

# Caracterização de uma Cadeia de Isoladores Longa em Ultra Alta Tensão: Simulações e Resultados Experimentais

Mayara Cunha Cagido\*  
Francisco Eduardo Rodrigues de Araújo\*\*  
Antonio Carlos Siqueira de Lima\*\*\*

\* Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPEL, RJ,  
(e-mail: mayarac@cepel.br).

\*\* Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPEL, RJ,  
(e-mail: edufra@cepel.br).

\*\*\* Programa de Engenharia Elétrica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, (e-mail: acsl@dee.ufrj.br)

**Abstract:** This work presents a study about the withstand characteristics of an ultra high voltage insulators string in direct current transmission towers, based on the Leader Progression Model (LPM). The results obtained with lightning impulses in a insulators string allowed the comparison of laboratory measurements with equations developed with the LPM. Electrical tests were also performed with switching impulses, which provided important information as time parameters, operation steps and measurement techniques, contributing to the research and development of the Cepel's Ultra High Voltage (UHV) Laboratory, unique in Latin America.

**Resumo:** Este trabalho apresenta um estudo sobre a suportabilidade de uma cadeia de isoladores de ultra alta tensão para torres de transmissão de corrente contínua, baseado no *Leader Progression Model (LPM)*. Os resultados obtidos por meio de experimentos laboratoriais, com aplicação de impulsos atmosféricos na cadeia de isoladores, permitiram a comparação com equações desenvolvidas para o LPM. Também foram realizados ensaios elétricos com impulsos de manobra, que possibilitaram a obtenção de informações importantes, como os parâmetros de tempo, etapas na operação e técnicas de medição, contribuindo para a pesquisa e desenvolvimento do laboratório de Ultra Alta Tensão (UAT) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - Cepel, único na América Latina.

Keywords: Lightning impulse; switching impulse; insulators; laboratory, LPM.

Palavras-chaves: Impulso atmosférico; impulsos de manobra; isoladores; laboratório; LPM.

## 1. INTRODUÇÃO

As redes de transmissão do Brasil são capazes de conduzir níveis superiores a 800 kV, com objetivo de suprir o consumo nas diferentes regiões. Como consequência, houve o surgimento de equipamentos que viabilizassem essa demanda de energia, juntamente com a necessidade de avaliar o desempenho de cada um durante a aplicação em ultra alta tensão (UAT).

A criação, em 2016, do laboratório de Ultra Alta Tensão, localizado no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), permite a realização de pesquisas e análises de estruturas que envolvem equipamentos que operam em UAT, por meio da aplicação de impulsos de tensão que simulam operações de manobra e descargas atmosféricas, gerando investigações importantes no setor elétrico, que podem caracterizar diferentes elementos que compõem as linhas de transmissão, como uma cadeia de isoladores.

Neste trabalho, foram realizados ensaios elétricos com impulsos de tensão para avaliar a suportabilidade de isolamento de uma cadeia longa, com 39 isoladores, medindo

7,8 metros. Além disso, foram abordados conceitos relacionados aos equipamentos utilizados no laboratório de UAT e recomendações técnicas na realização dos procedimentos experimentais envolvendo toda a estrutura utilizada.

O objetivo deste trabalho é investigar as características de suportabilidade elétrica de cadeias de isoladores em sistemas UAT quando solicitadas por sobretensões atmosféricas ou de manobra, cujo comportamento ainda é pouco conhecido e necessita de mais estudos. Trata-se de um estudo em fase inicial, que é particularmente importante, pois acrescenta informações significativas aos métodos analíticos e experimentais, vistos em Wagner and Hileman (1961), Suzuki and Miyake (1977), Shindo and Suzuki (1985), Pignini et al. (1989), Motoyama (1996) e Wang et al. (2014), contemplando os modelos que poderiam ser considerados na avaliação da suportabilidade em questão, baseados no *Leader Progression Model* - LPM.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para verificar o comportamento de equipamentos ou estruturas diante de impulsos de tensão é necessário en-

tender o processo físico da descarga elétrica. Quando um espaçamento de ar (*gap*) é submetido a uma sobretensão, pode ocorrer uma descarga elétrica, representada por uma sequência de fenômenos físicos que resultam na disrupção entre dois potenciais distintos da cadeia de isoladores.

### 2.1 Desenvolvimento de uma descarga elétrica

O processo físico de descarga elétrica possui três etapas: injeção do corona, propagação dos *streamers* e propagação do *leader*, que ocorrem independente da forma de impulso aplicado e geometria do *gap*. Todo o processo é mostrado em Cigré (1991).

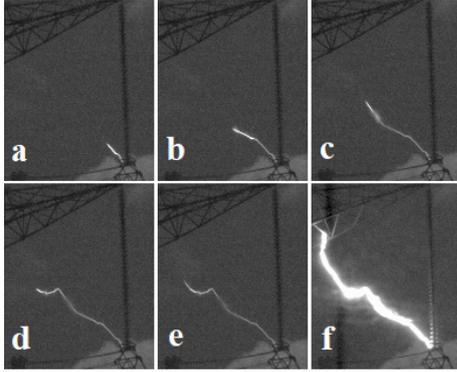


Figura 1. Propagação do *leader* em uma disrupção elétrica no laboratório UAT do Cepel.

O fenômeno se inicia a partir do aumento da tensão até o surgimento do Efeito Corona, momento em que acontece a ionização do ar, podendo ocorrer em toda a região entre eletrodos do arranjo isolante.

Ocorre então a “injeção do corona”, no qual se observa a presença de alguns filamentos próximos a região do efeito corona, conhecidos como *streamers*. Um *streamer* é representado por um trecho ou filamento que é crescente, estabelecendo um canal ionizado que definirá o percurso a ser seguido pelo *leader*. O surgimento de *streamers* é alternado com desaparecimento desse fenômeno e consequente inibição do corona (“*dark period*”). Em seguida, com o contínuo aumento da tensão até a intensidade do campo elétrico alcançar um valor fixo, os *streamers* se propagam e atravessam o *gap*, permitindo a criação de um ligamento comum, o *leader*. A trajetória exata do *leader* não é previsível, tendo um registro da propagação mostrado na Figura 1, em ordem alfabética. Quando o *leader* cruza esse *gap* ocorre o *salto final*, momento que acontece a descarga elétrica propriamente dita (Figura 1f). Tanto a fase do *streamer*, quanto a fase do *leader*, podem ocorrer em um eletrodo ou em ambas as extremidades. Neste segundo caso, a descarga ocorre quando os *leaders* das extremidades se encontram.

A Figura 1 corresponde a um impulso de tensão na polaridade positiva, utilizado para representar o modelo de descarga descrito. Como pode ser visto nos artigos de Motoyama (1996) e Pignini et al. (1989), apesar do modelo funcionar de forma mais adequada para impulsos positivos, é mostrado que, independente da polaridade do impulso e da geometria do *gap*, o tempo de propagação do *streamer* para impulsos positivos e negativos pode ser obtido através de outros parâmetros, como o fator de *gap* e gradiente.

### 2.2 Leader Progression Model - LPM

O LPM é um modelo que descreve o comportamento de uma disrupção baseado no mecanismo da descarga elétrica e suas fases de evolução, considerando os efeitos de um impulso atmosférico aplicado a diferentes tipos de *gaps*. Neste trabalho, o LPM foi utilizado para avaliar a suportabilidade de isolamento em um *gap* formado por isoladores de vidro, do tipo disco, e obter novas informações relacionadas a operação em ultra alta tensão.

Como mostrado em Pignini et al. (1989), este modelo é bastante utilizado em trabalhos científicos para diferentes tipos de *gap* (ponta-ponta, ponta-plano e com isoladores) e *gaps* longos (maiores que 1 metro), tornando-se útil na análise de fenômenos de disrupção com aplicação de impulsos atmosféricos padronizados e não padronizados em linhas de transmissão.

### 2.3 Tempo de Disrupção - $t_b$

O processo de descarga ocorre em um intervalo entre o zero virtual e o tempo de disrupção (momento que a tensão de impulso decai bruscamente até zero), ambos registrados na forma de onda de impulso. Dessa maneira, o tempo de disrupção (*time of breakdown*) pode também ser definido como a soma de cada fase da descarga elétrica, conforme Equação 1, vista em Motoyama (1996).

$$t_b = t_i + T_s + T_i + T_L + T_g \quad (1)$$

Assim, o tempo de disrupção é um parâmetro utilizado no LPM, composto pelo tempo de injeção 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).

De acordo com Shindo and Suzuki (1985), o parâmetro  $T_i$  está incluído em  $T_L$  nos impulsos com tempo de disrupção menores que  $20 \mu s$ . Além disso, Wang et al. (2014) apresentam consideráveis justificativas para desprezar os valores de  $t_i$  e  $T_g$ , sem introdução de erros significativos nos cálculos, sendo possível modificar a Equação 1, conforme a 2.

$$t_b = T_s + T_L \quad (2)$$

Os autores Wagner and Hileman (1961), Suzuki and Miyake (1977), Shindo and Suzuki (1985), Pignini et al. (1989), Motoyama (1996) e Wang et al. (2014) encontraram formulações para os parâmetros  $T_s$  e  $T_L$ , considerando diversas estruturas de *gaps* e polaridades, conforme Tabelas 1 e 2. Essas equações possuem características específicas de aplicação, sendo ainda explorada uma aplicação comum para todos os tipos de configurações de circuitos.

## 3. PARTICULARIDADES SOBRE OS ENSAIOS ELÉTRICOS

A avaliação da suportabilidade de isolamento de uma cadeia de isoladores foi realizada por meio de ensaios elétricos no laboratório UAT do Cepel. É importante ressaltar que

os resultados experimentais em laboratórios auxiliam em duas questões relevantes: na validação dos procedimentos analíticos, através da análise do comportamento da suportabilidade diante de impulso de tensões e tipos de *gap* e na investigação de quais valores dos parâmetros das Tabelas 1 e 2 podem ser considerados para o LPM representar a disrupção no arranjo com essa cadeia, de forma mais apropriada, como apresentado pela autora, em Cagido (2019).

Então, para relacionar o processo teórico, visto na Seção 2, com os resultados mostrados na Seção 4, torna-se fundamental enumerar os principais procedimentos adotados e ajustes necessários nas pesquisas, de modo que possa orientar a comunidade científica na elaboração de futuros trabalhos envolvendo estudos experimentais nesse laboratório singular. São estes:

- (1) *Condições ambientais*: As condições climáticas foram um fator decisivo na realização de ensaios. Sendo uma instalação ao tempo, fica constantemente exposta aos fatores naturais como chuvas, rajadas de vento e umidade, que podem impossibilitar os ensaios;
- (2) *Necessidade de equipamentos específicos*: A utilização de máquinas específicas como guincho e plataforma aérea torna-se indispensável, devido às grandes dimensões dos equipamentos utilizados, principalmente para alterar as configurações da cadeia de isoladores e gerador de impulso, que mede 25 m de altura;
- (3) *Tipos de impulsos*: Para produzir formas de onda de tensão com características de impulso atmosférico ou de manobra, é preciso configurar os 32 estágios do

Tabela 1. Equações para cálculos do tempo de desenvolvimento do *streamer*.

Fase de desenvolvimento do <i>Streamer</i>				
Ref.	Dist. [m] e tipo de Gap	Pol.	Parâmetros	Equações
1	1 a 3 Ponta-Ponta	+	$v_s = 3 \times 10^5$ m/s	—
2	1 a 5 Ponta-Plano	+	$k_1 = 1,63 \times 10^3$ m/(kV.s) $k_2 = 0,5 \times 10^6$ s <sup>-1</sup> $k_3 = 0,5 \times 10^6$ m/s	$v_s = k_1 U_p - k_2 d + k_3$
		-	$k_1 = 1,93 \times 10^3$ m/(kV.s) $k_2 = 0,77 \times 10^6$ s <sup>-1</sup> $k_3 = 0,77 \times 10^6$ m/s	$T_s = \frac{d}{v_s}$
3	1 a 5 Ponta-Plano	+	$k_1 = 0,5 \times 10^{-3}$ (kV.s)/m $k_2 = 300$ kV/m	$T_s = \frac{k_1}{(U_p/d) - k_2}$
	2 a 5 Ponta-Ponta	+	$k_1 = 0,5 \times 10^{-3}$ (kV.s)/m $k_2 = 420$ kV/m	
4	2 a 4 Ponta-Plano	±	$k_1 = 1,25 \times 10^6$ s <sup>-1</sup> $k_1 = 0,95 \times 10^6$ s <sup>-1</sup>	$T_s = \frac{1}{k_1 \frac{E_p}{E_{50}} - k_2}$
	2 a 4 Ponta-Ponta			
	3,36 Isolador			
5	0,4 a 3 Ponta-Ponta	+	$k_1 = 400$ kV/m $k_2 = 50$ kV/m	$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} U(t) dt >$
	0,4 a 3 Ponta-Ponta	-	$k_1 = 460$ kV/m $k_2 = 150$ kV/m	$k_1 d + k_2$
6	1,05 a 4,15 Isolador Polimérico	+	$k_1 = 360$ kV/m $k_2 = 290$ kV	$\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} U(t) dt >$
	0,95 a 4,14 Isolador de Porcelana	-	$k_1 = 500$ kV/m $k_2 = 140$ kV	
			+	$k_1 = 430$ kV/m $k_2 = 190$ kV
	-		$k_1 = 490$ kV/m $k_2 = 90$ kV	

<sup>1</sup> Wagner and Hileman (1961) <sup>2</sup> Suzuki and Miyake (1977) <sup>3</sup> Shindo and Suzuki (1985) <sup>4</sup> Pignini et al. (1989) <sup>5</sup> Motoyama (1996) <sup>6</sup> Wang et al. (2014)

gerador de impulsos da Figura 3 com os valores de resistência específicos, considerando que os tempos de frente e de cauda de um impulso estão relacionados com os valores de resistências em série e em paralelo do gerador, mostrado por Kuffel et al. (2000), demandando tempo e cuidado;

- (4) *Escolha do transformador de corrente (TC) adequado*: Além das pesquisas com aplicação de impulsos de tensão, houve uma investigação sobre a corrente envolvida no processo de disrupção da cadeia de isoladores. Devido às dificuldades impostas pelo circuito montado, com vários pontos de aterramento, a identificação de um TC adequado para o nível de corrente e a necessidade de duas ou mais unidades, tornaram esta medição não trivial. Para realizar essa medição no circuito da Figura 3, seria necessário encontrar um TC específico, que pudesse ser acoplado próximo à cadeia, sem a necessidade de um suporte durante toda a realização do ensaio e que pudesse ser submetido a uma alta energia e altas frequências. Foram escolhidos dois pontos de medição: um no gerador de impulso e outro no divisor de tensão, que demandaram cabos com 50 metros, para conexão com a sala de controle (osciloscópios). Os cabos longos produzem oscilações de tensão e corrente, cuja frequência está associada ao comprimento dos mesmos. Assim, os cabos utilizados nas conexões dos TCs podem causar ruídos nas medições;

Tabela 2. Equações para cálculos do tempo de desenvolvimento do *leader*.

Fase de desenvolvimento do <i>Leader</i>				
Ref.	Dist. [m] e tipo de Gap	Pol.	Parâmetros	Equações
1	1 a 3 Ponta-Ponta	+	$k_1 = 1 \times 10^3$ m/(kV.s) $E_o = 500$ kV/m $k_o = 320$ μC/m	$v_l = k_1 d \left( \frac{U(t)}{d-x} - E_o \right)$ $i = k_o v_l$
2	1 a 5 Ponta-Plano	+	$k_1 = 1,0$ m <sup>2</sup> /(kV <sup>2</sup> .s) $E_L = 250$ kV/m $k_0 = 78,6$ μC/m <sup>2</sup>	$v_l = k_1 \frac{(U(t) - E_L d)(U(t) - E_L x)}{d-x}$ $i = k_0 d(v_l - 0,25 \times 10^6)$
		-	—	—
3	1 a 5 Ponta-Plano	+	$k_1 = 0,2$ m <sup>2</sup> /(kV <sup>2</sup> .s) $k_2 = 3$ m <sup>2</sup> /(kV <sup>2</sup> .A.s) $k_0 = 500$ μF/m	$v_l = U(t) \left( k_1 \frac{U(t)}{d-x} + k_2 \frac{i(t)}{d-x} \cdot \frac{x}{d} \right)$ $i = k_0 U(t) v_l$
	2 a 5 Ponta-Ponta	+	$k_1 = 0,1$ m <sup>2</sup> /(kV <sup>2</sup> .s) $k_2 = 2,5$ m <sup>2</sup> /(kV <sup>2</sup> .A.s) $k_0 = 500$ μF/m	
4	2 a 4 Ponta-Plano	+	$k_1 = 0,05$ m <sup>2</sup> /(kV <sup>2</sup> .s) $k_2 = 5$ m <sup>2</sup> /(kV <sup>2</sup> .A.s) $k_0 = 500$ μF/m	$v_l = U(t) \left( k_1 \frac{U(t)}{d-2x} + k_2 \frac{i(t)}{d-2x} \cdot \frac{x}{d} \right)$ $i = k_0 U(t) v_l$
		-	$k_1 = 0,05$ m <sup>2</sup> /(kV <sup>2</sup> .s) $k_2 = 5$ m <sup>2</sup> /(kV <sup>2</sup> .A.s) $k_0 = 500$ μF/m	
		±	$k_1 = 170$ m/(kV.s) $k_2 = 1,5 \times 10^{-3}$ m/kV $E_o = E_{50}$ $k_0 = 100 \sim 700$ μC/m	
5	0,4 a 3 Ponta-Ponta	+	$k_1 = \begin{cases} 2,5, & 0 < x < d/2 \\ 0,42, & d/2 < x < d \end{cases}$ m <sup>2</sup> /(kV.s)	$v_l = k_1 \left( \frac{U(t)}{d-x} - E_o \right)$
	0,4 a 3 Ponta-Ponta	-	$E_o = 750$ kV/m $k_0 = 410$ μC/m	$i = k_0 v_l$
6	1,05 a 4,15 Isolador Polimérico	+	$k_0 = 1,5$ m <sup>2</sup> /(kV.10 <sup>-3</sup> .s) $E_o = 620$ kV/m $k_0 = 1,3$ m <sup>2</sup> /(kV.10 <sup>-3</sup> .s)	$v_l = k_0 \left( \frac{U(t)}{d-x} - E_o \right)$
		-	$E_o = 570$ kV/m	
	+	$k_0 = 2,9$ m <sup>2</sup> /(kV.10 <sup>-3</sup> .s) $E_o = 580$ kV/m		
	-	$k_0 = 2,5$ m <sup>2</sup> /(kV.10 <sup>-3</sup> .s) $E_o = 640$ kV/m		

<sup>1</sup> Wagner and Hileman (1961) <sup>2</sup> Suzuki and Miyake (1977) <sup>3</sup> Shindo and Suzuki (1985) <sup>4</sup> Pignini et al. (1989) <sup>5</sup> Motoyama (1996) <sup>6</sup> Wang et al. (2014)

(5) *Medição e nível de ruído*: Novamente, tendo como foco o considerável perímetro do laboratório, torna-se fundamental avaliar a integridade física dos cabos, para que não ocorra erros nas medições devido a alguma avaria. Deve-se considerar a utilização de fibra ótica, com a finalidade de minimizar a interferência gerada pelos cabos longos nas medições. Ademais, os ruídos provocados pela disrupção e centelhamento das esferas do gerador de impulsos são propagados, gerando impacto nas medições também.

### 3.1 Laboratório de Ultra Alta Tensão

Os ensaios elétricos descritos nesse trabalho foram realizados no laboratório UAT, que está localizado em Nova Iguaçu - Rio de Janeiro, recentemente inaugurado pelo Cepel. Nele, é possível realizar pesquisas experimentais e ensaios dielétricos em linhas de transmissão, cadeias de isoladores e equipamentos com classes até  $\pm 1200$  kV (corrente alternada) e  $\pm 1000$  kV (corrente contínua).

O laboratório foi construído numa área de  $40.800 \text{ m}^2$ , sendo composto por três pórticos principais, que possuem 70 m de altura e uma distância de 110 m entre si, totalizando um comprimento total de 220 m, conforme Figura 2.



Figura 2. Laboratório de Ultra Alta Tensão.

### 3.2 Montagem dos ensaios

A montagem do ensaio é composta por uma torre de suspensão de corrente contínua estaiada leve de 800 kV, dois polos e uma cadeia de isoladores. O polo possui um feixe com seis condutores, raio de 0,6 m e cabo coreopsis (CA1590 kcmil coreopsis - 61 fios), compondo as linhas de transmissão. A cadeia avaliada possui um comprimento de 7,8 m e 39 isoladores de vidro, tipo disco, com 320 kN e dimensões de  $\varnothing 360 \times 195$  mm cada isolador. A distância entre os polos é de 19,80 m.

O restante do circuito é formado por um gerador de impulsos capaz de produzir 6,4 MV, com 32 estágios, e divisor de tensão misto série (com capacitores e resistores), ambos conectados na linha de transmissão com a cadeia de isoladores, podendo ser visto na Figura 3.

## 4. ENSAIOS REALIZADOS E RESULTADOS

Inicialmente, foram realizados ensaios para determinação da tensão com probabilidade de 50% de ocorrência de

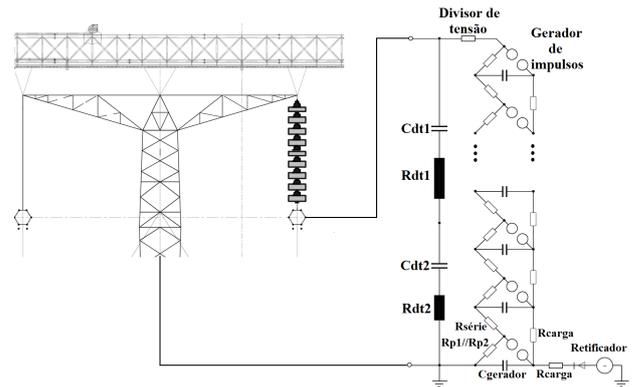


Figura 3. Circuito montado.

descarga ( $U_{50\%}$ ) com impulso de manobra, tanto na polaridade positiva quanto negativa, com a finalidade de investigar o comportamento da suportabilidade de uma cadeia de isoladores longa diante de impulsos com diferentes tempos de frente, em ultra alta tensão.

Em seguida, foi realizado o mesmo ensaio de determinação, porém com impulso atmosférico, na polaridade positiva. Esse ensaio tem uma utilidade importante na caracterização do LPM, pois as formulações desenvolvidas nas Tabelas 1 e 2 utilizaram este tipo de impulso como referência.

Os resultados obtidos na execução dos ensaios são de grande relevância na área científica, contribuindo para o desenvolvimento do sistema de transmissão em UAT, com destaque nas pesquisas experimentais envolvendo o LPM, verificando se os parâmetros considerados nos modelos matemáticos descritos nas Tabelas 1 e 2 podem representar esta configuração de ensaio.

### 4.1 Impulso de Manobra

O objetivo do ensaio é estabelecer uma correlação entre o nível de tensão  $U_{50\%}$  com aplicação de impulso de manobra (forma de onda com  $250 \mu\text{s}$  de tempo de frente e  $2500 \mu\text{s}$  de tempo cauda, apresentada em Cagido (2019)) e o comprimento do *gap*.

Realizou-se o método *Up and Down*, que consiste em identificar a tensão  $U_{50\%}$  correspondente e, em seguida, verificar se a cadeia de isoladores suporta os impulsos, de acordo com o nível de isolamento encontrado. O ensaio começa com aplicações em torno da tensão disruptiva estimada. Quando ocorre uma aplicação com disrupção, seguida de uma sem, inicia-se a contagem de 30 impulsos. Então, são aplicados impulsos com uma variação de 3%, abaixo ou acima do último valor de tensão aplicado, de acordo com a existência de descarga ou não, respectivamente.

Os resultados dos ensaios com impulsos de manobra, com variação do tempo de frente na polaridade positiva e negativa, encontram-se resumidos na Tabela 3. Neste ensaio, manteve-se constante o tempo de cauda com  $2500 \mu\text{s}$  e variou-se o tempo de frente de 78 a  $290 \mu\text{s}$ . A razão entre a suportabilidade para a polaridade negativa e positiva, também está descrita na Tabela 3, observando-se que a tensão  $U_{50\%}$  medida para os tempos de frente de  $140 \mu\text{s}$  a  $290 \mu\text{s}$ , está na faixa de 89% a 98%, maior para a polaridade negativa. A Figura 4 apresenta os gráficos  $U_{50\%} \times T_p$  para as duas polaridades.

Tabela 3. Valores de  $U_{50\%}$  em função do tempo de frente ( $T_p$ ).

$T_p$ [ $\mu$ s]	$U_{50\%}$ [kV]		Razão
	Polaridade Positiva	Polaridade negativa	
78	2015	3246	1,61
140	1837	3613	1,97
210	1829	3529	1,93
250	1816	3595	1,98
290	1883	3560	1,89

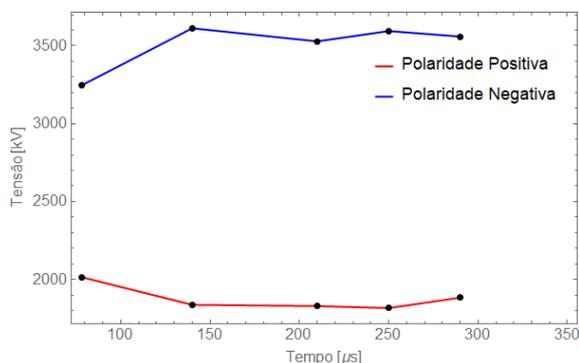


Figura 4. Gráfico  $U_{50\%}$  x  $T_p$  - Polaridade Positiva e Negativa.

Kuffel et al. (2000) apresentam que o fato da suportabilidade para a polaridade negativa ser maior do que para positiva se deve ao processo de formação de cargas pelo *gap* durante a disrupção elétrica, em campos não uniformes. Considera-se que o ar é composto por moléculas que ficam em movimento contínuo e aleatório, no qual ocorrem colisões. Os elétrons livres, ao longo da cadeia de isoladores, se aproximam da extremidade com campo elétrico mais intenso, ganhando velocidade através das colisões, podendo resultar em um processo de ionização do ar, criando um meio apropriado para desencadear o processo de avalanche de elétrons e disrupção.

Na polaridade positiva, os elétrons são atraídos para a região de campo elétrico alto com maior facilidade. Assim, inicia-se a ionização, formando as avalanches de elétrons e deixando para trás a carga positiva presente no espaço. Essa carga causará uma distorção na distribuição de campo original. Com o tempo, a região do campo elétrico se desloca, avançando no processo de ionização, formando outras avalanches e intensificando ainda mais o campo para o surgimento do *streamer*, até que alcance o eletrodo oposto.

Na polaridade negativa, os elétrons são repelidos para a região de campo elétrico mais baixo e acabam ficando presos nas moléculas de ar livres. Dessa forma, ocorre uma distorção diferente do campo, com os elétrons tendendo a prender a carga positiva que permanece no espaço, reduzindo a região de ionização ao longo do *gap* e retardando o processo para a disrupção, tornando a construção do canal ionizado mais trabalhosa. Para superar essa dificuldade no processo de ionização, é necessária uma tensão mais alta.

#### 4.2 Impulso Atmosférico

Também foram realizados ensaios com a aplicação de impulsos atmosféricos (forma de onda com  $1,2 \mu$ s de tempo

de frente e  $50 \mu$ s de tempo cauda, apresentada em Cagido (2019) e Figura 5), com a finalidade de avaliar se os parâmetros e expressões analíticas, citados nas Tabelas 1 e 2, são adequadas para representar a suportabilidade da cadeia de isoladores estudada.

Na Tabela 4, são apresentados os valores medidos na forma de onda utilizada no ajuste do ensaio de impulso atmosférico. Na Tabela 5, está a descrição de resistores e capacitores utilizados para a obtenção desta forma de onda e na Tabela 6, estão as condições ambientais registradas durante o ajuste e realização do ensaio.

Tabela 4. Medições feitas no ensaio de ajuste do método *Up and Down*.

Polaridade Positiva			
Tensão/estágio	Tensão medida	$T_p$	$T_2$
79,4 kV	1968 kV	$3,87 \mu$ s	$54,76 \mu$ s

Devido às dimensões do laboratório, as tensões de operação próximas ao limite do gerador, indutâncias próprias do circuito e alta capacitância da cadeia de isoladores, o tempo de frente obtido no ajuste foi de  $3,87 \mu$ s, condizente com os parâmetros típicos das primeiras descargas de retorno, vistos em Schroeder (2001).

Tabela 5. Parâmetros aplicados no circuito de ensaio.

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

Através do método *Up and Down*, encontrou-se a tensão  $U_{50\%}$  igual a 3976 kV para a cadeia, que indica uma tensão de aproximadamente 100 kV para cada isolador.

Tabela 6. Medição das condições atmosféricas.

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

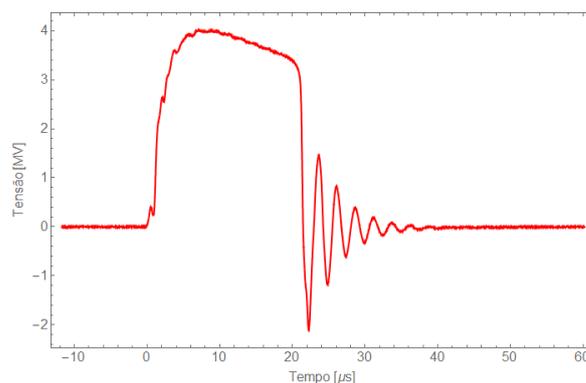


Figura 5. Oscilograma de tensão de impulso atmosférico.

#### 4.3 Comparações entre os resultados

Com a aplicação de impulsos atmosféricos, foi possível obter experimentalmente os valores de  $T_s$  e  $T_L$ , com base na Figura 5, além da tensão  $U_{50\%}$ . Isso permitiu uma comparação desses tempos com os calculados a partir das

informações descritas nas Tabelas 1 e 2, que consideram diferentes *gaps* e impulsos positivos. Uma síntese de todos os valores obtidos para  $T_s$  e  $T_L$ , é mostrada na Tabela 7.

Os resultados dos tempos na ordem de  $10^{-8}$  s ou menores, obtidos por meio de cálculos numéricos do programa computacional *Mathematica*, foram considerados como zero. Nota-se que as equações de Shindo and Suzuki (1985) e Motoyama (1996) apresentaram os resultados para  $T_s$  e  $T_L$  mais próximos dos experimentais. Na Figura 6, estão representados os gráficos da velocidade do *leader*, conforme as equações descritas na Tabela 2. O eixo vertical está na escala logarítmica para que todos os gráficos possam ser visualizados juntos. Como este trabalho considera os tempos até o momento de ruptura, os gráficos de  $v_L$  são apresentados até  $t_b$ . Em algumas expressões, o parâmetro  $k_0$  não foi utilizado, pois não faz parte da equação de  $v_L$ .

Tabela 7. Comparação entre resultados obtidos a partir das Tabelas 1, 2 e experimentais.

	$T_s$ [ $\mu$ s]	$T_L$ [ $\mu$ s]
Wagner and Hileman (1961)	26,00	0
Suzuki and Miyake (1977)	2,48	0
Shindo and Suzuki (1985)	2,33	-
Shindo and Suzuki (1985)	5,27	-
Pigini et al. (1989)	2,96	0
Motoyama (1996)	0	11,65
Wang et al. (2014)	0	3,26
Wang et al. (2014)	0	1,69
Experimental (este trabalho)	6,94	14,37

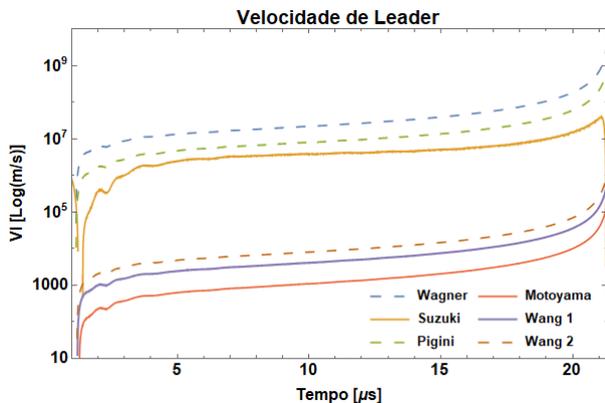


Figura 6. Gráficos das velocidades do *leader* obtidos a partir da Tabela 2.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal foco a pesquisa sobre a suportabilidade de uma cadeia de isoladores do laboratório de Ultra Alta Tensão do Cepel e a análise dos resultados experimentais, por meio do LPM, com utilização das formulações para diferentes tipos de *gaps* e polaridades. O diferencial deste trabalho concentra-se na construção de um *gap* longo com uma cadeia de isoladores de 7,8 m em uma torre de corrente contínua de 800 kV e avaliação das suas características dielétricas, pois existem poucas referências para *gaps* com isoladores e maiores que 5 m.

A realização dos ensaios com impulsos de manobra permitiu investigar o comportamento das curvas obtidas em UAT de forma prática, além de auxiliar na obtenção de

conhecimento na área tecnológica e elaboração dos ajustes necessários para os ensaios laboratoriais com impulsos atmosféricos, que foram feitos posteriormente. Através da Tabela 3 é possível visualizar que a suportabilidade para polaridade negativa é maior que para a positiva.

Os ensaios com impulsos atmosféricos possibilitaram a comparação entre  $T_s$  e  $T_L$  calculados e experimentais. Considerando que os resultados publicados até os dias atuais, referentes ao modelo LPM, são inconclusivos para uma cadeia de isoladores em níveis de ultra alta tensão, este trabalho mostra que as equações de Shindo and Suzuki (1985) e Motoyama (1996) apresentaram os valores mais próximos dos medidos experimentalmente para  $T_s$  e  $T_L$ .

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Cepel pela oportunidade de realizar as pesquisas desenvolvidas neste trabalho, à COPPE, ao professor Antonio Carlos Siqueira de Lima pelas significativas contribuições e conhecimentos compartilhados, à toda equipe do Cepel, aos meus familiares e amigos pelo incentivo.

## REFERÊNCIAS

- M. C. Cagido. *Caracterização de Cadeia de Isoladores de Ultra Alta Tensão para Torres de Transmissão de Corrente Contínua*. Rio de Janeiro, 2019. Dissertação de conclusão de mestrado em Engenharia Elétrica, realizado na COPPE / UFRJ.
- Cigré. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. (63), 1991.
- E. Kuffel, W.S. Zaengl, and J. Kuffel. *High Voltage Engineering Fundamentals*. Newnes, 2000.
- H. Motoyama. Experimental study and analysis of breakdown characteristics of long air gaps with short tail lightning impulses. *Transactions on Power Delivery*, 11(2):972–979, 1996.
- A. Pigini, G. Rizzi, and E. Garbagnati. Performance of large air gaps under lightning overvoltages: Experimental study and analysis of accuracy of predetermination methods. *Transactions on Power Delivery*, 4(2):1379–1392, 1989.
- M. A. O. Schroeder. *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 - PPGE, UFMG.
- T. Shindo and T. Suzuki. A new calculation method of breakdown voltage-time characteristics of long air gaps. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(6):1556–1563, June 1985.
- T. Suzuki and K. Miyake. Experimental study of breakdown voltage-time characteristics of large air gaps with lightning impulses. *Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-96(1):227–233, 1977.
- C. F. Wagner and A. R. Hileman. Mechanism of breakdown of laboratory gaps. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III Power Apparatus and Systems*, 80:604–618, 1961.
- X. Wang, Z. Yu, and J. He. Breakdown process experiments of 110 - to - 500 kv insulator strings under short tail lightning impulse. *Transactions on Power Delivery*, 29(5):2394–2401, 2014.