



CARACTERIZAÇÃO DE CADEIA DE ISOLADORES DE ULTRA ALTA TENSÃO PARA TORRES DE TRANSMISSÃO DE CORRENTE CONTÍNUA

Mayara Cunha Cagido

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

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Rio de Janeiro
Junho de 2019

CARACTERIZAÇÃO DE CADEIA DE ISOLADORES DE ULTRA ALTA
TENSÃO PARA TORRES DE TRANSMISSÃO DE CORRENTE CONTÍNUA

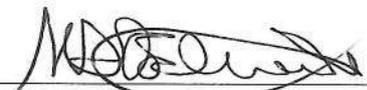
Mayara Cunha Cagido

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:


Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.


Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.


Prof. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JUNHO DE 2019

Cagido, Mayara Cunha

Caracterização de Cadeia de Isoladores de Ultra Alta Tensão para Torres de Transmissão de Corrente Contínua/Mayara Cunha Cagido. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XIV, 133 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 104 – 106.

1. Impulso Atmosférico. 2. Circuitos Elétricos. 3. Ultra Alta Tensão. I. Lima, Antonio Carlos Siqueira de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

À minha querida avó, Juracy.

Agradecimentos

Agradeço a Deus e Nossa Senhora pela força durante esta caminhada e conclusão deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Margareth Cunha Cagido e Mario Cezar Ribas Cagido, por toda base na minha formação. O suporte incondicional que me proporcionaram fez toda diferença nos obstáculos que enfrentei.

À minha irmã, Mayra Cunha Cagido, pelo apoio, por ser minha melhor amiga e por acreditar no meu trabalho, sempre com muito carinho e incentivo.

Ao meu namorado, Rafael Mazza Buchmann, por estar ao meu lado em todos os momentos e ser meu grande exemplo de determinação. Um grande companheiro, que me disse certa vez: "Não há nada no mundo que você não seja capaz de fazer".

Aos meus avós, Juracy Ribas Cagido (*in memoriam*) e Armando Cagido (*in memoriam*), por serem meus principais incentivadores nos estudos.

À minha sogra, Vera Lúcia Mazza Buchmann, pelas palavras de apoio.

Agradeço meu professor e orientador, Antonio Carlos Siqueira de Lima, por todo ensinamento, amizade, dedicação e apoio nos momentos difíceis. É um grande amigo, que me acompanha desde a graduação.

Aos membros da banca, Antonio Carlos Ferreira e Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, por participarem da banca examinadora desta dissertação e por toda contribuição.

Aos amigos do Cepel, pelo apoio na elaboração deste trabalho, realização de ensaios e esclarecimento de dúvidas. O apoio fornecido a este trabalho foi fundamental para sua concretização, por isso, agradeço especialmente ao diretor Orsino, aos chefes de departamento Alberto Junqueira, Alexandre Neves e Maurício Lisboa, aos funcionários: Lilian Ferreira, Francisco Eduardo, Flávio Barbosa, Jorge Ribeiro, Carlos Kleber, João Clávio, Rogério Azevedo, Ricardo Wesley e toda equipe.

Ao Cepel, pela oportunidade de cursar o Mestrado.

Aos colegas da Coppe, pelas experiências compartilhadas e momentos de estudo.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CARACTERIZAÇÃO DE CADEIA DE ISOLADORES DE ULTRA ALTA TENSÃO PARA TORRES DE TRANSMISSÃO DE CORRENTE CONTÍNUA

Mayara Cunha Cagido

Junho/2019

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho apresenta um estudo sobre a suportabilidade dielétrica da cadeia de isoladores de ultra alta tensão para torres de transmissão de corrente contínua, focando na análise de formas de onda de tensão medidas com a aplicação de impulsos atmosféricos, a partir das formulações para o *Leader Progression Model* - LPM.

Descrita toda a fundamentação teórica do processo da descarga, os tipos de impulsos de tensão, parâmetros de tempo relevantes na execução de ensaios elétricos e representação das formulações que descrevem o processo de disrupção baseado no LPM, foi possível ter o embasamento necessário para a realização do ensaio proposto.

Com os resultados experimentais, obtidos com a aplicação de impulsos atmosféricos, realizou-se então uma comparação entre esses dados e as equações desenvolvidas para o LPM. Também foram feitos ensaios com impulsos de manobra e medição de corrente do laboratório de Ultra Alta Tensão - UAT para complementar a pesquisa e promover um maior conhecimento da operação do laboratório.

Os experimentos realizados possibilitaram a obtenção de informações importantes relacionadas a cadeia de isoladores, como os parâmetros de tempo dos resultados experimentais, relação entre esses resultados e cálculos para outros tipos de espaçamentos de ar, complexidade de execução e medição de ensaio, contribuindo para a pesquisa e desenvolvimento do laboratório UAT do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel, único na América Latina.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ULTRA HIGH VOLTAGE INSULATORS STRING CHARACTERIZATION IN DIRECT CURRENT TRANSMISSION TOWERS

Mayara Cunha Cagido

June/2019

Advisor: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Department: Electrical Engineering

This work presents a study about the withstand characteristics of a ultra high voltage insulators string in direct current transmission towers, focusing on the voltage waveforms analysis measured throughout lightning impulses, based on the Leader Progression Model - LPM.

By describing the study of the discharge process, voltage impulse types, relevant time parameters of electrical tests and equations that describe the LPM-based disruption process, it was possible to gather the necessary knowledge for the realization of this work.

With the experimental results, obtained with the application of lightning impulses, it was possible to compare the data and the formulations developed for the LPM. Tests with switching impulses and current measurements of the Ultra High Voltage laboratory - UHV at Electrical Energy Research Center - Cepel were also performed to improve the research and to promote a better understanding of the operation of the laboratory.

The tests performed provided important information about the insulators string, like the time parameters of the experimental results, their relation with the calculations for other types of air gaps and the complexity of performance and test measurements, contributing to the research and development of the UHV Laboratory, unique in Latin America.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Siglas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Organização do trabalho	4
2 Estudo sobre impulsos de tensão em laboratório	6
2.1 Desenvolvimento de uma descarga elétrica	7
2.2 Impulsos de tensão simulados em laboratório	10
2.2.1 Impulso atmosférico	11
2.2.2 Impulso de manobra	16
2.3 Impulsos de corrente simulados em laboratório	17
2.3.1 Impulso de corrente exponencial	18
2.3.2 Impulso de corrente retangular	18
2.4 Tipos de modelagens para impulsos de tensão	20
2.4.1 Curvas V_{xt}	20
2.4.2 <i>Disruptive effect</i> - DE	23
2.4.3 <i>Leader progression model</i> - LPM	25
2.5 A Evolução do LPM	29
3 Ensaios elétricos realizados	38
3.1 Ajustes realizados e dificuldades	39
3.1.1 Condições ambientais	39
3.1.2 Necessidade de equipamentos específicos na montagem do circuito	40
3.1.3 Necessidade de incluir os ensaios elétricos na programação do laboratório	41

3.1.4	Alteração das configurações do gerador de impulsos e tipos de impulso	42
3.1.5	Dificuldades apresentadas pelo gerador de impulsos	43
3.1.6	Dificuldade de escolher um transformador de corrente de medição adequado	43
3.1.7	Disponibilidade de cabos longos	45
3.1.8	Montagens e desmontagens diárias	45
3.1.9	Alto nível de ruído por ondas refletidas	46
3.2	O laboratório de Ultra Alta Tensão	46
3.3	Equipamentos utilizados nos ensaios elétricos	48
3.3.1	Gerador de impulsos	48
3.3.2	Divisor de tensão	57
3.3.3	Aquisição de dados	59
3.4	Montagem do ensaio	60
3.5	Ensaio realizado	62
3.5.1	Ensaio com Impulso de manobra	63
3.5.2	Ensaio com impulso atmosférico	65
4	Análise dos resultados	66
4.1	Impulso de manobra	67
4.1.1	<i>Up and down</i> - polaridade positiva	67
4.1.2	<i>Up and down</i> - polaridade negativa	68
4.2	Impulso atmosférico	70
4.2.1	Medições de tensão	71
4.2.2	Cálculos dos parâmetros do LPM	78
4.2.3	Medições de corrente	82
5	Conclusões e recomendações	100
5.1	Trabalhos futuros	102
	Referências Bibliográficas	104
A	Cálculos feitos no Mathematica	107

Lista de Figuras

2.1	Esquema do desenvolvimento de uma descarga elétrica.	8
2.2	Efeito corona nas linhas de transmissão e eletrodo energizado da cadeia de isoladores.	9
2.3	Descarga elétrica.	10
2.4	Impulso atmosférico.	12
2.5	Impulso de tensão pleno.	13
2.6	Impulso de tensão cortado na cauda.	15
2.7	Impulso de tensão de manobra.	17
2.8	Impulso de corrente exponencial.	18
2.9	Impulso de corrente retangular.	19
2.10	Tipos de configurações de <i>gaps</i> : (a) - Ponta-plano, (b) - ponta-ponta e (c) - esfera-esfera.	21
2.11	Curva característica tensão x tempo.	22
2.12	<i>Disruptive effect</i> - Método de integração.	25
2.13	Evolução temporal do <i>leader</i> considerado no modelo LPM.	26
3.1	Laboratório UAT do Cepel.	38
3.2	Plataforma aérea.	41
3.3	Içamento com auxílio de guincho e plataforma aérea.	42
3.4	Vista geral do laboratório.	47
3.5	Vista frontal do laboratório.	47
3.6	Vista do interior do gerador de impulsos	50
3.7	Gerador de impulsos	51
3.8	Circuito simplificado do gerador de impulsos	52
3.9	Circuito completo de um gerador de impulsos com mais de um estágio.	54
3.10	Retificador de tensão.	55
3.11	Resistores.	57
3.12	Capacitores.	58
3.13	Divisor de tensão para medição.	58
3.14	Mesa de controle do HiAS.	59
3.15	Sistema de medição via fibra ótica.	60

3.16	Torre de transmissão em corrente contínua.	61
3.17	Esquema do circuito montado.	61
3.18	Foto do circuito de ensaio montado.	62
3.19	Fotos da torre montada e cadeia de isoladores no laboratório UAT . .	63
4.1	Gráfico $U_{50\%}$ x T_p - Polaridade Positiva.	68
4.2	Gráfico $U_{50\%}$ x T_p - Polaridade Negativa.	69
4.3	Gráfico $U_{50\%}$ x T_p - Polaridade Positiva e Negativa.	70
4.4	Oscilogramas de tensão obtidos no ensaio com Impulso Atmosférico - parte 1.	74
4.5	Oscilogramas de tensão obtidos no ensaio com Impulso Atmosférico -parte 2	75
4.6	Oscilogramas de tensão obtidos no ensaio com Impulso Atmosférico - parte 3.	76
4.7	Oscilogramas de tensão obtidos no ensaio com Impulso Atmosférico - parte 4.	77
4.8	Oscilograma de tensão 28.	78
4.9	Gráficos das velocidades do <i>leader</i> obtidos a partir das equações de Wagner, Suzuki, Shindo, Pignini, Motoyama e Wang.	82
4.10	Pontos de medição da corrente.	83
4.11	Corrente do GI medida no osciloscópio e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.	84
4.12	Corrente do GI medida no osciloscópio e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.	85
4.13	Corrente do divisor de tensão medida no osciloscópio e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.	86
4.14	Corrente do divisor de tensão medida no osciloscópio e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.	87
4.15	Corrente do GI medida no osciloscópio e TC 50 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.	88
4.16	Corrente do GI medida no osciloscópio e TC 50 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.	89
4.17	Corrente do divisor de tensão medida no osciloscópio e TC 20 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.	90
4.18	Corrente do divisor de tensão medida no osciloscópio e TC 20 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.	91
4.19	Corrente do gerador de impulso medida com fibra ótica e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.	92

4.20	Corrente do gerador de impulso medida com fibra ótica e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.	93
4.21	Corrente do divisor de tensão medida com fibra ótica e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.	94
4.22	Corrente do divisor de tensão medida com fibra ótica e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.	95
4.23	Corrente do gerador de impulso medida com fibra ótica e TC 50 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.	96
4.24	Corrente do gerador de impulso medida com fibra ótica e TC 50 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.	97
4.25	Corrente do divisor de tensão medida com fibra ótica e TC 20 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.	98
4.26	Corrente do divisor de tensão medida com fibra ótica e TC 20 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.	99

Lista de Tabelas

2.1	Equações para cálculos do tempo de desenvolvimento do <i>streamer</i> . . .	34
2.2	Equações para cálculos do tempo de desenvolvimento do <i>streamer</i> . . .	35
2.3	Equações para cálculos do tempo de desenvolvimento do <i>leader</i>	36
2.4	Equações para cálculos do tempo de desenvolvimento do <i>leader</i>	37
3.1	Informações nominais do TC modelo 1423.	44
3.2	Informações nominais do TC modelo 3025.	44
3.3	Informações nominais do TC modelo 301X.	45
3.4	Informações nominais do retificador de tensão.	55
4.1	Valores de U50% na polaridade positiva para diferentes ajustes de tempo de frentes.	67
4.2	Valores de U50% na polaridade negativa para diferentes ajustes de tempo de frentes.	69
4.3	Medições feitas no ensaio de ajuste do método <i>Up and Down</i>	72
4.4	Parâmetros aplicados no circuito de ensaio.	72
4.5	Medição das condições atmosféricas.	72
4.6	Informações sobre a cadeia de isoladores.	72
4.7	Valores do ensaio <i>Up and Down</i>	73
4.8	Comparação entre equações de Wagner e resultados experimentais. . .	79
4.9	Comparação entre equações de Suzuki e resultados experimentais. . .	79
4.10	Comparação entre equações de Shindo e resultados experimentais. . .	80
4.11	Comparação entre equações de Pigini e resultados experimentais. . . .	80
4.12	Comparação entre equações de Motoyama e resultados experimentais. .	81
4.13	Comparação entre equações de Wang e resultados experimentais. . . .	81
4.14	Comparação entre equações de Wagner, Suzuki, Shindo, Pigini, Motoyama, Wang e resultados experimentais.	81

Lista de Siglas

CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica

CFO – Critical Flashover Voltage

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro

DE – Disruptive Effect

HiAS – High Resolution Impulse Analyzing System

LPM – Leader Progression model

TC – Transformador de corrente

UAT – Ultra Alta Tensão

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Capítulo 1

Introdução

A transmissão de energia é uma das grandes áreas da engenharia, importante para o crescimento da rede elétrica, que demanda cada vez maiores distâncias entre os centros de geração de energia e os consumidores finais.

Nesse processo de expansão, dois relevantes temas motivam esse trabalho: Transmissão de energia em corrente contínua e a necessidade de desenvolver equipamentos capazes de operar em ultra alta tensão (UAT).

No desenvolvimento de equipamentos, as especificações elétricas são determinadas a partir da avaliação do isolamento dielétrico diante da ocorrência de perturbações no sistema causadas por situações como descargas atmosféricas, desvios de manobra (permissão ou interrupção de corrente), rejeição de carga, entre outros.

Considerando a necessidade de avaliação dos equipamentos e de transmissão de grande quantidade de energia, é crescente o número de pesquisas sobre tecnologias em UAT sendo realizadas no Brasil que, recentemente, ganhou grande notoriedade com a construção do laboratório de Ultra Alta Tensão (UAT) no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel e da usina hidrelétrica de Belo Monte.

A existência de um laboratório de tamanha especificidade permite a realização de pesquisas para elevados níveis de tensão, com aplicações de impulsos que simulam sobretensão de origem atmosférica e de manobra e a obtenção de resultados experimentais que podem caracterizar diferentes estruturas e equipamentos.

Neste trabalho, foi avaliada a suportabilidade dielétrica da cadeia de isoladores

de uma torre de corrente contínua no laboratório UAT do Cepel. Para isso, entender tanto o mecanismo de uma descarga elétrica quanto os modelos que descrevem esse processo foram fundamentais. Então, desenvolveu-se o interesse pelo estudo de modelo recente, conhecido como *Leader Progression Model* - LPM, utilizado na avaliação da suportabilidade de espaçamentos de ar longos, submetidos a impulsos atmosféricos.

Embora esse modelo seja bastante promissor, possui poucas informações experimentais sobre a utilização de isoladores, *gaps* maiores que 5 metros e aplicações acima de 500 kV. Nas pesquisas realizadas para este trabalho, foram encontrados estudos para *gaps* sem isoladores [1–4] e cadeia de isoladores menores que a considerada nesta dissertação, entre aproximadamente 1 e 4 metros [5, 6], para níveis de extra alta tensão. Dessa forma, observou-se uma grande oportunidade de realizar um trabalho com o propósito de analisar o desempenho de uma cadeia de isoladores de 7,8 metros, para níveis de ultra alta tensão, através da utilização do método LPM.

Alguns ensaios elétricos com aplicações de impulsos de manobra e medição de corrente foram realizados para complementar a pesquisa e a análise realizada.

Neste trabalho foram feitas:

- A abordagem dos conceitos dos equipamentos utilizados no laboratório UAT, desde o gerador de impulsos até a cadeia de isoladores estudada;
- A descrição dos conceitos teóricos envolvidos, desde a formação de um impulso até a avaliação dos impactos de sua aplicação na suportabilidade dielétrica de uma cadeia de isoladores, além dos ensaios elétricos realizados para análise de resultados e todas as informações obtidas ao longo desta pesquisa;
- A análise dos tipos de modelagens existentes e suas relações com os resultados do ensaio com impulsos atmosféricos.

1.1 Motivação

A avaliação da suportabilidade dielétrica de linhas de transmissão e equipamentos é a principal área de atuação do laboratório de Ultra Alta Tensão.

Os resultados experimentais em laboratório, obtidos principalmente através da aplicação de impulsos atmosféricos, permitem descrever o comportamento transitório na caracterização dielétrica de uma determinada estrutura exposta a elevados níveis de tensão, por meio de diferentes tipos de modelagens.

Essas modelagens são de grande interesse na área de transmissão de energia elétrica, pois possibilitam avaliar os impactos de sobretensões no sistema elétrico e obter um maior conhecimento das propriedades elétricas de um equipamento, viabilizando projetos que consigam suportar grandes solicitações de energia. Contudo, muitos trabalhos realizados não consideram níveis de tensão tão elevados e são baseados somente em espaçamentos de ar, sem considerar isoladores em seus resultados experimentais, o que torna suas formulações analíticas para UAT (que calculam os tempos e velocidades nas etapas de formação da descarga elétrica) inconclusivas.

Por ser o único laboratório de ultra alta tensão na América Latina, pesquisas aplicadas nesta área encontram-se em fase de crescimento e aprimoramento no Brasil. Dessa forma, a realização de um estudo nesse ramo, que permite agregar um maior conhecimento tanto para o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel quanto para a aplicação na operação do laboratório, possui uma considerável importância. Este trabalho apresenta os primeiros ensaios experimentais realizados no laboratório UAT do Cepel, com a finalidade de pesquisa, e relata todos os resultados de medição obtidos. Além disso, consolidou-se a integração entre Cepel e a COPPE, analisando os aspectos transitórios dos fenômenos simulados em laboratórios para enriquecer o campo da pesquisa e desenvolvimento acadêmico no país.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação de mestrado é avaliar o desempenho dielétrico de uma cadeia com 39 isoladores de um sistema de transmissão de energia elétrica, presente no Cepel, em Ultra Alta Tensão diante de impulsos atmosféricos padronizados através de procedimentos teóricos e resultados experimentais.

Este trabalho contribui ainda:

1. Para a realização de ensaios elétricos com impulsos de manobra, com o propósito de adquirir um maior conhecimento das técnicas de operação do laboratório UAT, e investigar a influência de sua aplicação na caracterização de uma cadeia de isoladores;
2. Na comparação de diferentes métodos de aplicação do *Leader Progression Model - LPM*, considerando as formas de ondas que correspondem a sobretensões de origem atmosférica.

O objetivo deste trabalho é particularmente importante, tendo em vista que embora vários métodos experimentais e analíticos tenham sido desenvolvidos ao longo dos últimos anos para a modelagem de descargas atmosféricas em *gaps* longos, poucas informações foram discutidas para cadeia de isoladores e para níveis de ultra alta tensão, tendo seu comportamento ainda pouco explorado.

Observação: É importante ressaltar que os ensaios de impulso de manobra foram realizados com o propósito de compreender o funcionamento do laboratório e de pesquisar sua atuação na caracterização da cadeia. Para comparação das diferentes aplicações do *LPM* e obtenção de parâmetros, foram utilizadas formas de onda referentes somente a impulsos atmosféricos.

1.3 Organização do trabalho

O capítulo 2 descreve o conceito teórico envolvido pelo processo de formação de uma descarga elétrica e diferentes tipos de impulsos. Além disso, apresenta também os

aspectos definidos para cada impulso, os fundamentos e princípios contidos em cada etapa dos tipos de modelagens propostas para a caracterização de uma disrupção.

A apresentação do laboratório de Ultra Alta Tensão, a montagem do circuito considerado e tipos de ensaios elétricos realizados são descritos no capítulo 3. Este capítulo é principalmente importante para o entendimento de como o processo de realização dos ensaios elétricos na cadeia de isoladores demandou grande trabalho e tempo para sua completa realização.

No capítulo 4 são apresentados todos os resultados obtidos nas etapas experimentais (tanto para impulsos de manobra quanto atmosféricos) e os cálculos feitos para cada referência do *Leader Progression Model* citada.

Finalmente, as conclusões desta dissertação e propostas de trabalhos futuros são apresentados no capítulo 5.

Capítulo 2

Estudo sobre impulsos de tensão em laboratório

O sistema elétrico de transmissão pode ser submetido a diversos fenômenos transitórios que podem causar consideráveis impactos na rede elétrica, através da propagação de surtos ao longo da linha de transmissão e equipamentos, caracterizados por elevados níveis de tensão ou corrente.

Os surtos são ondas eletromagnéticas que podem ser representados por uma forma de onda com crescimento muito rápido em um curto período de tempo [7]. Dessa forma, os surtos de tensão podem ocorrer em diversos pontos do sistema, tendo sua origem através de descargas atmosféricas ou por desvios de manobra de chaves seccionadoras e disjuntores [8].

Quando uma perturbação acontece, por exemplo, quando uma descarga atmosférica atinge a linha, ocorre uma mudança súbita tanto nas amplitudes quanto no tempo de duração de tensão e corrente, antes de o sistema retornar para condição estável de funcionamento, que caracteriza um comportamento transitório.

Para verificar o comportamento de equipamentos ou estruturas diante dessas sobretensões é necessário entender o processo físico da descarga. Então, o que ocorre quando um espaçamento de ar (*gap*) é submetido a uma sobretensão?

2.1 Desenvolvimento de uma descarga elétrica

No início do desenvolvimento de uma descarga elétrica, o valor da tensão aumenta até o início do corona, momento em que ocorre a ionização do ar em torno do eletrodo energizado (nenhuma descarga ocorre nesse instante), conforme Figura 2.1.

Em seguida, surge um fenômeno conhecido como inepção de corona, no qual é possível observar a presença de alguns filamentos próximos a região com corona, conhecido como *streamers* (etapa a). Esses filamentos são responsáveis por emitir luzes ultravioletas e começam em um determinado ponto do eletrodo energizado. A partir disso, surge uma sequência entre períodos escuros, com inibição da ionização (ou seja, sem a presença de *streamers*), conhecidos como *dark period*, e aparecimento de outros filamentos de corona. À medida que os *streamers* surgem no *gap* (espaçamento de ar que caracteriza uma distância de isolamento), ondas ionizadas se propagam através do caminho dos *streamers*.

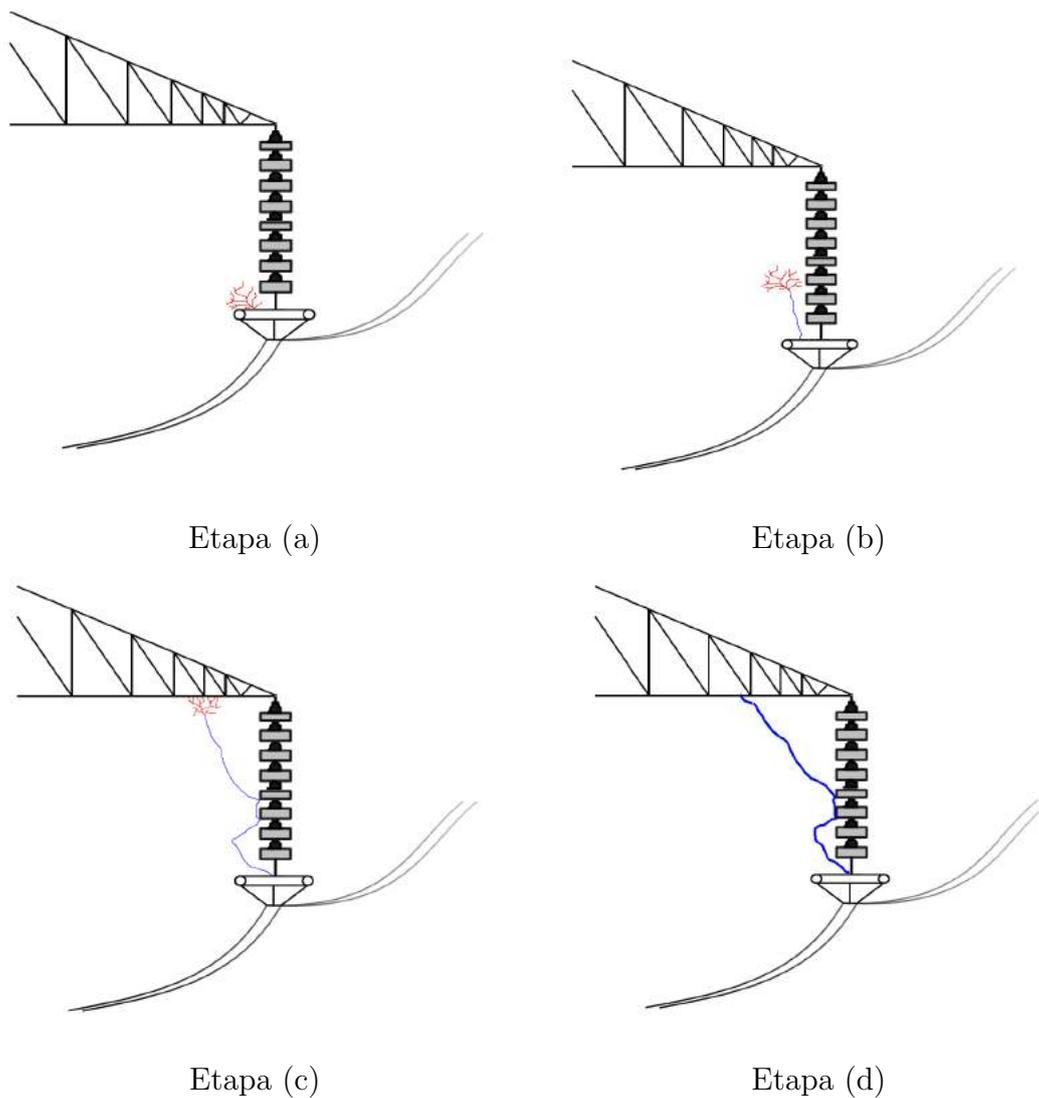


Figura 2.1: Esquema do desenvolvimento de uma descarga elétrica.

Ao final da etapa de desenvolvimento dos *streamers*, quando essas ondas atingem um valor suficientemente alto de tensão, um ligamento comum ao conjunto de *streamers*, denominado *leader*, começa a ser formado (etapa b). Assim, o *leader* é um canal altamente ionizado, com elevada condutividade. A propagação do *leader* ocorre por um caminho caracterizado por diversos términos e recomeços. Devido ao alto nível de campo elétrico na extremidade do *leader*, os *streamers* são mantidos intensos na região fornecendo as condições necessárias para o desenvolvimento do processo de propagação do *leader*.

Quando o *leader* atinge aproximadamente dois terços do comprimento total do *gap*, a velocidade cresce bruscamente causando um processo denominado como salto final (etapa c), caracterizado pela etapa final, a ocorrência da descarga propriamente dita (etapa d). Essa descarga elétrica significa a ruptura do dielétrico, no qual ocorre a perda das propriedades isolantes do ar. Tanto a fase do *streamer*, quanto a fase do *leader*, podem ocorrer em qualquer extremidade do eletrodo.

A Figura 2.2 mostra uma foto do efeito corona nas linhas de transmissão, obtida através da filmagem com uma câmera de alta velocidade, da marca *Phantom*, no laboratório UAT. A Figura 2.3 mostra uma foto de uma ruptura na cadeia de isoladores.



Figura 2.2: Efeito corona nas linhas de transmissão e eletrodo energizado da cadeia de isoladores.



Figura 2.3: Descarga elétrica.

2.2 Impulsos de tensão simulados em laboratório

Antes de entrar em operação, é necessário avaliar os equipamentos de uma linha de transmissão, quanto a tensão suportável sob impulso atmosférico ou de manobra, com o objetivo de melhorar as condições de isolamento e suas especificações de projeto.

Com a ocorrência de sobretensões, os equipamentos são expostos a níveis de tensão mais altos que a nominal do sistema, por isso é importante que sejam capazes de suportar elevadas solicitações de energia [7]. Assim, esses eventos transitórios têm importante relevância na especificação dos elementos do sistema, pois são através deles que é possível dimensionar os níveis de isolamento de cada componente.

O método para realizar essa avaliação é por meio da análise da resposta dos equipamentos a impulsos de tensão simulados em laboratório. Por meio das formas de ondas típicas de descargas atmosféricas e de manobra, foram estabelecidas formas de ondas geradas em laboratório com parâmetros padronizados, sendo especificadas por sua amplitude, frente de onda e por sua cauda para diferenciar cada tipo de impulso [9].

Os próximos tópicos têm o objetivo de promover uma descrição mais detalhada dos tipos de impulsos de tensão que podem ser produzidos em laboratório [10] e dos parâmetros relevantes nas formas de onda, que são os principais conceitos envolvidos neste trabalho.

2.2.1 Impulso atmosférico

O impulso de tensão atmosférico é uma forma de onda produzida em laboratório que possui a função de testar a suportabilidade elétrica de equipamentos contra sobretensões externas, como uma descarga atmosférica, que possam ocorrer no sistema de geração e transmissão de energia.

Este impulso é definido por uma elevada amplitude, na ordem de quilovolts, que ocorre num período muito curto, na ordem de microsegundos. Primeiramente, o impulso cresce de forma íngreme e decai mais lentamente, sendo a forma de onda resultante composta pela junção de duas funções exponenciais [8].

O impulso atmosférico padronizado possui um tempo de frente de $1,2 \mu s$ e um tempo de cauda de $50 \mu s$, conforme norma ABNT [11]. Por essa razão, o impulso atmosférico é conhecido como $1,2/50 \mu s$. A tolerância para essa forma de onda é de $\pm 30\%$ para tempo de pico e $\pm 20\%$ para o tempo de cauda.

Os ensaios elétricos que utilizam os impulsos atmosféricos (Figura 2.4), fornecem uma estimativa dos valores reais da suportabilidade de equipamentos.

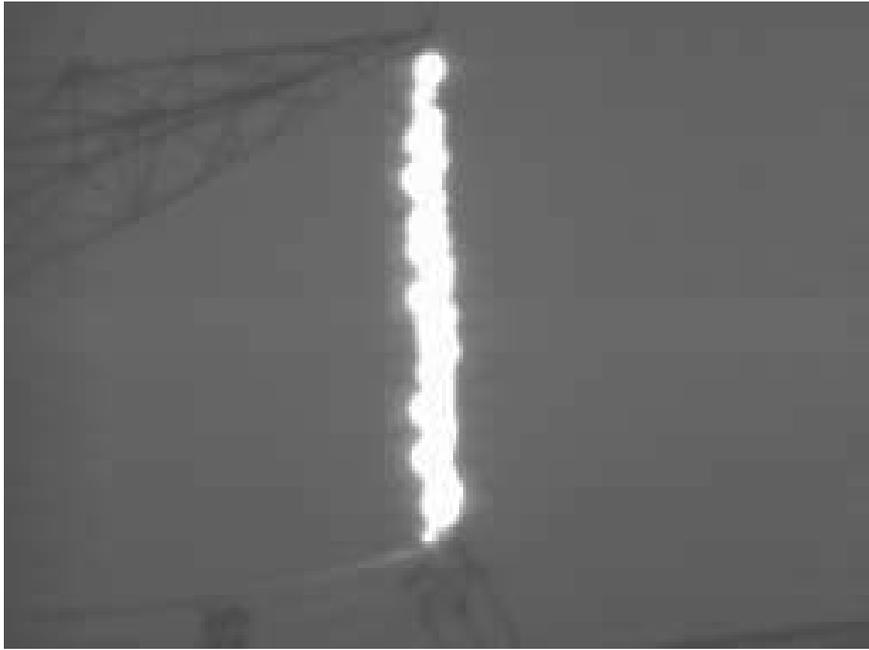


Figura 2.4: Impulso atmosférico.

2.2.1.1 Impulso pleno padrão para ensaio de impulso atmosférico

A principal característica de um impulso de tensão pleno é que ele não sofre uma queda repentina de tensão, causada por uma descarga disruptiva associada à falha do isolamento da cadeia de isoladores diante de uma perturbação elétrica. Um impulso produzido em laboratório é como mostra a Figura 2.5.

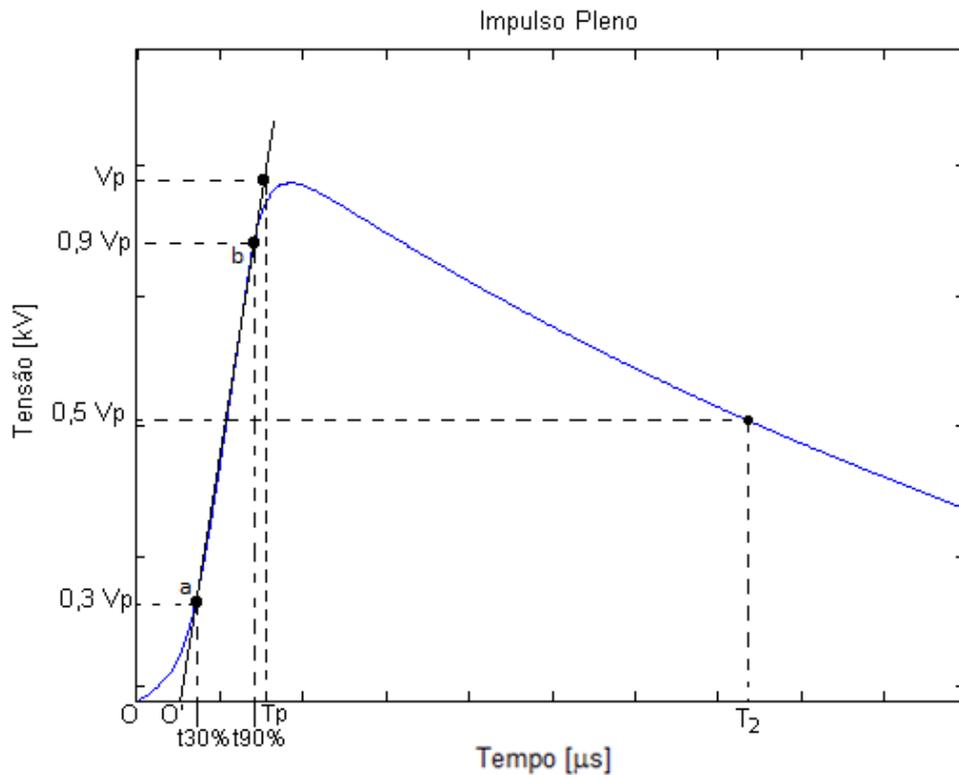


Figura 2.5: Impulso de tensão pleno.

As características do impulso pleno são:

Tempo de frente (T_1) - É estabelecido como o instante entre a origem virtual O' e o ponto de interseção da reta que contém os pontos a e b com a reta que equivale ao valor de pico [11], conforme Figura 2.5. É representado por:

$$T_1 = 1,67 \times (T_{90\%} - T_{30\%}) \quad (2.1)$$

Sendo:

$T_{90\%}$ - tempo correspondente ao instante que o impulso atinge 90% da tensão

de pico (ponto b).

$T_{30\%}$ - tempo correspondente ao instante que o impulso atinge 30% da tensão de pico (ponto a).

Esses valores são resultados de uma semelhança de triângulos que pode ser observada na Figura 2.5 (triângulos $O' a T_{30\%}$, $O' b t_{90\%}$ e $O' V_p T_p$);

Tempo de cauda (T_2) - Conhecido como o intervalo de tempo entre a origem virtual (O') e o instante equivalente à metade do valor de crista na cauda da onda;

Tempo de pico (T_p) - Corresponde ao tempo que a onda atinge o valor do pico de tensão;

Origem virtual (O') - Ponto definido na interseção entre o eixo x e a reta constituída pelos instantes $T_{30\%}$ e $T_{90\%}$ (ponto a e b, respectivamente);

Pico de tensão (V_p) - Tensão máxima visualizada no impulso de tensão, também conhecida como crista da tensão;

Origem (O) - Instante que o impulso de tensão começa a ser registrado.

2.2.1.2 Impulso cortado na cauda padrão para ensaio de impulso atmosférico

O impulso cortado na cauda possui como característica uma interrupção por uma descarga disruptiva, causando uma queda brusca de tensão até um valor nulo que acontece momentos depois que a forma de onda alcança a amplitude máxima. O momento de disrupção é conhecido como instante de corte, no qual pode haver o surgimento de oscilações, sendo demonstrado na Figura 2.6.

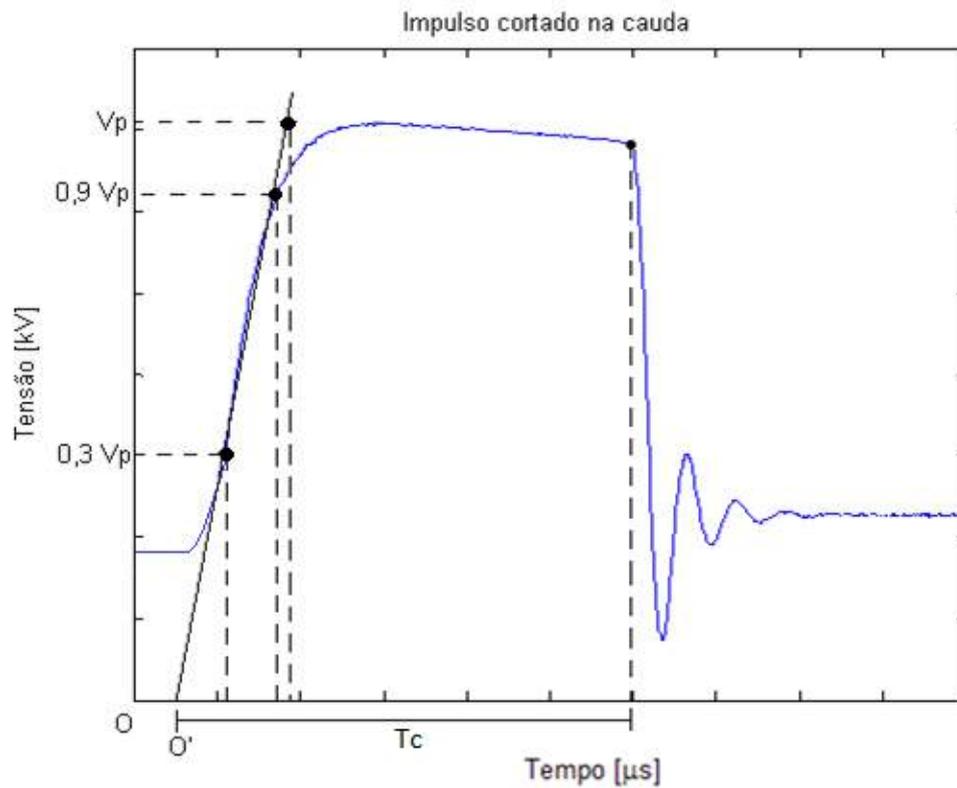


Figura 2.6: Impulso de tensão cortado na cauda.

Tempo de corte (T_c) - Conhecido como o intervalo de tempo entre a origem virtual (O') e o momento que ocorre o corte da onda.

As definições da origem virtual (O'), pico de tensão (V_p) e tempo de frente (T_1) são equivalentes as mencionadas no tópico 2.2.1.1.

2.2.2 Impulso de manobra

O impulso de tensão de manobra é uma forma de onda que simula as operações de manobra realizadas na rede elétrica ou subestações, por equipamentos, como chaves seccionadoras e disjuntores.

O impulso pleno de manobra é similar ao atmosférico em relação a superposição de duas funções exponenciais, porém as constantes de tempo no impulso de manobra são consideravelmente maiores. De acordo com os parâmetros de tempo elevados, a oscilação no início da forma de onda é desprezada e o impulso tem início na origem real em O , diferente do atmosférico, que tem início na origem virtual O' .

O impulso de manobra é caracterizado, principalmente, por dois parâmetros de tempo: o tempo de pico (T_p), representado entre os instantes de origem real O e amplitude máxima de tensão, e tempo até meio valor (T_2), sendo o tempo entre o instante O e o instante em que a tensão na cauda do impulso atinge 50% do valor de pico. Além desses parâmetros, existe também o tempo T_d , que é o intervalo de tempo durante o qual a tensão ultrapassa 90 % do valor máximo. A Figura 2.7 mostra um impulso de manobra com esses parâmetros indicados.

Apesar da similaridade, vale ressaltar uma importante diferença entre os tipos de impulsos: impulsos com tempo de frente menor que $20 \mu s$ são considerados atmosféricos, caso contrário são considerados impulsos de manobra [9].

O impulso padronizado para manobra tem a forma $250/2500 \mu s$. A tolerância para tempo de pico é de $\pm 20\%$ e para tempo de meia onda é $\pm 60\%$.

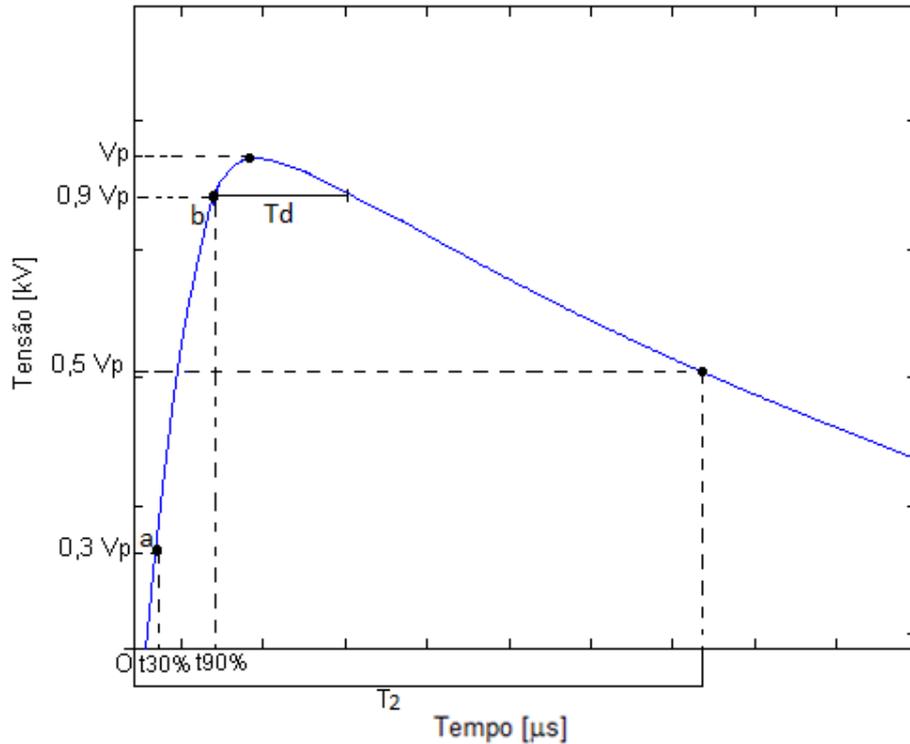


Figura 2.7: Impulso de tensão de manobra.

2.3 Impulsos de corrente simulados em laboratório

Além da necessidade de avaliar os equipamentos em relação ao comportamento dielétrico diante de impulsos de tensão, alguns ensaios elétricos são realizados com a finalidade de analisar a suportabilidade desses equipamentos perante a aplicação de impulsos de corrente. Os ensaios elétricos com impulsos de corrente têm o objetivo de simular os impactos causados por descargas atmosféricas e curto circuitos.

Embora os impulsos de corrente não sejam abordados ao longo da realização de ensaios experimentais desse trabalho, nos próximos tópicos serão apresentados os tipos existentes e os principais conceitos.

2.3.1 Impulso de corrente exponencial

O impulso de corrente exponencial é uma forma de onda simulada em laboratório, relativamente rápida e com comportamento próximo dos impulsos de tensão apresentados. Os parâmetros relevantes para sua medição são o pico de corrente (I_p), o tempo de frente (T_1) e o tempo de meia onda (T_2).

No caso dos impulsos de corrente, o tempo de frente é o instante entre a origem virtual (O') e a interseção entre as retas que contém 10% e 90% do valor de pico com a reta equivalente ao próprio valor de pico de tensão, conforme Figura 2.8.

O impulso de corrente padronizado tem a forma de onda correspondente a $8/20 \mu s$, com uma tolerância de $\pm 20\%$ para cada parâmetro de tempo.

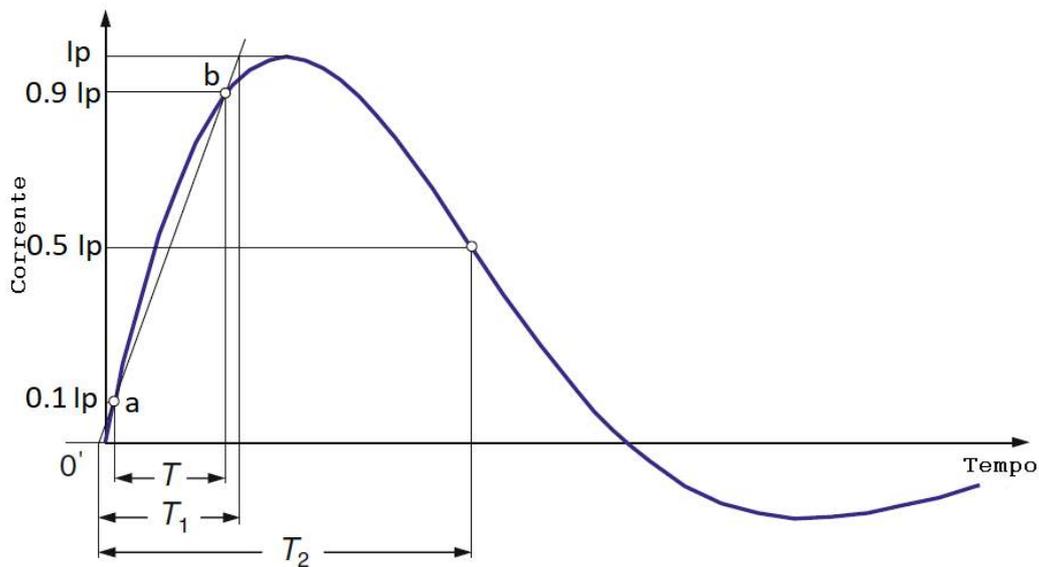


Figura 2.8: Impulso de corrente exponencial. Adaptado de SCHON [9].

2.3.2 Impulso de corrente retangular

Este impulso também é conhecido como impulso de corrente de longa duração, sendo o motivo dos ensaios elétricos com impulsos de corrente retangulares representarem um grande esforço ao equipamento avaliado. Além disso, simula também as componentes de corrente contínua das descargas atmosféricas.

Os parâmetros representativos dessa forma de onda são a corrente de ensaio (correspondente ao valor máximo de corrente), tempo de duração de pico (T_d) e tempo total (T_t), conforme pode ser visto na Figura 2.9.

O tempo de duração de pico é o instante em que a corrente fica igual ou maior que 90% do seu valor e o tempo total é o instante em que a forma de onda fica superior a 10% do valor de corrente, com a condição que $T_t \leq 1,5 T_d$. Este impulso também possui uma tolerância de $\pm 20\%$ para cada parâmetro de tempo, sendo os valores típicos para T_d iguais a 500, 1.000, 2.000 ou até 3.200 μs .

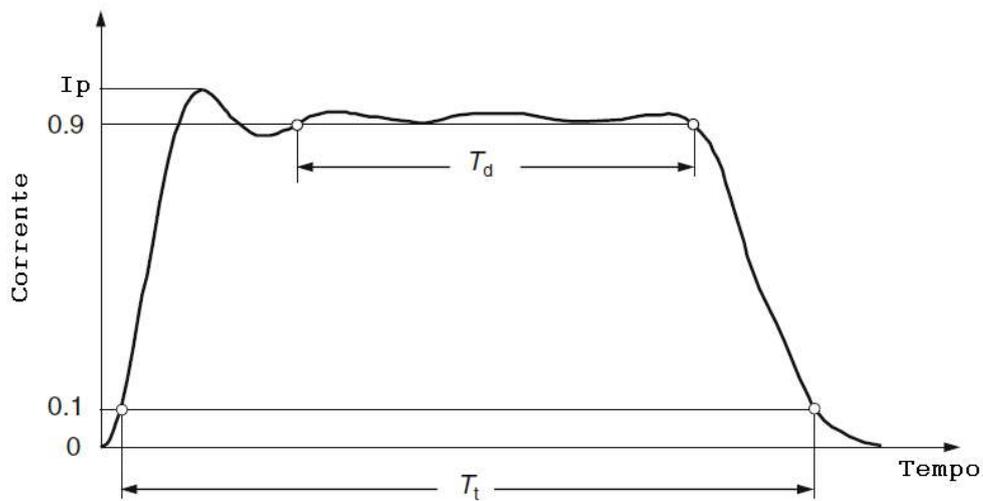


Figura 2.9: Impulso de corrente retangular. Adaptado de SCHON [9].

Existe também a corrente alternada de curta duração, que simula as perturbações causadas por eventos de curto-circuitos no sistema elétrico, simulada por meio de uma forma de onda assimétrica, caracterizada por uma corrente alternada de alta frequência sobreposta a uma componente de corrente contínua transitória [9].

2.4 Tipos de modelagens para impulsos de tensão

Entender e obter informações sobre a suportabilidade de disrupção para *gaps* longos, tornou-se um desafio na utilização do laboratório de Ultra Alta Tensão, considerando que há ainda poucas informações sobre a suportabilidade de *gaps* com isoladores de vidro para os níveis de Ultra Alta Tensão. A maioria dos trabalhos não consideram isoladores em sua formulação, o que é um grande diferencial deste trabalho.

Para descrever o comportamento de uma descarga elétrica e obter informações relevantes na análise da suportabilidade dielétrica do ar para *gaps* longos existem diferentes formas. O método convencional consiste em determinar as curvas características de tensão por tempo ($V \times t$), sendo utilizadas durante muitos anos. A partir das curvas V_{xt} é possível encontrar o tempo em que ocorre a disrupção de uma estrutura considerada a partir da tensão que representa a probabilidade de 50% do isolamento suportar a ocorrência da descarga, conhecida como $U_{50\%}$ [11].

Outros modelos como o *Disruptive Effect*, foram desenvolvidos para descrever o comportamento de uma descarga elétrica a partir de procedimentos analíticos, para previsão da tensão suportável da estrutura, em que por meio de formulações é possível determinar parâmetros importantes do estudo da suportabilidade dielétrica como a tensão máxima suportada por cada equipamento.

Um modelo físico baseado no desenvolvimento e na física envolvida em uma descarga elétrica, conhecido como *Leader Progression Model*, está sendo utilizado principalmente em trabalhos que analisam os efeitos de um impulso atmosférico na aplicação de diferentes tipos de *gaps*, linhas de transmissão e isoladores.

Nas próximas subseções, esses modelos mais utilizados na avaliação de suportabilidade dielétrica serão detalhados.

2.4.1 Curvas V_{xt}

As curvas características V_{xt} (Figura 2.11) relacionam as tensões críticas $U_{50\%}$ entre os dois terminais de um determinado *gap* ou cadeia de isoladores com os tempos em que ocorrem as disrupções. Essas curvas podem ser obtidas de forma experimental,

aplicando diferentes níveis de tensões em uma determinada estrutura e obtendo assim diferentes tempos de disrupção, ou a partir de um modelo matemático, através de equações de métodos de integração (*Disruptive Effect*).

O comportamento das curvas V_{xt} é afetado por muitos fatores, o que torna estudo bastante amplo, considerando as diferentes configurações das estruturas para ensaio utilizadas ao longo dos anos. Fatores como:

- **Tipo de *gap*:** Ponta -plano, ponta-ponta, esfera-esfera ou com isoladores (Figura 2.10);
- **Comprimento do *gap* e sua geometria;**
- **Impulso aplicado:** impulsos com tempo de frente diferentes dos valores normalizados influenciam as curvas V_{xt} ;
- **Polaridade do impulso.**

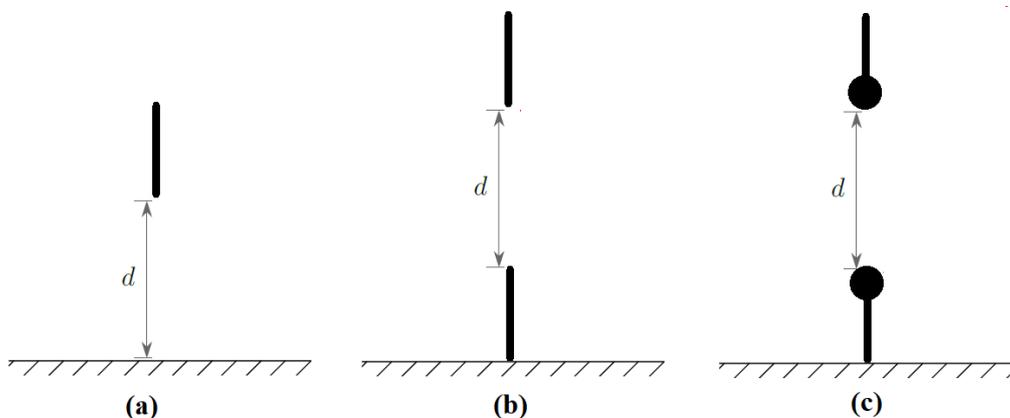


Figura 2.10: Tipos de configurações de *gaps*: (a) - Ponta-plano, (b) - ponta-ponta e (c) - esfera-esfera.

Porém, o conhecimento do comportamento da suportabilidade diante de um impulso atmosférico de acordo com as tolerâncias definidas por norma [11, 12] (impulsos padronizados), não é suficiente para prever o perfil de suportabilidade do *gap* exposto a qualquer tipo de sobretensão. Por isso, a curva característica V_{xt} é adequada

somente para relacionar a amplitude do impulso padronizado com o tempo em que ocorre a disrupção. Para um outro tipo de sobretensão, impulsos não-padronizados, é necessário um estudo mais amplo, sendo que a determinação dos parâmetros de disrupção podem ser obtidos de acordo com dois modelos conhecidos como *Disruptive Effect* e *Leader Pregression Model*.

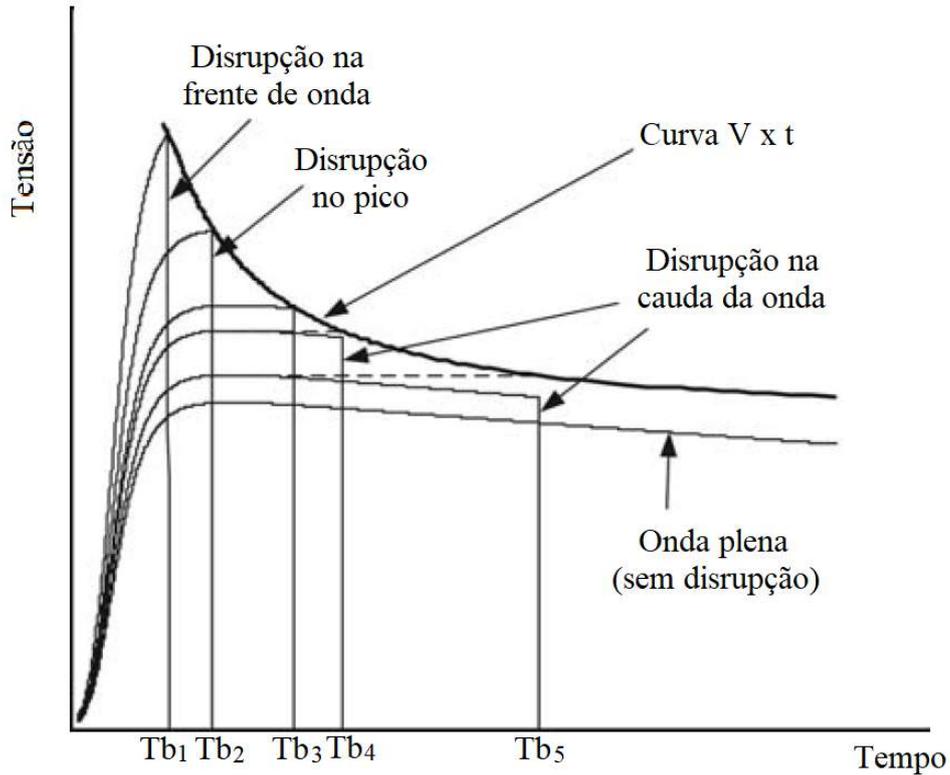


Figura 2.11: Curva característica tensão x tempo. Adaptado de MARTINEZ-VELASCO [13].

Através da equação proposta por DARVENIZA [6, 14, 15], é possível obter a tensão prevista da curva V x t (tensão $U_{50\%}$):

$$V_{Vxt} = \left(A + \frac{B}{t_b^{0,75}} \right) d \quad (2.2)$$

sendo as constantes A e B estimadas a partir da extrapolação empírica das curvas V x t [14], d a distância do *gap* e t_b o tempo de disrupção.

2.4.2 *Disruptive effect* - DE

O modelo conhecido como *Disruptive Effect* - DE é um método analítico desenvolvido para prever as curvas características Vxt de um determinado tipo de *gap* ou estrutura. Primeiramente, Witzke e Bliss [16] desenvolveram um método de integração, em 1950, baseado no fato de que o processo de disrupção de um *gap* ocorre quando a tensão aplicada ultrapassa uma tensão mínima de referência U_o e com a proposta de avaliar a capacidade de suportabilidade a impulsos padronizados ou não padronizados. No caso desse trabalho, a tensão de referência U_o indica o quanto a cadeia de de isoladores pode suportar sem que ocorra uma disrupção elétrica de fato. Outro ponto que deve ser considerado é o tempo que decorre entre situações de existir uma tensão aplicada suficientemente alta para causar a disrupção e a ocorrência da disrupção propriamente dita, já que esse parâmetro também influencia as características dielétricas da cadeia de isoladores. Com isso, Witzke e Bliss definiram que o termo *Disruptive Effect* seria igual a:

$$DE = \int_{t_o}^{t_b} [U(t) - U_o]^K dt \quad (2.3)$$

sendo $U(t)$ a tensão aplicada em [kV], U_o a tensão mínima de referência em [kV] antes que o processo de disrupção comece ocorrer, t_o o tempo em que a tensão aplicada ultrapassa a tensão de referência pela primeira vez em [μ s], t_b o tempo em que ocorre a disrupção em [μ s], DE o valor de efeito disruptivo em [kV μ s] e \mathbf{K} uma constante empírica.

Nesse modelo, é possível observar que a constante \mathbf{K} possui uma função importante na descrição do comportamento da suportabilidade, já que é esse parâmetro que provavelmente vai diferenciar a suportabilidade de cada estrutura. Considerando que a constante k depende da geometria da estrutura, do processo de disrupção e da polaridade do impulso, é possível calcular um conjunto de parâmetros \mathbf{K} , DE e U_o que melhor caracterizam a suportabilidade dielétrica de cada arranjo específico de isoladores, já que a partir desses parâmetros é possível obter os pontos de tensão e tempo da curva Vxt obtida através desse método.

Posteriormente, Kind (1958) [17] propôs um modelo simplificado, no qual assumia-se que $\mathbf{K} = 1$, conforme Equação 2.4 e Figura 2.12.

$$DE = \int_{t_o}^{t_b} [U(t) - U_o] dt \quad (2.4)$$

Dessa forma, era possível obter uma curva Vxt calculada mais próxima da curva Vxt experimental. Além disso, o valor da tensão de referência U_o poderia ser comparada a tensão crítica (CFO) dos isoladores. É importante ressaltar, que essa aproximação deu origem ao termo *Equal-Area Criterion*. Esse termo indica que:

Para impulsos plenos: as áreas formadas entre o instante que a tensão aplicada ultrapassa a tensão de referência U_o e o instante que a tensão aplicada torna-se menor que U_o são iguais, considerando diversos níveis de tensão aplicados sobre um mesmo *gap* ou cadeia de isoladores.

Para impulsos cortados (com disrupção elétrica): as áreas formadas entre o tempo que a tensão aplicada ultrapassa a tensão de referência U_o e o tempo de disrupção são iguais, considerando diversos níveis de tensão aplicados sobre uma mesma estrutura.

Mais estudos realizados por Darveniza [18], indicam que o modelo DE é adequado na caracterização da suportabilidade de diversos tipos, classes e arranjos de isoladores para impulsos atmosféricos padronizados e não-padronizados em ambas as polaridades, sendo utilizados alguns métodos numéricos para obtenção dos parâmetros do modelo DE como método dos mínimos quadrados e método de Newton. Darveniza e Vlastos (1988) também assumiram $\mathbf{K} = 1$ e que $U_o = 0,9 \times U_{50\%}$, sendo a tensão $U_{50\%}$ a tensão de pico de um impulso atmosférico aplicado com probabilidade de 50% de haver disrupção e também conhecido como Critical Flashover Voltage - CFO.

Apesar de ser um modelo bastante utilizado para descrever o processo de disrupção de uma determinada configuração de circuito, **este método não possui bons resultados para *gaps* com campo elétrico não-uniforme [19]**. Com isso, a tensão de referência U_o calculada não se aproxima da tensão da tensão $U_{50\%}$

obtida experimentalmente.

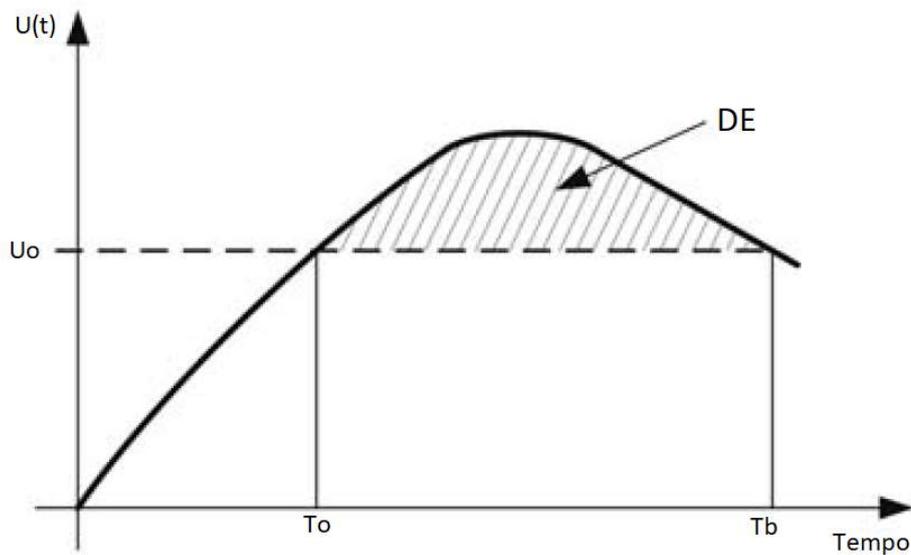


Figura 2.12: *Disruptive effect* - Método de integração. Adaptado de MARTINEZ-VELASCO [13].

2.4.3 *Leader progression model* - LPM

Um modelo mais recente, recomendado pelo CIGRE para *gaps* longos isolados a ar, é conhecido como *Leader Progression Model*. O LPM é um método que descreve o fenômeno de descarga elétrica em longos espaçamentos de ar a partir de similaridades com uma descarga atmosférica. Este modelo é baseado na física da descarga, considerando todo o desenvolvimento e a representação numérica de cada etapa do processo de descarga, simulando a evolução temporal das características elétricas e geométricas de um efeito corona.

O modelo tem como base a progressão de uma descarga elétrica que funciona como um líder, guiando o processo restante, como pode-se ver na Figura 2.13. Esta é mais uma razão para o detalhamento do fenômeno na Seção 2.1.

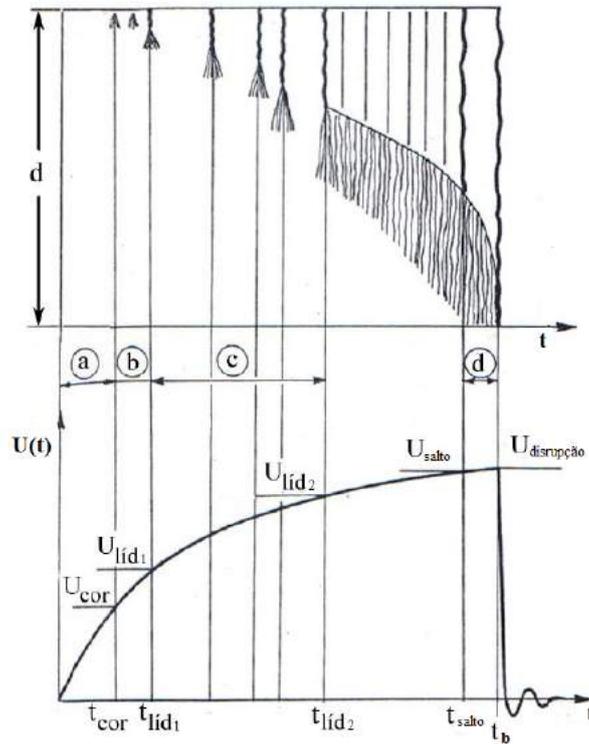


Figura 2.13: Evolução temporal do *leader* considerado no modelo LPM. Adaptado de CARRARA [20].

As etapas mostradas na Figura 2.13 são:

Etapa a - Ausência de fenômenos relacionados a disrupção;

Etapa b - Início do efeito corona e surgimento dos primeiros *streamers*, marcados pelos parâmetros U_{cor} e t_{cor} ;

Etapa c - O início desta etapa caracteriza o surgimento do *leader*, conforme U_{lid1} e t_{lid1} . Durante esta etapa, ocorre a alternância entre *dark period* e *streamers*. No final, o *leader* surge de forma contínua, como pode ser visto no instante t_{lid2} ;

Etapa d - Salto final do *leader*, causando a disrupção. Os parâmetros relacionados ao início do salto são U_{salto} e t_{salto} . A disrupção corresponde aos parâmetros $U_{disrupção}$ e t_b .

2.4.3.1 Tempo de disrupção - T_b

O tempo de disrupção (*time of breakdown*) é definido como o intervalo de tempo entre o zero virtual (O') e o instante de disrupção (que a tensão de impulso decai repentinamente). Também pode ser definido como a soma de cada fase da descarga elétrica [2]. Dessa forma, o tempo de disrupção é composto pelo tempo de inepção do corona (t_i - conhecido também como início do *streamer*), tempo de propagação do *streamer* (T_s), tempo de propagação da onda ionizada (T_i), tempo de propagação do *leader* (T_L) e tempo de aquecimento (T_g - tempo entre o início das ondas ionizadas e fase final do arco elétrico).

$$t_b = t_i + T_s + T_i + T_L + T_g \quad (2.5)$$

Sabendo que o tempo de propagação da onda ionizada é relativamente menor que os outros parâmetros de tempo e que o líder começa seu desenvolvimento num determinado ponto do *gap* (não a partir da extremidade do *gap*), normalmente é possível assumir que o tempo de propagação da onda ionizada pode ser incluído no tempo de propagação do *leader*, exceto em impulsos com o tempo de disrupção muito longo (maior que $20 \mu s$). Outra aproximação que pode ser feita também é com relação a T_g , que por ser tratar de um parâmetro com valor muito baixo em relação aos demais, pode ser ignorado [2].

Feita essa análise, é possível dizer que o tempo de disrupção considerando diferentes tipos de impulsos e geometrias do *gap* em que a descarga elétrica ocorre depende basicamente da soma de três etapas: tempo de inepção do corona (t_i), tempo de propagação do *streamer* (T_s) e tempo de propagação do *leader* (T_L) [12, 21].

$$t_b = t_i + T_s + T_L \quad (2.6)$$

Quando a tensão aplicada no *gap* durante um ensaio elétrico ultrapassa a tensão em que ocorre a inepção do corona, os *streamers* surgem em determinados pontos da estrutura. Na fase dos *streamers*, conforme a tensão aumenta, os *streamers* ocorrem

com mais frequência até o campo elétrico médio no *gap* alcançar um valor fixo E_o e dar origem ao *leader*. Nesta etapa em que o *gap* está carregado de *streamers*, o *leader* se desenvolve e, quando a tensão alcança um valor alto suficiente, ocorre o salto final do o *leader*, que é caracterizado pela disrupção na cadeia de isoladores (surgimento de um arco elétrico). A disrupção pode ocorrer de duas formas: quando o *leader* de uma extremidade do *gap* alcança a extremidade oposta ou quando dois *leaders* existentes no *gap* (um em cada extremidade) se encontram promovendo o arco elétrico.

Considerando que o tempo de injeção do corona é relativamente menor que o tempo de disrupção, geralmente esse parâmetro também pode ser desprezado sem a introdução de erros significativos nos cálculos.

O tempo de propagação do *streamer* pode ser estimado como:

$$\frac{1}{t_s} = 1,25 \left(\frac{E}{E_{50}} \right) - 0,95 \quad (2.7)$$

Através dessa equação é possível observar que o tempo de propagação de *streamer* é calculado em função da tensão $U_{50\%}$ e razão entre o campo elétrico máximo no *gap* antes da disrupção (E) e campo elétrico médio (E_{50}). Alguns gráficos relacionam o campo elétrico médio correspondente a tensão de $U_{50\%}$ com: a polaridade, características de arranjo e fator de *gap*. Porém existe uma aproximação que relaciona a razão E/E_{50} com o inverso do tempo t_s , sem necessariamente considerar essas outras variáveis.

O tempo de propagação do *leader* é diretamente relacionado com um parâmetro muito conhecido e estudado nesse modelo: a velocidade (v_l) que o *leader* alcança nesse momento. O cálculo do tempo T_L é realizado com base na tensão aplicada na cadeia de isoladores e comprimento do *leader*.

A velocidade do *leader* - v_l pode ser obtida através da seguinte equação [13]:

$$v_l = g(u(t), d_g) \left(\frac{u(t) - U_o(d_g - l_L)}{(d_g - l_L)} \right) \quad (2.8)$$

sendo g uma função dependente da tensão aplicada $u(t)$ e comprimento do gap d_g e U_o uma função dependente do comprimento do gap d_g e comprimento do leader l_L . O comprimento do leader é obtido através de um leader equivalente que atravessa o gap partindo de uma extremidade da cadeia de isoladores apenas.

Diversos estudos foram realizados nos últimos anos para determinar uma equação de velocidade do leader que possa abranger diferentes modelos de estruturas e diferentes gaps. Dessa forma é possível encontrar a seguinte expressão [12]:

$$v_l = \frac{dl}{dt} = 170 d_g \left(\frac{u(t)}{d_g - l_L} - E_o \right) \exp \left(\frac{0,0015u(t)}{d_g} \right) \quad (2.9)$$

Pelo fato dessa expressão possuir particularidades devido a geometria do gap que pode ser aplicada, é possível obter uma outra expressão simplificada para a velocidade do leader [12]:

$$v_l = \frac{dl}{dt} = k u(t) \left(\frac{u(t)}{d_g - l_L} - E_o \right) \quad (2.10)$$

2.5 A Evolução do LPM

Ao longo dos anos, diversos pesquisadores realizaram trabalhos com o objetivo de determinar modelos que melhor representam o fenômeno da disrupção elétrica, de acordo com o LPM, e que sejam adequados para diversos tipos de configuração de gap e cadeia de isoladores. A maioria dos ensaios elétricos foram feitos com impulsos atmosféricos, com características próximas ao modelo padronizado e com gaps longos [1–4]. Outros estudos mostram resultados laboratoriais para impulsos atmosféricos aplicados em isoladores [5, 6], sendo estes mais próximos desse trabalho. Diante da quantidade de trabalhos realizados e equações existentes para o LPM, tornou-se necessário descrever os métodos encontrados de acordo com o decorrer dos anos e com as características consideradas em cada ensaio elétrico.

- WAGNER [1]

Em 1961, WAGNER [1] desenvolveu um trabalho que buscava a relação en-

tre o fenômeno da descarga elétrica e os surtos atmosféricos que atingiam as linhas de transmissão. Para isso, foi feito um estudo que buscava avaliar o comportamento de um *gap* diante de impulsos atmosféricos com características específicas e determinar em que circunstâncias seria possível utilizar as ferramentas estudadas, relacionando com os resultados encontrados nos laboratórios.

Além de descrever as etapas da formação do corona, *streamers* e *leader*, WAGNER [1] analisou a configuração de *gap* ponta-ponta diante de impulsos atmosféricos com polaridade positiva, obteve oscilogramas de tensão e corrente através da conexão de dois *gaps* ponta-ponta ligados em paralelos, estudou a relação entre a carga do canal ionizado e comprimento do *gap*, as curvas V_{xt} obtidas através dos dados experimentais e comparou com outros estudos realizados anteriormente.

- SUZUKI [3]

Em 1977, SUZUKI [3] analisou as curvas $V \times t$ de duas configurações de *gap* com tamanho entre 1 e 5 metros: ponta-ponta e ponta-plano. Além disso, também fez um estudo de como acontece o processo de disrupção em ambas as polaridades e suas etapas, permitindo encontrar equações que relacionam a velocidade do *streamer* e do *leader* com parâmetros já conhecidos da configuração como distância do *gap* e amplitude máxima da tensão aplicada.

- SHINDO [2]

Em 1985, SHINDO [2] realizou um estudo no qual seu objetivo foi desenvolver um método, baseado no **LPM**, para o cálculo das características de disrupção de um *gap* com distância de vários metros submetido a qualquer impulso de tensão (padronizado ou não).

Neste trabalho, o autor afirma que o fenômeno do *leader* começa no instante T_S , portanto momento também que a velocidade do *leader* começa a existir. A partir desse propósito, o desenvolvimento do cálculo dos parâmetros do *leader*

foram realizados em conjunto com a obtenção de características de tensão e tempo da disrupção através de processos experimentais, o que possibilitou encontrar equações analíticas para o tempo de desenvolvimento de *streamer* e velocidade do *leader*.

- PIGINI [5]

Em 1989, PIGINI [5] apresentou uma pesquisa que descreve o desempenho de impulsos atmosféricos aplicados em diferentes configuração de *gaps*, entre eles uma que possui a presença de uma cadeia de isoladores. Considerando a semelhança com o presente trabalho, o artigo desenvolvido por PIGINI [5] possui grande relevância nas análises que serão feitas no Capítulo 4.

Dessa forma, foram realizados ensaios em configurações ponta-ponta, ponta-plano e cadeia de isoladores, todos em ambas polaridades. Nesses ensaios foram aplicados tensões com diferentes formas de ondas, totalizando 7 tipos de impulsos. Para os ensaios com a presença de isoladores, a distância do *gap* variou entre 1 e 4 metros. Considerando os isoladores no circuito, a distância do *gap* avaliada foi de 3,36 metros. Como resultado, PIGINI [5] obteve as curvas V_{xt} das três configurações citadas, além de outras informações como gráficos do gradiente médio do campo elétrico em função da distância do *gap* e do fator de *gap* (fator entre 1,0 e 1,4, associado ao tipo de *gap*). Além disso, assumiu algumas considerações:

1. Este modelo assume que a corrente é desprezada até o início do líder, enquanto que depois é linearmente relacionada à velocidade do líder, com carga igual a $400 \mu\text{C}/\text{m}$.
2. A fase do *streamer* torna-se completa quando o gradiente médio do campo no *gap* U/d alcança o valor fixo E_o . O valor de E_o pode ser obtido através de um gráfico que relaciona o gradiente médio do campo com a distância do *gap* e outro em função do gradiente médio no *gap* e fator de *gap*. É importante ressaltar que a configuração ponta-plano foi considerada na

obtenção desses gráficos e que dados em circuitos com cadeia de isoladores submetidos a impulsos atmosféricos positivos indicaram consideráveis desvios.

3. A fase do *leader* tem início quando o *gap* está completamente carregado de *streamers*. Então, o modelo assume a existência de um *leader* equivalente que se propaga de um eletrodo apenas, para todas as configurações de circuito e que a progressão do *leader* é interrompida quando o gradiente médio do campo em parte do *gap* torna-se menor que o valor de E_o .

- MOTOYAMA [4]

Em 1996, MOTOYAMA [4] criou um outro modelo, baseado em resultados experimentais, que descreve as características de ruptura de *gaps* longos submetidos a impulsos atmosféricos cortados na cauda.

Nesse modelo, é considerada uma configuração ponta-ponta com uma distância que varia entre 0,4 e 3 metros. O autor separou o processo de ruptura em três etapas:

1. Etapa de carregamento;
2. Etapa de desenvolvimento do *leader*;
3. Etapa da ruptura.

A partir disso, determinou as condições de início do *leader*. O instante T_s foi obtido através do processo de ruptura observado para alguns níveis de tensão, o que possibilitou encontrar uma equação em função da tensão instantânea aplicada U_t e o tempo de desenvolvimento do *streamer* T_s , ambos obtidos experimentalmente, para determinar tais condições:

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} U(t) dt = U_{med} > A \quad (2.11)$$

Essa expressão indica que o nível de *streamer* alcança o eletrodo oposto, quando a tensão média aplicada no *gap* ultrapassa uma constante A.

MOTOYAMA [4], além de mostrar a relação entre a corrente e o comprimento de *leader*, concluiu que a velocidade de desenvolvimento do *leader* pode ser relacionada com o campo elétrico médio E e com campo elétrico mínimo E_o para que ocorra as condições de início do *leader*:

$$E = \frac{U_t}{D - x_l} \quad (2.12)$$

$$v_l = K_1 \left(\frac{U_t}{D - x_l} - E_o \right) \quad (2.13)$$

Sendo D a distância do *gap* e x_l o comprimento do *leader*.

- WANG [6]

Neste trabalho o autor adota as mesmas formulações que MOTOYAMA [4], porém as constantes k_1 , k_2 , k_o e E_o são diferentes. Além disso, os dados experimentais são referentes a cadeias com isoladores poliméricos e de porcelana.

Para reunir todas as informações contidas nas formulações feitas para o desenvolvimento do *streamer* e do *leader*, fornecer uma visão geral dos conceitos descritos no tópico 2.5 e relacionar todas as condições experimentais considerada em cada trabalho, foram criadas tabelas com o objetivo de esclarecer os critérios adotados pelos autores WAGNER [1], SHINDO [2], SUZUKI [3], MOTOYAMA [4], PIGINI [5] e WANG [6] em cada modelo.

Nas Tabelas 2.1 e 2.2 estão descritas as equações que representam os parâmetros dos *streamers* e nas Tabelas 2.3 e 2.4 as que representam as características do *leader*.

Tabela 2.1: Equações para cálculos do tempo de desenvolvimento do *streamer*.

Fase de desenvolvimento do <i>Streamer</i>						
Referência	<i>Gap</i>	Distância de <i>Gap</i> [m]	Polaridade	Parâmetros	Equações	Ano
Wagner	Ponta-Ponta	1 a 3	+	$v_s = 3 \times 10^5$ m/s	-	1961
Suzuki	Ponta-Plano	1 a 5	+	$k_1 = 1,63 \times 10^3$ m/(kV.s) $k_2 = 0,5 \times 10^6$ s ⁻¹ $k_3 = 0,5 \times 10^6$ m/s	$v_s = k_1 U_p - k_2 d + k_3$	1977
			-	$k_1 = 1,93 \times 10^3$ m/(kV.s) $k_2 = 0,77 \times 10^6$ s ⁻¹ $k_3 = 0,77 \times 10^6$ m/s		
Shindo	Ponta-Plano	1 a 5	+	$k_1 = 0,5 \times 10^{-3}$ (kV.s)/m $k_2 = 300$ kV/m	$T_s = \frac{k_1}{(U_p/d) - k_2}$	1985
			+	$k_1 = 0,5 \times 10^{-3}$ (kV.s)/m $k_2 = 420$ kV/m		
			-	$k_1 = 0,5 \times 10^{-3}$ (kV.s)/m $k_2 = 500$ kV/m		

Tabela 2.2: Equações para cálculos do tempo de desenvolvimento do *streamer*.

Fase de desenvolvimento do <i>Streamer</i>						
Referência	Gap	Distância de Gap [m]	Polaridade	Parâmetros	Equações	Ano
Pigini	Ponta-Plano	2 a 4	±	$k_1 = 1,25 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ $k_2 = 0,95 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$	$T_s = \frac{1}{k_1 E_{50} - k_2}$	1989
	Ponta-Ponta					
	Isoladores	3,36				
Motoyama	Ponta-Ponta	0,4	+	$k_1 = 400 \text{ kV/m}$ $k_2 = 50 \text{ kV/m}$	$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} U(t) dt > k_1 d + k_2$	1996
		1 a 3				
		0,4	-	$k_1 = 460 \text{ kV/m}$ $k_2 = 150 \text{ kV/m}$		
		1 a 3				
Wang	Isolador Polimérico	1,05 a 4,15	+	$k_1 = 360 \text{ kV/m}$ $k_2 = 290 \text{ kV}$	$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} U(t) dt > k_1 d + k_2$	2014
			-	$k_1 = 500 \text{ kV/m}$ $k_2 = 140 \text{ kV}$		
			+	$k_1 = 430 \text{ kV/m}$ $k_2 = 190 \text{ kV}$		
	Isolador Porcelana	0,95 a 4,14	-	$k_1 = 490 \text{ kV/m}$ $k_2 = 90 \text{ kV}$		
			+	$k_1 = 430 \text{ kV/m}$ $k_2 = 190 \text{ kV}$		
			-	$k_1 = 490 \text{ kV/m}$ $k_2 = 90 \text{ kV}$		

Tabela 2.3: Equações para cálculos do tempo de desenvolvimento do *leader*.

Fase de desenvolvimento do <i>Leader</i>						
Referência	<i>Gap</i>	Distância de <i>Gap</i> [m]	Polaridade	Parâmetros	Equações	Ano
Wagner	Ponta-Ponta	1 a 3	+	$k_1 = 1 \times 10^3 \text{ m}/(\text{kV}\cdot\text{s})$	$v_l = k_1 d \left(\frac{U(t)}{d-x} - E_o \right)$ $i = k_o v_l$	1961
				$E_o = 500 \text{ kV/m}$ $k_o = 320 \text{ }\mu\text{C/m}$		
Suzuki	Ponta-Plano	1 a 5	+	$k_1 = 1,0 \text{ m}^2/(\text{kV}^2\cdot\text{s})$	$v_l = k_1 \frac{(U(t)-E_L d)(U(t)-E_L x)}{d-x}$ $i = k_o d(v_l - 0,25 \times 10^6)$	1977
				$E_L = 250 \text{ kV/m}$ $k_o = 78,6 \text{ }\mu\text{C/m}^2$		
			-	-		
Shindo	Ponta-Plano	1 a 5	+	$k_1 = 0,2 \text{ m}^2/(\text{kV}^2\cdot\text{s})$	$v_l = U(t) \left(k_1 \frac{U(t)}{d-x} + k_2 \frac{i(t)}{d-x} \cdot \frac{x}{d} \right)$ $i = k_o U(t) v_l$	
				$k_2 = 3 \text{ m}^2/(\text{kV}^2\cdot\text{A}\cdot\text{s})$ $k_o = 500 \text{ }\mu\text{F/m}$		
	Ponta-Ponta	2 a 5	+	$k_1 = 0,1 \text{ m}^2/(\text{kV}^2\cdot\text{s})$	$v_l = U(t) \left(k_1 \frac{U(t)}{d-2x} + k_2 \frac{i(t)}{d-2x} \cdot \frac{x}{d} \right)$ $i = k_o U(t) v_l$	1985
				$k_2 = 2,5 \text{ m}^2/(\text{kV}^2\cdot\text{A}\cdot\text{s})$ $k_o = 500 \text{ }\mu\text{F/m}$		
			-	$k_1 = 0,05 \text{ m}^2/(\text{kV}^2\cdot\text{s})$ $k_2 = 5 \text{ m}^2/(\text{kV}^2\cdot\text{A}\cdot\text{s})$ $k_o = 500 \text{ }\mu\text{F/m}$		

Tabela 2.4: Equações para cálculos do tempo de desenvolvimento do *leader*.

Fase de desenvolvimento do <i>Leader</i>						
Referência	<i>Gap</i>	Distância de <i>Gap</i> [m]	Polaridade	Parâmetros	Equações	Ano
Pigini	Ponta-Plano	2 a 4	±	$k_1 = 170 \text{ m}/(\text{kV}\cdot\text{s})$ $k_2 = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}/\text{kV}$ $E_0 = E_{50}$ $k_0 = 100 \sim 700 \text{ }\mu\text{C}/\text{m}$	$v_l = k_1 d \cdot e^{\frac{k_2 U(t)}{d}} \cdot \left(\frac{U(t)}{d-x} - E_0 \right)$ $i = k_0 v_l$	1989
	Ponta-Ponta					
	Isoladores	3,36				
Motoyama	Ponta-Ponta	0,4	+	$k_1 = \begin{cases} 2,5, & 0 < x < d/2 \\ 0,42, & d/2 < x < d \end{cases}$ $m^2 / (\text{kV}\cdot\text{s})$	$v_l = k_1 \left(\frac{U(t)}{d-x} - E_0 \right)$	1996
		1 a 3				
		0,4 1 a 3	-	$E_0 = 750 \text{ kV}/\text{m}$ $k_0 = 410 \text{ }\mu\text{C}/\text{m}$	$i = k_0 v_l$	
Wang	Isolador Polímero	1,05 a 4,15	+	$k_0 = 1,5 \text{ m}^2 / (\text{kV}\cdot 10^{-3}\text{s})$ $E_0 = 620 \text{ kV}/\text{m}$	$v_l = k_0 \left(\frac{U(t)}{d-x} - E_0 \right)$	2014
				-		
			+	$k_0 = 2,9 \text{ m}^2 / (\text{kV}\cdot 10^{-3}\text{s})$ $E_0 = 580 \text{ kV}/\text{m}$		
	Isolador Porcelana	0,95 a 4,14	-	$k_0 = 2,5 \text{ m}^2 / (\text{kV}\cdot 10^{-3}\text{s})$ $E_0 = 640 \text{ kV}/\text{m}$		
				+		
			-			

Capítulo 3

Ensaio elétrico realizados

Com os conceitos teóricos envolvidos no processo de formação da descarga elétrica, tipos de impulsos padronizados de tensão e modelagens para descrever os processos físicos da disrupção, é possível descrever as etapas experimentais realizadas.

Foram realizados ensaios elétricos no laboratório de Ultra Alta Tensão, situado no Cepel (Figura 3.1), com o objetivo de obter resultados experimentais e, a partir desses dados, verificar se a cadeia de isoladores está de acordo com as tensões suportáveis nominais que determinam seu nível de isolamento e analisar a modelagem da cadeia de isoladores considerada, a partir das definições citadas no capítulo 2.



Figura 3.1: Laboratório UAT do Cepel.

3.1 Ajustes realizados e dificuldades

A utilização do laboratório UAT apresenta algumas situações inovadoras, que apenas o trabalho diário e execução de atividades práticas podem esclarecer.

Além disso, através de pesquisas realizadas sobre o tema, é possível que os pesquisadores adquiram informações importantes que colaboraram para o entendimento do porquê determinados fenômenos ocorrem dentro do laboratório, como: oscilações na forma de onda, diferença entre o impulso atmosférico e de manobra na cadeia de isoladores, influência dos equipamentos escolhidos na realização de ensaio e na obtenção de resultados.

Por isso, destacar todo conhecimento obtido e estratégia adotada para analisar os fenômenos é fundamental na implementação de procedimentos de ensaios, pesquisas e avaliação de resultados, incluindo as dificuldades particulares do laboratório e ajustes feitos.

Durante este trabalho, ficou evidente que a condição que mais determinou a possibilidade ou não de ensaios experimentais foi o tempo na realização de cada ensaio, no qual é necessário considerar tempo de montagem, alteração e ajuste do circuito, execução do ensaio e medição.

3.1.1 Condições ambientais

O laboratório UAT é uma construção externa, que diariamente fica exposta a fatores climáticos e ambientais. Todos os equipamentos de alta tensão possuem restrições em relação a condições ambientais para suas operações, por isso algumas condições como vento, chuva, neblina e umidade prejudicam a execução de ensaios e devem ser avaliadas diariamente.

A umidade do ar, quando excessiva, diminui a capacidade de isolamento elétrica de um equipamento energizado, tornando um meio favorável para a condução de corrente elétrica, que aumenta o índice de descargas elétricas.

O fabricante do gerador de impulsos adotou os seguintes critérios no projeto dos equipamentos para garantia de segurança e bom funcionamento [22, 23] :

1. Temperatura de operação: 15 °C a 44 °C;
2. Temperatura de armazenamento: -20 °C a 60 °C;
3. Umidade relativa: equipamentos externos menor que 93 % e eletrônicos menor que 80%;
4. Vento máximo: médio 120 km/h;
5. Altitude: até 1000 metros.

Para o gerador de impulsos não sofrer os impactos de diversas mudanças de temperatura, este equipamento possui um ar-condicionado interno próprio, que está continuamente em operação (mesmo com o gerador fora de operação) para garantir condições ideais de temperatura e, principalmente, umidade, evitando danos internos nos componentes.

Dos fatores citados, o que apresentou maior índice de ocorrência foi a umidade alta, acima de 80%. A umidade é medida no interior da cápsula do gerador de impulsos e, seu elevado nível, impossibilita a realização de ensaios devido ao aumento do risco de descargas disruptivas dentro do gerador. Outro fator que impossibilitou a realização de ensaios foram as chuvas, que diversas vezes foram fortes e imprevisíveis.

3.1.2 Necessidade de equipamentos específicos na montagem do circuito

Devido às grandes dimensões do laboratório, incluindo elevada altura da cadeia de isoladores e do gerador de impulsos, as mudanças no circuito de ensaio são procedimentos muito complicados, que necessitam de equipamentos específicos na montagem do circuito, conforme Figuras 3.2 e 3.3. Para mudar algum elemento da cadeia de isoladores, uma equipe técnica especializada tem que subir com o auxílio de uma plataforma aérea.

Dois fatores devem ser considerados:

1. O serviço de montagem é feito com auxílio da oficina mecânica que não possui disponibilidade integral devido outras atribuições dentro do Cepel. Por isso toda montagem e desmontagem do circuito de ensaio deve ser solicitado, respeitando a demanda de serviços que a oficina possui.
2. Outro ponto é o tempo que uma alteração no circuito leva para ser realizada. O tempo até que a mudança seja feita incluindo a subida da equipe técnica em uma plataforma aérea, realização da mudança propriamente dita e descida, é grande. Seja uma alteração nos pontos de conexão do circuito ou estrutura da cadeia de isoladores, a mudança ocorre conforme os dois fatores citados.



Figura 3.2: Plataforma aérea.

3.1.3 Necessidade de incluir os ensaios elétricos na programação do laboratório

Para a realização de pesquisas experimentais, houve a necessidade de incluir os ensaios deste trabalho na programação estabelecida no laboratório. Por ser um laboratório recente e único no Brasil, atividades envolvendo o comissionamento de equipamentos novos e projetos externos, já estavam agendadas nesse período.



Figura 3.3: Içamento com auxílio de guincho e plataforma aérea.

3.1.4 Alteração das configurações do gerador de impulsos e tipos de impulso

No projeto de graduação da autora [8] e no tópico 3.3.1 deste trabalho, foi apresentado que o gerador de impulsos deve estar configurado com os valores de resistência específicos para produzir formas de onda com características de impulso atmosférico ou de manobra. Isso porque os tempos de frente e de cauda de um impulso estão relacionados com os valores de resistências em série e em paralelo do gerador.

Por esse motivo, é necessário considerar que alterar o tipo de impulso que será aplicado na cadeia de isoladores implica em realizar alterações no gerador e essa ação tem uma grande duração de tempo. O gerador é um equipamento bem alto e o acesso para alcançar os estágios mais altos não é fácil, sendo muito apertado devido a cápsula. Com isso, mudar os resistores dos 32 estágios para produzir uma forma de onda, seja de impulso atmosférico ou de manobra, envolve tempo e precauções na subida do gerador.

3.1.5 Dificuldades apresentadas pelo gerador de impulsos

Nos últimos meses de realização desse trabalho, o gerador de impulsos apresentou adversidades no carregamento, necessitando de manutenção. Esse problema foi um dos fatores limitantes para a quantidade de ensaios realizados, pois não houve tempo hábil para resolver o problema e continuar a execução de ensaios elétricos.

3.1.6 Dificuldade de escolher um transformador de corrente de medição adequado

Durante a realização dos ensaios com impulso atmosférico, houve uma investigação sobre a medição de corrente de disrupção na cadeia de isoladores.

Essa tarefa demandou bastante trabalho devido às dificuldades impostas pelo circuito montado e identificação de um transformador de corrente adequado para a medição. As situações ocorridas foram:

1. Instalação do TC no circuito: Para medir a corrente que circulava na cadeia de isoladores com o circuito de ensaio já montado, seria necessário encontrar um TC específico que pudesse ser acoplado na cadeia ou na sua extremidade sem a necessidade de um suporte durante toda a realização do ensaio e que pudesse ser submetido a uma alta energia e a altas frequências. Um TC com essas características não estava disponível no laboratório. Além disso, o circuito possui vários pontos de aterramento, o que dificulta a medição da corrente durante a disrupção.
2. TC com relação adequada as grandezas medidas no ensaio: Diante das opções disponíveis para a utilização, optou-se pela utilização de um TC do fabricante *Pearson*, modelo 1423. Esse TC possui como características o ponto de conexão que geralmente é realizado próximo a um ponto de aterramento e as informações descritas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Informações nominais do TC modelo 1423.

Relação de transformação	0,001 V/A
Máximo pico de corrente	500 kA
Frequência de operação	$\sim 1Hz < f < 0,7MHz$

Diante dos vários pontos de aterramento existentes, optou-se por utilizar dois transformadores de corrente de modelo 1423: Um próximo ao ponto de aterramento do gerador de impulsos e outro próximo ao ponto de aterramento do divisor de tensão.

Durante os primeiros testes, foi possível constatar que a relação de transformação era muito grande para esse tipo de medição. Foram retirados os atenuadores, utilizados cabos mais curtos, porém as medições apresentavam bastante ruído e comportamentos inesperados. No capítulo 4, os resultados serão apresentados.

3. Disponibilidade de mais de um TC do mesmo tipo: Considerando os problemas de medição com o TC 1423, buscou-se como alternativa a utilização de um TC com uma relação de transformação menor, de modo a melhorar a qualidade das medições de corrente.

Assim, optou-se pela utilização do TC modelo 3025 nas medições de corrente. Contudo, considerando ainda os dois pontos de medição (gerador de impulsos e divisor de tensão), não foi possível utilizar dois transformadores de mesmo modelo nas medições por falta de disponibilidade. Dessa forma, além do TC modelo 3025, foi utilizado também o TC modelo 301X, conforme informações contidas nas tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2: Informações nominais do TC modelo 3025.

Relação de transformação	0,025 V/A
Máximo pico de corrente	20 kA
Frequência de operação	$\sim 7Hz < f < 4MHz$

Tabela 3.3: Informações nominais do TC modelo 301X.

Relação de transformação	0,01 V/A
Máximo pico de corrente	50 kA
Frequência de operação	$\sim 5Hz < f < 2MHz$

3.1.7 Disponibilidade de cabos longos

Considerando o circuito montado em um laboratório de grandes dimensões como este e os sistemas de medição disponíveis, torna-se necessária a utilização de cabos de longa distância para efetuar a aquisição de dados.

Dessa forma, alguns requisitos são fundamentais como a disponibilidade de cabos longos, a integridade física de todo o cabo e suas conexões, para que não ocorra erros nas medições devido a alguma avaria nesse elemento.

Foram utilizados cabos de três comprimentos: 116,80 metros, 20,13 metros e 50,00 metros. É importante destacar que cabos longos devem afetar as medições realizadas, embora sejam necessários devido à distância entre a sala de controle e pontos de medição. Por isso, a medição com fibra ótica passou a ser considerada nos ensaios, com objetivo de sofrer menos interferência que os cabos longos.

3.1.8 Montagens e desmontagens diárias

Alguns procedimentos tiveram que ser adotados no decorrer da realização de ensaios elétricos, como a montagens e desmontagens diárias de alguns componentes do circuito.

A maioria dos equipamentos de alta tensão como gerador de impulsos, cadeia de isoladores e divisor de tensão continuam expostos e montados. Porém, outros equipamentos, principalmente os sistemas de medição, devem ser desmontados, pois são dispositivos eletrônicos sensíveis, que podem ser danificados por condições climáticas ou ação de animais silvestres que habitam as redondezas do laboratório.

3.1.9 Alto nível de ruído por ondas refletidas

Quando uma descarga elétrica atinge a linha de transmissão, provoca o surgimento de ondas trafegantes pelo circuito, com reflexões e refrações nos pontos onde ocorre alteração de impedância característica [7]. A disrupção provoca a propagação de ondas de tensão e corrente, que trafegam com a velocidade da luz, aproximadamente, em ambas as direções a partir do ponto da linha que foi atingido.

Assim como as ondas de tensão e corrente, os ruídos provocados pelo centelhamento das esferas do gerador de impulsos e outros componentes também são propagados, afetando inclusive as medições. Os resultados experimentais de corrente obtidos, por exemplo, apresentaram alto nível de ruído devido as ondas refletidas e grandes dimensões do circuito.

Essas ondas continuam a se propagar até que seja encontrada uma descontinuidade no circuito, caracterizada por chaves abertas, transformadores ou o rompimento do isolamento da linha de transmissão.

3.2 O laboratório de Ultra Alta Tensão

O laboratório UAT foi recentemente construído pelo Cepel e está localizado em Nova Iguaçu - RJ. Nesse laboratório é possível realizar pesquisas experimentais e ensaios dielétricos em linhas de transmissão, cadeia de isoladores e equipamentos com classes até ± 1200 kV (c.a.) e ± 1000 kV (c.c.).

O laboratório foi construído numa área de $40.800 m^2$, sendo composto por três pórticos principais: Norte, Sul e Central. Cada pórtico possui em torno de $70 m$ de altura, sendo a distância entre cada um de $110 m$, totalizando um comprimento total de $220 m$, conforme Figuras 3.4 e 3.5.



Figura 3.4: Vista geral do laboratório.

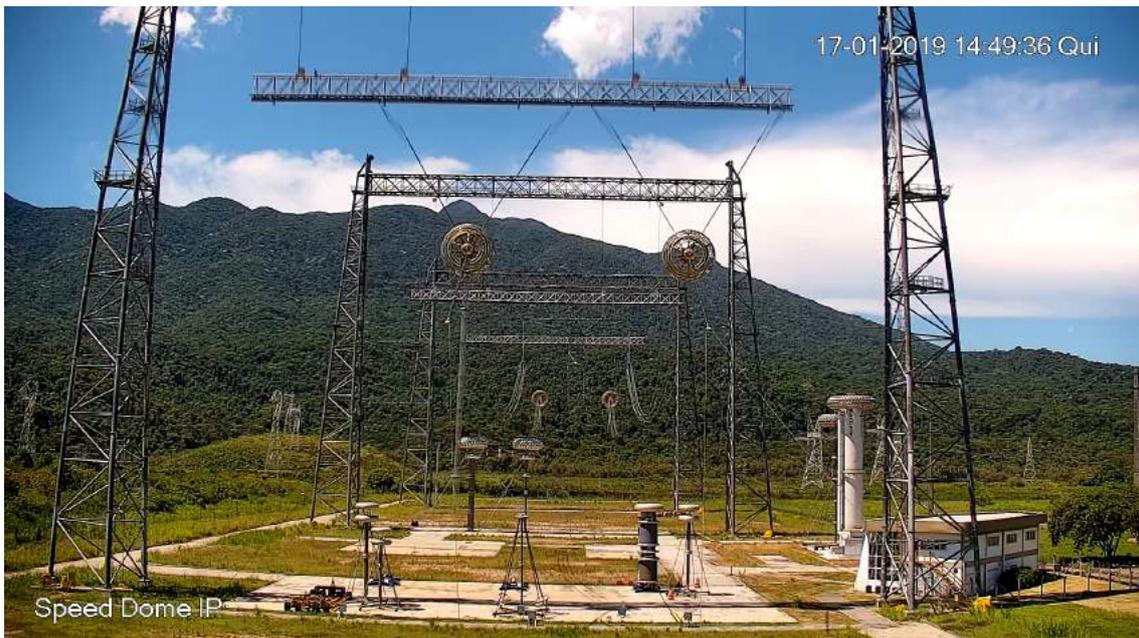


Figura 3.5: Vista frontal do laboratório.

O laboratório possui os seguintes equipamentos:

- 3 transformadores com tensão nominal de 750 kV e corrente de 1 A , podendo chegar até 2250 kV se combinados para montagem monofásica;

- 2 retificadores de tensão nominal igual a 1000 kV , podendo chegar até 1600 kV se combinados para montagem monofásica;
- 2 geradores de impulsos: Um com tensão nominal de 6,4 MV , 640 kJ , e outro com tensão nominal de 2,0 MV , 100 kJ ;
- 1 centelhador de esferas;
- câmera de alta velocidade modelo *Phantom*;
- sistemas de medições.

3.3 Equipamentos utilizados nos ensaios elétricos

Para a realização de ensaios elétricos, é necessário a utilização de equipamentos capazes de operar com elevados níveis de ultra alta tensão. Cada equipamento possui suas características particulares no tipo de funcionamento, que serão detalhados a seguir.

3.3.1 Gerador de impulsos

O gerador de impulsos é um equipamento que tem a finalidade de gerar impulsos de tensão, que simulam surtos atmosféricos ou de manobra para avaliar o desempenho de determinados equipamentos diante dessas solicitações [8].

O gerador do laboratório UAT, modelo SGV da marca *Haefely*, é composto por 32 estágios de um circuito que multiplica a tensão, desenvolvido por Marx. O impulso de tensão gerado possui um tempo de frente de onda que pode variar de 1,0 μs a 1000 μs e um tempo de cauda da onda entre 40 μs e 10000 μs . Valores de frente de onda muito rápidos não são possíveis para grandes níveis de tensão e equipamentos de ensaio com capacitância elevada, neste caso, sendo toleráveis tempos de frente de até 5 μs [23].

Considerando a capacitância total máxima para realização de ensaios que é de 6 nF, as indutâncias próprias do circuito, tensões de operação no limite do gerador

e grandes dimensões do laboratório e, conseqüentemente, do circuito, não é possível obter tempos de frente de $1,2 \mu s \pm 30\%$.

Cada estágio pode gerar até 200 kV, totalizando 6,4 MV com energia de 640 kJ, porém, considerando o rendimento do gerador, os valores efetivos de tensão variam entre 100 kV e 5,6 MV. Dessa forma, o gerador é capaz de gerar impulsos com formas de ondas plenas e cortadas de impulsos atmosféricos e de manobra.

O gerador de impulsos funciona com o propósito de gerar o maior nível de tensão possível, por isso, o gerador é formado por um conjunto de 32 estágios com capacitores e resistores, que são carregados em paralelo com uma tensão pré-determinada e, posteriormente, descarregados em série [8].

O impulso é produzido de acordo com os resistores e capacitores utilizados na operação do gerador, sendo possível escolher valores de resistores que resultem em um impulso do tipo atmosférico ou manobra. Com isso, a tensão de carregamento é estabelecida no sistema de controle e o centelhador de esferas do gerador é ajustado. Cada estágio possui um centelhador de esferas que é ajustado através de um mecanismo motorizado conforme a distância indicada para aquele nível de tensão escolhido. Então, retificador fornece uma tensão V_o ao gerador, permitindo o carregamento em paralelo dos estágios.

Quando a tensão atinge o valor definido no sistema de controle, um sinal de *trigger* é enviado para o gerador, que promove o processo de disrupção no centelhador de esferas. A descarga disruptiva gerada provoca o fechamento em série do circuito e, conseqüentemente, a soma das tensões carregadas nos estágios utilizados no circuito.

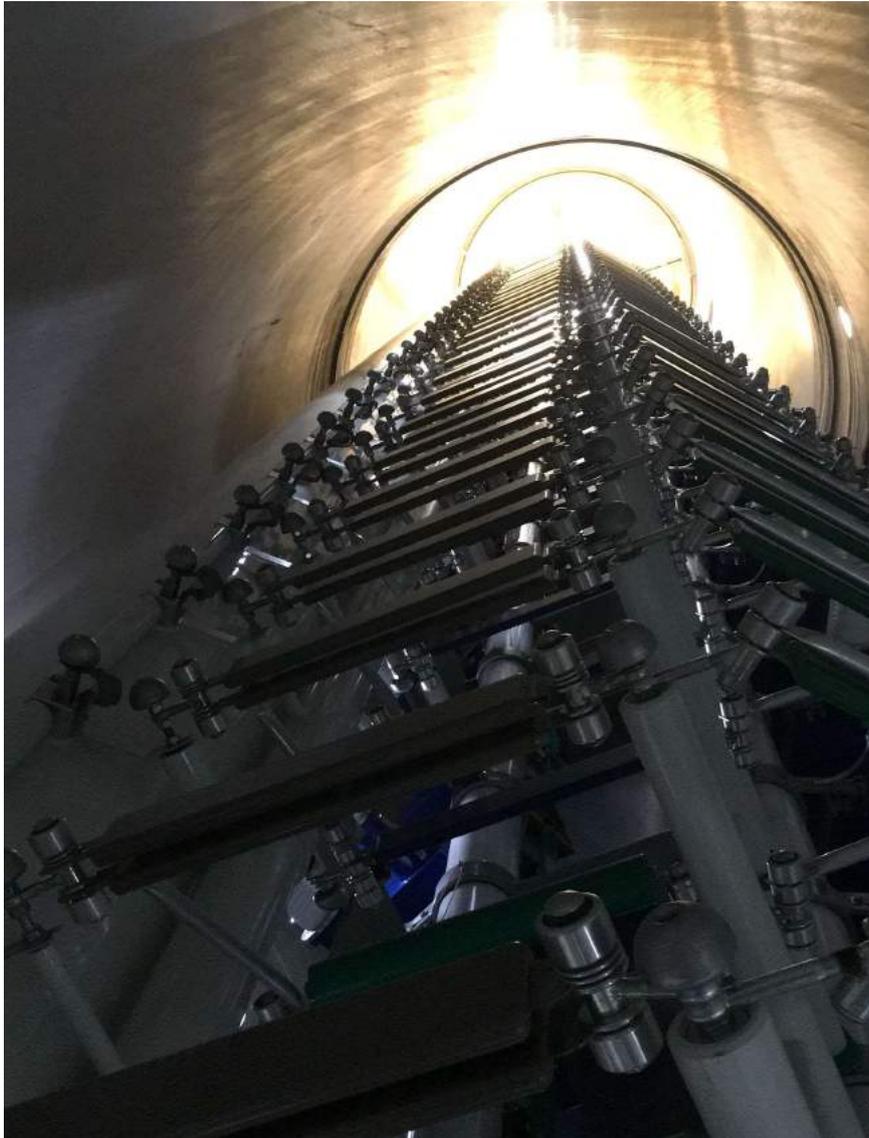


Figura 3.6: Vista do interior do gerador de impulsos

O sistema de geração de impulsos é composto pelos seguintes componentes:

- Retificador;
- Gerador de impulsos;
- *Chopping gap* (quando necessário);
- Sistema de controle e de medição;

O gerador de impulso está situado dentro de uma cápsula protetora (Figuras 3.6 e 3.7), com o objetivo de evitar o desgaste natural promovido pelas diversas condições ambientais, acúmulo de poeira e reduzir o impacto sonoro causado pelas descargas dos centelhadores, quando o gerador está em operação.



Figura 3.7: Gerador de impulsos

3.3.1.1 Circuito simplificado do gerador de impulsos

O circuito de um gerador de impulsos pode ser representado de forma simplificada, apresentando um estágio apenas, conforme pode ser visto na Figura 3.8.

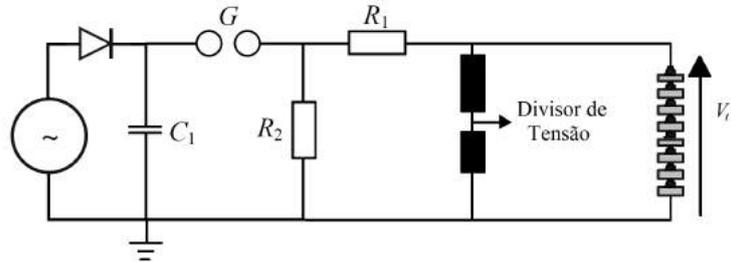


Figura 3.8: Circuito simplificado do gerador de impulsos

Os parâmetros do circuito simplificado são:

C_1 - Capacitor do gerador de Impulso;

R_1 - Resistência em série do gerador. É responsável por definir o tempo de duração da frente da forma de onda do impulso e o valor de pico do impulso;

R_2 - Resistência em paralelo do gerador. Tem relação direta com a cauda da forma de onda, fazendo com que dure menos ou mais o tempo entre o valor de pico e o ponto da cauda correspondente a 50% desse mesmo valor;

G - Esferas centelhadoras. Funcionam como uma chave controlada por tensão e como um limitador de tensão.

A tensão de saída produzida por um gerador de impulsos é definida por:

$$V_t = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \times [e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}] \times \frac{V_o}{k} \quad (3.1)$$

Sendo que α_1 e α_2 são as raízes de $s^2 + as + b = 0$ e representados por:

$$\alpha_1 = -\frac{a}{2} - \sqrt{\frac{a^2}{4} - b} \quad (3.2)$$

$$\alpha_2 = -\frac{a}{2} + \sqrt{\frac{a^2}{4} - b} \quad (3.3)$$

E sendo as constantes iguais a:

$$a = \frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} \quad (3.4)$$

$$b = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \quad (3.5)$$

$$k = R_1 C_2 \quad (3.6)$$

Todo o processo de formação do impulso de tensão com a junção de duas exponenciais podem ser vistos em [8]. Os parâmetros de tempo da forma de onda dependem dos valores das resistências conectadas com os capacitores do circuito. A resistência série altera o tempo de frente da onda, enquanto que as resistências em paralelo alteram o tempo de cauda.

3.3.1.2 Circuito completo do gerador de impulsos

O gerador de impulsos do laboratório UAT é um circuito multiplicador de tensão composto por 32 estágios. Dessa forma, a Figura 3.9 representa o circuito completo de um gerador com mais de um estágio.

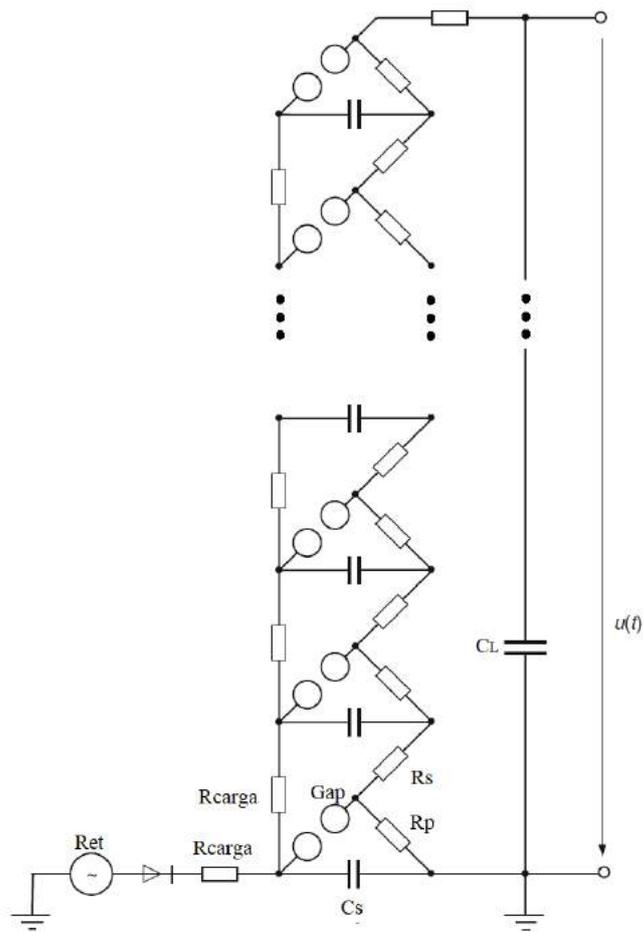


Figura 3.9: Circuito completo de um gerador de impulsos com mais de um estágio. Adaptado de SCHON [9].

Os parâmetros do circuito completo são:

C_s - Capacitor do gerador de Impulso;

R_s - Resistência em série do gerador;

C_L - Representação da capacitância equivalente de carga;

R_p - Resistência em paralelo do gerador;

Gap - Esferas centelhadoras;

R_{carga} - Resistência equivalente de carga (que atua no carregamento do gerador);

Ret - Retificador.

$U(t)$ - Impulso de tensão produzido pelo gerador.

3.3.1.3 Retificador

O retificador opera junto com o gerador de impulsos e tem uma importante função na realização de ensaios elétricos, pois é o responsável por carregar todos os estágios do gerador de impulsos com uma tensão contínua estabelecida pelo operador.

O retificador possui um reversor de polaridade motorizado, que permite aplicar tensão positiva ou negativa ao equipamento ensaiado, através do gerador de impulsos e um resistor de amortecimento. A função desse resistor é limitar a corrente para reduzir a sobretensão proveniente de um curto-circuito.

O retificador do laboratório UAT (Figura 3.10), modelo LGR 200-200, opera com tensão de saída de 200 kV e corrente de saída de 200 mA. Na tabela 3.4, são apresentados mais alguns dados nominais do retificador.

Tabela 3.4: Informações nominais do retificador de tensão.

Tensão de entrada trifásica	400 V
Potência de entrada trifásica	100 kVA
Consumo de potência	~ 50 kVA



Figura 3.10: Retificador de tensão.

3.3.1.4 *Chopping gap*

O *chopping gap*, conhecido como esferas de corte, é um dispositivo que é conectado juntamente com o gerador de impulsos e o restante do circuito, com o propósito de simular uma forma de onda cortada na cauda no equipamento ensaiado.

A distância das esferas é ajustada para produzir o corte na cauda de acordo com a tensão de ensaio e tempo de corte estabelecido. É muito utilizado em ensaios elétricos que avaliam os impactos do impulso cortado em transformadores de potência e ensaios de calibração de equipamentos.

Neste trabalho, foram aplicados somente impulsos plenos, sendo os impulsos cortados produzidos pela ruptura do isolamento dielétrico do ar e não provocados pelo *chopping gap*. Por isso, esse tipo de equipamento não foi utilizado no circuito.

3.3.1.5 Resistores e capacitores

Os resistores série e paralelo são componentes com baixa indutância responsáveis por alterar os parâmetros do tempo de frente e de cauda da forma de onda, respectivamente.

Estes componentes têm o núcleo enrolado, coberto por uma resina em formato retangular, sendo cada um reconhecido pela cor correspondente ao valor da resistência ôhmica, conforme Figura 3.11. Em cada estágio do gerador de impulsos, estão presentes os resistores (série e paralelo) e os capacitores.

Os capacitores de cada estágio, mostrados na Figura 3.12, são carregados com a tensão contínua estabelecida através do retificador. São carregados em paralelo e, na fase da geração de tensão, são descarregados em série, a fim de somar as tensões de cada estágio utilizado no circuito.

Cada capacitor está imerso em óleo em um tanque de aço. Sua especificação é de tensão nominal igual a 100 kV (cada estágio possui dois capacitores) e capacitância nominal de $2 \mu F$.



Figura 3.11: Resistores.

3.3.1.6 Centelhador de esferas

São esferas de cobre com diâmetro de 250 mm, que têm como características a redução do aquecimento quando o dispositivo encontra-se sob descarga elétrica e a função de colocar os estágios do gerador em série no momento do disparo.

A distância entre as esferas é determinada através de um mecanismo de controle, comandados por um motor ligado ao conjunto de esferas. A distância do *gap* é automaticamente ajustada, de acordo com a tensão de disparo selecionada.

3.3.2 Divisor de tensão

É um dispositivo que tem a função de medir os valores de tensão aplicados pelo gerador de impulso, no equipamento testado. O divisor de tensão do laboratório UAT é o de modelo CRO 6000, com capacidade nominal de 6 MV, conforme Figura 3.13.

Vale ressaltar que sua tensão nominal é um pouco abaixo da nominal do gerador de impulso de 6,4 MV, porque é considerado que o gerador não atinge sua capacidade plena devido as quedas de tensão do sistema.



Figura 3.12: Capacitores.

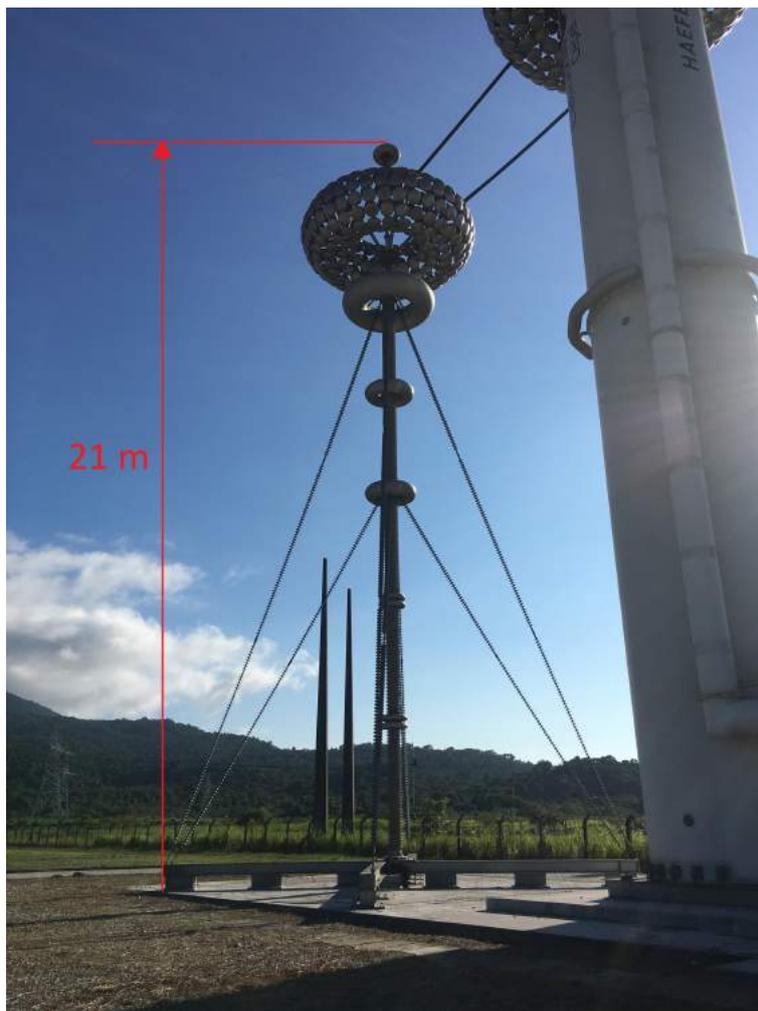


Figura 3.13: Divisor de tensão para medição.

3.3.3 Aquisição de dados

O principal meio de aquisição de dados no laboratório UAT é feito com um programa computacional, desenvolvido pela *Haefely*, chamado *High Resolution Impulse Analyzing System* - HiAS 743.

O HiAS compõe um sistema de medição preciso com 12 bits e uma taxa de resolução de 120 MS/s. As formas de onda são analisadas automaticamente, de acordo com as normas vigentes para impulsos em alta tensão [11]. O HiAS permite a visualização dos parâmetros de impulso que são efetivamente relevantes para a realização do ensaio, como amplitude de tensão, tempo de frente, de cauda e de disrupção, além de diversas ferramentas para análise de dados. Está localizado em uma parte da mesa de controle, conforme Figura 3.14.



Figura 3.14: Mesa de controle do HiAS.

Além disso, existe também outro sistema de medição composto por um gravador autônomo de transitórios de alta tensão e um sistema de transmissão de dados via fibra ótica, mostrados na Figura 3.15. A utilização desse sistema é bastante recente no Cepel, por isso, esse sistema de aquisição foi utilizado apenas para algumas medições de correntes, que serão mostradas no Capítulo 4.



Figura 3.15: Sistema de medição via fibra ótica.

3.4 Montagem do ensaio

A montagem do ensaio é composta por uma torre de suspensão de corrente contínua estaiada leve e dois pólos (Figura 3.16), com suas respectivas linhas de transmissão. Cada linha possui um feixe com seis condutores, com raio de 0,6 metros e cabo *coreopsis* como condutor (CA1590 kcmil *coreopsis* - 61 fios). Na Figura 3.19, é possível visualizar fotos da torre e da cadeia de isoladores montadas para o ensaio.

O circuito é montado com o gerador de impulsos e divisor de tensão conectados na linha de transmissão com a cadeia de isoladores. Na Figura 3.18, tanto o gerador quanto o divisor estão conectados através de uma ligação com fio de cobre que devido a resolução da imagem, não é possível observar. Por isso, o esquema de circuito foi montado, conforme Figura 3.17 para mostrar claramente as ligações realizadas.

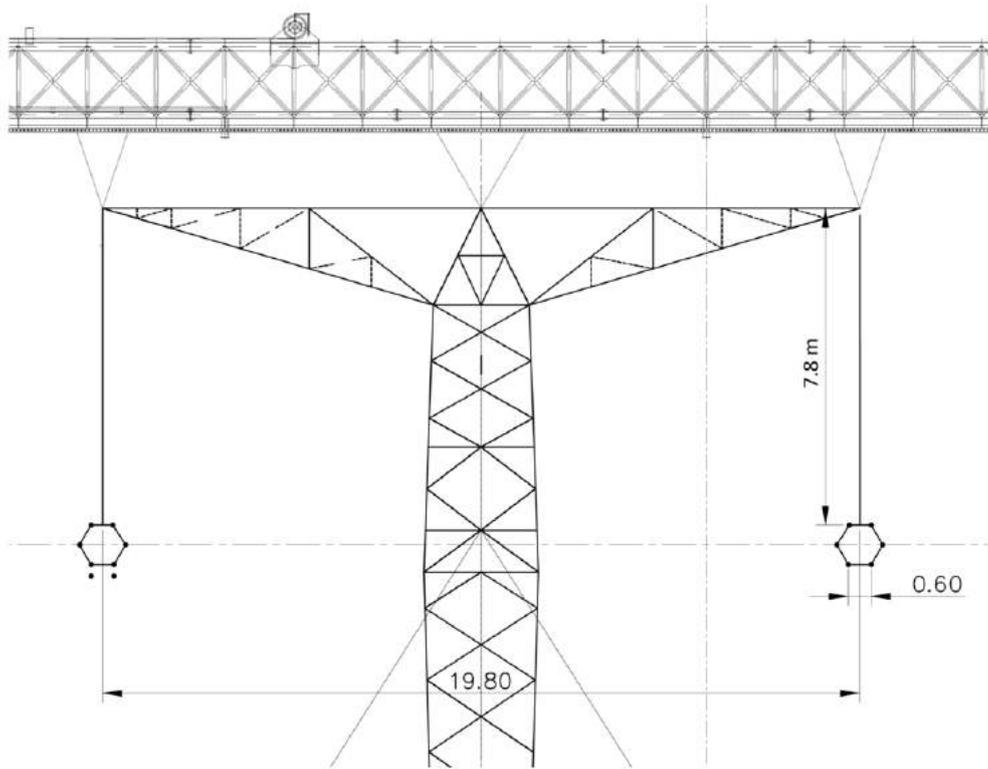


Figura 3.16: Torre de transmissão em corrente contínua.

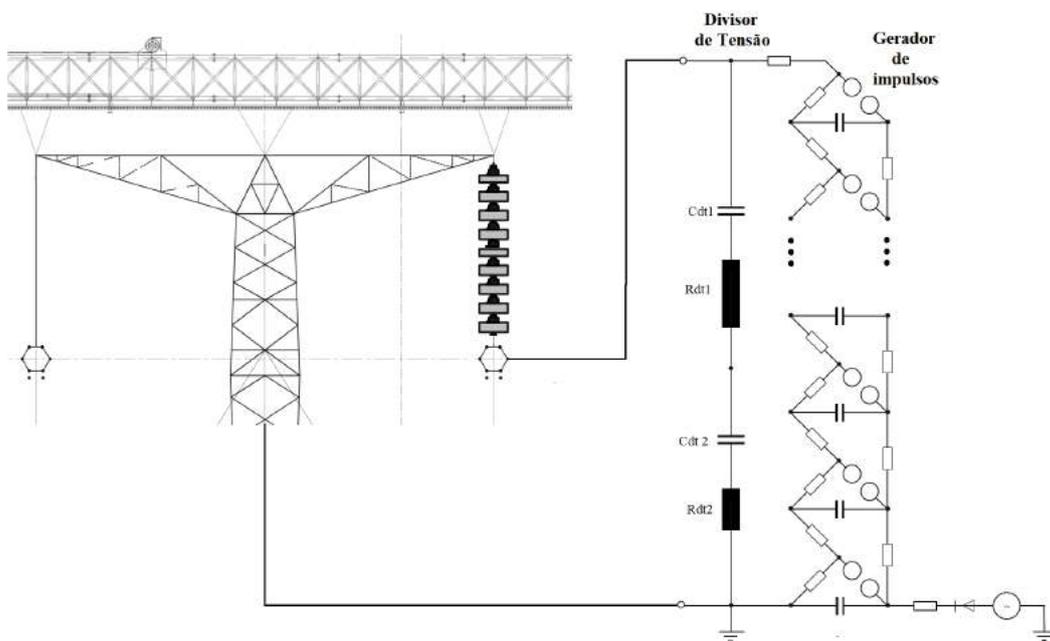


Figura 3.17: Esquema do circuito montado.



Figura 3.18: Foto do circuito de ensaio montado.

3.5 Ensaio realizados

Em 2018, iniciou-se a utilização do laboratório UAT para pesquisas experimentais com a realização de ensaios elétricos para avaliação das características dielétricas da cadeia de isoladores.

O laboratório UAT é uma área externa de grandes dimensões, que possui diversas particularidades, desde equipamentos capazes de operar com elevados níveis de tensão e de ficar expostos a diferentes condições climáticas, até imprevistos inerentes da própria conexão do circuito devido sua extensão.

Além disso, o processo de montagem e a realização de ensaios elétricos são procedimentos desafiadores, devido a inovação, singularidade e pouca referência disponibilizada deste laboratório.



Figura 3.19: Fotos da torre montada e cadeia de isoladores no laboratório UAT

Com isso, inicialmente foram realizados ensaios para determinação da tensão $U_{50\%}$ com impulso de manobra, com a finalidade de obter um maior conhecimento sobre o funcionamento do laboratório e seus equipamentos. Nesse período, foram realizados ensaios na polaridade positiva e negativa, alguns com a utilização de uma câmera de alta velocidade para capturar o momento da descarga elétrica.

Em seguida, no final de 2018, foi realizado o ensaio para determinação do $U_{50\%}$ com impulso atmosférico. Esse ensaio tem uma utilidade importante na caracterização do método **LPM**. Também foram realizados ensaios com o objetivo de medir a corrente durante a aplicação de impulsos atmosféricos.

Todos os ensaios serão detalhados nos próximos tópicos. Dessa forma, foram obtidos diversos resultados importantes na execução de ensaios, assim como as limitações e dificuldades envolvendo a operação desse laboratório único no Brasil.

3.5.1 Ensaios com Impulso de manobra

Com a proposta inicial de explorar a operação do laboratório e avaliar se os parâmetro de ensaios (como tempo e amplitude) estavam dentro dos valores especificados, os

ensaios preliminares realizados no laboratório UAT, foram os ensaios com aplicações de impulsos de manobra, conhecidos como *Up and Down*.

3.5.1.1 Método *Up and Down*

O método de ensaio consiste em identificar a tensão U50% correspondente da cadeia de isoladores e, em seguida, verificar se a cadeia de isoladores suporta os impulsos de acordo com o nível de isolamento encontrado.

Dois procedimentos são geralmente utilizados para a execução deste ensaio, sendo eles: Método de verificação e determinação, que devem ser efetuados tanto nas polaridades positiva quanto negativa.

Os ensaios foram realizados conforme o **item 7.3.1.4 da norma IEC 60060-1 (procedimento D)**, com o objetivo de encontrar o valor de tensão no qual o dielétrico tem 50% de probabilidade de suportar a disrupção - U50%. Fazem parte do método *Up and Down* dois procedimentos:

- **Método da Determinação**

É a constatação da tensão suportável previamente estabelecida com trinta impulsos de tensão. São realizadas aplicações em torno da tensão disruptiva estimada até a ocorrência da descarga elétrica, seguida de uma aplicação de tensão que não resulte em descarga disruptiva, na qual inicia-se a contagem dos trinta impulsos correspondentes a esse método. A partir do primeiro impulso contabilizado, são aplicados impulsos com uma variação de 3% abaixo ou acima, de acordo com a existência de descarga ou não, respectivamente. Em seguida, é feita uma média das trinta tensões medidas durante o ensaio, sendo esse valor multiplicado pelo desvio padrão considerado. Foram considerados resultados sem correção de temperatura. O valor final obtido é a tensão com 50% de probabilidade de ocorrência de descarga (U50%).

- **Método da Verificação**

Avalia se o isolamento da cadeia de isoladores ensaiada está adequado diante de um impulso de manobra. Para isso, é necessário realizar quinze ensaios

com o valor de U50% encontrado. O resultado é considerado aceitável se não ocorrer o rompimento do isolamento mais de duas vezes.

O método de verificação foi escrito nesse trabalho para referência teórica, pois somente o método de determinação foi realizado nos ensaios feitos no laboratório em ambas as polaridade (negativa e positiva). Para estes ensaios, variou-se o tempo de frente de onda entre 78 e 350 μs , mantendo o tempo de meia onda em torno de 2500 μs .

Com a realização dos ensaios, a ideia é estabelecer uma correlação entre o nível de tensão de impulso de manobra com probabilidade de 50% de descarga (U50%) e o comprimento do *gap*, conforme descrito nos conceitos teóricos deste trabalho. Dessa forma, buscou-se uma forma de validar os ensaios de impulso de manobra realizados com os conceitos teóricos, de forma a realizar um trabalho com aplicação experimental simultaneamente.

Durante a realização dos ensaios *Up-and-Down*, foram obtidos os oscilogramas de tensão e algumas filmagens com a câmera de alta velocidade. O objetivo principal foi gravar o momento da descarga, durante a aplicação dos impulsos de manobra.

3.5.2 Ensaios com impulso atmosférico

Posteriormente, foram realizados os ensaios elétricos com a aplicação de impulsos atmosféricos. Assim, como nos ensaios de manobra realizados preliminarmente, a proposta foi analisar e estudar esse tipo de ensaio em um laboratório com nível de ultra alta tensão.

Além disso, com os gráficos obtidos durante os ensaios de impulso atmosférico, será possível avaliar as formulações analíticas do modelo LPM, descritas no capítulo 2, com as formas de ondas medidas.

Capítulo 4

Análise dos resultados

No capítulo 4 são abordados os principais aspectos dos resultados obtidos durante a realização dos ensaios elétricos e a aplicação dos diferentes métodos com a utilização do *Leader Progression Model*. Para comparação entre resultados teóricos e experimentais, cálculos e visualização das formas de onda, foi utilizado o programa computacional *Mathematica*.

Os resultados obtidos durante a medição de corrente, com osciloscópio e fibra ótica, também serão apresentados como parte da pesquisa realizada no laboratório UAT. Essas medições foram feitas com aplicação de impulso atmosférico e apresentaram um elevado grau de complexidade, desde a aquisição até a interpretação da influência dos equipamentos utilizados no resultado final.

Feita a revisão teórica e destacando os principais conceitos envolvidos no laboratório UAT nos capítulos 2 e 3, será possível realizar uma análise das características mais importantes da cadeia de isoladores e concluir o processo de investigação por meio dos resultados experimentais obtidos.

4.1 Impulso de manobra

Os ensaios elétricos iniciais foram realizados com aplicação do impulso de manobra, sendo o método *Up and Down* detalhado no capítulo 3.

Foram utilizadas formas de onda nos ensaios com tempo de frente variando entre $78 \mu s$ e $350 \mu s$, em ambas polaridades.

4.1.1 *Up and down* - polaridade positiva

Os resultados dos ensaios de impulso de manobra, realizados para variação do tempo de frente na polaridade positiva, encontram-se resumidos na Tabela 4.1 e na Figura 4.1.

Tabela 4.1: Valores de U50% na polaridade positiva para diferentes ajustes de tempo de frentes.

Polaridade Positiva	
Tempo de frente [μs]	U50% [kV]
78	2015
140	1837
210	1829
250	1816
290	1883
350	1941

Observa-se que a variação da tensão $U_{50\%}$ foi menor no intervalo $140 \mu s < T_p < 250 \mu s$, podendo ser visualizado também na Figura 4.1.

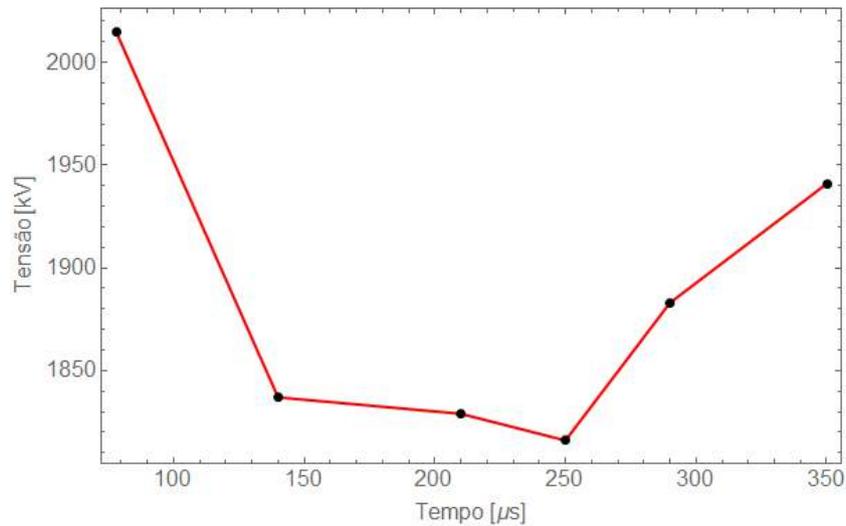


Figura 4.1: Gráfico U50% x T_p - Polaridade Positiva.

Para polaridade positiva, os resultados indicaram uma curva com a concavidade voltada para cima, que mostra que a suportabilidade dielétrica de uma cadeia longa teve comportamento semelhante a curvas relacionadas a diferentes configurações de *gap*, encontradas na referência [24].

O tempo de frente da onda influencia o valor da tensão U50%, podendo ser visto na Figura 4.1. Fazendo um comparativo, para os níveis de tensão aplicados, existe um ponto no gráfico que deve atender a uma tensão mínima de disrupção para este tipo de *gap*, que representa a distância de isolamento formada pela cadeia de isoladores. Dessa forma, as características da curva são alteradas de acordo com a distância de cada *gap* considerado.

4.1.2 *Up and down* - polaridade negativa

Os resultados dos ensaios de manobra, realizados para variação do tempo de frente na polaridade negativa, encontram-se resumidos na Tabela 4.2 e na Figura 4.2.

O ensaio correspondente ao tempo de frente de 350 μ s não foi realizado, devido às limitações do gerador, que não atinge sua capacidade máxima de tensão. Com isso, não foi possível gerar uma tensão de disrupção para esse parâmetro de tempo, por estar próximo do limite de tensão do gerador.

Tabela 4.2: Valores de U50% na polaridade negativa para diferentes ajustes de tempo de frentes.

Polaridade Negativa	
Tempo de frente [μs]	U50% [kV]
78	3246
140	3613
210	3529
250	3595
290	3560
350	-

Através da Tabela 4.2 é possível observar que a suportabilidade para polaridade negativa é aproximadamente duas vezes maior que para a positiva. Comparando os valores de tensão U50% na Figura 4.2, a tensão correspondente ao tempo de frente igual a $78 \mu s$ é menor quando comparado aos outros valores de U50%, caracterizando uma mudança no comportamento desta curva.

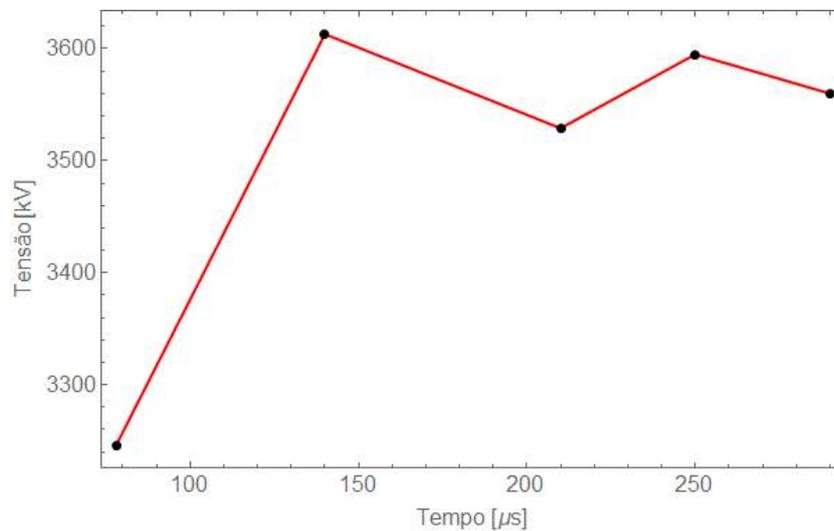


Figura 4.2: Gráfico U50% x T_p - Polaridade Negativa.

A Figura 4.3 apresenta os gráficos U50% x T_p para as duas polaridades.

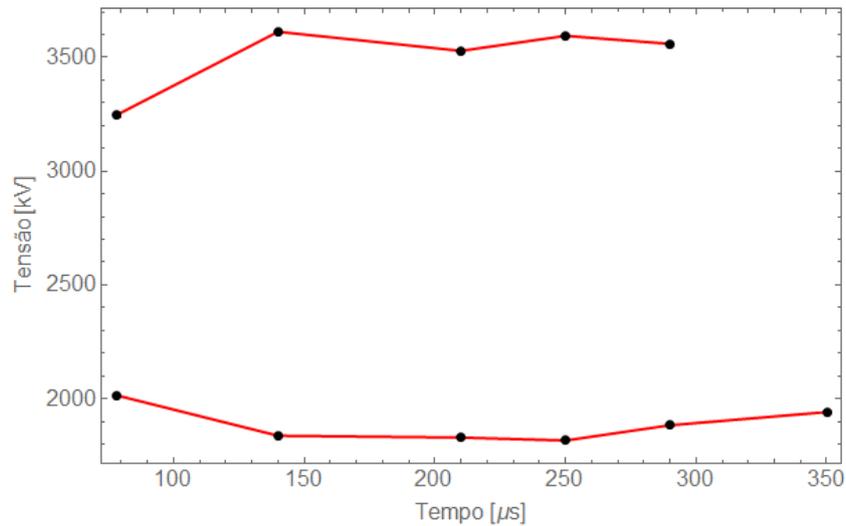


Figura 4.3: Gráfico U50% x T_p - Polaridade Positiva e Negativa.

A realização dos ensaios com impulsos de manobra foi de grande importância no desenvolvimento deste trabalho, pois permitiu identificar as dificuldades envolvidas na operação do laboratório, obter conhecimento e efetuar os ajustes necessários para os ensaios com impulsos atmosféricos.

Além disso, os resultados experimentais possibilitaram uma comparação com conceitos teóricos [24], nos quais observou-se que o comportamento da Figura 4.1 corresponde ao esperado. A Figura 4.3 indica que o ensaio com tempo de frente de 78μ s apresentou um resultado imprevisível, com uma tensão U50% menor do que a tensão correspondente aos outros parâmetros de tempo nesta mesma polaridade.

4.2 Impulso atmosférico

Para aplicar os métodos de cálculos dos parâmetros do **LPM**, vistos no capítulo 2, e avaliar se os conceitos definidos para diferentes tipos de *gap* podem ser utilizados também para *gaps* longos com isoladores, foi realizado o método *Up and Down* com impulso atmosférico.

Durante este ensaio as seguintes medições foram realizadas:

1. Medição da tensão U50%;
2. Medição da corrente no gerador de impulso e divisor com osciloscópio antes da disrupção;
3. Medição da corrente no gerador de impulso e divisor com medidor via fibra ótica antes da disrupção.

A montagem do circuito de ensaio para impulso atmosférico não é simples, conforme explicado no capítulo 3. Devido às grandes dimensões do circuito e limitações do gerador de impulso, valores de resistência e pontos de conexão, obter a forma de onda padronizada foi bastante complexa, bem mais que os impulsos de manobra.

Situações como impulsos atmosféricos com tempo de frente maior, na ordem de $10 \mu s$, e com bastante ruído na frente de onda demandaram muitos testes e mudanças no circuito, levando bastante tempo para serem solucionadas. Uma mudança importante feita foi com relação aos pontos de conexão do gerador e divisor. Após vários testes no circuito, verificou-se que afastando esses pontos um do outro, foi possível obter o melhor resultado para uma forma de onda de impulso atmosférico, de aproximadamente $4/50 \mu s$, que é um resultado condizente com os parâmetros típicos das primeiras descargas de retorno [25]. Dessa forma, tanto o gerador quanto o divisor foram conectados na linha de transmissão, com o ponto do divisor próximo da cadeia de isoladores e o do gerador afastado, produzindo formas de onda sem oscilações.

4.2.1 Medições de tensão

A primeira etapa da realização do ensaio *Up and Down* foi obter a forma de onda de impulso atmosférico para ajuste do circuito. Na Tabela 4.3 estão os valores medidos na forma de onda de ajuste e na Tabela 4.4 são apresentados os parâmetros do circuito para a obtenção desta forma de onda.

Tabela 4.3: Medições feitas no ensaio de ajuste do método *Up and Down*.

Polaridade Positiva			
Tensão aplicada por estágio	Tensão medida	T_p	T_2
79,4 kV	1968 kV	3,87 μs	54,76 μs

Tabela 4.4: Parâmetros aplicados no circuito de ensaio.

Parâmetros	
Capacitância em série	31,25 nF
Capacitância de frente	300 pF
Resistência em série	16 Ω
Resistência em paralelo 1	120 Ω
Resistência em paralelo 2	120 Ω
Número de estágios	32

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores relacionados às condições atmosféricas durante a realização do ensaio.

Tabela 4.5: Medição das condições atmosféricas.

Condições atmosféricas	
Pressão	755,7 mmHg
Temperatura	32,9 °C
Umidade Relativa	52 %

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores de tensão e de tempo de corte medidos no ensaio *Up and Down*. Na Tabela 4.6 são apresentadas as informações sobre a cadeia de isoladores. **A tensão $U_{50\%}$ encontrada para a cadeia de isoladores foi de 3975,93 kV**

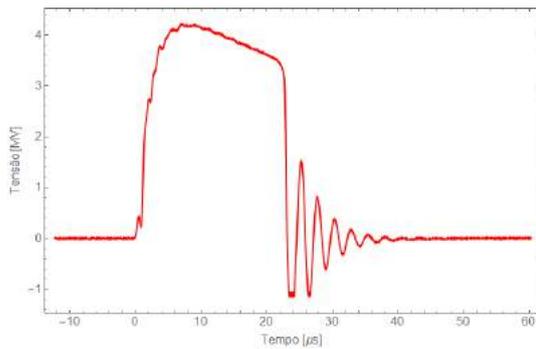
Tabela 4.6: Informações sobre a cadeia de isoladores.

Isoladores	
Número de isoladores	39
Comprimento da cadeia	7,8 m

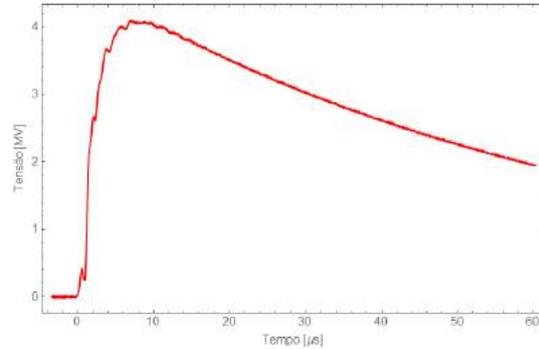
Tabela 4.7: Valores do ensaio *Up and Down*.

Polaridade Positiva			
Número	V [kV]	Suportou (sim/não)	T_C [μ s]
1	4189	não	22,961
2	4072	sim	-
3	4104	não	19,030
4	3996	sim	-
5	4095	não	16,248
6	3985	não	19,386
7	3871	sim	-
8	3979	não	16,903
9	3869	sim	-
10	3988	não	19,233
11	3877	sim	-
12	3989	não	25,526
13	3877	sim	-
14	3985	não	23,917
15	3875	sim	-
16	3991	não	21,083
17	3879	sim	-
18	3988	não	20,675
19	3878	sim	-
20	3988	sim	-
21	4098	não	16,334
22	3993	não	19,138
23	3882	sim	-
24	3989	não	18,502
25	3881	sim	-
26	3991	sim	-
27	4102	não	14,938
28	3992	não	21,317
29	3877	sim	-
30	3998	não	25,156

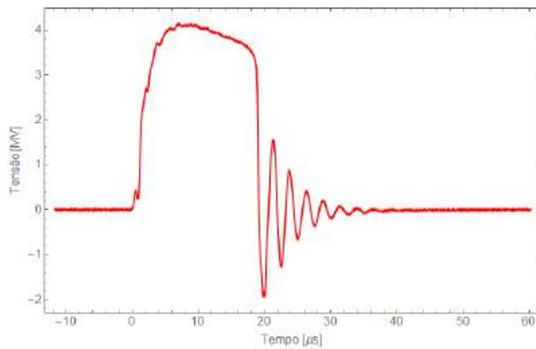
Nas Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 estão os oscilogramas de tensão medidos nesse ensaio. Esses registros correspondem aos 30 impulsos atmosféricos aplicados na cadeia de isoladores. Quando a cadeia não suporta a tensão aplicada, ocorre uma disrupção elétrica, caracterizada por um corte na forma de onda e, portanto, uma queda repentina de tensão. Os impulsos plenos indicam a ausência de disrupção.



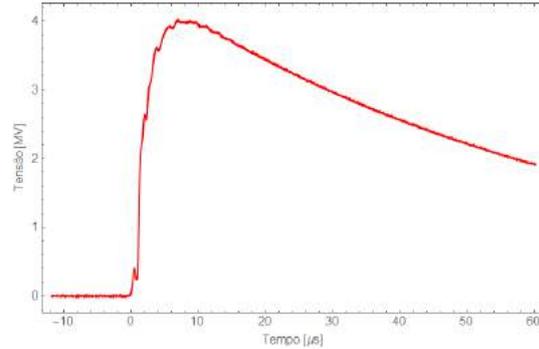
Oscilograma 1



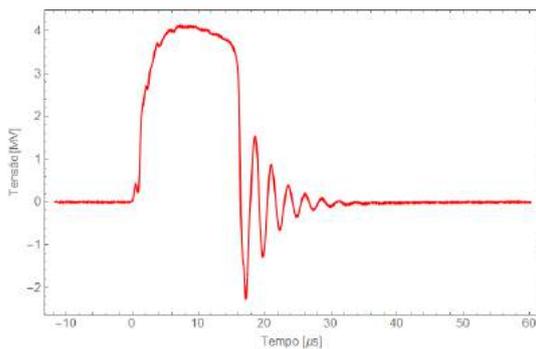
Oscilograma 2



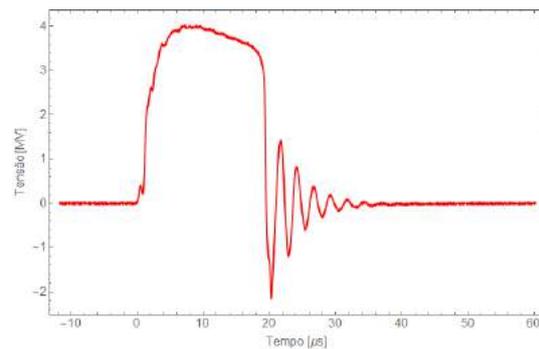
Oscilograma 3



Oscilograma 4

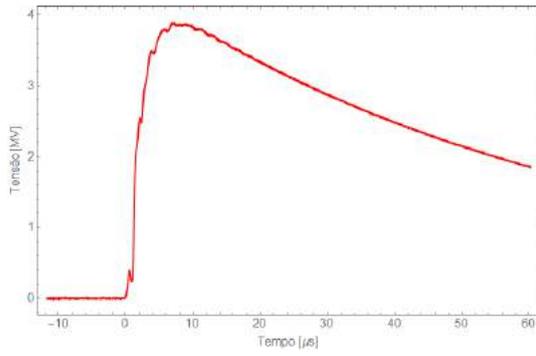


Oscilograma 5

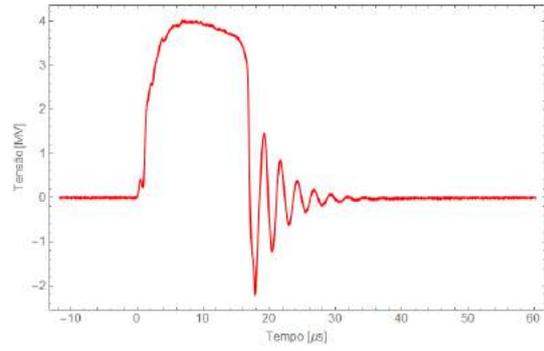


Oscilograma 6

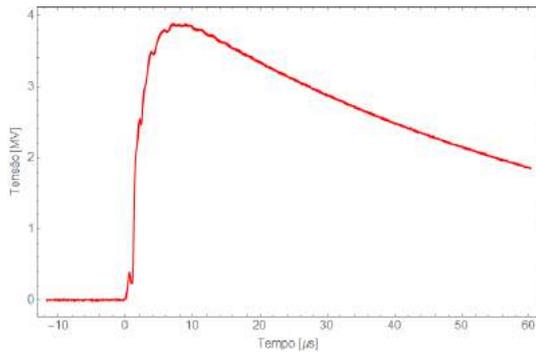
Figura 4.4: Oscilogramas de tensão obtidos no ensaio com Impulso Atmosférico - parte 1.



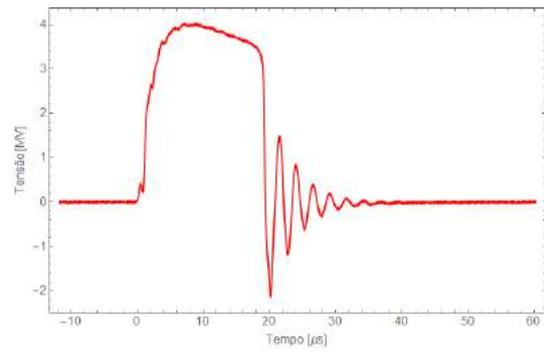
Oscilograma 7



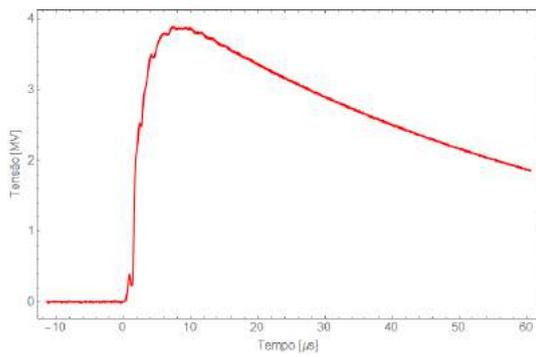
Oscilograma 8



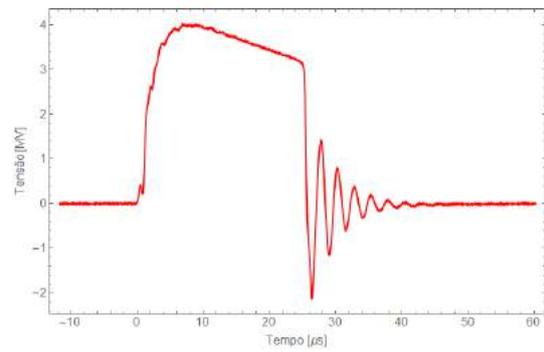
Oscilograma 9



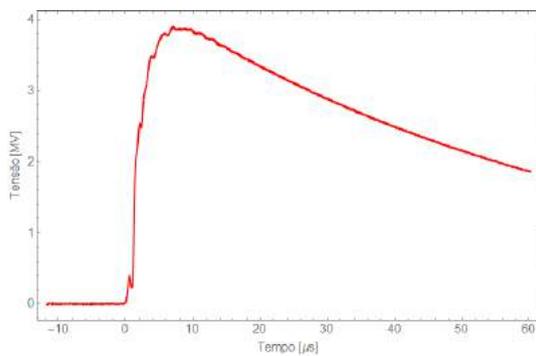
Oscilograma 10



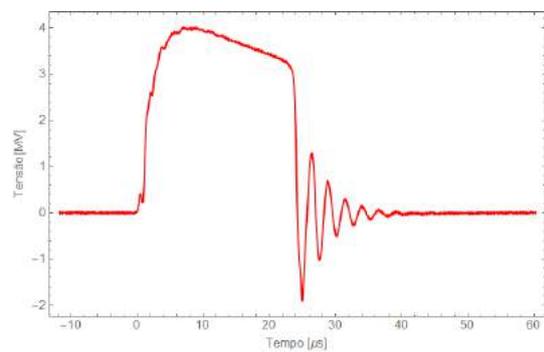
Oscilograma 11



Oscilograma 12

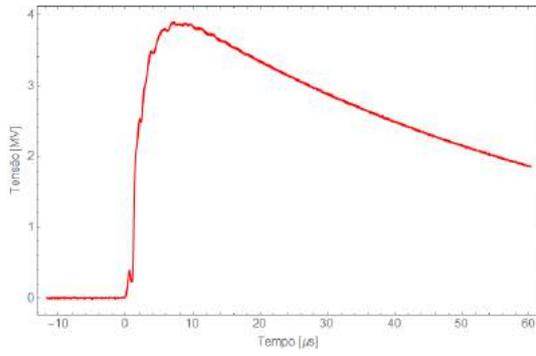


Oscilograma 13

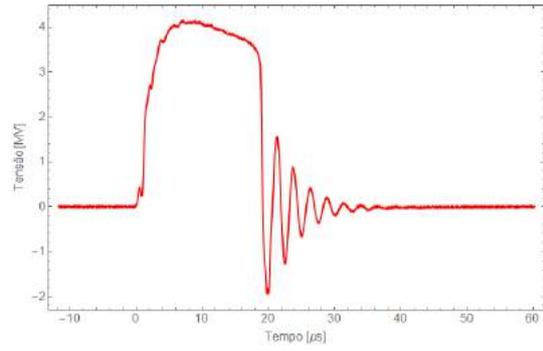


Oscilograma 14

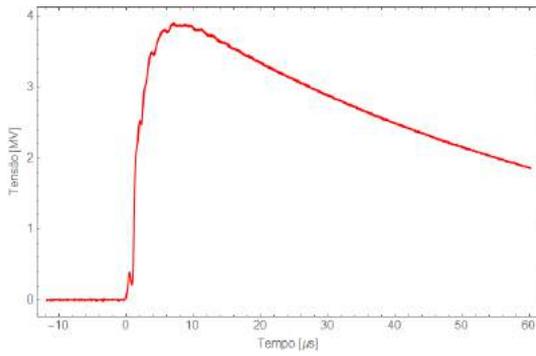
Figura 4.5: Oscilogramas de tensão obtidos no ensaio com Impulso Atmosférico -parte 2



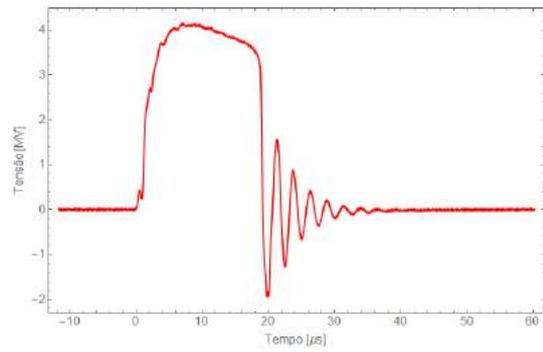
Oscilograma 15



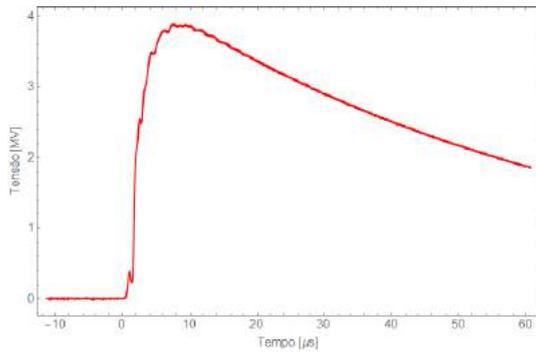
Oscilograma 16



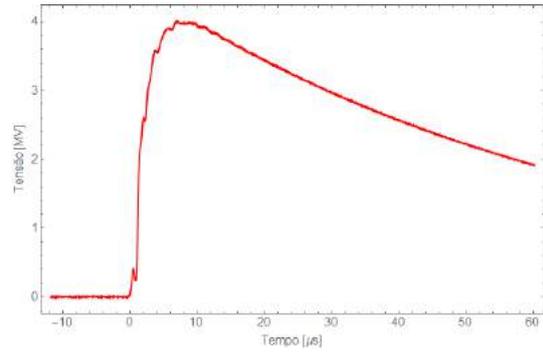
Oscilograma 17



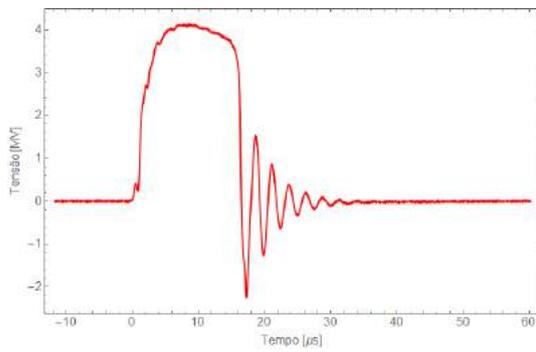
Oscilograma 18



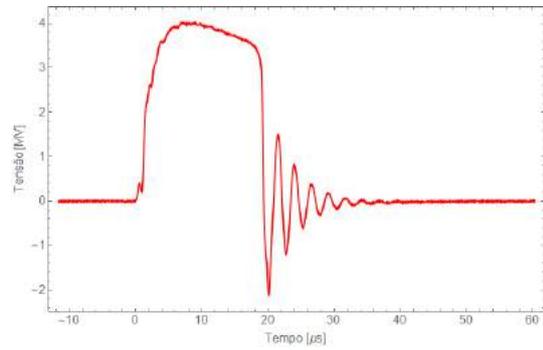
Oscilograma 19



Oscilograma 20

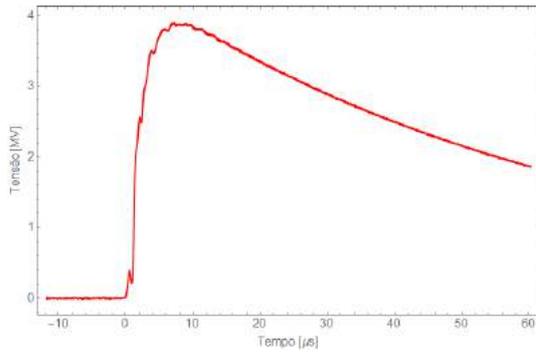


Oscilograma 21

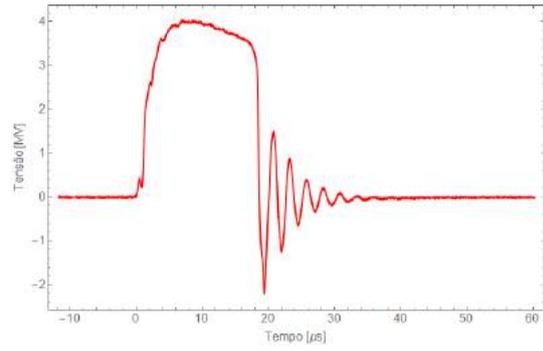


Oscilograma 22

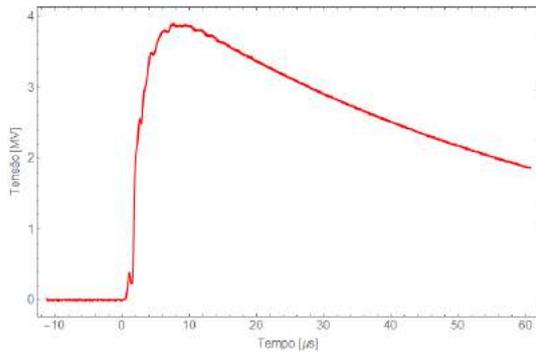
Figura 4.6: Oscilogramas de tensão obtidos no ensaio com Impulso Atmosférico - parte 3.



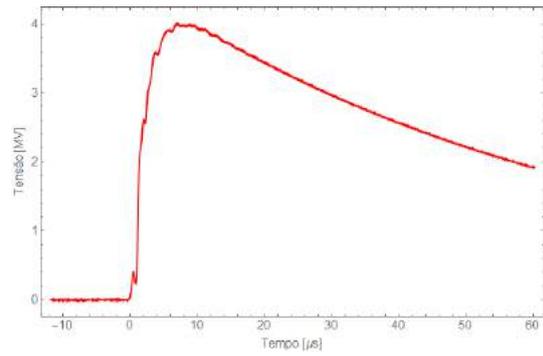
Oscilograma 23



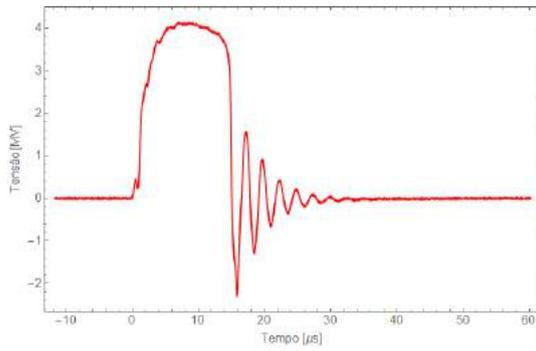
Oscilograma 24



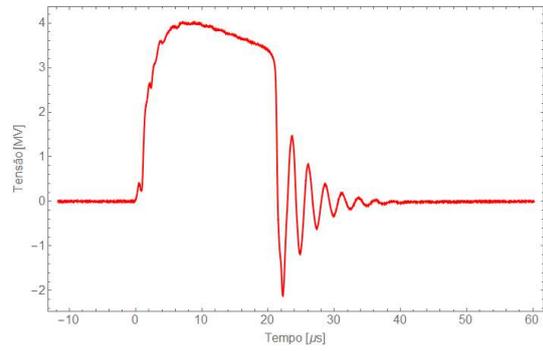
Oscilograma 25



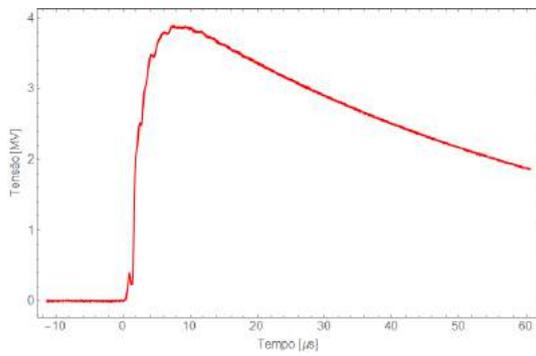
Oscilograma 26



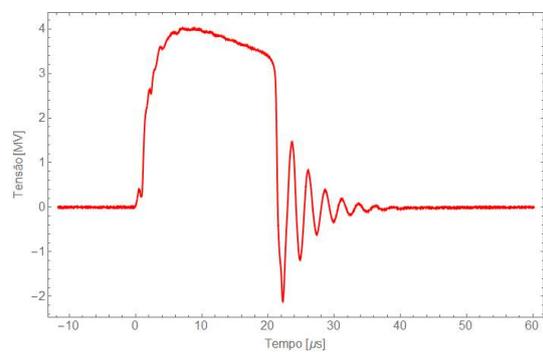
Oscilograma 27



Oscilograma 28



Oscilograma 29



Oscilograma 30

Figura 4.7: Oscilogramas de tensão obtidos no ensaio com Impulso Atmosférico - parte 4.

As formas de onda obtidas durante a realização do ensaio *up and down* com impulso atmosférico, permitiram efetuar os cálculos com as equações vistas nas Tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4.

4.2.2 Cálculos dos parâmetros do LPM

Neste tópico serão calculados os parâmetros baseados no modelo LPM, com o objetivo de avaliar se as formulações analíticas desenvolvidas podem ser utilizadas para *gaps* longos, com isoladores, em níveis de ultra alta tensão.

4.2.2.1 Estudo de caso

Neste estudo de caso, foi feita a comparação entre os resultados calculados a partir das formulações citadas no capítulo 2 e dados experimentais obtidos no oscilograma de tensão 28.

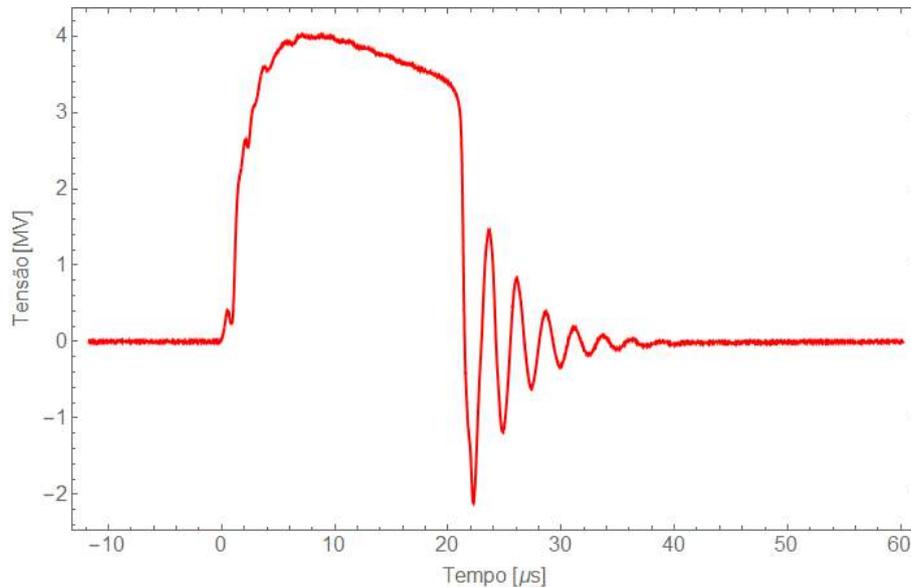


Figura 4.8: Oscilograma de tensão 28.

Nos trabalhos realizados por SUZUKI [3] e PIGINI [5], foi possível identificar que o tempo de desenvolvimento do *streamer* (T_s) equivale ao instante entre o zero virtual (O') e o tempo de pico da forma de onda. Outra característica é que o tempo de desenvolvimento do *leader* é aproximadamente a diferença entre o tempo de dis-

rupção (T_b) e tempo de desenvolvimento do *streamer* (T_s). Então, essas informações foram utilizadas nas comparações realizadas.

Nos próximos tópicos, serão apresentadas as Tabelas 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13, que indicam os resultados obtidos para este estudo de caso a partir das considerações e equações desenvolvidas por WAGNER [1], SHINDO [2], SUZUKI [3], MOTOYAMA [4], PIGINI [5] e WANG [6]. A Tabela 4.14, mostra uma comparação geral entre os valores calculados e obtidos experimentalmente.

4.2.2.2 WAGNER [1]

Considerando que $v_s = 3 \times 10^5$ m/s e que:

$$v_l = k_1 d \left(\frac{U(t)}{d-x} - E_o \right)$$

Tabela 4.8: Comparação entre equações de WAGNER [1] e resultados experimentais.

WAGNER [1]		Experimental	
T_s [s]	T_L [s]	T_s [s]	T_L [s]
26×10^{-6}	$6,27165 \times 10^{-10}$	$6,94167 \times 10^{-6}$	$14,37 \times 10^{-6}$

4.2.2.3 SUZUKI [3]

$$v_s = k_1 U_p - k_2 d + k_3$$

$$v_l = k_1 \frac{(U(t) - E_L d)(U(t) - E_L x)}{d-x}$$

Tabela 4.9: Comparação entre equações de SUZUKI [3] e resultados experimentais.

SUZUKI [3]		Experimental	
T_s [s]	T_L [s]	T_s [s]	T_L [s]
$2,47902 \times 10^{-6}$	$2,14727 \times 10^{-8}$	$6,94167 \times 10^{-6}$	$14,37 \times 10^{-6}$

4.2.2.4 SHINDO [2]

$$T_s = \frac{k_1}{(U_p/d) - k_2}$$

Tabela 4.10: Comparação entre equações de SHINDO [2] e resultados experimentais.

SHINDO [2]	Experimental	
T_s [s]	T_s [s]	T_L [s]
$T_{s_{Ponta-plano}} = 2,3267 \times 10^{-6}$	$6,94167 \times 10^{-6}$	$14,37 \times 10^{-6}$
$T_{s_{Ponta-ponta}} = 5,26887 \times 10^{-6}$	$6,94167 \times 10^{-6}$	$14,37 \times 10^{-6}$

4.2.2.5 PIGINI [5]

$$T_s = \frac{1}{k_1 \frac{E_p}{E_{50}} - k_2}$$

$$v_l = k_1 d \cdot e^{\frac{k_2 U(t)}{d}} \cdot \left(\frac{U(t)}{d-x} - E_0 \right)$$

Tabela 4.11: Comparação entre equações de PIGINI [5] e resultados experimentais.

PIGINI [5]		Experimental	
T_s [s]	T_L [s]	T_s [s]	T_L [s]
$2,96523 \times 10^{-6}$	$2,8251 \times 10^{-9}$	$6,94167 \times 10^{-6}$	$14,37 \times 10^{-6}$

4.2.2.6 MOTOYAMA [4]

$$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} U(t) dt > k_1 d + k_2$$

$$v_l = k_1 \left(\frac{U(t)}{d-x} - E_0 \right)$$

Tabela 4.12: Comparação entre equações de MOTOYAMA [4] e resultados experimentais.

MOTOYAMA [4]		Experimental	
T_s [s]	T_L [s]	T_s [s]	T_L [s]
$3,88488 \times 10^{-21}$	$11,649 \times 10^{-6}$	$6,94167 \times 10^{-6}$	$14,37 \times 10^{-6}$

4.2.2.7 WANG [6]

Tabela 4.13: Comparação entre equações de WANG [6] e resultados experimentais.

WANG [6]		Experimental	
T_s [s]	T_L [s]	T_s [s]	T_L [s]
$T_{s_{polimerico}} = 4,57141 \times 10^{-21}$	$3,2615 \times 10^{-6}$	$6,94167 \times 10^{-6}$	$14,37 \times 10^{-6}$
$T_{s_{porcelana}} = 1,76434 \times 10^{-21}$	$1,68694 \times 10^{-6}$	$6,94167 \times 10^{-6}$	$14,37 \times 10^{-6}$

4.2.2.8 Comparações entre os resultados

Tabela 4.14: Comparações entre todas as equações [1-6] e resultados experimentais.

	T_s [s]	T_L [s]
WAGNER [1]	26×10^{-6}	0
SUZUKI [3]	$2,47902 \times 10^{-6}$	0
SHINDO [2](ponta-plano)	$2,3267 \times 10^{-6}$	-
SHINDO [2](Ponta-ponta)	$5,26887 \times 10^{-6}$	-
PIGINI [5]	$2,96523 \times 10^{-6}$	0
MOTOYAMA [4]	0	$11,649 \times 10^{-6}$
WANG [6] (Polimérico)	0	$3,2615 \times 10^{-6}$
WANG [6](Porcelana)	0	$1,68694 \times 10^{-6}$
Experimental	$6,94167 \times 10^{-6}$	$14,37 \times 10^{-6}$

Considerando os valores da ordem de 10^{-8} ou menores virtualmente como zero, devido aos cálculos numéricos do *Mathematica*, e comparando as Tabelas 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13, observa-se que os resultados obtidos através das formulações

estão distantes dos resultados obtidos experimentalmente. O resultado mais próximo encontrado para T_s foi com a equação de SHINDO [2] e para T_L a equação de MOTOYAMA [4], conforme Tabela 4.14.

Na Figura 4.9, estão representados os gráficos da velocidade do *leader*, de acordo com cada equação utilizada. O eixo da velocidade está em escala logarítmica para melhor visualização de cada gráfico.

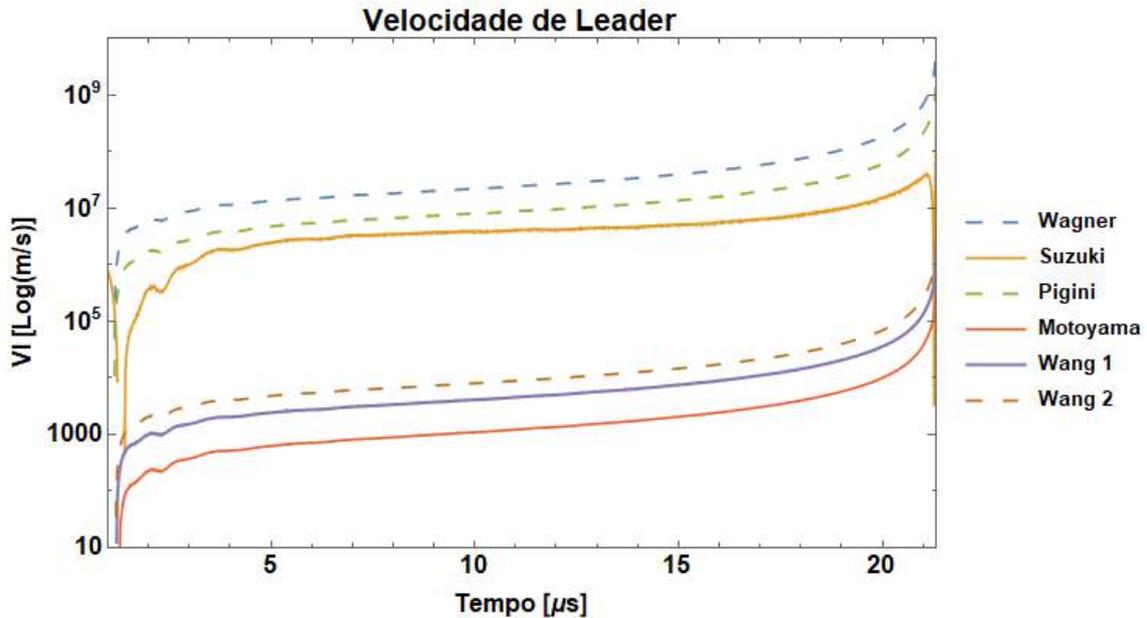


Figura 4.9: Gráficos das velocidades do *leader* obtidos a partir das equações de WAGNER [1], SUZUKI [3], MOTOYAMA [4], PIGINI [5] e WANG [6].

4.2.3 Medições de corrente

Com a finalidade de obter ainda mais informações sobre a cadeia de isoladores analisada, foi realizado um outro ensaio com impulso atmosférico, desta vez com o foco na medição da corrente do circuito.



Medição de corrente no divisor



Medição de corrente no gerador

Figura 4.10: Pontos de medição da corrente.

4.2.3.1 Medições de corrente com osciloscópio

Por tratar-se de uma medição ainda não realizada no laboratório UAT, muitos aspectos desafiadores surgiram nessa etapa, como foi visto no tópico 3.1. Após ajustes dos equipamentos do laboratório e sistemas de medições, os ensaios foram feitos com aquisição e armazenamento dos sinais de corrente medidos em dois pontos: gerador de impulso e divisor de tensão, conforme Figura 4.10.

Estas medições foram as melhores opções diante das dificuldades de conexão em outros lugares do circuito, devido aos vários pontos de aterramento e falta de medidores de correntes adequados. Foram aplicados impulsos atmosféricos com o valor máximo de 2000 kV para medição de corrente.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram os resultados medidos no gerador de impulso com osciloscópio e o TC para 500 kA de pico de corrente. Nas Figuras 4.13 e 4.14 são apresentados os resultados obtidos no divisor de tensão com osciloscópio e outro TC para 500 kA.

As medições feitas no gerador de impulso com o TC de 50 kA de pico de corrente são mostradas nas Figuras 4.15 e 4.16, enquanto as medições de corrente obtidas no divisor de tensão com o TC de 20 kA estão nas Figuras 4.17 e 4.18.

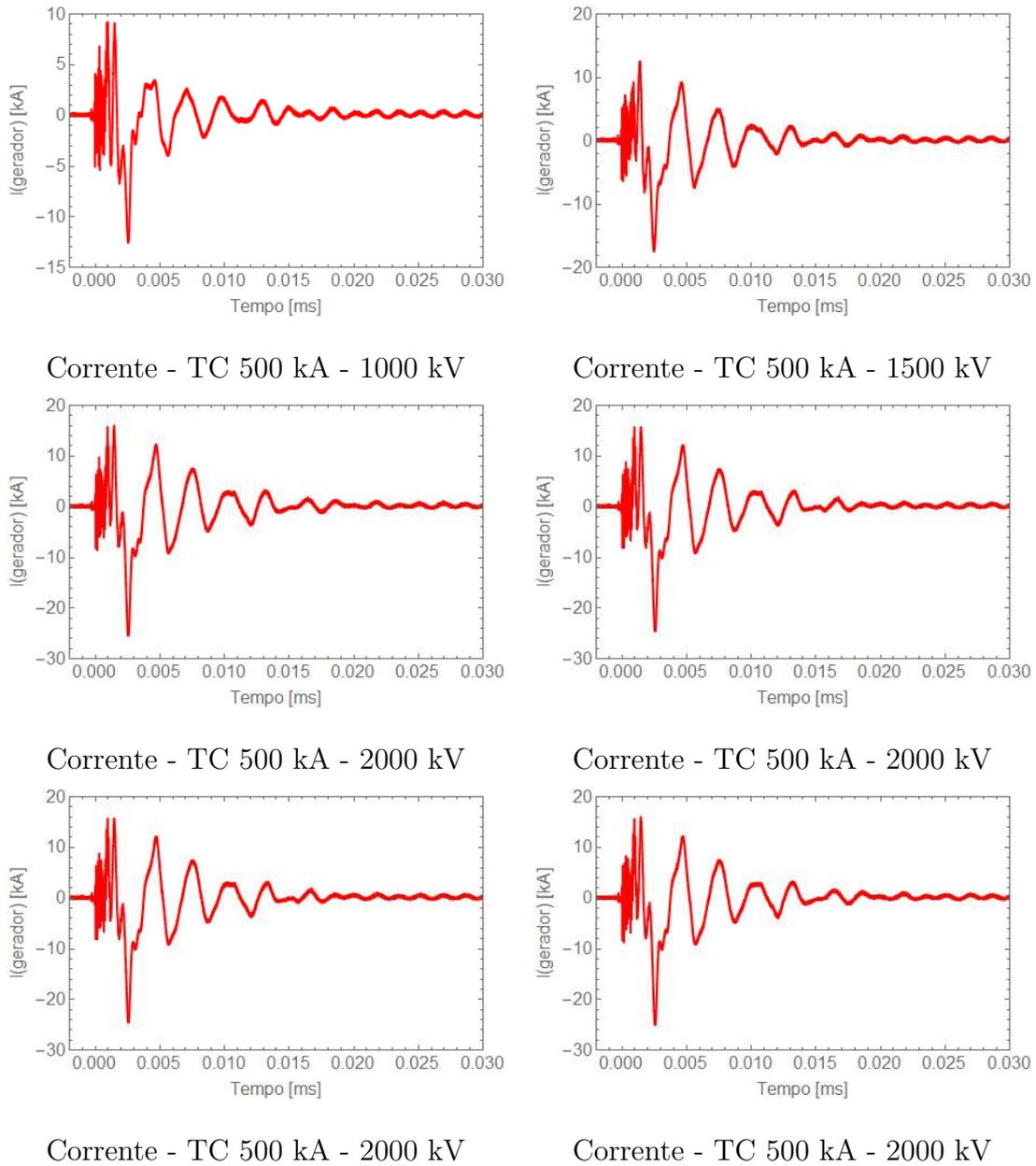


Figura 4.11: Corrente do GI medida no osciloscópio e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.

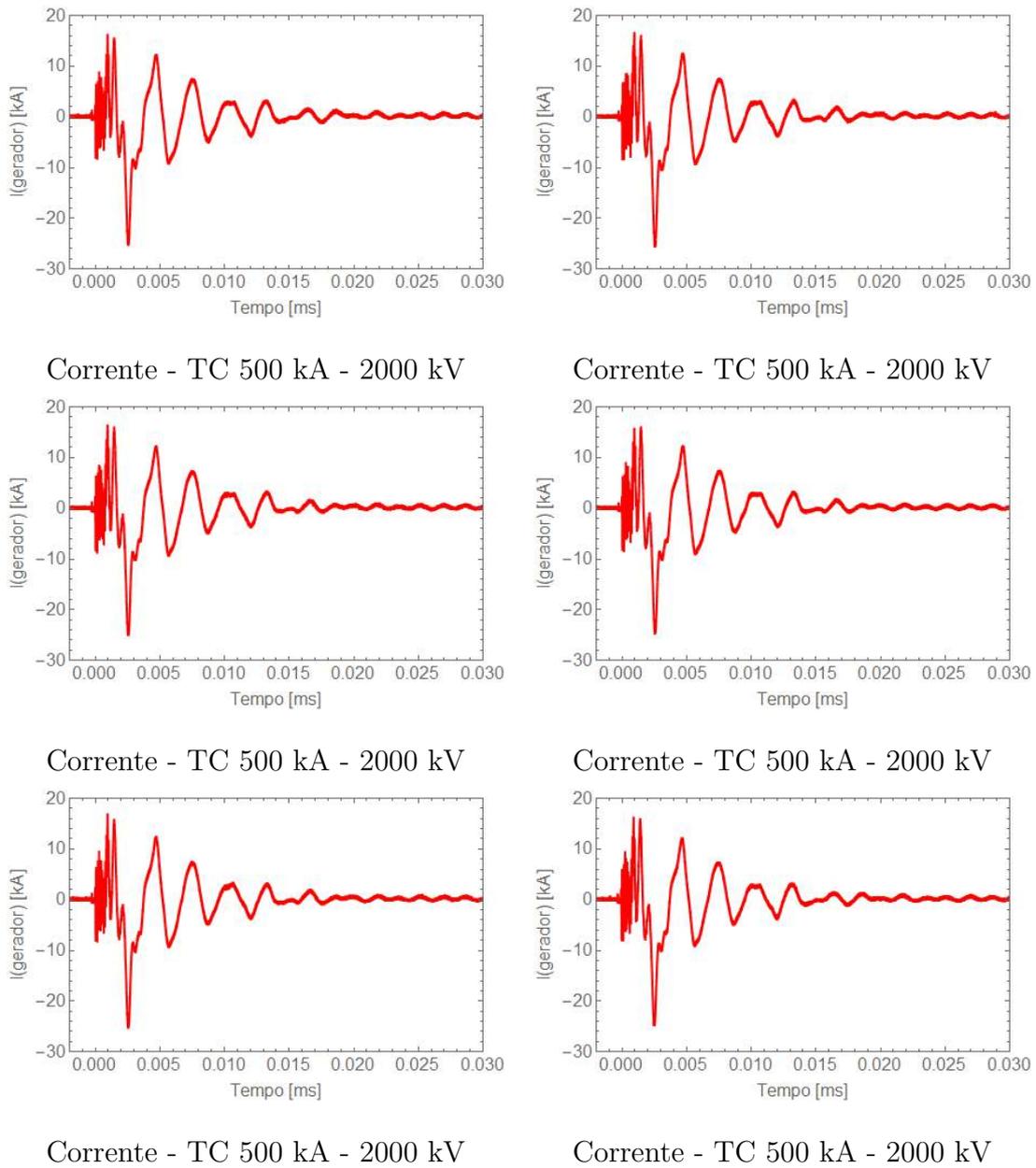
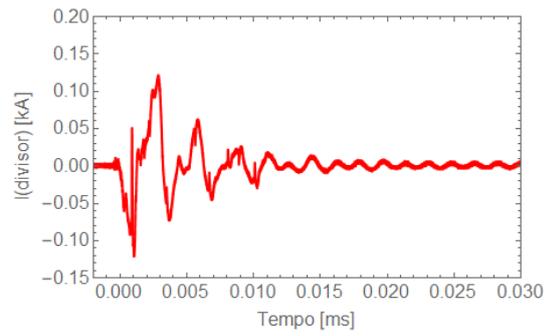
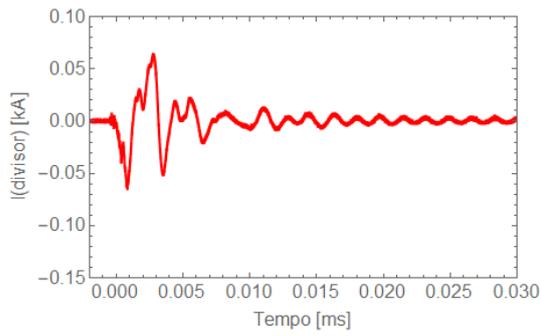
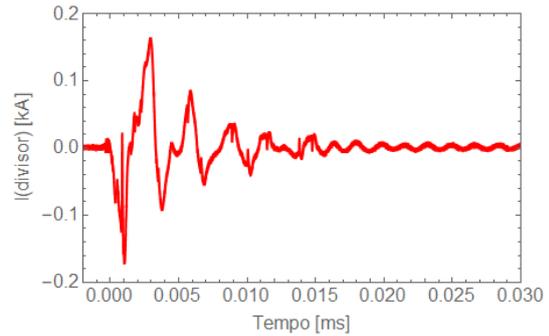
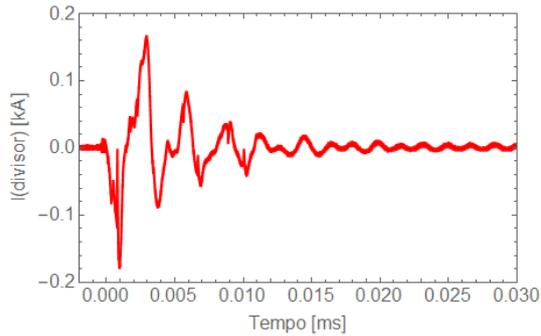


Figura 4.12: Corrente do GI medida no osciloscópio e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.



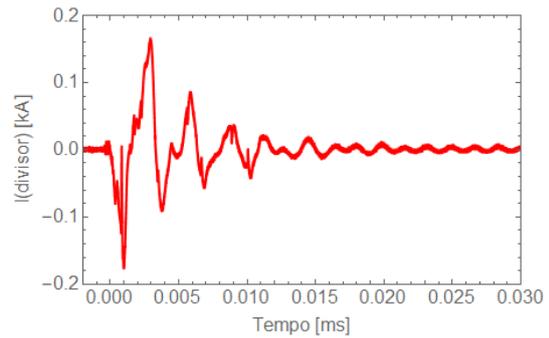
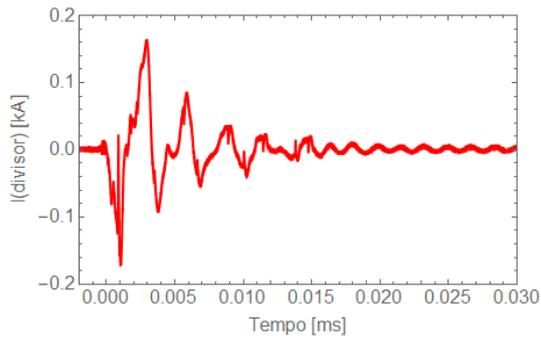
Corrente - TC 500 kA - 1000 kV

Corrente - TC 500 kA - 1500 kV



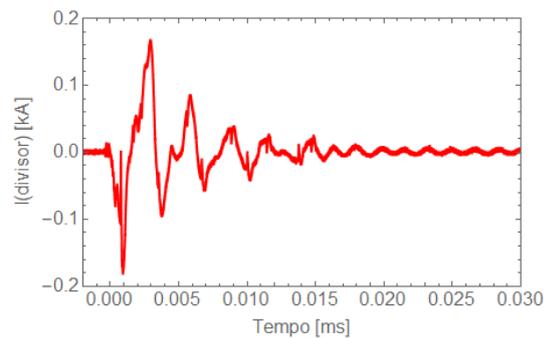
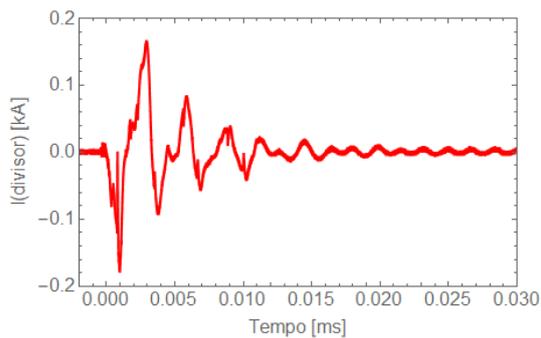
Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

Corrente - TC 500 kA - 2000 kV



Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

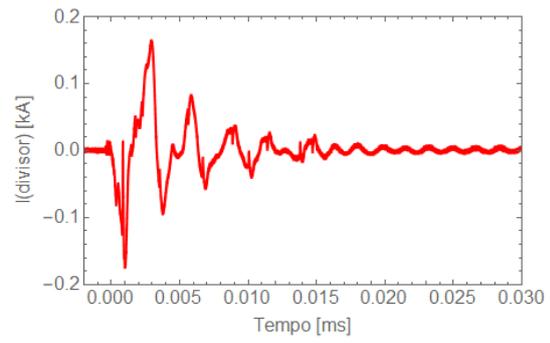
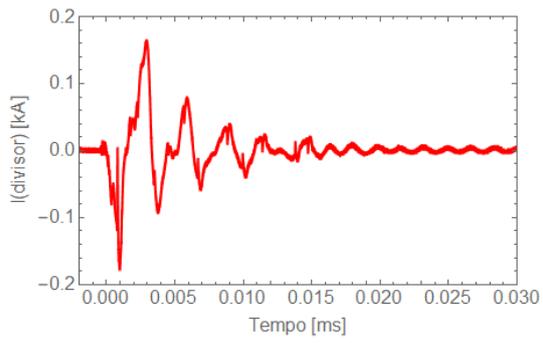
Corrente - TC 500 kA - 2000 kV



Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

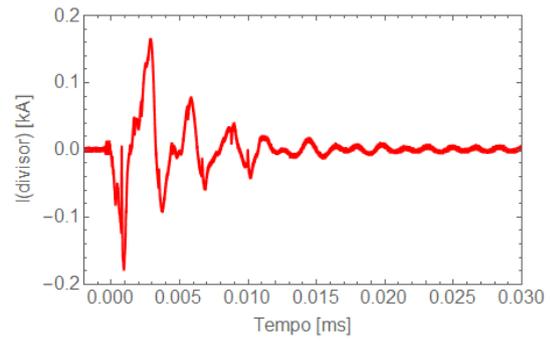
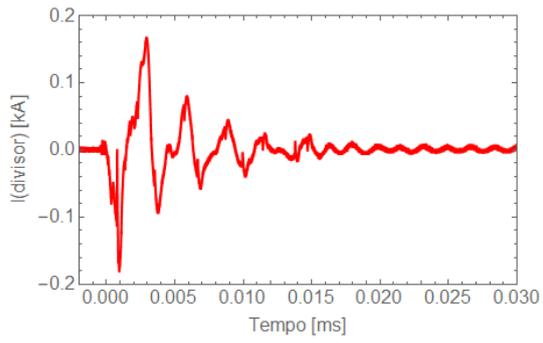
Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

Figura 4.13: Corrente do divisor de tensão medida no osciloscópio e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.



Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

Corrente - TC 500 kA - 2000 kV



Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

Figura 4.14: Corrente do divisor de tensão medida no osciloscópio e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.

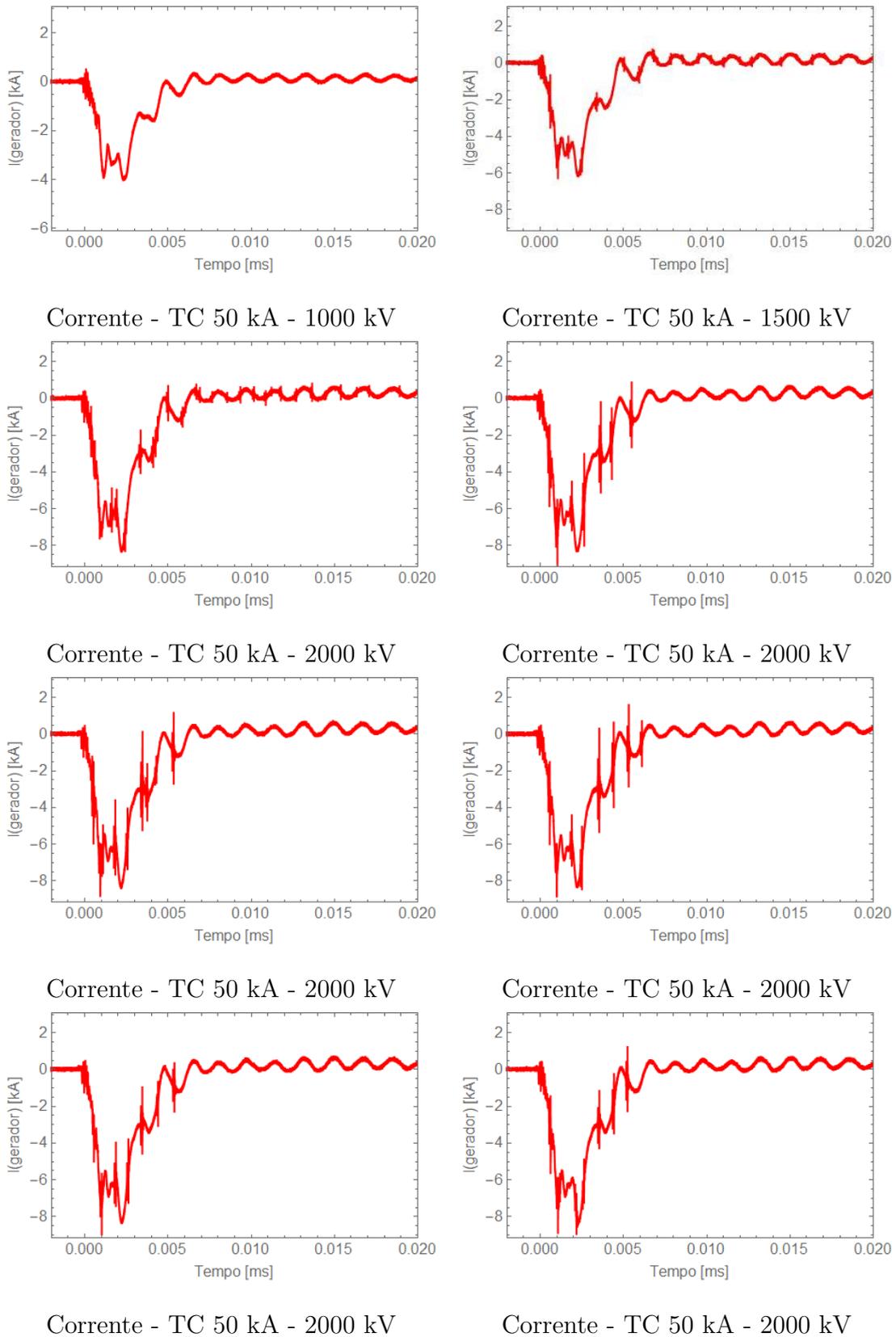
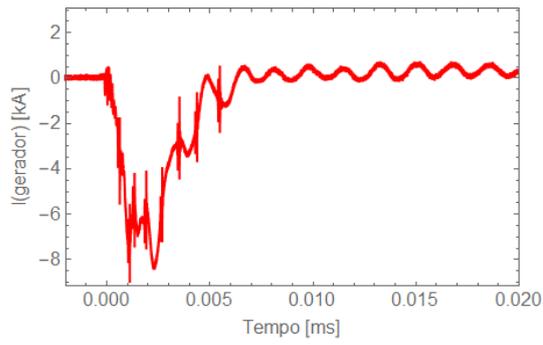
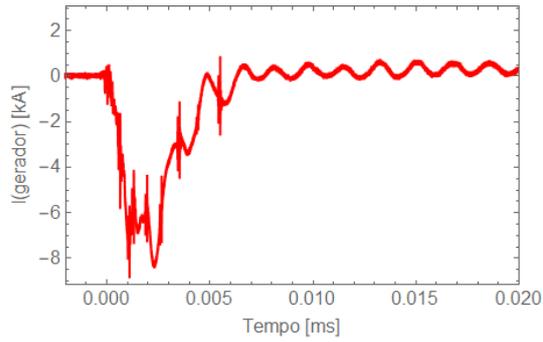


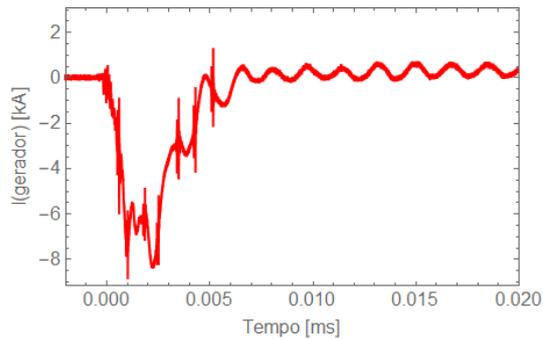
Figura 4.15: Corrente do GI medida no osciloscópio e TC 50 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.



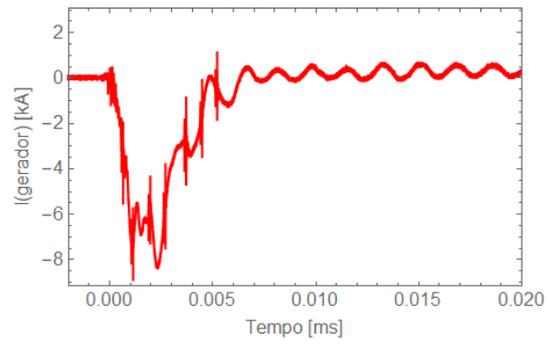
Corrente - TC 50 kA - 2000 kV



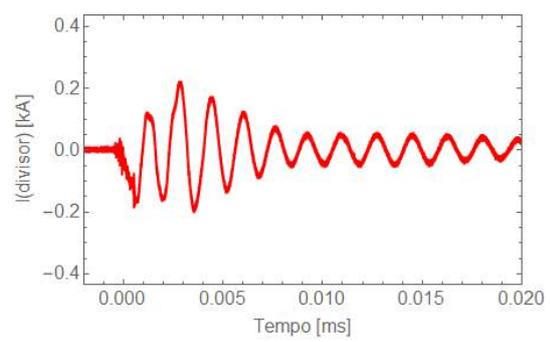
Corrente - TC 50 kA - 2000 kV 9



Corrente - TC 50 kA - 2000 kV

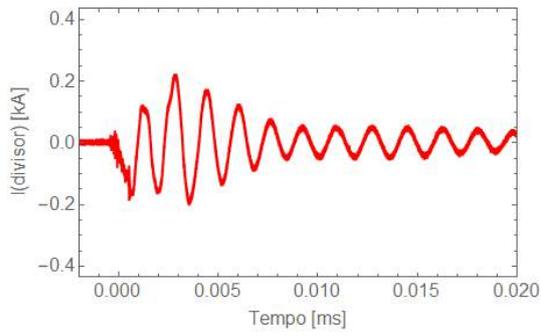


Corrente - TC 50 kA - 2000 kV

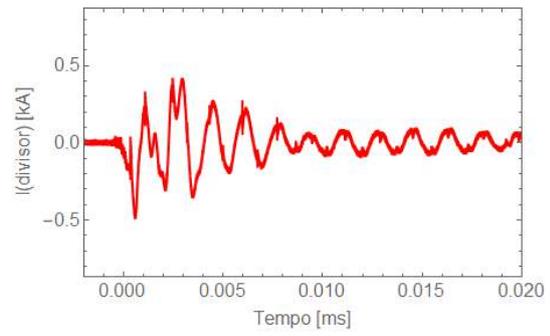


Corrente - TC 50 kA - 2000 kV

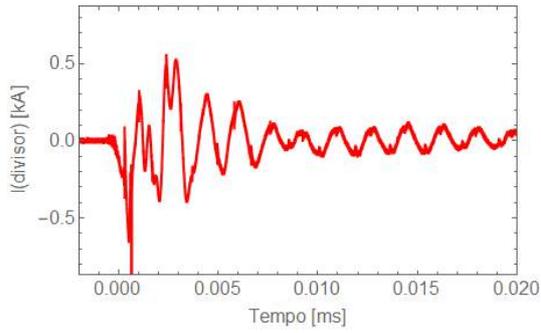
Figura 4.16: Corrente do GI medida no osciloscópio e TC 50 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.



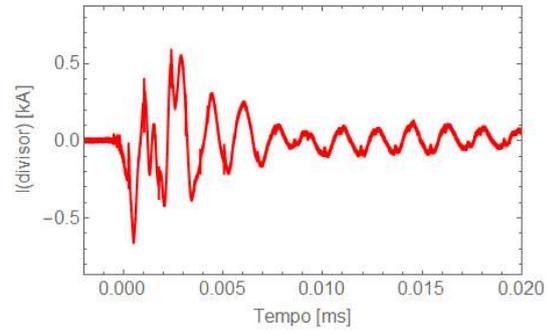
Corrente - TC 20 kA - 1000 kV



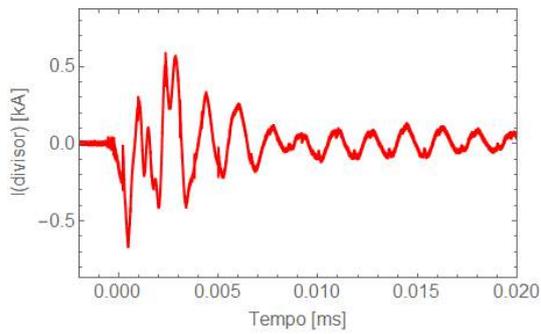
Corrente - TC 20 kA - 1500 kV



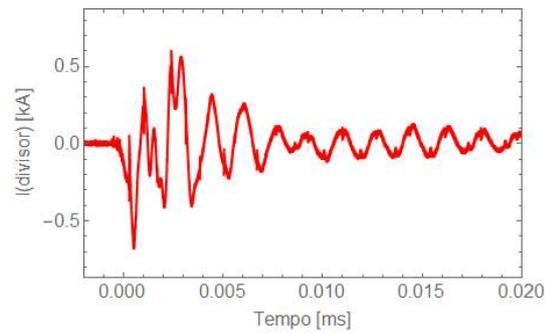
Corrente - TC 20 kA - 2000 kV



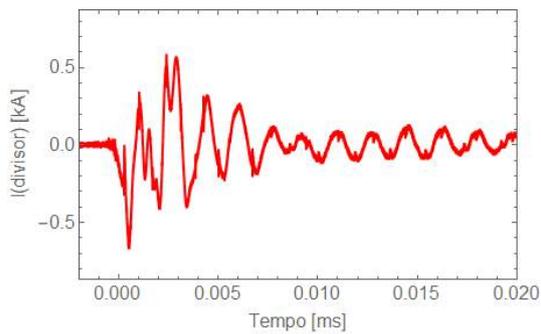
Corrente - TC 20 kA - 2000 kV



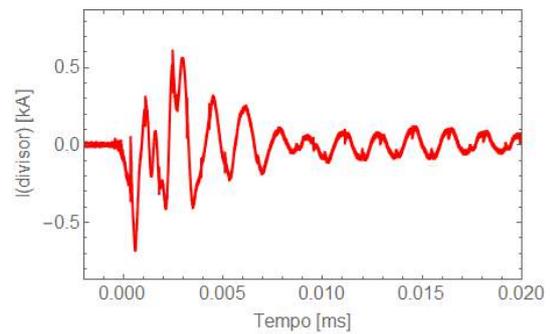
Corrente - TC 20 kA - 2000 kV



Corrente - TC 20 kA - 2000 kV



Corrente - TC 20 kA - 2000 kV



Corrente - TC 20 kA - 2000 kV

Figura 4.17: Corrente do divisor de tensão medida no osciloscópio e TC 20 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.

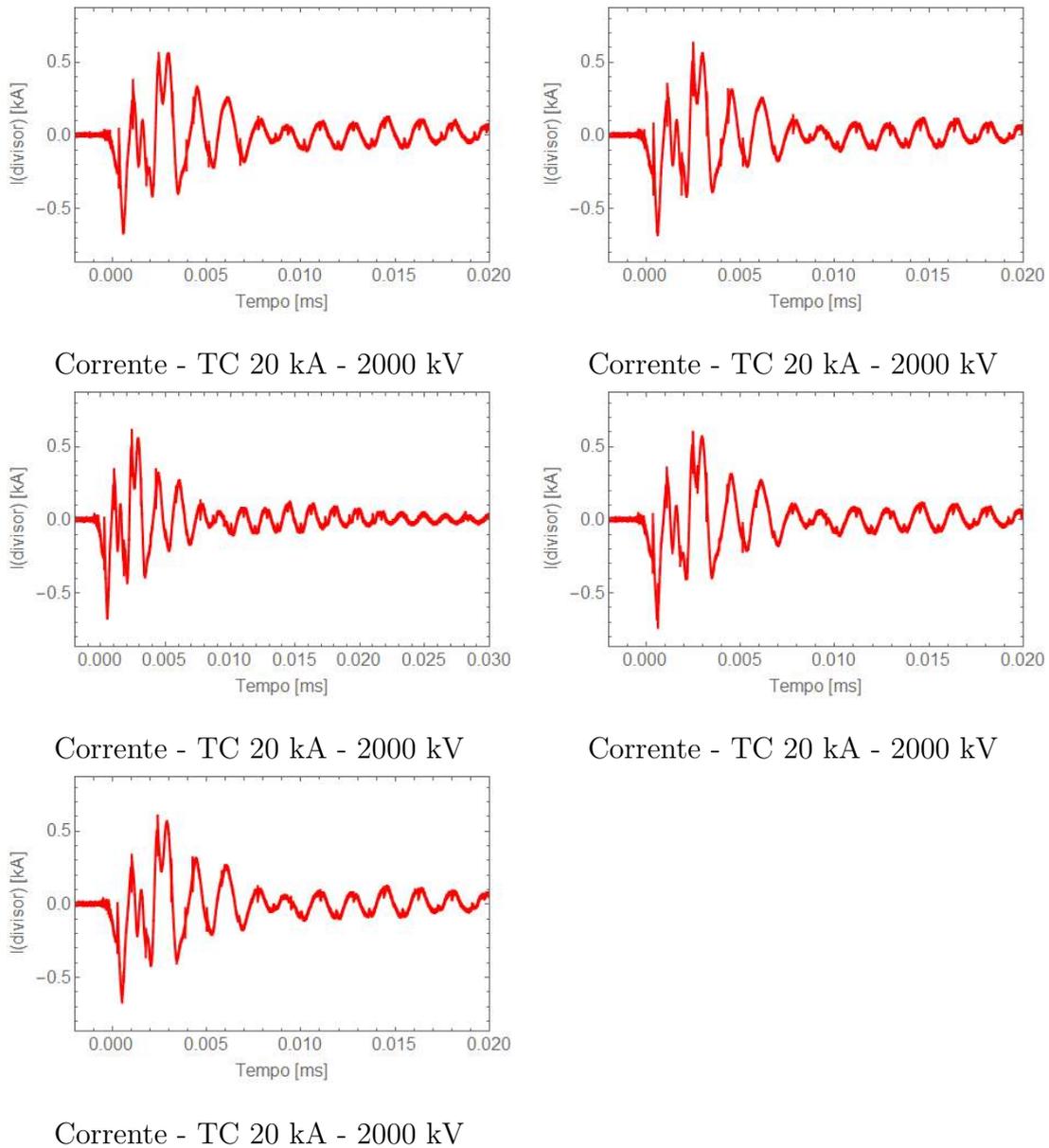


Figura 4.18: Corrente do divisor de tensão medida no osciloscópio e TC 20 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.

Os resultados nas Figuras 4.11 a 4.18 indicam que os cabos longos podem ter influenciado as medições apresentadas com a adição de ruídos nos dados obtidos. Sabe-se que, quando excitados, os longos cabos produzem oscilações de tensão e corrente, cuja frequência está associada ao comprimento dos mesmos. Por isso, os ruídos nas respostas de tensão foram atribuídos ao comportamento transitório dos cabos elétricos empregados para a aquisição dos sinais de corrente.

4.2.3.2 Medições de corrente com fibra ótica

Com o objetivo de melhorar a qualidade das medições de corrente, optou-se por utilizar um sistema de medição via fibra ótica. Os pontos de medição permaneceram iguais: um no gerador de impulso e outro no divisor de tensão.

No primeiro ensaio experimental, foram utilizados dois transformadores com corrente máxima suportada de 500 kA, conforme Figuras 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22. No segundo, foi utilizado um TC com corrente máxima de 50 kA e um de 20 kA, conforme Figuras 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26.

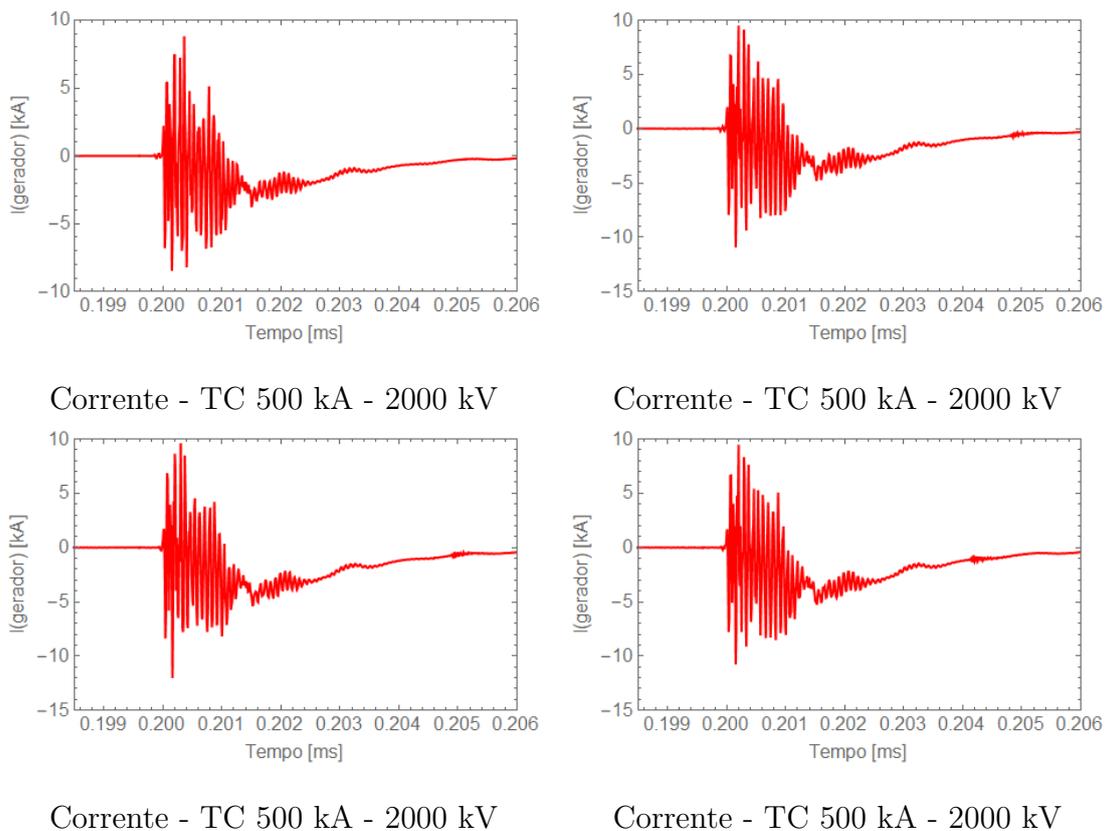
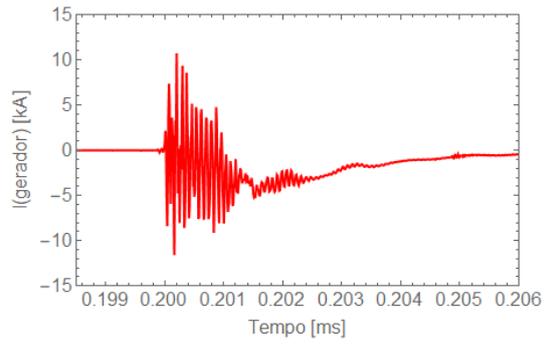
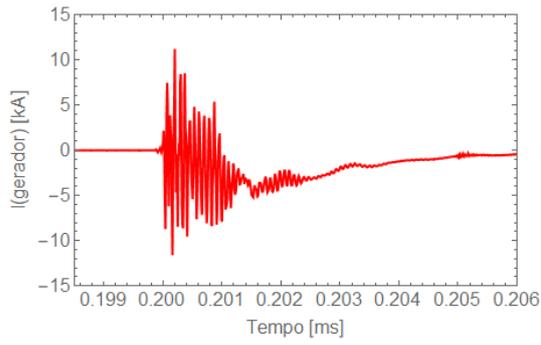
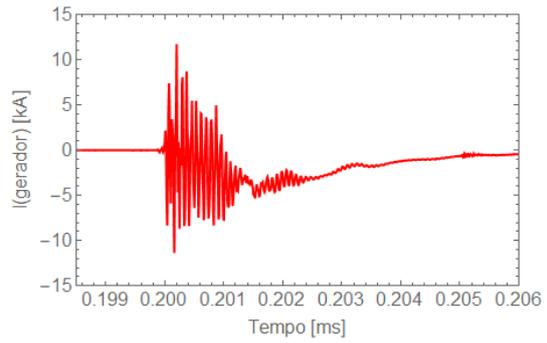
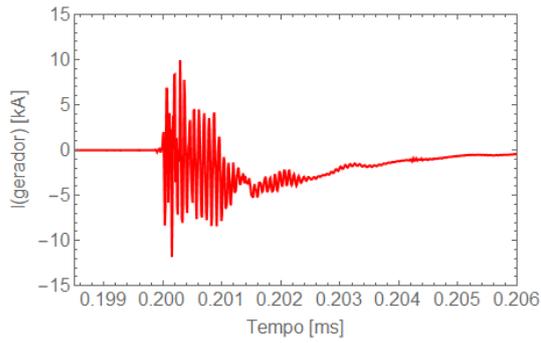


Figura 4.19: Corrente do gerador de impulso medida com fibra ótica e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.



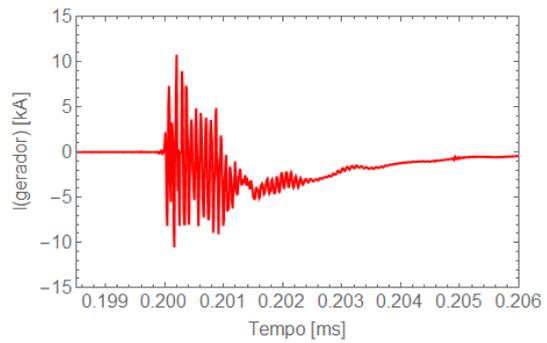
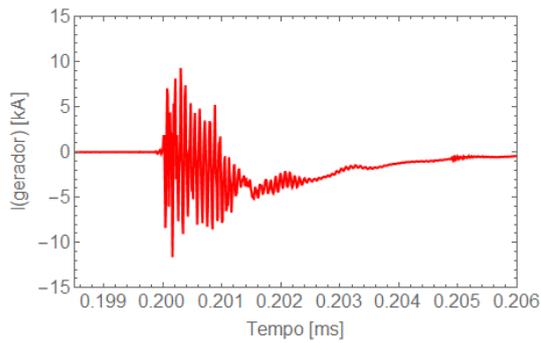
Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

Corrente - TC 500 kA - 2000 kV



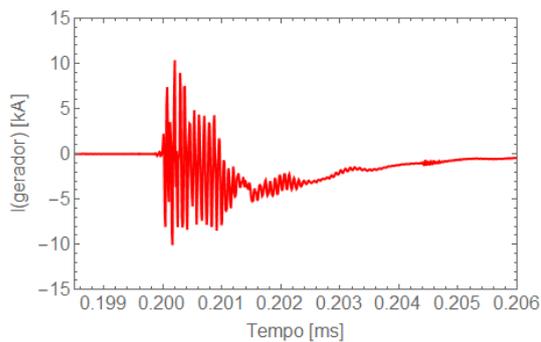
Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

Corrente - TC 500 kA - 2000 kV



Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

Corrente - TC 500 kA - 2000 kV



Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

Figura 4.20: Corrente do gerador de impulso medida com fibra ótica e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.

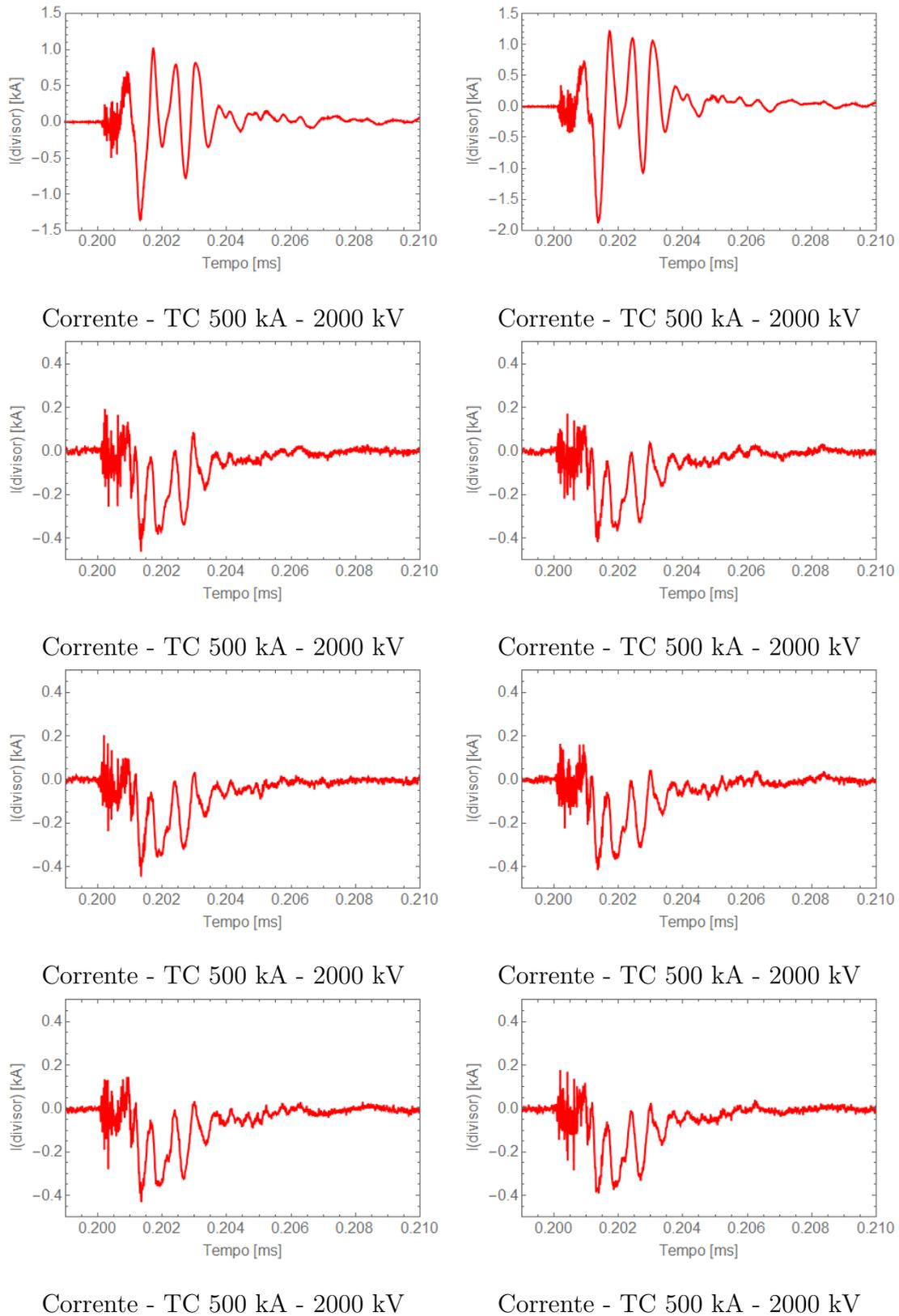
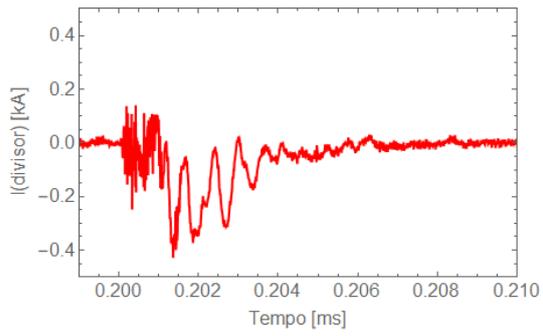
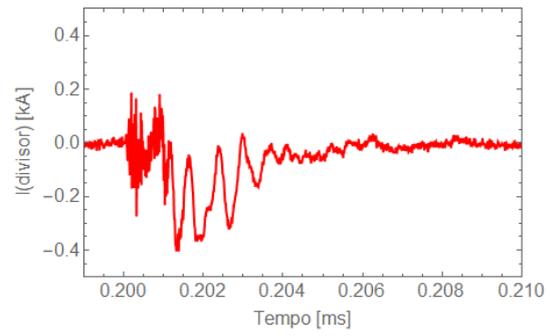


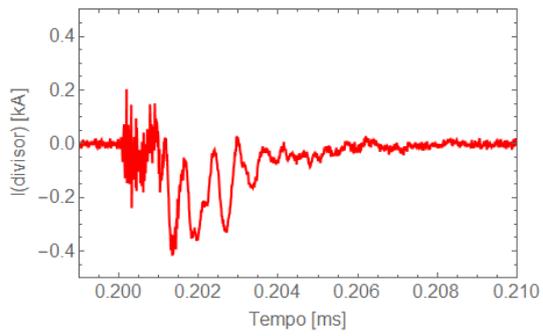
Figura 4.21: Corrente do divisor de tensão medida com fibra ótica e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.



Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

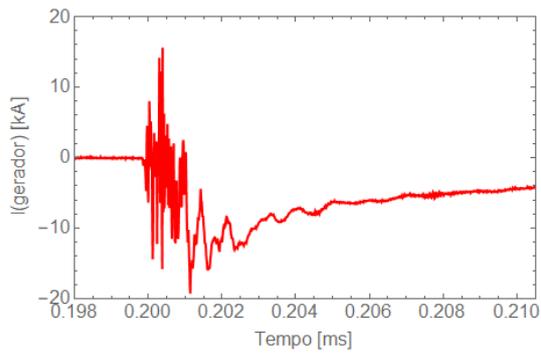


Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

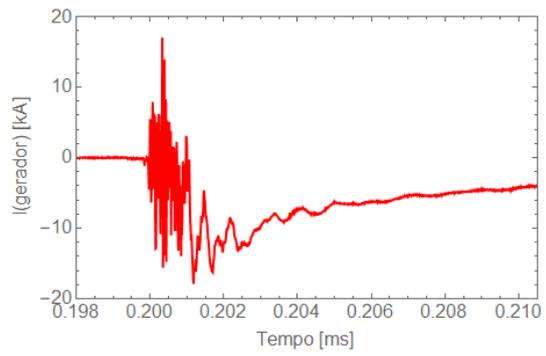


Corrente - TC 500 kA - 2000 kV

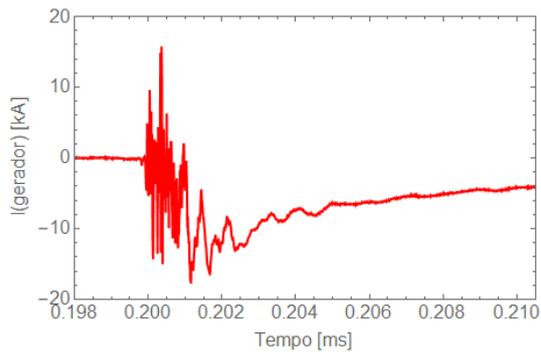
Figura 4.22: Corrente do divisor de tensão medida com fibra ótica e TC 500 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.



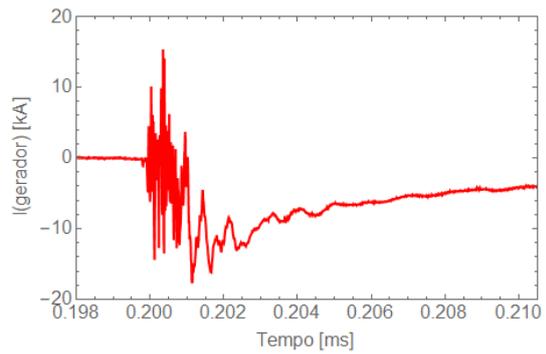
Corrente - TC 50 kA - 2000 kV



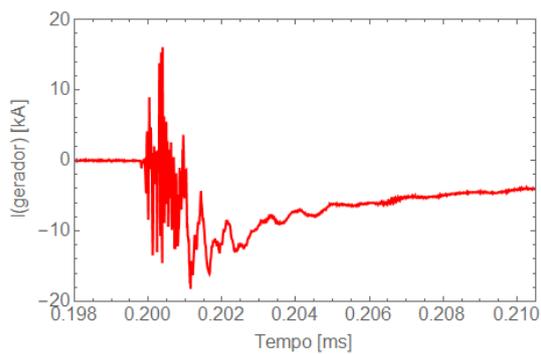
Corrente - TC 50 kA - 2000 kV



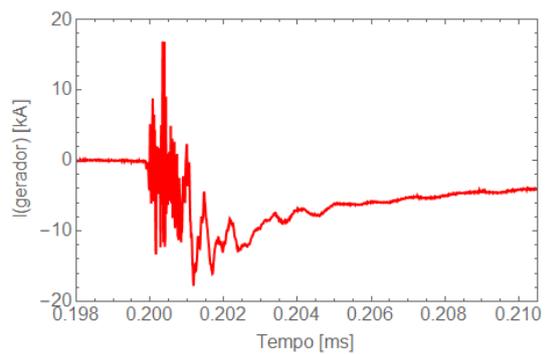
Corrente - TC 50 kA - 2000 kV



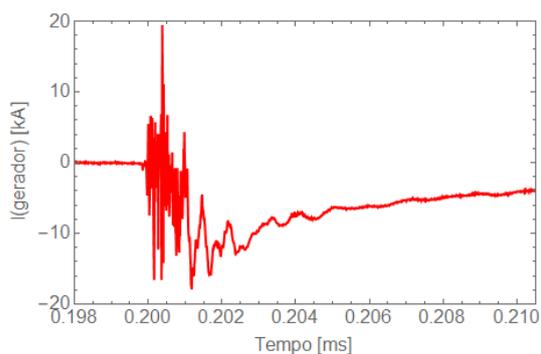
Corrente - TC 50 kA - 2000 kV



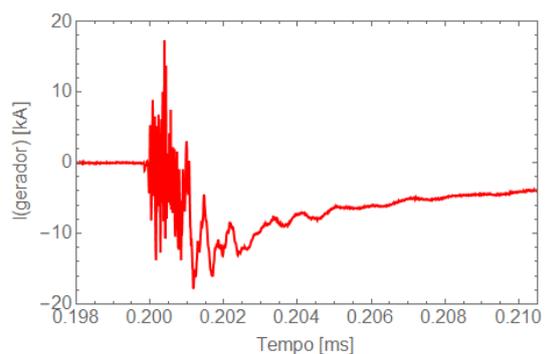
Corrente - TC 50 kA - 2000 kV



Corrente - TC 50 kA - 2000 kV

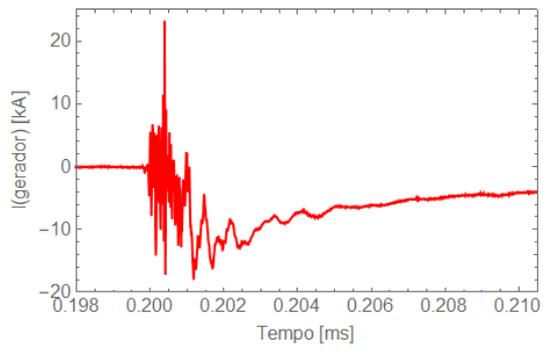


Corrente - TC 50 kA - 2000 kV

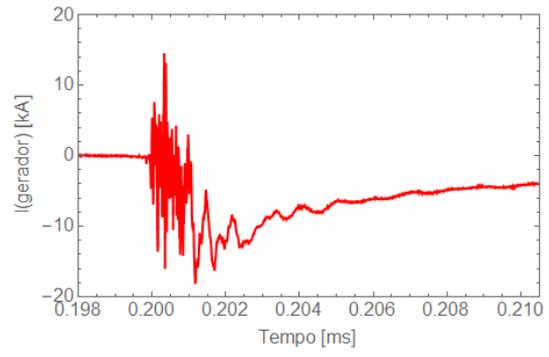


Corrente - TC 50 kA - 2000 kV

Figura 4.23: Corrente do gerador de impulso medida com fibra ótica e TC 50 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.

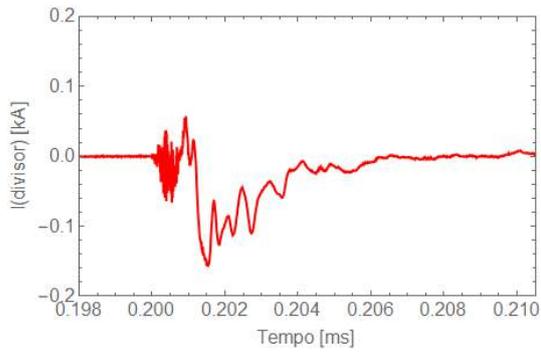


Corrente - TC 50 kA - 2000 kV

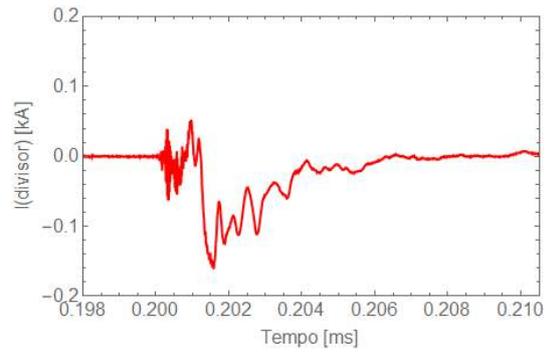


Corrente - TC 50 kA - 2000 kV

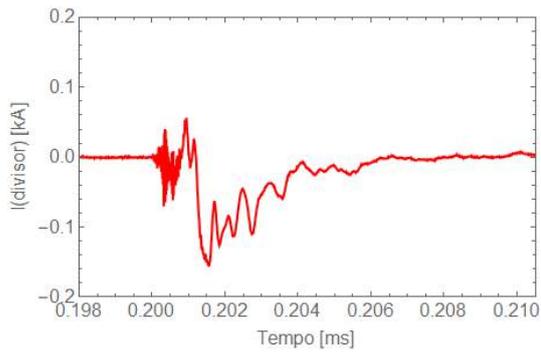
Figura 4.24: Corrente do gerador de impulso medida com fibra ótica e TC 50 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.



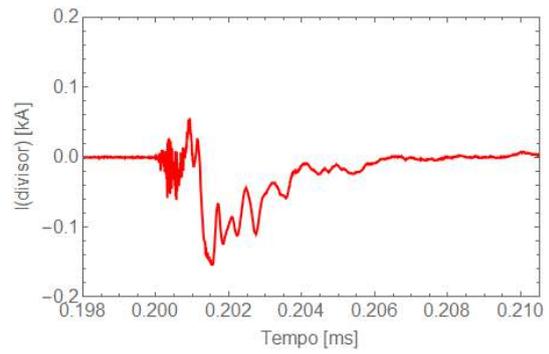
Corrente - TC 20 kA - 2000 kV



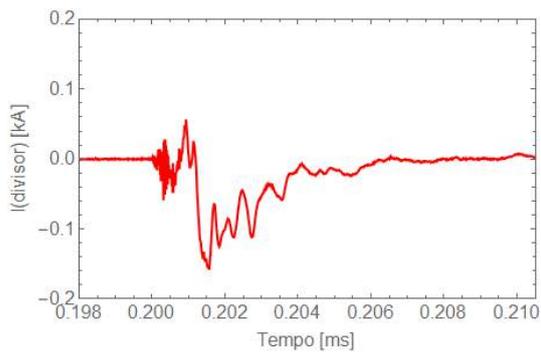
Corrente - TC 20 kA - 2000 kV



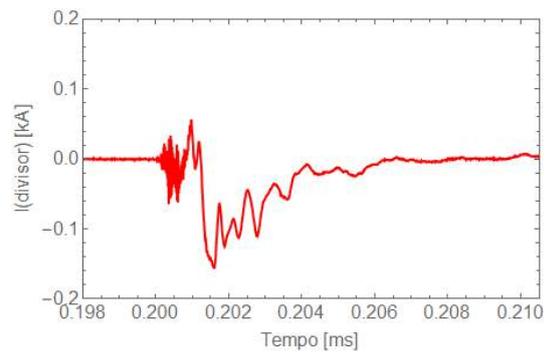
Corrente - TC 20 kA - 2000 kV



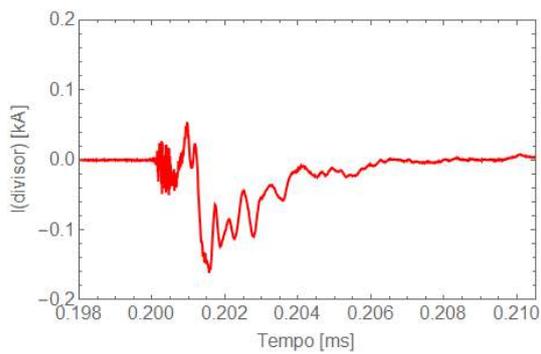
Corrente - TC 20 kA - 2000 kV



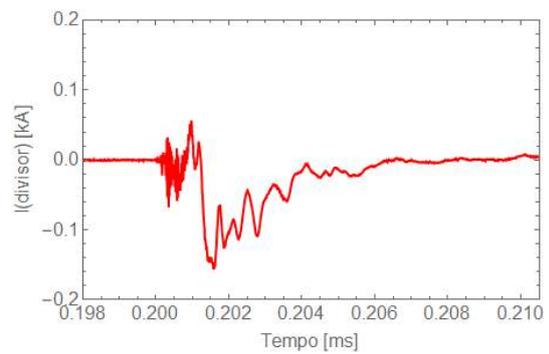
Corrente - TC 20 kA - 2000 kV



Corrente - TC 20 kA - 2000 kV

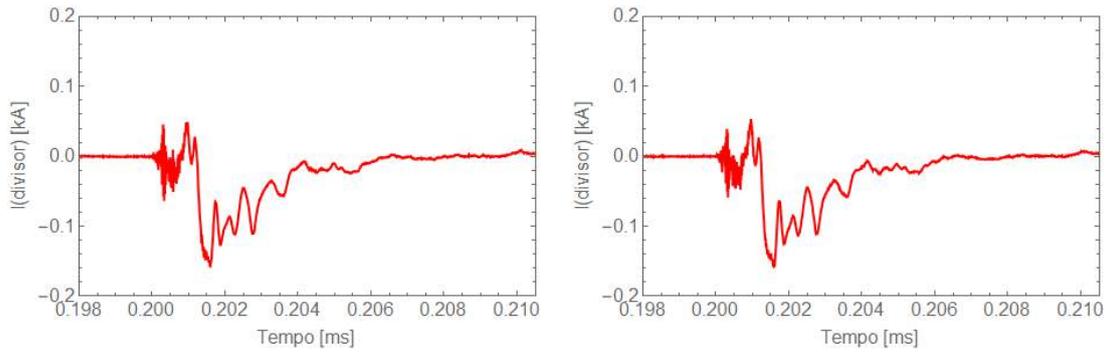


Corrente - TC 20 kA - 2000 kV



Corrente - TC 20 kA - 2000 kV

Figura 4.25: Corrente do divisor de tensão medida com fibra ótica e TC 20 kA com Impulso Atmosférico - Parte 1.



Corrente - TC 20 kA - 2000 kV

Corrente - TC 20 kA - 2000 kV

Figura 4.26: Corrente do divisor de tensão medida com fibra ótica e TC 20 kA com Impulso Atmosférico - Parte 2.

Os resultados exibidos nas Figuras 4.19 a 4.26 foram obtidos por meio da medição via fibra ótica. Esses resultados apresentaram um nível de ruído superior quando comparados com os obtidos através da utilização do osciloscópio. Mediante esses dados, houve uma investigação de como o processo foi feito e do que ocorreu nos ensaios para gerar esse fato. Considerando que esse tipo de medição nunca foi realizado no laboratório, embora o sistema de medição fosse composto por comunicação via fibra ótica, uma parte dos equipamentos eletrônicos para medição ficou muito próxima do gerador de impulso devido à própria estrutura desse tipo de equipamento. Recomenda-se que, futuramente, esses componentes próximos ao gerador, fiquem totalmente blindados, deixando exposta apenas a fibra ótica, para não sofrerem nenhum tipo de interferência eletromagnética proveniente do centelhamento entre as esferas de cada estágio do gerador de impulso.

Uma alternativa para realizar esse tipo de medição com objetivo de obter sinais com menos ruídos, é a utilização de *shunts* para medição de corrente [26], que é um equipamento composto por um resistor de precisão em paralelo com o medidor, indicado para medição de elevados níveis de corrente.

Todos os resultados apresentados são expressivos e podem auxiliar bastantes pesquisas futuras no laboratório UAT, tanto para ensaios elétricos com impulsos atmosféricos quanto de manobra.

Capítulo 5

Conclusões e recomendações

A dissertação de mestrado apresentada desenvolveu as etapas para caracterização de uma cadeia de isoladores em ultra alta tensão para torres de corrente contínua, desde o estudo dos principais modelos que descrevem uma disrupção elétrica até a obtenção de resultados experimentais em uma torre montada no laboratório UAT, do Cepel, com uma cadeia de isoladores de 7,8 metros.

Essa montagem possibilitou a realização de diversos ensaios elétricos: primeiramente, a aplicação de impulsos de manobra promoveu o melhor entendimento dos mecanismos de operação do laboratório e comparação com referências já consolidadas [24].

Enquanto que a primeira etapa teve o objetivo de validar as medições do laboratório, o maior interesse deste trabalho foi a segunda etapa, definida pela realização do ensaio *Up and Down* com impulso atmosférico, que teve como foco principal as aplicações das formulações desenvolvidas para o cálculo de parâmetros do *Leader Progression Model*.

A terceira etapa deste trabalho foi realizada com o objetivo de complementar a pesquisa, com a aquisição de formas de ondas que representam as correntes do circuito. Sabendo que a medição de corrente não é trivial, por ser necessário um transformador de medição específico para alta frequência e considerando que um circuito de grandes proporções pode gerar bastante ruído nas medições, foram realizados dois tipos de medições de corrente: com osciloscópio e com transmissor via

fibra ótica.

Os resultados obtidos contribuem para maior domínio sobre o processo físico envolvido no *Leader Progression Model*, ainda muito recente, principalmente para cadeia de isoladores de uma torre de corrente contínua de 800 kV. Em razão desse laboratório ser único na América Latina e os resultados experimentais publicados até hoje, referentes ao LPM, serem inconclusivos para uma cadeia de isoladores neste nível de tensão, os resultados descritos nessa dissertação são fundamentais para o desenvolvimento de trabalhos que avaliam a suportabilidade de *gaps* longos para garantir um bom desempenho na transmissão de energia elétrica.

Considerando que a suportabilidade dielétrica varia para cada tipo de *gap*, verificou-se que, para obter novos parâmetros do modelo **LPM**, seriam necessários, no mínimo, 5 ensaios com tensão $U_{50\%}$ e tempos de cortes variados, o que ocasionaria curvas $V \times t$ bem definidas, porém, fora do cronograma hábil de uma dissertação de mestrado, já que haveria necessidade de alinhamento com o cronograma do laboratório e mobilização das equipes técnicas do Cepel.

Por meio dos resultados obtidos nas medições de corrente feitas, foi constatado que os resultados com osciloscópio apresentaram menos ruído que com a fibra ótica. Esse fato ocorreu devido ao tipo de montagem de cada sistema de medição. O sistema de transmissão via fibra ótica é composto por um atenuador, um transmissor de fibra ótica e um receptor, sendo que o transmissor e atenuador ficam próximos dos equipamentos de alta tensão (gerador e divisor de tensão), conectados através da fibra ótica ao receptor, que encontra-se na sala de controle. Assim, o atenuador e transmissor sofrem uma interferência direta dos centelhamentos dos *gaps*, envolvidos no processo de formação de impulso do gerador, por estarem perto dele. Já o osciloscópio fica na sala de controle, distante dessa interferência, porém conectado com cabos longos aos TC's de medição, que também geram ruídos nos sinais.

Os ensaios elétricos realizados com impulsos de manobra também foram de grande importância na elaboração deste trabalho, pois permitiram a obtenção de diversas informações do laboratório como o funcionamento, operação, medição e

aquisição de dados.

Como principais contribuições deste trabalho, destacam-se:

- Obtenção da tensão crítica de disrupção $U_{50\%}$ diante da aplicação de impulsos atmosféricos em cadeia de isoladores em torre de transmissão de corrente contínua de 800 kV, reproduzida em laboratório com seu tamanho real;
- Avaliação dos parâmetros relacionados ao processo de disrupção causado por um impulso atmosférico, com base na comparação entre cálculos utilizando diferentes formulações do modelo LPM e informações obtidas diretamente dos resultados experimentais;
- Obtenção e avaliação do comportamento da tensão crítica de disrupção $U_{50\%}$ com aplicação de impulsos de manobra na cadeia de isoladores, nas polaridades positiva e negativa, com objetivo de promover um maior domínio das capacidades do laboratório;
- Avaliação da complexidade na realização dos ensaios e na obtenção de formas de ondas que representam as correntes do circuito com osciloscópio e via fibra ótica.

Por fim, é importante ressaltar que, todo o trabalho apresentado, mostrou a importância dos ensaios realizados e como todos os resultados experimentais devem ser analisados com bastante atenção, devido às poucas informações disponibilizadas sobre *gaps* com isoladores em ultra alta tensão, dificuldade de medição e interpretação desses resultados.

5.1 Trabalhos futuros

Um dos pontos mais importantes deste trabalho é a possibilidade que ele gera de inúmeros projetos sucessores. Nesta seção final da dissertação são colocadas sugestões e ideias que objetivam dar progresso ao trabalho realizado.

Diante das poucas informações experimentais encontradas para cadeia de isoladores, principalmente em laboratórios de ultra alta tensão, é importante ressaltar que esse trabalho possibilita a continuação das pesquisas realizadas a partir da aplicação de impulsos atmosféricos e o *Leader Progression Model*, visto que todas as etapas de fundamentação teórica, montagem do circuito, dificuldades envolvidas na execução dos ensaios e medições estão descritas nesse texto.

Como recomendações de trabalhos futuros, pode-se citar:

- Obtenção das Curvas $V \times t$ para cadeia de isoladores na torre de transmissão de corrente contínua, nas quais ocorram diferentes tempos de disrupções, antes e depois do valor de pico;
- Continuidade dos estudos relacionados aos métodos de aplicação do LPM para impulsos atmosféricos, com obtenção de novos valores necessários para um modelo específico da cadeia de isoladores, e avaliação do modelo desenvolvido com base nas comparações entre curvas $V \times t$;
- Realização de ensaios combinados, nos quais são avaliados os impactos causados pela aplicação de alta tensão em corrente contínua em um pólo e um impulso de tensão no outro;
- Influência de um impulso atmosférico aplicado do topo da torre de transmissão em corrente contínua, através de estudo feito por elementos finitos e considerando a impedância da torre;
- Avaliação do impacto causado em um pólo pela aplicação de impulso em outro.

Referências Bibliográficas

- [1] WAGNER, C. F.; HILEMAN, A. R. “Mechanism of Breakdown of Laboratory Gaps”, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III Power Apparatus and Systems*, v. 80, pp. 604–618, 1961.
- [2] SHINDO, T.; SUZUKI, T. “A New Calculation Method Of Breakdown Voltage-Time Characteristics Of Long Air Gaps”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-104, n. 6, pp. 1556–1563, June 1985.
- [3] SUZUKI, T.; MIYAKE, K. “Experimental Study of Breakdown Voltage-Time Characteristics of Large Air Gaps With Lightning Impulses”, *Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-96, n. 1, pp. 227–233, 1977.
- [4] MOTOYAMA, H. “Experimental Study and Analysis of Breakdown Characteristics of Long Air Gaps With Short Tail Lightning Impulses”, *Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2, pp. 972–979, 1996.
- [5] PIGINI, A.; RIZZI, G. G. E. “Performance of Large Air Gaps Under Lightning Overvoltages: Experimental Study and Analysis of Accuracy of Predetermination Methods”, *Transactions on Power Delivery*, v. 4, n. 2, pp. 1379–1392, 1989.
- [6] WANG, X.; YU, Z. H. J. “Breakdown Process Experiments of 110 - to - 500 kV Insulator Strings Under Short Tail Lightning Impulse”, *Transactions on Power Delivery*, v. 29, n. 5, pp. 2394–2401, 2014.
- [7] ARY D’AJUZ, ET AL. *Transitórios Elétricos e Coordenação de isolamento - aplicação em sistemas de potência de alta tensão*. Rio de Janeiro, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987. ISBN: 85-228-0069-3.
- [8] CAGIDO, M. C. *Impulso Atmosférico em Laboratório - Aplicação, Medição e Interpretação*. Rio de Janeiro, 2014. Projeto de conclusão da graduação em Engenharia Elétrica, realizada na Escola Politécnica da UFRJ.

- [9] SCHON, K. *High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques: Fundamentals - Measuring Instruments - Measuring Methods*. Springer International Publishing AG, 2013.
- [10] CEPTEL. “Laboratório de Ultra Alta Tensão”. Disponível em: <http://www.cepel.br/pt_br/laboratorios-e-centros/menu/laboratorio-de-ultra-alta-tensao-externo.htm/>. Último Acesso: 19 de maio de 2019.
- [11] *Técnicas de ensaios elétricos em alta tensão*, 1991. ABNT NBR 60060-1:2013.
- [12] *Guide To Procedures For Estimating The Lightning Performance Of Transmission Lines*, n. 63, 1991. Cigré.
- [13] MARTINEZ-VELASCO, J. A. *Power System Transients: Parameter Determination*. CRC Press, 2009. ISBN: 1420065297,9781420065299.
- [14] DARVENIZA, M.; POPOLANSKY, F. W. E. R. “Lightning protection of UHV transmission lines”, *Electra*, , n. 41, pp. 39 – 69, 1975. pg. 55.
- [15] CHISHOLM, W. “New challenges in lightning impulse flashover modeling of air gaps and insulators”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 26, pp. 14–25, 2010. ISSN: 0883-7554. doi: 10.1109/mei.2010.5482551.
- [16] WITZKE, R. L.; BLISS, T. J. “Surge Protection of Cable-Connected Equipment”, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, v. 69, pp. 527–542, 1950. ISSN: 0096-3860. doi: 10.1109/taiee.1950.5060183.
- [17] DIETER KIND, H. K. A. *High-Voltage Insulation Technology: Textbook for Electrical Engineers*. Vieweg+Teubner Verlag, 1985. ISBN: 978-3-528-08599-5,978-3-663-14090-0. pg. 27.
- [18] DARVENIZA, M. “The generalized integration method for predicting impulse volt-time characteristics for non-standard wave shapes-a theoretical basis”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 23, pp. 373–381, 1988. ISSN: 0018-9367. doi: 10.1109/14.2377.
- [19] CALDWELL, R.O.; DARVENIZA, M. “Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-92, pp. 1420–1428, 1973. ISSN: 0018-9510. doi: 10.1109/t-pas.1973.293550.

- [20] CARRARA, G.; THIONE, L. “Switching surge strength of large air gaps: A physical approach”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 95, pp. 512–524, 1976. ISSN: 0018-9510. doi: 10.1109/T-PAS.1976.32131.
- [21] *Insulation Co-ordination - Part 4: Computational Guide to Insulation Co-ordination and Modelling of Eletrical Networks*, 2004. PD IEC TR 60071-4:2004.
- [22] *Haefely High Voltage Test - Operating Instructions - SGVA 6400-640*, 2010. Manual do fabricante Haefely - KA 08101021 - BR 259077.
- [23] *Relatório Técnico do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Especificação e Implantação Inicial do Laboratório de Ultra-Alta Tensão Externo*, 2015. DLE-33197/15.
- [24] WOLFGANG HAUSCHILD, E. L. A. *High-Voltage Test and Measuring Techniques*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. ISBN: 978-3-642-45351-9,978-3-642-45352-6. pg. 288.
- [25] SCHROEDER, M. A. O. *Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas - Aplicação às Medições na Estação do Morro do Cachimbo*. Belo Horizonte, 2001. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, UFMG.
- [26] XUAN ZHOU, *ET AL.* “Experiment on Leader Propagation Characteristics of Air Gaps in UHVDC Transmission Towers Under Positive Switching Impulse Voltages”, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, v. 1, n. 3, pp. 42–48, 2015.

Apêndice A

Cálculos feitos no Mathematica

Opções de programa

```
In[1]:= Clear["Global`*"]
      _apaga

In[2]:= SetDirectory[NotebookDirectory[]]
      _define diretório  _diretório do notebook

Out[2]:= E:\

In[3]:= SetOptions[{ListPlot, ListLogPlot, ListLogLinearPlot, ListLogLogPlot},
      _define opções  _gráfico de...  _gráfico log de ...  _gráfico log linear de uma·  _gráfico log-log de uma lista de
      BaseStyle → {FontFamily → "Helvetica", 16}, ImageSize → 600,
      _estilo base  _família da fonte  _tamanho da imagem
      Joined → True, PlotStyle → {{Thick, Red}, {Thick, Blue}, {Thick, Green}},
      _verd...  _estilo do gráfico  _espesso _verde...  _espesso _azul  _espesso _verde
      Axes → False, Frame → True];
      _falso  _quadro  _verdadeiro

In[4]:= SetOptions[{Plot, LogPlot, LogLinearPlot, LogLogPlot},
      _define opções  _gráfico  _gráfico log  _gráfico log-linear  _gráfico log-log
      BaseStyle → {FontFamily → "Helvetica", 16}, ImageSize → 600,
      _família da fonte  _tamanho da imagem
      PlotStyle → {{Thick, Red}, {Thick, Blue}, {Thick, Green}},
      _espesso _verde...  _espesso _azul  _espesso _verde
      Axes → False, Frame → True];
      _falso  _quadro  _verdadeiro

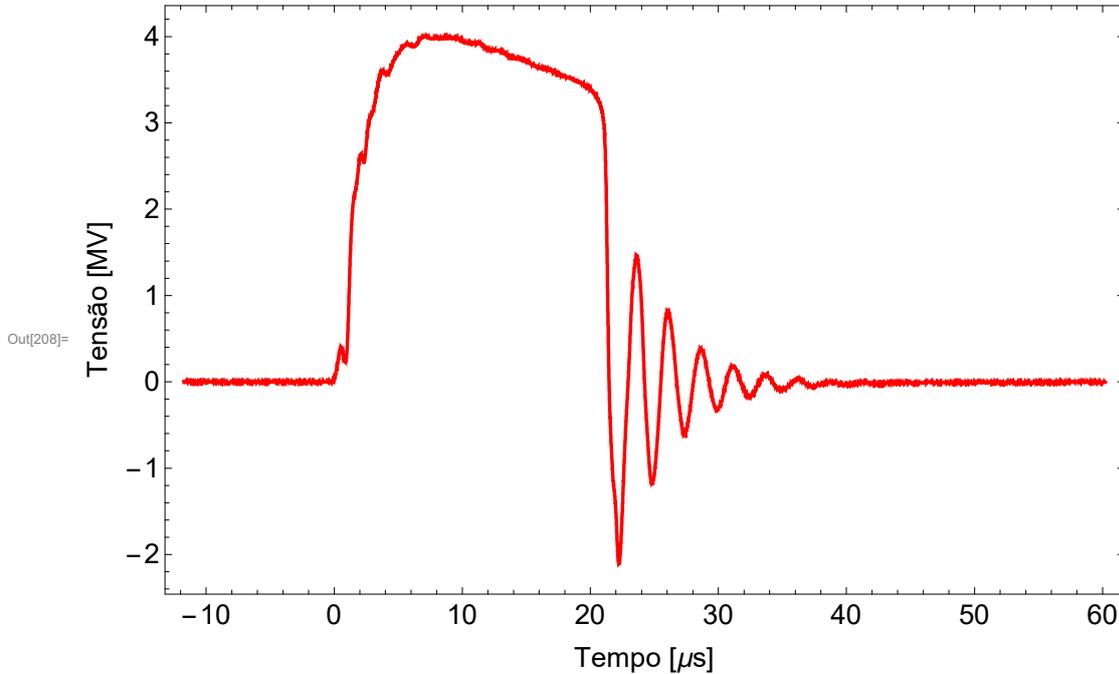
In[5]:= (*SetOptions[{Fourier}, FourierParameters → {1, -1}]; *)
      _define opções  _transform...  _parâmetros de transformada de Fourier
```

Oscilograma

```
In[6]:= osc82 = Import["E:\\hias/80.TXT", "Data"];
      _importa  _número E

In[7]:= osc822 = Drop[osc82, 4];
      _descartar
```

```
In[208]:= Fig1 = ListPlot[
  gráfico de uma lista de valores
  Table[{10^6 osc822[[n, 1]], 10^-6 osc822[[n, 2]]}, {n, 5000, Length[osc822]}],
  tabela comprimento
  FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "Tensão [MV]"}, ImageSize -> 600
  legenda do quadro tamanho da imagem
```



Parâmetros da forma de onda:

Graficos para comprimento do leader - $x(t)$

Equações LPM - Aplicação em impulsos cortados

■ Referência 1 - WAGNER

Método 1 - com $x(t)$ variando linearmente

- Para achar a posição de tempo de corte

```
In[22]:= numero = Nearest[Ut[[A11, 1]], Tcorte, 1]
           elemento mais... tudo
```

```
Out[22]:= {0.0000213167}
```

```
In[23]:= num2 = numero [[1]]
```

```
Out[23]= 0.0000213167
```

```
In[24]:= Pos = Position[Ut [[All, 1]], num2]
           |posição |tudo
```

```
Out[24]= {{8965}}
```

```
In[25]:= Pos2 = Pos [[1, 1]]; (*Posição do vetor que ocorre o corte*)
```

■ Valores das constantes:

```
In[26]:= vs = 3 × 10^5;
          (*k1=1×10^3; *)
          k1 = 1;
          E0 = 500 × 10^3;
          k0 = 320 × 10^-6;
```

■ Total de valores de U(t) e t

```
In[30]:= Pos3 = Length[UT];
           |comprimento
```

■ Cálculo da velocidade de Leader

```
In[31]:=
```

```
In[32]:= xparte1 = Table[i, {i, 0 (**d/Pos2*), d, d / Pos2}];
           |tabela
```

```
In[33]:= xparte2 = ConstantArray[0, (Length[UT] - Pos2)];
           |arranjo constante |comprimento
```

```
In[34]:= xtotal = Join[xparte1, xparte2];
           |junta
```

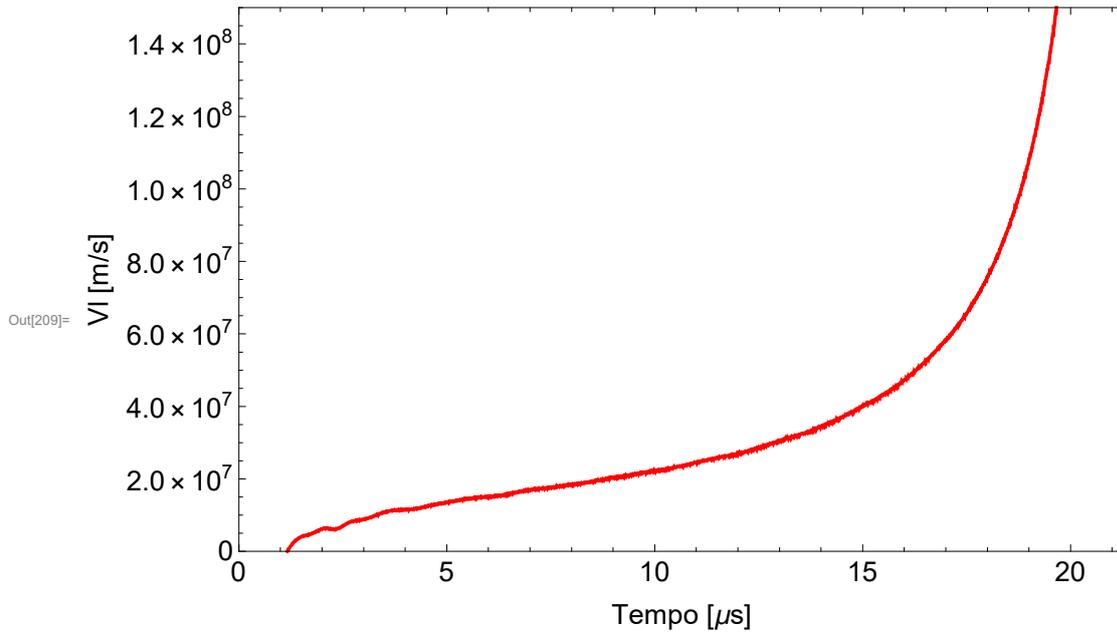
```
In[35]:= v11 = i1 = Table[0, {Length[UT]}];
           |tabela |comprimento
```

```
Do[{if[Ut [[nm, 1]] > 0, v11[[nm]] = k1 × d ((Ut[[nm, 2]] / (d - xtotal[[nm]])) - E0)},
   |repete
   {nm, Pos3}];
```

```
Do[{if[Ut [[nm, 1]] > 0, i1[[nm]] = k0 × v11[[nm]]}], {nm, Pos2}];
   |repete
```

■ Gráfico da velocidade do leader

```
In[209]:= ListPlot[Table[{10^6 osc822[[n, 1]], v1[[n]]}, {n, 1, Length[Ut]}],
[gráfico de... | tabela] [comprimento]
PlotRange -> {{0, 10^6 Tcorte}, {0, 1.5 * 10^8}},
[intervalo do gráfico]
FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "V1 [m/s]"}, ImageSize -> 600]
[tamanho da imagem]
```

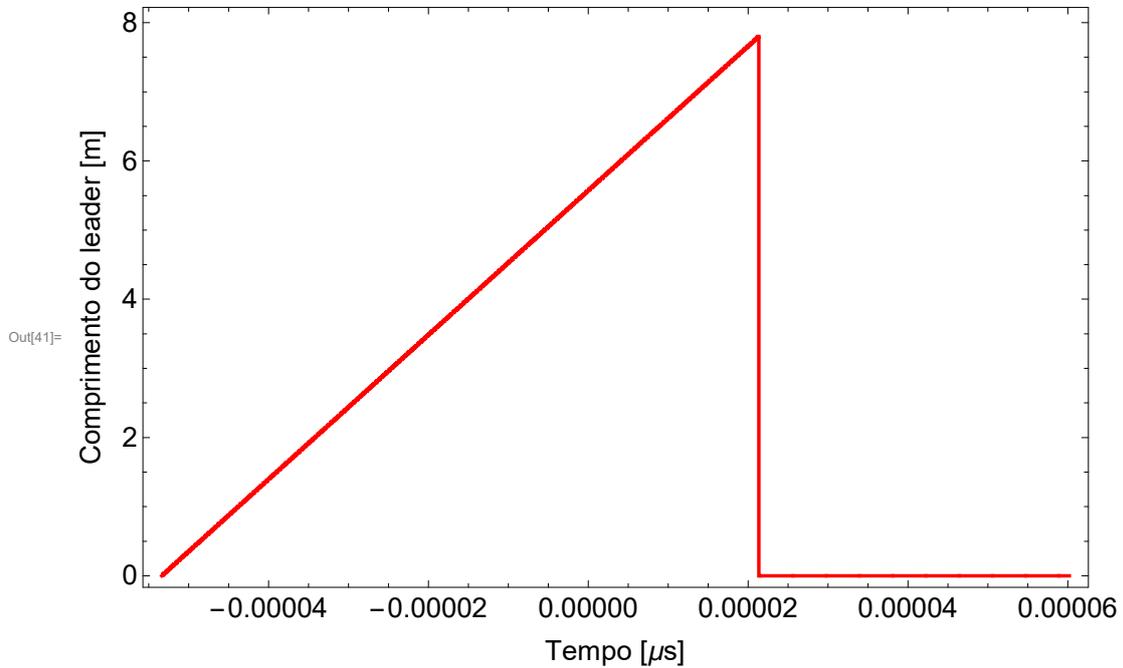


In[39]=

- Gráfico de x(t) usado:

In[40]=

```
In[41]:= ListPlot[Table[{Ut[[t, 1]], xtotal[[t]]}, {t, 1, Pos3}],
  gráfico de... | tabela
  FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "Comprimento do leader [m]"}
  | legenda do quadro
```



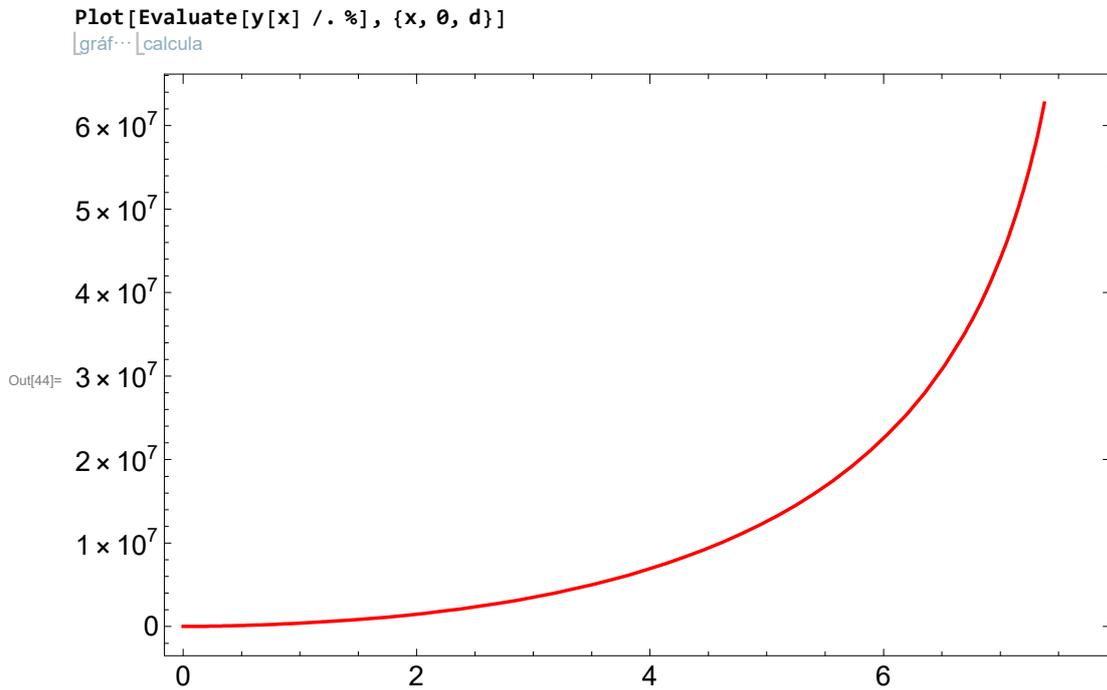
- Comparando com NDSolve:

```
In[42]=
```

```
NDSolve[{y'[x] == k1 * d ((Upico / (d - x)) - E0), y[0] == 0}, y, {x, 0, d}]
  | resolve numericamente equação diferencial
```

*** NDSolve: At x == 7.799999999985408, step size is effectively zero; singularity or stiff system suspected.

Out[43]= $\left\{ \left\{ y \rightarrow \text{InterpolatingFunction} \left[\begin{array}{c} \text{Domain: } \{0, 7.8\} \\ \text{Output: scalar} \end{array} \right] \right\} \right\}$



Cálculo de Ts e Tl por Wagner:

In[45]= **Vswagner = 3 * 10^5;**

In[46]=

In[47]= **Tswagner = d / Vswagner (*Certo*)**

Out[47]= 0.000026

In[48]= **Vaux1 = Nearest[v11[[All]], Vswagner, 1]**
[elemento mais ...](#) [tudo](#)

Vaux2 = Vaux1[[1]]

Out[48]= {249 698.}

Out[49]= 249 698.

In[50]= **posVaux2 = Position[v11[[All]], Vaux2]**
[posição](#) [tudo](#)

Out[50]= {{6548}}

In[51]= **{{6548}}**

pos2Vaux2 = posVaux2[[1]]

Out[51]= {{6548}}

Out[52]= {6548}

```

In[53]:= pos3Vaux2 = pos2Vaux2 [ [1] ]
Out[53]= 6548

In[54]:= Tswagner2 = Ut [ [pos3Vaux2, 1] ]
Out[54]=  $1.175 \times 10^{-6}$ 

In[55]:= (*Tswagner3=xtotal [ [pos3Vaux2] ] /Vswagner*)
In[56]:= Tlwagner = d / Max [v11 [ [A11] ] ]
           |máximo |tudo
Out[56]=  $6.27165 \times 10^{-10}$ 

In[57]:=
In[58]:= Tlwagner = d / v11 [ [Pos2] ]
Out[58]=  $6.27165 \times 10^{-10}$ 

In[59]:= Tlwagner2 = xtotal [ [Pos2] ] / v11 [ [Pos2] ]
Out[59]=  $6.27095 \times 10^{-10}$ 

```

■ Referência 2 - SUZUKI

Método 2 - x(t) variando linearmente

```

In[60]:= k1 = 1.63;
          k2 = 0.5 * 10^6;
          k3 = 0.5 * 10^6;
          k1 = 1 / ((10^3)^2);
          E1 = 250 * 10^3;
          k0 = 78.6 * 10^-6;

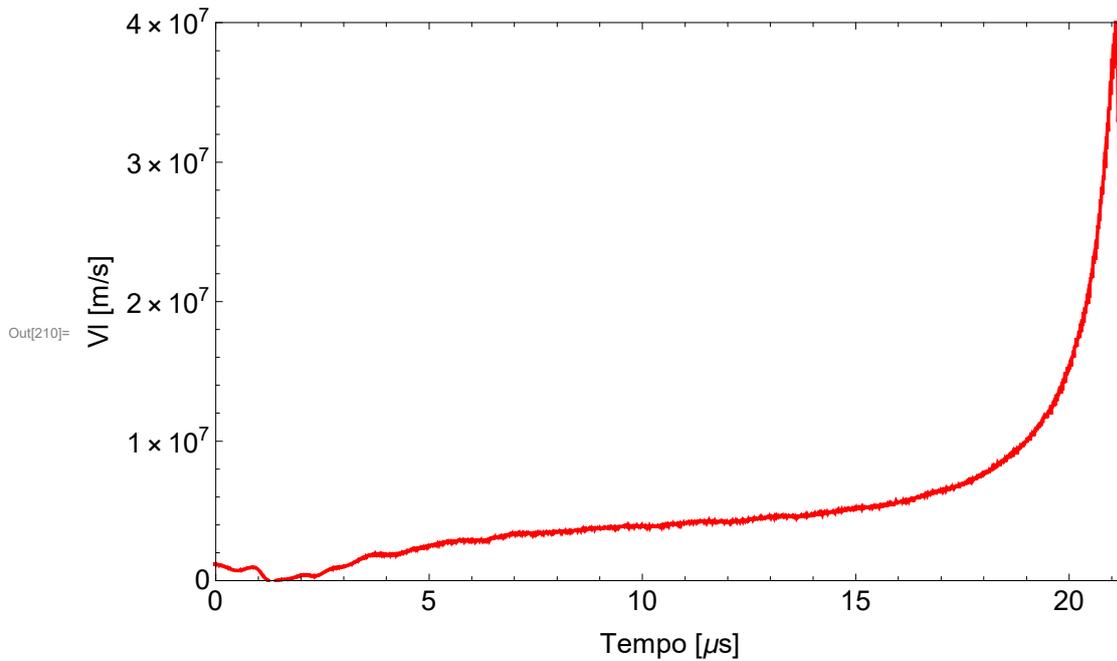
In[66]:= vs2 = (k1 * Upico) - (k2 * d) + k3;

In[67]:= vs2
Out[67]=  $3.1464 \times 10^6$ 

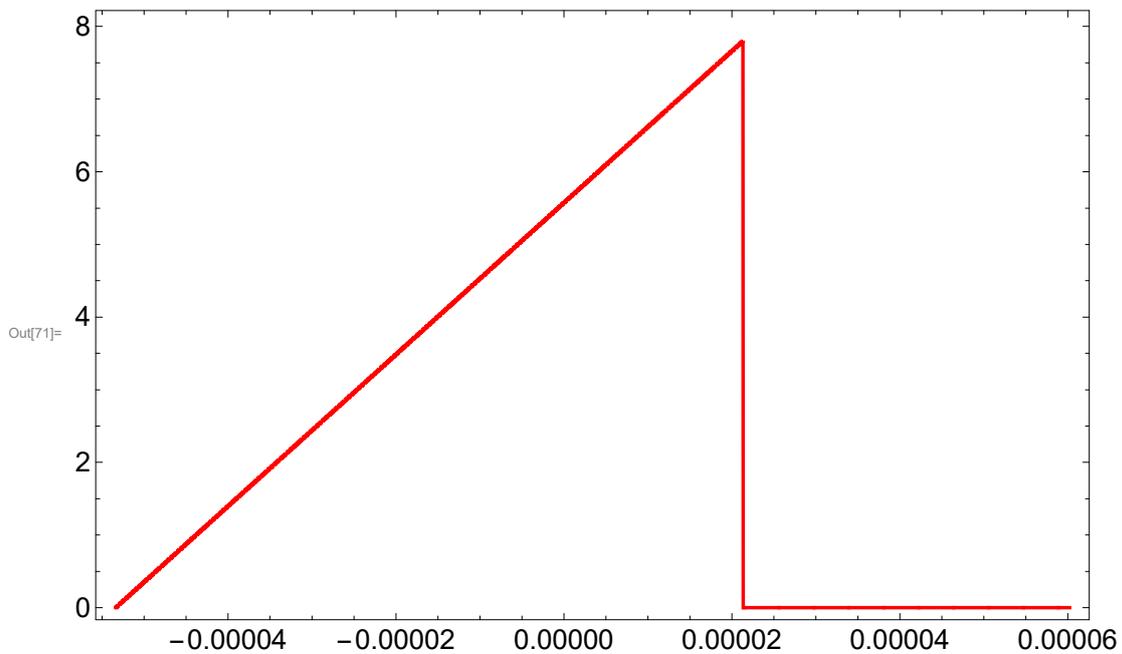
In[68]:= vs5 = v15 = i5 = Table[0, {Length[Ut] }];
           |tabela |comprimento
Do[{v15[[nm]] = k1 * ((Ut[[nm, 2]] - (E1 * d)) * (Ut[[nm, 2]] - (E1 * xtotal[[nm]])) /
           |repete
           (d - xtotal[[nm]]))};
           i5[[nm]] = k0 * d (v15[[nm]] - 0.25 * 10^6);}, {nm, Length[Ut] }];
           |comprimento

```

```
In[210]:= ListPlot[Table[{10^6 osc822[[n, 1]], v15[[n]]}, {n, 1, Length[Ut]}],
[gráfico de... | tabela | comprimento
PlotRange -> {{0.00000 x 10^6, Tcorte 10^6}, {0, 4 * 10^7}},
[intervalo do gráfico
FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "V1 [m/s]"}, ImageSize -> 600]
[tamanho da imagem
```



```
In[71]:= ListPlot[Table[{Ut[[t, 1]], xtotal[[t]]}, {t, 1, Pos3}]]
[gráfico de... | tabela
```



Cálculo de Ts e Tl por Suzuki:

In[72]=

In[73]=

In[74]= **Tssu = d / vs2 (*Usei esse*)**

Out[74]= 2.47902×10^{-6}

In[75]= **Vaux1 = Nearest[v11[[All]], vs2, 1]**
Elemento mais próximo de tudo

Vaux2 = Vaux1[[1]]

Out[75]= $\{3.1172 \times 10^6\}$

Out[76]= 3.1172×10^6

In[77]= **posVaux2 = Position[v11[[All]], Vaux2]**
Posição de tudo

Out[77]= $\{\{6572\}\}$

In[78]= **{{6548}}**

pos2Vaux2 = posVaux2[[1]]

Out[78]= $\{\{6548\}\}$

Out[79]= $\{6572\}$

In[80]= **pos3Vaux2 = pos2Vaux2[[1]]**

Out[80]= 6572

In[81]= **Tss2 = Ut[[pos3Vaux2, 1]]**

Out[81]= 1.375×10^{-6}

In[82]= **Tlsu = d / Max[v15[[All]]] (*Usei esse*)**
máximo de tudo

Out[82]= 2.14727×10^{-8}

In[83]=

In[84]= **Tlsu2 = d / v15[[Pos2]]**

Out[84]= 2.14727×10^{-8}

■ Referência 3 - SHINDO

Método 1 - Ponta-Plano:

```
In[85]:= k1 = 0.5;
k2 = 300 * 10^3;
Upico = Max[Ut];
      |
      |_máximo
```

```
In[88]:= Ts1 = k1 / ((Upico / d) - k2)
```

```
Out[88]= 2.3267 * 10^-6
```

Método 2- Ponta-Ponta:

```
In[89]:= k1 = 0.5;
k2 = 420 * 10^3;
(*Ts=k1/((Upico/d)-k2);*)
```

```
In[91]:= Ts2 = k1 / ((Upico / d) - k2)
```

```
Out[91]= 5.26887 * 10^-6
```

■ Referência 4 - PIGINI

Método 1 - X(t) variando linearmente

```
In[92]:= k1 = 1.25 * 10^6;
k2 = 0.95 * 10^6;
E0 = E50 = 500 * 10^3;
Ep = Upico / d;
```

```
In[96]:= Ts3 = 1 / ((k1 (Ep / E50)) - k2)
```

```
Out[96]= 2.96523 * 10^-6
```

```
In[97]:= k1 = 170 / (10^3);
k2 = 1.5 * 10^-3 / (10^3);
k0 = 100; (*até 700*)
```

```
In[100]:= v16 = i6 = Table[0, {Length[Ut]};]
      |
      |_tabela      |_comprimento
```

- Essa equação está errada pois está explodindo para infinito

```
In[101]:=
```

```
In[102]:= Do[{v16[nm] = d k1 (
  
$$\frac{Ut[[nm, 2]]}{d - xtotal[[nm]]} - E0 \exp\left(\frac{k2 Ut[[nm, 2]]}{d}\right);$$

  
```

```

  i6[[nm]] = k0 x v16[[nm]]}], {nm, Length[Ut]}];
  
```

```
In[103]:= (*v1novo=Table[d k1 (
  
$$\frac{Ut[[nm, 2]]}{d - x4[[nm]]} - E0 \exp\left(\frac{k2 Ut[[nm, 2]]}{d}\right),$$

  
```

```

  {nm, Ut[[1, 1]], Ut[[Pos3, 1]], Ut[[Pos3, 1]]/Pos3} ]---- Sugestão Tunico*)
  
```

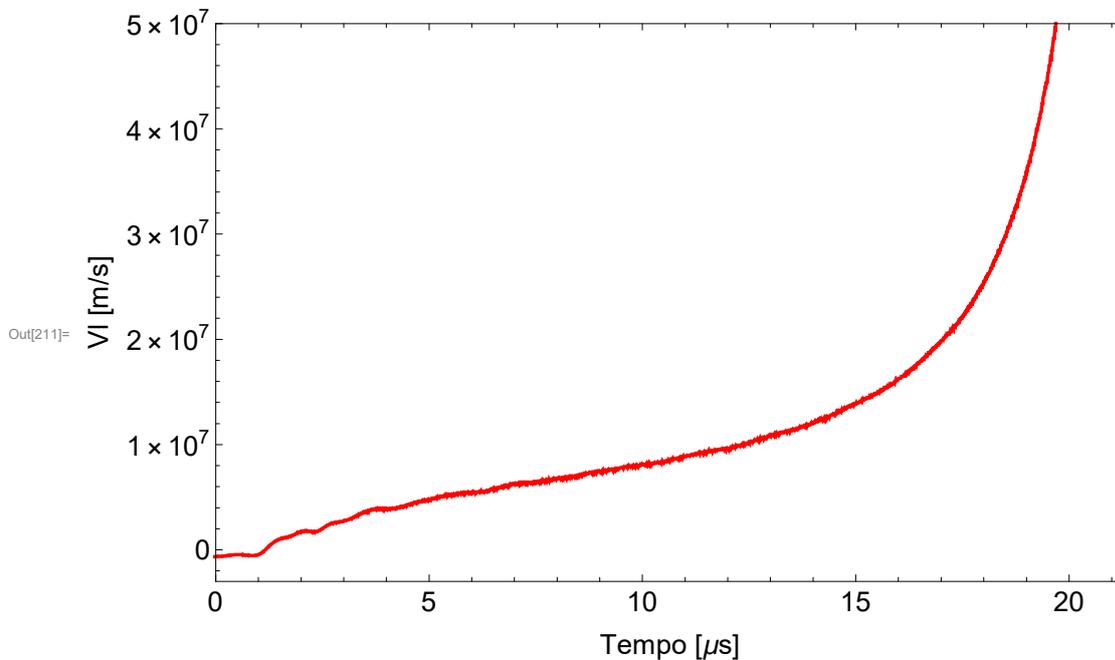
```
In[211]:= ListPlot[Table[{10^6 osc822[[n, 1]], v16[[n]]}, {n, 1, Length[Ut]}],
  gráfico de... [tabela] [comprimento]
  
```

```

  PlotRange -> {{0.0000, Tcorte 10^6}, {-3 * 10^6, 5 * 10^7}},
  intervalo do gráfico
  
```

```

  FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "V1 [m/s]"}, ImageSize -> 600]
  tamanho da imagem
  
```



```
In[105]:= k1 = 170 / (10^3);
  k2 = 1.5 x 10^-3 / (10^3);
  k0 = 100; (*até 700*)
  
```

```
In[108]:= v17 = i7 = Table[0, {Length[Ut]}];
  [tabela] [comprimento]
  
```

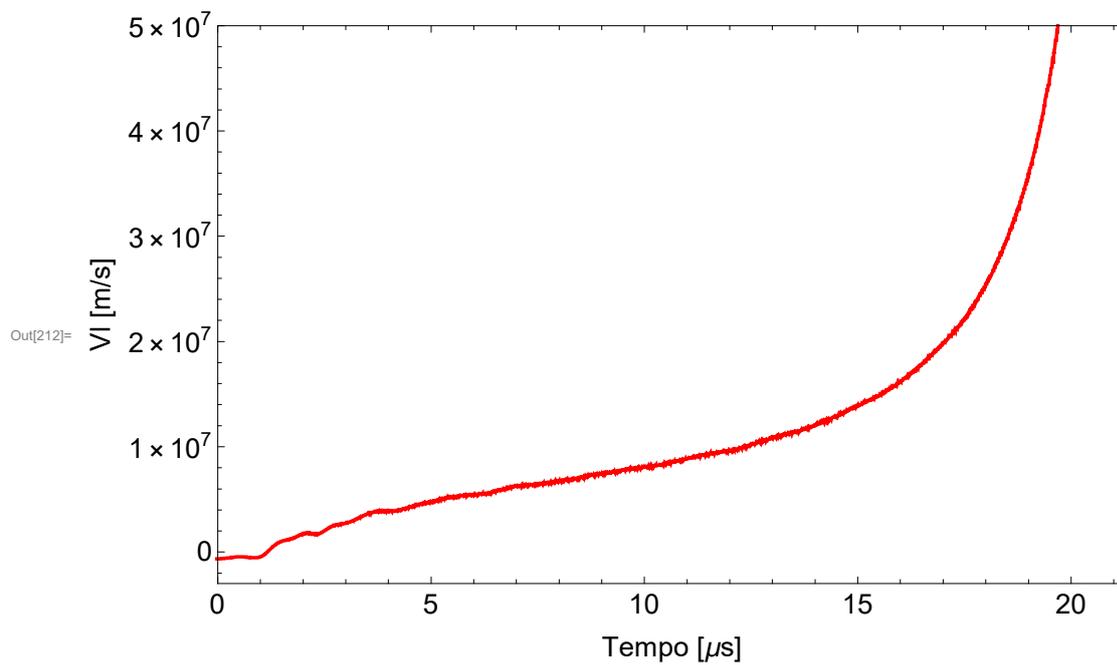
```
In[109]:= (*Do[{Ts3[[nm]] = 1 / (k1 (Ep/E50) - k2)}, {nm, Length[Ut]}]; *)
  [repete] [comprimento]
  
```

In[110]:=

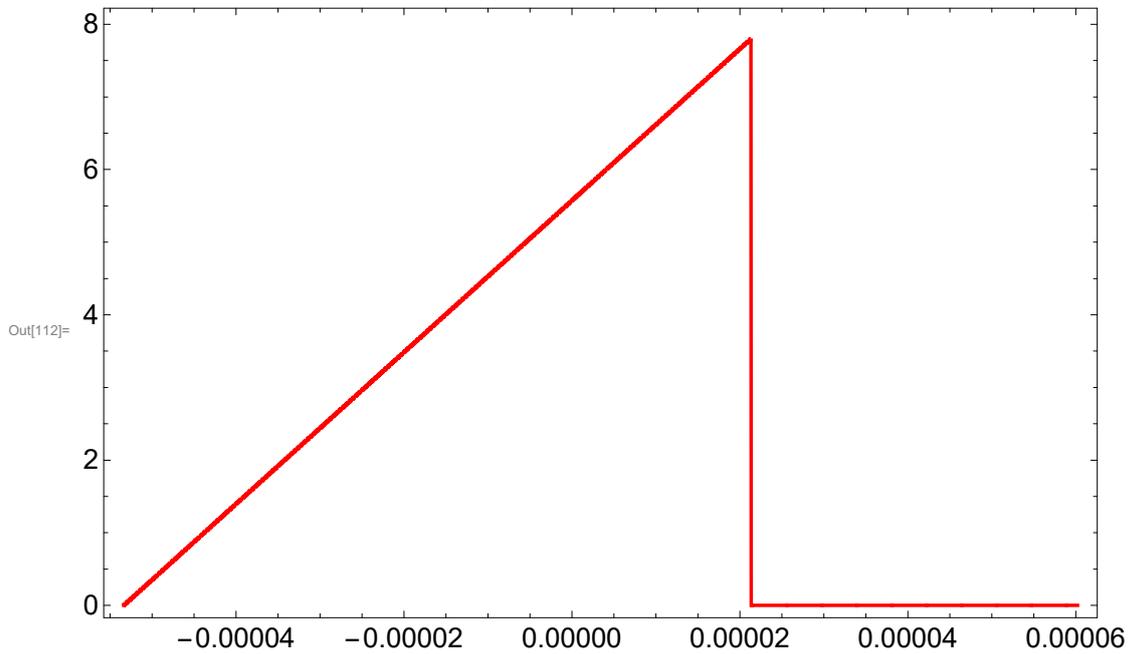
```
Do[{v17[[nm]] = d * k1 * Exp[(k2 * Ut[[nm, 2]]) / d] *
  (Ut[[nm, 2]] / ((d - xtotal[[nm]])) - E0)}, {nm, Length[Ut]}]
```

In[212]:=

```
ListPlot[Table[{10^6 osc822[[n, 1]], v17[[n]]}, {n, 1, Length[Ut]}],
  PlotRange -> {{0.0000, Tcorte 10^6}, {-3 * 10^6, 5 * 10^7}},
  FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "V1 [m/s]"}, ImageSize -> 600]
```



```
In[112]:= ListPlot[Table[{Ut[[t, 1]], xtotal[[t]]}, {t, 1, Pos3}]]
|gráfico de... |tabela
```



Cálculo de Tl por Pignini:

Ts3 (*Usei esse*)

Out[113]= 2.96523×10^{-6}

```
In[114]:= (*TlPignini=1/(((590000/500000)-1)*0.07)*(N[Exp[1.9*((590000/500000)-1)]])*)
|... |exponencial
```

In[115]=

```
In[116]:= Tlpi = d / Max[v16[[All]]] (*Usei esse*)
|máximo |tudo
```

Out[116]= 2.8251×10^{-9}

In[117]=

In[118]=

In[119]= **tc = Tcorte;**

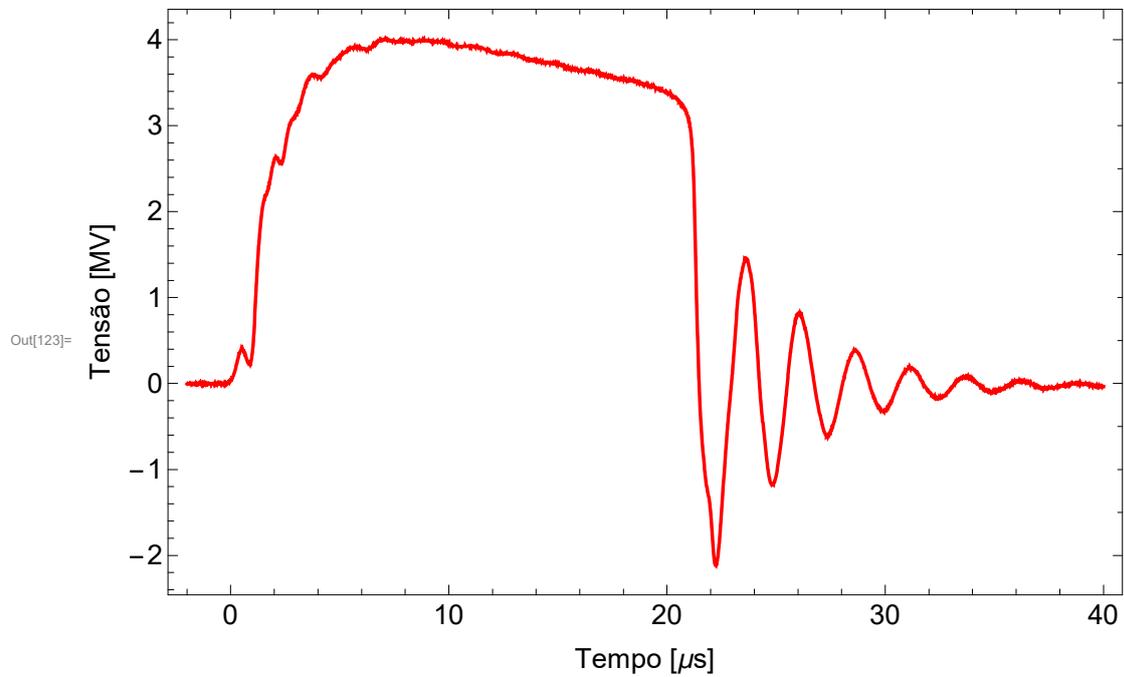
■ Referência 5 - MOTOYAMA

Método 1 - X(t) variando linearmente

```
In[120]:= k1 = 400 * 10^3;
k2 = 50 * 10^3;
```

```
In[122]:= u = Interpolation[Transpose@{Ut[[6000 ;; All, 1]], Ut[[6000 ;; All, 2]]}];
```

```
In[123]:= Plot[10^-6 u[t 10^-6], {t, -2.0, 40}, FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "Tensão [MV]"}]
```



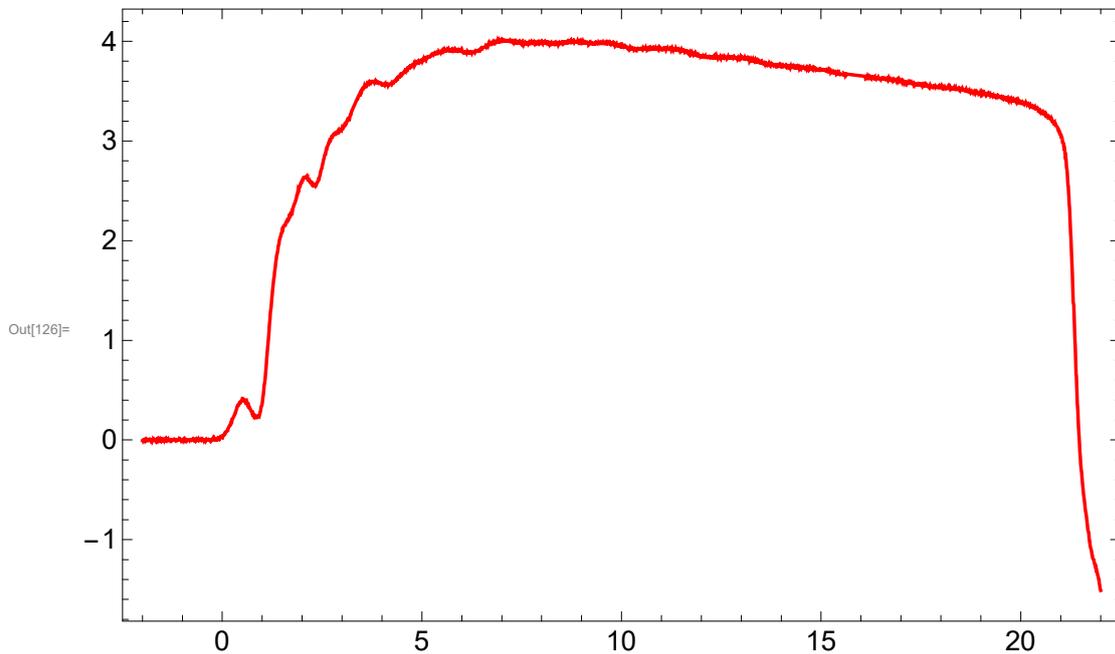
```
In[124]:=
```

```
In[125]:= NIntegrate[10^-6 u[t 10^-6], {t, 0, tc},
  [integra numericamente]
  MaxRecursion -> 100, Method -> "DoubleExponential"]
  [método]
```

Out[125]= 9.27702×10^{-7}

In[126]:= `Plot[10^-6 u[t 10^-6], {t, -2.0, 22}]`

[gráfico](#)



In[127]:= `(*FindRoot[
encontra raiz
 NIntegrate[u[t 10^-6], {t, 0, ts}, MaxRecursion->100, Method->"DoubleExponential"] ==
integra numericamente recursão máxima método
 ts (k1 d + k2), {ts, tc}, Evaluated->False, AccuracyGoal->8, PrecisionGoal->8] *)`

In[128]:= `FindRoot[NIntegrate[10^-6 u[t 10^-6], {t, 0, ts},
encontra r... integra numericamente
 MaxRecursion -> 100, Method -> "DoubleExponential"] == ts (k1 d + k2),
recursão máxima método
 {ts, tc}, Evaluated -> False, AccuracyGoal -> 8, PrecisionGoal -> 8]`

Out[128]= `{ts -> 1.12242 × 10^-16}`

In[129]:= `Length[Ut[[All, 1]]]`

[comprimento](#) [tudo](#)

Out[129]= 13 631

In[130]:= `(*o q fiz foi 1.01(k1+d+k2)*)`

`(*FindRoot[
encontra raiz
 NIntegrate[u[t 10^-6], {t, 0, ts}, MaxRecursion->100, Method->"DoubleExponential"] ==
integra numericamente recursão máxima método
 1.01 ts (k1 d+k2), {ts, 10^-2}, Evaluated->False, AccuracyGoal->8, PrecisionGoal->8]`

`*)`

```
In[131]= FindRoot[NIntegrate[u[t 10^-6], {t, 0, ts},
  |encontra r· |integra numericamente
  MaxRecursion -> 100, Method -> "DoubleExponential"] == 1.01 ts (k1 d + k2),
  |recursão máxima |método
  {ts, 10^-2}, Evaluated -> False, AccuracyGoal -> 8, PrecisionGoal -> 8]
  |falso |meta de exatidão |meta de precisão
```

```
Out[131]= {ts -> 3.88488 x 10^-21}
```

```
In[132]= k1 = 2.5 / (10^3); (*0<x<d/2*)
k2 = 0.42 / (10^3); (*d/2< x <d *)
E0 = 750 * (10^3);
k0 = 410 * (10^-6);
```

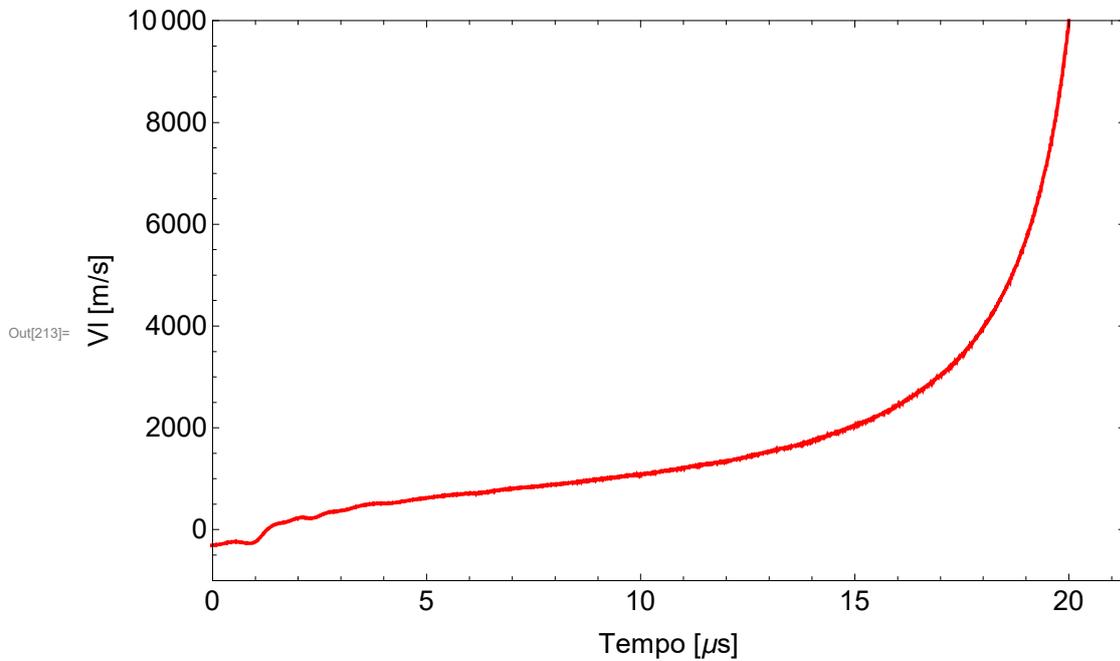
```
In[136]=
```

```
In[137]= v19 = i9 = Table[0, {Pos3}];
  |tabela
```

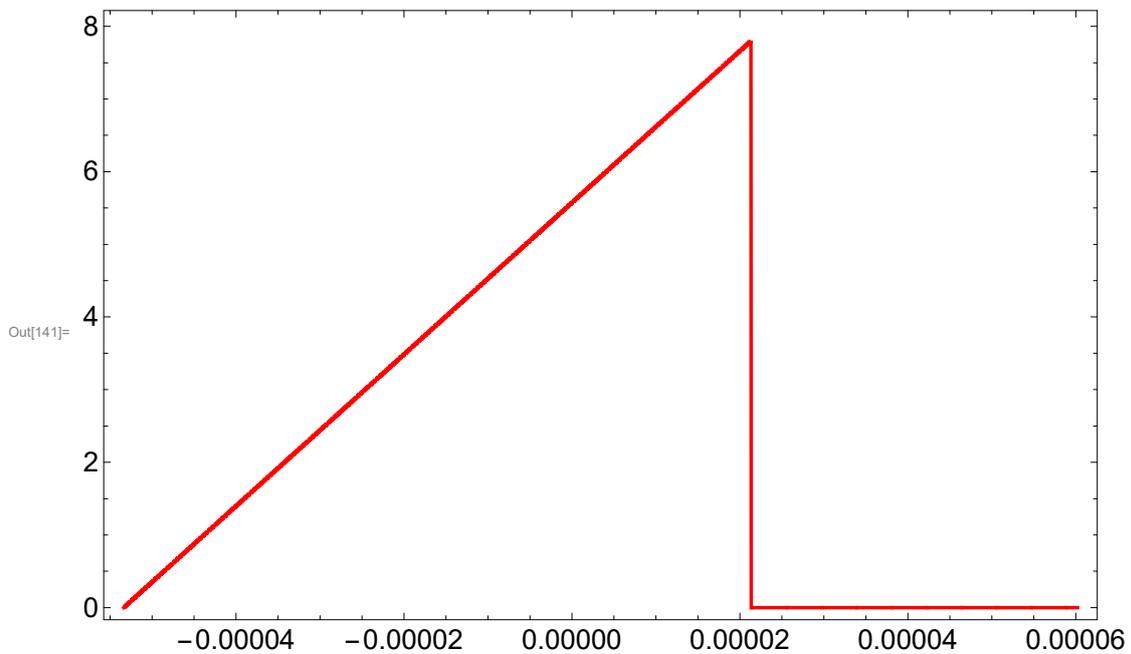
```
In[138]= Do[{if[xtotal[[nm]] < d / 2, v19[[nm]] = k1 * ((Ut[[nm, 2]] / (d - xtotal[[nm]])) - E0),
  |repete
  v19[[nm]] = k2 * ((Ut[[nm, 2]] / (d - xtotal[[nm]])) - E0)}], {nm, Pos3}];
```

```
In[139]= (*Do[{v16[[nm]] = k1 * ((Ut[[nm, 2]] / (d - x)) - E0); *
  |repete
  Do[{i9[[nm]] = k0 * v19[[nm]]}], {nm, Pos3}];
  |repete
```

```
In[213]:= ListPlot[Table[{10^6 osc822[[n, 1]], v19[[n]]}, {n, 1, Length[Ut]}],
  gráfico de... [tabela] comprimento
  PlotRange -> {{0.0000, Tcorte 10^6}, {-1000, 10000}},
  intervalo do gráfico
  FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "V1 [m/s]"}, ImageSize -> 600]
  tamanho da imagem
```



```
In[141]:= ListPlot[Table[{Ut[[t, 1]], xtotal[[t]]}, {t, 1, Pos3}]]
  gráfico de... [tabela]
```



Cálculo de Tl por Motoyama:

In[142]:= **Ts3**

Out[142]:= 2.96523×10^{-6}

In[143]:= **(*Tlpgini=1/(((590000/500000)-1)*0.07)*(N[Exp[1.9*((590000/500000)-1)]])*)**

In[144]:=

In[145]:= **Tlmo1 = d / Max[v19[[All]]] (*Usei esse*)**

Out[145]:= 0.0000116492

In[146]:=

Encontrando Ts e TL experimental

■ HE

Método 1 - X(t) variando linearmente

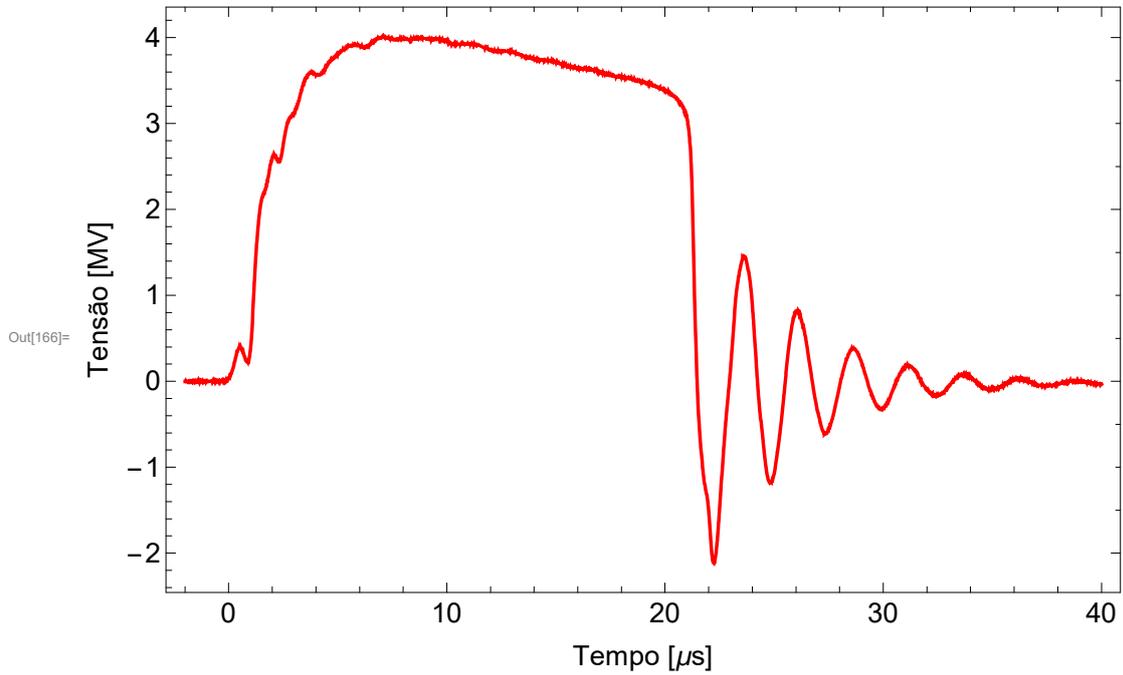
Isolador polimérico

In[163]:= **k1 = 360 * 10^3;**

k2 = 290 * 10^3;

In[165]:= **u = Interpolation[Transpose@{Ut[[6000 ;; All, 1]], Ut[[6000 ;; All, 2]]}];**

In[166]:= `Plot[10^-6 u[t 10^-6], {t, -2.0, 40}, FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "Tensão [MV]"}]`
[gráfico](#) [legenda do quadro](#)

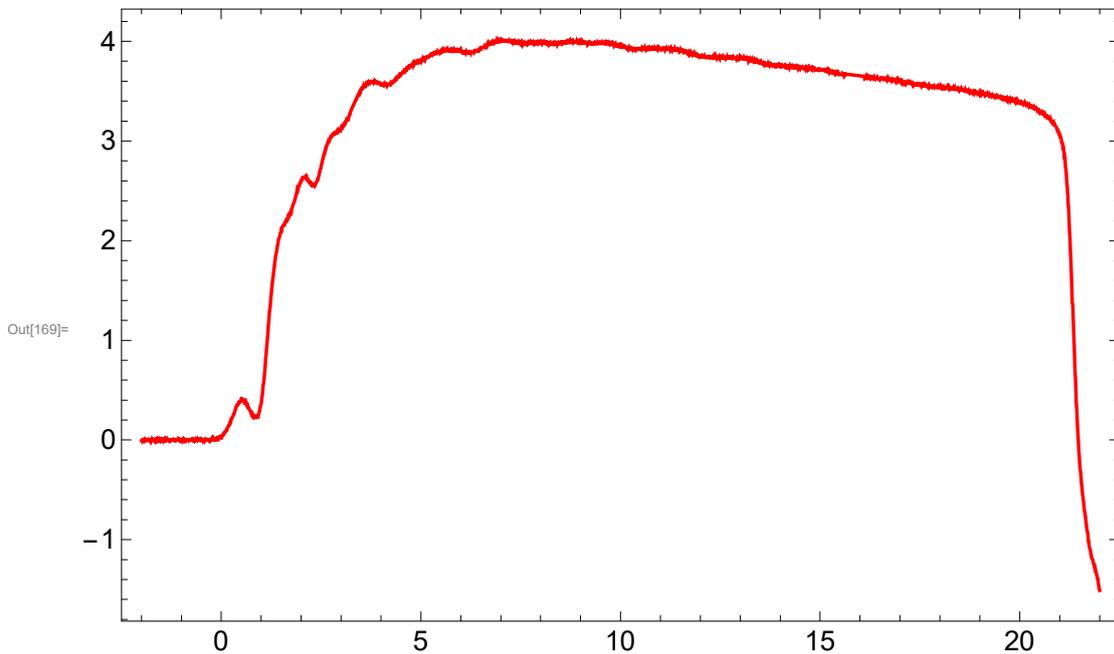


In[167]:=

In[168]:= `NIntegrate[10^-6 u[t 10^-6], {t, 0, tc},`
[integra numericamente](#)
`MaxRecursion -> 100, Method -> "DoubleExponential"]`
[método](#)

Out[168]= 9.27702×10^{-7}

In[169]:= `Plot[10^-6 u[t 10^-6], {t, -2.0, 22}]`
 gráfico



In[170]:= `(*FindRoot[`
 encontra raiz
`NIntegrate[u[t 10^-6], {t, 0, ts}, MaxRecursion->100, Method->"DoubleExponential"] ==`
 integra numericamente recursão máxima método
`ts (k1 d + k2), {ts, tc}, Evaluated->False, AccuracyGoal->8, PrecisionGoal->8] *)`
 falso meta de exatidão meta de precisão

In[171]:= `FindRoot[NIntegrate[10^-6 u[t 10^-6], {t, 0, ts},`
 encontra r... integra numericamente
`MaxRecursion -> 100, Method -> "DoubleExponential"] == ts (k1 d + k2),`
 recursão máxima método
`{ts, tc}, Evaluated -> False, AccuracyGoal -> 8, PrecisionGoal -> 8]`
 falso meta de exatidão meta de precisão

Out[171]= `{ts -> 1.14851 × 10^-16}`

In[172]:= `Length[Ut[[All, 1]]]`
 comprimento tudo

Out[172]= 13 631

In[173]:= `(*o q fiz foi 1.01(k1+d+k2)*)`
`(*FindRoot[`
 encontra raiz
`NIntegrate[u[t 10^-6], {t, 0, ts}, MaxRecursion->100, Method->"DoubleExponential"] ==`
 integra numericamente recursão máxima método
`1.01 ts (k1 d+k2), {ts, 10^-2}, Evaluated->False, AccuracyGoal->8, PrecisionGoal->8]`
 falso meta de exatidão meta de precisão
`*)`

```
In[174]:= FindRoot[NIntegrate[u[t 10^-6], {t, 0, ts},
  |encontra r· |integra numericamente
  MaxRecursion -> 100, Method -> "DoubleExponential"] == 1.01 ts (k1 d + k2),
  |recursão máxima |método
  {ts, 10^-2}, Evaluated -> False, AccuracyGoal -> 8, PrecisionGoal -> 8]
  |falso |meta de exatidão |meta de precisão
```

```
Out[174]:= {ts -> 4.57141 x 10^-21}
```

```
In[175]:= k1 = 1.5 / (10^3); (*0<x<d/2*)
E0 = 620 * (10^3);
k0 = 410 * (10^-6);
```

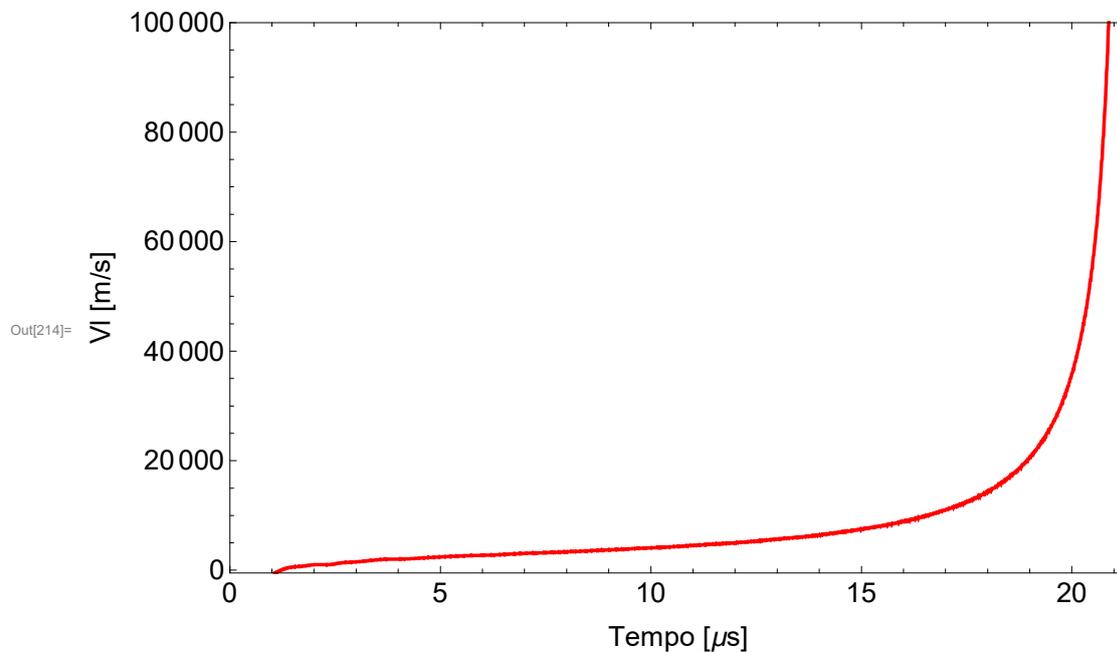
```
In[178]:=
```

```
In[179]:= v111 = i11 = Table[0, {Pos3}];
  |tabela
```

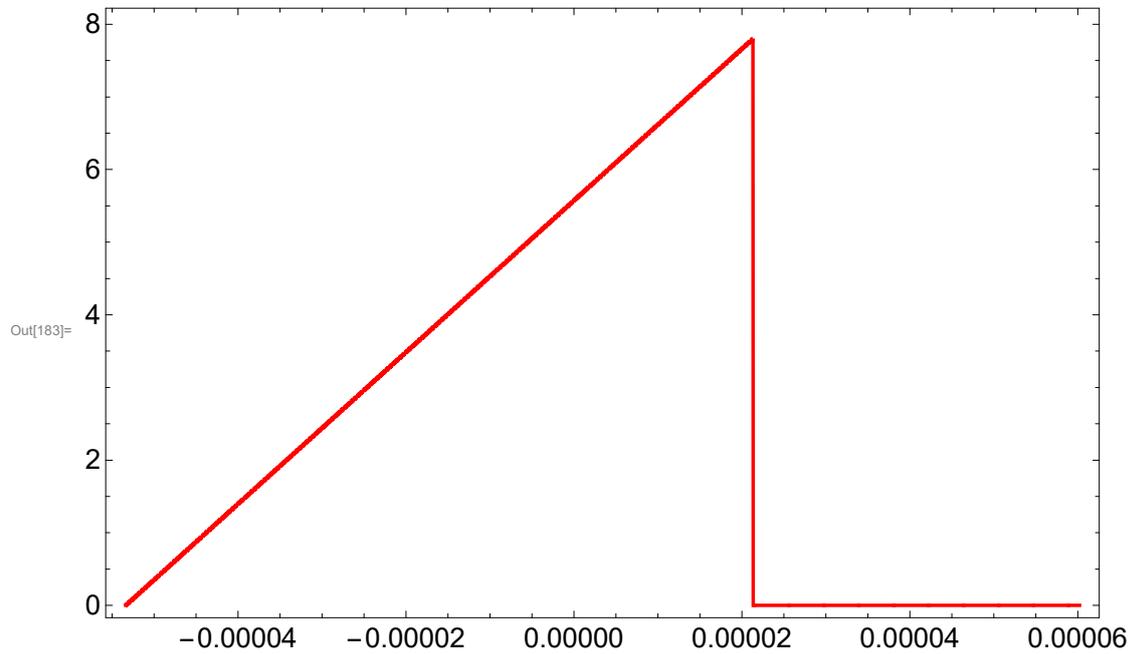
```
In[180]:= Do[{v111[[nm]] = k1 * ((Ut[[nm, 2]] / (d - xtotal[[nm]])) - E0)}, {nm, Pos3}];
  |repete
```

```
In[181]:= (*Do[{v16[[nm]] = k1 * ((Ut[[nm, 2]] / (d - x)) - E0); *}
  |repete
  Do[{i11[[nm]] = k0 * v111[[nm]]}, {nm, Pos3}];
  |repete
```

```
In[214]:= ListPlot[Table[{10^6 osc822[[n, 1]], v111[[n]]}, {n, 1, Length[Ut]}],
  |gráfico de· |tabela |comprimento
  PlotRange -> {{0.0000, Tcorte 10^6}, {-500, 1 * 10^5}},
  |intervalo do gráfico
  FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "V1 [m/s]"}, ImageSize -> 600]
  |tamanho da imagem
```



In[183]:= `ListPlot[Table[{Ut[[t, 1]], xtotal[[t]]}, {t, 1, Pos3}]]`
 gráfico de... tabela

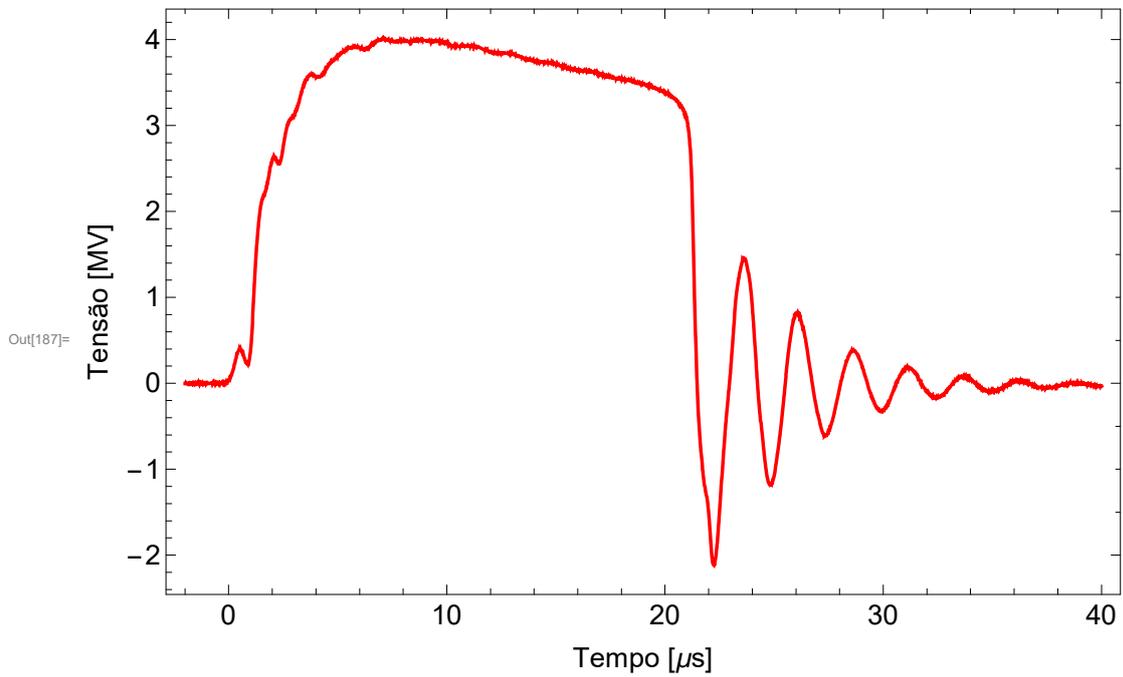


Isolador porcelana

In[184]:= `k1 = 430 * 10^3;`
`k2 = 190 * 10^3;`

In[186]:= `u = Interpolation[Transpose[{Ut[[6000 ;; A11, 1]], Ut[[6000 ;; A11, 2]]}]];`
 interpoação transposição tudo tudo

In[187]:= `Plot[10^-6 u[t 10^-6], {t, -2.0, 40}, FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "Tensão [MV]"}]`
[gráfico](#) [legenda do quadro](#)

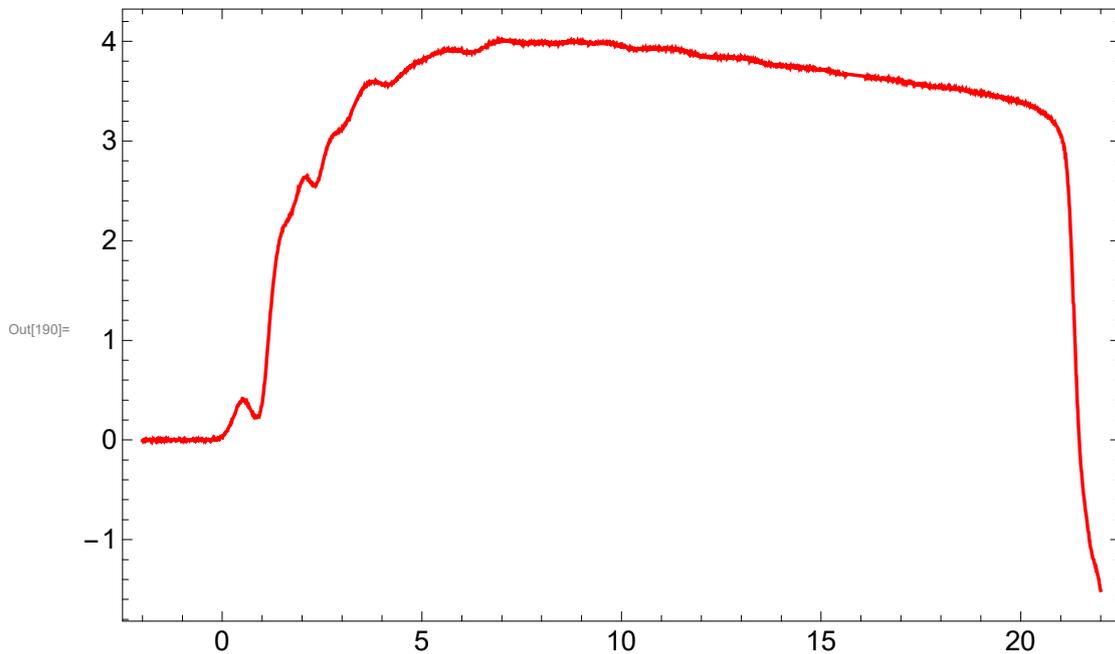


In[188]:=

In[189]:= `NIntegrate[10^-6 u[t 10^-6], {t, 0, tc},`
[integra numericamente](#)
`MaxRecursion -> 100, Method -> "DoubleExponential"]`
[método](#)

Out[189]= 9.27702×10^{-7}

In[190]:= `Plot[10^-6 u[t 10^-6], {t, -2.0, 22}]`
 gráfico



In[191]:= `(*FindRoot[`
 encontra raiz
`NIntegrate[u[t 10^-6], {t, 0, ts}, MaxRecursion->100, Method->"DoubleExponential"] ==`
 integra numericamente recursão máxima método
`ts (k1 d + k2), {ts, tc}, Evaluated->False, AccuracyGoal->8, PrecisionGoal->8] *)`
 falso meta de exatidão meta de precisão

In[192]:= `FindRoot[NIntegrate[10^-6 u[t 10^-6], {t, 0, ts},`
 encontra r... integra numericamente
`MaxRecursion -> 100, Method -> "DoubleExponential"] == ts (k1 d + k2),`
 recursão máxima método
`{ts, tc}, Evaluated -> False, AccuracyGoal -> 8, PrecisionGoal -> 8]`
 falso meta de exatidão meta de precisão

Out[192]:= `{ts -> 1.00394 x 10^-16}`

In[193]:= `Length[Ut[[All, 1]]]`
 comprimento tudo

Out[193]:= 13 631

In[194]:= `(*o q fiz foi 1.01(k1+d+k2)*)`
`(*FindRoot[`
 encontra raiz
`NIntegrate[u[t 10^-6], {t, 0, ts}, MaxRecursion->100, Method->"DoubleExponential"] ==`
 integra numericamente recursão máxima método
`1.01 ts (k1 d+k2), {ts, 10^-2}, Evaluated->False, AccuracyGoal->8, PrecisionGoal->8]`
 falso meta de exatidão meta de precisão
`*)`

```
In[195]:= FindRoot[NIntegrate[u[t 10^-6], {t, 0, ts},
  |encontra r... |integra numericamente
  MaxRecursion -> 100, Method -> "DoubleExponential"] == 1.01 ts (k1 d + k2),
  |recursao maxima |metodo
  {ts, 10^-2}, Evaluated -> False, AccuracyGoal -> 8, PrecisionGoal -> 8]
  |falso |meta de exatidao |meta de precisao
```

```
Out[195]:= {ts -> 1.76434 x 10^-21}
```

```
In[196]:= k1 = 2.9 / (10^3); (*0<x<d/2*)
E0 = 580 * (10^3);
k0 = 410 * (10^-6);
```

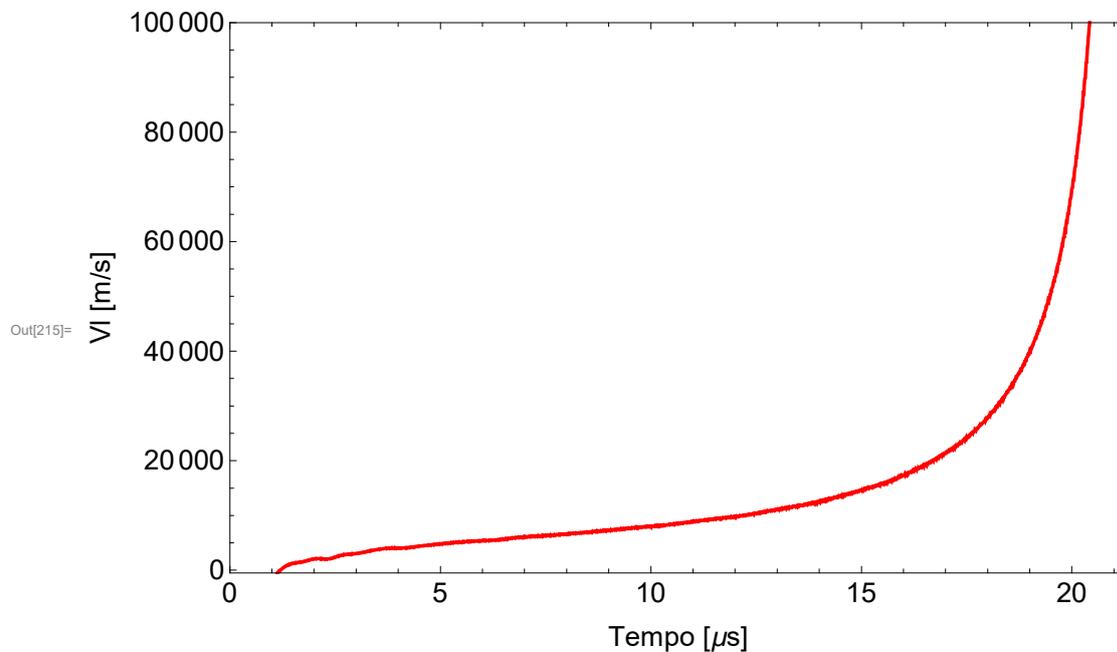
```
In[199]:=
```

```
In[200]:= v112 = i12 = Table[0, {Pos3}];
  |tabela
```

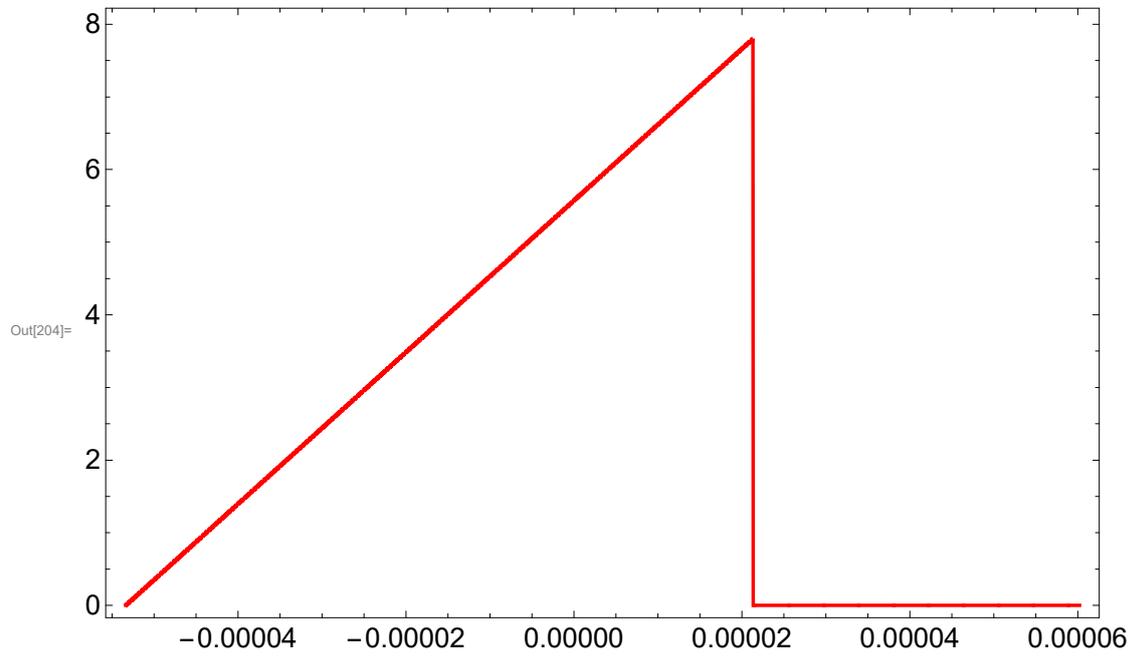
```
In[201]:= Do[{v112[[nm]] = k1 * ((Ut[[nm, 2]] / (d - xtotal[[nm]])) - E0)}, {nm, Pos3}];
  |repete
```

```
In[202]:= (*Do[{v16[[nm]] = k1 * ((Ut[[nm, 2]] / (d - x)) - E0); *]
  |repete
Do[{i12[[nm]] = k0 * v111[[nm]]}, {nm, Pos3}];
  |repete
```

```
In[215]:= ListPlot[Table[{10^6 osc822[[n, 1]], v112[[n]]}, {n, 1, Length[Ut]}],
  |grafico de... |tabela |comprimento
  PlotRange -> {{0.0000, Tcorte 10^6}, {-500, 1 * 10^5}},
  |intervalo do grafico
  FrameLabel -> {"Tempo [μs]", "V1 [m/s]"}, ImageSize -> 600]
  |tamanho da imagem
```



In[204]:= `ListPlot[Table[{Ut[[t, 1]], xtotal[[t]]}, {t, 1, Pos3}]]`
 gráfico de... tabela



In[205]:= `Tlhe1 = d / Max[v111[[All]]] (*Usei esse*)`
 máximo tudo

Out[205]= 3.2615×10^{-6}

In[206]:= `Tlhe1 = d / Max[v112[[All]]] (*Usei esse*)`
 máximo tudo

Out[206]= 1.68694×10^{-6}