pé da torre 2 igual a 60Ω utilizando a curva sincronizada.

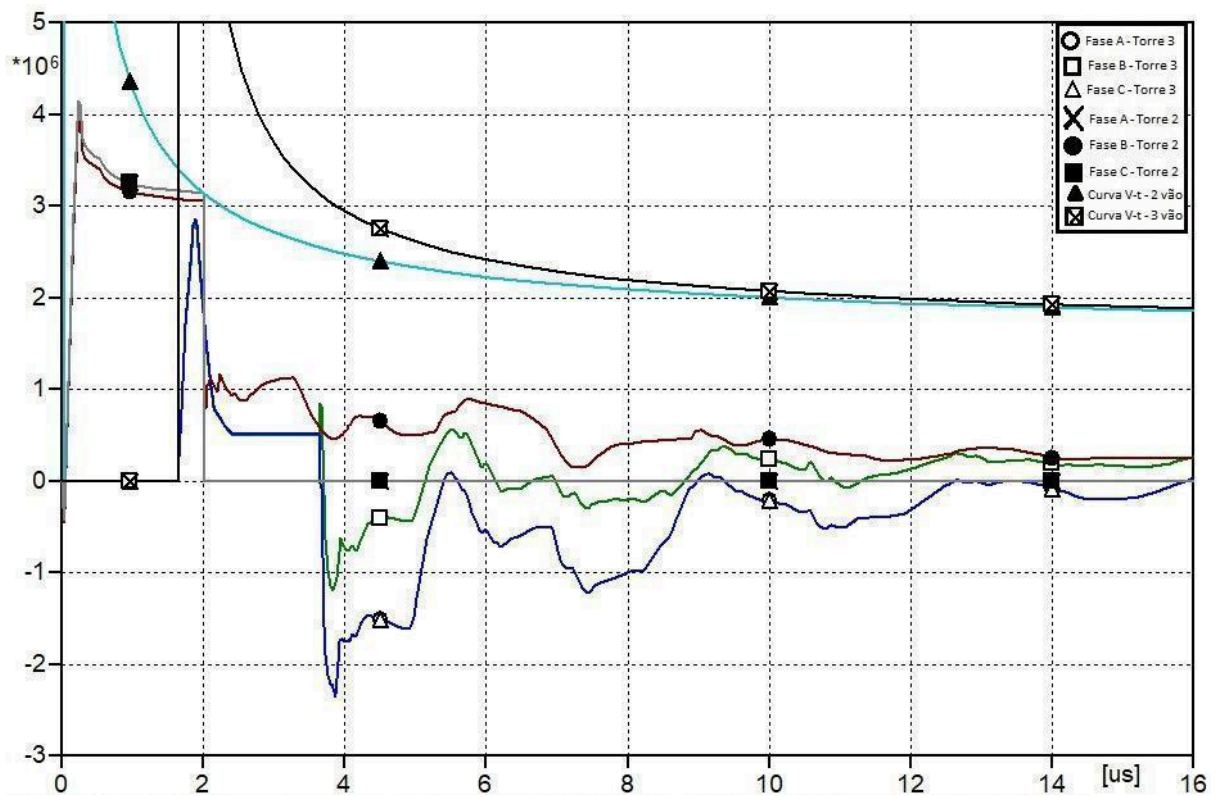


Fonte: Elaborada pelo autor.

Quando há um aumento de 16 A na corrente crítica que causou a disrupção na fase C da torre 2, a cadeia de isoladores da fase A também sobre com o mesmo fenômeno. A amplitude desta corrente chegou ao valor de $113,714 \text{ kA}$.

Na Figura A.16 estão as curvas de sobretensão das fases A, B e C das torres 2 e 3 e suas curvas de suportabilidade sincronizadas. Nela, é possível ver o momento em que as fases A e C decaem à zero.

Figura A.17 - Sobretensões impostas às torres 2 e 3 para disrupção das cadeias das fases A e C da torre 2 com resistência de pé da torre 2 igual a 60Ω utilizando a curva sincronizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em virtude de suas notáveis semelhanças com o caso A.1, os casos 3 e 4 da seção de resultados não serão replicados neste APÊNDICE.