Transdutor de pico de correntes de descargas atmosféricas para instalação em estruturas elevadas

Felipe Schiavon Inocência de Sousa

São Carlos

2016

Felipe Schiavon Inocência de Sousa

Transdutor de pico de correntes de descargas atmosféricas para instalação em estruturas elevadas

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
para obtenção do título de Mestre em Ciências,
Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistema Elétricos de
Potência.

Orientador: Prof. Titular Ruy Alberto Corrêa
Altafim.

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

São Carlos

2016

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

S725t Sousa, Felipe Schiavon Inocência de
Transdutor de pico de correntes de descargas
atmosféricas para instalação em estruturas elevadas /
Felipe Schiavon Inocência de Sousa; orientador Ruy
Alberto Corrêa Altafim. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - 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, 2016.

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

FOLHA DE JULGAMENTO

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

Título da dissertação: "Transdutor de pico de correntes de descargas atmosféricas para instalação em estruturas elevadas".

Data da defesa: 12/08/2016.

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Ruy Alberto Correa 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)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Agradecimentos

Ao Professor Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim pela orientação ao longo do mestrado.

Aos Professores convidados para a banca, Doutor Daniel Thomazini e Doutor Alexandre Piantini.

Aos meus pais, Francisco Inocência de Sousa e Rita de Cássia Schiavon Inocência de Sousa, pelo apoio incondicional.

À Rio Grande Energia (RGE), subsidiária do Grupo CPFL, pelo financiamento do projeto PA0030 – Padrões de RDA robusta frente a descargas atmosféricas diretas. Contratos RGE nº 4600031357 e nº 4600031324.

Ao Laboratório de Alta Tensão e Altas Corrente do Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo. Agradecimentos especiais ao Técnico de Laboratório Clóvis Yoshio Kodaira e ao Doutor Acácio Silva Neto.

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

Ao Grupo de Alta Tensão e Materiais (GATM), professores e colegas de trabalho: Mestre Daniel Augusto Pagi Ferreira, Doutor Yuri Andrey Olivato Assagra, Mestre Thamyres Tânulla Cavalcante Palitó e Engenheiro Felipe José de Carvalho.

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

Resumo

SOUSA, F. S. I. **Transdutor de pico de correntes de descargas atmosféricas para instalação em estruturas elevadas**. 2016. 84f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Este trabalho descreve um novo transdutor para medir os picos de correntes impulsivas originárias de descargas atmosféricas em torres elevadas, à exemplo das dedicadas à telefonia móvel. Os componentes do sistema constituem em uma bobina de Rogowski auto-integradora, fixada no topo da torre, um cabo coaxial, e uma unidade de aquisição do sinal alocada na base da torre. A bobina de Rogowski, fixada na base superior da torre, próxima ao captor do sistema de proteção de descargas atmosféricas, gera em seus terminais um sinal elétrico proporcional à variação do campo magnético produzido pela corrente da descarga, que é injetado no cabo coaxial. O sinal é transmitido com o mínimo de distorções até a base da torre. Conectado ao cabo está um osciloscópio que mede e armazena o sinal. O projeto foi simulado com o auxílio de *softwares* de análise de circuitos. Para a definição de todos os elementos deste projeto, foi realizada uma análise bibliográfica sobre descargas atmosféricas, particularmente sobre corrente impulsivas, campos magnéticos gerados e elementos de transdução por acoplamento magnético. Inicialmente as estruturas mecânicas foram modeladas no *software* Inventor para posterior confecção. Ensaios foram realizados no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para aferir o comportamento do sistema em situações de operação em correntes elevadas e como forma de calibração do sistema.

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

Abstract

SOUSA, F. S. I. **Lightning peak current transducer for installation on tall structures.** 2016. 84f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

The present work introduces a new transducer for measuring the peak of impulsive currents originated from tall structures, such as those related to telecommunication. The components of the system are the Rogowski coil, fixed on the top of the tower, the coaxial cable and an oscilloscope allocated at the base of the tower. The coil, fixed on the platform located on the tower top next to the lightning discharge protection system, generates an electric signal on its terminals that is proportional to the magnetic field variation generated by the current of the discharge. The signal is transmitted with a minimum distortion through the cable. An oscilloscope is connected to the cable and it measures and store data obtained from the signal. The project was simulated using circuit analysis software. In order to develop all the components of the system, an extensive literature review was performed, particularly related to impulsive currents, related magnetic fields and magnetic coupling transducers. The mechanical structures were designed using the Inventor software for further construction. The first calibration tests were already performed. Tests were performed at the Instituto de Energia e Ambiente (IEE-USP) to calibrate the system and to determine the system behavior when working with impulsive peak currents.

Keywords: Current transducer. Rogowski coil. Tall structures. Current peak. Impulsive current. Signal acquisition. Data storage.

Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição de cargas na nuvem Fonte: Adaptado de Uman e Krider (1982, p. 80).....	24
Figura 2 - Polaridade dos diferentes tipos de descargas atmosféricas Fonte: Adaptado de Heidler et al. (2008, p. 2).....	25
Figura 3 - Descarga atmosférica com múltiplos <i>return strokes</i> Fonte: Adaptado de Heidler et al. (2008, p. 3).....	26
Figura 4 - Formas de onda de corrente para primeiro <i>return strokes</i> negativo Fonte: Berger (1967, p. 492).....	27
Figura 5 - Formas de onda de <i>return strokes</i> negativos subsequentes Fonte: Berger (1967, p. 493).....	28
Figura 6 - Ocorrência dos diferentes tipos de descargas atmosféricas Fonte: Adaptado de Heidler et al. (2008, p. 10).....	29
Figura 7 - Densidade de fluxo magnético para 10, 20 e 50 quilômetros Fonte: Lin et al. (1979, p. 6308).....	30
Figura 8 - Densidade de fluxo magnético Fonte: Lin et al. (1979, p. 6309)	31
Figura 9 - Formas de onda da intensidade de campo magnético em função da altura e distância Fonte: Adaptado de Master et al. (1981, p. 12,132).....	32
Figura 10 - Gráficos de densidade de fluxo magnético, corrente, variação de densidade de fluxo e variação de corrente para dois <i>return strokes</i> subsequentes Fonte: Adaptado de Uman et al. (2002, p. 4).....	33
Figura 11 - Esquemático do Klydonografo Fonte: Adaptado de Cox e Legg (1925, p. 858)	35
Figura 12 - Figuras de Lichtenberg obtidas a partir do Klydonografo Fonte: Adaptado de Cox e Legg (1925, p. 858, 859).....	36
Figura 13 – Transdutor de pico de tensão impulsiva baseado na tecnologia de eletretos Fonte: Adaptado de Altafim et al. (1992).....	37
Figura 14 – Curva de calibração do sensor Fonte: Adaptado de Altafim et al. (1992) ..	37
Figura 15 - Disposição das barras magnéticas em relação ao condutor Fonte: Adaptado de Foust e Henderson (1935, p. 374).....	38
Figura 16 - Conexões externas do osciloscópio	40
Figura 17 - Posicionamento do sensor de descargas atmosféricas Fonte: Adaptado de Yao et al. (2013, p. 1251).....	44

Figura 18 - Transdução por acoplamento magnético Fonte: Adaptado de Thomas (1970, p. 107).....	45
Figura 19 - Bobina de Rogowski Fonte: Ray e Hewson (2000, p. 3083).....	46
Figura 20 - Circuito equivalente da bobina de Rogowski Fonte: Adaptado de Argueso et al. (2005).....	48
Figura 21 - Integrador passivo Fonte: Ward e Exon (1993, p. 110).....	49
Figura 22 - Integrador ativo Fonte: Ward e Exon (1993, p. 108).....	49
Figura 23 - Diagrama do sistema instalado na torre.....	51
Figura 24 - Bobina com enrolamento de cobre	52
Figura 25 - Estrutura de fixação da bobina com esquemático de dimensões.....	53
Figura 27 - Bobina de Rogowski construída	53
Figura 28 - Detalhe da bobina e invólucro de fixação para ensaios.....	54
Figura 29 – Bobina e estrutura condutora da torre	54
Figura 30 - Circuito equivalente da bobina conectada ao analisador	56
Figura 31 - Cabo coaxial	57
Figura 32 – Modelo em elementos concentrados do cabo.....	58
Figura 33 - Modelo para determinação da impedância de entrada.....	58
Figura 34 - Mini osciloscópio DSO 201.....	60
Figura 35 - Circuito do gerador de corrente 1.2/50 microssegundos	61
Figura 36 - Detalhe do circuito da bobina em simulação	62
Figura 37 – Modelo do cabo coaxial	62
Figura 38 - Gráficos do módulo de impedância e fase da bobina para determinação do valor de resistência	63
Figura 39 - Circuito elétrico equivalente para determinação da resistência própria da bobina	64
Figura 40 - Gráfico do módulo de impedância e fase para determinação de indutância e capacitância	65
Figura 41 - Circuito elétrico equivalente para determinação da indutância e capacitância	65
Figura 42 - Diagrama da parte real do módulo da impedância característica e fase	67
Figura 43 - Gerador utilizado em ensaios no LATM EESC-USP.....	68
Figura 44 - Relação entre tensão da bobina e corrente simulada	69
Figura 45 - Forma de onda de tensão da bobina utilizando-se o cabo coaxial de 100 metros	71

Figura 46 - Medida do valor de tensão da bobina utilizando o DSO 201	71
Figura 47 - Esquemático da montagem de ensaio no IEE-USP	73
Figura 48 – Bobina imediatamente acima do tambor.....	73
Figura 49 - Bobina a 70 centímetros do tambor	74
Figura 50 - Bobina posicionada na porção final da barra condutora.....	74
Figura 51 - Gráfico obtido utilizando-se a bobina de Rogowski para uma forma de onda 8/20 microssegundos	75
Figura 52 - Formas de onda de corrente normalizadas.....	75

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 - Valores de módulo de impedância e fase e parâmetros de circuito medidos	66
Tabela 4.2 – Ensaio de teste de linearidade e exatidão	68
Tabela 4.3 – Valores de determinação da precisão do osciloscópio DSO 201	70
Tabela 4.4 - Resultados obtidos para montagem das figuras 47 e 48.....	76
Tabela 4.5 - Valores obtidos para a montagem da figura 49	76

Sumário

1.	Introdução.....	21
1.1	Objetivos	22
1.2	Organização do trabalho	22
2.	Revisão Bibliográfica.....	23
2.1	Aspectos da formação de descargas atmosféricas	23
2.1.1	Formação de descargas atmosféricas	23
2.1.2	Polaridade.....	25
2.1.3	Forma de onda de corrente	26
2.1.4	Estatísticas	28
2.1.5	Corrente e densidade de fluxo magnético	29
2.2	Técnicas de medição de descargas atmosféricas	34
2.2.1	Medição por <i>gap</i> entre esferas	34
2.2.2	Medição por figuras de Lichtenberg e o Klydonografo	35
2.2.3	Medição por transdutor de eletreto.....	36
2.2.4	Medidor por retenção magnética.....	38
2.2.5	Osciloscópio de raios catódicos e medição em estruturas elevadas..	39
2.2.6	Estações de medição em torres de telecomunicação	40
2.2.7	Medidor <i>B-dot Probe</i>	42
2.2.8	Sistema de monitoramento de corrente de descargas.....	43
2.3	Bobina de Rogowski	44
2.3.1	Apresentação, caracterização e principais aplicações	44
2.3.2	Princípio de operação e modelagem.....	46
2.3.3	Métodos de integração do sinal de tensão	48
2.4	Considerações finais	50
3.	Sensor de pico de corrente impulsiva.....	51
3.1	Bobina de Rogowski	51

3.1.1	Construção.....	52
3.1.2	Indutância mútua	54
3.1.3	Determinação dos parâmetros R, L e C da bobina.....	56
3.2	Cabo Coaxial.....	57
3.2.1	Determinação dos parâmetros de circuito	57
3.3	Sistema de aquisição de dados.....	59
3.3.1	Osciloscópio DSO 201	59
3.4	Simulação SPICE do sistema.....	60
3.4.1	Circuito gerador de corrente.....	61
3.4.2	Modelagem da Bobina	61
3.4.3	Circuito do cabo coaxial.....	62
4.	Análises e Resultados.....	63
4.1	Bobina.....	63
4.1.1	Determinação dos parâmetros da bobina	63
4.2	Cabo coaxial.....	65
4.2.1	Determinação dos parâmetros do cabo coaxial.....	65
4.3	Ensaio em laboratório e simulações	68
4.3.1	Ensaio de precisão e convergência do modelo	68
4.3.2	Ensaio no Instituto de Energia e Ambiente	72
4.4	Outros resultados	77
5.	Conclusões e trabalhos futuros.....	79
5.1	Conclusões	79
5.2	Trabalhos futuros	79
	Referências.....	79

1. Introdução

A evolução nos últimos anos da telefonia móvel e dos sistemas de comunicação sem fio, em especial nas subestações de energia, fez surgir a necessidade de uma infraestrutura cada vez maior de torres de transmissão de dados para cobertura da rede. Estas estruturas podem ser instaladas em centros urbanos, regiões periféricas ou em zonas rurais. Encontram-se instaladas nessas estruturas as antenas acopladas à equipamentos eletrônicos e alimentados pela rede de distribuição de energia elétrica. Como normalmente constituem-se nos pontos mais altos das regiões de sua instalação, ficam susceptíveis às descargas atmosféricas e necessitam ser devidamente protegidas por sistemas de proteção adequados.

Soma-se a esta condição adversa o fato de que o Brasil figura entre os principais países atingidos anualmente por raios, devido principalmente a seu nível cerâmico elevado. Esta situação pode se tornar um problema quanto à qualidade e continuidade do funcionamento do sistema de telecomunicações e operação de todo o sistema elétrico nacional, acarretando às empresas de telecomunicação e concessionárias de energia inúmeros prejuízos materiais, multas e transtornos aos seus clientes usuários. No entanto, como ainda existem muitas dúvidas quanto aos valores e densidades destas correntes, o cenário é propício para um aprofundamento nos estudos destes fenômenos e suas características.

Devido à infraestrutura existente para operação destas torres de telecomunicação, a medição dos parâmetros de descargas, em especial aqueles relacionados à corrente impulsiva, pode ser realizada em vários pontos, desde que sejam utilizados sensores de baixo custo. Essa condição, no entanto, constitui-se num fator limitante dos parâmetros mensurados. Neste contexto, o cerne deste trabalho será a medição apenas do pico de correntes impulsivas, por um novo sensor de pico de corrente, cujas características principais são a de ser confiável, compacto, econômico e de fácil calibração e leitura. Ressalta-se ainda que os valores medidos desses picos de correntes poderão auxiliar os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, não só quanto aos equipamentos instalados nas estruturas elevadas, como também nas linhas de distribuição e transmissão de energia.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivos:

- Realizar o projeto e construção de um sensor de pico de corrente de descargas atmosféricas preciso e de baixo custo;
- Apresentar as etapas de projeto por meio de cálculos, simulações e medições dos componentes que compõem o sistema;
- Apresentar os resultados em ensaios e simulações para o sistema de medição completo.

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho apresenta a seguinte estrutura e organização. O primeiro capítulo apresenta uma breve contextualização da problemática atual com relação à medição de descargas atmosféricas em estruturas elevadas, particularmente aquelas destinadas à transmissão de dados de telefonia móvel.

O segundo capítulo aborda o processo de formação das descargas atmosféricas, suas principais etapas e características, com ênfase no estudo da forma de onda da corrente gerada pela descarga e os campos eletromagnéticos decorrentes. O capítulo aborda ainda estatísticas de valores de corrente e frequência de ocorrência de descargas atmosféricas em estruturas elevadas. Apresenta-se diversas técnicas de medição de picos de corrente impulsiva desenvolvidos ao longo de um século. Ainda neste capítulo, o transdutor de pico de corrente baseado na bobina de Rogowski é exposto, ressaltando seu princípio de operação, suas aplicações e vantagens.

O terceiro capítulo apresenta a modelagem e simulação da bobina de Rogowski e a determinação dos principais parâmetros de seu modelo em circuitos elétricos. Apresenta ainda a determinação dos parâmetros do cabo coaxial e as principais características do osciloscópio digital utilizado para armazenagem dos valores medidos.

O quarto capítulo apresenta o equipamento construído, os resultados obtidos em simulações e os resultados obtidos em testes.

O quinto capítulo apresenta as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

A seguir é apresentada uma revisão bibliográfica como fundamentação teórica para a simulação e construção do transdutor proposto. A bibliografia compreende o processo de formação de descargas atmosféricas, seus principais parâmetros, as principais técnicas de medição utilizadas e ainda em uso e finalmente um estudo aprofundado sobre a bobina de Rogowski.

2.1 Aspectos da formação de descargas atmosféricas

Muito do conhecimento sobre descargas atmosféricas disponível atualmente teve como base observações feitas sobre o fenômeno no começo do século XX. A observação, ainda que puramente qualitativa, consolidou a base para metodologia utilizada no estudo dos fenômenos, e fomentou o desenvolvimento de novos instrumentos e técnicas. Segundo Loeb (1948), grandes avanços no entendimento do mecanismo de formação das descargas atmosféricas foram possíveis graças à análise dos fenômenos por instrumentos de medição e gravação de dados. Inicialmente caracterizada por fotografias em alta velocidade das descargas atmosféricas e medições indiretas de tensão e corrente, os estudos aferiam principalmente a temporização das diversas etapas que compõem os raios e aspectos como luminosidade e intensidade de corrente. Nesta seção, a principal ênfase repousa no estudo da forma de onda de corrente, do campo magnético e de seus respectivos valores de pico.

2.1.1 Formação de descargas atmosféricas

Segundo Uman e Krider (1982, p. 79), “uma descarga típica se inicia na nuvem em direção ao solo, com duração média de 0,5 segundos. Uma descarga completa possui vários elementos componentes que ocorrem em tempos distintos, normalmente com três ou quatro componentes com correntes elevadas chamados de *strokes*”. Entretanto, podem ocorrer descargas oriundas de estruturas elevadas, como torres e montanhas, em direção à nuvem, com cargas tanto negativas quanto positivas. O tipo mais recorrente é aquele que ocorre com movimento descendente de cargas negativas da nuvem em direção ao solo.

Uman e Krider (1982) apresentam como disposição usual de cargas na nuvem a formação apresentada na figura 1a, onde N e P são cargas negativas e positivas, respectivamente. Loeb (1948) afirma que a descarga se inicia com um processo invisível que abre caminho ao longo do ar, chamado *pilot streamer*. Neste processo, elétrons

percorrem o ar gerando íons, que formarão o canal principal da descarga, e que iniciarão o processo de avalanche. Segundo Schonland (1938, p. 132), “um *streamer* é uma porção filamentar condutora formada por gás ionizado que se estende devido ao processo de ionização gerado pelo forte campo elétrico presente em sua ponta” (figura 1b). Entretanto, há uma queda de potencial elétrico ao longo do canal, o que propicia a condução de corrente através do mesmo e o acréscimo de novas cargas que irão dar continuidade ao processo.

Figura 1 - Distribuição de cargas na nuvem
Fonte: Adaptado de Uman e Krider (1982, p. 80)

A etapa de completa formação do canal é precedida por uma série de impulsos originados na nuvem em direção ao chão, que ocorrem em passos a intervalos regulares, chamados de *stepped leaders* (figura 1c, 1d e 1e). Segundo Schonland (1938, p. 136) “Esta característica intermitente e impulsiva se deve à variação da intensidade de campo elétrico do *streamer*”. De acordo com Loeb (1948), para que haja o processo de ionização do ar, é necessário um campo elétrico com intensidade superior a um valor crítico. A recombinação de íons no ar ao redor do canal reduz a intensidade do campo elétrico interrompendo o processo de avalanche e reduzindo a quantidade de cargas descendentes da nuvem. Apenas quando o campo elétrico atinge o valor crítico novamente, o processo de ionização pode se repetir, e criar condições para originar um novo *leader*.

Uma vez próximo ao solo, o campo elétrico gerado pelas cargas na ponta do *stepped leader* induzem a formação de um novo canal originado no solo ou em qualquer objeto carregado tais como: torres, linhas de transmissão e edifícios. Este fenômeno é conhecido por *attachment process*, ou processo de ligação (figura 1f). Uman e Krider (1982) consideram este processo como o momento em que se pode definir o ponto de impacto da descarga. Segundo os autores, normalmente isto ocorre algumas dezenas de metros acima do solo ou de qualquer outra estrutura elevada.

O processo de ligação completa a formação do canal entre nuvem e solo. A partir deste estágio, ocorre uma grande transferência de cargas do solo para a nuvem, em um processo conhecido como *return stroke*. Uman e Krider (1982, p. 88) referem-se à esta etapa como “a mais estudada e conhecida entre as etapas componentes de uma descarga atmosférica, em parte devido à facilidade de medição, mas também pelo interesse prático de seus efeitos em estruturas elevadas e equipamentos eletrônicos”. Após uma recombinação de cargas no interior da nuvem, um novo *stroke*, conhecido como *dart leader*, normalmente menos intenso em relação ao primeiro, pode percorrer o canal em direção ao solo. Este processo pode se suceder até que o canal seja interrompido e a descarga atmosférica extinta.

2.1.2 Polaridade

De acordo com Heidler et al. (2008, p. 2) “descargas atmosféricas que transferem cargas negativas ao solo são denominadas descargas de polaridade negativa, enquanto as que transferem cargas positivas são denominadas descargas de polaridade positiva”. Ainda segundo os autores, “devido ao processo inicial de formação, as descargas atmosféricas são classificadas descendentes e ascendentes”.

Figura 2 - Polaridade dos diferentes tipos de descargas atmosféricas
Fonte: Adaptado de Heidler et al. (2008, p. 2)

A figura 2 apresenta as quatro configurações possíveis de polaridade de uma descarga atmosférica. Nas figura 2a, 2b, 2c e 2d são indicados respectivamente: descarga negativa descendente, descarga positiva descendente, descarga negativa ascendente, descarga positiva ascendente. Ainda de acordo com Heidler et al. (2008, p. 2) “Edifícios pequenos de até 100 metros são quase que exclusivamente atingidos por descargas

descendentes”. Entretanto, segundo o autor descargas ascendentes podem se originar no topo de estruturas muito altas, com no mínimo 100 metros de altura.

2.1.3 Forma de onda de corrente

Berger (1967) descreve a forma de onda da corrente do *return stroke* dividindo-a em duas seções principais. A primeira seção, também chamada de pico de corrente, apresenta tempo de subida abrupto e é caracterizada por ter duração inferior a 500 microssegundos e amplitudes que variam de 20 a 40 kA. Segue-se então uma etapa de corrente de longa duração definida como corrente contínua ou cauda, com amplitudes inferiores a 100 A e duração de algumas centenas de milissegundos. Uman e Krider (1982) estabelecem um intervalo de duração para o pico de corrente de no máximo 1 microssegundo, com um intervalo de duração médio de corrente contínua de 150 milissegundos.

A figura 3 apresenta o perfil de uma descarga atmosférica ao longo do tempo. A escala de corrente encontra-se à esquerda em kA, e a escala de tempo é apresentada na parte inferior do gráfico. A figura consiste de 11 *return strokes*, sendo que o primeiro apresenta uma corrente de 63 kA, seguido de múltiplos *return strokes* (subsequentes). No oitavo *return stroke* destaca-se a corrente contínua, com duração muito maior, porém com amplitudes baixas.

Figura 3 - Descarga atmosférica com múltiplos *return strokes*
 Fonte: Adaptado de Heidler et al. (2008, p. 3)

De acordo com Berger (1967), a maior parte das descargas atmosféricas apresentam apenas um primeiro *return stroke*, podendo ocorrer descargas subsequentes. A figura 4 apresenta formas de onda obtidas do primeiro *return stroke* por osciloscópio de raios catódicos em diferentes escalas de tempo. O valor da corrente em kA é apresentado na coluna da esquerda e o valor de tempo em duas escalas na parte superior do gráfico.

Figura 4 - Formas de onda de corrente para primeiro *return strokes* negativo
 Fonte: Berger (1967, p. 492)

A figura 5 apresenta a forma de onda de corrente para *return strokes* subsequentes. É importante destacar que os picos de corrente subsequentes apresentam tempo de subida mais agudo em relação ao tempo de subida do primeiro pico de corrente. Isso se deve em grande parte pelo fato de o canal já apresentar uma ionização elevada pela passagem da corrente do primeiro *return stroke* e pelas elevadas temperaturas do ar ao redor do canal.

Figura 5 - Formas de onda de *return strokes* negativos subsequentes
 Fonte: Berger (1967, p. 493)

Embora apresentem uma taxa de variação de corrente maior, *return strokes* subsequentes normalmente apresentam amplitudes menores, conforme exposto anteriormente na figura 3. *Return strokes* positivos normalmente apresentam amplitudes de corrente bastante elevadas, normalmente da ordem de 100 kA ou mais. Na seção seguinte são apresentados dados estatísticos relacionados aos diferentes tipos de descargas atmosféricas.

2.1.4 Estatísticas

As estatísticas consideram, normalmente, os valores de pico de corrente para os diferentes tipos de descargas atmosféricas. Heidler et al. (2008) destaca que para primeiros *return strokes*, o valor médio de pico de corrente é de 30 kA, enquanto que para *return strokes* subsequentes o valor de pico de corrente médio é de 12 kA. Os dados são condizentes com os valores obtidos em medições realizadas em várias estações em diferentes localidades, como destacado por Rakov et al. (2013).

Figura 6 - Ocorrência dos diferentes tipos de descargas atmosféricas
 Fonte: Adaptado de Heidler et al. (2008, p. 10)

Com relação à intensidade da descarga e sua ocorrência, a figura 6 apresenta, nas curvas 1, 2 e 3 respectivamente: pico de corrente para primeiro *return stroke* negativo, *return stroke* subsequente negativo e *return stroke* positivo. Embora a frequência de ocorrência de descargas atmosféricas negativas seja muito maior que as positivas, estas apresentam valores de pico de corrente mais elevados, conforme a curva 3 da figura 6. De fato, os valores máximos de corrente impulsiva são encontrados, segundo Heidler et al. (2008) em descargas positivas.

2.1.5 Corrente e densidade de fluxo magnético

A correlação entre campo magnético e corrente é direta, tanto com relação à forma de onda, quanto à magnitude. O projeto de blindagem de equipamentos eletrônicos e proteção de estruturas, bem como o projeto de um sensor de pico de corrente deve levar em conta em sua concepção, uma correta interpretação das principais propriedades associadas a estas grandezas. Deve-se considerar também sua dependência com relação ao posicionamento dos sensores e a forma como os campos gerados interagem com o equipamento.

Lin et al. (1979) realizaram medições dos valores de densidade de campo magnético de descargas atmosféricas como função da distância. Utilizando antenas dispostas em

distâncias pré-estabelecidas, compuseram os gráficos apresentados na figura 7. A figura apresenta valores da densidade de fluxo magnético obtida para distancias de 10, 15, 50 e 200 quilômetros com escala de tempo de 50 microssegundos para: o primeiro *return stroke* (linha sólida) e *return stroke* subsequente (linha tracejada). Nos gráficos é possível destacar o momento em que o valor de densidade de fluxo magnético atinge um pico inicial (*initial peak*), o momento em que atinge o valor de pico (*hump*) e o momento em que a densidade de fluxo atinge seu valor médio (*half value*). É possível destacar ainda a dependência da densidade de fluxo magnético (valor na escala à esquerda do gráfico) com a distância (escala abaixo do gráfico).

Figura 7 - Densidade de fluxo magnético para 10, 20 e 50 quilômetros
Fonte: Lin et al. (1979, p. 6308)

A figura 8 apresenta a densidade de fluxo magnético obtida por Lin et al. (1979) para uma medição de descarga composta por dois *return strokes*, realizada a 51 quilômetros da estação de medição. Na legenda, B_{1NS} e B_{2NS} representam, respectivamente, densidade de fluxo magnético para o primeiro e para o segundo *return*

stroke. É possível destacar o valor de pico, seguido por uma atenuação suave ao longo do tempo. Conforme apresentado na Seção 2.1.3, é possível identificar pelo valor da densidade de fluxo magnético qual linha do gráfico corresponde ao primeiro *return stroke* ou à um *return stroke* subsequente pela observação do valor de pico do fluxo magnético na escala.

Figura 8 - Densidade de fluxo magnético
Fonte: Lin et al. (1979, p. 6309)

Master et al. (1981) desenvolveram, a partir de dados coletados em medições, uma modelagem dos campos elétricos e magnéticos gerados pelas descargas, como função da altura e da distância do ponto de impacto do raio. A partir do modelo gerado, foram computados gráficos para alturas variando do nível do solo até 10 quilômetros, e distâncias do ponto de impacto variando de 20 metros até 10 quilômetros. A possibilidade de se adotar um modelo permite uma maior padronização dos parâmetros principais e das formas de onda que caracterizam a descarga atmosférica. Modelos bem definidos permitem ainda a realização de simulações com o objetivo de prever o comportamento de equipamentos em situações de correntes e tensões elevadas.

Na figura 9 é possível verificar as diversas formas de onda para diferentes valores de altura e distância. As linhas sólidas representam a forma de onda do campo magnético sem levar em consideração o efeito da altura, as linhas tracejadas representam a forma de onda do campo magnético levando-se em consideração este efeito. De acordo com Master et al. (1981), a altura apresenta influência significativa na intensidade de corrente e velocidade de propagação do *return stroke* ao longo do canal. Pode-se destacar ainda na figura 9 o efeito de atenuação da forma de onda com relação à altura e extinção do valor de pico do campo magnético para distâncias maiores que 1 quilômetro ao longo do nível do solo. Tais características podem ter grande influência nos resultados das medições.

Figura 9 - Formas de onda da intensidade de campo magnético em função da altura e distância

Fonte: Adaptado de Master et al. (1981, p. 12,132)

Uman et al. (2002) realizaram experimentos por meio da indução de descargas atmosféricas provenientes de nuvens naturais utilizando foguetes (*triggered lightning*). A descarga é induzida pelo foguete e atinge o ponto de impacto em uma barra metálica de dois metros presa ao solo. Fixado no solo a uma distância de 15 metros do ponto de impacto encontra-se uma antena para medição de: intensidade de campo elétrico, variação de campo elétrico, densidade de fluxo magnético e variação da densidade de fluxo magnético. Na base da barra é montado um medidor de corrente e de variação de corrente.

O trabalho de Uman et al. (2002) traz informações importantes à respeito da natureza das descargas atmosféricas com relação aos campos eletromagnéticos induzidos. A figura 10 apresenta os gráficos das medições de corrente, variação de corrente, densidade de fluxo magnético e variação da densidade de fluxo magnético, sendo os dois últimos medidos a uma distância de quinze metros do ponto de impacto. As medições foram realizadas para dois *return strokes* subsequentes provenientes do mesmo raio (figura 10a e 10b respectivamente).

Figura 10 - Gráficos de densidade de fluxo magnético, corrente, variação de densidade de fluxo e variação de corrente para dois *return strokes* subsequentes
 Fonte: Adaptado de Uman et al. (2002, p. 4)

É importante destacar a grande semelhança entre os gráficos de corrente e densidade de fluxo magnético e variação de corrente e variação de densidade de fluxo magnético, enfatizando a estreita relação entre as duas grandezas e a forma quase idêntica como

variam sua magnitude ao longo do tempo. Sensores de pico de corrente utilizam, de modo frequente, o campo magnético gerado pela corrente de descarga para traduzir sua amplitude em um valor de tensão mensurável. Esta correlação é de fundamental importância para o projeto do sensor proposto neste trabalho.

2.2 Técnicas de medição de descargas atmosféricas

Ao longo do século XX, foram desenvolvidas várias técnicas para medição das descargas atmosféricas. Inicialmente, estes métodos permitiam uma análise indireta do valor de pico de corrente ou tensão. Grande avanço se deu na utilização de câmeras de alta velocidade para gravação das diversas etapas que compõem o raio. As filmagens permitiam análises, por exemplo, da intensidade luminosa do *stepped leader* ou *return stroke* e revelavam ainda a formação do processo de ligação. A partir de uma verificação quadro a quadro, era possível determinar o intervalo de duração de cada componente e da descarga total. Posteriormente, avanços em técnicas de oscilografura e o advento de instrumentos eletrônicos possibilitaram a medição de parâmetros como corrente e tensão, variação de corrente, campos elétricos e magnéticos com precisão e nível de detalhamento cada vez maior.

2.2.1 Medição por *gap* entre esferas

Segundo Foust e Henderson (1935, p. 373), “o método de medição por espaçamento entre esferas foi, por muito tempo, o único método disponível para medição do valor máximo de tensão”. O método consistia em duas esferas metálicas separadas por um *gap* de ar. A calibração era realizada aplicando tensão alternada aos terminais das esferas, que carregava o dielétrico, no caso o ar, até uma tensão máxima de ruptura, proporcional ao valor do *gap* de ar. O valor de tensão era então medido com um galvanômetro.

De acordo com o trabalho de Chubb e Fortescue (1913), as medições foram realizadas considerando-se apenas formas de onda senoidais. A frequência do sinal alternado foi medida em uma faixa de 25 Hz a 60 Hz, para esferas separadas por distâncias de 25 cm, 37,5 cm e 50 cm. Como resultado, curvas de calibração que correlacionam o valor da distância medida entre as esferas com o valor da tensão de ruptura foram apresentadas. Os autores concluíram a partir dos resultados das medições que a frequência e a forma de onda do sinal não influenciavam de maneira significativa na precisão do método, permitindo uma medição precisa do valor de tensão.

Entretanto, Cox e Legg (1925) apresentaram uma série de limitações ao método supracitado. Dentre tais limitações destaca-se: atraso na resposta do equipamento quando operando com valores de tensão muito próximos ao valor de ruptura, a influência do diâmetro das esferas no valor de medição, a ausência de qualquer leitura física do aparelho, seu tamanho e custo excessivos e elevada interferência na rede à qual está conectado.

2.2.2 Medição por figuras de Lichtenberg e o Klydonografo

Segundo Cox e Legg (1925, p. 857), “em 1777, G. C. Lichtenberg observou que, ao espalhar farinha sobre uma superfície isolante previamente carregada por uma descarga, a farinha se aglomerava sobre a superfície obedecendo um padrão distinto”. Como resultado, a substância tendia a ser repelida do ponto onde ocorreu a descarga, formando uma figura circular. Posteriormente, os autores propuseram um aparelho capaz de gerar registros de descargas atmosféricas utilizando-se do princípio descrito acima.

O Klydonografo consistia de um filme fotográfico, armazenado em uma caixa, com o lado do filme que contem a emulsão fotográfica apoiado sobre material isolante. Do outro lado do filme é apoiado um eletrodo pontiagudo. A figura 11 apresenta um esquemático do instrumento. Ao ser atingido por uma descarga elétrica, a emulsão agia como a farinha, e a superfície apresentava figuras semelhantes a um arvorejamento, compostas de linhas que partiam sempre do centro da descarga.

Figura 11 - Esquemático do Klydonografo
Fonte: Adaptado de Cox e Legg (1925, p. 858)

De acordo com a forma e espessura das linhas e o diâmetro das figuras, era possível determinar o valor de tensão, polaridade, frente de onda e se a descarga era unidirecional ou oscilatória. Os gráficos obtidos eram correlacionados aos padrões previamente obtidos em laboratório. A figura 12 apresenta figuras de Lichtenberg diversas obtidas por Cox e Legg (1925). As figura 12a, 12b, 12c e 12d ilustram, respectivamente, uma descarga impulsiva de polaridade positiva, descarga impulsiva de polaridade negativa, descarga impulsiva de polaridade positiva acima do valor de operação do aparelho e descarga oscilatória.

Figura 12 - Figuras de Lichtenberg obtidas a partir do Klydonografo
Fonte: Adaptado de Cox e Legg (1925, p. 858, 859)

O método exposto apresenta uma série de vantagens com relação ao apresentado na Seção 2.2.1, como por exemplo: a geração de resultados gráficos em suas leituras e a possibilidade de se determinar uma série de parâmetros do impulso medido. Destaca-se ainda a facilidade de instalação do medidor e seu custo relativamente baixo.

2.2.3 Medição por transdutor de eletreto

Altafim et al. (1992) apresentam o medidor de pico de tensão baseado na tecnologia de eletretos para determinar de forma indireta, o pico de tensão originado de descargas atmosféricas em linhas de transmissão e distribuição. No elemento transdutor em questão, uma fina película de material dielétrico com grande capacidade de aprisionar cargas, conhecido por eletreto, é disposta sobre um eletrodo planar. Dentre os materiais que se enquadram na categoria de eletretos, os autores realizaram estudos com uma película de 50 micrometros de espessura de Teflon-FEP (Flúor etileno propileno), sendo que um dos lados da película permanece metalizado. A figura 13 ilustra a montagem do transdutor.

Figura 13 – Transdutor de pico de tensão impulsiva baseado na tecnologia de eletretos
Fonte: Adaptado de Altafim et al. (1992)

Um outro eletrodo é disposto logo acima da película, o perfil deste eletrodo pode ser planar ou cilíndrico. Quando aplicado uma tensão impulsiva, a película aprisiona cargas em sua estrutura molecular. O valor de tensão impulsiva aplicado pode ser correlacionado com a medida da largura da área carregada sobre a película, na figura identificada por δ . A calibragem do sensor pode ser realizada em laboratório, utilizando-se um gerador de tensões impulsivas, obtendo-se assim uma curva de calibração do sensor, conforme destacado na figura 14.

Figura 14 – Curva de calibração do sensor
Fonte: Adaptado de Altafim et al. (1992)

O sensor de pico de tensões impulsivas baseado na tecnologia de eletreto caracteriza-se por apresentar robustez e baixo custo de construção, possibilitando a aferição precisa de picos de tensão impulsivas.

2.2.4 Medidor por retenção magnética

Foust e Henderson (1935) propuseram um novo aparelho para medição do pico de corrente de descargas atmosféricas. Dentre as principais características, destaca-se o fato de os elementos sensores permitirem leituras diretas e precisas, ressaltando ainda o baixo custo, a possibilidade de instalação de várias unidades, fácil instalação, e ainda a possibilidade de reutilizar o mesmo sensor várias vezes. À época, osciloscópios de tubos de raios catódicos começaram a surgir, porém eram utilizados quase que exclusivamente em ambiente de laboratório. Assim, o medidor por retenção magnética apresentava-se como uma alternativa robusta e confiável para medições em campo.

O princípio de operação do sensor é descrito a seguir. Trata-se de duas barras de material magnético (*magnetic links*), que quando permeadas pelo campo gerado pela corrente do surto, podem reter a magnetização por um longo período de tempo. Tal magnetização é proporcional à intensidade da corrente do surto e é inversamente proporcional ao valor da distância dos *links* à fonte geradora de campo magnético. Uma barra é posicionada próxima à fonte de magnetização, enquanto a segunda é posicionada à uma distância mais afastada. A figura 15 ilustra a disposição do sistema.

Figura 15 - Disposição das barras magnéticas em relação ao condutor
Fonte: Adaptado de Foust e Henderson (1935, p. 374)

Como consequência deste arranjo, cada barra é magnetizada com uma densidade de fluxo magnético diferente. É utilizada então uma razão entre os valores medidos de cada barra. Esta taxa é então correlacionada com medidas feitas em laboratório a fim de

calibrar o sensor. Caso a descarga elétrica seja de caráter oscilatório, pode ocorrer a um dado percentual, a desmagnetização das barras devido ao sentido de fluxo magnético contrário. Desta forma o medidor pode determinar a magnitude da corrente, sua polaridade e sua natureza unidirecional ou oscilatória.

O baixo custo e a facilidade de instalação permitiram que este método fosse amplamente adotado. Destaca-se ainda a fácil leitura e interpretação dos dados por meio de tabelas obtidas de ensaios em laboratório. Entretanto, tal método apresentava limitações em sua precisão, particularmente devido às propriedades magnéticas das barras e a instalação das mesmas em campo. O fato de a precisão na medição depender quase que exclusivamente das características magnéticas das barras e de seu correto posicionamento em campo levanta dúvidas quanto à precisão e repetibilidade das medidas.

2.2.5 Osciloscópio de raios catódicos e medição em estruturas elevadas

O advento do osciloscópio permitiu um estudo mais aprofundado e detalhado, principalmente das formas de onda de corrente relacionadas às descargas atmosféricas. A possibilidade de plotar gráficos em tela permitiu não somente a medição dos parâmetros de tensão e corrente, mas ainda a possibilidade de identificar, por exemplo, o tempo de subida e duração do impulso. Segundo Flowers (1941, p. 425), “a maioria dos aparelhos disponíveis utilizavam de métodos indiretos e incompletos de medição”. Características importantes como a corrente no ponto de contato não podiam ser verificadas com as técnicas então disponíveis. Ainda de acordo com Flowers (1941, p. 427), “a escolha do osciloscópio como instrumento de medição foi avaliada em função da sua velocidade de medição e a utilidade das medidas realizadas”.

A instalação de sensores em linhas de transmissão apresentou-se como uma escolha natural. Estruturas elevadas como estas forneciam um ponto com maior probabilidade para a ocorrência de descargas atmosféricas. Para equipamentos que operavam pelo princípio de retenção magnética, ou ainda para equipamentos conectados diretamente à rede, caso do medidor por *gap* entre esferas, a tensão nos cabos contribuía para a criação dos campos eletromagnéticos necessários para realização das medidas. Entretanto, segundo Flowers (1941), interferências inerentes do sistema de transmissão, como efeito corona, elevações de tensão e impedâncias parasitas poderiam prejudicar a qualidade das medidas realizadas.

Com a finalidade de eliminar os efeitos citados, e ainda aumentar a probabilidade de que o equipamento de medição pudesse realizar leituras de descargas atmosféricas, Flowers (1941) utilizou-se da mais alta estrutura construída no mundo pelo momento, o edifício *Empire State*, em Nova Iorque. A malha de distribuição de raios instalada no edifício, contribuiria para que parte da corrente gerada fosse dissipada, além de proteger os equipamentos componentes do osciloscópio de interferências eletromagnéticas. A figura 16 apresenta um esquemático da montagem realizada no topo do edifício.

Figura 16 - Conexões externas do osciloscópio
Fonte: Adaptado de Flowers (1941)

Na configuração apresentada por meio da figura 16, pode-se destacar a fonte do sinal de surto, proveniente de um cabo de alta tensão conectado à estrutura metálica de captação do raio. Toda a conexão entre a fonte e os osciloscópios de medição é feita por cabos. Acoplado aos osciloscópios, encontram-se ainda rolos de filme, para a gravação fotográfica das formas de onda obtidas, para posterior análise. Todo o aparato encontra-se instalada no topo do edifício, logo abaixo à torre metálica. O nível de tensão ao qual os osciloscópios operam é condicionado por meio de um divisor de tensão. Os osciloscópios funcionam em sincronia com o início da descarga. Esta característica permite que o equipamento comece a gravar os dados apenas no momento em que o surto ocorre, evitando gravação de sinais espúrios e a utilização desnecessária de filme fotográfico.

2.2.6 Estações de medição em torres de telecomunicação

O desenvolvimento das modernas redes de telecomunicação ocasionou a construção de estruturas cada vez mais elevadas para aumentar o alcance e consequente cobertura dos serviços. De acordo com Fuchs et al. (1998, p. 444), “descargas atmosféricas vêm

sendo medidas em estruturas elevadas de telecomunicações em vários países [...] sendo uma fonte bastante comum de interferências em equipamentos eletrônicos e de potência”. Ainda de acordo com os autores, outras estruturas como chaminés e torres de resfriamento podem ser atingidas pelo fenômeno, não se restringido apenas a estas estruturas, mas também a todas que contenham qualquer tipo de sistema eletrônico instalado.

Com a finalidade de realizar medições principalmente da intensidade dos campos elétrico e magnético gerados pelas elevadas correntes provenientes dos raios, Fuchs et al. (1998) construíram uma estação de medição próxima à uma torre de telecomunicação no sul da Alemanha, no monte *Hoher Peissenberg*. Transformadores de corrente e bobinas de indução foram instalados no topo e na base da torre. Uma antena em forma de bastão com uma esfera metálica na ponta foi instalada para medição do campo elétrico gerado pela corrente da descarga em uma estação de medição distante 189 metros da base da torre. Na mesma estação foram instalados ainda medidores de campo magnético e uma câmera de filmagem em alta velocidade, com velocidade de 1000 quadros por segundo. Um segundo sistema de câmeras de alta velocidade foi instalado em uma estação distante 1000 metros da base da torre.

O sistema de aquisição de dados da forma de onda da corrente consistia em três osciloscópios digitais: dois osciloscópios DSO LeCroy 9430 e um osciloscópio DSO LeCroy 9310AL. Para aquisição dos dados provenientes dos sensores de variação de campo magnético e elétrico, os autores utilizaram um osciloscópio DSO LeCroy 9424E e um osciloscópio DSO LeCroy 2450, sendo o último acoplado à integradores de sinal. Uma antena em barra para medição do campo eletrostático foi conectada à um osciloscópio DSO LeCroy 9310AL. Todos os dispositivos foram conectados utilizando-se cabos coaxiais. De acordo com Fuchs et al. (1998), o sistema de aquisição e gravação funciona de modo automático e digitalizado, podendo realizar uma nova medição apenas alguns segundos após a ocorrência da descarga.

Uma primeira análise, bastante superficial, pode revelar claras diferenças em termos tecnológicos entre os experimentos citados nesta seção e na Seção 2.2.5. Embora tenha, com relativa semelhança, utilizado um osciloscópio acoplado à uma câmera para visualização e gravação dos dados, Flowers (1941) conectou o instrumento à rede de aterramento do edifício utilizando um divisor de tensão. O experimento apresentado por Fuchs et al. (1998) contou com uma série de instrumentos digitais de aquisição,

tratamento e armazenamento de dados. Todos os transdutores de corrente e campo apresentam isolamento galvânica, não havendo qualquer conexão elétrica entre os sensores e os instrumentos localizados na estação. Tal característica confere maior segurança aos instrumentos operando em situações de correntes elevadas.

2.2.7 Medidor *B-dot Probe*

Yao et al. (2011) propuseram um novo tipo de sensor de pico de corrente caracterizado por uma bobina instalada no topo de uma torre de transmissão acoplada magneticamente à linha. A construção constitui um fio de cobre com isolamento, enrolado em uma estrutura circular de alumínio, que funciona como base para o enrolamento. A estrutura é dividida ao longo de sua seção longitudinal a fim de evitar efeitos de correntes parasitas de Foucault. O sensor é posicionado à uma distância de 2 metros da linha de transmissão.

A seção transversal do sensor deve ser alinhada de forma perpendicular às linhas de fluxo magnético geradas pelo surto. O campo magnético gerado pela corrente induz, de acordo com a lei de Faraday, uma tensão nos terminais da bobina. Com o valor de tensão obtido, é possível correlacionar o valor do pico de corrente do surto, a partir de valores adquiridos previamente em ensaios em laboratório. A aquisição do sinal e gravação do valor de tensão em ensaios é feita por meio de um osciloscópio digital Tektronix modelo DPO4054.

Segundo Yao et al. (2011), dentre as principais vantagens do sensor *B-dot Probe* destaca-se: a isolamento galvânica do sensor com relação à rede de transmissão, a simplicidade do equipamento, permitindo a redução dos custos de construção, e precisão e linearidade das medidas dentro das exigências necessárias para medição de correntes provenientes de descargas atmosféricas.

Sendo a instalação do *B-dot Probe* muito semelhante àquela do medidor proposto por Foust e Henderson (1935), um fator que pode influir de maneira direta na precisão das medidas, assim como ocorria com o sensor por barras magnéticas, é o alinhamento da seção longitudinal do sensor com as linhas de fluxo magnético geradas pela corrente da descarga. Ocorrendo qualquer evento, como um choque mecânico com o sensor, que possa desalinhar sua seção longitudinal com as linhas de fluxo, o valor da tensão induzida pode ser drasticamente alterado, tornando as medidas inviáveis.

Outra questão diz respeito ao método de aquisição do valor de tensão da bobina e posterior armazenagem. Não há um esclarecimento sobre a forma como os parâmetros seriam adquiridos e armazenados, quais parâmetros deveriam ser armazenados, e qual equipamento deveria ser adotado para tal finalidade. Todos os resultados foram obtidos em laboratório com o uso de equipamentos de bancada, não estando suficientemente claro como estes equipamentos poderiam ser instalados em campo.

2.2.8 Sistema de monitoramento de corrente de descargas

Yao et al. (2013) aperfeiçoaram o sistema apresentado na seção 2.2.7, desenvolvendo assim o sistema de monitoramento de corrente de descargas. Dentre vários aspectos, destaca-se o aperfeiçoamento do transdutor de corrente em tensão, e o sistema de leitura e armazenamento dos dados. O princípio de operação do transdutor é semelhante ao sensor *B-dot Probe*, constituindo de uma bobina acoplada magneticamente à fonte geradora de corrente.

O projeto compreende uma bobina de Rogowski, com enrolamento de fio isolado, sobre uma base de alumínio. Os terminais da bobina são conectados via cabo a um sistema de medição e armazenamento, composto de quatro conversores analógico-digitais e um microprocessador que coleta os dados amostrados e os grava na memória. Os dados podem permanecer armazenados para posterior leitura ou enviados via internet para um computador remoto.

Para uma correta interpretação dos dados obtidos, os autores consideram no artigo, três coeficientes de correção do valor medido. O primeiro coeficiente refere-se à correção do valor em ensaio em laboratório. Uma vez que o cabo utilizado em ensaios tem comprimento finito, deve-se considerar que o valor de campo magnético não é o mesmo ao longo de seu comprimento. Considerando-se que a calibração é feita com o sensor do sistema de monitoramento de descargas em comparação à um medidor comercial, as medidas podem diferir caso não seja considerado este coeficiente.

O segundo coeficiente refere-se ao ajuste do valor de tensão lido pelos conversores analógico-digitais. A tensão obtida nos terminais da bobina deve ser ajustada para que seja proporcional a um intervalo de tensão de $\pm 5V$, que é a faixa de operação dos conversores. Caso este valor limite seja extrapolado, o valor de pico de corrente será perdido. De acordo com Yao et al. (2013), causas prováveis para que este valor seja extrapolado constituem, mas não se restringem somente à: ruídos na linha de transmissão

proveniente de fontes diversas e desregulagem da tensão de referência do conversor. O valor do coeficiente de ajuste é configurado por meio da regulação de valores de resistência na unidade de aquisição de dados.

O terceiro coeficiente refere-se ao desalinhamento do sensor com relação às linhas de campo magnético geradas pela descarga. Assim como o medidor por barras magnéticas e o *B-dot probe*, o sensor de monitoramento de correntes deve ter sua seção transversal alinhada perpendicularmente às linhas de fluxo magnético. Caso esta incidência seja oblíqua, o valor de tensão induzida será menor e a medida se torna inválida. A figura 17 ilustra o posicionamento do sensor com relação às linhas de fluxo magnético.

Figura 17 - Posicionamento do sensor de descargas atmosféricas
Fonte: Adaptado de Yao et al. (2013, p. 1251)

Mesmo que haja um correto alinhamento quando da instalação, um choque mecânico durante a operação pode provocar desalinhamento, resultando em uma fonte de erro de medida imprevisível e incorrigível.

2.3 Bobina de Rogowski

2.3.1 Apresentação, caracterização e principais aplicações

Vários métodos de transdução de sinais de corrente impulsiva em valores mensuráveis de tensão têm sido desenvolvidos ao longo dos séculos XX e XXI. Thomas (1970) apresenta várias técnicas de transdução e destaca vantagens e desvantagens para os métodos de medição disponíveis, dentre eles: o método por acoplamento magnético, divisor de tensão resistivo e divisor de tensão capacitivo, transformador com núcleo de

ferro e métodos de acoplamento ótico para medição de sinais. A figura 18 ilustra o método por acoplamento magnético.

Figura 18 - Transdução por acoplamento magnético
Fonte: Adaptado de Thomas (1970, p. 107)

Um dos métodos de transdução que se destaca é o método de medição por sonda magnética, que consiste em um circuito medidor de tensão magneticamente acoplado à fonte geradora de corrente impulsiva, tendo como elemento sensor amplamente utilizado em pesquisas e equipamentos comerciais disponíveis a bobina de Rogowski. O sensor consiste basicamente de um enrolamento de fios de cobre em estrutura isolante, tendo ar como o núcleo da bobina. Ray e Hewson (2000) e Argueso et al. (2005) apresentam como principais vantagens na utilização deste tipo de transdutor:

- Boa linearidade devido à ausência de materiais ferromagnéticos;
- Não saturação devido ao núcleo de ar;
- Largura de banda de frequências de operação ampla;
- Montagem simples e eficaz, não sendo necessário realizar grandes alterações no dispositivo para medição de correntes elevadas;
- Isolação galvânica devido ao acoplamento magnético da fonte geradora de corrente impulsiva e do circuito de medição de tensão;
- Necessidade de circuitos simples e baratos para tratamento do sinal de tensão obtido;
- Sensor de fácil uso e instalação;
- Equipamento não intrusivo, uma vez que o circuito de transdução e tratamento não carrega o circuito gerador de corrente impulsiva.

Estas características tornaram a bobina de Rogowski um método preferencial no desenvolvimento de medidores de corrente, em especial para medições de elevados

valores de correntes impulsivas provenientes de descargas atmosféricas. Sua fácil construção e baixo custo permitiram sua utilização em aplicações variadas. Ward e Exon (1993) citam como aplicações principais:

- Circuitos de monitoração de geradores de energia;
- Monitoração e medição em laboratórios de teste de descargas atmosféricas e de tensões e correntes elevadas;
- Monitoramento e proteção de motores de indução;
- Aplicações comerciais e industriais diversas como: fornos de indução, soldas à arco elétrico e aceleradores eletromagnéticos.

Por sua versatilidade, facilidade de construção, simplicidade e baixo custo, a bobina de Rogowski tem sido largamente utilizada em pesquisas e em aplicações industriais e comerciais. Sendo assim, a bobina se mostrou a forma de transdução de sinal ideal para o sensor apresentado neste trabalho.

2.3.2 Princípio de operação e modelagem

A bobina de Rogowski é normalmente constituída por fios de cobre enrolados ao longo de um núcleo de formato toroidal de material não ferromagnético e seção transversal de perfil circular. A corrente geradora de sinal é conduzida por um condutor disposto no centro do toroide. Esta disposição permite que o fluxo magnético gerado pela corrente no condutor possa incidir de forma perpendicular em relação à seção transversal do enrolamento da bobina. Muito embora o enrolamento possa ser feito em uma seção circular, outras geometrias, como quadrada ou retangular são utilizadas para dar forma à seção transversal de cada enrolamento da bobina. A figura 19 ilustra uma bobina de Rogowski típica.

Figura 19 - Bobina de Rogowski
Fonte: Ray e Hewson (2000, p. 3083)

O princípio de funcionamento da bobina é descrito pela lei de Faraday. O campo magnético gerado pela corrente que percorre um condutor filamentar induz uma força eletromotriz (fem) nos terminais da bobina. De acordo com o equacionamento apresentado por Argueso et al. (2005), o valor de tensão gerado em uma porção infinitesimal é:

$$v = -\frac{d}{dt} \left(\int_S \mu_0 \vec{H} \cdot d\vec{S} \right) = -\mu_0 A \frac{dH}{dt} \cos \alpha \quad (1)$$

Logo, o valor de tensão ao longo de todo o percurso da espira é:

$$v_{\text{espira}} = -\mu_0 A \oint \frac{dH}{dt} \cos \alpha dl = -\mu_0 A \frac{d}{dt} \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (2)$$

De acordo com a lei de Ampère:

$$i = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (3)$$

E assim:

$$v_{\text{espira}} = -\mu_0 A \frac{di}{dt} \quad (4)$$

Para uma bobina composta por n espiras, o valor da tensão em função da variação de corrente é dado pela equação 5, onde M é a indutância mútua do sistema:

$$v_{\text{bobina}} = -\mu_0 A n \frac{di}{dt} = -M \frac{di}{dt} \quad (5)$$

Argueso et al. (2005) e Ward e Exon (1993) apresentam modelos equivalentes com parâmetros concentrados para a bobina de Rogowski. A figura 20 expõe o modelo equivalente da bobina, onde a tensão induzida V_{bobina} é modelada como uma fonte de tensão, com a resistência R_b do enrolamento em série com a autoindutância L_b da bobina em paralelo com a capacitância parasita C_b entre os fios do enrolamento. A impedância Z representa uma carga colocada nos terminais.

Figura 20 - Circuito equivalente da bobina de Rogowski
Fonte: Adaptado de Argueso et al. (2005)

Pelo modelo proposto percebe-se que a tensão de saída mensurada $V_{saída}$ não é a mesma que a tensão induzida pela corrente. Para o projeto de sensores baseados na tecnologia da bobina de Rogowski, deve-se levar em conta os parâmetros de circuito equivalente da bobina, principalmente para medições em altas frequências, situação em que a autoindutância da bobina pode interferir de modo significativo no valor medido. Uma outra questão que deve se levar em conta é o fato de a tensão gerada ser proporcional à taxa de variação de corrente, e não à corrente em si. Na próxima seção discute-se a necessidade de integrar o valor de tensão para que possa ser feita a correlação das grandezas de tensão e corrente.

2.3.3 Métodos de integração do sinal de tensão

Como se pode verificar na equação 5, a tensão é proporcional ao número de espiras, à área da seção transversal da bobina e é função da taxa de variação da corrente no tempo. Sendo assim, para que o valor de tensão seja função do valor de corrente, é necessário que se realize uma integração no tempo do sinal obtido. Argueso et al. (2005) apresentam como principais formas de integração do sinal de tensão:

- Integração matemática realizada a partir do sinal amostrado por um osciloscópio;
- Integração eletrônica por meio de elementos de circuito passivos ou ativos;
- Auto integração.

Argueso et al. (2005) propuseram um modelo de bobina auto integrante. Neste modelo, os parâmetros de circuito equivalente são projetados de modo a apresentar um valor de tensão da bobina proporcional ao valor de corrente. Ray e Hewson (2000)

propuseram ainda circuitos de integração do sinal que utilizam de elementos passivos, como capacitores e resistores associados, ou ainda circuitos ativos com amplificadores operacionais. A figura 21 apresenta um integrador passivo constituído de um resistor para atenuação do sinal de tensão e um capacitor como elemento integrador.

Figura 21 - Integrador passivo
Fonte: Ward e Exon (1993, p. 110)

A figura 22 apresenta um integrador ativo com amplificador operacional e elementos de circuito para ajuste de ganho. A figura apresenta também o circuito equivalente da bobina de Rogowski.

Figura 22 - Integrador ativo
Fonte: Ward e Exon (1993, p. 108)

Embora os métodos apresentados permitam correlacionar o sinal de tensão com a corrente, seu funcionamento pode ser limitado pela banda de frequência de operação da bobina, ou ainda pela amplitude do sinal de tensão gerado. Os elementos utilizados para integração do sinal podem realizar uma filtragem, a partir de uma dada faixa de frequência, do sinal mensurado. Pode ocorrer ainda a saturação de componentes eletrônicos presentes em amplificadores operacionais dependendo da amplitude da corrente e, consequentemente, do sinal de tensão gerado. O projeto da bobina de

Rogowski e do circuito de integração deve levar em consideração tais limitações. Por apresentar uma topologia simples, de baixo custo e eficiente, o método de integração utilizado no sistema proposto no presente trabalho é a auto integração.

2.4 Considerações finais

O presente capítulo apresentou uma revisão das principais características a serem mensuradas e analisadas em descargas atmosféricas, bem como ilustrações a respeito da forma de onda de corrente e campo magnético para os diversos impulsos que compõem uma descarga completa. Apresentou-se um estudo da medição de valores de corrente em estruturas elevadas como edifícios e torres de transmissão de energia e de telefonia móvel, e seus efeitos nos resultados obtidos. Apresentou-se ainda sensores e técnicas de transdução de valores de corrente em tensão. Fez-se uma análise mais aprofundada a respeito do sensor baseado na bobina de Rogowski, considerando suas principais características e a aplicação no estudo de descargas atmosféricas relacionadas, principalmente, na medição de picos de corrente impulsiva em estruturas. Devido ao princípio de funcionamento da bobina de Rogowski, deu-se maior ênfase no estudo da corrente e dos campos magnéticos por ela gerados, que traduzem em nível de tensão, informações a respeito das características fundamentais dos raios e seus principais componentes.

3. Sensor de pico de corrente impulsiva

Pode-se subdividir o sensor apresentado neste trabalho em três componentes distintos. O primeiro componente é a bobina de Rogowski, que permanece exposta ao tempo fixada na estrutura da torre. Uma vez atingida por uma descarga atmosférica, a estrutura condutora gera um campo magnético devido à corrente que induz uma tensão nos terminais da bobina. O segundo componente é o cabo coaxial, que transmite o sinal gerado pela bobina ao longo de todo o comprimento da torre até uma estação próxima. Instalado na estação encontra-se o osciloscópio que realiza a leitura do nível de tensão da bobina e grava os dados mensurados. A figura 23 ilustra a instalação do sistema na torre.

Figura 23 - Diagrama do sistema instalado na torre

3.1 Bobina de Rogowski

Por possuir todas as vantagens apresentadas na Seção 2.3.1, a bobina de Rogowski caracteriza-se como o transdutor ideal para a proposta do presente trabalho. Esta seção apresenta as etapas de modelagem, construção e simulação da bobina.

3.1.1 Construção

A bobina proposta possui uma construção diferente da apresentada na figura 19. O enrolamento não é realizado ao longo de um toroide, com espiras distribuídas ao longo do comprimento do núcleo, mas sim sobre um núcleo retangular. Esta configuração deve-se sobretudo à disposição da bobina em relação à estrutura condutora da corrente. Normalmente, as múltiplas espiras são distribuídas em formato radial ao longo do núcleo, no presente trabalho condensou-se as espiras em um único núcleo de seção transversal retangular. A figura 24 apresenta uma vista em perfil do núcleo de acrílico da bobina com o enrolamento de cobre. A construção é realizada cortando-se chapas do material em uma máquina laser. O enrolamento é feito com fios de cobre de diâmetro 26 AWG isolados com verniz. Realizou-se 200 voltas ao longo do núcleo, sendo posteriormente as terminações fixadas e seladas com fita isolante líquida.

Figura 24 - Bobina com enrolamento de cobre

A instalação da bobina é feita por meio de uma haste de alumínio curvado, conforme figura 25, elevando-se por um metro a partir da base superior da torre, fixada à uma distância de 0,3 metro em relação ao captor. Sua principal finalidade é a de oferecer um ponto de fixação rígido para a bobina, não permitindo que esta saia de sua posição relativa ao condutor da corrente de descarga. Deve-se ressaltar que a estrutura protege a bobina e o cabo coaxial das intempéries, além de proporcionar uma blindagem elétrica do cabo próximo ao local de impacto da descarga.

Figura 25 - Estrutura de fixação da bobina com esquemático de dimensões

A figura 26 exibe a bobina de Rogowski construída para realização dos ensaios. Este modelo construído difere do modelo a ser instalado em campo apresentado na figura 24. Construiu-se o núcleo de plástico em impressora 3D, além de uma estrutura que permite um fácil encaixe e fixação em manobras durante a realização de testes.

Figura 26 - Bobina de Rogowski construída

A figura 27 exhibe a bobina dentro do invólucro para fixação.

Figura 27 - Detalhe da bobina e invólucro de fixação para ensaios

3.1.2 Indutância mútua

O primeiro passo na modelagem do sistema é o cálculo da indutância mútua entre a estrutura e a bobina, uma vez que esse parâmetro expressa o acoplamento magnético entre os dois sistemas e modela o gerador de tensão apresentado na figura 20. Conforme apresentado na Seção 2.3.2, a indutância mútua é função do número de espiras e da geometria da bobina. Entretanto, é necessário considerar a distribuição do campo magnético ao redor do enrolamento. O perfil apresentado pela bobina, bem como seu posicionamento em relação à estrutura é apresentado na figura 28.

Figura 28 – Bobina e estrutura condutora da torre

O campo magnético gerado pelo condutor é descrito por:

$$\vec{H}(t) = \frac{i(t)}{2\pi r} \vec{a}_\phi \quad (6)$$

E a densidade de fluxo magnético é descrito por:

$$\vec{B}(t) = \frac{\mu_{ar} i(t)}{2\pi r} \vec{a}_\phi \quad (7)$$

O fluxo magnético é calculado integrando-se o vetor densidade de fluxo ao longo da área da seção transversal da bobina:

$$\Phi(t) = \int_c^{b+c} \int_0^a \frac{\mu_{ar} i(t)}{2\pi r} dz dr \quad (8)$$

Realizando-se a integração nos limites especificados:

$$\Phi(t) = \frac{\mu_{ar} i(t) a}{2\pi} \ln\left(\frac{b+c}{c}\right) \quad (9)$$

Como a tensão induzida na bobina é dada pela lei de Faraday:

$$v_{bobina} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (10)$$

O valor da tensão induzida na bobina é dado por:

$$v_{bobina} = -\frac{\mu_{ar} a}{2\pi} \ln\left(\frac{b+c}{c}\right) \frac{di(t)}{dt} \quad (11)$$

Onde o valor da indutância mútua é dado por:

$$L_{mútua} = \frac{\mu_{ar} a}{2\pi} \ln\left(\frac{b+c}{c}\right) \quad (12)$$

Determina-se o parâmetro geométrico da indutância mútua por:

$$A = a \ln\left(\frac{b+c}{c}\right) \quad (13)$$

A seguir, apresenta-se os parâmetros da fórmula, bem como os respectivos valores utilizados:

- Comprimento de seção do núcleo: $a = 0,085$ metro;
- Largura da seção do núcleo é $b = 0,045$ metro;
- Distância entre a bobina, fixada pela haste de alumínio curvada, e o captor da descarga atmosférica. Valor fixado para o equipamento $c = 0,3$ metro;
- O parâmetro μ_{ar} é a permeabilidade magnética do ar e $\mu_{ar} = 1,256.10^{-6}$ H/m.

O valor calculado do parâmetro geométrico A depende da distância da bobina em relação à haste condutora, portanto depende também deste parâmetro o valor de indutância mútua. Apresentar-se-á os valores utilizados em simulações e ensaios para estes parâmetros ao longo das seções seguintes.

3.1.3 Determinação dos parâmetros R, L e C da bobina

O modelo da bobina de Rogowski apresentado na figura 20 necessita ainda da determinação dos parâmetros de circuito R_b , L_b e C_b . Entretanto, para que se realize esta determinação, é necessário configurar o circuito equivalente da bobina conectando-a a um analisador de impedância. De acordo com a figura 20, para realização do ensaio considera-se a ausência de qualquer carga conectada à bobina, portanto, não havendo qualquer valor de impedância Z . Considera-se ainda que fora de operação, o valor de tensão na fonte entre os terminais a e b é nulo, portanto, a fonte V_{bobina} encontra-se em curto circuito. O analisador de impedância passa a ser uma fonte geradora de sinal conectada entre os terminais c e d . Desta forma, apresenta-se o circuito equivalente da bobina conforme a figura 29.

Figura 29 - Circuito equivalente da bobina conectada ao analisador

Com a obtenção dos parâmetros do circuito da bobina, necessita-se realizar a simulação do sistema completo, que compreende a bobina, o cabo coaxial de transmissão e o circuito de tratamento e armazenamento dos dados obtidos.

3.2 Cabo Coaxial

O cabo coaxial tem como função transmitir o sinal gerado nos terminais da bobina até o osciloscópio. Uma vez que a bobina está disposta 70 metros acima do solo, o comprimento do cabo passa a ter uma importância significativa na forma de onda do sinal e no tempo com que este chega até o osciloscópio, sendo importante no projeto considerar os efeitos da impedância do cabo no sinal. O cabo utilizado possui 100 metros de comprimento, suficientes para conectar a bobina no topo da torre, ao osciloscópio no nível do solo. A figura 30 exibe uma foto do cabo coaxial utilizado.

Figura 30 - Cabo coaxial

3.2.1 Determinação dos parâmetros de circuito

A utilização de um modelo em circuitos elétricos do cabo coaxial depende da determinação dos parâmetros de indutância, capacitância e resistência por unidade de comprimento. Admitindo-se o modelo de linhas de transmissão, o principal parâmetro a ser determinado é a impedância característica Z_0 . Este parâmetro determina qual valor de impedância deve ser conectada na terminação do cabo a fim de evitar o fenômeno de reflexão de ondas incidentes. A figura 31 ilustra o modelo de elementos concentrados da linha, onde R_c , G_c , L_c e C_c são respectivamente a resistência, condutância, indutância e capacitância por unidade de comprimento.

Figura 31 – Modelo em elementos concentrados do cabo

De acordo com Kraus (1999), a impedância característica de uma linha de transmissão é dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (14)$$

Onde ω é a frequência angular em radianos por segundo. De acordo com a equação 14, a impedância característica não depende do comprimento do cabo, mas exclusivamente do valor dos elementos de circuito que o compõem e da frequência. Portanto, faz-se necessário também uma análise espectral da impedância do cabo.

Considerando-se o circuito da figura 32, um gerador conectado nos terminais a - b enxerga um valor de impedância Z_l dependente do comprimento do cabo l , da impedância característica Z_0 e da constante de propagação γ , além do valor da impedância de carga Z_{carga} . De fato, conectou-se o gerador de sinal de um analisador de impedância HP 4284A aos terminais de uma amostra de 10 metros do cabo coaxial da figura 30. O valor do módulo da impedância e fase foram medidos em diferentes frequências em duas situações distintas: os terminais c - d da linha de transmissão em aberto e posteriormente em curto circuito.

Figura 32 - Modelo para determinação da impedância de entrada

De acordo com Kraus (1999), o valor de Z_l pode ser expresso por:

$$Z_l = Z_0 \frac{Z_{carga} + Z_0 \tanh(\gamma l)}{Z_0 + Z_{carga} \tanh(\gamma l)} \quad (15)$$

No caso particular de os terminais de carga do cabo estarem abertos, o parâmetro Z_{carga} é caracterizado por uma alta impedância e Z_l é descrita por:

$$Z_{loc} = \frac{Z_0}{\tanh(\gamma l)} \quad (16)$$

Caso os terminais de carga estejam curto-circuitados, Z_{carga} é nula e:

$$Z_{lsc} = Z_0 \tanh(\gamma l) \quad (17)$$

Deve-se ressaltar que Z_l é a impedância total vista pelo terminal do gerador. Das equações 16 e 17, pode-se concluir que a impedância característica da linha de transmissão é:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{loc} \cdot Z_{lsc}} \quad (18)$$

Da análise acima obteve-se o gráfico da impedância característica pela frequência. Com a obtenção dos parâmetros de indutância, capacitância e resistência por unidade de comprimento pelo medidor HP 4284A, determinou-se os valores destes três componentes que melhor descreveriam o comportamento do cabo coaxial no software de simulação LT SPICE.

3.3 Sistema de aquisição de dados

3.3.1 Osciloscópio DSO 201

Uma vez transmitido o sinal gerado pela bobina, faz-se necessário mensurar os valores de pico de tensão e armazená-los para posterior análise. Escolheu-se o mini osciloscópio DSO 201 para esta função. O osciloscópio opera como um osciloscópio comum de bancada, capaz de exibir formas de onda de tensão em uma pequena tela de 2,8 polegadas. Dentre suas principais características, destaca-se:

- Medição de valores de pico de tensão até 400V;
- Taxa de amostragem de 1 milhão de amostras por segundo;
- Ajuste de *trigger* em modo automático e *single*;
- Resolução em escala de tempo de até 1µs/divisão;

- Armazenamento dos dados em cartão de memória;
- Autonomia de bateria de até 6 horas.

A figura 33 mostra o mini osciloscópio em operação realizando medida de uma forma de onda quadrada. A ponta de prova pode ser configurada para uma atenuação de dez vezes, e a bateria pode ser recarregada conectando-se o aparelho à uma tomada comum utilizando-se um carregador de telefone celular.

Figura 33 - Mini osciloscópio DSO 201

Dentre as principais vantagens do osciloscópio destaca-se:

- O formato compacto;
- Portabilidade;
- Baixo consumo de energia e bateria com longa autonomia;
- Possibilidade de armazenagem e posterior acesso aos dados.

As características do DSO 201 o tornam ideal para a aplicação desejada. Devido aos valores de tensão gerados pela bobina, utilizou-se o osciloscópio com a ponta de prova configurada para uma atenuação de dez vezes. A interface entre o mini osciloscópio e o cabo coaxial é feita por meio de conectores do tipo BNC, com uma impedância na terminação do cabo de $50\ \Omega$. O osciloscópio permanece instalado dentro de uma caixa plástica alocada na subestação próxima a torre, protegido de intempéries e choques mecânicos.

3.4 Simulação SPICE do sistema

Com a determinação dos parâmetros da bobina e do cabo coaxial realizou-se um modelo no *software* de análise de circuitos elétricos LT SPICE. O modelo permite uma compreensão inicial do comportamento da bobina e do cabo além de uma estimativa dos valores de tensão e corrente gerados.

3.4.1 Circuito gerador de corrente

O circuito para simulação do gerador de corrente proveniente de descargas atmosféricas utilizado é apresentado na figura 34.

Figura 34 - Circuito do gerador de corrente 1,2/50 microssegundos

O circuito apresentado é capaz de gerar uma forma de onda de 1,2/50 microssegundos, de acordo com o estabelecido na norma da *International Electrotechnical Commission* IEC 61000-4-5. Utilizando-se um divisor capacitivo Haeffely, mede-se o valor de tensão aplicada sobre o resistor R2, elemento pelo qual flui a corrente que se deseja mensurar. A relação do divisor de tensão é:

$$V_{R2} = 400,98.V_{medido} \quad (19)$$

Determina-se indiretamente a corrente de acordo com a Lei de Ohm:

$$i_{1,2/50} = \frac{V_{R2}}{R2} = \frac{400,98.V_{medido}}{R2} \quad (20)$$

Considerou-se o valor de amplitude de corrente de acordo com o exposto na Seção 2.1.4, com valores de amplitude variando de 4 kA à 100 kA e valor máximo de amplitude de 100 kA.

3.4.2 Modelagem da Bobina

A figura 35 ilustra o modelo completo da bobina. O circuito consiste do gerador de tensão da bobina, a indutância própria em série com a resistência, e considera-se ainda a capacitância parasita entre os enrolamentos, conforme definido na Seção 2.3.2. O valor da indutância mútua é determinado pela equação 12 e uma vez calculado, é inserido na equação do gerador de tensão como um fator de acoplamento da derivada da corrente.

Figura 35 - Detalhe do circuito da bobina em simulação

3.4.3 Circuito do cabo coaxial

A figura 36 ilustra o modelo em circuito elétrico do cabo coaxial. Os parâmetros são inseridos em um modelo próprio do LT SPICE para linhas de transmissão. Acoplado à terminação do cabo, está o resistor de $50\ \Omega$ para casamento de impedância. Faz-se necessário o uso do resistor a fim de evitar reflexão de componentes do espectro harmônico do sinal que podem alterar o sinal lido pelo osciloscópio.

Figura 36 – Modelo do cabo coaxial

O osciloscópio DSO 201 é conectado ao resistor $R_{\text{osciloscópio}}$ por meio da ponta de prova, com uma atenuação de dez vezes, a fim de adequar o valor de tensão gerado pela bobina à máxima tensão de entrada suportada pelo aparelho. Uma vez que a impedância característica do cabo varia em amplo espectro de frequência, definiu-se os parâmetros de resistência, indutância e capacitância do cabo levando-se em consideração a componente fundamental do sinal mensurado. Para o caso da onda de 1,2/50 microssegundos, a frequência fundamental é de 120 kHz.

4. Análises e Resultados

Neste capítulo apresenta-se os resultados dos parâmetros medidos e dos ensaios realizados em laboratório a fim de aferir a precisão das medidas.

4.1 Bobina

4.1.1 Determinação dos parâmetros da bobina

Realizou-se a determinação dos parâmetros de resistência, indutância e capacitância própria da bobina a partir da varredura do espectro de frequência e medição do módulo de impedância e fase. De acordo com o exposto na seção 3.1.3, conectou-se a bobina aos terminais do analisador de impedância Solartron SI 1260.

O aparelho aplica uma tensão alternada de frequência variável nos terminais da bobina e mede o valor de corrente. A partir destes dados, o módulo e fase da impedância de acordo com a frequência são armazenados e posteriormente gravados em um arquivo. A análise dos dados é feita utilizando-se o *software* ZView. A figura 37 exibe os gráficos do módulo de impedância e fase plotados no *software* a partir das medidas obtidas com o aparelho.

Figura 37 - Gráficos do módulo de impedância e fase da bobina para determinação do valor de resistência

O programa permite ainda, através do ajuste de curva sobre os pontos obtidos, determinar um circuito elétrico equivalente configurável. A figura 38 exibe o circuito elétrico equivalente da bobina, bem como os valores calculados de resistência, indutância e capacitância. Os pontos escolhidos compreendem uma faixa de frequência de 10 Hz a 7 kHz, conforme o gráfico da figura 37. Nesta faixa de frequência o programa determina o valor da resistência própria da bobina como sendo de $7,97 \Omega$.

Figura 38 - Circuito elétrico equivalente para determinação da resistência própria da bobina

Para determinação do valor de indutância e capacitância, estabeleceu-se uma faixa diferente de frequência. A figura 39 exibe os pontos escolhidos na faixa de 150 kHz a 1 MHz. Esta faixa de frequências compreende a frequência de ressonância e de inversão do valor de fase do sistema formado pela bobina. A escolha destas duas faixas de frequência reflete o conjunto de pontos onde o programa pode ajustar a melhor curva e calcular o valor dos parâmetros de circuito com erros inferiores a 1%.

Figura 39 - Gráfico do módulo de impedância e fase para determinação de indutância e capacitância

A figura 40 exibe os valores obtidos de capacitância e indutância para o circuito elétrico equivalente da bobina. O valor de capacitância obtido é de 35,4 pF e o valor de indutância própria de 4.55 mH.

Figura 40 - Circuito elétrico equivalente para determinação da indutância e capacitância

4.2 Cabo coaxial

4.2.1 Determinação dos parâmetros do cabo coaxial

Determinou-se os valores de módulo de impedância e fase a partir de resultados de medidas aplicadas na equação 18, e os valores de módulo de impedância e fase a partir de resultados de medidas dos parâmetros de circuito aplicadas na equação 14. A tabela

4.1 apresenta os dados. O valor de condutância obtido nas medidas mostrou-se desprezível.

Tabela 4.1 - Valores de módulo de impedância e fase e parâmetros de circuito medidos

Frequência (Hz)	Resistência (Ohms/m)	Indutância (H/m)	Capacitância (F/m)	Módulo da impedância equação 18 (Ohms/m)	Fase equação 18 (Graus)	Módulo da impedância equação 14 (Ohms/m)	Fase equação 14 (Graus)
800	0,0765	3,41E-07	8,731E-11	417,56	-44,36	418,55	-45,48
1000	0,0765	3,41E-07	8,668E-11	374,86	-44,20	375,02	-43,89
1200	0,0765	3,42E-07	8,675E-11	342,09	-44,03	342,12	-43,75
1500	0,0765	3,43E-07	8,673E-11	306,06	-43,79	306,07	-43,49
2000	0,0765	3,44E-07	8,682E-11	265,01	-43,38	265,10	-43,09
2500	0,0765	3,44E-07	8,685E-11	237,10	-42,98	237,11	-42,69
3000	0,0765	3,44E-07	8,686E-11	216,54	-42,58	216,57	-42,28
4000	0,0765	3,44E-07	8,687E-11	187,78	-41,78	187,89	-41,48
5000	0,0765	3,44E-07	8,686E-11	168,26	-40,98	168,40	-40,68
6000	0,0766	3,44E-07	8,686E-11	154,03	-40,20	154,04	-39,91
8000	0,0766	3,43E-07	8,682E-11	134,13	-38,66	134,19	-38,36
10000	0,0764	3,44E-07	8,605E-11	121,18	-37,10	121,24	-36,81
12000	0,0764	3,43E-07	8,615E-11	111,43	-35,65	111,51	-35,35
15000	0,0764	3,43E-07	8,617E-11	101,07	-33,53	101,10	-32,97
20000	0,0766	3,43E-07	8,602E-11	90,17	-30,32	90,12	-29,77
25000	0,0768	3,42E-07	8,594E-11	83,32	-27,51	83,31	-26,93
30000	0,0769	3,42E-07	8,589E-11	78,73	-25,01	78,71	-24,44
40000	0,0773	3,41E-07	8,592E-11	73,11	-21,02	73,13	-20,43
50000	0,0778	3,41E-07	8,629E-11	69,89	-17,99	69,90	-17,70
60000	0,0784	3,40E-07	8,627E-11	67,97	-15,73	68,02	-15,41
80000	0,0798	3,40E-07	8,621E-11	65,97	-12,51	65,98	-12,23
100000	0,0813	3,39E-07	8,559E-11	65,11	-10,45	65,18	-10,14
120000	0,0833	3,38E-07	8,614E-11	64,25	-9,05	64,33	-8,74
150000	0,0867	3,37E-07	8,735E-11	63,24	-7,63	63,27	-7,62
200000	0,0931	3,35E-07	8,664E-11	62,93	-6,24	62,96	-6,22
250000	0,1001	3,33E-07	8,701E-11	62,42	-5,42	62,46	-5,41
300000	0,1075	3,31E-07	8,768E-11	61,89	-4,89	61,93	-4,87
400000	0,1223	3,28E-07	8,845E-11	61,23	-4,22	61,24	-4,21
500000	0,1368	3,25E-07	8,876E-11	60,78	-3,82	60,84	-3,81
600000	0,1509	3,23E-07	8,896E-11	60,49	-3,53	60,57	-3,52
800000	0,1779	3,22E-07	8,941E-11	60,19	-3,14	60,21	-3,12
1000000	0,2036	3,22E-07	9,02E-11	59,90	-2,87	59,93	-2,86

A figura 41 exibe o gráfico da parte real do módulo da impedância característica e a fase.

Figura 41 - Diagrama da parte real do módulo da impedância característica e fase

A análise da figura 41 evidencia que o módulo da impedância característica do cabo tende a diminuir o valor com o aumento da frequência, até que este permaneça na faixa próxima à 50 Ω para frequências acima de 1 MHz. O valor de impedância para frequências acima desta faixa apresenta, basicamente, característica resistiva, ao contrário da faixa até 100 kHz, que apresenta forte característica capacitiva. Fez-se o uso de uma impedância resistiva de 50 Ω disponível comercialmente como forma de casar a impedância característica na extremidade do mesmo. Entretanto, o uso deste tipo de conexão poderia configurar uma fonte de erro, uma vez que esta proporcionaria um casamento de impedância apenas para frequências superiores à 1 MHz.

De acordo com Johnson (1980), considerando-se a equação 15, para valores de comprimento do cabo coaxial inferiores a um quarto do comprimento de onda relativo a uma dada frequência, e considerando-se as perdas do cabo suficientemente baixas, o valor da impedância vista pelo gerador Z_l será igual ao valor de Z_{carga} . Portanto, para frequências abaixo de 500 kHz, pode-se considerar o cabo coaxial como um curto circuito entre a bobina e a impedância de casamento do cabo. Para frequências superiores a esta faixa, pode-se considerar a impedância de 50 Ω como apropriada para realizar o casamento de impedância do cabo.

4.3 Ensaios em laboratório e simulações

4.3.1 Ensaios de precisão e convergência do modelo

Apresenta-se nesta seção os resultados obtidos do ensaio da bobina no laboratório de alta tensão e materiais LATM-EESC-USP. Os resultados compreendem a análise e comparação, de forma paralela, dos valores obtidos da simulação e ensaios em laboratório do sistema. Utilizou-se no ensaio o gerador cujo circuito é descrito na figura 34. A figura 42 ilustra a construção do equipamento utilizado para gerar a forma de onda padronizada 1,2/50 microssegundos. Fixou-se a bobina de Rogowski à barra condutora pela estrutura de suporte conectada ao cabo coaxial de 100 metros. Conectado ao terminal de alta tensão encontra-se o medidor de referência Haefely. Neste ensaio, fixou-se o núcleo da bobina à 0,019 m de distância do condutor de corrente. O valor da indutância mútua calculada de acordo com a equação 12 é de 3,64 μH .

Figura 42 - Gerador utilizado em ensaios no LATM EESC-USP

Utilizando-se o osciloscópio Agilent DSO X 2002A, mediu-se o valor de tensão do medidor de referência Haefely e da bobina. A tabela 4.2 apresenta os valores de tensão medidos e os valores de corrente determinados a partir da equação 20 e simulação.

Tabela 4.2 – Ensaio de teste de linearidade e exatidão

Tensão obtida pelo medidor Haefely (V)	19.25	15.75	11.8	9.31	7.31
Corrente medida a partir da equação 20 (A)	106.8	87.35	65.2	51.63	40.5

Tensão da bobina obtida com osciloscópio Agilent (V)	4.75	3.85	2.85	2.27	1.77
Corrente obtida a partir da simulação (A)	101,92	82,58	61,15	48,66	38,01

A figura 43 mostra a correlação entre a tensão da bobina para os diferentes valores de corrente do gerador e o valor de corrente obtido via simulação.

Figura 43 - Relação entre tensão da bobina e corrente simulada

Os resultados obtidos mostram a linearidade do sensor baseado na bobina de Rogowski. A determinação do valor de corrente a partir do modelo proposto para o sensor de pico apresenta um erro médio de 5,58% em relação à corrente de referência. O sistema mostra-se, portanto, exato em relação ao valor de corrente obtido com equipamentos de referência. Entretanto, necessita-se determinar a precisão do osciloscópio DSO 201. Mediu-se o valor da tensão da bobina com o osciloscópio DSO 201 e com o osciloscópio Agilent. A tabela 4.3 exibe os valores de tensão e corrente para os dois instrumentos e o valor da corrente de referência.

Tabela 4.3 – Valores de determinação da precisão do osciloscópio DSO 201

Corrente de Referência (A)	Corrente obtida a partir da tensão do DSO 201 (A)	Corrente obtida a partir da tensão do osciloscópio Agilent (A)	Tensão da bobina medida com osciloscópio DSO 201 (V)	Tensão da bobina medida com osciloscópio Agilent (V)
84,19	85.36	86.45	3.60	3.65
84,19	82.32	86.45	3.48	3.65
84,19	86.12	86.45	3.64	3.65
84,19	85.36	86.45	3.60	3.65
84,19	83.44	86.45	3.52	3.65
84,19	87.12	86.45	3.68	3.65
84,19	85.36	86.45	3.60	3.65
84,19	85.36	86.45	3.60	3.65
84,19	86.12	86.45	3.64	3.65
84,19	85.36	86.45	3.60	3.65
84,19	84.19	86.45	3.56	3.65
84,19	84.19	86.45	3.56	3.65
84,19	81.51	86.45	3.44	3.65
84,58	84.19	86.79	3.56	3.67
84,58	86.12	86.79	3.64	3.67

O valor de corrente determinado a partir da tensão do DSO 201 apresenta um erro médio de $1,57\% \pm 1,02$ em relação à corrente de referência, enquanto o osciloscópio Agilent apresenta um erro médio de $2,68\% \pm 0,02$. A maior variação do erro do DSO 201 em torno do valor médio em relação ao Agilent se deve principalmente à sua taxa de amostragem menor. Embora apresente uma variação maior em suas medidas, o osciloscópio DSO 201 mostra-se um equipamento preciso, mesmo para medições de sinais com forma de onda bastante abrupta como a utilizada.

A figura 44 ilustra a forma de onda obtida com a bobina de Rogowski utilizando-se o osciloscópio Agilent. Obteve-se o gráfico do canal 1 a partir da leitura do divisor de tensão Haeffely conectado ao resistor de $72,3 \Omega$, conforme descrito na Seção 3.4.1. O

gráfico obtido no canal 2 evidencia a leitura da forma de onda de tensão da bobina de Rogowski.

Figura 44 - Forma de onda de tensão da bobina utilizando-se o cabo coaxial de 100 metros

A figura 45 ilustra medição com o osciloscópio DSO 201 do valor de tensão da bobina. A medida do valor de pico indicada no osciloscópio, para a corrente de aproximadamente 96,0 A, é de 4,05 V. O valor de pico e a forma de onda se assemelham às obtidas pelo osciloscópio Agilent da figura 44.

Figura 45 - Medida do valor de tensão da bobina utilizando o DSO 201

A análise dos dados obtidos no LATM-EESC-USP evidencia que o sistema proposto permite a medição do valor de pico de tensão gerado nos terminais da bobina para posterior correlação com o valor de corrente medido. Os resultados do valor de corrente obtidos convergem com o modelo proposto, com um erro mínimo entre os valores de referência e os valores medidos. Analisando-se os resultados das medições de aferição de precisão, comparado ao osciloscópio Agilent, o DSO 201 apresenta uma precisão satisfatória. Dentre os fatores que podem interferir na precisão do aparelho, destaca-se a forma de onda e a taxa de amostragem do equipamento.

Deve-se destacar que a forma de onda originada nos terminais da bobina apresenta diferenças com relação à forma de onda do gerador. Não se atinge o valor de tensão de cauda correspondente à metade do valor de pico de tensão em 50 microssegundos, mas sim em um intervalo de tempo menor. Tal fenômeno se deve ao fato de a bobina realizar uma auto integração do sinal a partir do tempo de descarga da sua indutância própria. Uma vez que o valor de indutância própria não é suficiente para manter o tempo de descarga equivalente à forma de onda original, ocorre uma descaracterização da forma de onda. Embora haja este fenômeno devido à característica auto integrante da bobina, conforme pôde-se constatar ao longo dos experimentos, a determinação do pico de corrente não é afetada.

Finalmente, pode-se destacar no gráfico da figura 44 a formação de ondulações na forma de onda medida pela bobina. Devido ao comprimento do cabo coaxial, o fenômeno de reflexão de ondas abrange uma maior faixa de frequências componentes do sinal. Para estas frequências, a impedância conectada ao final do cabo não se encontra perfeitamente casada com a impedância do cabo, ocorrendo reflexão. Mesmo com este fenômeno, é possível a partir dos valores de pico de tensão obtidos, determinar o valor de pico de corrente.

4.3.2 Ensaios no Instituto de Energia e Ambiente

Os ensaios realizados no LATM-EESC-USP permitiram, em uma escala reduzida de corrente, validar o modelo proposto para o sistema de medição. Entretanto, a disposição do aparelho em relação ao condutor de corrente em campo, conforme proposto na Seção 3.1.1, difere completamente do apresentado na Seção 4.3.1. O aumento na distância entre a bobina e o captor da torre promove uma alteração no valor da indutância mútua, assim como a estrutura da torre pode influenciar o fluxo magnético que é concatenado pela bobina. Finalmente, necessita-se testar o sistema em condições de operação com valores de corrente superiores à 4 kA. Neste contexto, uma vez a modelagem do sistema validada, realizou-se testes da bobina e do cabo no Laboratório de Altas Correntes do Instituto de Energia e Ambiente IEE-USP. O objetivo principal do ensaio é o de simular as condições reais de operação da bobina. Colocou-se uma haste de 2 metros de comprimento sobre um tambor de alumínio de 60 centímetros de diâmetro por 60 centímetros de altura. Esta montagem tem por objetivo reproduzir o pedestal localizado na parte superior da torre, onde se encontra o captor de descargas atmosféricas.

Para realização dos ensaios, fixou-se a bobina em duas alturas distintas em relação ao topo do tambor. Na primeira montagem, fixou-se a bobina imediatamente acima do topo do tambor. Com o intuito de avaliar a influência desta base na leitura da bobina, em uma segunda montagem alocou-se a bobina 70 centímetros acima do topo do tambor. Nos dois ensaios realizados, fixou-se a bobina em uma haste não condutora justaposta à parede do tambor. Na primeira montagem, a bobina permaneceu distante 34 centímetros da barra condutora de corrente. Na segunda montagem, alocou-se a bobina a 36 centímetros de distância da haste condutora. A bobina foi conectada ao osciloscópio Agilent por meio de um cabo coaxial de 100 metros de comprimento. A figura 46 mostra um esquemático da montagem.

Figura 46 - Esquemático da montagem de ensaio no IEE-USP

A figura 47 mostra a montagem realizada com a bobina disposta imediatamente acima do tambor, distante 34 centímetros da barra condutora de corrente.

Figura 47 – Bobina imediatamente acima do tambor

A figura 48 ilustra a configuração da bobina disposta 70 centímetros acima do tambor, distante 36 centímetros da barra condutora.

Figura 48 - Bobina a 70 centímetros do tambor

Realizou-se uma última montagem da bobina, estando posicionada na porção final da barra de fixação, próxima da porção final da barra condutora, à 1,24 metro acima do topo do tambor e a 36 centímetros da haste. Este ensaio tem por objetivo averiguar a relação da distância da bobina em relação à barra condutora e o comprimento da barra condutora. A figura 49 ilustra montagem.

Figura 49 - Bobina posicionada na porção final da barra condutora

O gerador utilizado no Laboratório de Altas Correntes, ao contrário do utilizado no LATM-EESC-USP, gera correntes com forma de onda de 8/20 microssegundos, com valores de amplitude até 20 kA. Esta forma de onda é descrita pela norma IEC 61000-4-5 para ensaios que simulem transitórios de chaveamento em sistemas elétricos de potência. Desta forma, é possível não somente realizar o teste de pico de corrente impulsiva, como também averiguar a capacidade de integração da bobina utilizando-se uma forma de onda com características diferentes. A figura 50 ilustra a forma de onda obtida pela bobina de Rogowski utilizando-se o osciloscópio Agilent, estando a bobina à 70 centímetros acima do tambor e à 36 centímetros de distância da barra condutora.

Figura 50 - Gráfico obtido utilizando-se a bobina de Rogowski para uma forma de onda 8/20 microssegundos

A figura 51 ilustra forma de onda de corrente obtida pelos equipamentos do IEE-USP e a forma de onda de corrente obtida pela bobina normalizadas.

Figura 51 - Formas de onda de corrente normalizadas

Os resultados obtidos dos ensaios são exibidos na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados obtidos para montagem das figuras 47 e 48

Corrente medida pelo IEE-USP (kA)	Tensão da bobina (V)	Distância (metros)	Configuração
4,57	16,43	0,34	Imediatamente acima do tambor
4,54	16,37		
4,57	16,37		
4,95	16,75	0,36	70 centímetros acima do topo do tambor
4,84	16,25		
4,73	15,68		

Os resultados obtidos para a montagem da bobina disposta 1,24 metro acima do topo do tambor são exibidos na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores obtidos para a montagem da figura 49

Corrente medida pelo IEE-USP (kA)	Tensão da bobina (V)	Distância (metros)	Configuração
4,69	9,8	0,36	1,24 metro acima do tambor
4,61	9,68		
4,57	9,68		

Analisando-se os valores de corrente mensurados pelo IEE-USP e correlacionando com os valores de tensão obtidos na bobina em ambas montagens para tabela 4.4, pode-se concluir que a altura da bobina em relação ao tambor não constitui um fator que altere significativamente o valor das medidas de tensão. A análise dos valores de tensão e corrente para a montagem da figura 48 indica uma sensibilidade da bobina de aproximadamente 299 A/V. Os resultados da tabela 4.5 mostram que uma vez a bobina estando próxima à extremidade da barra condutora, o valor do pico de tensão medida pela bobina é totalmente diferente do que se apresentava em outras configurações. Mesmo estando a bobina posicionada à uma mesma distância da barra condutora que em ensaios anteriores. Este fenômeno deve-se ao campo eletromagnético fortemente distorcido na extremidade do condutor. Entretanto, estando a bobina posicionada próxima à um condutor suficientemente longo, à uma distância menor que o comprimento da barra condutora, pode se constatar que a influência do fenômeno de distorção do campo é negligenciável.

4.4 Outros resultados

O trabalho apresentado gerou um artigo publicado no congresso *Electrical Insulation Conference* EIC-2016 realizado em Montreal-Canadá, com indicação de apresentação em sessão de pôster e intitulado “*Low-cost lightning peak detector for installation on communication towers*”.

5. Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

A partir do exposto em trabalhos anteriores, é possível determinar o pico de corrente impulsiva de uma descarga atmosférica a partir da medição do nível de tensão de um elemento transdutor. Da extensa análise dos diferentes métodos para determinação do valor de pico de corrente, pode-se concluir que o projeto proposto apresenta todos os elementos necessários para o desenvolvimento de um sensor robusto e de baixo custo, para ser instalado em torres de telecomunicação.

O estudo das características de circuito, tanto da bobina quanto do cabo coaxial, permite o desenvolvimento de um modelo de simulação que descreve o sistema com precisão. A partir do valor de pico de tensão medido na bobina, é possível correlacioná-lo com valor de pico de corrente em simulação. Entretanto, deve-se aperfeiçoar o sistema e a simulação para determinações mais precisas e confiáveis.

Adicionalmente, foi possível realizar um ensaio que simule as condições reais de operação no topo da torre de telecomunicações no IEE-USP. Dos resultados, pode-se concluir que a estrutura da torre no entorno da bobina não afetara de forma significativa a precisão das medidas.

5.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, pode-se destacar a necessidade de:

- Desenvolver um método rápido e eficaz para correlacionar o valor de tensão obtido na bobina e o valor de corrente.
- Aperfeiçoar o projeto da bobina para que esta possa realizar a integração do sinal sem provocar maiores distorções do mesmo.
- Destaca-se a possibilidade de construção de um dispositivo *peak and hold*, que possa ler e fixar o valor de pico de tensão para que este possa ser mensurado posteriormente.
- Aprimorar a blindagem eletromagnética do DSO 201, para evitar maiores interferências nas medidas e medições espúrias.

Referências

ALTAFIM, R. A. C.; GIACOMETTI, J. A.; JANISZEWSKI, J. M. An Electret transducer for impulse voltage measurements. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 28, n. 5, p. 1217-1222, Sept./Dec. 1992.

ARGUESO, M.; ROBLES, G.; SANZ, J. **Measurement of high frequency currents with a Rogowski coil**. 9th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering. 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, Jun 1967. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016003267905984>>. Acesso em: 26 Fevereiro 2015.

CHUBB, L. W.; FORTESCUE, C. The calibration of the sphere gap voltmeter. **American Institute of Electrical Engineers, Proceedings of the**, 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 Fevereiro 2015.

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

FLOWERS, J. W. The direct measurement of lightning current. **Journal of the Franklin Institute**, Philadelfia, 232, n. 5, Nov 1941. 425-450. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003241900686>>. Acesso em: 26 Fevereiro 2015.

FOUST, C. M.; HENDERSON, J. T. Direct measurement of surge currents, v. 54, n. 4, p. 373-378, Apr 1935. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6539143&queryText%3Ddirect+measurement+of+surge+currents>>. Acesso em: 26 Fevereiro 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. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=736205&queryText%3Dlightning+current+and+magnetic+fields+fuchs>>. Acesso em: 22 Janeiro 2015.

GRANDI, G. et al. Stray capacitances of single-layer solenoid air-core inductors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 35, n. 5, p. 1162-1168, Sep 1999. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=793378&queryText%3Dstray+capacitances+of+single>>. Acesso em: 22 Janeiro 2015.

HEIDLER, F. et al. **Parameters of lightning current given in IEC62305-background, experience and outlook**. 29th International Conference on Lightning Protection. Uppsala: [s.n.]. 2008. p. 1-22.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **ANSI/IEEE Std 4-1978: IEEE standard techniques for high-voltage testing**. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1978. 123 p. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=18456>>. Acesso em: 19 Mar. 2015.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-4-5: electromagnetic compatibility (EMC) - part 4-5: testing and measurement techniques - surge immunity test**. Geneva, 2005. 95 p.

JOHNSON, W. C. **Linhas de Transmissão e Circuitos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, v. 1, 1980. 360 p.

JUNIOR, W. H. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. Tradução de Antonio Romeiro Sapienza. 6ª. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill Companies, Inc, 2003. 339 p.

KRAUS, J. D. **Electromagnetics: with applications**. 5th ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, c1999.

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: 07 Março 2015.

LOEB, L. B. The mechanism of lightning discharge. **Journal of the Franklin Institute**, Philadelphia, v. 246, n. 2, p. 123-148, Aug 1948. Disponivel em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016003248903123>>. Acesso em: 26 Fevereiro 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. Disponivel em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JC086iC12p12127/abstract>>. Acesso em: 07 Março 2015.

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**. Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE. 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. Disponivel em: <<http://www.jstor.org/discover/10.2307/97002?sid=21106121370603&uid=3737664&uid=2&uid=4>>. Acesso em: 26 Fevereiro 2015.

THOMAS, R. J. High-impulse current and voltage measurement, v. IM-19, n. 2, p. 102-117, May 1970. Disponivel em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=4313872&matchBoolean%3Dtrue%26queryText%3Dhigh+impulse+current+and+voltage+thomas>>. Acesso em: 14 Março 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, Jul 2002. Disponivel em:

<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2000JD000249/abstract>>. Acesso em: 07 Março 2015.

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 Fevereiro 2015.

WARD, D. A.; EXON, J. L. T. Using Rogowski coils for transient current measurements. **Engineering Science and Education Journal**, v. 2, n. 3, p. 105-113, Jun 1993. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=222754&queryText%3Dusing+rogowski+coils+for+transient+current>>. Acesso em: 14 Março 2015.

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 Janeiro 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 Janeiro 2015.