

**Felipe Schiavon Inocência de Sousa**

**Sensor de picos de correntes impulsivas  
com tecnologia dos eletretos**

**São Carlos**

**2019**



**Felipe Schiavon Inocência de Sousa**

# **Sensor de picos de correntes impulsivas com tecnologia dos eletretos**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim

**Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graquação de Engenharia Elétrica.**

**São Carlos**

**2019**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues  
Fontes da EESC/USP

S725s                    Sousa, Felipe Schiavon Inocência de  
                              Sensor de picos de correntes impulsivas com tecnologia  
                              dos eletretos / Felipe Schiavon Inocência de Sousa;  
                              orientador Ruy Alberto Corrêa Altafim. -- São Carlos, 2019.

                              Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em  
                              Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas  
                              Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São Carlos  
                              da Universidade de São Paulo, 2019.

                              1. Transdutor de corrente. 2. Bobina de Rogowski.  
                              3. Estruturas elevadas. 4. Pico de corrente.  
                              5. Corrente impulsiva. 6. Eletretos. 7. Aquisição de  
                              sinais. I. Título.

Elaborado por Elena Luzia Palloni Gonçalves – CRB 8/4464

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FELIPE SCHIAVON INOCENCIO DE SOUSA.**

Título da tese: "Sensor de picos de correntes impulsivas com tecnologia dos eletretos".

Data da defesa: 07/11/2019

### Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Ruy Alberto Corrêa Altafim**  
**(Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Alexandre Piantini**  
(Instituto de Energia e Ambiente/IEE-USP)

Prof. Dr. **Daniel Thomazini**  
(Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI)

Prof. Dr. **Mardson Freitas de Amorim**  
(Universidade Federal da Paraíba/UFPB)

Prof. Associado **Rogério Andrade Flauzino**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

### Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:  
Prof. Titular **Ivan Nunes da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**



# Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família: Meu pai Francisco Inocencio de Sousa, que sempre me ensinou o valor do trabalho e o poder do caráter. Minha mãe: Rita de Cássia Schiavon Inocencio de Sousa, que sempre me ensinou a importância das pessoas que temos ao nosso lado e a valorizar nossas escolhas e nossas conquistas. Minha irmã: Marcela Schiavon Inocencio de Sousa, a quem estarei sempre ao lado dando todo o apoio em sua jornada ao meu lado ao longo da vida.

Dedico este trabalho especialmente à minha tia: Marcia Elena Schiavon Barbosa (in memoriam), que me ensinou o poder do amor ao próximo e de como devemos sempre sorrir e valorizar cada instante de nossas vidas. Levarei suas lembranças comigo por onde quer que eu esteja.



# Agradecimentos

Ao Professor Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim pela orientação ao longo desta tese.

À Rio Grande Energia (RGE), subsidiária do Grupo CPFL, pelo financiamento, auxílio e provimento de recursos e locações para instalação dos equipamentos.

Ao Laboratório de Alta Tensão do Instituto de Energia e Eletrotécnica (IEE) da Universidade de São Paulo.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Ao Grupo de Alta Tensão e Medidas (GATM), professores e colegas de trabalho: Doutor Ruy Alberto Pisani Altafim, Doutor Daniel Augusto Pagi Ferreira, Doutor Yuri Andrey Olivato Assagra, Doutora Thamyres Tâmula Cavalcante Palitó, Eng. Melkezedekue Moraes de Alcântara Calabrese Moreira e Eng. Jéssica Fernandes Alves.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos Rui Bertho e César Domingues.

Um agradecimento especial à Doutora Daniela Terenzi, por todo apoio ao longo da pós-graduação.



# Resumo

SOUSA, F. S. I. **Sensor de picos de correntes impulsivas com tecnologia dos eletretos**. 2019. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Este trabalho descreve um novo sistema para a medição de correntes provenientes de descargas atmosféricas que atingem estruturas elevadas. O sistema compreende: um conjunto de aquisição de sinais baseado na bobina de Rogowski, que transforma o sinal de corrente da descarga atmosférica em uma tensão; um cabo coaxial que transmite o sinal de tensão gerado pela bobina para a base da torre e um sistema baseado na tecnologia dos eletretos (STE). O STE consiste em um gerador de alta tensão DC, que pelo princípio da superposição, carrega o sensor de eletreto junto a tensão impulsiva proveniente da bobina. O STE também possui um circuito que divide a tensão da bobina a fim de promover um carregamento seletivo das diversas regiões do eletreto. Através da aferição das regiões carregadas, é possível correlacionar o nível de tensão gerado pela bobina com o valor de corrente que atingiu o captor de raios. O STE, por utilizar componentes robustos e passivos, além de um processo de preparação do eletreto a frio, mostra-se apropriado tanto para instalação em campo, quanto para instalação em diversos pontos de medição. As características do dispositivo permitem uma medição dos principais parâmetros de descargas atmosféricas em uma ampla faixa de correntes e frequências, permitindo medições de amplitude de corrente da ordem de 100 kA.

Palavras chave: Transdutor de corrente. Bobina de Rogowski. Estruturas elevadas. Pico de corrente. Corrente impulsiva. Eletretos. Aquisição de sinais.



# Abstract

SOUSA, F. S. I. **Peak impulse current sensor with electret technology**. 2019. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

The present describes a new system for measuring currents deriving from atmospheric discharges on tall structures. The system comprises a signal acquisition transducer based on the Rogowski coil, which converts the current signal from lightning into a voltage signal. A coaxial cable transmits the signal generated by the coil down to the tower base, which is measured by an electret-based system. The acquisition system comprises a high voltage DC generator, which charges the electret sensor by superimposing the high voltage to the impulsive signal from the coil. The internal circuitry divides the voltage from the coil in order to charge only selected areas of the electret. By the assessment of the different charged regions, it is possible to correlate the measured voltage from the coil to the impulse current from the striking lightning. Due to its robustness, low-cost characteristics and cold preparation process of the electret sample, the system is suitable for installation in the field and in several distinct measuring points. Its characteristics allow the measurement of the main parameters of atmospheric discharges, with current amplitudes up to 100 kA.

Keywords: Current transducer. Rogowski coil. Tall structures. Peak current. Impulsive current. Electrets. Signal acquisition.



# Lista de Figuras

Figura 1 Modelo de formação de processo de avalanche em gases.....	23
Figura 2 Tensão de <i>breakdown</i> para eletrodos esfera-plano e gap entre esferas.....	25
Figura 3 Efeito de distorção de campo para gap entre esferas com diferentes diâmetros.....	26
Figura 4 Tensão de ruptura do ar em função da frequência para diferentes espaçamentos.....	27
Figura 5 Tensão de ruptura do ar para diferentes polaridades para eletrodos do tipo ponta-plano.....	28
Figura 6 Tensão de ruptura para eletrodo esfera-plano e tensão impulsiva.....	29
Figura 7 Tensão em UHF de 150 MHz e tensão DC.....	30
Figura 8 Etapas típicas do processo de formação de descargas atmosféricas.....	31
Figura 9 Perfil de forma de onda de descargas positivas: a) descendentes e b) ascendentes.....	32
Figura 10 Frequência cumulativa de ocorrência de amplitudes de corrente para primeiros <i>return strokes</i> .....	33
Figura 11 Formas de onda de intensidade de fluxo magnético e amplitude de corrente.....	34
Figura 12 Frequência cumulativa de taxa de variação de corrente.....	35
Figura 13 Influência da altura e da distância na densidade de fluxo magnético.....	36
Figura 14 Influência da altura para um mesmo <i>return stroke</i> medido na <i>Ostankino Tower</i> .....	36
Figura 15 Rede de transmissão utilizada para medição de descargas atmosféricas.....	38
Figura 16 Medida de pico de tensão em amostrador digital interrompida.....	39
Figura 17 Modelo em circuitos elétricos do divisor capacitivo.....	41
Figura 18 Parte de alta e baixa tensão do divisor capacitivo.....	42
Figura 19 Padrões formados por figuras de Lichtenberg.....	43
Figura 20 Sensor de corrente por retenção magnética.....	44
Figura 21 Gráfico de calibração do sensor.....	45
Figura 22 Esquemático de montagem do sistema de medição por fita magnética.....	46
Figura 23 Sinal de referência e sinal apagado na fita magnética.....	47
Figura 24 Bobina de Rogowski de formato toroidal.....	47
Figura 25 Processo de inversão de polaridade.....	50
Figura 26 Modelo de band gap e armadilhas eletrônicas.....	51
Figura 27 Tipos de cargas aprisionadas em eletretos.....	51

Figura 28 Corrente de descarga de cera de carnaúba para diferentes valores de temperatura.....	52
Figura 29 Corrente de carregamento para diferentes valores de temperatura .....	53
Figura 30 Trípode corona proposto por Gross e Moreno .....	54
Figura 31 Aplicação de tensão impulsiva sobre amostra de Teflon FEP .....	55
Figura 32 Potencial na superfície do eletreto formado com tensões impulsivas .....	56
Figura 33 Termogramas de Teflon FEP metalizado .....	57
Figura 34 Sinal LIPP para teflon FEP.....	58
Figura 35 Sensor de pico de tensões impulsivas baseado na tecnologia dos eletretos .....	59
Figura 36 Curva de calibração do sensor EPVD .....	59
Figura 37 Amostra carregada com eletrodo esférico .....	60
Figura 38 Disposição dos eletrodos e revelação do eletreto .....	60
Figura 39 Torre de telecomunicação em Santo Ângelo-RS.....	61
Figura 40 Torre de telecomunicação com o sistema instalado .....	62
Figura 41 Conjunto transdutor de descargas atmosféricas .....	62
Figura 42 Formas de onda de tensão obtidas com a bobina de Rogowski .....	63
Figura 43 Fonte de alta tensão contínua utilizada nos ensaios .....	64
Figura 44 a) amostras de Teflon FEP fixadas ao bastidor b) eletrodo inferior.....	64
Figura 45 Amostras em lavadora ultrassônica .....	65
Figura 46 Amostras em superfície metálica aquecidas em estufa .....	65
Figura 47 Esquemático eletrodo superior .....	66
Figura 48 Eletrodos superiores da placa de fenolite numerados.....	67
Figura 49 Montagem do eletrodo superior com o circuito eletrônico instalado .....	67
Figura 50 Circuito interno do eletrodo superior e circuito do gerador de alta tensão corrente contínua.....	68
Figura 51 Sistema de revelação dos padrões geométricos.....	69
Figura 52 Circuito gerador de impulsos e divisor capacitivo .....	70
Figura 53 Divisor capacitivo utilizado em ensaios .....	71
Figura 54 Gráficos de forma de onda para a tensão mínima no nó 1 .....	72
Figura 55 Resultado da revelação com um círculo para uma tensão $V_{imp}$ de -101 V .....	72
Figura 56 Resultados das revelações subsequentes: a) 2 círculos, b) 3 círculos, c) 4 círculos, d) 5 círculos, e) 6 círculos e f) 7 círculos .....	73

Figura 57 Correlação entre tensão impulsiva e número de círculos .....	74
Figura 58 Correlação entre número de círculos e corrente .....	74
Figura 59 Maleta plástica e eletrodo superior .....	76
Figura 60 Circuito gerador de alta tensão contínua .....	76
Figura 61 Bastidor de alumínio e amostra de Teflon FEP .....	76
Figura 62 Montagem do bastidor de alumínio com a amostra fixada.....	77
Figura 63 Amostra revelada com tensão impulsiva de 200 V de pico.....	77
Figura 64 Sistema de alimentação e <i>backup</i> .....	78
Figura 65 Sistema de aquisição de picos de correntes impulsivas a ser instalado em campo .....	78



# Sumário

1.	Introdução .....	21
2.	Revisão bibliográfica .....	23
2.1.	Processo de breakdown em gases.....	23
2.1.1.	Influência da polaridade e da geometria dos eletrodos.....	24
2.1.2.	Influência da frequência.....	26
2.2.	Processo de formação de descargas atmosféricas.....	30
2.2.1.	Intensidade, formas de onda de corrente e polaridade de descargas atmosféricas	31
2.2.2.	Campos magnéticos e efeitos de distância e altura.....	33
2.3.	Medição de descargas atmosféricas em estruturas elevadas .....	37
2.4.	Técnicas de medição de descargas atmosféricas.....	39
2.4.1.	Medidor com <i>gap</i> entre esferas.....	40
2.4.2.	Divisor Capacitivo .....	40
2.4.3.	Figuras de Lichtenberg .....	43
2.4.4.	Medição por links magnéticos .....	44
2.4.5.	Medição por fita magnética .....	45
2.4.6.	Bobina de Rogowski.....	47
2.5.	Eletretos.....	48
2.5.1.	Histórico e ensaios preliminares .....	48
2.5.2.	Processo térmico de formação de eletretos.....	51
2.5.3.	Processo isotérmico de formação de eletretos .....	53
2.5.4.	Métodos de medição de cargas em eletretos.....	56
2.5.5.	Medição de descargas atmosféricas com eletretos.....	58
3.	Materiais e métodos .....	61
3.1.	Sistema transdutor .....	61
3.2.	Sistema de medição com eletretos .....	63
3.2.1.	Eletrodo inferior e amostras de Teflon FEP .....	64

3.2.2.	Eletrodo superior.....	66
3.2.3.	Circuito eletrônico interno e lógica de operação .....	67
3.2.4.	Subsistema de revelação das amostras.....	69
3.2.5.	Ensaaios .....	70
4.	Resultados .....	72
4.1.	Discussões .....	75
4.2.	Instalação em campo e unidade de energia de <i>backup</i> .....	75
5.	Conclusões .....	79
	Referências.....	81

## 1. Introdução

Descargas atmosféricas ocorrem naturalmente em terrenos ou estruturas elevadas, afetando principalmente sistemas elétricos, de telecomunicações, estações de rádio e TV ou mesmo instalações residências próximas. A compreensão do fenômeno tem avançado de forma bastante expressiva nas últimas décadas, principalmente pelo advento de novos métodos de leitura e gravação dos dados, osciloscópios digitais e pelo aprimoramento dos transdutores utilizados, bem como o surgimento de novas técnicas de transdução. Entretanto, muitos são os fatores que devem ser levados em conta na aferição de tais fenômenos, a citar: custos com a instalação e robustez do mecanismo de medição, o tipo de estrutura próxima ao local de instalação do sensor e a região onde se pretende realizar a mensuração.

Neste aspecto, ao longo das últimas décadas, há um número crescente de estruturas como torres metálicas, destinadas à instalação de radiotransmissores, localizadas principalmente em regiões remotas e elevadas, e que devido à estas características são privilegiadas para o estudo dos raios e seus efeitos. Há ainda que se considerar os aspectos financeiros envolvidos, uma vez que o custo dos equipamentos de medição não pode tornar sua utilização proibitiva, bem como seu funcionamento deve levar em consideração as elevadas correntes, campos magnéticos, além das intempéries como umidade e degradação dos materiais por radiação solar.

Neste âmbito, um grande avanço foi realizado pelo trabalho de Altafim, Giacometti e Janiszewski (1992a), que primeiro destacaram o uso dos eletretos na medição de tensões impulsivas provenientes de descargas atmosféricas. Posteriormente, com o avanço de técnicas de transdução de corrente, e com novas formas de carregamento e revelação de eletretos, diferentes sistemas de medição puderam ser desenvolvidos. Neste âmbito, sensores de tensões e correntes provenientes de descargas atmosféricas robustos e de baixo custo puderam ser utilizados para detecção dos principais parâmetros referentes ao fenômeno.

Este trabalho compreende o projeto de um sensor de correntes provenientes de raios operando na faixa até 100 kA, que permite uma leitura precisa através da correlação do sinal de tensão gerado por uma bobina de Rogowski, instalada próximo ao captor de uma antena de telecomunicações. O sinal proporcional de tensão da bobina é transmitido via cabo coaxial até a base da torre, onde o sistema sensor permanece alocado. Agregando-se a tecnologia dos eletretos, um sensor robusto e de componentes passivos, que permita a aferição das medições em campo é instalado na base da torre, permitindo um fácil acesso aos dados para aferição.

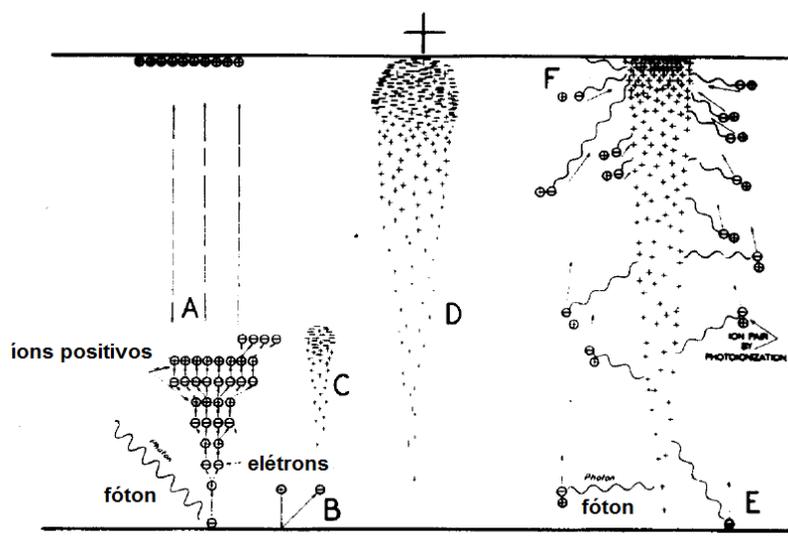
Com o objetivo de apresentar uma melhor compreensão do fenômeno a ser medido, uma extensa revisão bibliográfica apresenta as principais características do processo de formação de descargas atmosféricas e de breakdown em gases. Métodos de medição de descargas atmosféricas, desenvolvidos ao longo de décadas, são apresentados. Posteriormente, o processo de formação de eletretos com tensões impulsivas, bem como métodos de carregamento e descarga de eletretos é apresentado. O sistema de medição de correntes impulsivas baseado na tecnologia dos eletretos é apresentado, enfatizando o circuito desenvolvido e o princípio de carregamento das amostras utilizadas. Finalmente, os resultados de ensaios com tensões impulsivas são apresentados.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. Processo de breakdown em gases

Muito do conhecimento adquirido contemporaneamente sobre descargas atmosféricas começou com o estudo de descargas elétricas em gases. Loeb (1948) discorre sobre o processo de avalanche de elétrons sobre o gás que permeia eletrodos com uma diferença de potencial aplicada. Na Figura 1, na legenda de A à D, pode-se ver os eletrodos planos paralelos. Um elétron é liberado do catodo devido à radiação ou partícula acelerada e atravessa o meio, liberando assim mais partículas negativas em seu caminho até que se choquem com o anodo. Tal processo incorre na formação de um *streamer*, que se projeta de um eletrodo a outro transferindo grande quantidade de elétrons. Os elétrons acelerados deixam uma nuvem de partículas positivas que são aceleradas em direção ao catodo promovendo grande distorção do campo elétrico ao longo do canal. Ao se chocarem com o anodo, novas partículas são liberadas em direção ao catodo (legenda E e F), recomecendo o processo. Meek (1942) propõe que as partículas positivas atraem novas partículas negativas para o interior do canal, o que inicia o processo de *breakdown* e grande transferência de elétrons.

Figura 1 Modelo de formação de processo de avalanche em gases



Fonte: Adaptado de Loeb (1948).

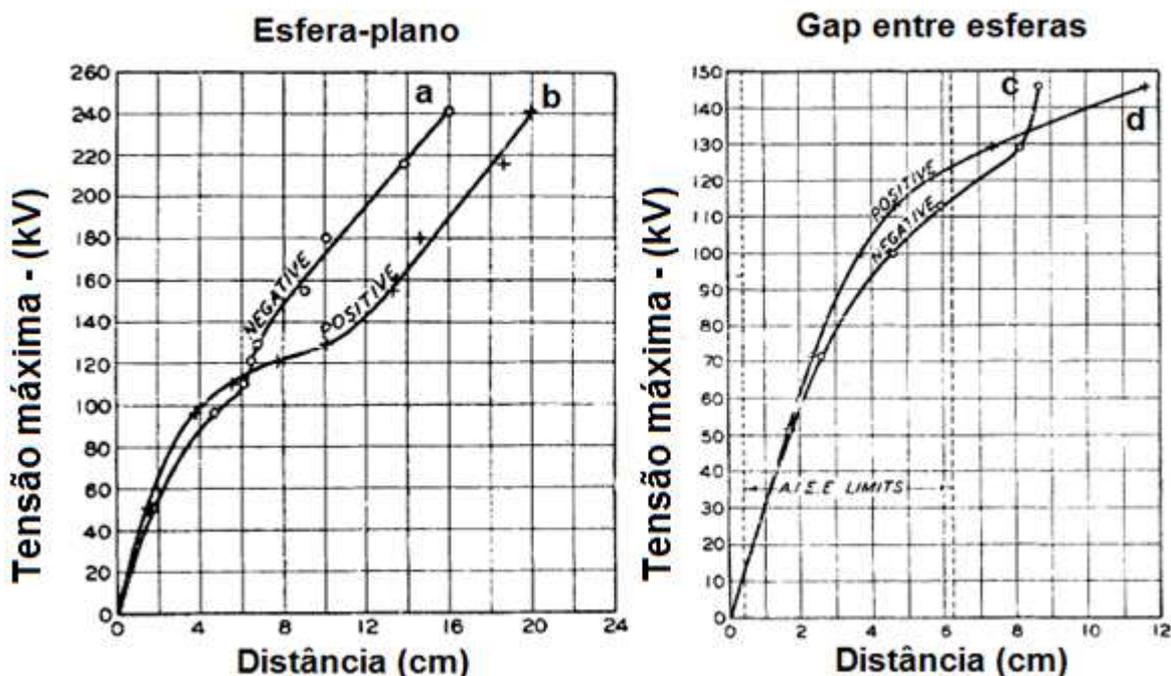
Muitos são os fatores que influenciam tanto o processo de *breakdown* quanto a determinação da tensão mínima para ruptura. De acordo com Meek (1942), experimentos realizados por Townsend a partir da medição da corrente de descargas elétricas em gases permitiram a seguinte formulação:

$$i = i_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (1)$$

Em que  $i_0$  é a corrente inicial,  $d$  é a distância do gap,  $\alpha$  representa o número de íons gerados por unidade de comprimento e  $\gamma$  a quantidade de elétrons criados no catodo por qualquer outro mecanismo. Portanto a corrente, ou a quantidade de carga transferida por unidade de tempo, ao longo do processo depende intrinsecamente da distância dos eletrodos e consequentemente da quantidade de íons disponíveis. Entretanto, vale ressaltar que esta fórmula é válida para eletrodos planos paralelos sob um campo elétrico externo contínuo. Vários são os fatores que influenciam na formação de uma descarga em gases, tais como: a forma de onda de tensão aplicada, a frequência da tensão aplicada, a presença ou não de radiação eletromagnética, pressão e tipo do gás ao redor dos eletrodos, temperatura do gás, e o formato dos eletrodos.

### 2.1.1. Influência da polaridade e da geometria dos eletrodos

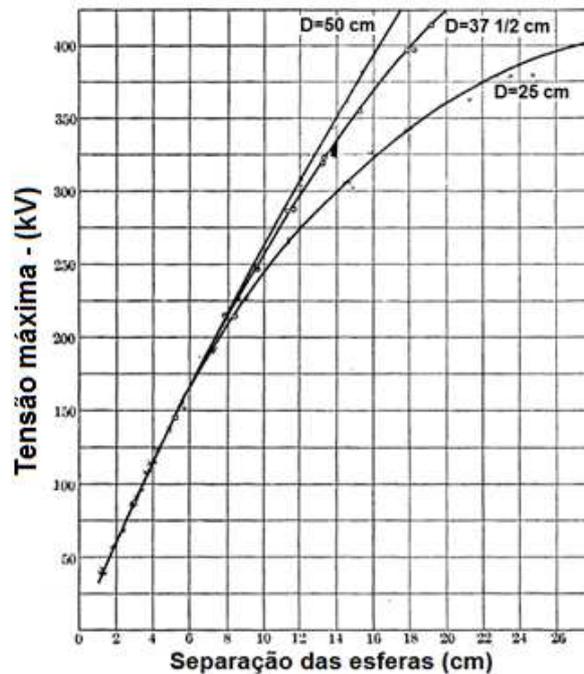
A polaridade da tensão aplicada influi principalmente na forma como o processo de avalanche eletrônica se inicia, tendo consequências diretas sobre o valor da tensão de ruptura. McMillan e Starr (1931) realizaram ensaios tanto com tensões alternadas em 60 Hz quanto com tensões impulsivas em eletrodos esféricos de diâmetros de 2,54 cm, 6,25 cm e 25 cm de diâmetro tanto na configuração esfera-plano quanto com *gap* entre esferas. Na Figura 2 pode-se notar que para o experimento com esferas de 6,25 cm, tanto na configuração esfera-plano (curvas **a** e **b**) quanto na configuração gap entre esferas (curvas **c** e **d**), a polaridade tem efeito sobre o valor máximo de tensão entre o dielétrico. Segundo McMillan e Starr (1931), quando operando com polaridade negativa, os elétrons são acelerados em direção ao anodo, e parte dos elétrons são recombinados com os íons positivos presentes no dielétrico. Desta forma, é necessária uma maior tensão aplicada para que haja ruptura. Na polaridade reversa, uma grande quantidade de elétrons é atraída para o eletrodo esférico, ionizando o dielétrico com partículas positivamente carregadas porém de mobilidade mais reduzida. Essa nuvem de partículas positivas ao redor do eletrodo estende gradualmente o potencial positivo até o catodo, e quando atinge o valor crítico, ocorre a descarga.

Figura 2 Tensão de *breakdown* para eletrodos esfera-plano e gap entre esferas

Fonte: Adaptado de McMillan e Starr (1931).

Os eletrodos apresentam ainda influência nos resultados obtidos. Pode-se notar que para a mesma distância entre os eletrodos, tanto para polaridades positivas quanto para negativas, o eletrodo de gap entre esferas requer valores de tensão ligeiramente maiores. Isso se deve a uma maior densidade de fluxo elétrico no eletrodo esférico em relação ao eletrodo plano, o que intensifica o processo de ionização e conseqüentemente reduz a tensão mínima de ruptura. Chubbs e Fortescue (1913) realizaram ensaios com o medidor de tensão por *gap* entre esferas, com valor de diâmetro dos eletrodos esféricos de 25 cm, 37,5 cm e 50 cm em corrente alternada. Na Figura 3 pode-se notar que o efeito de distorção de campo torna-se mais proeminente para eletrodos com curvatura mais acentuada, enquanto que eletrodos maiores possuem maior efeito de equalização de campo.

Figura 3 Efeito de distorção de campo para gap entre esferas com diferentes diâmetros

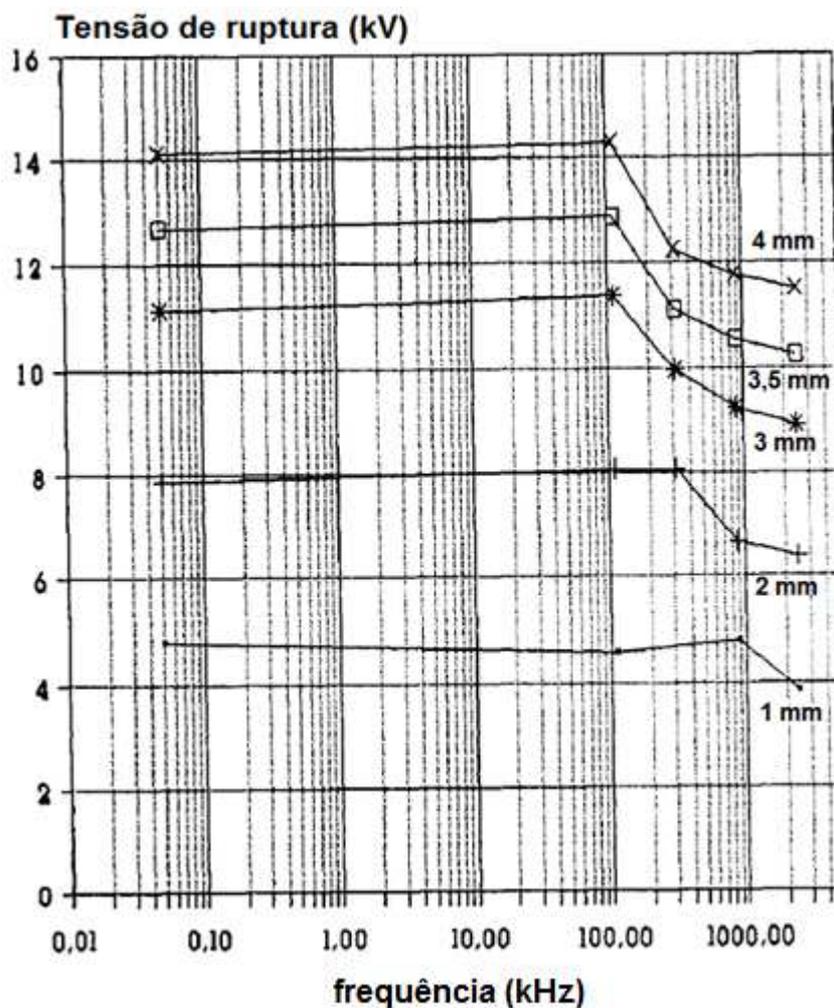


Fonte: Adaptado de Chubbs e Fortescue (1913).

### 2.1.2. Influência da frequência

Devido ao fato de ser um meio dielétrico, ar e outros gases podem estar sujeitos à influência da frequência do sinal de tensão aplicado. No experimento de Chubbs e Fortescue (1913), não se notou grande diferença do valor máximo de tensão de ruptura uma vez que os testes foram realizados em um intervalo de 25 Hz até 60 Hz. De acordo com Seward (1939), em frequências baixas as cargas formadas ao longo do processo de avalanche no dielétrico possuem um tempo de recombinação suficientemente grande quando da inversão de polaridade pela onda senoidal. Isso se deve pelo período da onda ser suficientemente grande para que ocorra a mobilidade dos íons de um eletrodo a outro. Entretanto, com o aumento da frequência, o tempo de recombinação diminui devido à diminuição do período da onda senoidal, e uma descarga se inicia do eletrodo em direção aos íons no dielétrico, iniciando assim o processo de ruptura. Não obstante, a tensão de ruptura para altas frequências é inferior àquela de baixas frequências ou corrente contínua. Pfeiffer (1991) mostra a tensão de *breakdown* para o ar para diferentes frequências e distancias dos eletrodos, considerando-se eletrodos com campo homogêneo, nota-se na Figura 4 que a frequência crítica dá-se entre 100 kHz e 1000 kHz.

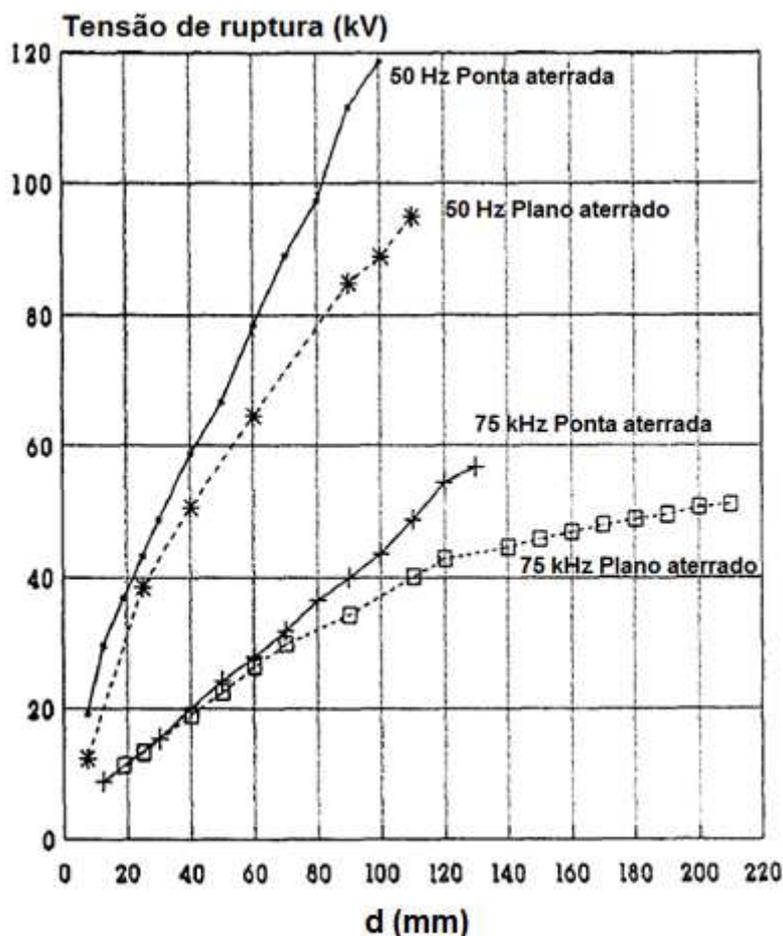
Figura 4 Tensão de ruptura do ar em função da frequência para diferentes espaçamentos



Fonte: Adaptado de Pfeiffer (1991).

Ainda de acordo com Pfeiffer (1991), a influência da frequência é mais notada quando o campo elétrico é inhomogêneo, como no caso de eletrodos ponta-plano. A Figura 5 relaciona, para diferentes frequências, a tensão de ruptura para eletrodos ponta-plano com diferentes polaridades e diferentes distâncias dos eletrodos.

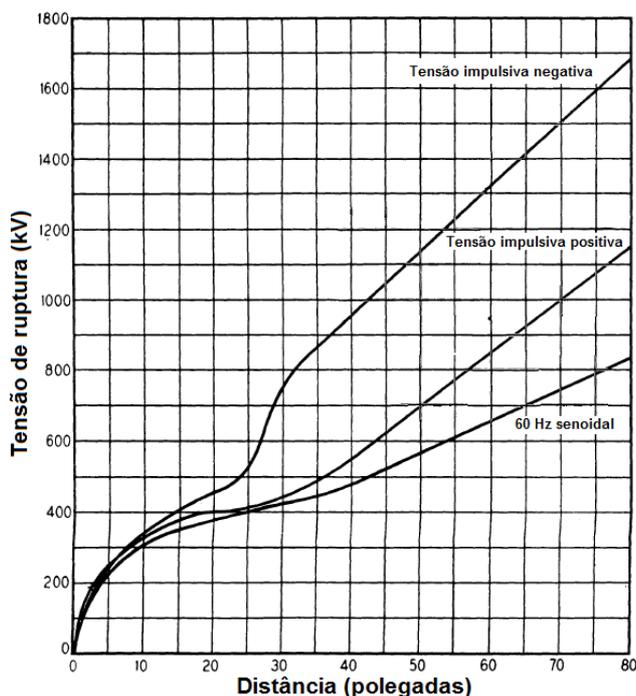
Figura 5 Tensão de ruptura do ar para diferentes polaridades para eletrodos do tipo ponta-plano



Fonte: Adaptado de Pfeiffer (1991).

O trabalho de Bellaschi e Teague (1935) sumariza os efeitos do tipo de eletrodo, polaridade e forma de onda do sinal de tensão. Utilizando-se um gerador com tensões até 2 MV, os autores realizaram ensaios com forma de onda impulsiva de 1,5 – 40 microssegundos e tensões senoidais em 60 Hz para eletrodos do tipo esfera-plano com esfera de 25 cm de diâmetro. A Figura 6 ilustra a tensão de ruptura para tensões impulsivas em relação à tensão senoidal de 60 Hz. O autor ainda realizou experimentos para eletrodos do tipo ponta-plano com tensões senoidais e impulsivas.

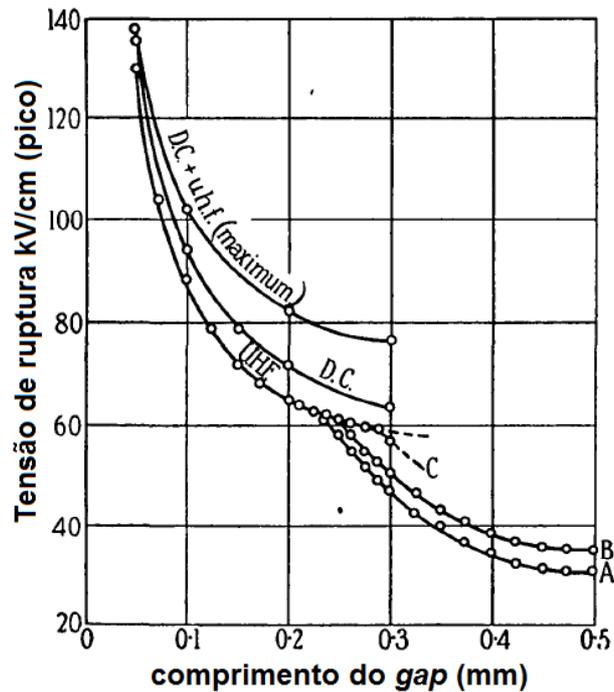
Figura 6 Tensão de ruptura para eletrodo esfera-plano e tensão impulsiva



Fonte: Adaptado de Bellaschi e Teague (1935).

Diversos outros trabalhos correlacionam a influência da frequência no processo de formação de descargas elétricas em gases. Pim (1949) realizou experimentos em frequências ultra altas (UHF), no intervalo de 100 MHz até 300 MHz, muito superior ao apresentado por Pfeiffer (1991). Com o aumento da distância entre os eletrodos, a tensão de ruptura tende a aumentar até um valor crítico, que satura e posteriormente volta a se elevar (de forma similar ao apresentado por Pfeiffer). Entretanto um experimento que desperta atenção é a adição de uma tensão DC à tensão UHF. Segundo Pim (1949), para uma tensão alternada de 150 MHz, a elevação da tensão DC não surtira efeito até que se atingisse um valor crítico, como descrito na Figura 7. Como resultado, a elevação do valor DC após o valor de tensão UHF alcançar o valor crítico descrito anteriormente tem, como efeito prático equivalente, reduzir o valor do gap para a tensão UHF, elevando assim a tensão de ruptura suportável. No gráfico da Figura 7, a curva **A** representa a tensão de ruptura para a frequência de 150 MHz somente, a curva **B** a tensão de ruptura para a frequência de 150 MHz mais tensão DC de 1 kV e a curva **C** a tensão de ruptura de para a frequência de 150 MHz mais tensão de 2 kV DC.

Figura 7 Tensão em UHF de 150 MHz e tensão DC



Fonte: Adaptado de Pim (1949).

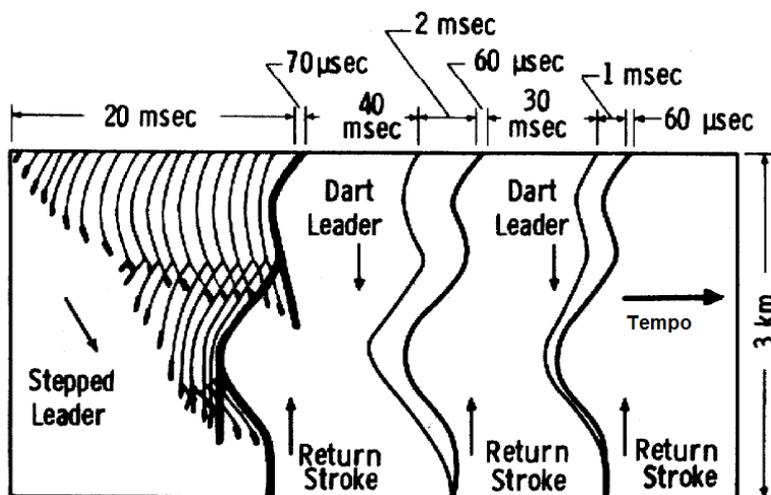
## 2.2. Processo de formação de descargas atmosféricas

Com a utilização de câmeras de grande velocidade durante tempestades, estudos foram realizados por Schonland (1938), identificando os principais aspectos do processo de formação dos raios. O fenômeno se inicia quando há um campo elétrico elevado o suficiente para romper a rigidez dielétrica do campo local. Entretanto, não somente este fator, como também água, poeira, cristais de gelo e mesmo radiação eletromagnética podem induzir a formação do canal inicial da descarga atmosférica. Como sumarizado por Uman e Krider (1982), descargas atmosféricas são compostas principalmente por: descarga preliminar, *stepped-leader*, processo de ligação, *return stroke*, *dart leader* e processo de corrente contínua. Suas características estão relacionadas com a quantidade de carga deslocada, a direção da corrente (se da nuvem para o solo e vice-versa) e influem na forma de onda, campos elétricos e magnéticos e intensidade de correntes durante os raios.

O *stepped-leader* se origina quando um campo elétrico suficientemente forte inicia um movimento descendente de cargas negativas que momentaneamente se extingue pela recombinação com partículas do ar. Cargas continuam seu movimento da nuvem ao solo reiniciando o processo e avançando através do meio até que ocorra o processo de ligação ao solo e formação do canal. Devido as elevadas temperaturas e grande quantidade de partículas ionizadas, o canal se sustenta e cargas são transferidas do solo para a nuvem em um processo

conhecido como *return stroke*. O *dart leader* consiste em nova transferência de cargas da nuvem para o solo em um processo contínuo até que o canal seja extinto. A Figura 8 ilustra os diferentes processos e o tempo médio de duração para cada um deles.

Figura 8 Etapas típicas do processo de formação de descargas atmosféricas



Fonte: Adaptado de Uman e Krider (1982).

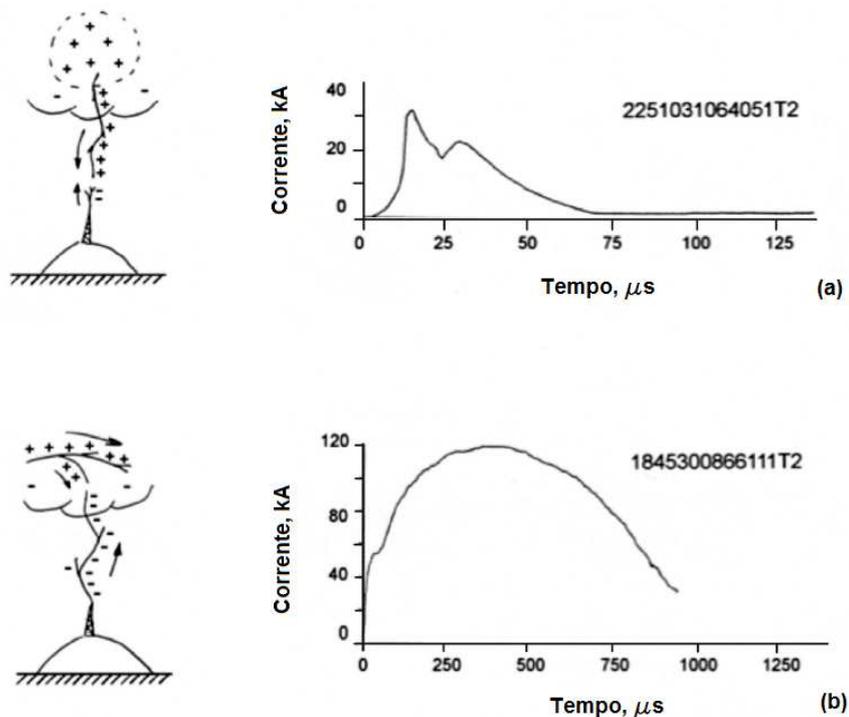
Embora uma descarga atmosférica possa durar, em média, até 2,5 segundos, o momento em que há o maior pico de corrente se dá nos primeiros *return strokes*, em que correntes impulsivas da ordem de 35 kA podem ser observadas, podendo alcançar valores superiores a 100 kA, sucedidas por *return strokes* com picos de correntes menores (HEIDLER et al., 2008). Uma grande quantidade de carga é liberada em um processo conhecido como corrente contínua, em que correntes de amplitude inferior àquela dos *return strokes*, da ordem de 100 A, mas com um tempo de duração da ordem de 100 milissegundos (HEIDLER et al., 2008).

### 2.2.1. Intensidade, formas de onda de corrente e polaridade de descargas atmosféricas

Descargas atmosféricas podem ser de polaridade positiva, negativa e bipolares. O que evidencia a diferença é se a descarga é descendente (nuvem em direção ao solo) ou ascendente (solo em direção à nuvem). Descargas atmosféricas negativas transferem cargas negativas para o solo e descargas positivas transferem o mesmo tipo de carga para a nuvem (HEIDLER et al., 2008). A frequência com que cada tipo de descarga ocorre também é determinada pelo tipo de terreno e estrutura. De acordo com os dados obtidos por Berger (1967) no topo do monte San Salvatore, terrenos elevados como montanhas, bem como estruturas elevadas tendem a ter maior frequência de descargas ascendentes negativas. De acordo com Rakov et al. (2013), os dados ilustrados na Figura 9 a) mostram a forma de onda de descargas positivas descendentes,

enquanto a Figura 9 b) o perfil de descarga positiva ascendente. A primeira possui frente de onda mais abrupta e cauda com decaimento quase exponencial, enquanto a segunda apresenta formato côncavo e regular. Ainda de acordo com os autores, objetos elevados (algumas centenas de metros), bem como terrenos elevados possuem maior probabilidade de ocorrência de descargas atmosféricas ascendentes.

Figura 9 Perfil de forma de onda de descargas positivas: a) descendentes e b) ascendentes

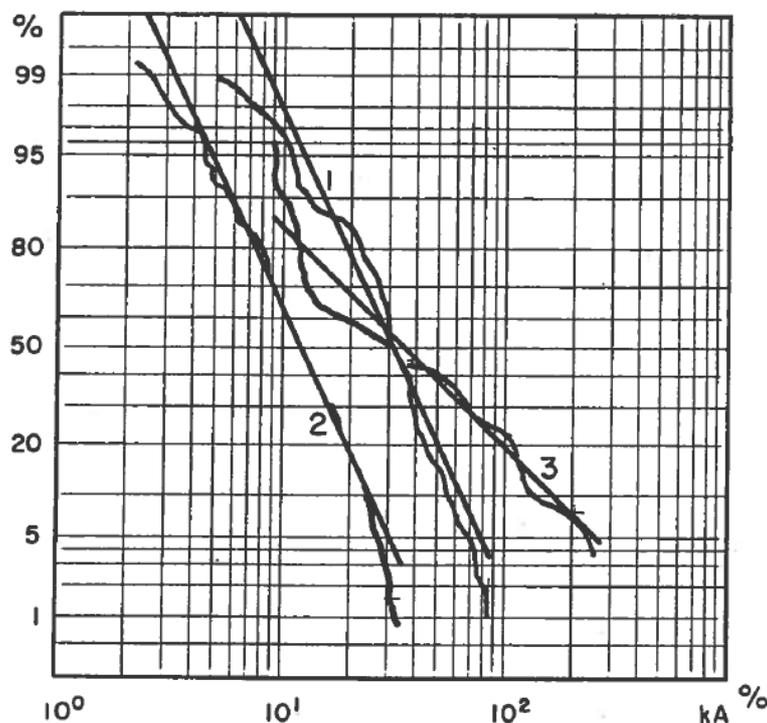


Fonte: Adaptado de Rakov et al. (2013).

Descargas atmosféricas positivas registraram as maiores amplitudes para correntes, da ordem de 300 kA. De acordo com Rakov et al. (2013), os autores determinam como mediana para primeiros *return strokes* negativos valores de amplitude de 30 kA, em medições diretas realizadas na Suíça, Itália, África do Sul e Japão. No Brasil, os valores são relativos a *return strokes* negativos, como destacado no trabalho de Visacro et al. (2010), para medições realizadas no topo do Morro do Cachimbo no período de 1985 a 2010. Segundo Rakov et al. (2013), a média de amplitude de corrente para o Brasil é de 45 kA para primeiros *return strokes* e 18 kA para subsequentes para medições em torre instrumentada localizada no Morro do Cachimbo. De acordo com a Figura 10 baseada nos estudos de Berger, Anderson e Kroninger (1975), pode-se notar que os primeiros *return strokes* negativos (curva 1) apresentam maior amplitude de corrente em relação aos subsequentes (curva 2), assim como os *return strokes* positivos (curva 3) podem apresentar amplitudes muito maiores em um intervalo de frequência

de ocorrência significativo. Ainda de acordo com Berger, Anderson e Kroninger (1975) e Rakov et al. (2013) descargas atmosféricas positivas não apresentam *return strokes* subsequentes.

Figura 10 Frequência cumulativa de ocorrência de amplitudes de corrente para primeiros *return strokes*



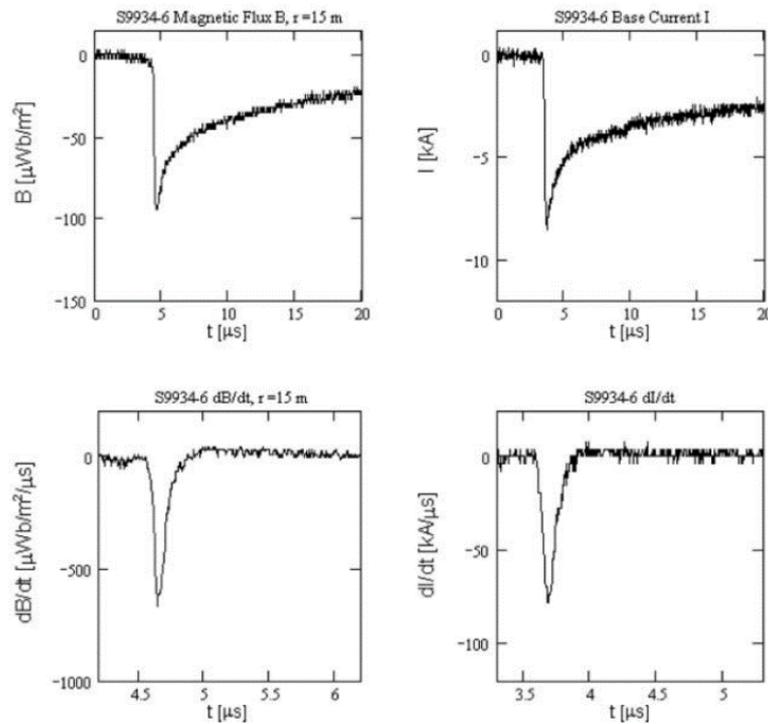
Fonte: Adaptado de Berger, Anderson e Kroninger (1975).

### 2.2.2. Campos magnéticos e efeitos de distância e altura

Entender os campos elétricos e magnéticos advindos das descargas atmosféricas é de fundamental importância para a caracterização e modelagem do fenômeno. Os primeiros estudos a correlacionar a amplitude da corrente com a intensidade de campo magnético foram realizados por Foust e Henderson (1935) utilizando a técnica de links magnéticos. Posteriormente, avanços na tecnologia dos foguetes permitiu a criação de uma técnica denominada *triggered lightning*. Esta técnica consiste em lançar sobre as nuvens de tempestade foguetes conectados por meio de finos fios metálicos ao solo. Antenas e medidores de corrente dispostos próximos ao ponto de impacto dos raios realizam a medição e enviam os dados para um osciloscópio. Lin et al. (1979) e Rakov (2001a) apresentam gráficos dos campos elétricos e magnéticos tanto para primeiro *return strokes* quanto para *return strokes* subsequentes utilizando sensores dispostos a 10, 15, 50 e 200 km de distância. Uman et al. (2002) realizaram experimentos com a técnica de *triggered lightning* com sensores de campos elétrico e magnético a 15 m de distância do ponto de impacto. Os dados obtidos para densidade de fluxo

magnético são exibidos na Figura 11. Deve-se destacar a semelhança entre as formas de onda de corrente  $I$  e a densidade de fluxo magnético  $B$ . Isso evidencia a correlação direta entre ambas as grandezas, sendo de fundamental importância para o entendimento dos diversos métodos de medição de descargas atmosféricas a serem descritos posteriormente.

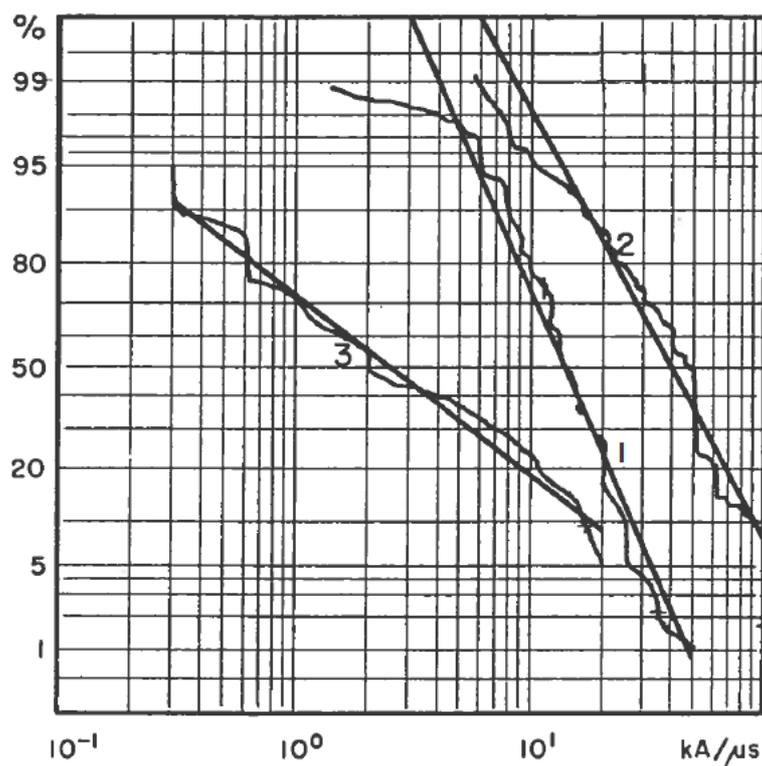
Figura 11 Formas de onda de intensidade de fluxo magnético e amplitude de corrente



Fonte: Uman et al. (2002).

A Figura 12 ilustra a frequência cumulativa de ocorrência da taxa de variação de corrente pelo tempo ( $di/dt$ ). A curva 1 ilustra os dados para primeiros *return strokes* negativos, a curva 2 para *return strokes* negativos subsequentes e a curva 3 para impulsos positivos. Os dados apresentados revelam que *return strokes* subsequentes, embora apresentem amplitudes de corrente menores, apresentam taxa de variação de corrente maiores, o que revela um comportamento abrupto do início da forma de onda. Por sua característica suave, a taxa de variação de corrente para descargas atmosféricas positivas é substancialmente menor.

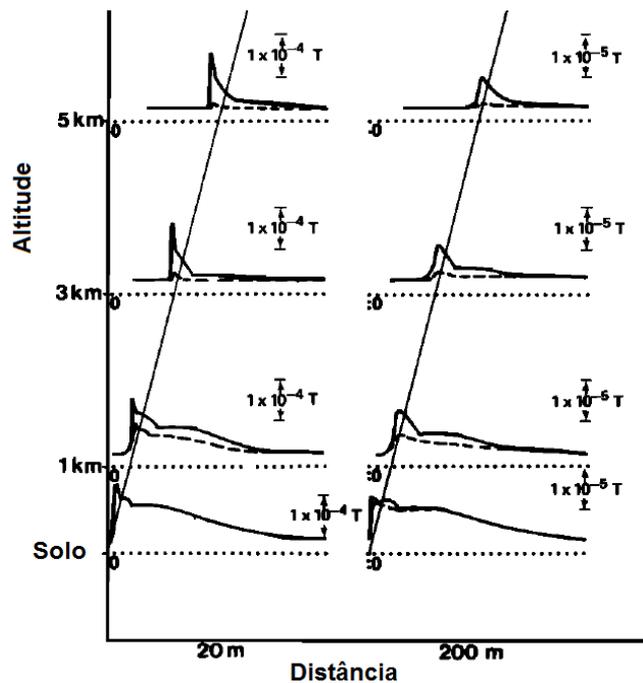
Figura 12 Frequência cumulativa de taxa de variação de corrente



Fonte: Adaptado de Berger, Anderson e Kroninger (1975).

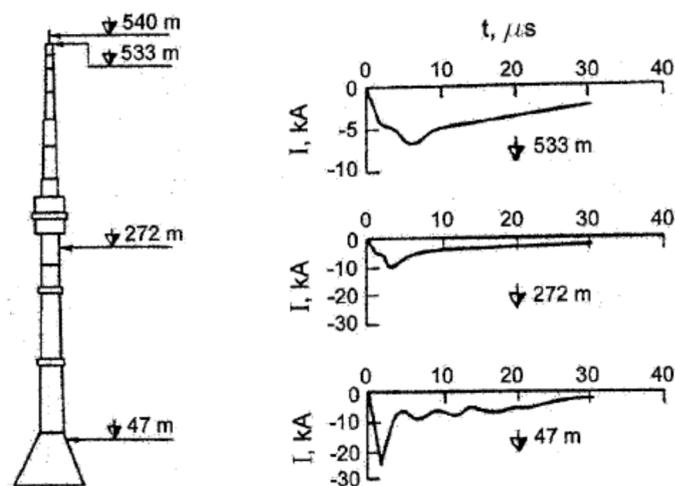
A partir dos dados obtidos com medições de campos elétricos e magnéticos, Master et al. (1981) desenvolveram um modelo matemático para determinação dos mesmos. Tal modelo permite prever a intensidade de fluxo magnético como função da altura entre solo e nuvem e da distância do sistema de sensoriamento do ponto de impacto. A Figura 13 ilustra o campo magnético calculado utilizando-se dois modelos matemáticos diferentes. A linha sólida representa o modelo original proposto pelo autor, enquanto que a linha tracejada leva em consideração efeitos da altura na corrente da descarga. Pode-se notar uma pouca distorção dos campos magnéticos gerados com a distância do ponto de impacto, embora a altura exerça maior influência. Portanto, o posicionamento do sensor e a elevação, tanto da estrutura utilizada para medição quanto do sistema de medição em si, influem diretamente nos valores mensurados de corrente.

Figura 13 Influência da altura e da distância na densidade de fluxo magnético



Fonte: Adaptado de Master et al. (1981).

Da mesma forma, o efeito da altura pode também ser visualizado no trabalho de Rakov (2001b), conforme ilustrado na Figura 14, em medições realizadas na *Ostankino Tower* em Moscou. Para um mesmo *return stroke*, proveniente de uma descarga ascendente negativa, diferentes formas de onda são obtidas em diferentes alturas da torre. Tal diferença se deve principalmente à efeitos de reflexão da corrente ao longo do condutor até o solo.

Figura 14 Influência da altura para um mesmo *return stroke* medido na *Ostankino Tower*

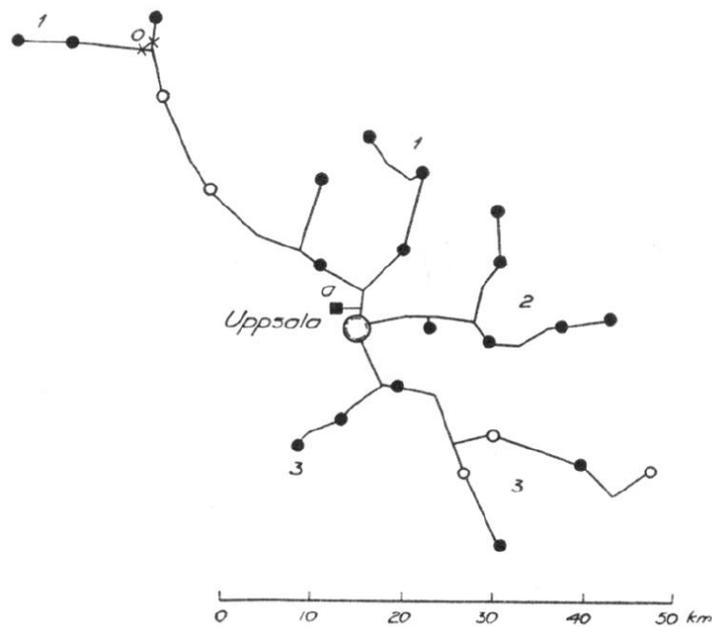
Fonte: Adaptado de Rakov (2001b).

### **2.3. Medição de descargas atmosféricas em estruturas elevadas**

Localidades como topos de montanhas, edifícios, torres de rádio e TV e linhas de transmissão são privilegiados para o estudo de tais fenômenos, uma vez que apresentam maior proximidade com as nuvens de tempestades (reduzindo, portanto, a camada de ar entre solo e nuvem), além de conseguirem deslocar uma maior quantidade de cargas do solo próximo a nuvem. Como evidenciado no capítulo 2.2.2, a distância do sistema de medição ao ponto de impacto, bem como a altura, é determinante na correta mensuração, influenciando tanto na determinação da amplitude quanto da forma de onda a ser estudada. Devido as excelentes condições para monitoramento de descargas atmosféricas, de acordo com Rakov et al. (2013), estações equipadas para medição direta de fenômenos atmosféricos têm sido utilizadas na Alemanha, Áustria, Brasil, Canada e Suíça, embora tantas outras localidades ao redor do globo utilizem linhas de transmissão, torres de telecomunicações ou estações dedicadas aos estudos atmosféricos.

Norinder (1928) utilizou a estrutura de uma linha de transmissão de 20 kV em uma região com um raio de aproximadamente 30 Km próximo à cidade de Uppsala, na Suécia. A Figura 15 ilustra o sistema de transmissão da região. Para a medição, utilizou-se um osciloscópio operando com um feixe de elétrons em uma câmara a vácuo, em que o feixe era defletido pelo campo elétrico do sinal de tensão proveniente da descarga atmosférica e gravado em papel fotossensível. Segundo o autor, o sistema apresentava como principal característica a possibilidade de gravar a forma de onda de tensão, bem como o pico de tensão mensurado, compilando dados a respeito do fenômeno apresentados pelo autor em 1935 (Norinder, 1935). Entretanto, a necessidade de exposição e monitoramento contínuos e ajuste da faixa de operação do sistema constituíam algumas das dificuldades de operação do sistema. Ainda de acordo com o autor, devido a propagação da corrente da descarga atmosférica ao longo da linha de transmissão, o sinal de tensão mensurado pelo osciloscópio apresentava grande atenuação da amplitude e distorção da forma de onda.

Figura 15 Rede de transmissão utilizada para medição de descargas atmosféricas



Fonte: Adaptado de Norinder (1928).

Em 1941, Flowers (1941) alocou um resistor shunt na estrutura do edifício *Empire State Building* em Nova Iorque e o conectou a um osciloscópio e um sistema de gravação de imagens com *trigger* sincronizado com o início da descarga atmosférica. Durante o período de 1947 a 1963, Berger (1967) realizou medições com um sistema similar de medição no topo do monte San Salvatore na Suíça. O sistema foi alocado em torres construídas tanto para pesquisas e medições de fenômenos meteorológicos quanto para utilização como transmissores de rádio e TV.

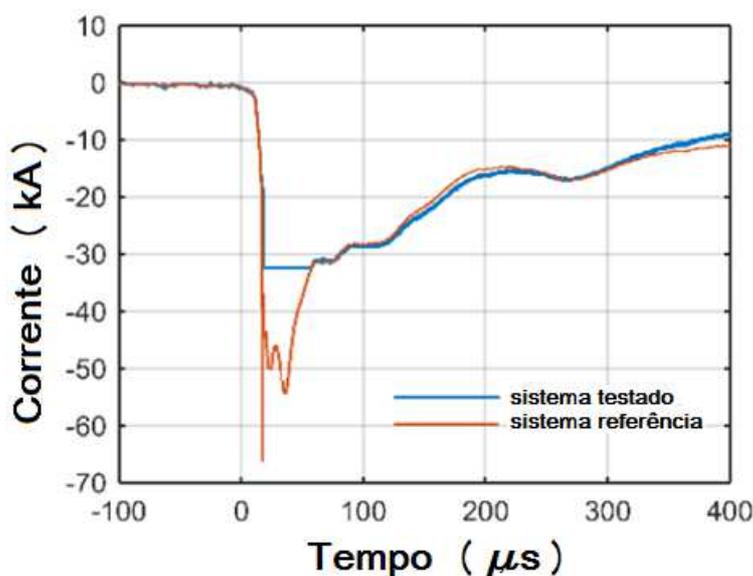
Fuchs et al. (1998) realizaram medições no topo do monte *Hoher Peissenberg* utilizando a estrutura de uma antena de telecomunicação. O sistema de medição era composto por osciloscópios digitais modernos, que podem gravar as formas de onda obtidas e bem como realizar análises de espectro de frequências. A aparelhagem ainda incluía bobinas de medição corrente, medidores de campo elétrico e câmeras de alta resolução e alta velocidade.

Yao et al. (2011, 2013) utilizaram torres de transmissão de energia elétrica para instalação de bobinas de Rogowski. O sistema consiste de uma bobina de Rogowski blindada, cabo de conexão da bobina ao solo e um sistema eletrônico de medição próximo ao pé da torre protegido por uma caixa metálica. O sistema reduz o nível de tensão da bobina à um valor seguro de operação e digitaliza a forma de onda de tensão para posterior análise. De modo análogo, na China, Gao et al. (2015) utilizaram um sistema de monitoramento óptico-magnético no topo da torre de monitoração meteorológica de Shenzhen.

De forma análoga, Domingues et al. (2017) utilizaram transdutores baseados na bobina de Rogowski para adquirir sinais de tensão, proporcionais ao pico de corrente da descarga atmosférica, por meio de amostradores digitais e microcontroladores. Recentemente, Araújo e Visacro (2018) integraram um sistema de medição por bobina de Rogowski, alocado em torre localizada no Morro do Cachimbo, com sistemas digitais de processamento e envio de dados conectado à rede internet. O sistema permite não somente a detecção, como também a comunicação da estação de medição com aplicativos conectados à rede para download de dados.

Entretanto, tanto os trabalhos de Yao et al. (2011, 2013), Domingues et al. (2017) e Araújo e Visacro (2018) apresentam a necessidade de se adequar o pico de tensão proporcional à corrente por meio de controles eletrônicos. Em alguns casos, a faixa de operação dos amostradores digitais não compreende a totalidade da faixa de operação do transdutor, o que incorre em medidas de tensão com interrupções abruptas. Este efeito pode ser visto na Figura 16, em que a forma de onda do sistema testado é interrompida no momento da medida.

Figura 16 Medida de pico de tensão em amostrador digital interrompida



Fonte: Adaptado de Araújo e Visacro (2018).

## 2.4. Técnicas de medição de descargas atmosféricas

O longo dos últimos séculos, várias foram as técnicas utilizadas para mensuração dos principais parâmetros de descargas atmosféricas. A compreensão do fenômeno parte da precisão das medições e principalmente, da interpretação dos diferentes efeitos e perturbações causados no ambiente ao redor do ponto de impacto do raio.

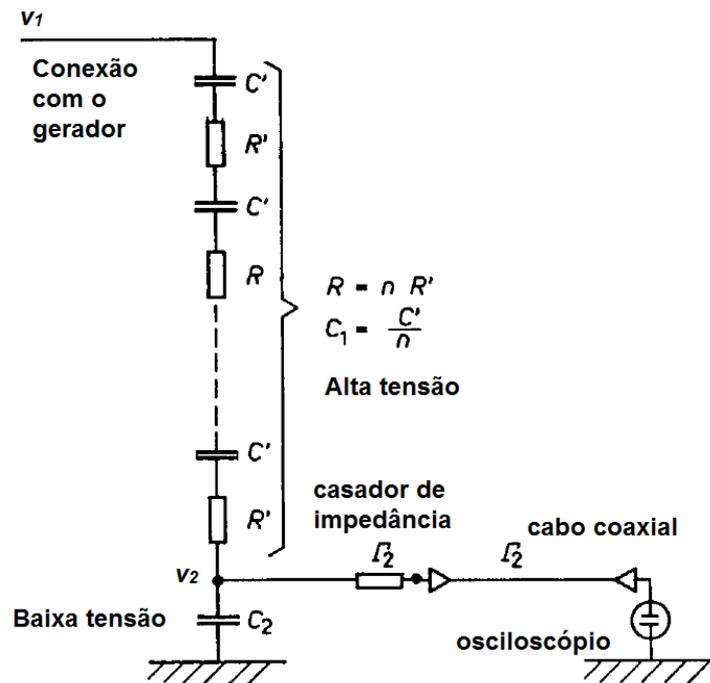
#### **2.4.1. Medidor com *gap* entre esferas**

O estudo de descargas elétricas em gases propiciou a criação de diversos instrumentos que permitiam a mensuração de tensões oriundas de raios. Uma vez caracterizado o mecanismo de formação e conseqüentemente as principais propriedades, abordados ao longo de toda a seção 2.1, tornou-se possível a construção de instrumentos baseados no princípio de operação de descargas elétricas em gases para tal finalidade. O aparelho criado por Chubbs e Fortescue (1913) consiste de centelhadores de esfera conectados a circuitos com resistores *shunt* para medição de tensão e corrente previamente calibrados. Uma corrente proporcional ao valor de tensão de ruptura do centelhador é drenada para os resistores de medição e um valor de tensão proporcional é mensurado, permitindo a correlação com valores previamente calibrados. Os autores realizaram ensaios com valores de frequência variando de 25 Hz a 60 Hz e tensões até 300 kV.

#### **2.4.2. Divisor Capacitivo**

Divisores de tensão têm sido aplicados em técnicas de medição de tensões extensivamente. A topologia relativamente simples e robusta, o baixo custo dos materiais e a facilidade de montagem e instalação justificam o uso destes transdutores tanto em laboratório quanto em campo. Divisores resistivos tem sido muito bem aplicados para a medição tanto de correntes DC quanto de tensões alternadas em 60 Hz. Entretanto, para tensões impulsivas tais como a padrão de 1,2/50  $\mu$ s (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE, 1978), o instrumento mais adequado é o divisor capacitivo. Tais dispositivos são constituídos de uma parte de alta tensão conectada à fonte geradora do sinal, e uma parte de baixa tensão, normalmente conectada a um osciloscópio ou outro instrumento de medição. Dentre as topologias utilizadas, destaca-se o uso de capacitores isolados à vácuo (SCHWAB; PAGEL, 1972) e capacitores e resistores (FESER, 1971). A Figura 17 apresenta o modelo em circuitos elétricos de um divisor capacitivo para medição de sinais impulsivos.

Figura 17 Modelo em circuitos elétricos do divisor capacitivo



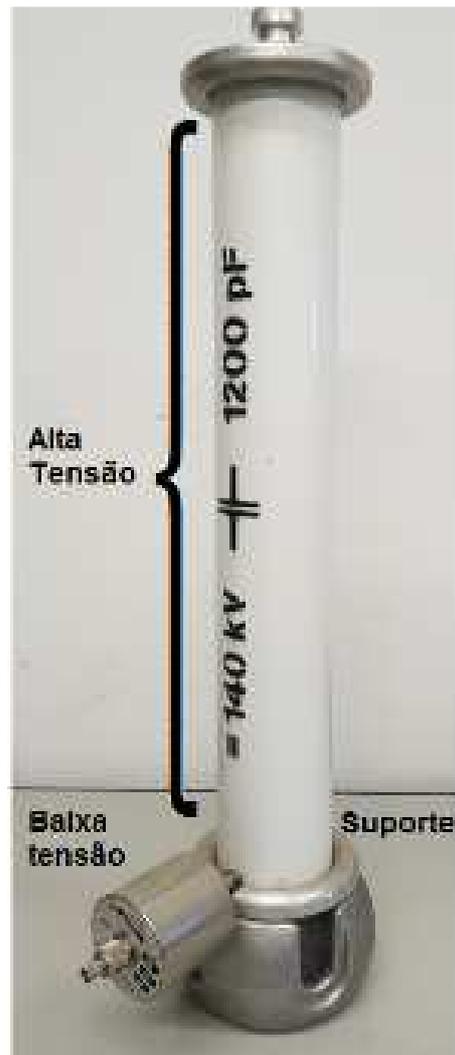
Fonte: Adaptado de Feser (1971).

A parte de alta tensão é composta por capacitores e resistores e dividem o valor de tensão do gerador. O capacitor  $C_2$  é responsável pela filtragem de valores de frequência indesejados que possam influenciar na forma de onda. Os resistores na parte de alta reduzem amplitudes de frequência que possam circular ao longo do circuito. A impedância  $\Gamma_2$  normalmente consiste de um resistor com valor de impedância igual a impedância característica do cabo coaxial. As duas impedâncias com valores iguais dividem o valor de tensão de entrada no cabo coaxial à metade, e uma vez que esta encontre a alta impedância de entrada do osciloscópio tem seu valor dobrado, sendo exibido, portanto, o valor de tensão  $v_2$  do nó de baixa tensão. Para pequenos valores de resistência  $R$ , a relação de divisão é dada por:

$$r = \frac{v_2}{v_1} = \frac{c_1}{c_1 + c_2} \quad (2)$$

Portanto, o sinal de tensão  $v_1$  é reduzido por um fator  $r$ , sendo  $v_2$  muito inferior ao valor da fonte geradora e seguro para a operação do osciloscópio. A parte de alta tensão é composta de tantos capacitores quantos necessários, em série, para dividir o valor da tensão até o valor nominal de operação de cada capacitor. A parte de baixa é composta de capacitores associados em paralelo, que constituem um filtro passa-baixa, que elimina ruídos e interferências causadas por altas frequências provenientes dos equipamentos de ensaios. A Figura 18 ilustra o divisor capacitivo.

Figura 18 Parte de alta e baixa tensão do divisor capacitivo

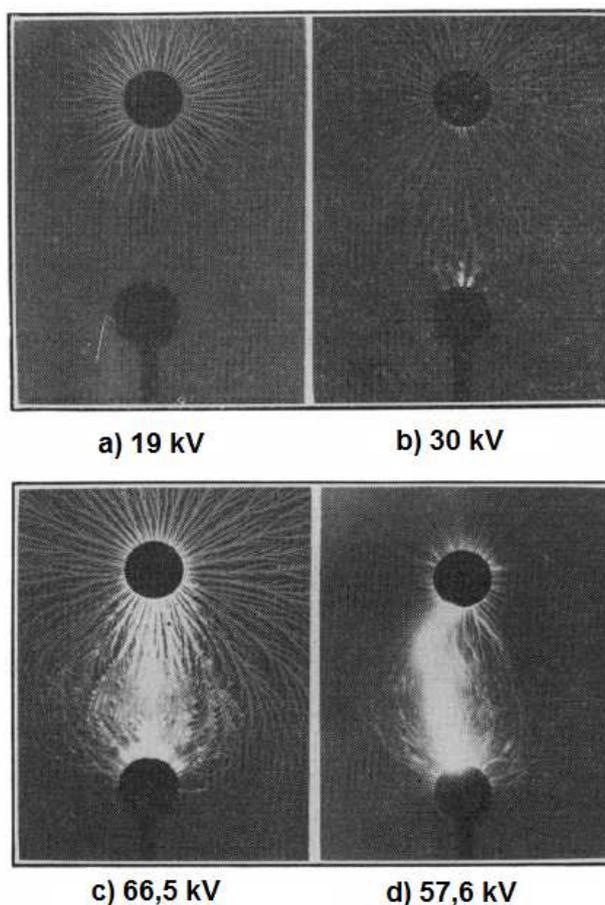


Fonte: Autor.

### 2.4.3. Figuras de Lichtenberg

O método de medição por figuras de Lichtenberg possui grande efeito prático, uma vez que possibilita a gravação de aspectos da descarga atmosférica, tais como: intensidade, polaridade e tipos de forma de onda. Para este método de gravação é utilizado um papel com emulsão fotográfica ligado ao eletrodo de alta tensão. As cargas induzidas pelo eletrodo permeiam o papel fotográfico e suas trilhas revelam figuras cujo padrão pode ser correlacionado com as principais características dos raios. O aprimoramento da técnica de medição por figuras de Lichtenberg levou à criação do instrumento conhecido por Klydonografo, apresentado por Cox e Legg (1925). McMillan e Starr (1931) utilizaram o instrumento para determinação dos efeitos de polaridade em descargas elétricas em gases. A Figura 19 ilustra os diversos padrões formados sobre o papel com emulsão fotográfica para diferentes valores de tensão impulsiva positiva obtidos por (MCMILLAN; STARR, 1931).

Figura 19 Padrões formados por figuras de Lichtenberg

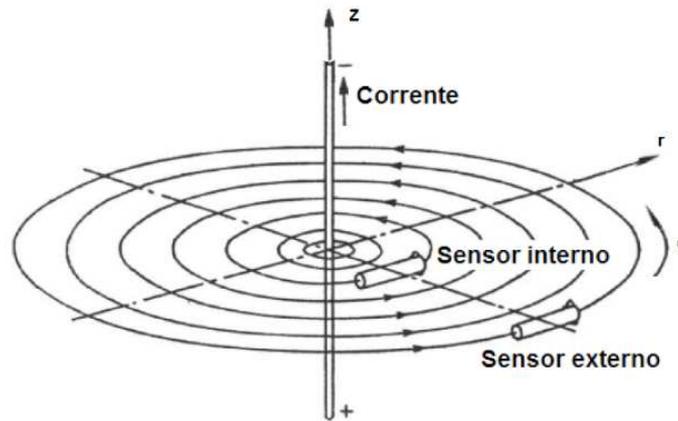


Fonte: Adaptado de Mcmillan e Starr (1931).

#### 2.4.4. Medição por links magnéticos

Foust e Henderson (1935) descrevem um sensor de correntes de descargas atmosféricas baseado no princípio da retenção magnética. Sensores de material ferromagnético são dispostos próximos a um condutor de corrente, a diferentes distancias do condutor, na orientação disposta na Figura 20.

Figura 20 Sensor de corrente por retenção magnética



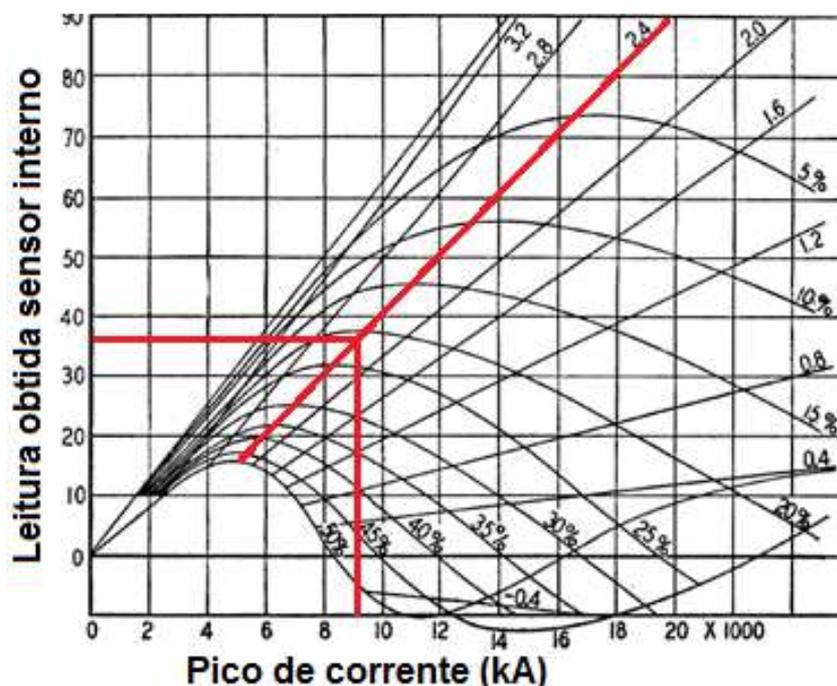
Fonte: Adaptado de Foust e Henderson (1935).

O campo magnético gerado pela corrente elétrica proveniente da descarga atmosférica sensibiliza domínios magnéticos presentes no material dos sensores (*links* magnéticos). A densidade de campo magnético na direção  $\varphi$  é dada por:

$$\frac{\mathbf{u}}{B} = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \mathbf{u}_{\varphi} \quad (3)$$

Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética no vácuo,  $i$  é a corrente elétrica e  $r$  é a distância de um ponto qualquer do espaço em relação ao condutor na direção radial. A densidade de campo magnético é diretamente proporcional à corrente e, portanto, é possível correlacionar o efeito de  $\mathbf{B}$  nos links magnéticos com a corrente  $i$ . Foust e Henderson (1935) realizaram medições com *links* dispostos a 1 polegas e 7 polegadas de distância do condutor. No gráfico da Figura 21, ao se cruzar a razão entre as medidas dos *links* interno e externo (retas no gráfico) com o valor de densidade de campo magnético do *link* interno (eixo das ordenadas), é possível determinar o valor de corrente (eixo das abscissas) bem como a proporção de oscilação (curvas). No exemplo utilizado pelo autor, a razão entre as medidas provenientes dos links é de 2,4, o que corresponde no gráfico à uma corrente de 9 kA para uma leitura no eixo das ordenadas (valor do link interno) de 36. A oscilação correspondente é de aproximadamente 22%.

Figura 21 Gráfico de calibração do sensor



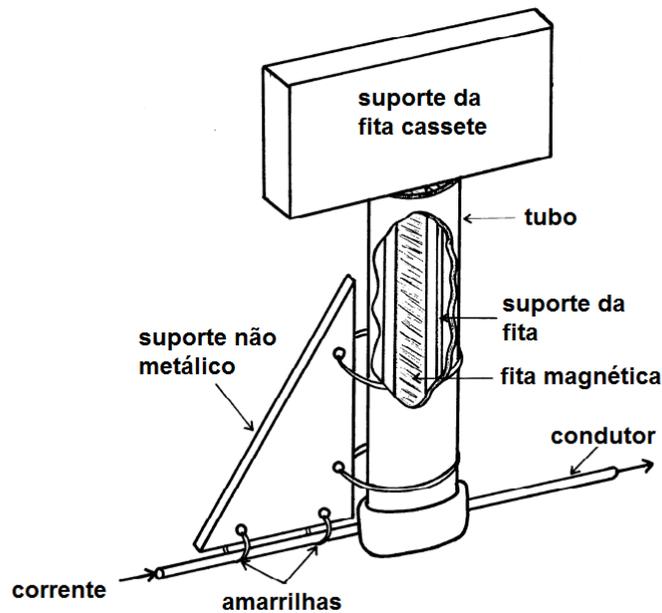
Fonte: Adaptado de Foust e Henderson (1935).

#### 2.4.5. Medição por fita magnética

O campo eletromagnético gerado pela corrente de descargas atmosféricas mostra-se bastante intenso, tendo seu efeito cobrindo uma longa distância do ponto de impacto praticamente de livre de distorções e efeitos de atenuação, conforme abordado na seção 2.2.2. O funcionamento do sistema de utilização por links magnéticos, por sua robustez e baixo custo, permitiu a criação do sistema por fita magnética por. De acordo com Crouch (1980), dentre as vantagens de tais sistema, revela-se o custo e a simplicidade.

O sistema consiste da aplicação de fitas cassete utilizadas para fins de gravação de mídias de áudio. A fita consiste de uma longa tira polimérica com material magnético depositado sobre sua superfície. Este material contem domínios magnéticos que se alinham à um campo magnético externo, e mantem sua direção de alinhamento com o campo depois que este é extinto, podendo assim gravar um sinal proporcional à intensidade do campo. No caso do sensor proposto por Crouch (1980), a fita magnética é previamente gravada utilizando-se um gravador de áudio na frequência de 400 Hz. Esse sinal é tido como referência para o sinal que será medido pelo sistema. A fita magnética é disposta próxima à fonte de campo magnético gerado pelo raio, na direção radial a este, conforme ilustrado na Figura 22, em configuração semelhante àquela dos links magnéticos.

Figura 22 Esquemático de montagem do sistema de medição por fita magnética

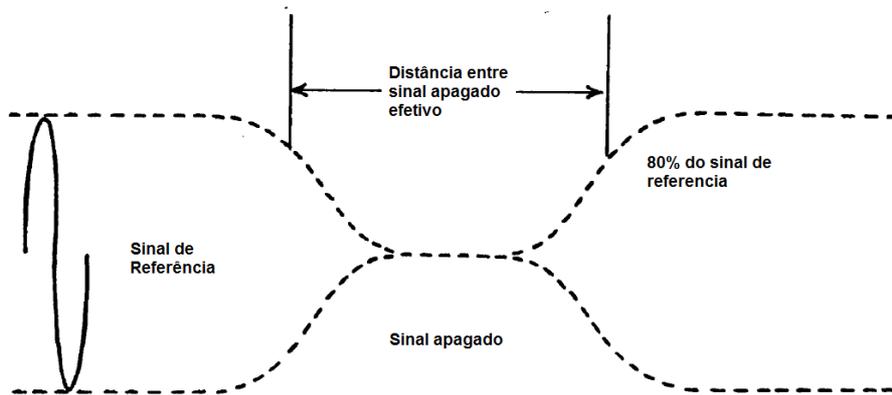


Fonte: Adaptado de Crouch (1980).

Uma vez que ocorra a descarga atmosférica, a corrente gera o campo magnético que reorganiza os domínios magnéticos sobre a fita, apagado assim o sinal de referência. Quando da revelação da fita magnética no gravador de áudio, o trecho exposto ao campo magnético apresenta um sinal sonoro diferente do sinal monotônico de 400 Hz de referência. De acordo com Crouch (1980), o sinal apagado efetivo considerado começa e termina em 80% do valor de pico do sinal de referência, conforme ilustrado na Figura 23. A aferição do sinal é feita utilizando o gravador de áudio com mensuração do comprimento do trecho apagado utilizando um relógio para contagem do tempo. A correlação entre o tempo mensurado com valores previamente calibrados revela a intensidade da corrente medida.

De acordo com o autor, apesar de sua robustez e baixo custo, o sistema pode apresentar desvantagens em sua utilização. Como exemplos, o autor cita o tempo de reação do ouvido humano na medição do sinal sonoro como fonte de erro. Derivado desta limitação, a velocidade com que a fita é revelada também constitui um problema. Além do fato de descargas atmosféricas com intensidades inferiores à 7 kA serem de difícil aferição, uma vez que a impressão efetiva do sinal da corrente sobre a fita corresponde a um intervalo de medição de tempo muito baixo, da ordem de 0,1 - 0,5 segundos. Erros referentes ao suporte da fita magnética também devem ser considerados.

Figura 23 Sinal de referência e sinal apagado na fita magnética

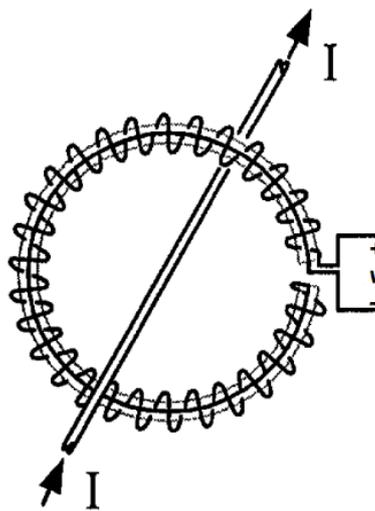


Fonte: Adaptado de Crouch (1980).

#### 2.4.6. Bobina de Rogowski

A bobina de Rogowski é um sistema transformador de corrente, normalmente com núcleo de ar, para transdução de sinais de corrente em tensão (Argueso, Robles e Sanz, 2005). Sua construção consiste em um fio enrolado em núcleo de material não ferromagnético de formato toroidal (Ray e Hewson, 2000). O campo magnético gerado pela corrente elétrica permeia o núcleo e gera nos terminais da bobina uma tensão proporcional à taxa de variação do sinal de corrente, conforme descrito pela Lei de Faraday. A Figura 24 ilustra o transdutor.

Figura 24 Bobina de Rogowski de formato toroidal



Fonte: Adaptado de Ray e Hewson (2000).

O sinal de tensão gerado pela bobina é, segundo (ARGUESO; ROBLES; SANZ, 2005), dado por:

$$v = -M \frac{di}{dt} \quad (4)$$

Em que  $M$  é a indutância mútua entre a bobina e o condutor de corrente elétrica. Como exibido na fórmula 3, o sinal de tensão da bobina é proporcional à taxa de variação da corrente e ao acoplamento magnético da bobina com o condutor de corrente. Para que haja uma correlação entre o valor de tensão e o valor de corrente, é necessário que haja uma integração do sinal. De acordo com Argueso, Robles e Sanz (2005), esta integração pode ser obtida de três formas:

- Integração matemática: realizado por meio de algoritmos matemáticos e sinais obtidos de um osciloscópio digital:
- Integração eletrônica: consiste na utilização de circuitos amplificadores operacionais para integração do sinal analógico de tensão obtido:
- Auto integração: consiste na integração do sinal de tensão por uma relação dos elementos de circuito que caracterizam o modelo da bobina.

Bobinas de Rogowski têm sido utilizadas devido ao seu baixo custo e facilidade de operação. O sinal de tensão pode ser facilmente lido e digitalizado por um osciloscópio, revelando não apenas a forma de onda do sinal, mas também permitindo a correlação do valor de tensão com o de corrente. O transdutor ainda apresenta vantagens tais como: ampla faixa de frequências de operação, isolamento galvânica com o circuito a ser testado, baixa interferência com o circuito a ser testado e baixa interferência de sinal.

## **2.5. Eletretos**

### **2.5.1. Histórico e ensaios preliminares**

Eletretos são materiais que podem reter carga elétrica de forma permanente uma vez que tenham sido expostos à um campo elétrico externo (SESSLER, 1998), ou ainda, são materiais que mantem uma polarização elétrica mesmo após o campo externo ser reduzido a zero (GROSS; DENARD, 1945). Embora as propriedades de retenção de cargas em materiais como âmbar sejam conhecidas há séculos, estudos das principais propriedades e formas de carregamento e medição da quantidade de carga em dielétricos se iniciaram em 1919 com o experimento de Eguchi (1925), que aqueceu uma mistura de cera de carnaúba e cera de abelha sobre uma base metálica entre dois eletrodos. A amostra permanecia isolada da estrutura onde fora montada e, uma tensão elétrica foi aplicada sobre os eletrodos a medida em que a amostra resfriava até atingir temperatura ambiente. Após retirado o campo elétrico, o autor notou a presença de cargas de polaridade opostas àquelas do respectivo eletrodo na superfície do disco de cera. Entretanto, este efeito mostrou-se temporário e, após algum tempo (um ou dois dias),

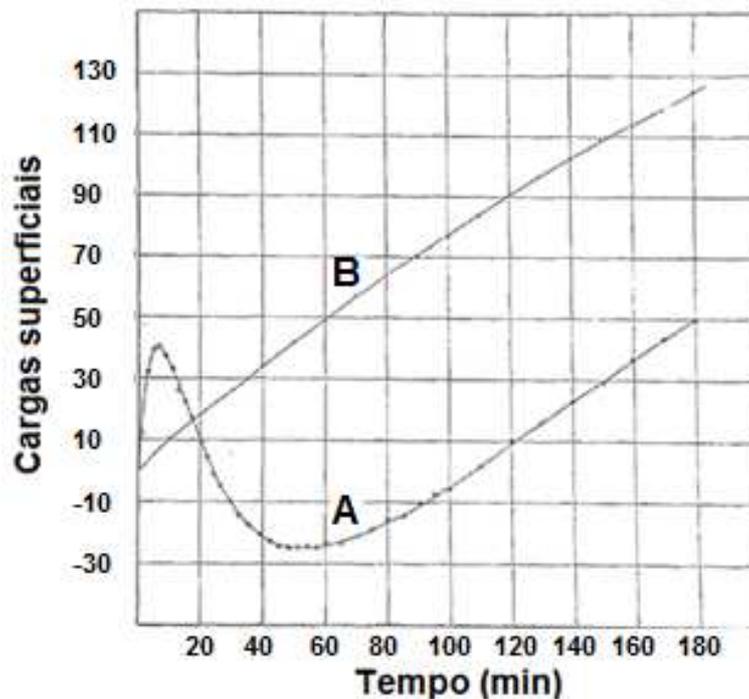
a polaridade das cargas revertia, tornando-se igual àquela dos eletrodos e assim permanecendo sem decaimento perceptível por longos períodos de tempo.

Segundo Gutmann (1948), cargas nos eletretos de mesma polaridade dos eletrodos ao qual estava em contato são chamadas de homocargas e, cargas com polaridade oposta àquela dos eletrodos aos quais estiveram em contato, são chamadas de heterocargas. Pares de dipolos elétricos presentes nas moléculas que compõem o material do dielétrico tendem a se alinhar ao campo elétrico externo aplicado (ADAMS, 1927). O fenômeno de formação de heterocargas advém de um processo de volume, em que íons dispersos no material se alinham ao campo elétrico externo, realizando uma polarização interna. Homocargas advém de um processo de superfície, tanto da interface entre o dielétrico e o eletrodo ou do próprio eletrodo (GUTMANN, 1948).

O processo de aquecimento aumenta a mobilidade dos íons presentes no material que compõem o dielétrico, permitindo o realinhamento dos mesmos com o campo elétrico externo. Uma vez que ocorra o resfriamento da amostra, a mobilidade diminui e os íons alinhados com o campo permanecem polarizados, porém com sua orientação invertida em relação aos eletrodos, formando assim heterocargas. Posteriormente, cargas opostas às heterocargas se adensam na superfície e ao longo do interior do dielétrico, formando assim homocargas (GUTMANN, 1948).

A Figura 25 ilustra o processo de inversão de polaridade para uma amostra de eletreto composta de cera de carnaúba e cera de abelha. A curva *A* mostra as cargas superficiais e a polaridade versus tempo para uma amostra inicialmente aquecida a 40° C sendo resfriada até 25° C. A curva *B* ilustra as cargas superficiais e a polaridade para a mesma amostra permanecendo a 25° C após dois dias. É possível notar a inversão de polaridade das cargas ao longo do processo de resfriamento, bem como o aumento da quantidade de cargas superficiais ao longo do tempo para a mesma polaridade após o resfriamento.

Figura 25 Processo de inversão de polaridade



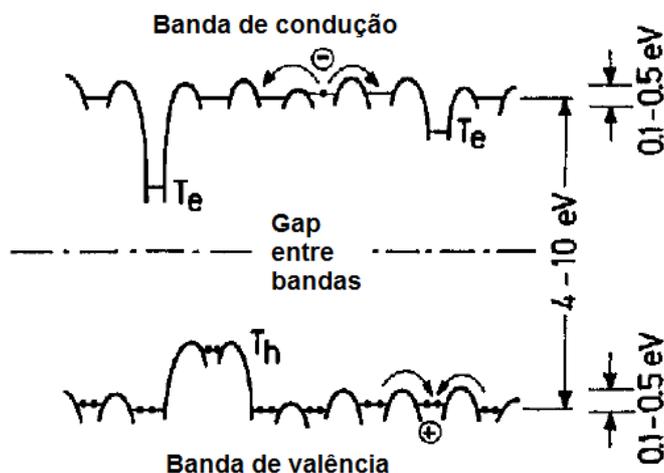
Fonte: Adaptado de Adams (1927).

Eletretos como cera de carnaúba e âmbar apresentam polarização devido ao alinhamento de seus dipolos elétricos presentes nas moléculas, normalmente ácidos graxos, que os compõem. Entretanto, para materiais poliméricos, tais como Teflon FEP (*fluorinated ethylene propylene*), polietileno (PE), PTFE (*polytetrafluoroethylene*) e PVDF (Polyvinylidene Fluoride), a polarização ocorre pelo fenômeno de aprisionamento de cargas em armadilhas eletrônicas (*trapps*). Segundo Sessler (1998, p. 55 e p.217) e Von Seggern (1979), tais armadilhas podem ainda ser distinguidas entre armadilhas de volume e armadilhas de superfície. De acordo com os autores, tais armadilhas se devem principalmente à impurezas, defeitos e irregularidades na estrutura molecular dos compostos e oxidação da superfície dos materiais. Entretanto, os autores destacam ser muito difícil determinar a real natureza de tais armadilhas.

As armadilhas de elétrons estão associadas com os níveis de energia nas bandas eletrônicas. A Figura 26 ilustra a banda de condução e a banda de valência, com as respectivas armadilhas de elétrons  $T_e$ . Armadilhas rasas apresentam níveis de energia entre 0,1 e 0,5 eV, enquanto armadilhas profundas apresentam níveis de energia da ordem de 1 eV até 2 eV, com seu potencial se aprofundando para próximo da banda de valência. Isso evidencia que é necessária uma fonte de excitação como radiação ou elevação de temperatura para que um

elétron possa sair das armadilhas profundas para a banda de condução, ou ainda que possa cruzar o *gap* entre bandas e se recombinar na banda de valência.

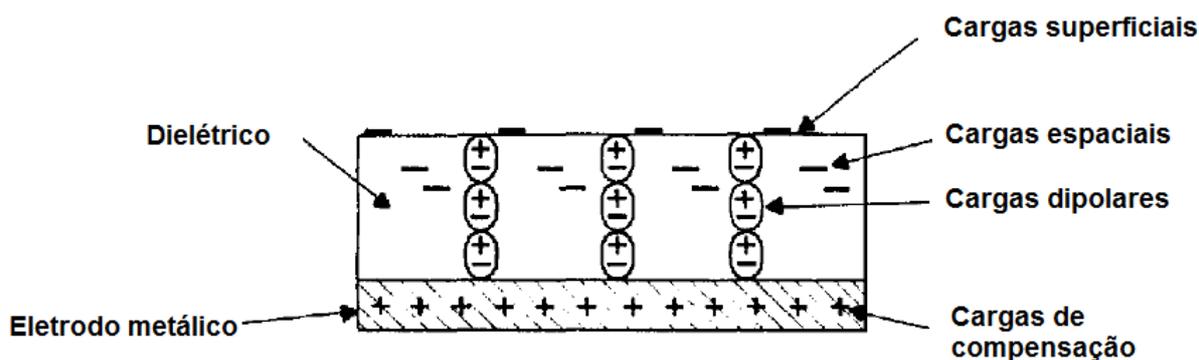
Figura 26 Modelo de band gap e armadilhas eletrônicas



Fonte: Adaptado de Sessler (1998).

As cargas que compõem um eletreto podem ser do tipo: cargas de superfície, cargas espaciais e cargas dipolares. A Figura 27 ilustra os diversos tipos de cargas aprisionadas para um dielétrico com uma das extremidades metalizada. A forma como estas cargas serão aprisionadas depende do tipo de material e da forma como ele será carregado.

Figura 27 Tipos de cargas aprisionadas em eletretos



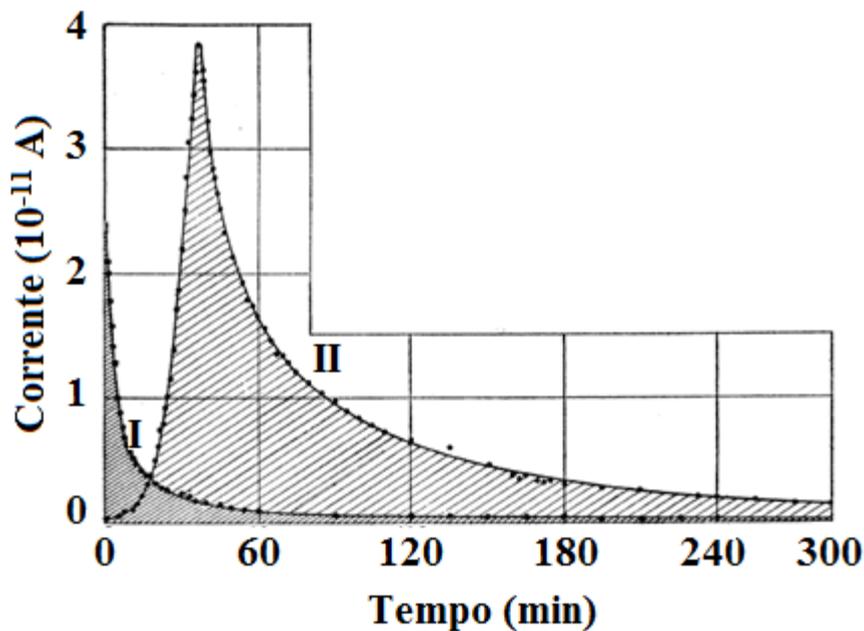
Fonte: Adaptado de Sessler (1998).

### 2.5.2. Processo térmico de formação de eletretos

Muitos são os processos de formação de eletretos desenvolvidos desde os primeiros trabalhos de Eguchi. De fato, o processo de formação (ou de polarização) de eletretos consiste basicamente na injeção de cargas, superficiais ou espaciais, no dielétrico (SESSLER, 1998, p. 20). Para eletretos tais como cera de carnaúba, o processo de formação necessariamente passa

pela elevação da temperatura e posterior resfriamento. Gross e Denard (1945) descreve um experimento em que amostras de cera de carnaúba de 1 mm de espessura e área de aproximadamente 15 cm<sup>2</sup> são carregadas com uma tensão de 118 V a 70° C durante 24 horas, e posteriormente resfriadas a temperatura ambiente de 26° C. A curva **II** do gráfico da Figura 28 ilustra a corrente de descarga da amostra depois de ser reaquecida a 70° C. A área abaixo da curva do gráfico é a carga total medida. A curva mostra que há um valor de carga muito maior liberado pelo aquecimento da amostra em relação à carga liberada pela mesma a temperatura ambiente (curva **I**).

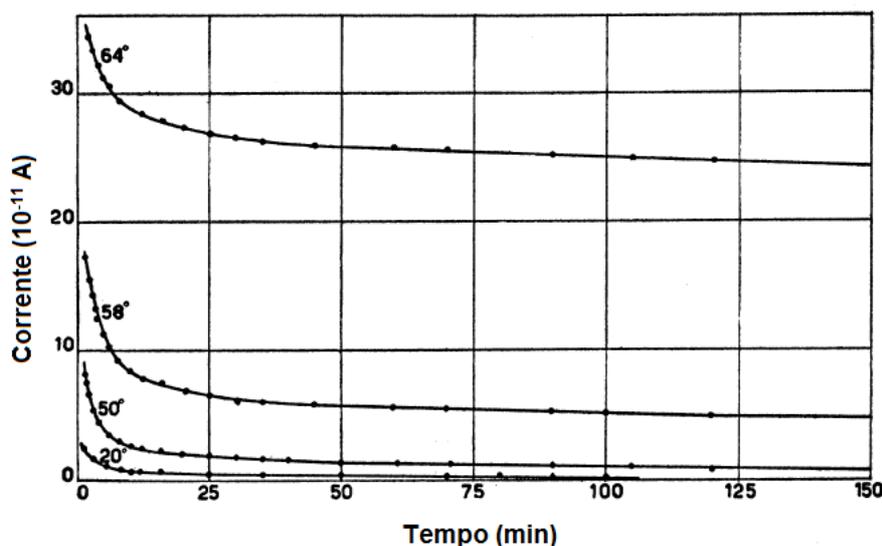
Figura 28 Corrente de descarga de cera de carnaúba para diferentes valores de temperatura



Fonte: Adaptado de Gross e Denard (1945).

Entretanto, para as mesmas amostras, a figura de carregamento também revela que o processo de carregamento é extremamente dependente da temperatura. A Figura 29 ilustra a corrente de carregamento para as mesmas amostras para diferentes valores de temperatura. Quanto maior o valor da temperatura, maior a quantidade de carga aprisionada na amostra.

Figura 29 Corrente de carregamento para diferentes valores de temperatura



Fonte: Adaptado de Gross e Denard (1945).

### 2.5.3. Processo isotérmico de formação de eletretos

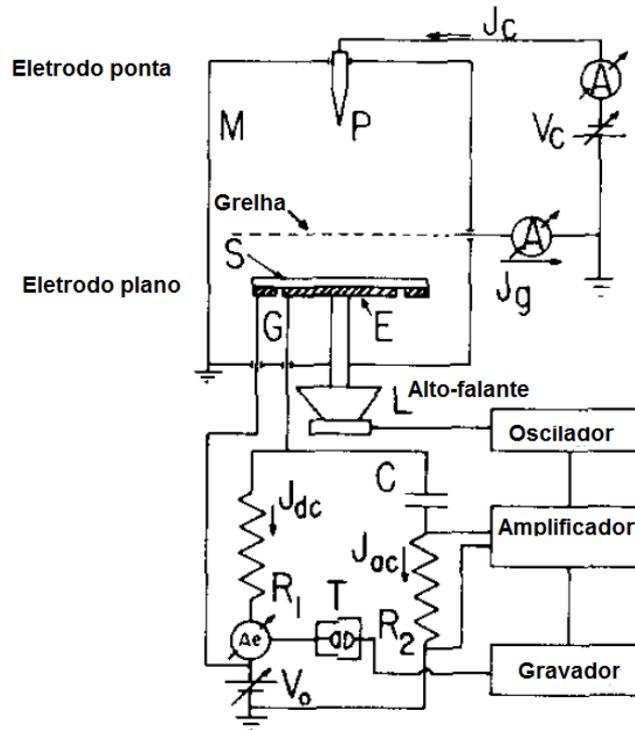
Os métodos térmicos de carregamento de eletretos têm sido aprimorados ao longo de vários anos, sendo ainda utilizados na atualidade. Entretanto, Sessler (1998, p. 30) destaca que este tipo de processo tende a ter o inconveniente da não uniformidade da distribuição de calor na amostra e da lentidão do processo de aquecimento e resfriamento (valores elevados de constantes de tempo para processos térmicos). Métodos isotérmicos, contudo, apresentam maior velocidade de transmissão de carga para o dielétrico, além de atingirem camadas mais profundas do interior da amostra.

Dentre os processos mais conhecidos, destaca-se o método de carregamento por efeito corona. De acordo com Giacometti e Oliveira Júnior (1992), a descarga corona pode ser categorizada como uma descarga elétrica autossustentável, não abrupta que ocorre quando há um potencial elevado o suficiente entre eletrodos assimétricos. Normalmente eletrodos assimétricos são montagens do tipo ponta-plano. O carregamento da amostra depende tanto da polaridade quanto da tensão aplicada nos eletrodos. De acordo com Sessler (1998, p. 30), em dielétricos como o Teflon FEP, cargas negativas tendem a ser depositadas na superfície da amostra, enquanto cargas positivas tendem a ter maior penetração.

Um ponto importante no carregamento por efeito corona é a necessidade de controle da tensão com a qual a amostra é carregada e com a uniformidade do carregamento. Para tal finalidade, o tríodo corona foi proposto por Moreno e Gross (1976). A montagem consiste de eletrodos ponta-plano e uma grelha metálica entre a amostra e o eletrodo ponta. O potencial elétrico aplicado na grelha é o mesmo com o qual a amostra será carregada. Na montagem da

Figura 30, a vibração mecânica do alto-falante excita a parte interna da amostra de PTFE, cuja variação da distância da amostra com a grelha produz correntes alternadas que podem ser mensuradas pelo amplificador, bem como a corrente de carregamento da mesma.

Figura 30 Triodo corona proposto por Gross e Moreno

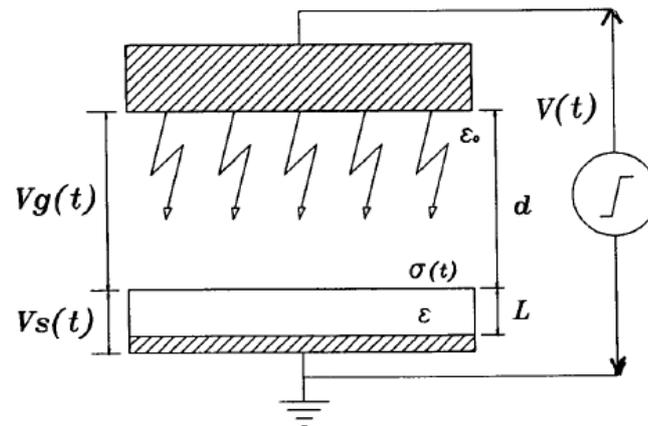


Fonte: Adaptado de Moreno e Gross (1976).

Além do efeito corona, um método bastante utilizado é o método por contato direto. Este método consiste na aplicação de uma tensão elétrica entre dois eletrodos com o dielétrico a ser carregado justaposto entre os dois eletrodos. A tensão pode ser DC ou impulsiva e os eletrodos não necessariamente devem ser simétricos. De acordo com Sessler (1998, p. 31), quando da aplicação da tensão, os eletrodos irão transferir cargas para a amostra por meio de um processo de descarga elétrica no *gap* de ar entre a superfície da amostra e do eletrodo, tal como descrito na seção 2.1, permanecendo estas cargas aprisionadas nas armadilhas eletrônicas presentes na superfície da amostra.

Altafim, Giacometti e Janiszewski (1992b) desenvolveram um método de produção de eletretos por contato direto utilizando tensões impulsivas. No experimento, uma tensão impulsiva  $V(t)$  é aplicada em uma amostra de Teflon FEP metalizada em um lado e disposta entre eletrodos planares com um *gap* de ar entre os eletrodos, conforme Figura 31.

Figura 31 Aplicação de tensão impulsiva sobre amostra de Teflon FEP



Fonte: Adaptado de Altafim, Giacometti e Janiszewski (1992b).

A diferença de potencial no *gap* de ar é dada por:

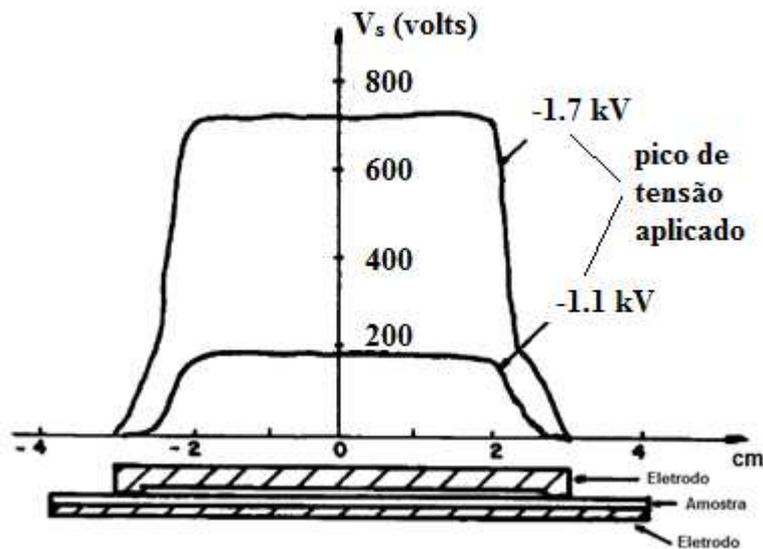
$$V_g(t) = V(t) - V_L(t) = \frac{\frac{\epsilon V(t)}{L} - \sigma_0}{\frac{\epsilon_0}{d} + \frac{\epsilon}{L}} \quad (5)$$

Em que  $V_s(t)$  é o potencial elétrico na superfície do dielétrico,  $\epsilon$  e  $\epsilon_0$  são as permissividades do dielétrico e do vácuo, respectivamente,  $L$  e  $d$  são, respectivamente, a espessura do dielétrico e o comprimento do *gap* e  $\sigma_0$  é a densidade de carga do eletreto. O potencial elétrico na superfície do eletreto quando da ocorrência do pico de tensão impulsiva é dada por:

$$V_s = \sigma_m \frac{L}{\epsilon} \quad (6)$$

Em que  $\sigma_m$  é a carga transferida para a superfície do eletreto quando do valor de pico de tensão impulsiva. A medição da do potencial elétrico sobre a superfície do dielétrico foi feito utilizando-se um *scanner* eletrostático, exibido na Figura 32.

Figura 32 Potencial na superfície do eletreto formado com tensões impulsivas



Fonte: Adaptado de Altafim, Giacometti e Janiszewski (1992b).

Outros métodos de carregamento permitem a injeção de cargas localizadas sobre a amostra, tal como a técnica de feixe de elétrons ou ainda a utilização de raios X e radiação gama. Em ambas as técnicas, diferentes profundidades das camadas interiores do dielétrico podem ser carregadas, além de permitirem a injeção de cargas em pontos localizados da amostra, com boa uniformidade e densidade de cargas (SESSLER, 1998, p. 34).

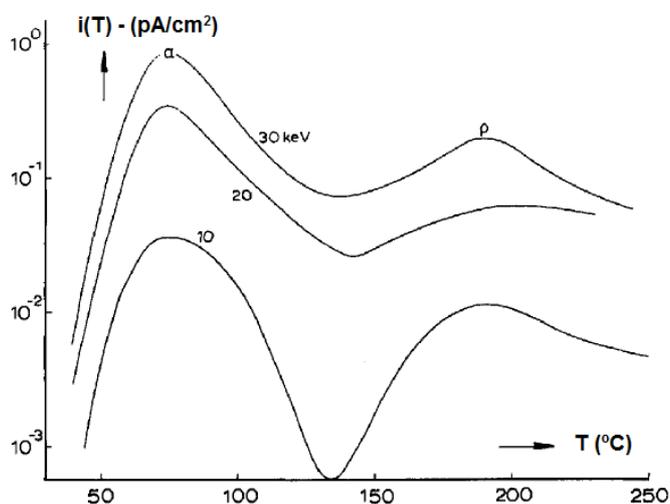
#### 2.5.4. Métodos de medição de cargas em eletretos

Vários são os métodos utilizados para medição da carga e da densidade de cargas em eletretos. Gross (1950) utiliza a técnica do capacitor dinâmico para medição da carga em amostras de poliestireno. O sistema consiste de uma base com fonte de calor onde a amostra é colocada e uma estrutura basculante onde se encontra o eletrodo superior. O eletrodo é conectado a um capacitor de capacitância conhecida  $q$ . Uma vez que a amostra é carregada, o eletrodo é desconectado do aterramento e erguido, sendo carregado até atingir uma tensão  $V=q/C_0$ . A medição da tensão  $V$  permite a determinação da carga da amostra  $C_0$ .

Uma outra técnica amplamente utilizada é a TSD (*Thermally Stimulated Discharge*) (VAN THURNHOUT, 1971), que consiste no estudo do descarregamento de eletretos pelo aquecimento a uma taxa constante (SESSLER, 1998, p. 81). Por esta técnica, os diversos mecanismos de formação de eletretos, bem como os mecanismos de formação de armadilhas e aprisionamento de elétrons são investigados em função da temperatura e não do tempo ou da profundidade da amostra. Considerando que elétrons são aprisionados em armadilhas com diferentes níveis de energia, a estimulação por temperatura pode liberar estes elétrons da

estrutura do dielétrico, tendo então sua corrente e conseqüentemente a carga medidas em função do aumento de temperatura (SESSLER; WEST, 1976). Para maiores valores de temperatura, picos de corrente são esperados da liberação de elétrons de armadilhas mais profundas. Os gráficos obtidos pelo método TSD são termogramas. A Figura 33 ilustra os termogramas de amostras de Teflon FEP carregadas pelo processo de feixe de elétrons com valores de energia de 10 keV, 20 keV e 30 keV. Os gráficos mostram a corrente obtida do eletreto para diferentes valores de temperatura, com picos para valores de temperatura distintos, indicando a necessidade de uma maior quantidade de energia para liberação dos elétrons das armadilhas mais profundas.

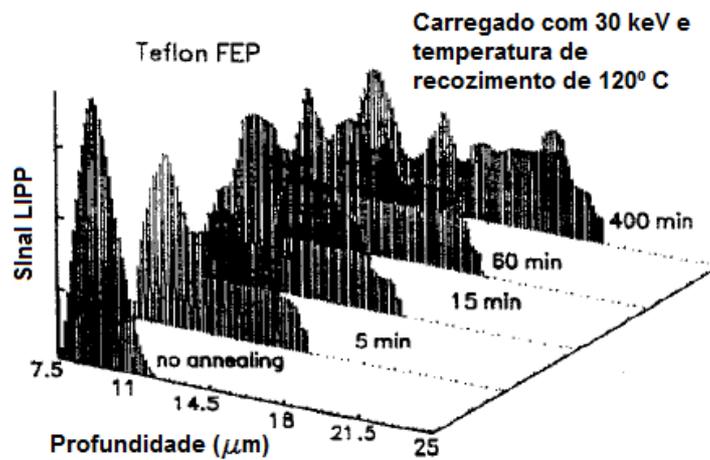
Figura 33 Termogramas de Teflon FEP metalizado



Fonte: Adaptado de Sessler (1998, p. 92).

Uma outra técnica, relativamente recente, e que vem sendo amplamente utilizada é conhecida como LIPP (*Laser-induced pressure pulse*), que consiste na aplicação de um pulso laser sobre uma amostra carregada de eletreto. A pressão causada pelo laser na superfície da amostra provoca ondas que se propagam ao longo da amostra e de suas diversas camadas, causando deformações. Essas deformações originam correntes que são medidas por eletrodos e posteriormente exibidas em osciloscópio. A Figura 34 ilustra o sinal LIPP obtido por Sessler (1997) para diferentes profundidades de uma amostra de Teflon FEP de 25  $\mu\text{m}$  carregada com feixe de elétrons de 30 keV em diferentes tempos de recozimento a 120° C. Para um maior tempo de exposição da amostra a elevadas temperaturas após o carregamento, pode-se notar uma maior distribuição das cargas para as camadas mais profundas do eletreto.

Figura 34 Sinal LIPP para teflon FEP

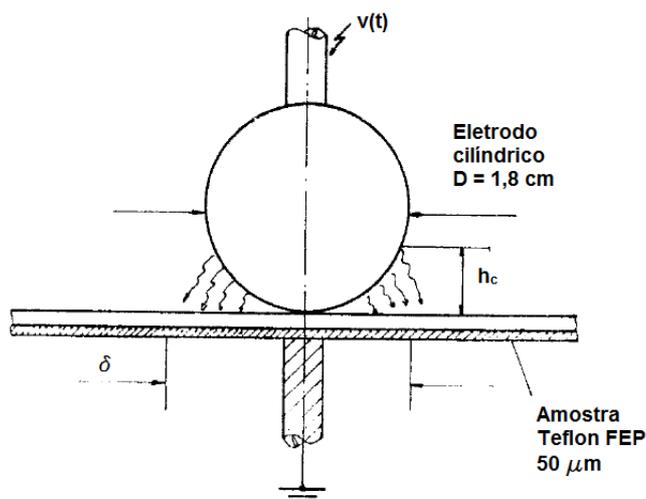


Fonte: Adaptado de Sessler (1997).

### 2.5.5. Medição de descargas atmosféricas com eletretos

Altafim, Janiszewski e Giacometti (1990) e Altafim, Giacometti e Janiszewski (1992b) propuseram um sistema de monitoramento de descargas atmosféricas baseado na tecnologia dos eletretos caracterizado como EPVD (*Electret peak voltage detector*). Baseado nos estudos de descargas elétricas em gases à mínimas distancias com a utilização de eletrodos simétricos e aplicação de tensões impulsivas, os autores propuseram um sensor robusto e de baixo custo. O layout da montagem consiste em um eletrodo planar e outro cilíndrico com uma amostra de Teflon FEP metalizada em um lado. A metalização em um lado permite a medição do potencial de superfície da amostra e da densidade de cargas em uma superfície (superfície não metalizada), sem maiores efeitos de distorção das linhas de fluxo elétrico. O carregamento do dielétrico é feito por carregamento direto aplicando-se uma tensão impulsiva padrão de 1,2/50  $\mu\text{s}$  no eletrodo cilíndrico. As cargas são ejetadas do eletrodo e permanecem aprisionadas na superfície do eletreto, podendo ser revelada tanto com o uso de um eletrômetro quanto com o uso do capacitor dinâmico. A Figura 35 ilustra a montagem do sensor, onde  $\delta$  é o comprimento equivalente ao raio do padrão circular formado na área carregada,  $h_c$  é a distância crítica para início do processo de descarga elétrica no ar.

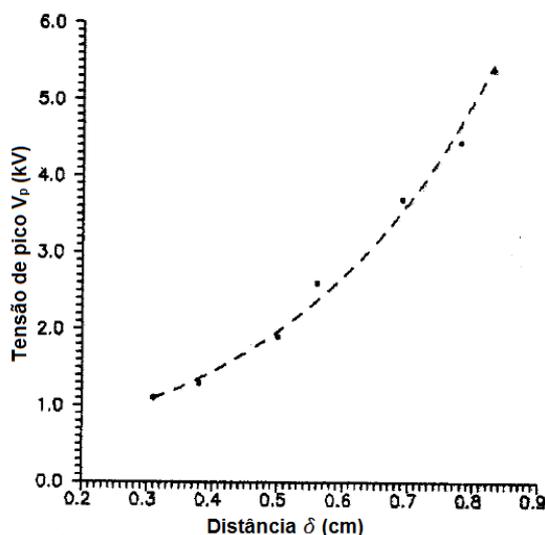
Figura 35 Sensor de pico de tensões impulsivas baseado na tecnologia dos eletretos



Fonte: Adaptado de Altafim, Janiszewski e Giacometti (1990).

A correlação entre a distância  $\delta$  e a tensão de pico  $v(t)$  permite a calibração do sensor. A Figura 36 ilustra a curva de calibração do sensor no range de 1 kV a 6 kV.

Figura 36 Curva de calibração do sensor EPVD



Fonte: Adaptado de Adaptado de Altafim, Janiszewski e Giacometti (1990).

Posteriormente, Falconi, Altafim e Altafim (2013b) propuseram um novo método de revelação, de baixo custo e de fácil aplicação tanto em laboratório quanto em campo, que consiste na pulverização de pó de toner xerográfico sobre a amostra dentro de uma câmara com ventoinha. O pó de toner se deposita sobre a superfície não carregada pela tensão impulsiva, deixando a parte carregada exposta com o padrão geométrico do eletrodo proporcional ao valor da tensão de pico. O eletrodo utilizado consistia de esferas metálicas dispostas sobre a amostra,

que uma vez carregada e tendo sua superfície revelada, permitia a medição tanto do diâmetro como o cálculo da área do círculo correspondente, conforme Figura 37.

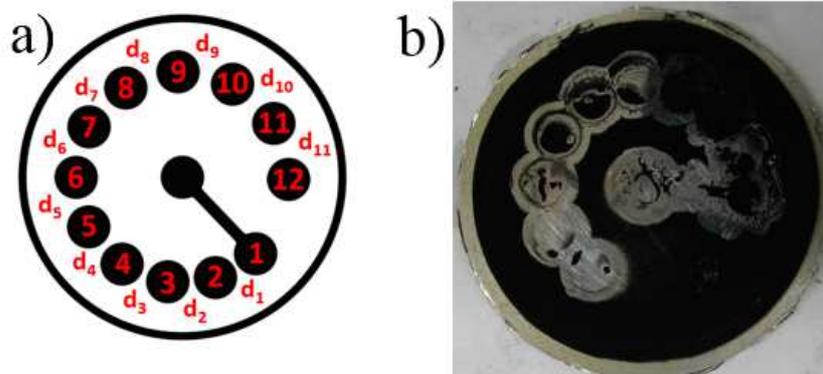
Figura 37 Amostra carregada com eletrodo esférico



Fonte: Falconi [2013a]

Falconi et al. (2017) propuseram um sensor baseado no mesmo método de carregamento e revelação, entretanto utilizaram um sistema de marcação baseado no fenômeno de descargas elétricas entre eletrodos. A Figura 38 a) ilustra a disposição dos eletrodos de cobre sobre fenolite, com diferentes distâncias entre círculos adjacentes, senso  $d_1 > d_2 > \dots > d_n$ . Assim, ocorre ruptura de arco elétrico apenas em uma tensão de pico proporcional ao valor de tensão de ruptura do *gap* de ar entre dois eletrodos adjacentes. A Figura 38 b) ilustra o padrão de círculos formados sobre a superfície do eletreto após a revelação com pó de toner.

Figura 38 Disposição dos eletrodos e revelação do eletreto



Fonte: Adaptado de Falconi et al. (2017).

### 3. Materiais e métodos

Vários são os métodos de transdução apresentados que permitem a medição tanto de tensões quanto de correntes provenientes de descargas atmosféricas. Este fenômeno, por sua vez, possui uma frequência de ocorrência muito maior em terrenos e estruturas elevadas. Desta forma, é natural a instalação de um sistema de medição em campo próximo destas estruturas. O sistema apresentado realiza uma transdução da corrente de descarga atmosférica em um sinal de tensão proporcional ao valor do pico da corrente por meio de um transdutor bobina de Rogowski. Dentre as diversas vantagens deste sistema, destacam-se: robustez, baixo custo, ampla faixa de operação e isolamento do transdutor da estrutura a ser monitorada.

#### 3.1. Sistema transdutor

O sistema de transdução utilizado é constituído de uma bobina de Rogowski, conforme discutido na seção 2.4.6. O sistema é composto por uma bobina auto integrante conectada à um cabo coaxial instalado na torre de telecomunicação em Santo Ângelo no Rio Grande do Sul, conforme descrito na Figura 39.

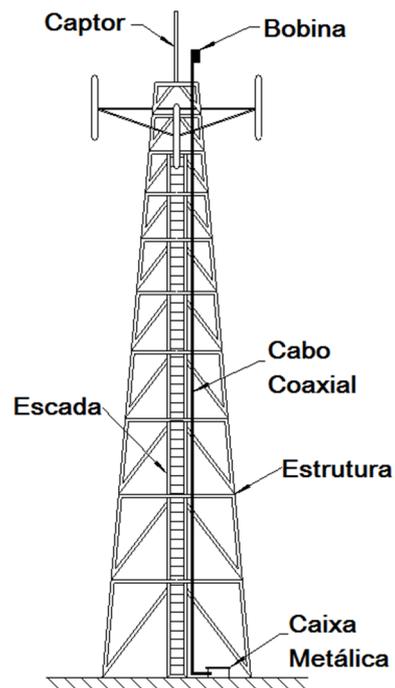
Figura 39 Torre de telecomunicação em Santo Ângelo-RS



Fonte: Silva Neto (2017).

O sistema a ser instalado na torre consiste de uma bobina, com princípio e faixas de operação descritos por Sousa et al. (2016), conectada à um cabo coaxial e um pedestal para fixação do conjunto próximo ao captor de descargas atmosféricas da torre. Próximo ao pé da torre fica alocado o sistema de aquisição baseado nos eletretos em uma caixa metálica, conforme Figura 40.

Figura 40 Torre de telecomunicação com o sistema instalado



Fonte: Autor.

A bobina, conforme ilustrada na Figura 41 é capaz de medir descargas atmosféricas até 100 kA, com um sinal de tensão proporcional que replica a forma de onda em uma faixa até 350 V.

Figura 41 Conjunto transdutor de descargas atmosféricas



Fonte: Autor.

Ensaio em laboratório com uma forma de onda de 1,2/50 microssegundos proveniente de um gerador de alta tensão, conforme descrito por Sousa et al. (2016), são ilustrados na Figura 42. A forma de onda medida com o divisor capacitivo de referência da Figura 18 é ilustrado no oscilograma 1. A forma de onda 2 é o resultado da transdução da corrente do gerador em tensão obtida com a bobina de Rogowski conectada ao cabo coaxial de 100 metros. Este resultado mostra que a bobina é capaz de replicar a forma de onda de corrente, quer seja de um gerador ou de uma descarga atmosférica, em um sinal de tensão proporcional. A diferença do valor de tensão entre ambas as curvas se deve à indutância mútua entre a bobina e o sistema ao qual está acoplada. A transimpedância do transdutor operando em campo, com valores calibrados em laboratório, é de aproximadamente 1 V para cada 299 A de corrente.

Figura 42 Formas de onda de tensão obtidas com a bobina de Rogowski



Fonte: Sousa et al. (2016).

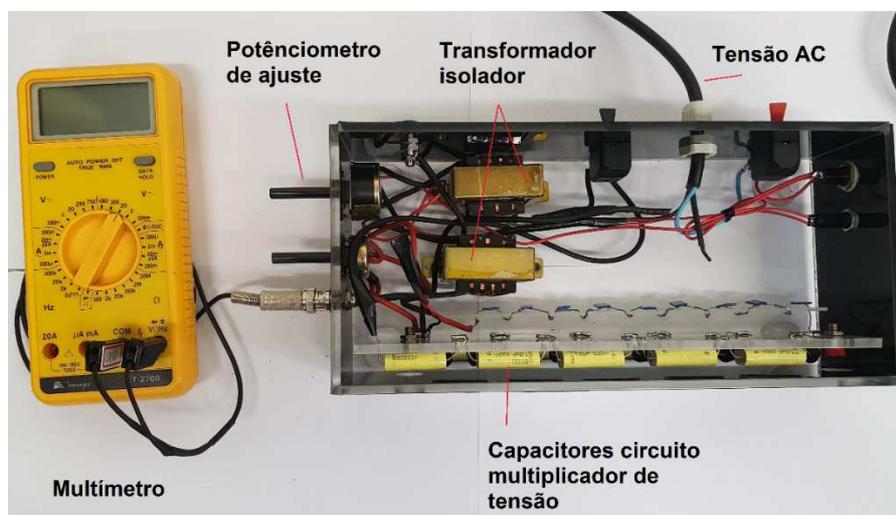
### 3.2. Sistema de medição com eletretos

O sistema para aquisição de sinais baseado na tecnologia dos eletretos apresenta elementos em comum com os trabalhos de Altafim, Giacometti e Janiszewski (1992b) e Falconi et al. (2017), sendo integrado ao sistema de transdução apresentado na seção 3.1. Baseado no método de carregamento de eletretos por contato direto do eletrodo com o dielétrico e posterior revelação com toner, o sistema polariza com tensão DC de aproximadamente 900 V uma amostra de Teflon FEP de 50  $\mu\text{m}$  de espessura metalizada em um lado. A amostra permanece fixada à bastidores de alumínio que mantem o filme esticado, evitando a formação de ondulações na superfície, sendo o lado metalizado posto sobre um eletrodo cilíndrico. Eletrodos de perfil circular são justapostos sobre o lado isolante da amostra, sendo o circuito elétrico destes eletrodos conectados à bobina de Rogowski. A seguir, são detalhados cada um dos componentes.

### 3.2.1. Eletrodo inferior e amostras de Teflon FEP

O eletrodo inferior é composto de um cilindro de alumínio conectado à uma fonte de alta tensão em corrente contínua. Esta fonte é composta de um potenciômetro, para regular a tensão de saída do transformador, um circuito multiplicador de tensão Walton-Cockrofftt e um divisor resistivo. O divisor tem uma relação de divisão de 1:1000 e pode ser conectado à um multímetro para leitura do valor de tensão. Antes de cada ensaio, calibrrou-se o divisor de tensão com uma ponta de prova de alta tensão, para uma correta aferição da tensão contínua aplicada na amostra. Desta forma, obteve-se tensões contínuas da ordem de 1 kV.

Figura 43 Fonte de alta tensão contínua utilizada nos ensaios



Fonte: Autor.

A superfície do eletrodo é polida e as arestas arredondadas a fim de equalizar o campo elétrico em todo o eletrodo. As amostras de Teflon FEP são metalizadas em um lado e fixadas à um bastidor de alumínio que as mantem esticadas. A Figura 44 a) ilustra as amostras de Teflon FEP fixadas ao bastidor, a Figura 44 b) o eletrodo inferior onde a amostra é sobreposta.

Figura 44 a) amostras de Teflon FEP fixadas ao bastidor b) eletrodo inferior



Fonte: Adaptado de Sousa, Altafim e Altafim (2019).

Uma vez metalizadas, as amostras devem ser preparadas antes de cada ensaio realizado, uma vez que as mesmas podem apresentar gordura, poeira ou pó de toner de ensaios anteriores, o que pode prejudicar o correto carregamento da superfície. Cada amostra é lavada e colocada em uma lavadora ultrassônica por vinte minutos, retirando-se assim qualquer sujeira incrustada, como mostrado na Figura 45.

Figura 45 Amostras em lavadora ultrassônica



Fonte: Autor.

A Figura 46 ilustra as amostras colocadas sobre uma superfície metálica e aquecidas em uma estufa elétrica a uma temperatura de 200° C por três horas. Tal procedimento é extremamente importante para retirar cargas elétricas remanescentes aprisionadas nas armadilhas profundas do material polimérico. Tais cargas podem comprometer o resultado final de revelação, evidenciando pontos de carregamento de ensaios anteriores.

Figura 46 Amostras em superfície metálica aquecidas em estufa



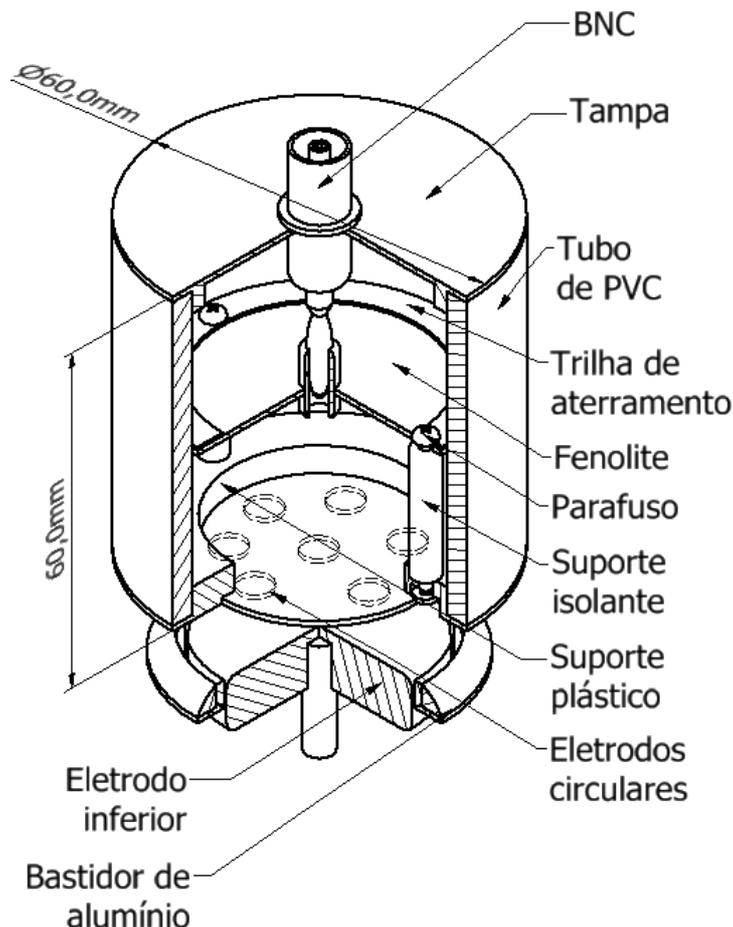
Fonte: Autor.

Após o aquecimento, as amostras são limpas com algodão embebido em álcool isopropílico e acetona, enxaguadas e secas com um soprador térmico. Finalmente, as amostras são colocadas em um dessecador com sílica, até que atinjam a temperatura ambiente, estando assim prontas para os ensaios.

### 3.2.2. Eletrodo superior

Um esquemático do eletrodo superior é ilustrado na Figura 47. Este subsistema é composto de 7 eletrodos metálicos circulares, dispostos sobre uma placa de fenolite circular fixada a um suporte de plástico. Uma segunda placa de fenolite permanece acima dos eletrodos, servindo como suporte para o conector de sinal de tensão BNC e a trilha de aterramento. Uma tampa metálica conectada à trilha de aterramento garante o contato de retorno da corrente impulsiva proveniente da bobina, além de manter o conector BNC fixado e alinhado. Entre as duas placas de fenolite encontra-se um circuito eletrônico que seleciona, de forma proporcional ao nível de tensão advindo da bobina, os círculos correspondentes.

Figura 47 Esquemático eletrodo superior



Fonte: Adaptado de Sousa, Altafim e Altafim (2019).

A Figura 48 ilustra os eletrodos circulares numerados de 1 a 7. Estes eletrodos são feitos a partir de uma placa de PCB (*printed circuit board*), que após corroída por ácido, revela os eletrodos circulares em cobre. Cada eletrodo é perfurado e soldado com estanho. O perfil plano é feito lixando os eletrodos com lixas de diferentes graus de abrasão, até que se obtenha uma superfície polida e plana. Uma vez prontos, a placa é fixada sobre o suporte plástico para a soldagem dos componentes eletrônicos.

Figura 48 Eletrodos superiores da placa de fenolite numerados



Fonte: Adaptado de Sousa, Altafim e Altafim (2019).

A Figura 49 ilustra a montagem do eletrodo superior, com o circuito eletrônico e respectivos componentes soldados.

Figura 49 Montagem do eletrodo superior com o circuito eletrônico instalado



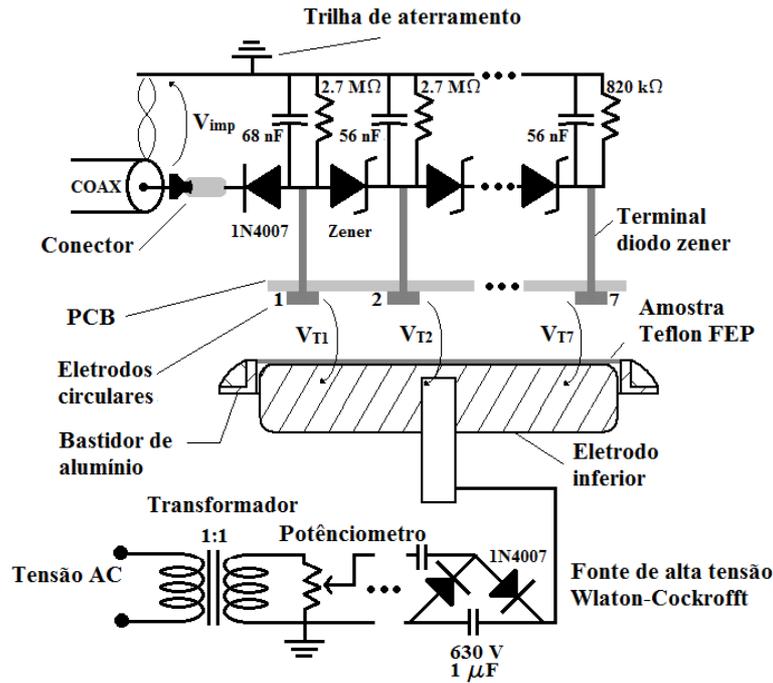
Fonte: Autor.

### 3.2.3. Circuito eletrônico interno e lógica de operação

Conforme discutido nas seções 2.4.3 e 2.5.5, padrões geométricos e filmes de eletreto metalizados têm sido utilizados para medição de impulsos de corrente de descargas atmosféricas. No caso do sensor EPVD, um parâmetro que se torna inconveniente é a tensão

mínima  $V_{min}$  necessária para carregar o eletreto, em torno de 1 kV. Como a tensão da bobina de Rogoski opera muito abaixo deste valor, faz-se necessário diminuir este valor de *offset*, superpondo a tensão impulsiva da bobina com uma tensão contínua operando próximo a 1 kV. A Figura 50 ilustra como a operação do sensor, tanto com a tensão impulsiva, quanto com a tensão contínua, é realizada.

Figura 50 Circuito interno do eletrodo superior e circuito do gerador de alta tensão corrente contínua



Fonte: Adaptado de Sousa, Altafim e Altafim (2019).

O circuito do eletrodo superior é composto de uma série de circuitos RC individuais, cada um composto um nó do sistema. Cada nó é separado por um diodo Zener, com tensão  $V_Z$  correspondente de 30 V, e os terminais elétricos de cada diodo são soldados aos eletrodos circulares numerados de 1 a 7. A amostra de Teflon FEP é justaposta entre os eletrodos circulares e o eletrodo inferior, com a tensão contínua  $V_{DC}$ . Como o eletrodo inferior compreende cada nó do sistema, a tensão  $V_{DC}$  em cada nó é a mesma. A tensão impulsiva proveniente da bobina é  $V_{imp}$ , e se distribui em cada nó do sistema com uma queda de tensão (no caso de um sinal impulsivo positivo), ou uma elevação de tensão (no caso de um sinal negativo), proporcional ao valor da tensão de *breakdown* do Zener. Desta forma, cada nó possui uma tensão  $V_n$  escalonada, sendo  $V_{n1} < V_{n2} \dots < V_{n7}$  para uma tensão impulsiva negativa. A diferença de potencial em cada nó  $V_{Tn}$  é dado pela equação 7, que consiste na diferença entre a tensão impulsiva em cada nó, e a tensão contínua.

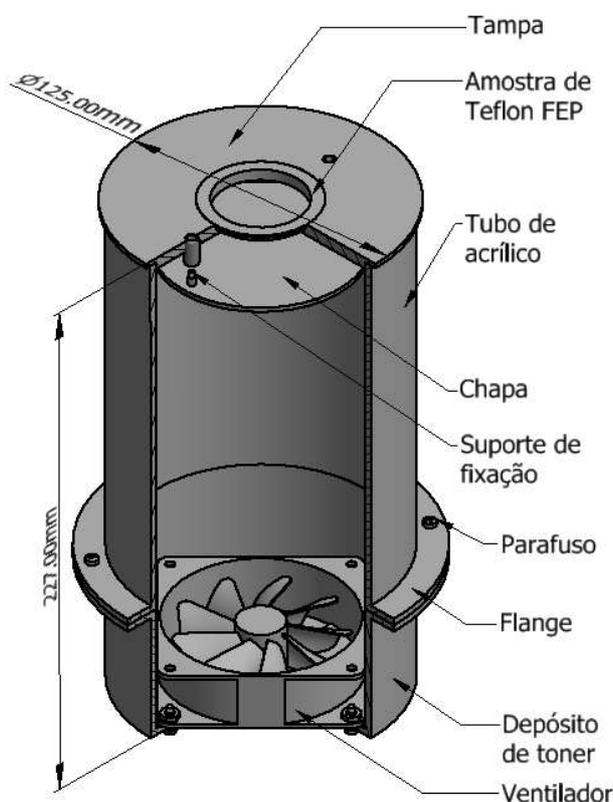
$$V_{Tn} = V_n - (-V_{DC}) \quad (7)$$

A medida que  $V_{imp}$  aumenta, o valor de  $V_n$  aumenta, superpondo assim ao valor de  $V_{DC}$  constante. Portanto, o valor de  $V_{Tn}$  aumenta de forma progressiva em cada nó. Quando  $V_{Tn}$  atinge o valor  $V_{min}$ , a região da amostra sob o eletrodo circular é permanentemente carregada, tendo posteriormente, o padrão geométrico revelado e correlacionado com o pico de tensão impulsiva  $V_{imp}$ . Uma vez aplicada a tensão impulsiva, cada capacitor é carregado com uma tensão proporcional, tendo sua descarga bloqueada pelo diodo 1N4007. Como o capacitor descarrega sobre os resistores em paralelo, fez-se o uso de resistores elevados, o que aumenta a constante de tempo do sistema, expondo a amostra à diferença de tensão por mais tempo. Os resistores também são responsáveis pela regulação da tensão contínua em cada nó. A lógica de operação descrita acima também é válida quando da inversão da polaridade da tensão impulsiva, bastando inverter também a polaridade da tensão contínua e dos diodos Zener e 1N4007.

#### 3.2.4. Subsistema de revelação das amostras

Após o processo de carregamento, as amostras devem ser reveladas a fim de se estabelecer os padrões geométricos, que correspondem ao valor de pico de tensão adquirido pela bobina. A montagem do sistema de revelação é mostrada na Figura 51.

Figura 51 Sistema de revelação dos padrões geométricos



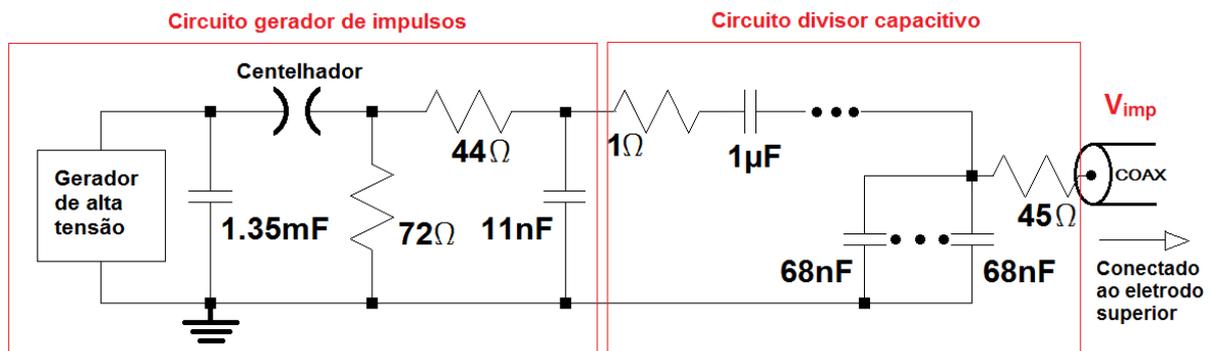
Fonte: Adaptado de Sousa, Altafim e Altafim (2019).

O sistema consiste de um tubo de acrílico em cuja parte inferior é fixado um depósito de toner. Na parte superior, uma tampa de acrílico é fixada, com um rebaixo de diâmetro igual ao do bastidor de alumínio da amostra. Uma vez colocada a amostra no rebaixo, o ventilador é acionado, revolvendo o pó de toner, projetando-o para cima, em direção à amostra. Uma chapa de metal é colocada entre o tubo e a amostra, a fim de reduzir o fluxo de toner que incide diretamente sobre a superfície. As partículas de toner são repelidas pelas regiões carregadas, revelando formas geométricas que podem ser correlacionadas com o pico de tensão impulsiva. O ventilador é acionado apenas o tempo necessário para que as regiões não carregadas pelos eletrodos sejam cobertas com toner.

### 3.2.5. Ensaio

Para a realização dos ensaios, colocou-se a amostra entre os eletrodos e ajustou-se a tensão contínua da fonte em 900 V, valor ligeiramente inferior a tensão mínima de carregamento da amostra ( $V_{min}$ ) de 1 kV. Aplicou-se uma tensão impulsiva negativa de 1,2/50  $\mu$ s proveniente de um circuito gerador de impulsos, que simula a tensão proveniente da bobina. O circuito do gerador de tensão impulsiva e do divisor capacitivo é apresentado na Figura 52.

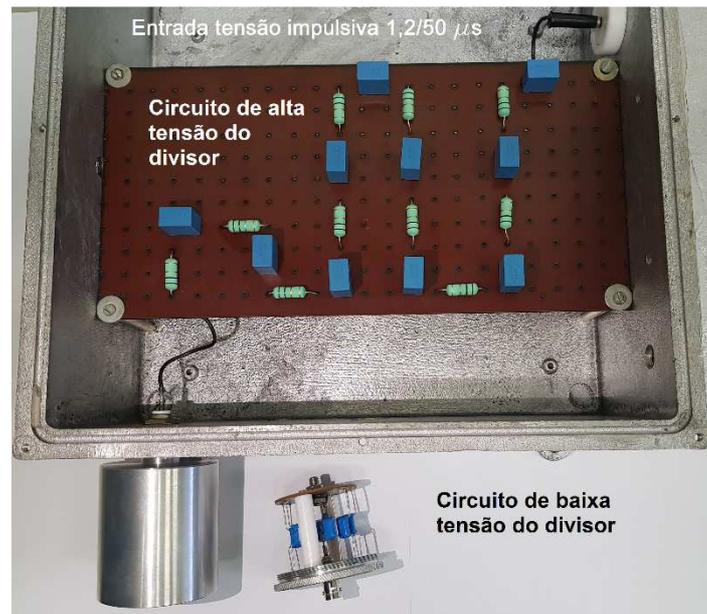
Figura 52 Circuito gerador de impulsos e divisor capacitivo



Fonte: Adaptado de Sousa, Altafim e Altafim (2019).

Para se ajustar a tensão impulsiva ao valor da bobina, com valores impulsivos até 350 V, utilizou-se um divisor capacitivo, conforme ilustrado na Figura 53. A parte de alta tensão é composta de 10 capacitores de 1  $\mu$ F e 10 resistores de 1  $\Omega$ . A parte de baixa tensão é composta de 8 capacitores de 68 nF. A saída do divisor é conectada ao cabo coaxial, que transmite o impulso de tensão para o eletrodo superior do sistema de aquisição baseado em eletretos.

Figura 53 Divisor capacitivo utilizado em ensaios



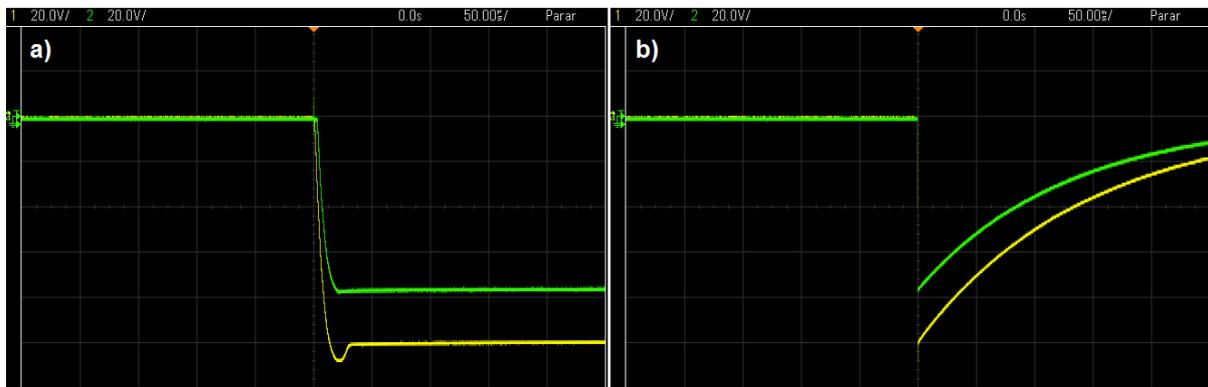
Fonte: Autor.

A partir da tensão impulsiva proveniente do divisor, é possível polarizar os eletrodos circulares com  $V_{imp}$ , carregando-se as amostras.

## 4. Resultados

As Figura 54 a) e b) mostram a forma de onda e o valor de pico de tensão impulsiva para os eletrodos 1 e 2 referidos na Figura 48 para uma tensão impulsiva  $V_{imp}$  de -101 V no nó 1. Os gráficos obtidos mostram a forma de onda para duas escalas de tempo diferentes, a primeira para uma escala de tempo de 50  $\mu$ s/divisão e a segunda para 50 ms/divisão. Os resultados evidenciam uma constante de tempo muito maior para o circuito RC, em cada nó do circuito do eletrodo superior, do que o tempo para atingir metade do valor de pico da onda impulsiva de 1,2/50  $\mu$ s utilizada nos testes.

Figura 54 Gráficos de forma de onda para a tensão mínima no nó 1



Fonte: Adaptado de Sousa, Altafim e Altafim (2019).

Como resultado da revelação, figuras geométricas surgem em porções selecionadas da superfície da amostra. A intensidade, o contraste e a quantidade de círculos é proporcional ao valor de tensão impulsiva nos respectivos nós. A Figura 55 ilustra, para uma tensão impulsiva de -101 V e 900 V contínua, o contraste de um círculo no nó 1, no centro da amostra.

Figura 55 Resultado da revelação com um círculo para uma tensão  $V_{imp}$  de -101 V



Fonte: Adaptado de Sousa, Altafim e Altafim (2019).

De forma subsequente, a tensão  $V_{imp}$  foi incrementada gradualmente. A Tabela 1 mostra o valor de tensão impulsiva em cada nó. O valor de tensão no nó 1 é equivalente à  $V_{imp}$ .

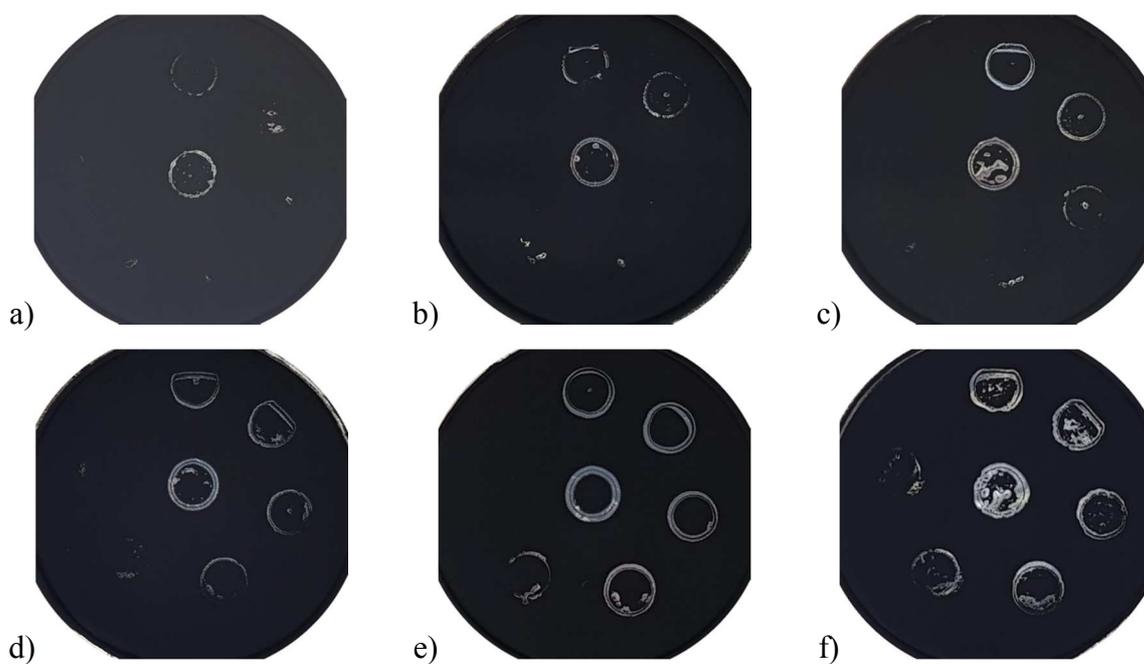
Tabela 1 Valor de tensão impulsiva em cada nó

Nó	Tensão em cada nó (V)						
1	-101	-130	-160	-196	-220	-248	-282
2	-77	-105	-136	-172	-198	-225	-260
3	-50	-77	-105	-146	-174	-201	-231
4	-21	-50	-80	-113	-145	-172	-204
5	0	-18	-51	-86	-115	-144	-175
6	0	0	-22	-59	-85	-112	-144
7	0	0	0	-30	-55	-85	-117
Número de círculos revelados	1	2	3	4	5	6	7

Fonte: Adaptado de Sousa, Altafim e Altafim (2019).

A Figura 56 ilustra o resultado das revelações subsequentes, conforme a tensão  $V_{imp}$  é incrementada.

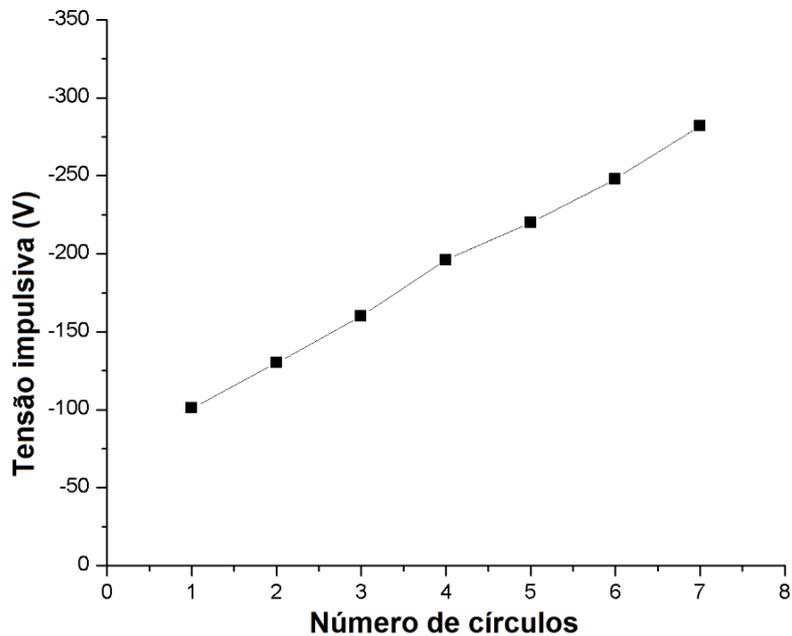
Figura 56 Resultados das revelações subsequentes: a) 2 círculos, b) 3 círculos, c) 4 círculos, d) 5 círculos, e) 6 círculos e f) 7 círculos



Fonte: Adaptado de Sousa, Altafim e Altafim (2019).

A Figura 57 correlaciona a tensão impulsiva  $V_{imp}$  com o número de círculos revelados.

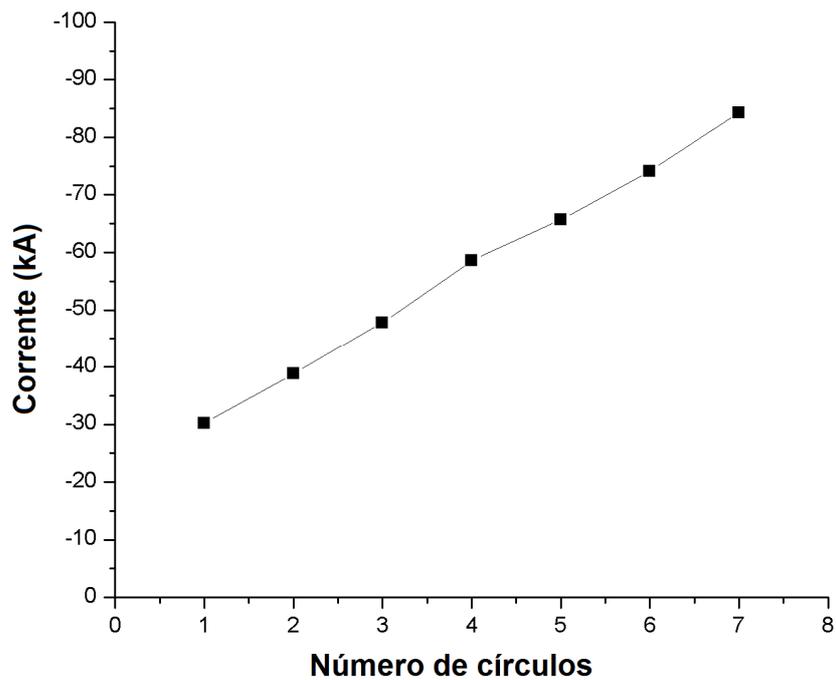
Figura 57 Correlação entre tensão impulsiva e número de círculos



Fonte: autor

De forma análoga, a Figura 58 ilustra a correlação entre o número de círculos e a corrente proveniente de descargas atmosféricas.

Figura 58 Correlação entre número de círculos e corrente



Fonte: autor

#### 4.1. Discussões

Dos resultados obtidos, pode-se destacar que o sistema permite leituras do valor de tensão com uma resolução de aproximadamente 7 kV, em uma amplitude de corrente que corresponde até 100 kA. A superposição das tensões contínua, para eliminar o *offset*, e tensão impulsiva, permitem o carregamento seletivo das amostras de Teflon FEP. O uso de tensão contínua permite que uma fração da tensão necessária para polarizar as amostras percorra o comprimento do cabo coaxial pela torre. O sistema mostra-se bastante flexível, uma vez que permite o incremento de sua resolução com a mudança dos valores de tensão  $V_z$  do Zener. Pela Tabela 1 é possível notar que a diferença de tensão em cada nó é de aproximadamente 30 V, correspondente à tensão de *breakdown* do Zener.

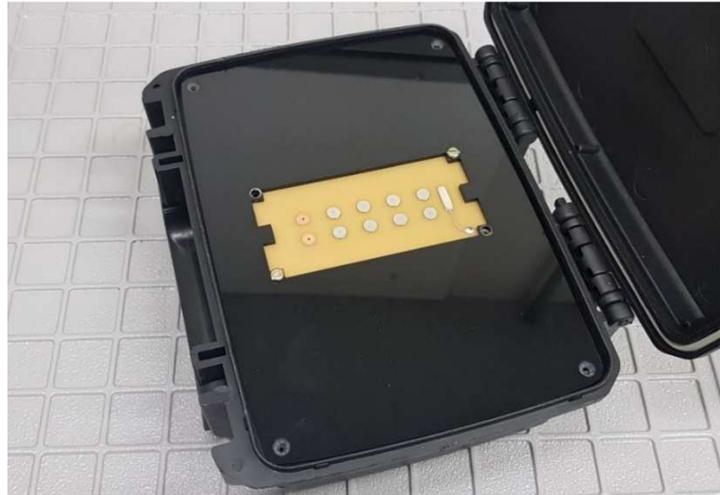
Da Figura 50 pode-se notar que o valor do capacitor no nó 1 é de 68 nF, enquanto os demais são de 56 nF. Tal diferença se deve pelo fato de o sinal de tensão no nó 1 apresentar um *overshoot*, como pode ser observado Figura 54 a). O valor maior de capacitância permite filtrar parte das frequências elevadas que compõem o *overshoot*, reduzindo seu efeito. Ainda na Figura 50 pode-se observar que o resistor no nó 7 é menor que os demais resistores. Isso se deve ao fato de o valor  $V_{DC}$  em todos os nós dependerem do valor do resistor no nó 7, que precisa ser um pouco menor para que a tensão  $V_{DC}$  seja a mesma. Ensaios mostram que o valor do resistor em 7 deve ser aproximadamente um terço do valor dos demais resistores.

A Figura 57 permite fazer a correlação entre o valor de tensão impulsiva, o número de círculos obtidos e a corrente da descarga atmosférica. Pode-se destacar que, para uma tensão  $V_{DC}$  de 900 V, a mínima tensão impulsiva necessária para se carregar a amostra com um círculo é de -101 V. Deve-se destacar que existe ainda um *offset* de aproximadamente 100 V, entretanto, este pode ser minimizado com a elevação da tensão contínua. A resolução do sistema, que pode ser facilmente elevada com a redução do valor de  $V_z$ , deve ser acompanhada do aumento do número de círculos, a fim de ajustar a faixa de operação do sistema com a faixa de operação da bobina, em torno de 350 V impulsivo.

#### 4.2. Instalação em campo e unidade de energia de *backup*

A instalação em campo requer que o sistema permaneça isolado e protegido de qualquer umidade que possa influenciar na operação do eletreto. O sistema é alocado em uma maleta plástica que abriga o circuito Walton-Cockroft e permite a conexão com a rede elétrica e com o cabo coaxial proveniente da bobina. A Figura 59 ilustra a maleta com os eletrodos circulares que compõem o eletrodo superior. No interior da maleta encontra-se o circuito gerador de alta tensão contínua de 1 kV.

Figura 59 Maleta plástica e eletrodo superior



Fonte: Autor.

A Figura 60 mostra o circuito gerador de alta tensão contínua configurado para operação em 1 kV.

Figura 60 Circuito gerador de alta tensão contínua



Fonte: Autor.

A Figura 61 ilustra o bastidor de alumínio com a amostra. O contato elétrico do bastidor com o gerador de alta tensão contínua polariza a parte metalizada da amostra. A película de Teflon FEP é justaposta e fixada com um grampo. Uma vez pronto, a amostra é colocada sobre os eletrodos circulares.

Figura 61 Bastidor de alumínio e amostra de Teflon FEP



Fonte: Autor.

A Figura 62 ilustra a montagem da amostra sobre o bastidor de alumínio.

Figura 62 Montagem do bastidor de alumínio com a amostra fixada



Fonte: Autor.

A Figura 63 ilustra o resultado obtido para o mesmo ensaio realizado na Figura 52, porém com a amostra em eletrodo retangular, conforme ilustrado na Figura 62, com uma tensão impulsiva de -200 V de pico e tensão contínua de 900 V. A revelação com pó de toner mostra 4 círculos, em conformidade com os resultados obtidos na Tabela 1.

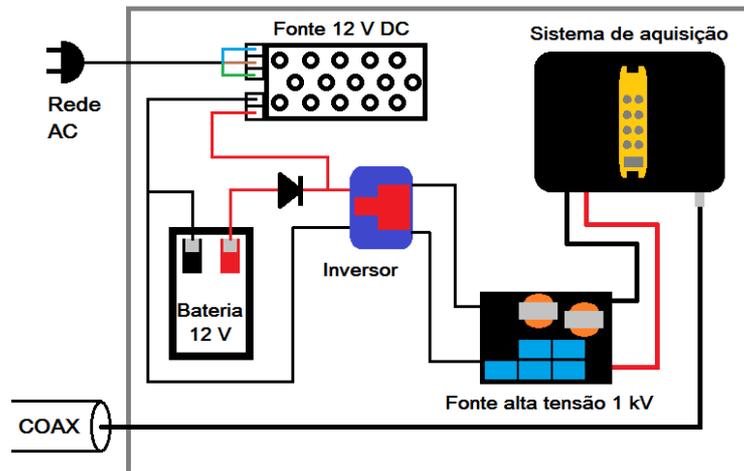
Figura 63 Amostra revelada com tensão impulsiva de 200 V de pico



Fonte: Autor.

O sistema é composto ainda de uma unidade de *backup*, caso haja falta de energia da rede principal. O sistema, ilustrado na Figura 64, é composto de uma bateria, uma fonte de tensão contínua de 12 V e um inversor, que suprime a fonte de alta tensão contínua do sistema de aquisição. Todo o sistema permanece protegido das intempéries por uma caixa metálica.

Figura 64 Sistema de alimentação e *backup*



Fonte: Autor.

O sistema completo é apresentado na Figura 65.

Figura 65 Sistema de aquisição de picos de correntes impulsivas a ser instalado em campo



Fonte: Autor.

## 5. Conclusões

Baseado em sólidas referências que trazem os grandes avanços da tecnologia dos eletretos, bem como em sistemas de medições que permitam medir tensões impulsivas com uma tecnologia robusta e composta de componentes totalmente passivos, propõe-se um sistema para medição de correntes provenientes de descargas atmosféricas. O elemento transdutor utilizado possui uma boa faixa de operação de tensões bem como boa resposta à impulsos atmosféricos, além de propiciar proteção para o sistema de medição da tensão proveniente da bobina. O circuito proposto para carregamento do eletreto constitui uma inovação na forma como estes materiais são carregados, permitindo uma seleção de regiões de carregamento proporcional ao valor de corrente da descarga atmosférica. As amostras uma vez carregadas, permitem a aferição da tensão de pico gerada pela bobina, e por sua correlação, a determinação da corrente de descargas atmosféricas de forma robusta e confiável. Ensaios preliminares mostram a possibilidade de carregamento do eletreto com o sistema proposto, embora questões como: melhoria no processo de preparação das amostras, melhoria na resolução dos diodos Zener, melhoria no processo de revelação da amostra e integração do sistema de medição com o sistema de transdução possam ser melhoradas.



## Referências

- ADAMS, E. P. On Electrets. **Journal of the Franklin Institute**, Philadelphia, v.204, n.4, p.469-486, Oct. 1927. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003227914161>>. Acesso em: 11 mai. 2018.
- ALTAFIM, R. A. C.; GIACOMETTI, J. A.; JANISZEWSKI, J. M. A Novel method for electret production using impulse voltages. **IEEE Transactions on electrical insulation**, v.27, n.4, p.739-743, 1992a. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/167220/>>. Acesso em: 11 mai. 2018.
- \_\_\_\_\_. An Electret transducer for Impulse Voltage Measurements. **IEEE Transactions on Industry Applications**, New York, v.28, n.5, p.1217-1222, Sept./Oct. 1992b. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/158851/>>. Acesso em: 11 mai. 2018.
- ALTAFIM, R. A. C.; JANISZEWSKI, J. M.; GIACOMETTI, J. A. Electret transducer for measuring impulse voltages and currents-application in lightning detection. In: CONFERENCE RECORD OF THE 1990, 1990, Seattle. **IEEE Industry Applications Society Annual Meeting**, v.1, p.893-896, 1990.
- ARAÚJO, L.; VISACRO, S. Low-cost systems for measurement of lightning-currents provided with remote access. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 34., Rzeszow, 2018. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ICLP.2018.8503475.
- ARGUESO, M.; ROBLES, G.; SANZ, J. Measurement of high frequency currents with a Rogowski coil. In: SPANISH PORTUGUESE CONGRESS ON ELECTRICAL ENGINEERING, 9., 2005, Marbella. **Proceedings...** Marbella: [s.n.], 2005.
- BERGER, K. Novel observations on lightning discharges: results of research on mount San Salvatore. **Journal of the Franklin Institute**, v.283, n.6, p.478-525, June 1967. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016003267905984>>. Acesso em: 26 fev. 2015.
- BERGER, K.; ANDERSON, R. A.; KRONINGER, H. Parameters of lightning flashes. **Electra**, v.41, p.23-37, 1975.
- BELLASCHI, P. L.; TEAGUE, W. L. Impulse and 60 cycle strength of air. **Electrical Engineering**, v.54, n.7, p.769-770, July 1935. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/6538944/>>. Acesso em: 11 mai. 2018.
- CHUBB, L. W.; FORTESCUE, C. The Calibration of the sphere gap voltmeter. **Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers**, v.32, n.2, p.627-638, Feb. 1913. Disponível em:<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6661202&queryText%3Dthe+calibration+of+the+sphere+gap>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

COX, J. H.; LEGG, J. W. The Klydonograph and Its applications to surge investigation. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v.44, p.857-871, Jan. 1925. Disponivel em:<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5061173&queryText%3Dthe+klydonograph>>. Acesso em: 22 fev. 2015.

CROUCH, K. E. **Calibration tests on magnetic tape lightning current detectors**. Pittsfield: Lighting Technologies, 1980. (NASA Contractor Report 3270).

DOMINGUES, C. et al. Electronic peak lightning current detector. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 14., Natal, 2017. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2017. p. 329-332. DOI: 10.1109/SIPDA.2017.8116946.

EGUCHI, M. On The Permanent electret. **Philosophical Magazine**, London, ser.6, v.49, p.178-182, 1925.

FALCONI, D. R. Amostra carregada com eletrodo esférico. 1 fotografia, color., 6,5cm x 6,9 cm, [2013a].

FALCONI, D. R.; ALTAFIM, R. A. P.; ALTAFIM, R. A. C. Impulse voltage sensor based on electret technology. In: SPANISH-PORTUGUESE CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, 13., 2013, Valencia. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2013b. Paper n. 230.

FALCONI, D. R. et al. Capacitive-electret sensor for measuring high-voltage discharges. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRETS, 16., 2017, Leuven. [S.l.:s.n.], 2017. p.149.

FESER, K. A New type of voltage divider for the measurement of high impulse and a.c. voltages. **Bulletin ASE**, v.62, n.19, p.929-935, 1971.

FLOWERS, J. W. The Direct measurement of lightning current. **Journal of the Franklin Institute**, Philadelphia, v.232, n.5, p.425-450, Nov. 1941. Disponivel em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003241900686>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

FOUST, C. M.; HENDERSON, J. T. Direct measurement of surge currents. **Electrical Engineering**, v.54, n.4, p.373-378, Apr. 1935. Disponivel em:<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6539143&queryText%3Ddirect+measurement+of+surge+currents>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

FUCHS, F. et al. Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes to tall structures relating to interference of electronic systems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.40, n.4, p.444-451, Nov. 1998. Disponivel em:<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=736205&queryText%3Dlightning+current+and+magnetic+fields+fuchs>>. Acesso em: 22 jan. 2015.

GAO, H. et al. Application of magnetic-optic crystal materials in the measurement of lightning current. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 13., 2015, Balneário Camboriu. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2015. p.314-317.

GIACOMETTI, J. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, O. N. Corona charging of polymers. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v.27, n.5, p.924-943, Oct. 1992. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/256470/>>. Acesso em: 11 mai. 2018.

GROSS, B. Experiments on electrets. **Physical Review**, Woodbury, v.66, n.1/2, p.26-28, 1944.

\_\_\_\_\_. Static charges on dielectrics. **British Journal of Applied Physics**, v.1, n.10, p.259-267, Oct. 1950.

GROSS, B.; DENARD, L. F. On Permanent charges in solid dielectrics I. Dielectrics absorption and temperature effects in carnauba wax. **Physical Review**, v.67, n.7/8, p.253-259, Apr. 1945.

GUTMANN, F. The Electret. **Reviews of Modern Physics**, Minneapolis, v.20, n.3, p.457-473, July 1948.

HEIDLER, F. et al. Parameters of lightning current given in IEC62305-background, experience and outlook. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 29., 2008, Uppsala. **Proceedings...** Uppsala: [s.n.], 2008. p.1-22.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **ANSI/IEEE Std 4-1978: IEEE standard techniques for high-voltage testing**. New York: IEEE, 1978. Disponível em:<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=18456>>. Acesso em: 19 mar. 2015.

LIN, Y. T. et al. Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements. **Journal of Geophysical Research**, v.84, n.C10, p.6307-6314, Oct. 1979. Disponível em:<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JC084iC10p06307/abstract>>. Acesso em: 7 mar. 2015.

LOEB, L. B. The Mechanism of lightning discharge. **Journal of the Franklin Institute**, Philadelphia, v.246, n.2, p.123-148, Aug. 1948. Disponível em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016003248903123>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

MASTER, M. J. et al. Calculations of lightning return stroke electric and magnetic fields above ground. **Journal of Geophysical Research**, v.86, n.C12, p.12-127-12-132, Dec. 1981. Disponível em:<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JC086iC12p12127/abstract>>. Acesso em: 7 mar. 2015.

MCMILLAN, F. O.; STARR, E. C. The Influence of polarity on high-voltage discharges. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v.50, n.1, p.23-33, Mar. 1931. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/5055733/>>. Acesso em: 11 mai. 2018.

MEEK, J. M. The Electric spark in air. **Journal of the Institution of Electrical Engineers – Part I: general**, v.89, n.20, p.335-356, Aug. 1942. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/5293804/>>. Acesso em: 11 mai. 2018.

MORENO, R. A.; GROSS B. Measurement of potential building and decay, surface charge density, and charging currents of corona-charged polymer foil electrets. **Journal of Applied Physics**, Menasha, v.47, n.8, p.3397-3402, 1976.

NORINDER, H. The Cathode oscillograph as used in the study of lightning and other surges on transmission lines. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineer**, v.47, n.2, p.446-455, Apr. 1928.

\_\_\_\_\_. Lightning currents and their variations. **Journal of the Franklin Institute**. Philadelphia, v.220, p.69–92, 1935.

PFEIFFER, W. High-frequency voltage stress of insulation. Methods of testing. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v.26, n.2, p.239-246, Apr. 1991. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/78324/>>. Acesso em: 11 mai. 2018.

PIM, J. A. The Electrical breakdown strength of air at ultra-high frequencies. **Journal of the Institution of Electrical Engineers**, v.1949, n.4, p.113-115, Apr. 1949. Disponível em:<<https://ieeexplore.ieee.org/document/5319865/>>. Acesso em: 11 mai. 2018.

RAKOV, V. A. Characterization of lightning electromagnetic fields and their modeling. In: EMC INTERNATIONAL SYMPOSIUM, Zurich, 2001a. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2001. p.3-16.

\_\_\_\_\_. Transient response of a tall object to lightning. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.43, n.4, p.654-661, Nov. 2001b. DOI: 10.1109/15.974646.

RAKOV, V. A. et al. Lightning parameters for engineering applications. **Electra**, n.269, p.58-65, 2013.

RAY, W. F.; HEWSON, C. R. High performance rogowski current transducers. In: CONFERENCE RECORD OF THE 2000 IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 2000, Rome. **Proceedings...** Rome: IEEE, 2000. p.3083-3090.

SCHONLAND, B. F. J. Progressive lightning. IV: the discharge mechanism. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, mathematical and physical sciences**, London, v.164, n.916, p.132-150, Jan. 1938. Disponível em:<<http://www.jstor.org/discover/10.2307/97002?sid=21106121370603&uid=3737664&uid=2&uid=4>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

SCHWAB, A. J.; PAGEL, J. H. W. Precision capacitive voltage divider for impulse voltage measurements. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v.PAS-91, n.6, p.2376-2382, Nov. 1972.

SESSLER, G. M. Charge distribution and transport in polymers. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.4, n.5, p.614-628, Oct. 1997.

\_\_\_\_\_. **Electrets**. Laplacian: Morgan Hill, 1998. v.1.

SESSLER, G. M.; WEST, J. E. Trap-modulated mobility of electrons and holes in Teflon FEP. **Journal of Applied Physics**, v.47, n.8, p.3480-3484, 1976.

SEWARD, E. W. The Electric strength of air at high frequencies. **Journal of the Institution of Electrical Engineers**, v.84, n.506, p.288-292, Feb. 1939. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5317914/>>. Acesso em: 11 mai. 2018.

SILVA, S. D. C. et al. Images from high-voltage impulse discharges evaluated with a developed graphical software. In: IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, Montevideo, 2014. **Proceedings...** Montevideo: [s.n.], 2014. p. 82-85. DOI: 10.1109/I2MTC.2014.6860704.

SILVA NETO, A. Torre de telecomunicação em Santo Ângelo-RS. 1 fotografia, color., 7,3 cm x 10 cm, (2017).

SOUSA, F. S. I.; ALTAFIM, R. A. C.; ALTAFIM, R. A. P. Lightning peak current sensor based on electret technology. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 2019. DOI: 10.1109/TEM.2019.2924670.

SOUSA, F. S. I. et al. Low-cost lightning current peak detector for installation on communication towers. In: IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, 2016, Montreal. **Proceedings...** p.113-116. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7548580/>>. Acesso em: 11 mai. 2018.

UMAN, M. A.; KRIDER, E. P. A Review of natural lightning: experimental data and modeling. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v.EMC-24, n.2, p.79-112, May 1982. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4091535&queryText%3Da+review+of+natural+lightning+uman>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

UMAN, M. A. et al. Correlated time derivatives of current, electric field intensity, and magnetic flux density for triggered lightning at 15 m. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n.D13, p.1-11, July 2002. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2000JD000249/abstract>>. Acesso em: 7 mar. 2015.

VAN THURNHOUT, J. Thermally stimulated discharges of polymer electrets. **Polymer Journal**, v.2, n.2, p.173-191, 1971.

VON SEGGERN, H. Identification of TSC peaks and surface-voltage stability in teflon FEP. **Journal of Applied Physics**, Menasha, v.50, n.4, p.2817-2821, 1979.

YAO, C. et al. Contactless measurement of lightning current using self-integrating B-dot probe. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.18, n.4, p.1323-

1327, Aug. 2011. Disponível

em:<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5976134&queryText%3Dcontactless+measurement+of+lightning>>. Acesso em: 12 jan. 2015.

YAO, C. et al. A Novel lightning current monitoring system based on the differential-integral loop. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.20, n.4, p.1247-1255, Aug. 2013. Disponível

em:<<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6571441&queryText%3Da+novel+lightning+current+monitoring>>. Acesso em: 12 jan. 2015.