

TESE DE DOUTORADO Nº 333

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO ORIGINAL PARA MEDIÇÃO E REGISTRO  
DE ONDAS DE CORRENTE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

**LISTZ SIMÕES DE ARAÚJO**

DATA DA DEFESA: 12/05/2020

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO ORIGINAL PARA  
MEDIÇÃO E REGISTRO DE ONDAS DE CORRENTE DE  
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Listz Simões de Araújo

Tese de doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Silvério Visacro Filho

Belo Horizonte – MG

Maio de 2020

A663d	<p>Araújo, Listz Simões de.  Desenvolvimento de dispositivo original para medição e registro de ondas de corrente de descargas atmosféricas [recurso eletrônico] / Listz Simões de Araújo. - 2020.  1 recurso online (112 f. : il., color.) : pdf.  Orientador: Silvério Visacro Filho.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 109-112.  Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Antenas loop - Teses. 3. Bobinas de Rogowski - Teses. 4. Instrumentos de medição - Teses. I. Visacro Filho, Silvério. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3(043)</p>
-------	---

**"Desenvolvimento de Dispositivo Original Para Medição e Registro de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas"**

**Listz Simões de Araújo**

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 12 de maio de 2020.

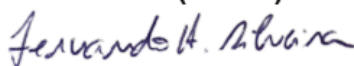
Por:



\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Silvério Visacro Filho**  
DEE (UFMG) - Orientador



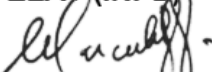
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho**  
DEE (UFMG)



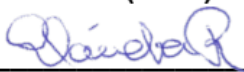
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira**  
DEE (UFMG)



\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Osmar Pinto Junior**  
ELAT (INPE)



\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Marcelo Saba**  
ELAT (INPE)



\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Claudia Rejane de Mesquita**  
Campus Itabirito (IFMG)

# Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Albenes e Lourdes. Eles foram fundamentais em minha vida, me ensinaram que por meio da honestidade, da humildade, do respeito, da parceria e do estudo é possível alcançar qualquer objetivo. Afinal, como eles sempre disseram, não há limites para quem estuda.

Agradeço ao meu professor orientador Silvério Visacro pela parceria, a sua contribuição técnica foi fundamental para a minha formação profissional. Ele permitiu que eu tivesse acesso aos recursos da notável estrutura do Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (LRC), os quais contribuíram substancialmente para a conclusão deste trabalho de doutorado. Além disso, tive a oportunidade de trabalhar com pesquisas de ponta, uma vez que o LRC é referência internacional nos trabalhos desenvolvidos.

Agradeço de forma especial a minha esposa Mariana e a minha filha Ana Laura, elas me apoiaram de forma incondicional para vencer diversos desafios. A elas eu dedico esta tese de doutorado.

Agradeço aos meus grandes amigos, Rafael Maia, Pedro Mattioli, Rafael Alípio, Barbara Alves, Felipe Cota, Guilherme Lima, Marcelo Arcanjo, Paulo Henrique e Roger Araújo, por estarem comigo em todos os momentos. São pessoas incríveis que contribuíram muito para o meu amadurecimento.

Agradeço, também, as minhas irmãs, Karla e Karina, pela amizade e companheirismo em todos os momentos.

Por fim, e não menos importante, agradeço a todos os meus amigos que me apoiaram e acreditaram na minha vitória.

---

# Resumo

A representação da forma e amplitude da onda de corrente de descarga atmosférica constitui elemento fundamental para definição e dimensionamento das práticas de proteção contra o fenômeno. As estações de pesquisas que realizam o registro de formas de ondas de correntes de descargas a partir de torres instrumentadas requerem investimentos altos para sua construção e operação, o que inviabiliza a aquisição de dados de várias localidades em uma determinada região. O trabalho de doutorado consistiu na concepção e desenvolvimento de um dispositivo, capaz de medir e registrar a forma de onda da primeira corrente de retorno de descargas atmosféricas por meio do campo eletromagnético próximo. Tal dispositivo, de custo reduzido e baseado em DSP, tem o propósito de fornecer uma alternativa consistente aos sistemas tradicionais de medição de correntes impulsivas. Desenvolveram-se dois sistemas de medição, sendo a principal diferença entre eles o sensor de aquisição de tensão induzida. Um utiliza uma antena loop e o outro uma bobina de Rogowski. Ambos os sistemas incluem funções adicionais, tais como acesso remoto, autoteste e transferência de dados que podem ser acionadas remotamente por meio de internet. A validação dos sistemas propostos ocorreu em duas etapas. A primeira baseou-se em ensaios laboratoriais e a segunda na medição de corrente de descargas atmosféricas na estação de pesquisa do Morro do Cachimbo (MCS). Em 2018, instalaram-se quatro dispositivos nessa Estação, sendo três com antena loop e um com bobina de Rogowski. Estes dispositivos registraram a forma de onda de cinco primeiras correntes de retorno de descargas descendentes negativas que atingiram a torre instrumentada de MCS. Os resultados obtidos pelos sistemas desenvolvidos mostraram-se consistentes com aqueles obtidos pelo sistema de medição tradicional. Como continuidade do projeto de doutorado, pretende-se constituir uma rede de dispositivos distribuídos em diferentes localidades numa região determinada por um raio da ordem de 30 km, para composição de uma base de dados local de parâmetros de corrente de retorno num curto período.

---

# Abstract

The acquisition of lightning-current waveforms is important for providing parameters required for lightning-protection design and for estimating effects resulting from lightning events. Currently, building and maintaining research stations able to obtain lightning current waveforms from instrumented towers require high investments, which make impossible data acquisition from different places of a specific region. This doctoral project consisted in the design and development of a device for measuring and recording the waveform of the return stroke currents by means of the nearby electromagnetic field. The low-cost device based in DSP has the purpose of providing a consistent alternative to traditional systems of impulsive current measurements. Two measurement systems were developed, the main difference being the acquisition sensor of the induced voltage. One employs a loop antenna, while the other a Rogowski coil. Both systems include additional functionalities, such as remote access, self-test, data transfer, all of which can be controlled from the internet. The validation of the proposed systems was performed in two stages. The first one was based on laboratorial tests and the second one on the measurement of lightning currents at Morro do Cachimbo Station (MCS). In 2018, four devices were installed at MCS, three with a loop antenna and one with a Rogowski coil. These devices recorded the waveform of five first return currents of negative downward lightning that hit MCS instrumented tower. The results obtained by the developed systems were consistent with those provided by the traditional measurement system. As a sequence of the doctoral project, it is intended to build a network of several devices installed in different location in a region, which is determined by a radius of the 30 km, in order to obtain a relevant local database of parameters of lightning currents in a short period of time.

---

# Sumário

<b>1. Introdução.....</b>	<b>4</b>
1.1. Considerações básicas .....	4
1.2. Relevância e motivação do trabalho .....	4
1.3. Objetivo do trabalho.....	5
1.4. Metodologia de desenvolvimento.....	6
1.5. Estrutura do texto.....	7
<b>2. Considerações preliminares .....</b>	<b>9</b>
2.1. Características das correntes de descargas atmosféricas .....	11
2.2. Sistema de medição direta de correntes para prover resultados de referência para o trabalho.....	13
<b>3. Realizações relativas à medição de correntes de descargas: desenvolvimento de transdutores .....</b>	<b>15</b>
3.1. Estado da arte: Bobina de Rogowski .....	15
3.1.1. Princípio de funcionamento e recuperação da forma de onda de corrente a partir da bobina de Rogowski .....	17
3.1.2. Resposta em frequência do sistema de medição .....	19
3.1.3. Integração da tensão induzida .....	21
3.2. Realizações experimentais com Bobinas de Rogowski.....	25
3.2.1. Medições em laboratório utilizando o gerador portátil e a bobina de Rogowski com integrador ativo. ....	26
3.2.2. Medições em campo utilizando o gerador portátil e a bobina de Rogowski com integrador ativo. ....	28
3.2.3. Bobina de Rogowski instalada em MCS.....	31
3.2.1. Cálculo da tensão induzida na bobina de Rogowski.....	34
3.3. Estado da arte: Antena <i>loop</i> .....	37
3.3.1. Tensão induzida em espira próxima ao canal de descarga atmosférica .....	37
3.3.2. Antena - Sensor de corrente .....	39



## SUMÁRIO

---

3.4.	Realizações experimentais com antena <i>loop</i> .....	40
3.4.1.	Cálculo da tensão induzida em uma antena <i>loop</i> .....	40
3.4.2.	Medições em laboratório utilizando o gerador de alta tensão Haefely e o dispositivo	42
<b>4.</b>	<b>Dispositivo de medição e registro da forma de onda corrente de descargas atmosféricas .....</b>	<b>45</b>
4.1.	Visão geral do funcionamento do dispositivo .....	45
4.2.	Diagrama de blocos geral do dispositivo .....	47
4.2.1.	Transdutores: Bobina de Rogowski ou Antena <i>loop</i> .....	49
4.2.2.	Placa de condicionamento de sinal .....	50
4.2.3.	Fonte de tensão alternada, bateria, controlador de carga e conversor CC-CC.....	51
4.2.4.	Microcontrolador 1 – DSP TMS320F28335 .....	52
4.2.5.	Microcontrolador 2 – Arduino MEGA 2560.....	57
4.2.6.	Software de gerenciamento do dispositivo via internet .....	60
4.3.	Calibração do registrador de corrente quando se utiliza a antena <i>loop</i> como sensor...64	
4.4.	Calibração do registrador de corrente quando se utiliza a bobina de Rogowski como sensor.....	67
4.5.	Instalação de equipamentos em MCS .....	69
<b>5.</b>	<b>Medições realizadas em MCS: resultados e análises .....</b>	<b>73</b>
5.1.	Evento 1: Descarga descendente negativa registrada em 03/02/2018 .....	73
5.1.1.	Análise geral do evento .....	74
5.1.2.	Resposta em frequência do dispositivo e melhorias realizadas .....	75
5.1.3.	Validação das ações realizadas por meio de ensaio laboratorial com correntes impulsivas com caudas lentas .....	76
5.1.4.	Análise da fase inicial da corrente .....	77
5.2.	Evento 2: Descarga descendente negativa registrada em 20/01/2019 .....	78
5.2.1.	Análise geral do evento .....	78
5.2.2.	Medição realizada pelo dispositivo 1 (Antena <i>loop</i> ) .....	79
5.2.3.	Medição realizada pelo dispositivo 3 (Antena <i>loop</i> ) .....	80
5.2.4.	Medição realizada pelo dispositivo com a bobina de Rogowski .....	82

## SUMÁRIO

---

5.2.5.	Comparação entre os registros obtidos pelos dispositivos .....	83
5.2.6.	Comparação entre os parâmetros obtidos por cada sistema de medição.....	85
5.3.	Evento 3: Descarga descendente negativa registrada em 20/02/2019 .....	86
5.3.1.	Análise geral do evento .....	86
5.3.2.	Medição realizada pelo dispositivo 1 (Antena <i>loop</i> ) .....	86
5.3.3.	Medição realizada pelo dispositivo 2 (Antena <i>loop</i> ) .....	88
5.3.4.	Medição realizada pelo dispositivo 3 (Antena <i>loop</i> ) .....	89
5.3.5.	Medição realizada pelo dispositivo com a bobina de Rogowski .....	90
5.3.6.	Comparação entre os registros obtidos pelos dispositivos .....	91
5.3.7.	Comparação entre os parâmetros obtidos por cada sistema de medição.....	93
5.4.	Evento 4: Descarga descendente negativa registrada em 19/11/2019 .....	94
5.4.1.	Análise geral do evento .....	94
5.4.2.	Medição realizada pelo dispositivo 3 (Antena <i>loop</i> ) .....	94
5.4.1.	Parâmetros obtidos a partir da forma de onda registrada pelo dispositivo 3 .....	96
5.5.	Evento 5: Descarga descendente negativa registrada em 02/01/2020 .....	96
5.5.1.	Análise geral do evento .....	96
5.5.2.	Medição realizada pelo dispositivo 1 (Antena <i>loop</i> ) .....	97
5.5.3.	Medição realizada pelo dispositivo com a bobina de Rogowski .....	98
5.5.4.	Comparação entre os registros obtidos pelos dispositivos 1 e com a bobina de Rogowski .....	99
5.5.5.	Parâmetros obtidos a partir da forma de onda registrada pelo dispositivo 1 com a bobina de Rogowski .....	101
<b>6. Conclusões e propostas de continuidade .....</b>		<b>102</b>
<b>7. Referências Bibliográficas .....</b>		<b>109</b>

# 1. Introdução

## 1.1. Considerações básicas

A descarga atmosférica é um fenômeno natural que é fonte de distúrbios e danos intensos nos sistemas elétricos e eletrônicos de maneira geral. No Brasil, esses efeitos são intensificados tendo em vista o alto índice de incidência de descargas no solo e em estruturas aterradas.

Dentre as grandezas associadas às descargas atmosféricas entre nuvem e solo, a corrente de retorno é a de maior relevância para estudos de proteção, pois esta consiste na fonte primária dos efeitos eletromagnéticos do fenômeno, notadamente da primeira corrente de descarga. Vários parâmetros desta corrente influenciam na intensidade destes efeitos, especialmente o seu valor de pico, a forma de onda e a sua duração. Deste contexto decorre o interesse na medição integral da onda de corrente, através da qual todos os seus respectivos parâmetros podem ser derivados [1].

A realização da medição de alta qualidade de corrente de descargas atmosféricas é considerada, ainda, um desafio científico. As dificuldades associadas a tal desafio decorrem da natureza complexa dos raios responsáveis pelo fluxo desta corrente, da imprevisibilidade do instante de ocorrência do evento e da intensidade extrema das grandezas envolvidas [1].

## 1.2. Relevância e motivação do trabalho

Atualmente, a medição direta da corrente de descarga atmosférica é realizada basicamente por meio de torres instrumentadas, cujos custos de construção e manutenção são muito elevados. São realizadas, também, estimativas do valor de

pico de corrente por sistemas de detecção de raios LLS (*Lightning Location Systems*), a partir dos dados obtidos de redes integradas de sensores terrestres que percebem os campos eletromagnéticos distantes gerados por cada evento de descarga. Tais estimativas são, entretanto, grosseiras, como demonstram as comparações dos valores estimados para eventos de incidência em torres instrumentadas com aqueles providos pela instrumentação de medição direta instalada nestas torres [2].

Com o intuito de contribuir para a evolução científica desta medição, este trabalho aborda o desenvolvimento de sistemas alternativos de medição de custo reduzido em relação aos sistemas tradicionais, cuja aplicação em larga escala possibilite a constituição de base de dados extensa para melhor caracterização da corrente de descarga [2].

O Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas - *Lightning Research Center* (LRC) tem trabalhado na concepção de um medidor de corrente de raios desde 2002, conforme já apresentado nas referências [2]–[6]. A primeira versão do dispositivo baseado em medição de campo próximo contava com a tecnologia *Field Programmable Gate Arrays* (FPGA) [4], posteriormente, evoluiu-se para um modelo aprimorado, o qual fundamentou-se em utilizar um sistema de aquisição de dados por meio de *Digital Signal Processing* (DSP) [3]. As experiências desenvolvidas são importantes para a continuidade da investigação do tema e para o aprimoramento do registrador de corrente.

### **1.3. Objetivo do trabalho**

No contexto apresentado, projetou-se como objetivo do doutorado desenvolver contribuições para possibilitar o registro de qualidade de correntes de descargas atmosféricas por meio de medição de campo magnético próximo.

O planejamento do trabalho previa a realização de duas etapas, as quais foram concluídas durante o período do doutorado. A primeira, consistia na concepção e desenvolvimento de uma versão de um dispositivo capaz de registrar com exatidão as formas de onda de corrente de retorno de descargas atmosféricas

a partir da medição de tensão induzida gerada por uma antena do tipo *loop*. Tal dispositivo obteria a forma de onda de corrente através da medição do campo magnético próximo gerado pela corrente da descarga. Já a segunda etapa teria como objetivo construir outro registrador de corrente, no qual o sistema de aquisição de dados usaria uma bobina de Rogowski para medir diretamente a corrente que fluiria pela estrutura atingida pelo raio. O desafio inicial desta etapa consistiria no domínio da tecnologia da bobina de Rogowski e no desenvolvimento do sistema de condicionamento do sinal medido pela bobina para sua transmissão até o sistema de aquisição.

Além da capacidade de registrar ondas de corrente de retorno com alta exatidão, os medidores, objetos de desenvolvimento, deveriam incluir sistema de comunicação para transmissão de dados obtidos e para realização de autoteste. Dessa forma, evitar-se-ia a necessidade de deslocamentos frequentes da equipe de manutenção ao local de instalação dos registradores de corrente para coleta de dados, reservando-os para os momentos de necessidade. Experiências anteriores da equipe do LRC na medição em locais remotos já haviam indicado tais deslocamentos frequentes como ponto crítico das campanhas de medição, responsável por inviabilizá-las em muitos casos.

O texto desta tese reporta os desenvolvimentos do trabalho para realização do objetivo do doutorado por meio das implementações relativas às duas etapas programadas.

## **1.4. Metodologia de desenvolvimento**

O trabalho teve início a partir da revisão bibliográfica sobre a medição de correntes impulsivas e dos desenvolvimentos anteriores do LRC. Na sequência do trabalho, optou-se, em um primeiro momento, por aprimorar as técnicas de medição de corrente por meio bobinas de Rogowski, desenvolvendo-se e testando-se unidades destas bobinas com aspectos construtivos diferenciados. Paralelamente, iniciou-se o desenvolvimento completo de um protótipo do medidor baseado em campo próximo. A expertise obtida na fase de desenvolvimento das bobinas de Rogowski foi fundamental para a concepção dos parâmetros do projeto do

registrador de corrente, cujo método de funcionamento consiste na medição de tensão induzida a partir da antena *loop*. Atualizações no projeto do medidor foram realizadas à medida que se evoluía na implementação experimental de protótipos.

Na fase seguinte, ocorreu a avaliação do desempenho dos sistemas propostos por meio de testes laboratoriais e correções, num processo recursivo até se alcançar a operação estável. Em seguida, realizou-se a instalação de protótipos de medição com antena *loop* na estação Morro do Cachimbo (MCS) e, desde então, há monitoramento constante dos dispositivos. Em paralelo, protótipo referente ao sistema de medição com bobina de Rogowski foi preparado e instalado em MCS.

Ao longo das últimas temporadas de chuvas, ocorreram descargas atmosféricas descendentes negativas na estação de pesquisa, que permitiram validar os protótipos instalados.

Após constatado o correto funcionamento do medidor e a necessidade de eventuais aprimoramentos, projeta-se em sequência a este doutorado instalar-se uma rede de medidores, constituída por unidades distribuídas por diversas localidades no estado de Minas Gerais.

## **1.5. Estrutura do texto**

Esta tese está organizada em seis capítulos, incluindo esta introdução. O texto apresenta as realizações do desenvolvimento do projeto de forma cronológica, de modo que o leitor possa entender as principais soluções atribuídas a cada fase do projeto do medidor.

O capítulo 2 apresenta a descrição sucinta do processo de formação de descargas atmosféricas descendentes negativas, bem como os parâmetros e características da primeira corrente de retorno.

O capítulo 3 apresenta as realizações para a concepção de transdutores, os quais foram projetados e desenvolvidos manualmente no laboratório para medir tensões induzidas provenientes de campos magnéticos de descargas atmosféricas.

No capítulo 4 são discutidos aspectos relativos aos desenvolvimentos do dispositivo para a medição e registro da forma de onda de corrente de descargas atmosféricas.

O capítulo 5 se dedica em apresentar e analisar os registros obtidos pelos dispositivos que foram instalados em MCS.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e as propostas de continuidade.

## 2. Considerações preliminares

A descrição do processo de formação dos raios é abordada em detalhes em diversos trabalhos do LRC [1], [7]–[10]. Nesta seção procede-se apenas a uma síntese objetiva das etapas de formação da descarga no que se refere à caracterização da corrente de retorno, que é o resultado final do processo.

A descarga atmosférica é um fenômeno que tem sua origem nas nuvens de tempestade, devido ao acúmulo de cargas negativas e positivas. A literatura reporta que a maioria das cargas positivas se concentra na região superior da nuvem, as cargas negativas se concentram na parte inferior [11]. Há ainda, em pequenas regiões próximas à base das nuvens de tempestade, bolsões de carga positivas. A grande maioria das descargas atmosféricas ocorrem dentro das nuvens. Dentre as descargas que ocorrem da nuvem para o solo, as descargas negativas são as mais comuns (cerca de 90%) e, por tal motivo, têm sua formação considerada a seguir.

Basicamente, há duas teorias que tratam da formação do canal de descargas atmosféricas. Segundo Schonland [11], ocorre transferência de carga do centro de carga da nuvem para o canal à medida que este evolui. Já a teoria apresentada por Kasemir [12] considera que a carga do canal é proveniente da ruptura do ar devido aos elevados gradientes de potencial no interior da nuvem. Desta forma, segundo esta teoria, a carga líquida presente no canal é nula.

A dinâmica dos processos macroscópicos que ocorrem na nuvem de tempestade pode determinar, num certo momento, a concentração de grande volume de cargas negativas na parte inferior da nuvem. O intenso campo elétrico resultante, superior à rigidez dielétrica do meio, é capaz de levar à ruptura uma região consideravelmente extensa, na forma de um canal ionizado de dezenas de



metros, mas de raio reduzido, da ordem de centímetros. É importante mencionar que o termo “canal ionizado” descrito na tese refere-se ao canal em formação, o qual é usualmente designado em inglês como *leader*.

Devido à polaridade do campo elétrico e ao poder das pontas, há o deslocamento das cargas negativas para a extremidade deste canal condutor mais distante do centro de cargas. Com a concentração das cargas negativas no local, há intensificação do campo elétrico superposto ao campo de fundo. Tal campo elétrico na extremidade do canal pode ser suficientemente intenso para gerar uma nova ruptura, alongando o canal, que também passa a ter o campo intensificado na sua extremidade mais distante do centro de cargas que originou o processo, devido ao deslocamento das cargas negativas para o local.

Esse processo pode se repetir por passos consecutivos e, em alguns casos, a evolução do canal ionizado ocorre verticalmente em direção ao solo. Neste caso, o canal é denominado canal descendente.

À medida que o canal carregado se aproxima do solo por passos, a carga induzida neste meio aumenta, num efeito semelhante à aproximação dos eletrodos de um capacitor ao ser submetido a uma determinada diferença de potencial. À medida que evolui, o campo elétrico muito intenso no entorno do canal gera um efeito corona pronunciado que dá origem a um envelope de corona, no qual fica armazenada parte da carga negativa que se deslocou para o canal.

O canal evolui por passos e, quando a distância até solo é reduzida, da ordem de centenas de metros, o campo elétrico no meio se intensifica enormemente, sobretudo nas partes elevadas, e faz surgir canais ionizados positivos designados ascendentes, que evoluem em direção ao canal descendente. No caso em que um dos canais ascendentes se conecta ao canal descendente, tem início a corrente de retorno. O fluxo de corrente de descarga pelo canal ionizado gera um aquecimento intenso e um efeito luminoso, o relâmpago. O processo também provoca a expansão do ar e uma onda sonora de choque associada, o trovão.

Uma descrição detalhada deste processo, bem como suas variações associadas aos outros tipos de descargas (positiva, ascendentes), pode ser encontrada em [7], [13].

## 2.1. Características das correntes de descargas atmosféricas

O foco do trabalho descrito por esta tese é medir e registrar a forma de onda da primeira corrente de retorno de descargas descendentes. A figura 2.1 ilustra uma curva típica de uma primeira corrente de retorno de uma descarga descendente negativa registrada pelo sistema de medição tradicional de MCS [14]. Nota-se, nessa medição, o caráter impulsivo da corrente, que alcança o pico de aproximadamente 80 kA em alguns microssegundos. Vale ressaltar que tal valor de pico é mais intenso que o usual, uma vez que o valor mediano de amplitudes das correntes de descargas medidas na estação é de cerca de 45 kA [7]. Após o pico, a corrente reduz seu valor lentamente, alcançando a faixa de 1000 A em cerca de 350  $\mu$ s. O sinal negativo indica que houve transferência de cargas negativas da atmosfera para o solo.

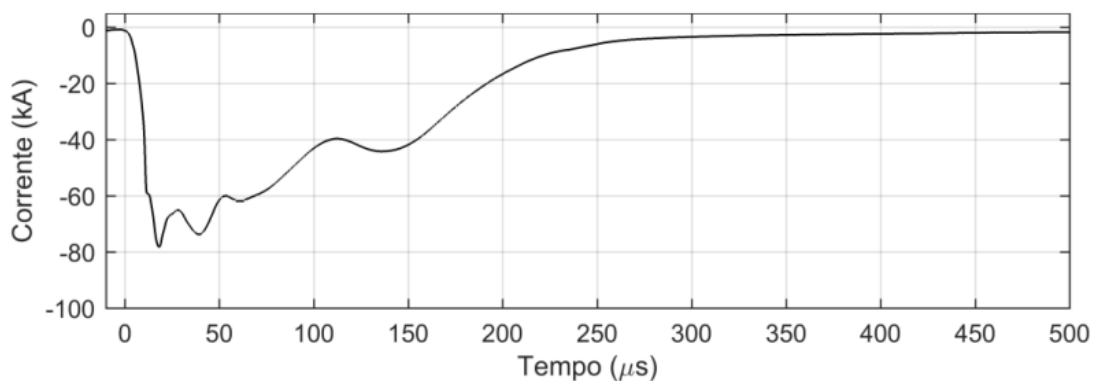


Figura 2.1 - Forma de onda típica de uma corrente de descarga descendente negativa. Adaptado de [14].

Os parâmetros de tempo de uma onda de corrente influenciam os efeitos produzidos pelas descargas atmosféricas, tais como a tensão induzida em redes próximas. A figura 2.2 ilustra os parâmetros tempo de frente da onda ( $T_{10}$  e  $T_{30}$ ) e o tempo de meia onda. Espera-se que esses parâmetros sejam determinados a partir das ondas de correntes registradas pelos dispositivos propostos.

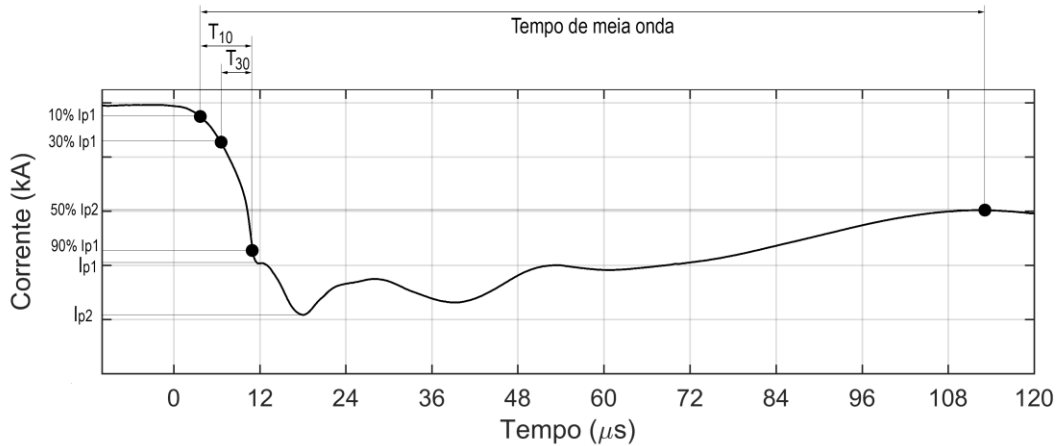


Figura 2.2 – Parâmetros de tempo da onda de descarga. Adaptado de [10].

A partir de  $T_{10}$  e  $T_{30}$ , podem ser obtidos os tempos de frente virtuais  $T_{d10}$  e  $T_{d30}$ , que visam representar a duração total da frente de onda como se esta apresentasse comportamento linear. O cálculo do parâmetro  $T_{d10}$  é bastante simples. Primeiro, determina-se o intervalo de tempo entre o instante em que a corrente atinge 10% do valor do primeiro pico da onda e o instante em que a corrente atinge 90% desse pico, o  $T_{10}$ . Em seguida, tal intervalo de tempo é dividido por 0,8, obtendo-se o tempo de frente. O cálculo do parâmetro  $T_{d30}$  é muito similar à análise descrita para  $T_{d10}$ . Para determinar  $T_{d30}$ , calcula-se o período de tempo que a corrente leva para evoluir de 30% até 90% do primeiro pico ( $T_{30}$ ) e divide-se tal intervalo de tempo por 0,6.

Os valores de  $T_{d30}$  e  $T_{d10}$  podem ser diferentes, pois o crescimento da corrente da descarga atmosférica não é linear até o primeiro pico. Vale ressaltar que comparações relacionadas ao tempo de frente entre formas de ondas de correntes distintas devem ser referenciadas a um mesmo parâmetro.

O tempo de meia onda é definido como o intervalo de tempo entre o instante inicial da corrente e o instante, após o pico maior, quando a intensidade de corrente tem seu valor decrescido a 50% do valor de pico mais intenso. O valor de tempo de meia onda é muito superior ao do tempo de frente, portanto, neste caso, não há necessidade de em se definir com alto grau de exatidão o instante inicial da corrente.

O tempo de duração total de descarga refere-se ao período de tempo decorrido entre o início da onda impulsiva e o seu término.

## 2.2. Sistema de medição direta de correntes para prover resultados de referência para o trabalho

Atualmente, a estação de pesquisa Morro do Cachimbo dispõe de uma infraestrutura avançada para medição de correntes de descargas atmosféricas. O sistema de medição de corrente possui uma torre instrumentada de 60 metros de altura, tendo como suporte cabos isolados. Desse modo, toda a corrente que fluir pela torre tem apenas um caminho para solo. Na base da torre, há duas bobinas de *Pearson*, que são usadas como transdutores para medição direta de corrente, uma de até 11 kA e a outra de até 150 kA. As resoluções do sistema de medição para a bobina até 11 kA e 150 kA são  $\pm 5$  A e  $\pm 72$  A, respectivamente. O nível de ruído identificado é de  $\pm 5$  A e os limites de frequência das bobinas são de 0,25 Hz e 4 MHz, 3 Hz e 1,5 MHz para a escala menor e maior, respectivamente. O sinal captado pelas bobinas é direcionado a uma placa de aquisição que está configurada para operar a uma taxa de 60 milhões de amostras por segundo (60 MS/s), o que resulta em resolução temporal de aproximadamente 17 ns. O sistema foi projetado para que qualquer corrente na torre superior ao limiar de 60 A fosse gravada. Cada registro de corrente tem uma duração total de 500 ms, a qual inclui um intervalo de 15 ms anterior à detecção do limiar (*pré-trigger*). Com o intuito de se aumentar a confiabilidade dos resultados de medição, outro sistema com configuração similar à descrita opera em paralelo com o sistema principal, de maneira a oferecer resultados redundantes. A figura 2.3 apresenta o diagrama esquemático do sistema de medição de correntes da Estação do Morro do Cachimbo. Informações detalhadas sobre os sistemas instalados na estação MCS podem ser encontradas em [13].

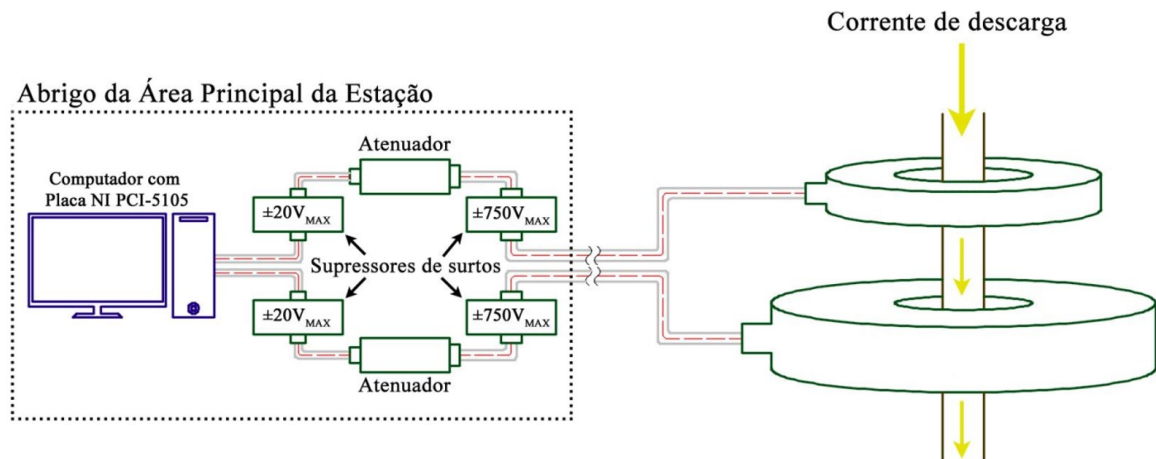


Figura 2.3 - Representação esquemática do sistema de medição de correntes da Estação do Morro do Cachimbo. [13]

O sistema de medição de corrente descrito encontra-se em operação desde 2008 e sua performance e confiabilidade tem sido apresentada em diversos trabalhos do LRC. Por isso, os registros de correntes fornecidos pelas bobinas de Pearson serão considerados neste trabalho como referência para calibrar os dispositivos de medição de corrente propostos nesta tese.

# 3. Realizações relativas à medição de correntes de descargas: desenvolvimento de transdutores

## 3.1. Estado da arte: Bobina de Rogowski

A bobina de Rogowski é um notável transdutor para medição de correntes alternadas e transitórias, muito utilizado em faixas elevadas de corrente, de dezenas a milhares de amperes [15]. A característica deste tipo de bobina de não saturar em correntes elevadas torna a sua aplicação muito difundida no desenvolvimento de eletrônica de potência. A sua aplicação é particularmente importante para medição de correntes impulsivas elevadas, tais como as correntes de retorno de descargas atmosféricas.

O trabalho de Ray e Hewson [16] apresenta o princípio de funcionamento, limitações e desenvolvimento de tecnologia de medição com a utilização de bobinas de Rogowski. Os autores também reportam técnicas para proporcionar melhorias no projeto de um integrador ativo, o qual é responsável por processar o sinal de tensão induzido na bobina de modo a obter a forma de onda final similar à da corrente que gerou a tensão induzida. Tais técnicas consistem em propor e alterar parâmetros no sistema de medição para que ele opere com frequência de corte superior a 10 MHz.

Os autores Ray, Hewson e Metwally [16], [17] afirmam que a bobina de Rogowski é tratada na literatura com menor ênfase do que os métodos tradicionais

de medição, tais como o transformador de corrente e o sensor de efeito Hall. Somente a partir da década de 1990, o estudo da bobina começa a ter maior relevância na comunidade científica.

A literatura [15]–[21] destaca as seguintes características das bobinas de Rogowski:

- Capacidade de medição de transitórios de correntes. Isso decorre do fato da bobina apresentar uma ampla banda de passagem, a qual corresponde a um intervalo de 1 Hz até 10 MHz. [16].
- Ampla faixa de amplitude. A mesma bobina é capaz de medir um grande intervalo de amplitude de corrente, de 100 A a 100 kA.
- Apresenta comportamento linear frente a variação de amplitude e frequência.
- Se houver sobrecorrentes, a bobina não será danificada, tampouco ocorrerá saturação;
- É fácil de construir, manipular e instalar. A figura 3.1 ilustra uma bobina de Rogowski desenvolvida no LRC.
- Não transfere o potencial do circuito de potência para o circuito de medição. A bobina envolve o condutor onde flui a corrente e não há conexão elétrica entre os circuitos.



Figura 3.1 – Bobina de Rogowski.

A fabricação da bobina é relativamente simples e esta pode ser construída a partir de um fio de cobre esmaltado enrolado em um material flexível, que permita moldar o formato do percurso fechado ao redor do condutor onde se deseja realizar a medição de corrente.

### 3.1.1. Princípio de funcionamento e recuperação da forma de onda de corrente a partir da bobina de Rogowski

A figura 3.2 ilustra de forma esquemática um sistema de medição de corrente composto por uma bobina de Rogowski conectada a um circuito integrador. A corrente  $i(t)$ , variável no tempo, gera um campo magnético também variável no tempo que atravessa a área das espiras da bobina de Rogowski. A força eletromotriz induzida em cada espira é somada, pois elas estão conectadas em série, resultando na tensão  $fem(t)$ . Tal tensão alimenta um circuito integrador, cuja função envolve o condicionamento e a integração temporal do sinal para se obter uma forma de onda de tensão de saída  $V_{out}(t)$  correspondente à forma de onda de corrente  $i(t)$ . Vale ressaltar que o condutor por onde flui a corrente  $i(t)$  não precisa estar posicionado no centro da bobina. Essa característica facilita o uso do sistema de medição, pois qualquer posição do condutor no interior da bobina produzirá a mesma tensão induzida.

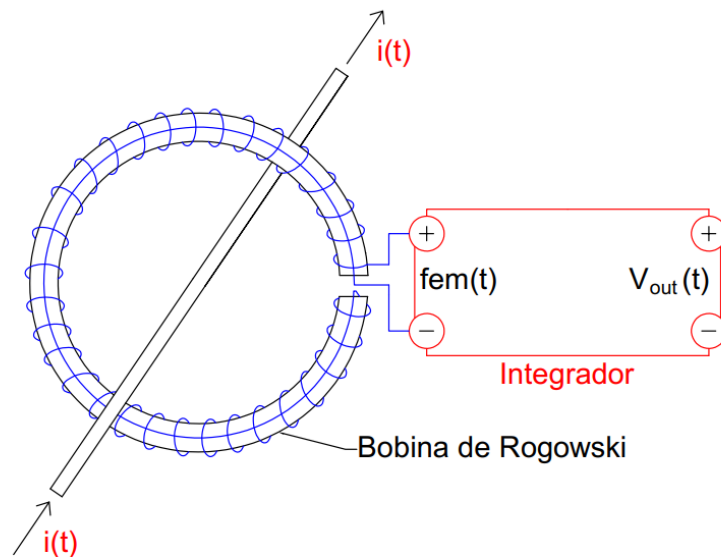


Figura 3.2 – Sistema de medição de corrente através de uma bobina de Rogowski. Adaptado de [16]

A figura 3.3 ilustra um arranjo para cálculo da intensidade de campo magnético  $H$  em uma bobina de Rogowski.



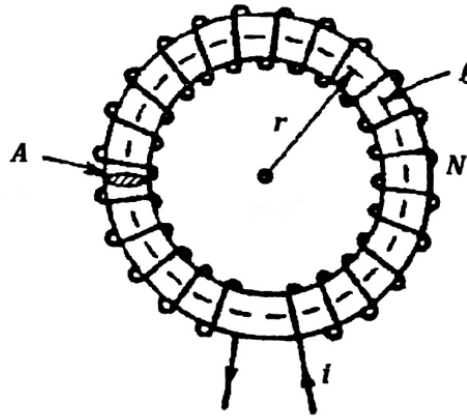


Figura 3.3 - Arranjo para cálculo da intensidade de campo magnético H. [22].

No caso em questão, o cálculo da intensidade de campo magnético é dado pela aplicação da Lei de Ampere no percurso circular tracejado, conforme apresentado na equação 3.1. O parâmetro  $N$  corresponde ao número de espiras enroladas no núcleo,  $I$  indica a corrente que atravessa a bobina (figura 3.2) e  $\mu_o$  é a permeabilidade magnética do ar que constitui o núcleo da bobina.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad \text{Equação 3.1}$$

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad \text{Equação 3.2}$$

$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi r} \quad \text{Equação 3.3}$$

A partir da densidade de campo magnético fornecida pela equação 3.3, obtém-se o fluxo magnético pela equação 3.4. A aplicação da Lei de Faraday e de Lenz permite obter a tensão induzida entre os terminais da bobina, a qual é expressa na equação 3.6. Nota-se que a forma de onda de tensão induzida é dependente dos parâmetros construtivos da bobina e da derivada da corrente  $I$ .

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \text{Equação 3.4}$$

$$fem(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Equação 3.5}$$

$$fem(t) = -\left(\frac{A_e N \mu_o}{2\pi r}\right) \frac{di}{dt} \quad \text{Equação 3.6}$$

No projeto da bobina de Rogowski adequada à medição de primeira corrente de retorno de descargas atmosféricas, pode-se atuar nos parâmetros  $A_e$ ,  $N$ ,  $r$  e  $\mu_o$

para se alcançar a faixa de amplitude da tensão induzida apropriada para as características peculiares do evento em foco.

### 3.1.2. Resposta em frequência do sistema de medição

A análise da resposta em frequência do sistema de medição compreende a avaliação da banda de passagem da bobina de Rogowski e da resposta do integrador.

A equação 3.6 apresenta a tensão induzida em uma bobina ideal. Para os casos reais, os autores Ray e Hewson [16] sugerem o modelo indicado na figura 3.4 para representar a bobina. Os parâmetros  $L$  e  $C$  representam a indutância e capacitância da bobina, respectivamente. No modelo, a tensão induzida  $fem(t)$  é dada pela equação 3.6 e  $fem_s(t)$  corresponde a tensão de saída nos terminais da bobina, sob o efeito da indutância e capacitância.

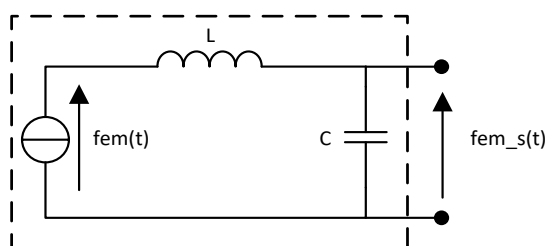


Figura 3.4 – Modelo da bobina de Rogowski. [16]

A frequência de corte inferior do sistema é definida apenas pela bobina de Rogowski, pois, conforme visto na equação 3.6, a tensão induzida é diretamente proporcional à derivada da corrente. Se a componente de frequência do sinal de corrente for 0 Hz, não há tensão induzida  $fem_s(t)$ . A frequência de corte superior é determinada a partir da análise entre as frequências de corte da bobina de Rogowski e do integrador, a que for menor será definida como a frequência de corte superior do sistema. O gráfico ilustrado na figura 3.5 apresenta a resposta em frequência do conjunto formado pela bobina de Rogowski e integrador. Na figura,  $f_A$  e  $f_B$  correspondem às frequências de corte inferior e superior do sistema de medição, respectivamente. A resposta em frequência do sistema indica que há um ganho constante para as componentes de frequências que compreendem a faixa de  $f_A$  até  $f_B$ . Essa característica facilita e justifica o seu uso na prática.

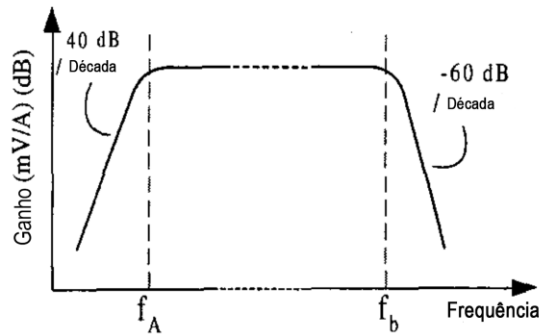


Figura 3.5 - Resposta em frequência do sistema de medição apresentado na figura 2.5. [16]

A frequência de corte superior do integrador depende da constante de tempo do circuito. Já a da bobina depende dos parâmetros construtivos (indutância e capacitância), conforme indicado na equação 3.7. [16]

$$Frequência\ de\ corte = \frac{1}{4\sqrt{LC}} \quad \text{Equação 3.7}$$

Para alcançar uma frequência de corte mais elevada é necessário diminuir a indutância da bobina, que é proporcional ao quadrado das espiras enroladas no núcleo. Também, pode-se reduzir a capacitância da bobina com o uso de condutor de menor diâmetro.

Em aplicações de alta frequência, não é recomendado o uso de várias camadas de espiras. Tais camadas provocam um aumento de capacitância e indutância do conjunto, tornando o sistema de medição muito limitado nos casos onde a frequência de corte for menor que as frequências que compõem o sinal de corrente que se deseja medir. Contudo, há casos em que interessa usar indutância elevada para se reduzir o ruído de baixa frequência.

A utilização da bobina de Rogowski deve ser feita com muita atenção. Conhecer as componentes de frequência do sinal que será medido é fundamental para garantir que o sinal original não seja distorcido pelo sistema de medição.

Conforme ilustrado na figura 3.6, utiliza-se o resistor  $R_d$  para realizar casamento de impedância com a finalidade de reduzir oscilações de alta frequência no sinal de tensão induzida da bobina. Além do resistor  $R_d$ , a figura mostra o circuito simplificado equivalente da bobina conectado ao circuito integrador por um cabo coaxial. A literatura reporta que a capacitância adicional do cabo coaxial faz a banda

de passagem da bobina de Rogowski diminuir. A frequência de corte superior da bobina permanece inalterada quando se utiliza um resistor  $R_o$ , cujo valor de resistência seja muito maior que o valor de  $R_d$ .

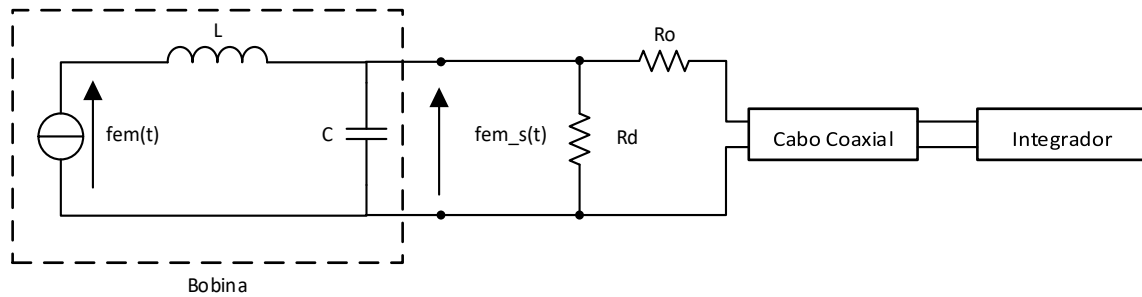


Figura 3.6 – Arranjo esquemático da conexão entre a bobina e o circuito integrador. [16]

Ray e Hewson [16] afirmam que o valor da resistência que promove o casamento de impedância é dada pela equação 3.8:

$$R_d = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{Equação 3.8}$$

O valor de  $R_d$  obtido na equação 3.8 é maior que a impedância característica da bobina e, neste aspecto, não há consenso na literatura. Outros pesquisadores afirmam que o resistor com a finalidade de realizar o casamento de impedância deveria ser igual à impedância de surto. [23]

### 3.1.3. Integração da tensão induzida

A forma de onda de corrente é obtida por meio da integração temporal do sinal da tensão induzida  $fem_s(t)$  (figura 3.4). Pode-se realizar a operação de integração através de circuitos, na forma analógica ou numérica. Basicamente, os integradores analógicos podem ser divididos em dois grupos, integradores passivos e ativos.

#### a. Integração passiva

A integração passiva consiste em utilizar apenas elementos que não necessitam de fonte externa para funcionar. Ray e Hewson [16] apresentam dois métodos para integração passiva, os quais estão ilustrados nas figuras 3.7 e 3.8.

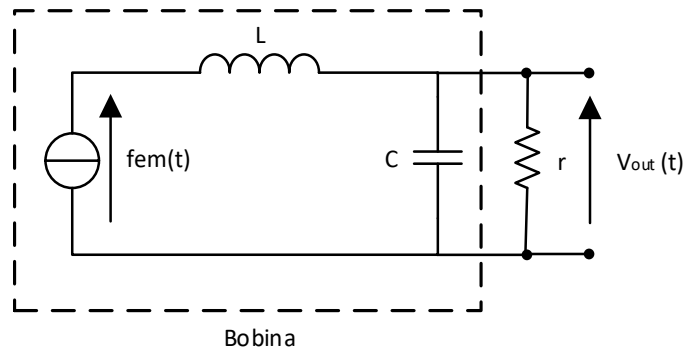


Figura 3.7 – Integrador passivo LR. [16]

O circuito apresentado na figura 3.7 é conhecido na literatura como auto integrador, ele atua efetivamente como um transformador de corrente proporcional ao número de espiras da bobina. O método somente funciona se a resistência  $r$  for muito menor que o valor da impedância característica da bobina de Rogowski. Sabe-se que a amplitude do sinal de tensão de saída  $V_{out}(t)$  tem valor muito reduzido comparado ao valor de amplitude da tensão induzida na bobina. Portanto, o método é indicado para situações onde a corrente a ser medida possua componentes de frequências elevadas, aquelas superiores a 100 kHz ou para medição de pulsos que tem duração menor que 5  $\mu s$ . Outros pesquisadores não recomendam utilizar o método em aplicações práticas, a não ser que esteja medindo apenas sinais senoidais [17]. Do ponto de vista de medição, oscilações com frequência de ressonância da bobina podem surgir sobrepostas à onda de corrente original.

O método apresentado na figura 3.8 possui características muito semelhantes ao circuito ilustrado na figura 3.7. A principal diferença entre eles é que, devido à presença do resistor de casamento de impedância  $R_d$ , as oscilações com componentes de frequência de ressonância da bobina não são observadas nas medições.

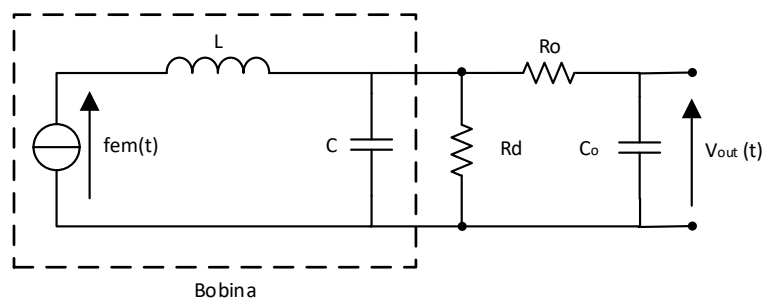
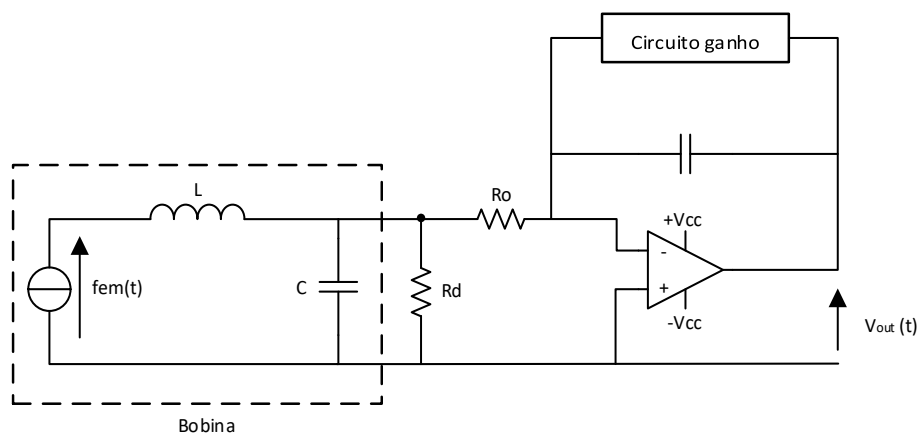


Figura 3.8 – Integrador passivo CR. [16]

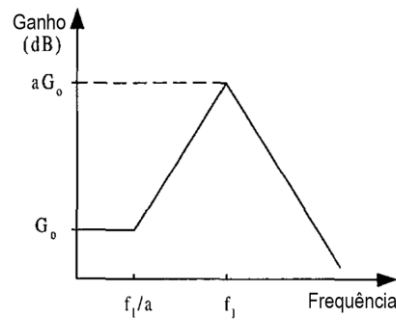
**b. Integração ativa**

O universo de sinais de correntes que possuem características adequadas para a utilização do integrador passivo é muito restrito. Por exemplo, correntes impulsivas associadas a descargas atmosféricas não são medidas com qualidade por tais integradores. A parcela de corrente que contém componentes de baixa frequência (menores que 100 kHz) gera valores de tensão induzida reduzidos na bobina de Rogowski, portanto, qualquer ruído é capaz de corromper o sinal integrado. Nesta perspectiva, aplica-se o integrador ativo, com o objetivo de se medirem sinais com espectro de frequência mais largo. Dentro da categoria de integradores ativos, há a configuração inversora e a não-inversora, ilustradas nas figuras 3.9 e 3.10, respectivamente.

O integrador ativo tem como característica fornecer ao sinal medido um ganho inversamente proporcional às componentes de frequências que constituem o sinal. Desse modo, o circuito comporta-se, basicamente, como um filtro passa baixas com ganho. Isso pode ser um grande problema na prática, já que sinais de baixa frequência podem ter um ganho de 1000 vezes ou até superior. Desta maneira, a medição está sujeita a sofrer interferências e introduzir distorções no sinal de interesse. O problema pode ser minimizado utilizando um circuito adicional indicado na figura 3.9 (a) como “circuito ganho”, o qual controla o ganho em baixas frequências, naquelas menores que  $f_1$ , conforme ilustrado no gráfico de resposta em frequência da figura 3.9 (b). A frequência  $f_1$  é definida pela interação entre a constante de tempo do circuito adicional e a do integrador. Detalhes de tal circuito podem ser encontrados nos trabalhos de Ray e Hewson [16] [20].



(a)



(b)

Figura 3.9 – (a) Integrador ativo: configuração inversora. (b) Resposta em frequência do integrador ativo. [16]

O circuito integrador ativo implementado com a configuração inversora apresenta duas grandes desvantagens, a saber:

- Oscilações de alta frequência são reportadas na literatura [16] ;
- Um pulso com polaridade inversa é medido no início do registro da forma de onda de corrente.

As desvantagens descritas acima podem ser evitadas utilizando a configuração não inversora, ilustrada na figura 3.10. No entanto, o integrador não inversor é difícil de ser construído na prática, pois, para se obter um ganho constante na faixa de frequência de operação, é necessário ajustar três constantes de tempo: a do circuito adicional, a do integrador e a do circuito passivo constituído pelos elementos  $C_0$  e  $R_0$ .

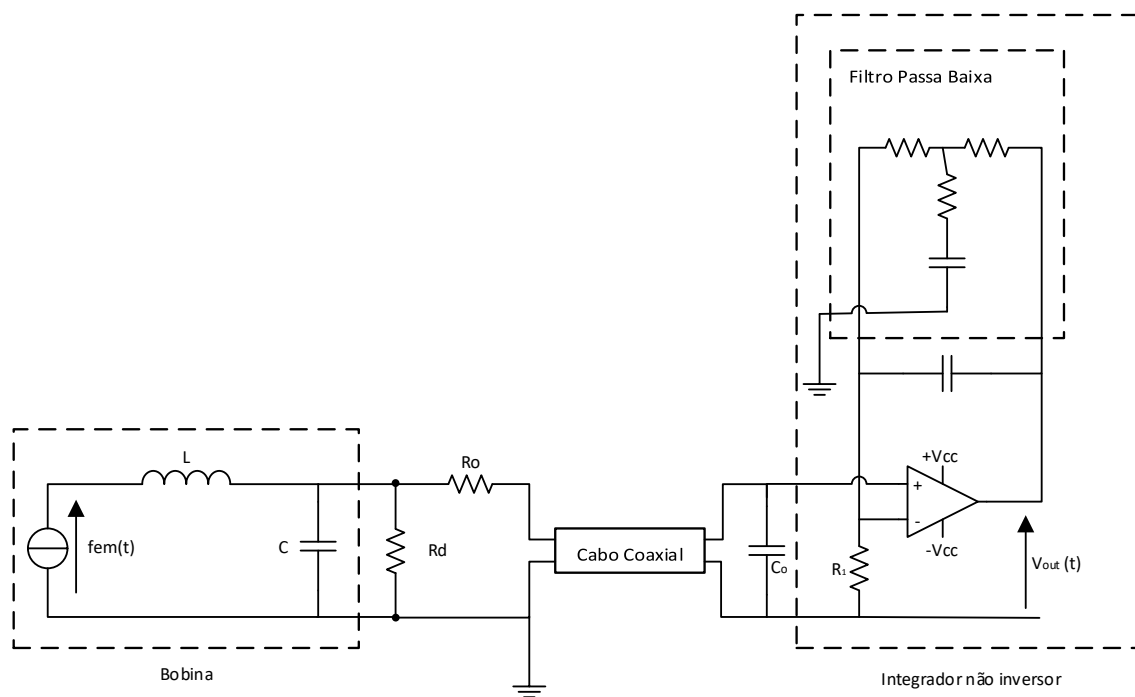


Figura 3.10 – Integrador ativo: configuração não inversora. [16]

## 3.2. Realizações experimentais com Bobinas de Rogowski

O LRC possui uma infraestrutura através da qual é possível realizar ensaios com correntes impulsivas elevadas a partir de um gerador de alta tensão. Isso foi crucial para realizar, em laboratório, testes com campos eletromagnéticos de intensidades proporcionais a eventos reais.

A medição de sinais com componentes de alta frequência é complexa, uma vez que interferências eletromagnéticas podem provocar ruídos aos dados medidos pelo dispositivo. Em função de tais interferências e da necessidade de ajustes nos parâmetros do sensor de corrente, diversos testes foram realizados para atingir o estágio atual do projeto. Entretanto, neste texto serão apresentados apenas os resultados mais relevantes.

O início das realizações experimentais deu-se com o desenvolvimento de bobinas de Rogowski com características diferentes, de maneira a avaliar o desempenho delas quando submetidas à medição de correntes impulsivas. Além das bobinas, diferentes topologias de circuitos integradores ativos e passivos foram



construídos, buscando-se a solução mais adequada para a medição de correntes de descargas.

O foco desta seção é apresentar os resultados laboratoriais de medição de corrente alcançados por meio da bobina de Rogowski e comparar com os registros fornecidos por um sistema de referência.

### 3.2.1. Medições em laboratório utilizando o gerador portátil e a bobina de Rogowski com integrador ativo.

O projeto do sistema de medição abordado neste ensaio foi baseado no circuito ilustrado na figura 3.2. O teste laboratorial consistiu em aplicar uma onda de corrente impulsiva a uma carga e obter simultaneamente dois registros de correntes, um provido pela bobina de Pearson (sistema de referência) e outro proveniente da Bobina de Rogowski.

A figura 3.11 ilustra o arranjo experimental que contém a bobina de Rogowski conectada a um circuito integrador, a bobina de Pearson e o fio condutor por onde a corrente a ser medida flui. Nesta fase dos experimentos, o circuito do integrador estava na etapa de aprimoramento, por isso ele ainda se encontrava montado em um *protoboard*.

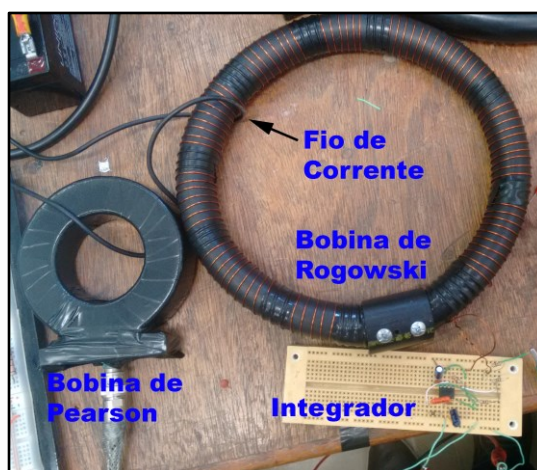


Figura 3.11 – Sistema de corrente impulsiva utilizando bobina de Pearson e bobina de Rogowski.

Como já mencionado no capítulo 2, a bobina de Pearson é um excelente transdutor de corrente impulsiva, por isso ela será utilizada como referência para

avaliar o desempenho da bobina de Rogowski. O gerador de impulso foi ajustado para fornecer três formas de ondas de correntes impulsivas de aproximadamente 6,5 A de pico. A diferença básica entre elas é o tempo de frente. As figuras 3.12, 3.13 e 3.14 ilustram os resultados obtidos para correntes com tempo de frente de 8  $\mu$ s, 3  $\mu$ s e 0,75  $\mu$ s, respectivamente. Ambos sistemas de medição foram capazes de medir a corrente de teste que fluiu pelo condutor indicado pela seta na figura 3.11.

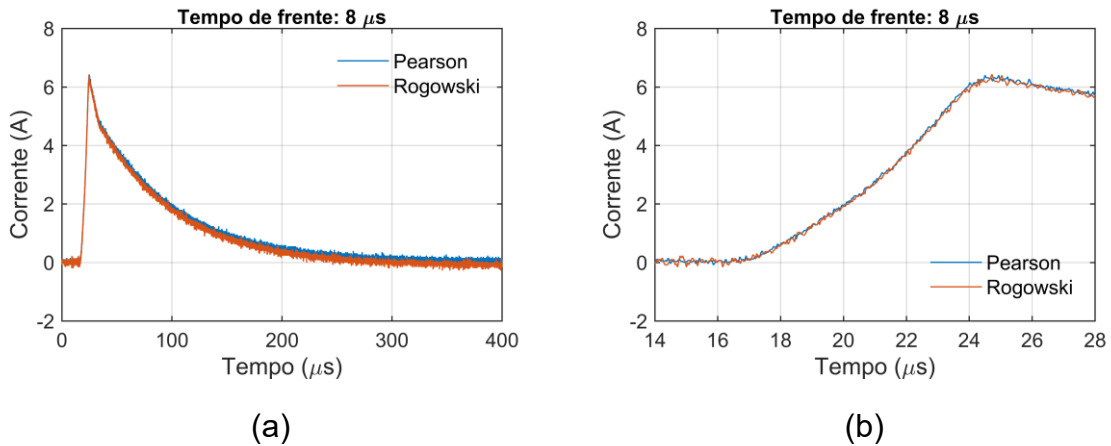


Figura 3.12 – Comparação entre a onda de corrente medida pela bobina de Pearson e a Bobina de Rogowski. Figura (a) corresponde ao evento completo e (b) é ampliação do período referente à frente da onda de corrente.

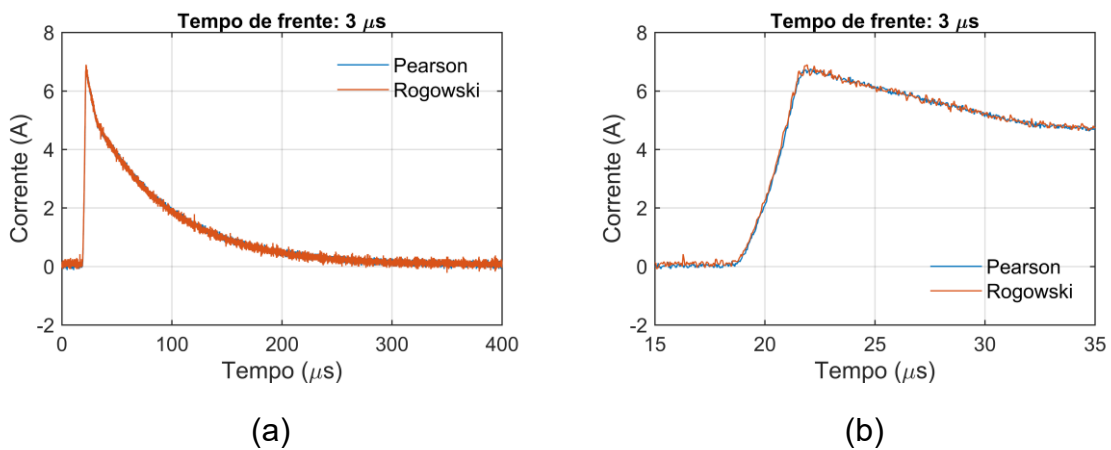


Figura 3.13 – Comparação entre a onda de corrente medida pela bobina de Pearson e a Bobina de Rogowski. Figura (a) corresponde ao evento completo e (b) é ampliação do período referente à frente da onda de corrente.

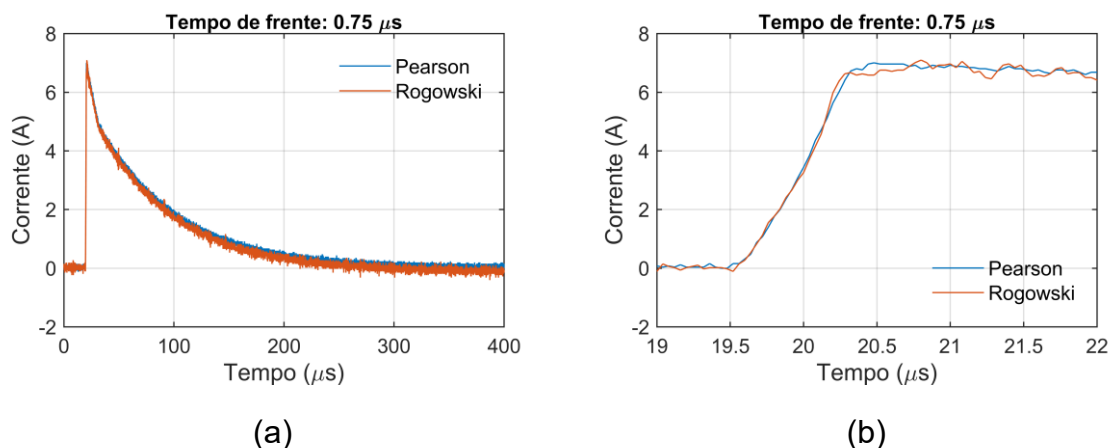


Figura 3.14 – Comparação entre a onda de corrente medida pela bobina de Pearson e a Bobina de Rogowski. Figura (a) corresponde ao evento completo e (b) é ampliação do período referente à frente da onda de corrente.

Observa-se, nos resultados alcançados, grande similaridade entre os registros obtidos pela bobina de Rogowski e pela bobina de Pearson. A variação no tempo de frente das ondas mostrou que o mesmo integrador funcionou de forma consistente para ondas impulsivas com conteúdo espectral diferente. Ademais, o mesmo ganho pôde ser atribuído aos três registros de tensão providos pelo integrador.

### 3.2.2. Medições em campo utilizando o gerador portátil e a bobina de Rogowski com integrador ativo.

Após o resultado promissor obtido em laboratório, optou-se por avaliar o comportamento do sistema em campo. Então, ondas de correntes impulsivas foram aplicadas a um aterramento real a partir do gerador portátil conforme ilustrado na figura 3.15. Com o intuito de avaliar e validar os registros das correntes injetadas no solo medidas pelo sistema que conta com a bobina de Rogowski, utilizaram-se dois métodos de medição como referência. O primeiro consistiu em utilizar um resistor *shunt* e o outro a bobina de Pearson. Informações detalhadas sobre a configuração do aterramento podem ser encontradas na dissertação de Neto [24]. O diagrama esquemático do arranjo experimental é apresentado na figura 3.16.

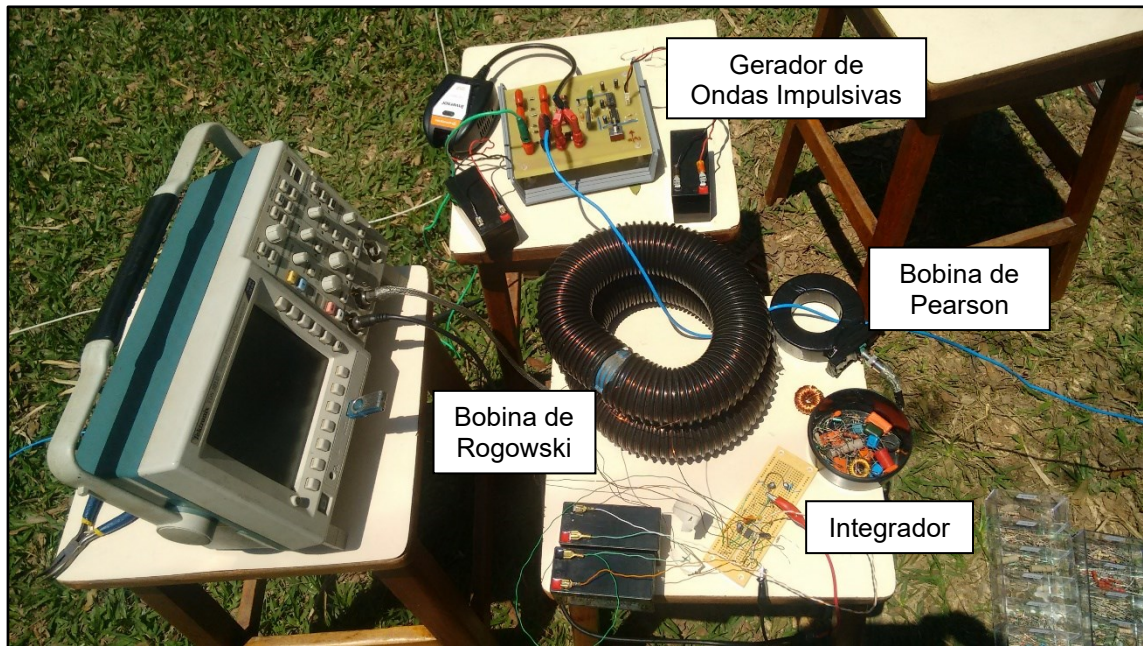


Figura 3.15 – Arranjo experimental utilizado em campo.

Uma corrente impulsiva foi injetada no aterramento por meio do condutor azul, indicado na figura 3.15. Nota-se que tal condutor foi instalado de modo a atravessar as bobinas de Rogowski e de Pearson. Os sinais fornecidos pelos transdutores de correntes alimentaram um osciloscópio, que registrou os dados de corrente em um cartão de memória.

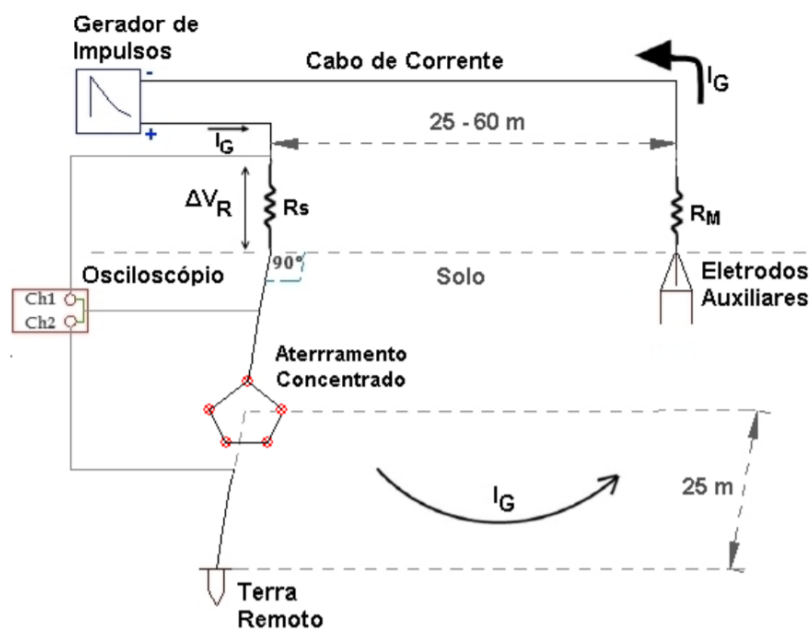


Figura 3.16 – Diagrama esquemático do arranjo experimental ilustrado na figura 3.15. [24]

A figura 3.17 apresenta os resultados de corrente obtidos pelos três métodos de medição. Este ensaio refere-se à aplicação de uma onda de corrente impulsiva rápida (tempo de frente de aproximadamente 1  $\mu\text{s}$ ) ao aterramento.

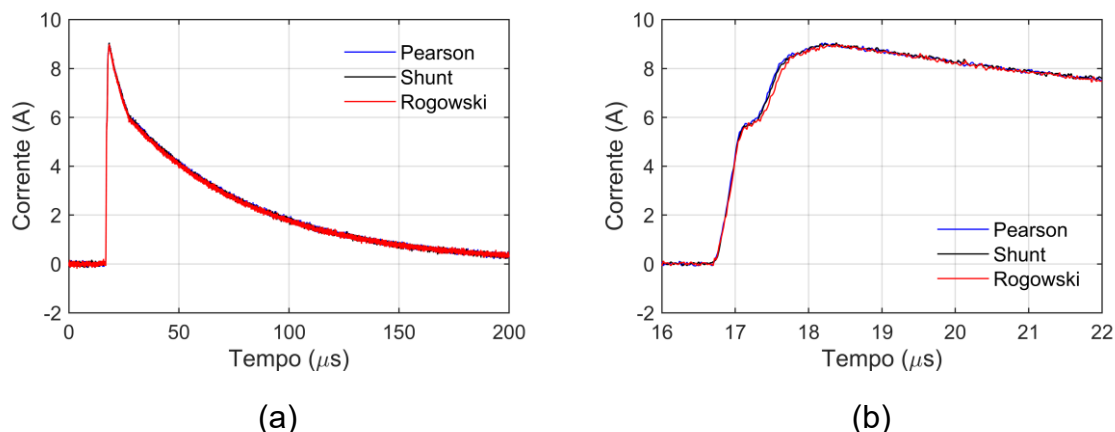


Figura 3.17 – Comparação entre ondas de correntes medidas por meio do resistor shunt, da bobina de Pearson e da bobina de Rogowski. Figura (a) corresponde ao evento completo e (b) é ampliação do período referente à frente da onda de corrente.

A figura 3.18 apresenta os resultados de corrente obtidos pela bobina de Pearson e pelo dispositivo com bobina de Rogowski. Este ensaio refere-se à aplicação de uma onda de corrente impulsiva lenta (tempo de frente de aproximadamente 4  $\mu\text{s}$ ) ao aterramento.

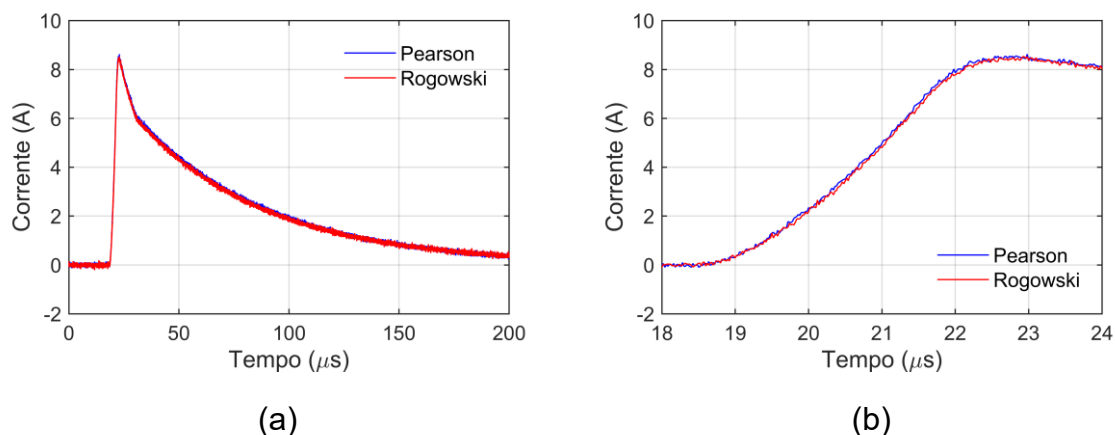


Figura 3.18 – Comparação entre ondas de correntes medidas por meio da bobina de Pearson e da bobina de Rogowski. Figura (a) corresponde ao evento completo e (b) é ampliação do período referente à frente da onda de corrente.

A configuração do retorno de corrente do aterramento foi alterada de forma proposital, a fim de se obter uma forma de onda de corrente diferente. Resistores foram inseridos para gerar uma reflexão negativa na onda de corrente injetada no aterramento. Tal reflexão pode ser visualizada na figura 3.19.

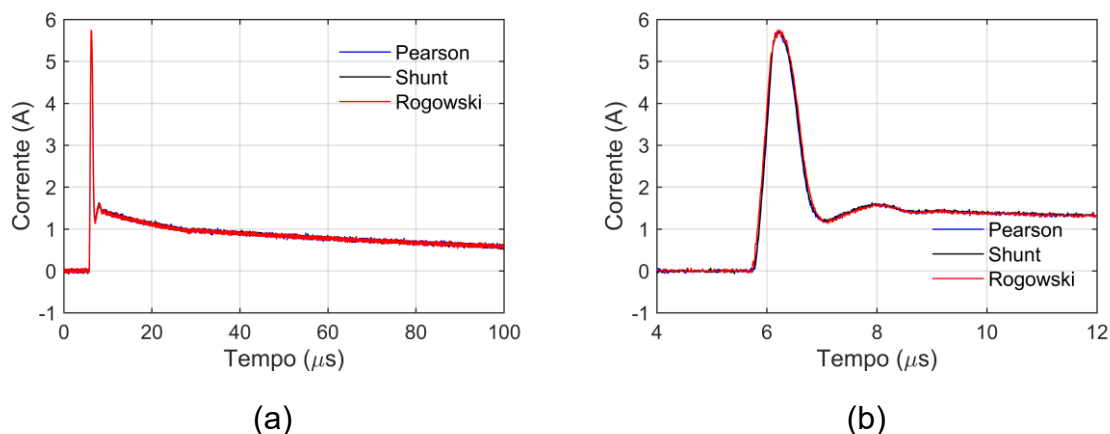


Figura 3.19 – Comparação entre ondas de correntes medidas por meio do resistor shunt, da bobina de Pearson e da bobina de Rogowski. Figura (a) corresponde ao evento completo e (b) é ampliação do período referente à frente da onda de corrente.

Nota-se, em todos casos apresentados nas figuras 3.17, 3.18 e 3.19, grande similaridade entre a bobina de Rogowski e os métodos de referência (a bobina de Pearson e o resistor *shunt*). É importante ressaltar que, mesmo para uma onda de corrente com comportamento muito diferente daquelas produzidas em laboratório, como a onda apresentada na figura 3.19, a bobina de Rogowski apresentou um resultado satisfatório. Nenhum ajuste no circuito integrador foi realizado entre os instantes dos ensaios apresentados, o que valida o seu funcionamento para diferentes tipos de correntes.

### 3.2.3. Bobina de Rogowski instalada em MCS

Uma nova bobina de Rogowski foi construída manualmente no laboratório do LRC para realizar o registro de primeiras correntes de retorno. As bobinas apresentadas nas seções anteriores foram desenvolvidas para operarem na condição de baixa intensidade de corrente (até 20 A). Portanto, uma análise mais rigorosa dos parâmetros construtivos da bobina foi realizada, para assegurar que um registro da forma de onda de corrente pudesse ser obtido em MCS. Diversas topologias de bobinas de Rogowski foram avaliadas durante o projeto, todavia apenas os resultados mais relevantes são apresentados nesta seção.

Primeiramente, realizou-se o procedimento de obtenção da resposta em frequência da nova bobina de Rogowski com a finalidade de compreender o

comportamento do sensor no domínio da frequência. Tal procedimento é importante para identificar possíveis ressonâncias que poderiam inviabilizar a medição de corrente. A figura 3.20 ilustra a primeira versão da bobina de Rogowski, construída manualmente no LRC, para registro de correntes elevadas (até 100 kA).



Figura 3.20 – Bobina de Rogowski construída manualmente.

Especificações da bobina apresentada na figura 3.20:

- Número de espiras: 200;
- Área da espira: 0,0019 m<sup>2</sup>;
- Raio = 22 cm;

A figura 3.21 apresenta respostas em frequência da bobina ilustrada na figura 3.20, obtidas para quatro casos diferentes. Em cada caso testado, conectaram-se os terminais da bobina de Rogowski a diferentes resistores com o objetivo de avaliar o efeito de uma terminação resistiva na frequência de ressonância da bobina. Nota-se que, para o resistor superior a 560  $\Omega$ , o efeito da ressonância é identificado a partir da frequência 700 kHz. Para a bobina em questão, concluiu-se que seus terminais deveriam ser conectados a um resistor de 560  $\Omega$  para evitar efeitos de ressonância até, pelo menos, a frequência de 1 MHz.

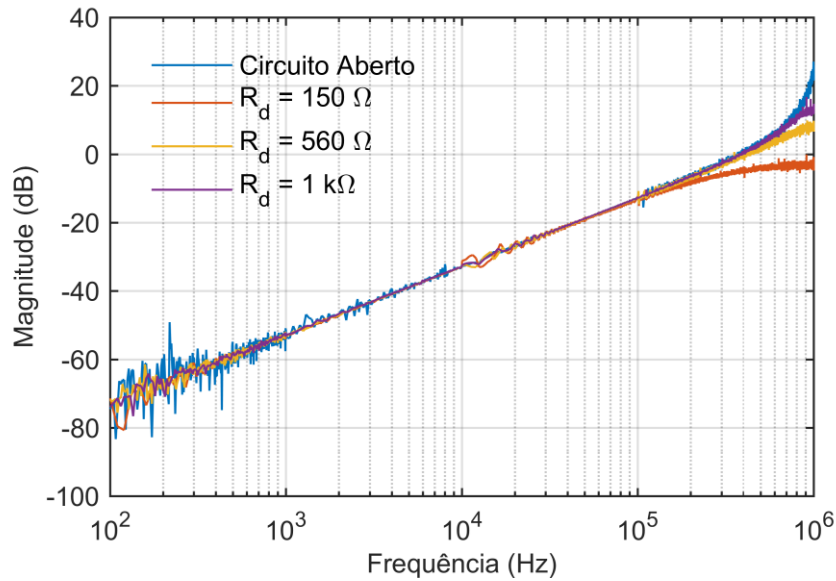


Figura 3.21 – Resposta em frequência da bobina de Rogowski

Conforme discutido na seção 3.1.1, a aplicação da lei de Faraday e de Lenz permite obter a tensão induzida entre os terminais da bobina, a qual foi expressa na equação 3.6. A partir dos parâmetros construtivos da bobina apresentada na figura 3.2, obteve-se a equação 3.9, que representa a tensão induzida calculada da bobina, sem o efeito capacitivo.

$$fem(t) = - \left( \frac{A_e N \mu_o}{2\pi r} \right) \frac{di}{dt}$$

$$fem(t) = - 3,455 \times 10^{-7} \frac{di}{dt} \quad \text{Equação 3.9}$$

Desse modo, a tensão induzida calculada não considera o efeito da ressonância na bobina. Neste contexto, com objetivo de se comparar a resposta em frequência simulada e com aquela obtida por medições em laboratório, aplicou-se a transformada de Laplace nessa equação a fim de se obter a função de transferência da bobina de Rogowski. A equação 3.10 apresenta a transformada de Laplace.

$$fem(s) = - 3,455 \times 10^{-7} s \quad \text{Equação 3.10}$$

A figura 3.22 apresenta a comparação entre a função de transferência calculada da bobina de Rogowski com resultado medido a partir da bobina real no caso em que os terminais dessa bobina estavam conectados a um resistor de 560 Ω. Observa-se que as curvas são bastantes similares. Tal resultado é muito relevante pois assegura que as ressonâncias naturais da bobina não causem



distúrbios no sinal de tensão induzida quando se deseja realizar a medição da primeira corrente de retorno.

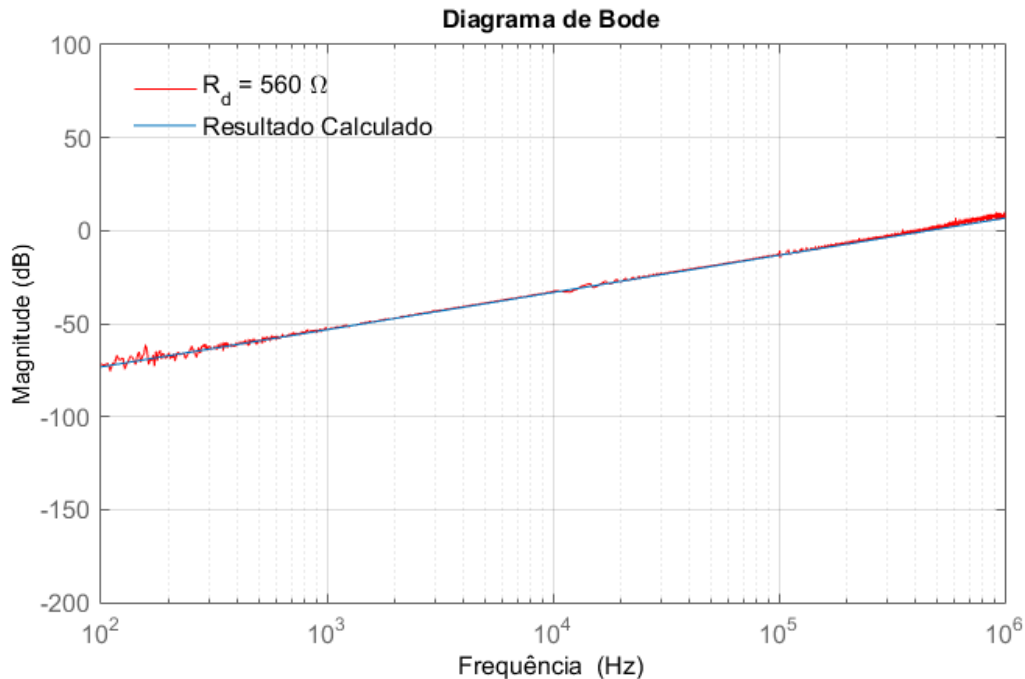


Figura 3.22 – Comparação entre a função de transferência calculada da bobina de Rogowski e o resultado de medição (terminais conectados a um resistor de  $560 \Omega$ ) apresentado na figura 3.21.

### 3.2.1. Cálculo da tensão induzida na bobina de Rogowski

Após a análise no domínio da frequência, realizou-se a avaliação do desempenho da bobina no domínio do tempo. Comparações entre a forma de onda de tensão induzida calculada e a medida nos terminais da bobina de Rogowski foram realizadas para assegurar consistência entre as realizações experimentais e a teoria. Conforme discutido nas seções anteriores, a forma de onda de tensão induzida na bobina de Rogowski pode ser calculada a partir da equação 3.6.

O gerador de impulso de alta tensão foi ajustado para produzir uma corrente impulsiva com tempo de frente de  $5 \mu\text{s}$  e com pico de corrente de aproximadamente 935 A. A figura 3.23 ilustra a corrente produzida pelo gerador.

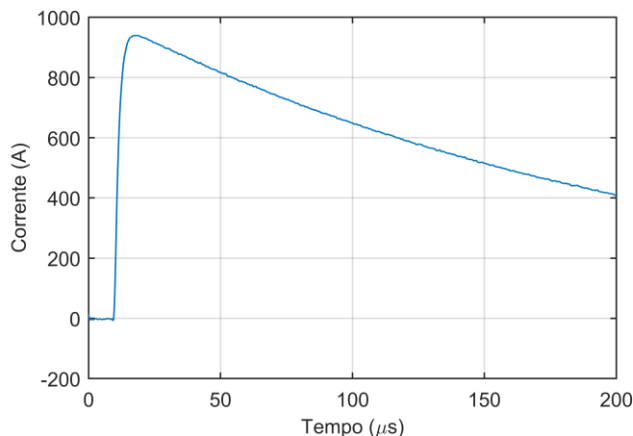


Figura 3.23 - Corrente impulsiva de tempo de frente de 5  $\mu$ s com pico de corrente de aproximadamente 935 A.

Derivou-se numericamente a forma de onda de corrente ilustrada na figura 3.23 e aplicou-se tal resultado na equação 3.9, a qual já contempla os parâmetros construtivos da bobina em questão. A figura 3.24 apresenta a comparação entre a tensão induzida nos terminais da bobina do Rogowski e a tensão induzida calculada. Nota-se que as curvas seguiram a mesma tendência. O resultado era esperado e mostrou-se consistente com os resultados obtidos no domínio da frequência.

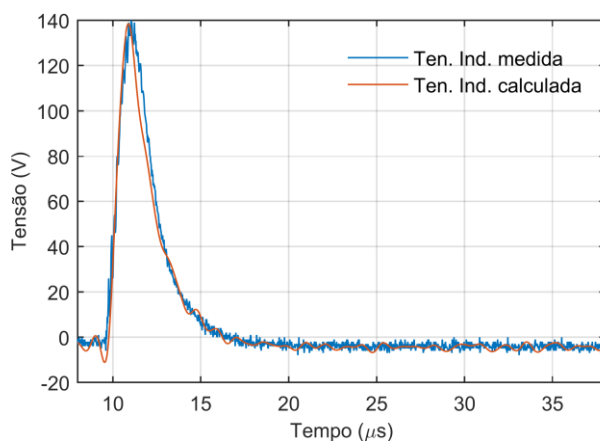


Figura 3.24 – Comparação entre a tensão induzida calculada e a medida pela bobina de Rogowski.

Conforme apresentado na figura 3.20, o cabo coaxial conectado aos terminais da bobina é responsável por conduzir o sinal de tensão induzida até o sistema de aquisição de dados. Estimativas a partir da figura 3.24 indicaram que a tensão induzida na bobina em questão poderia ser superior a 10 kV ao se considerar parâmetros típicos de primeira corrente de retorno de descargas atmosféricas. Uma análise na folha de especificações do cabo utilizado no projeto indicou que não se

poderia aplicar mais que 2,5 kV em tais cabos. Portanto, uma nova bobina foi proposta para não superar os limites de tensão dos cabos coaxiais.

Optou-se por diminuir o número de espiras para reduzir o valor de tensão induzida nos terminais da bobina. A nova bobina contém 17 espiras, porém as demais características mantiveram-se inalteradas em relação às especificações da primeira bobina discutida no início desta seção. Tal sensor, que foi instalado em MCS, possui as seguintes especificações:

- Número de espiras: 17;
- Área da espira: 0,0019 m<sup>2</sup>;
- Raio = 22 cm;

A redução do número de espiras da bobina implicou a diminuição significativa da sua indutância própria. Tal característica influenciou de forma positiva a resposta em frequência da nova bobina, proporcionando melhoria substancial ao sensor de medição. Observou-se em ensaios experimentais que ao se diminuir a indutância própria da bobina, a frequência de ressonância ficava cada vez maior. A resposta em frequência experimental obtida para a nova bobina indicou que, independentemente do resistor conectado aos seus terminais, a bobina continuava a ter uma resposta consistente, sem a evidência de ressonâncias até a frequência de interesse de medição (até 1 MHz). Portanto, dois problemas foram resolvidos a partir da redução do número de espiras da bobina. A figura 3.25 ilustra a bobina de Rogowski instalada em MCS.



Figura 3.25 – Bobina de Rogowski instalada em MCS.

### **3.3. Estado da arte: Antena *loop***

#### **3.3.1. Tensão induzida em espira próxima ao canal de descarga atmosférica**

O campo magnético variante no tempo produzido pela corrente de retorno de uma descarga atmosférica nuvem-solo promove tensão induzida nos terminais de uma espira instalada nas proximidades, cuja área é atravessada pela correspondente densidade de fluxo magnético. A reconstrução da forma de onda de corrente que gerou essa tensão induzida pode ser realizada por meio da integração do sinal medido pela espira. A figura 3.26 ilustra esquematicamente uma espira sendo iluminada por um campo magnético quando flui corrente por um condutor próximo.

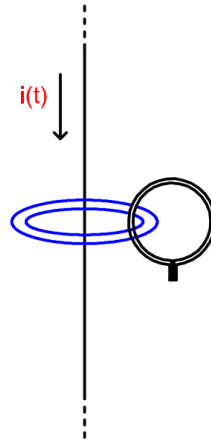


Figura 3.26 - Espira posicionada próximo a um condutor. Adaptado de [5]

A figura 3.27 mostra uma representação geométrica simplificada do canal de descarga acima de uma superfície plana de condutividade infinita, que pode representar o solo como condutor elétrico perfeito.

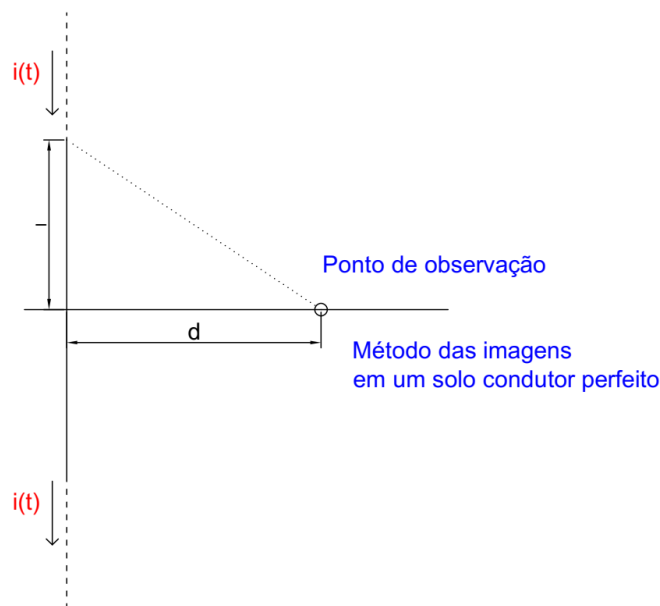


Figura 3.27 – Geometria simplificada para representação do canal de descarga acima de uma superfície plana de condutividade infinita. Adaptado de [5]

A partir desta representação, e considerando uniforme a distribuição de campo magnético ao longo da seção da espira, determina-se a tensão induzida pela corrente  $i(t)$  nos terminais da espira posicionada no ponto de observação. O valor instantâneo de tal tensão é dado pela equação 3.11.

$$fem(t) = -\frac{\mu_0}{2\pi d} N \times A_e \times \cos(\varphi) \times \frac{l}{\sqrt{l^2 + d^2}} \times \frac{di(t)}{dt} \quad \text{Equação 3.11}$$

Parâmetros da equação 3.11:

$i(t)$  – Corrente que flui pelo canal de descarga atmosférica;

$d$  – Distância entre o canal de descarga e o centro da espira;

$A_e$  – Área da espira;

$\mu_0$  – Permeabilidade magnética do vácuo;

$N$  – Número de espiras;

$l$  – Comprimento do canal de descarga atmosférica;

$\varphi$  – Ângulo formado entre a área da espira e a segmento  $d$ .

Se todos os parâmetros são conhecidos, a onda de corrente pode ser obtida através da integração da  $fem(t)$ .

### 3.3.2. Antena - Sensor de corrente

A literatura não apresenta soluções consolidadas no que diz respeito a medições indiretas de corrente a partir de espiras instaladas em pontos distantes. Devido a essa lacuna no conhecimento, sobretudo nos casos em que o sinal é medido a partir do campo magnético próximo de descargas atmosféricas, o projeto do sensor de corrente fez recurso ao conhecimento desenvolvido no trabalho sobre as bobinas de Rogowski. Tal conhecimento foi essencial para compreender a dinâmica do processo e para propor uma solução que atendesse às necessidades do medidor.

Diversos formatos, topologias e materiais foram utilizados no projeto do sensor de corrente. A antena proposta para o dispositivo, ilustrada na figura 3.28, apresentou o melhor desempenho. Essa antena, bastante simples, foi construída a partir de um fio esmaltado com comprimento de 60 cm. O fio foi instalado no interior de um tubo flexível de raio 0,9 cm, o que permitiu moldar a área interna da espira, que é proporcional à amplitude da tensão induzida.

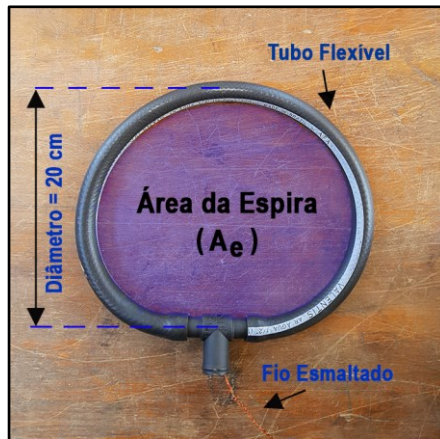


Figura 3.28 Sensor de corrente.

### 3.4. Realizações experimentais com antena *loop*

#### 3.4.1. Cálculo da tensão induzida em uma antena *loop*

A tensão induzida de uma antena *loop* é determinada a partir da aplicação da equação 3.11. No entanto, aproximações podem ser feitas para simplificá-la. A primeira simplificação decorre da natureza da sua aplicação no trabalho em questão, uma vez que ela será utilizada na medição de correntes de descargas atmosféricas. Além disso, espera-se instalar a antena até 20 metros da torre, por isso, pode-se assumir que o comprimento  $l$  do canal de descarga é muito maior que a distância  $r$  entre o canal de descarga e o centro da espira. Outra simplificação se concentra na orientação da antena *loop*, a sua área sempre deverá estar completamente alinhada com a torre, onde, supostamente, a descarga incidirá. Desse modo, a antena terá influência máxima do campo magnético produzido por uma eventual corrente que fluir pela torre. A antena *loop* foi construída com apenas uma espira. A equação 3.12 representa a versão simplificada da equação 3.11.

$$f_{em}(t) = -\frac{\mu_0 A_e}{2\pi d} \frac{di(t)}{dt} \quad \text{Equação 3.12}$$

Buscou-se avaliar o desempenho da antena *loop* frente a uma corrente impulsiva a partir de um ensaio experimental e de simulações computacionais. Em

tal ensaio, comparou-se a tensão induzida medida nos terminais da antena com a forma de onda da tensão calculada a partir da equação 3.12.

O gerador de impulso de corrente portátil [25] foi ajustado para produzir a corrente impulsiva ilustrada na figura 3.29, cujo tempo de frente é de aproximadamente 1  $\mu$ s. Optou-se por aplicar uma corrente tão rápida para verificar se ressonâncias na bobina poderiam causar distorções na forma de onda de tensão induzida. O ajuste para o tempo de frente de 1  $\mu$ s foi bastante conservador, já que objetivo do projeto é medição de primeira corrente de retorno que, geralmente, apresenta tempo de frente superior a esse valor.

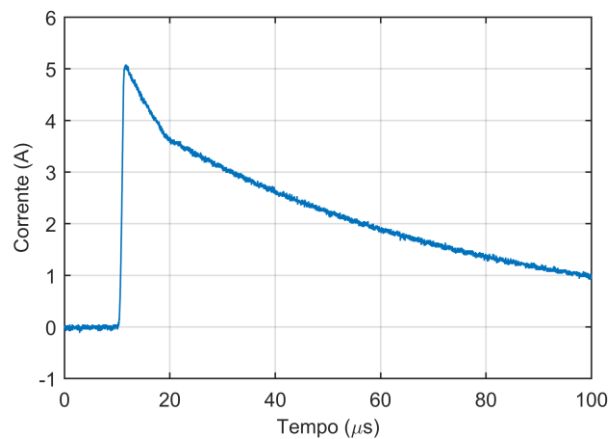


Figura 3.29 – Corrente impulsiva produzida pelo gerador portátil.

A corrente impulsiva indicada na figura 3.29 foi aplicada ao condutor ilustrado na figura 3.30. Nessa figura, a antena *loop* foi posicionada próxima ao condutor de modo que a distância entre o condutor e o centro da antena fosse de 10 cm.



Figura 3.30 – Experimento para avaliar o desempenho da antena.



Parâmetros construtivos da antena loop:

- $A_e = 0,0285 \text{ m}^2$
- $N = 1 \text{ espira}$
- $\text{diâmetro} = 0,2 \text{ m}$

A partir da antena *loop* ilustrada na figura 3.30, aplicaram-se os parâmetros construtivos dela na equação 3.12.

A figura 3.31 apresenta a comparação entre a tensão induzida medida e a calculada.

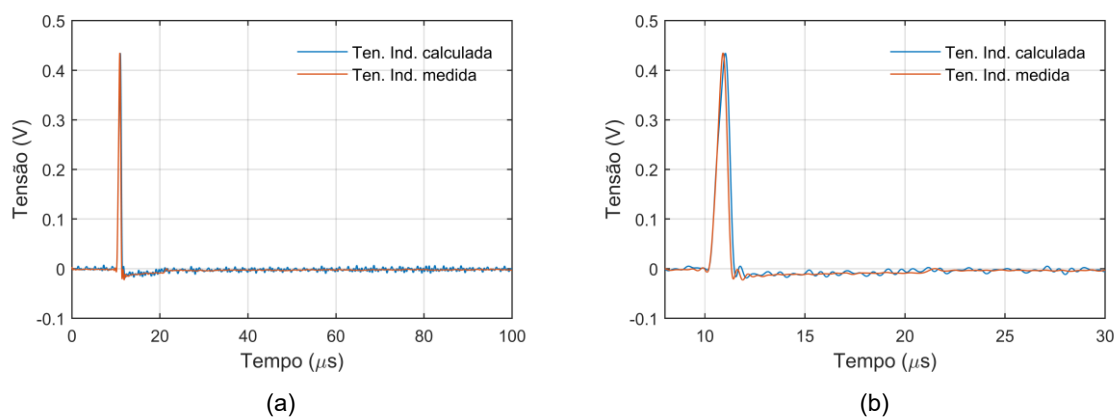


Figura 3.31 – Comparação entre a tensão induzida medida e a calculada.

Nota-se grande similaridade entre as curvas obtidas diretamente nos terminais da antena e aquela calculada a partir da equação 3.11. Tal comportamento assegura que nenhum efeito de ressonância na antena ocorrerá na medição da primeira corrente de retorno. Além da corrente impulsiva com o tempo de frente de  $1 \mu\text{s}$ , outras correntes com tempo de frente superiores foram comparadas com a simulação. Em todos os casos testados, as curvas seguiram a mesma tendência, indicando consistência do sensor de medição.

### 3.4.2. Medições em laboratório utilizando o gerador de alta tensão Haefely e o dispositivo

A figura 3.32 ilustra o sistema de medição que utiliza uma antena *loop* posicionada ao lado de um condutor pelo qual flui a corrente impulsiva produzida pelo gerador de alta tensão.



Figura 3.32 – Arranjo experimental utilizado em laboratório.

A figura 3.33 apresenta um resultado medido e registrado pelo dispositivo desenvolvido. Observa-se, em ambas figuras, que há concordância significativa entre a onda de referência fornecida pelo gerador Haefely e a do medidor.

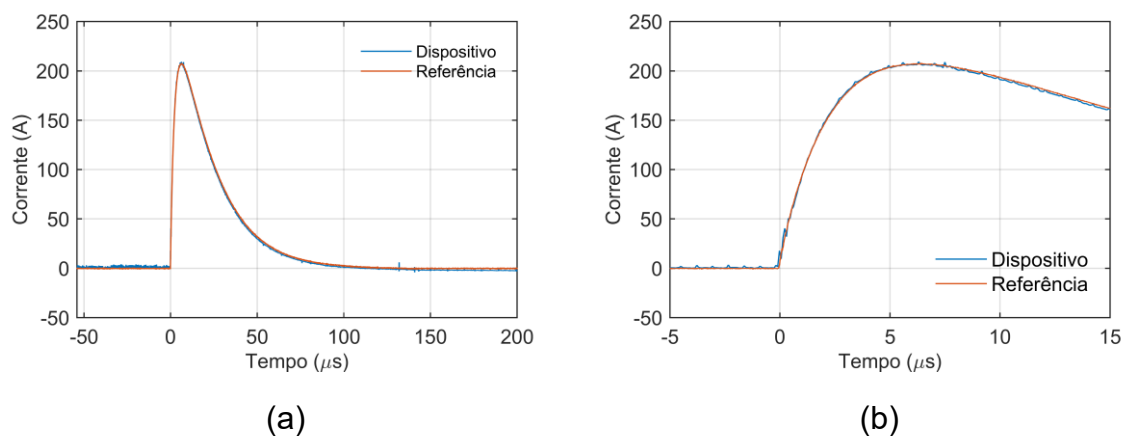


Figura 3.33 – Comparação entre ondas de correntes medidas por meio da bobina de Pearson e o dispositivo. Figura (a) corresponde ao evento completo e (b) é ampliação do período referente à frente da onda de corrente.

Embora o gerador de tensão não forneça amplitudes de correntes compatíveis com os valores reais da corrente de descarga, o equipamento de medição foi colocado bem próximo ao condutor para que ele fosse submetido a níveis de campo eletromagnético similares àqueles esperados na estação do Morro do Cachimbo.

# 4. Dispositivo de medição e registro da forma de onda corrente de descargas atmosféricas

## 4.1. Visão geral do funcionamento do dispositivo

Discutem-se, neste capítulo, os principais aspectos de concepção do sistema de medição capaz de medir e registrar formas de ondas de primeira corrente de retorno de descargas atmosféricas, bem como as diversas etapas de seu desenvolvimento. Além das funcionalidades fundamentais, o dispositivo conta com comunicação remota. É importante ressaltar que o trabalho em questão é fundamentado em desenvolvimentos de trabalhos anteriores desenvolvidos pela equipe do LRC [4]–[6], [26], [27].

O dispositivo de medição foi concebido para medir e registrar formas de ondas de primeiras correntes de retorno a partir da bobina de Rogowski ou da antena *loop*. Em ambos casos, o princípio de funcionamento é parecido, o campo magnético variável no tempo se propaga e ilumina as espiras destes transdutores gerando uma tensão induzida em seus terminais. O princípio de funcionamento de cada sensor de corrente foi discutido em detalhes no capítulo 3. O medidor condiciona o sinal de tensão induzida produzido pela bobina de Rogowski ou pela antena *loop* e o integra, de maneira a reconstruir a forma de onda da corrente original de descarga. Os ganhos envolvidos no integrador para cada transdutor são, evidentemente, diferentes. Entretanto, a lógica de operação é a mesma.

Sabidamente, as descargas atmosféricas atingem preferencialmente pontos em destaque no relevo, tais como torres de telecomunicações instaladas no topo de morros. O atual projeto prevê a instalação do medidor de correntes de descargas atmosféricas próximas a tais torres ou a outras estruturas longas colocadas no alto de morros e elevações, nos quais se tem expectativa de alta taxa de incidência de descargas. A figura 4.1.a ilustra o medidor com antena *loop* instalado a uma distância  $d$  da torre, enquanto a figura 4.1.b mostra o medidor com bobina de Rogowski, instalada ao redor da torre. Caso os dois sistemas de medição (antena *loop* e bobina de Rogowski) fossem instalados em uma mesma torre, os dois dispositivos deveriam necessariamente recuperar a mesma forma de onda de corrente de retorno. Os dois sistemas foram instalados na Estação de Pesquisa do Morro do Cachimbo. Registros reais obtidos por tais sistemas são apresentados no capítulo 5.

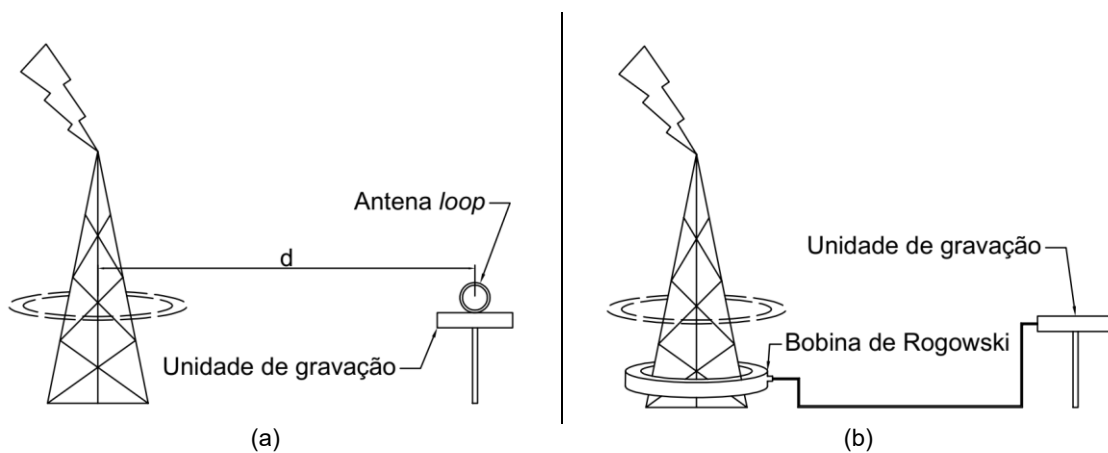


Figura 4.1 – (a) Sistema de medição com antena loop. (b) Sistema de medição com bobina de Rogowski.

A figura 4.2, desenvolvida a partir de uma estilização de Mesquita [3] e em complemento à figura 4.1.a, mostra a instalação do medidor a 15 metros de uma torre de telecomunicações. A indicação (A) ilustra o percurso fictício de um raio atingindo a torre. Em (B) apresenta-se, esquematicamente, as linhas de campo magnético próximo, geradas pela corrente de descarga que fluiu pela torre, iluminando o dispositivo remoto representado em (C).

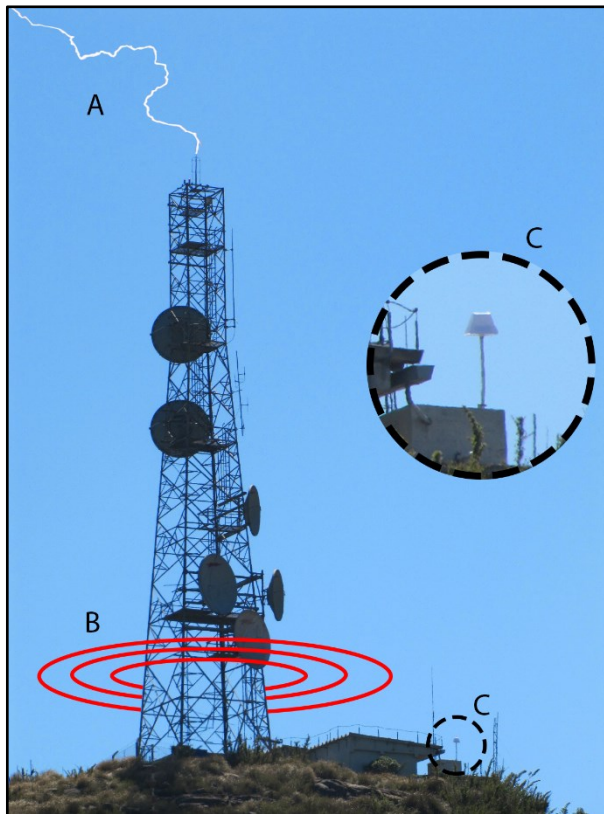


Figura 4.2 - Instalação de um dispositivo com antena *loop* para medição de corrente de descargas atmosféricas.

## 4.2. Diagrama de blocos geral do dispositivo

A figura 4.3 ilustra o diagrama de blocos do dispositivo desenvolvido, que é constituído pelos seguintes subsistemas: alimentação, transdutores, unidade de gravação e da interface com o usuário. O funcionamento geral do dispositivo é o mesmo para a bobina de Rogowski e para a antena *loop*. Detalhes de cada bloco do sistema de medição são discutidos nos tópicos seguintes desta seção.

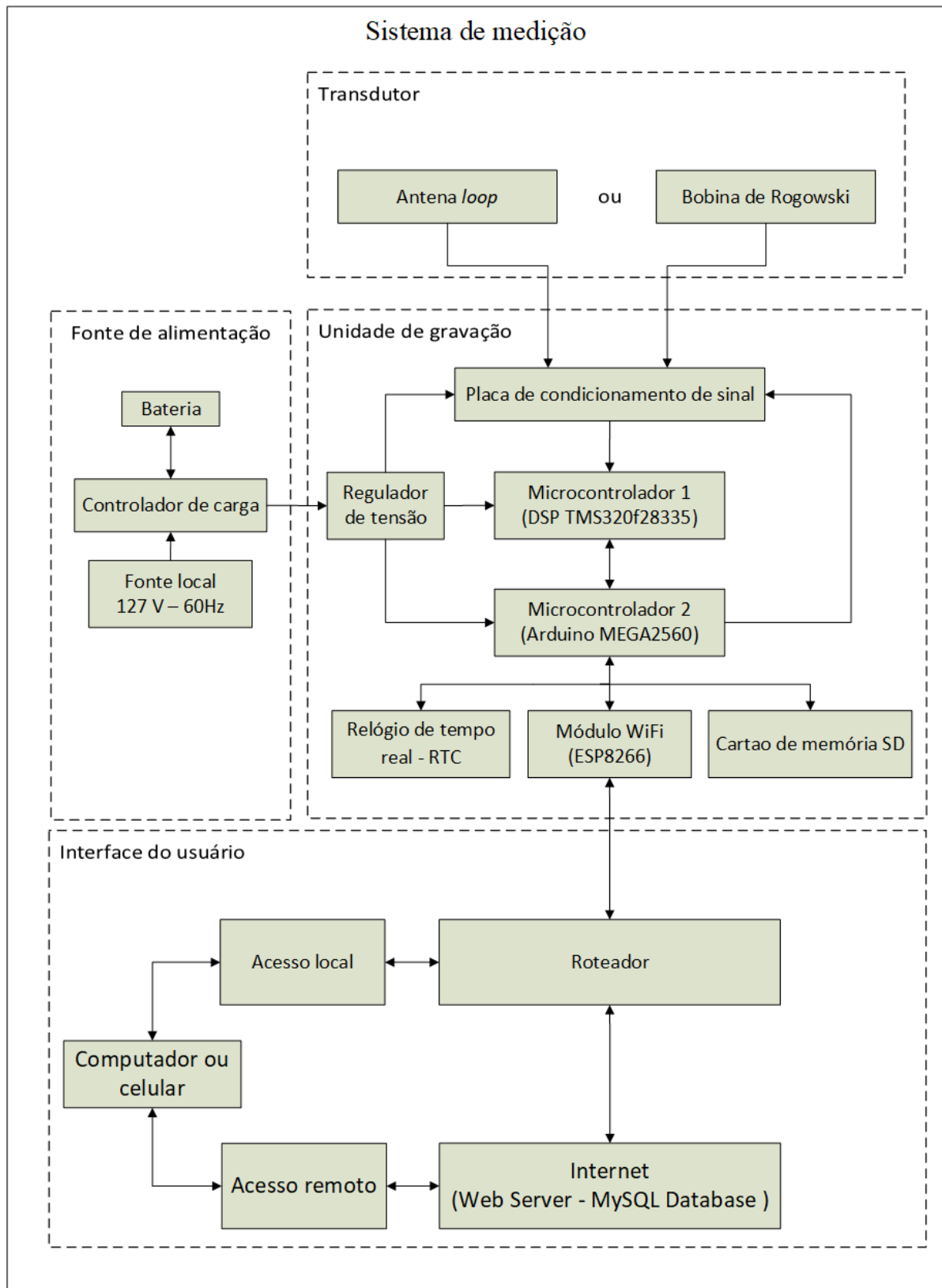


Figura 4.3 – Diagrama de blocos do dispositivo de corrente de descargas atmosféricas.

O campo magnético variável no tempo produzido pela corrente do raio ilumina as espiras da bobina de Rogowski ou a antena *loop*, induzindo uma força

eletromotriz, nos terminais desses sensores. O sinal de tensão produzido alimenta o condicionador de sinal, que o integra e filtra as componentes de altas frequências (superiores a 1,5 MHz). Em seguida, o sinal integrado é conduzido ao microcontrolador 1 (*Digital Signal Processing* – DSP – TMS320f28335). Se o sinal for reconhecido como de uma descarga atmosférica por ultrapassar um limiar de amplitude definida, a lógica interna do DSP registra os dados em uma memória RAM (*Random Access Memory*) à taxa de 12,5 milhões de amostras por segundo. Posteriormente, todos os dados são transferidos para o microcontrolador 2 (Arduino MEGA 2560), o qual é responsável por obter informações de horário do evento e armazenamento dos dados em um cartão SD (*Secure Digital*). O ESP8266 é o *hardware* que permite a conexão via rede sem fio entre o dispositivo e um roteador conectado à internet.

#### **4.2.1. Transdutores: Bobina de Rogowski ou Antena *loop***

Em decorrência da natureza complexa dos raios, a medição de corrente da descarga atmosférica é de alta complexidade. Sinais com componentes de alta frequência geram interferências eletromagnéticas que podem causar ruídos no sinal medido ou até mesmo uma pane no dispositivo. Portanto, soluções foram propostas e testadas em laboratório para que os transdutores e a placa condicionadora de sinal fossem imunes a esses problemas, possibilitando uma medição de qualidade.

Devido às peculiaridades naturais associadas aos transdutores para medição de corrente de descarga atmosférica, dedicou-se completamente o capítulo 3 desta tese para apresentar as singularidades e especificidades da bobina de Rogowski e antena *loop*. As figuras 3.28 e 3.25 ilustram a antena *loop* e bobina de Rogowski, respectivamente, utilizados no sistema de medição. Tais sensores de corrente foram dimensionadas para registrar a primeira corrente de retorno.



### 4.2.2. Placa de condicionamento de sinal

Os terminais do transdutor são conectados ao circuito condicionador de sinal, alimentando a placa com a tensão induzida proveniente da antena ou da bobina de Rogowski. A placa condicionadora, ilustrada na figura 4.4, foi projetada para incluir um resistor de casamento de impedância. Esse componente tem comportamento muito similar ao resistor  $R_D$  da figura 3.6, apresentada na seção 3.1.2. O sinal de tensão induzida é processado por um integrador ativo capaz de recuperar o formato da onda de corrente original. Nesta fase, o sinal já poderia ser gravado na memória do microcontrolador. No entanto, em função do nível elevado de ruído, inseriu-se no circuito condicionador um filtro passa baixa passivo de quarta ordem com frequência de corte de aproximadamente 1,5 MHz.

A tensão de saída máxima e mínima na placa de condicionamento de sinal é definida em função do conversor analógico digital (ADC) usado. No caso em questão, o ADC do microcontrolador 1 trabalha com tensões dentro da faixa de 0 V a 3 V. Por isso, a placa condicionadora foi projetada com sistema de proteção para evitar avarias ao ADC causadas por sobretensão.

Um controle do nível de tensão contínua (*offset*) foi criado para gerar uma referência de medição. A tensão contínua de 1,5 V na saída do circuito condicionador de sinal corresponde ao valor de corrente de 0 A. Qualquer tensão inferior a 1,5 V na saída da placa indica corrente negativa medida, enquanto tensões superiores a este limiar são positivas. Esse artifício possibilita registrar ondas de descargas atmosféricas positivas e negativas. A figura 4.16, discutida em seção posterior, ilustra as escalas correspondentes entre a tensão integrada e a corrente medida.

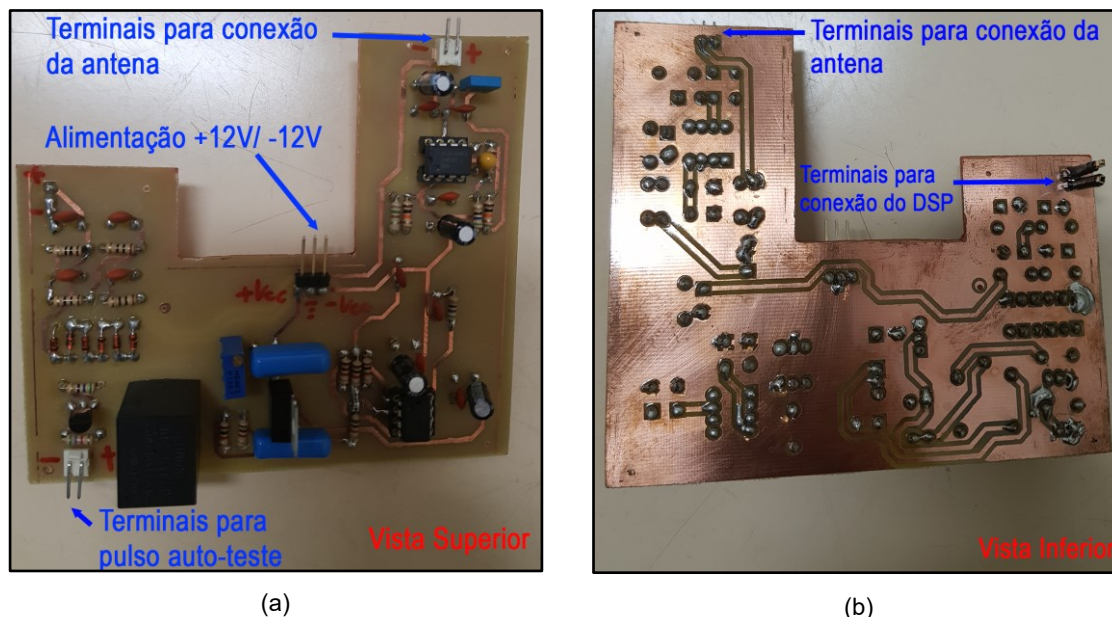


Figura 4.4 – Placa de condicionamento de sinal: (a) Vista superior. (b) Vista inferior.

A placa de condicionamento de sinal possui, ainda, um módulo para realizar autoteste, o qual consiste em gerar um pulso de onda quadrada, que é somado à saída do circuito integrador. Conseqüentemente, a tensão somada é maior que o limiar pré-definido de disparo (*trigger*) para o início da gravação de um evento.

O ajuste dos parâmetros do integrador não é uma tarefa trivial. Dessa forma, esta etapa do projeto requereu longo tempo de dedicação.

### 4.2.3. Fonte de tensão alternada, bateria, controlador de carga e conversor CC-CC

O módulo de medição requer uma fonte de tensão alternada de 127 V com frequência de 60 Hz para alimentar um controlador de carga que carrega uma bateria estacionária de 115 Ah, assegurando, assim, uma autonomia de pelo menos 100 horas de funcionamento, caso ocorra falta de energia da concessionária. O circuito eletrônico do dispositivo de medição de corrente deve ser alimentado com tensões de 12V, -12V, 5V e 3,3V. Tais tensões são obtidas por reguladores e por um conversor CC-CC (*flyback*).

A figura 4.5 ilustra uma placa de circuito impresso que contém os reguladores de tensão e o conversor CC-CC. Além de tais componentes, a placa conta ainda

com supressores de surto e filtros, cuja aplicação visa mitigar o efeito de ruídos e tensões induzidas em condutores iluminados pelo campo eletromagnético estabelecido durante a descarga de retorno. O projeto desses componentes deve ser realizado no sentido de evitar sobretensões provenientes dos cabos de alimentação externos sejam capazes de inviabilizar a medição.

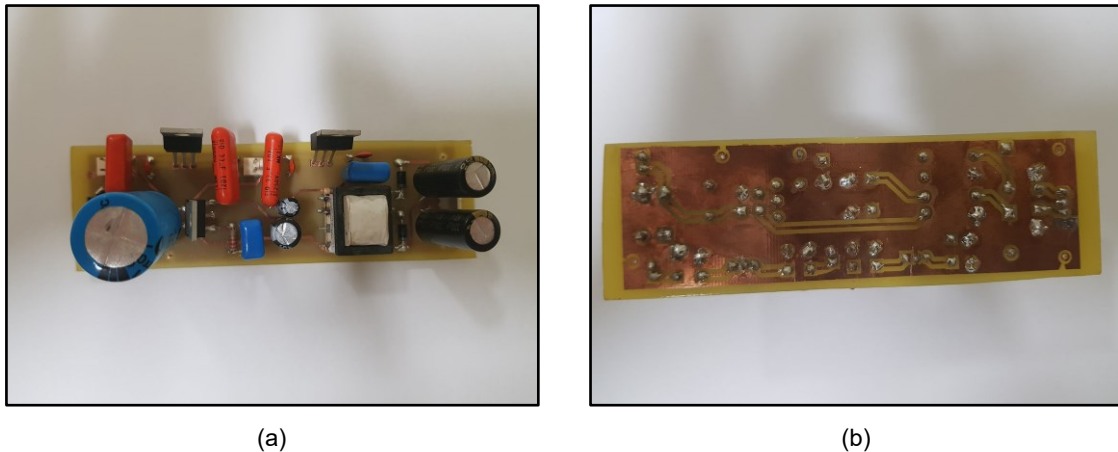


Figura 4.5 – Placa do sistema de alimentação. (a) Vista superior. (b) Vista inferior.

#### 4.2.4. Microcontrolador 1 – DSP TMS320F28335

O microcontrolador 1 é o elemento responsável por realizar a conversão do sinal analógico, que foi fornecido pela placa de condicionamento, para a forma digital. Para esse tipo de aplicação, é complexo especificar um microcontrolador que seja capaz de operar o conversor analógico digital (ADC) com frequências superiores a 10 MHz, com memória interna suficiente para registro completo do evento (pelo menos 500 ms), resolução superior a 12 bits e escala de tensão de entrada maior que 3V. Essa dificuldade ocorre porque os microcontroladores, em geral, não são projetados com o propósito de se realizar conversões analógico-digitais contínuas com alta taxa de amostragem por longo tempo. Com o objetivo de contemplar as especificidades da onda de corrente de descarga em relação ao tempo de meia onda do evento e às componentes de frequência, o microcontrolador mais adequado ao projeto foi o DSP TMS320F28335. A figura 4.6 apresenta o kit de desenvolvimento utilizado, fabricado pela *Spectrum Digital*.

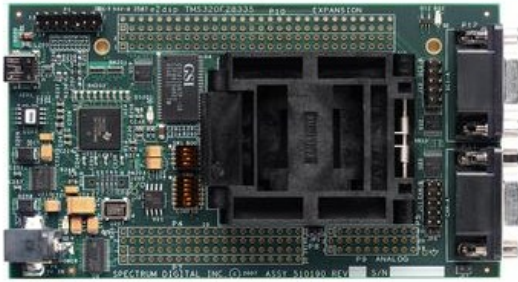


Figura 4.6 – Kit de desenvolvimento eZdsp TMS320F28335.

A figura 4.7 ilustra o diagrama de blocos da lógica de operação interna do microcontrolador 1. A programação foi desenvolvida por meio da linguagem C de baixo nível. Essa linguagem permitiu explorar e extrapolar as funcionalidades padrão do equipamento, possibilitando alcançar a condição de operação adequada à medição de correntes de descargas atmosféricas.

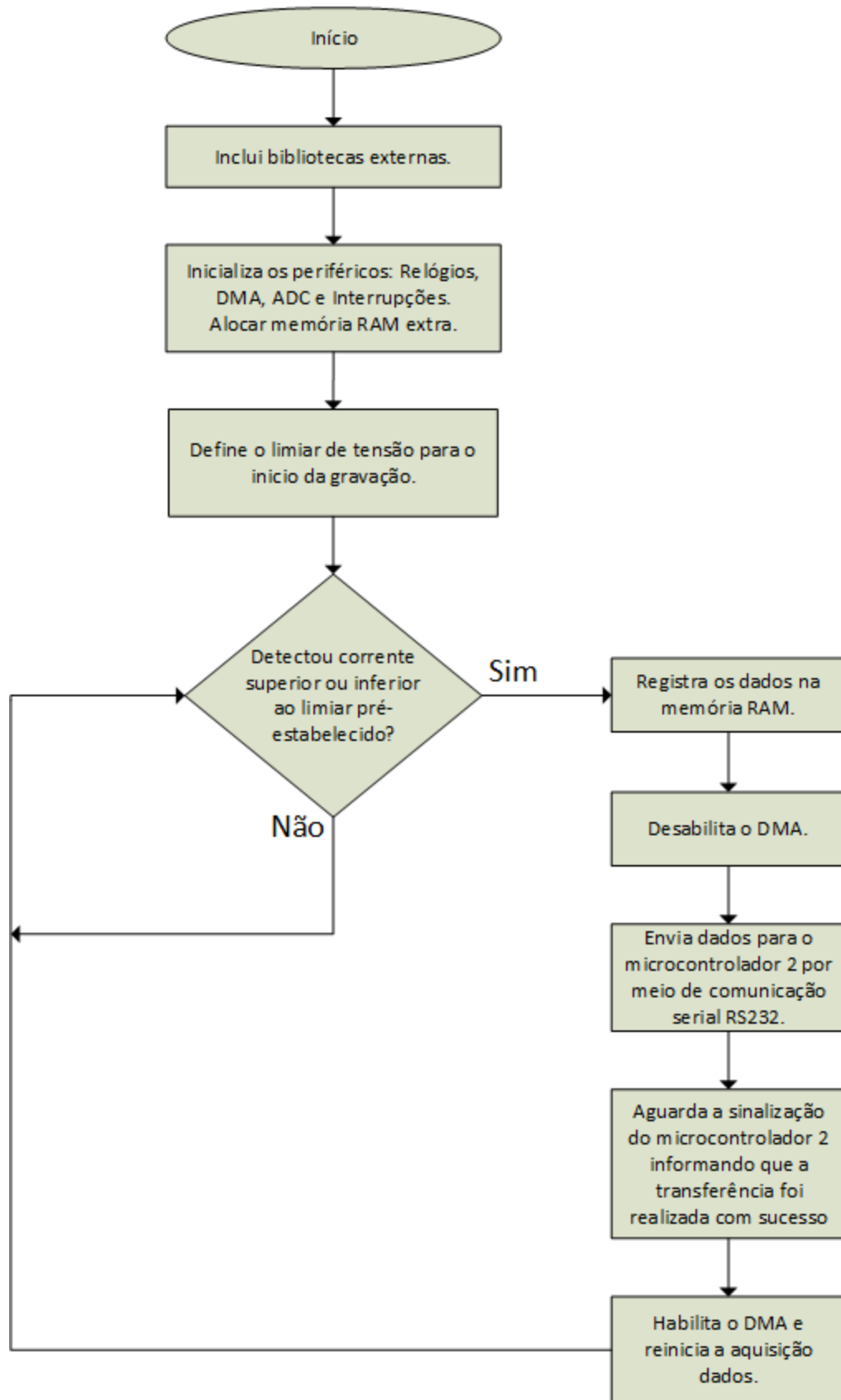


Figura 4.7 – Diagrama de blocos da programação interna do microcontrolador 1.

O diagrama indica que o programa se inicia com a inclusão de bibliotecas externas com a finalidade de inicializar os periféricos do kit de desenvolvimento. Os principais periféricos são: relógio interno; acesso direto à memória (DMA); ADC e interrupções. Em seguida, o mapa de memória de acesso aleatório (RAM) do dispositivo é alterado, realocando-se memória, de modo a aumentar a memória RAM disponível para registrar dados de medição. O atual estágio do projeto permite armazenar vetores de 15000 posições, onde cada posição corresponde a uma palavra de 16 bits.

O conversor analógico digital foi programado para operar na taxa máxima de amostragem de 12,5 MHz. Para assegurar o tempo de 80 ns entre os dados amostrados, foi necessário configurar o ADC para operar de forma conjunta com o DMA. Assim os dados amostrados são destinados diretamente à memória RAM, sem a interação da unidade central de processamento (CPU). O DMA foi configurado para funcionar no modo *buffer* circular, o qual consiste em escrever continuamente dados nos registros de memória de um vetor. Além disso, quando a última posição desse vetor é atingida, as posições iniciais são automaticamente reescritas. Tal comportamento é ilustrado na figura 4.8.

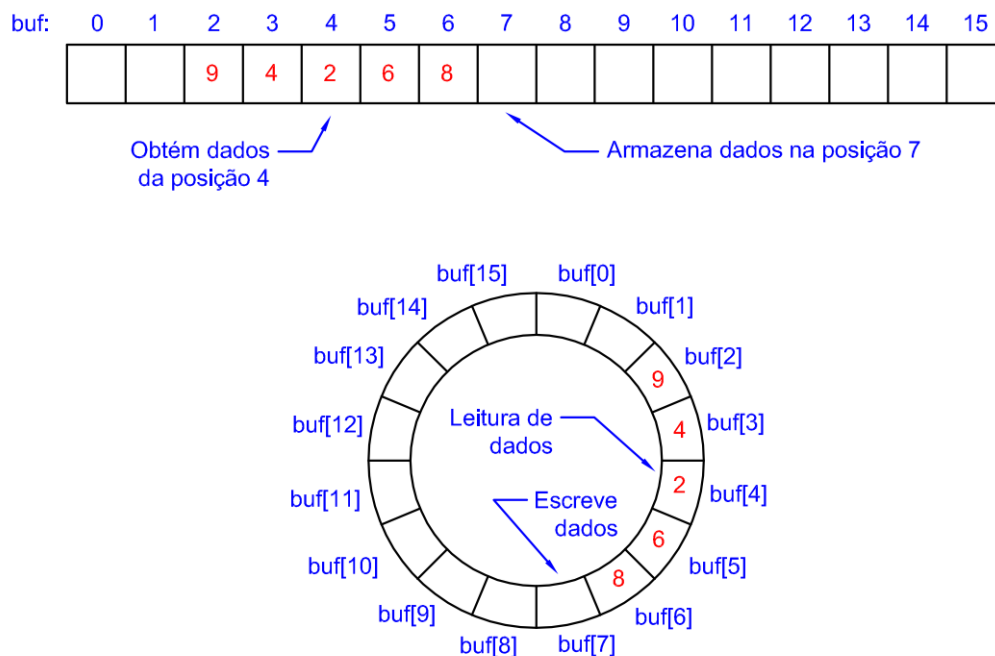


Figura 4.8 – Buffer circular.

Os dados adquiridos pelo ADC são continuamente registrados no *buffer* circular até que o programa interprete que o sinal medido corresponda ao evento de uma corrente de descarga atmosférica. O sinal de disparo para início da gravação em uma memória não-volátil é estabelecido por meio de comparação entre o valor lido na memória do *buffer*, que foi armazenado pelo DMA, com um valor constante definido pelo programador do dispositivo. Tal processo é possível porque os dados alocados na memória pelo DMA podem ser acessados a qualquer momento, mesmo durante a aquisição de dados pelo ADC. Portanto, a CPU está livre para realizar qualquer ação, inclusive a de comparação de valores dos dados.

O procedimento de armazenar os dados na memória RAM na forma de *buffer* permite acessar dados anteriores ao sinal de disparo. Portanto, informações relevantes do início da corrente de descarga atmosférica são recuperadas. O código atual, em operação, conta um período de pré-disparo (*pré-trigger*) de 120  $\mu$ s e período pós disparo de 1080  $\mu$ s, totalizando uma janela de aquisição de 1200  $\mu$ s com 15000 amostras.

Após o sinal de disparo, que indica que houve um evento correspondente a uma corrente de retorno, o DMA é desabilitado até que todos os dados registrados na memória RAM sejam transferidos para o microcontrolador 2. Este procedimento leva cerca de 30 segundos. Em seguida, se não houver erros na transferência dos dados, o DMA é habilitado novamente e o sistema está apto a registrar outro evento.

A figura 4.9 ilustra o microcontrolador 1 acoplado à placa de condicionamento de sinal. Observa-se, na figura, que não há conexões por fios entre o microcontrolador e a placa de condicionamento, em função de tais condutores constituírem fonte de ruídos de alta frequência. Desse modo, diminuição significativa dos ruídos medidos pelo sistema foi obtida com a conexão mais próxima possível entre o DSP e a placa. A conexão foi realizada diretamente pela placa de circuito impresso.

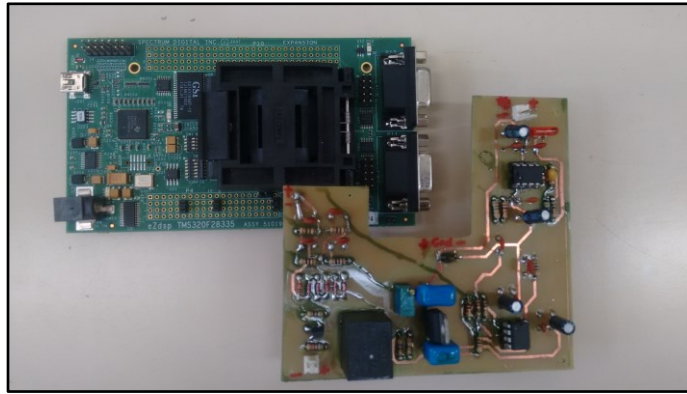


Figura 4.9 – Núcleo de aquisição de dados e placa de condicionamento de sinal.

#### 4.2.5. Microcontrolador 2 – Arduino MEGA 2560

Com o propósito de tornar o DSP exclusivo para a aquisição dos dados, de modo a evitar quaisquer interferências externas que poderiam prejudicar o seu desempenho, decidiu-se utilizar um segundo microcontrolador para realizar tarefas secundárias, tais como salvar os dados medidos em um cartão SD e obter informações de horário a partir de um dispositivo GPS (Sistema de Posicionamento Global). Pela simplicidade de uso e pelo baixo custo, optou-se por utilizar o kit de desenvolvimento Arduino MEGA 2560 para ser o segundo microcontrolador. A figura 4.10 ilustra o kit.

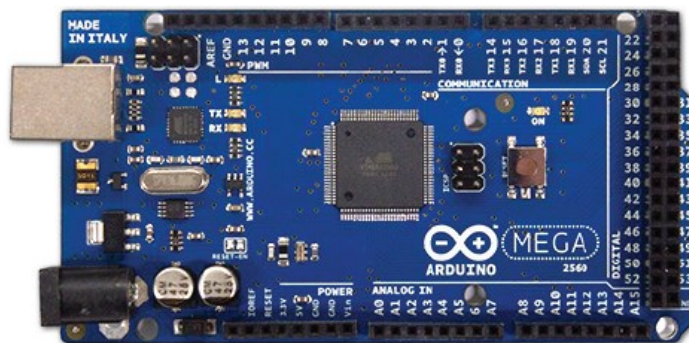


Figura 4.10 – Microcontrolador 2 – Arduino MEGA 2560

O diagrama de blocos ilustrado na figura 4.11 apresenta a lógica interna da programação do Arduino. O programa se inicia ao carregar bibliotecas externas e habilitar os periféricos do kit de desenvolvimento. Após todas as funções básicas terem sido estabelecidas, o código inicia uma rotina de repetição infinita. Tal rotina consiste em tornar o microcontrolador preparado para atender à solicitação de um



evento externo, originado por uma interrupção. No caso em questão, há duas interrupções possíveis, uma gerada pelo microcontrolador 1 e outra pelo usuário por meio de acesso remoto via internet. Diferentes interrupções geram ações distintas pelo Arduino.

Conforme apresentado no fluxograma ilustrado na figura 4.7, instantes antes do DSP transferir os registros de dados para o microcontrolador-2, um sinal é enviado do DSP para o Arduino. Assim, uma interrupção é captada pelo microcontrolador 2 e é identificada como solicitação para abrir um canal de comunicação entre os dois microcontroladores. Neste momento, inicia-se o processo para obtenção de informações de horário daquele instante por meio de um módulo externo, que pode ser um RTC (*real time clock*) ou por um GPS. Em seguida, os registros da onda de corrente são armazenados em um arquivo do tipo texto no cartão SD. O nome de cada arquivo contém informações de data e horário em que o evento ocorreu, no seguinte formato: **ano\_mês\_dia\_hora\_minuto\_segundo.txt**. Os registros são armazenados no padrão de uma coluna, facilitando a leitura por outros *softwares*, tais como o **Matlab**.

A outra interrupção tratada no código foi a originada pelo módulo ESP8266. Comandos realizados à distância por um usuário geram ações no registrador de corrente. Tais comandos são interpretados por uma página disponível na internet, que foi programada para enviar informações específicas a esse módulo. Uma interrupção é captada pelo Arduino a todo momento que o ESP8266 recebe algum comando válido vindo do usuário. Atualmente, o sistema conta com os comandos apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Comandos recebidos pelo usuário via internet e as respectivas ações do Arduino.

Comando Recebido	Ação
Leitura de dados no cartão SD.	O Arduino abre o cartão SD e atualiza o servidor (banco de dados MySQL) com informações referentes ao nome do registro e o seu tamanho em <i>bytes</i> . Não há transferência do conteúdo do arquivo para o banco de dados.
Autoteste.	O microcontrolador 2 envia um pulso de tensão com tempo de duração controlado para a placa de condicionamento de sinal.
Transferência de dados do cartão SD para o banco de dados MySQL.	Após o usuário visualizar na página de internet a lista de todos os arquivos armazenados no cartão SD, ele seleciona apenas um evento para iniciar o processo de transferência do conteúdo do arquivo que está no cartão SD para o banco de dados no servidor.
Remover registro.	O código inicia a rotina para excluir o arquivo selecionado da memória do cartão SD e do banco de dados do servidor.

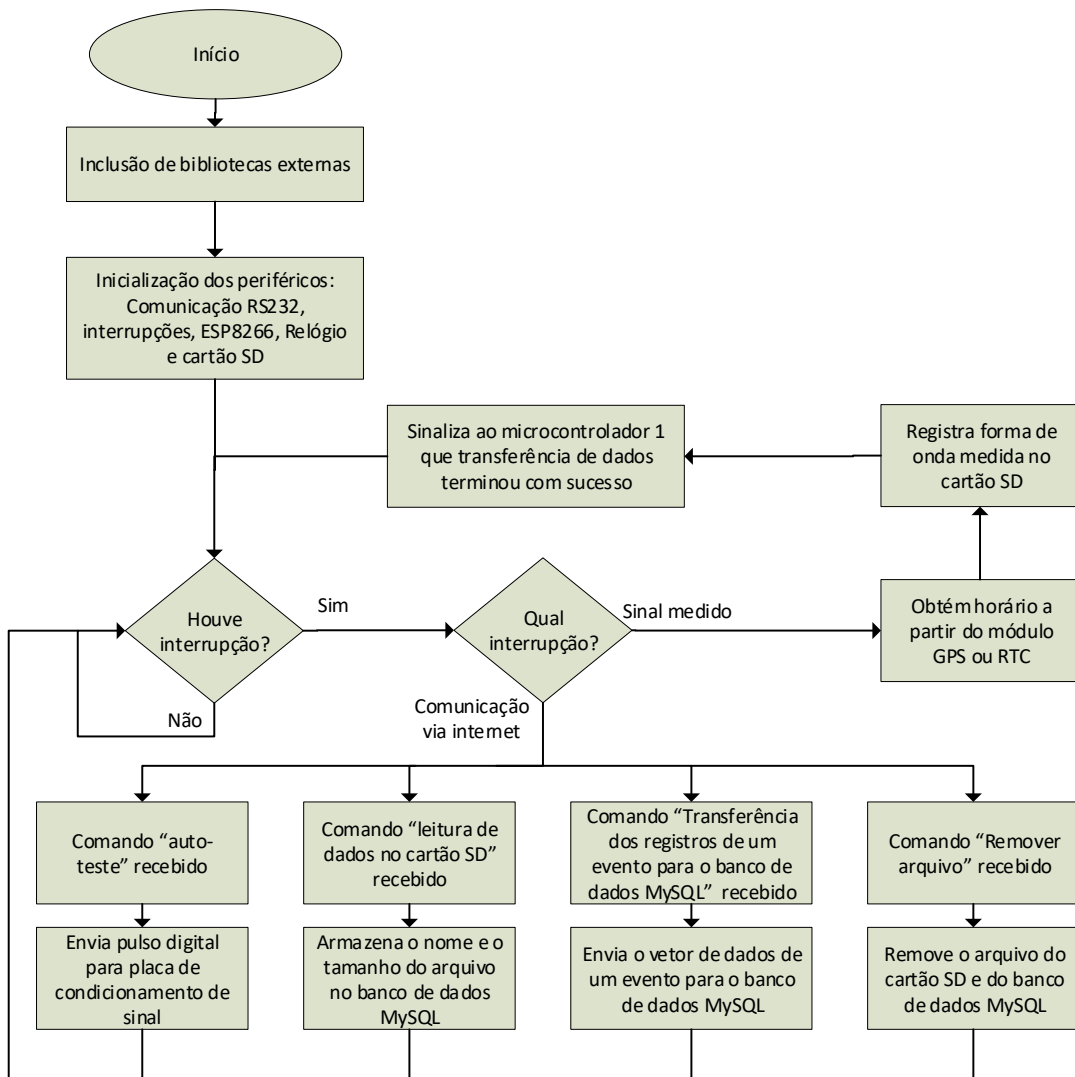


Figura 4.11 – Diagrama de blocos da programação interna do microcontrolador 2.

#### **4.2.6. Software de gerenciamento do dispositivo via internet**

O controle à distância do dispositivo é de grande importância na operacionalização da implantação e funcionamento do medidor, pois, pela própria natureza de medição de corrente de descargas, o registrador é usualmente instalado em locais remotos, com acesso muitas vezes complicado e/ou distante. Isto denota a relevância de disponibilidade de uma funcionalidade de controle à distância.

O acesso remoto é realizado por meio de computadores ou *smartphones* conectados à internet. O usuário gerenciador do medidor tem acesso a uma página desenvolvida em linguagem PHP (*Personal Home Page*). Tal página, ilustrada na figura 4.12, funciona como um intermediador de comandos entre o usuário e o registrador de corrente. Além das funções de controle, há informações sobre o dispositivo a ser controlado, tais como endereço MAC, IP na rede e o nome do dispositivo. A funcionalidade de indicar informações sobre o equipamento ao administrador da página decorre da necessidade de se identificar o medidor caso o usuário esteja gerenciando uma rede com dezenas de registradores. Com a finalidade de se evitarem acessos de usuários não autorizados no sistema supervisor do medidor, o acesso à página só é permitido mediante a validação por um e-mail e uma senha previamente cadastrados no servidor.



Figura 4.12 - Software de gerenciamento do dispositivo via internet

A página principal, ilustrada na figura 4.12, disponibiliza ao usuário as funções de atualizar o banco de dados MySQL, realizar autoteste e fechar a seção atual. Ao clicar no campo “**Atualizar banco de dados**”, o programa abre um canal de comunicação por meio de protocolo TCP-IP (*Transmission Control Protocol – Internet protocol*) entre o servidor e o módulo ESP8266. Então, é solicitada ao Arduino a leitura do cartão de memória SD e, em seguida, são enviados ao servidor apenas os nomes dos arquivos e os respectivos tamanhos. Neste momento, nenhum registro do conteúdo do arquivo é transferido para o servidor. Embora a comunicação entre o servidor e o módulo ESP8266 seja TCP-IP, que permite alta velocidade na transferência de dados, a comunicação entre o ESP8266 e o Arduino é realizada por protocolo RS-232, que é muito lenta. Portanto, em um primeiro momento, apresenta-se ao usuário, de forma rápida e resumida, a lista de todos os eventos armazenados no cartão SD e depois realiza-se por meio da página de internet, ilustrada na figura 4.13, a transferência do conteúdo dos arquivos.

Os eventos listados no navegador que ainda tem seus dados armazenados apenas no cartão SD são indicados dentro de um retângulo verde com a seguinte

opção habilitada: **“Transferir dados do dispositivo remoto para o banco de dados MySQL”**. Essa situação é mostrada na figura 4.13.



Figura 4.13 - Software de gerenciamento do dispositivo via internet. Um arquivo armazenado no cartão SD.

Ao clicar na opção **“Transferir dados do dispositivo remoto para o banco de dados MySQL”**, o programa inicia uma rotina que procura o arquivo específico selecionado pelo usuário no cartão SD e transfere completamente o conteúdo do arquivo para servidor. Devido ao gargalo na velocidade de transferência causado pelo protocolo de comunicação RS-232 e limitação de memória do módulo ESP8266, a função atual leva cerca de 30 segundos para completar o processo de transferência de um arquivo que contém 15000 palavras de 16 bits. Ao término da transferência, o retângulo que estava verde muda para a cor amarela e a função de transferência de dados do dispositivo remoto para o banco de dados é desabilitada. Entretanto, duas novas funções são habilitadas. Uma permite ao usuário realizar o descarregamento dos dados diretamente do servidor, sem envolver o dispositivo remoto. A outra possibilita remover o registro do cartão SD e do banco de dados. A figura 4.14 ilustra a situação descrita.



Figura 4.14 - Software de gerenciamento do dispositivo via internet. Arquivo já armazenado no banco de dados do servidor.

A função de autoteste envia um comando ao Arduino para gerar um pulso de tensão com tempo de duração controlado, o qual é aplicado na placa de condicionamento de sinal. A tensão gerada pelo microcontrolador no circuito condicionador de sinal é maior que o limiar pré-definido para iniciar o processo de armazenamento na memória, portanto, um sinal conhecido é registrado na memória do cartão SD. Ao se fazer o descarregamento desses dados, verifica-se se o dispositivo está operando de forma normal ou se requer manutenção.

É importante ressaltar que, no processo de desenvolvimento de todo o dispositivo, há atenção especial na programação do núcleo de aquisição de dados, para que este seja o mais independente possível dos demais sistemas, tais como o software de gerenciamento do medidor. Em outras palavras, mesmo sem internet, por exemplo, o dispositivo é capaz de medir a corrente e armazenar os dados do evento no cartão SD.

### 4.3. Calibração do registrador de corrente quando se utiliza a antena *loop* como sensor

A corrente medida da descarga atmosférica é obtida a partir da integração da tensão induzida gerada nos terminais da espira, conforme indicado na equação 4.1.

$$i(t) = \frac{2\pi d}{A_e \mu_o} \times \frac{1}{\cos(\varphi) N} \times \frac{\sqrt{l^2 + d^2}}{l} \int fem(t) dt \quad \text{Equação 4.1}$$

Parâmetros da equação 4.2:

$fem(t)$  – Tensão induzida medida nos terminais da espira;

$i(t)$  – Corrente que fluiu pelo canal de descarga atmosférica;

$d$  – Distância entre o canal de descarga e o centro da espira;

$A_e$  – Área da espira;

$\mu$  – Permeabilidade do ar;

$N$  – Número de espiras;

$l$  – Comprimento do canal de descarga atmosférica.

$\varphi$  – Ângulo formado entre a área da espia e o segmento  $d$ .

O canal de descarga atmosférica possui comprimento da ordem de quilômetros enquanto a distância de instalação do dispositivo é de alguns metros da estrutura elevada. A equação 4.2 é obtida ao se considerar o comprimento do canal muito maior que a distância do equipamento até a torre ( $l \gg d$ ).

$$i(t) = \frac{2\pi r}{A_e \mu_o} \times \frac{1}{\cos(\varphi) N} \int fem(t) dt \quad \text{Equação 4.2}$$

No caso em questão, a espira é posicionada de modo que o fluxo magnético atravessando a área da espira seja máximo, assim, o termo  $\cos(\varphi)$  da equação 4.2 é igual a 1. Além disso,  $N$  é igual 1, já que a antena do projeto conta com apenas uma espira. A expressão simplificada é apresentada na equação 4.3.

$$i(t) = \frac{2\pi d}{A_e \mu_o} \int fem(t) dt \quad \text{Equação 4.3}$$

$$i(t) = C_{1L} \int fem(t) dt \quad \text{Equação 4.4}$$

Nota-se, na equação 4.4, que a constante  $C_{1L}$  é definida em função da distância entre o canal de descarga e o local de instalação do medidor, da área da espira e da permeabilidade do ar.

No caso do dispositivo, o circuito integrador ativo projetado na placa de condicionamento de sinal fornece um ganho ao sinal integrado da tensão induzida, representado na equação 4.5 como o fator  $C_{2L}$ , que pode ser incluído na equação que permite recuperar  $i(t)$ .

$$i(t) = C_{1L}C_{2L} \int_{\text{Circuito Ativo}} fem(t)dt = C_{TL} \int_{\text{Circuito Ativo}} fem(t)dt \quad \text{Equação 4.5}$$

A determinação da constante  $C_{TL}$  foi feita experimentalmente por meio de ensaios laboratoriais controlados, conforme apresentado no diagrama esquemático da figura 4.15. Mantendo-se o fluxo da mesma corrente  $i(t)$  em todos os ensaios e variando-se a distância  $d$ , nota-se que há variação inversa entre a tensão integrada  $V_s$  e a distância  $d$ .

Assumindo que a distância  $d$  é um importante parâmetro para obter o módulo da corrente, é razoável presumir que, em uma situação prática real, dificilmente o equipamento será instalado a uma mesma distância entre o medidor e a estrutura elevada em diferentes localidades. Portanto, é interessante criar uma expressão que relacione o sinal de tensão final obtido com a correspondente corrente real, a partir da distância entre o medidor e a estrutura que, presumidamente, será atingida por um raio.

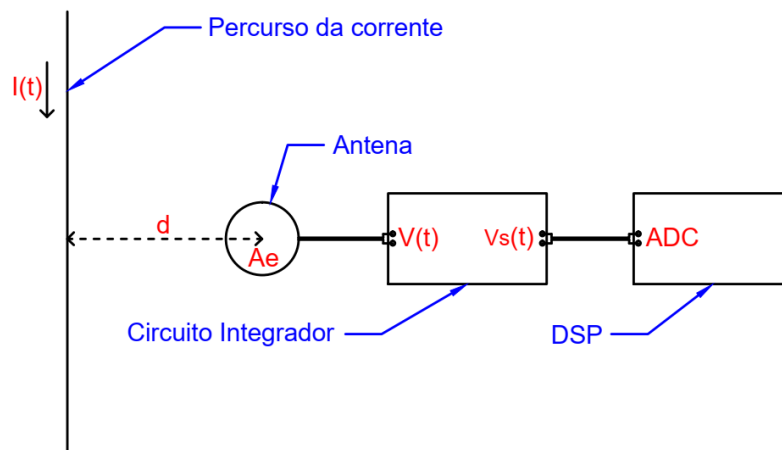


Figura 4.15 – Esquemático de ensaios laboratoriais.



Como mencionado na seção 4.2.4, o sinal de tensão  $V_s(t)$  fornecido pelo circuito integrador não pode conter componentes negativas e nem valores superiores a 3V. Esse limite está condicionado à entrada do conversor analógico digital do DSP. Entretanto, o medidor deve ser capaz de registrar ondas positivas e negativas que varram a escala de aproximadamente -85,5 kA a +85,5 kA, quando instalada a uma distância de 15 metros da torre. A figura 4.16 apresenta três escalas. A **escala A** ilustra os limites de tensão  $V_s(t)$ , considerando o *offset* discutido na seção 4.2.2. A **escala B** mostra o sinal  $V_s(t)$  subtraído do *offset*. A **escala C** apresenta os valores de correntes correspondentes à tensão medida  $V_s(t)$ , considerando a instalação do medidor a 15 metros da torre.

Nota-se, na figura 4.16, que a relação entre a corrente máxima a ser medida e a tensão limite  $V_s(t)$  deve ser 57.000 vezes para a distância de 15 m. Conseqüente, a equação 4.6 descreve a corrente em kA em função da distância de instalação. Ajustes no circuito integrador da placa condicionadora de sinal foram realizados para alterar o fator  $C_{2L}$  até que o parâmetro  $C_{TL}$  fosse igual a  $3,8 \times d$ .

$$i(t) = C_{TL} \int fem(t)dt = 3,8 \times d \times V_s(t) \quad \text{Equação 4.6}$$

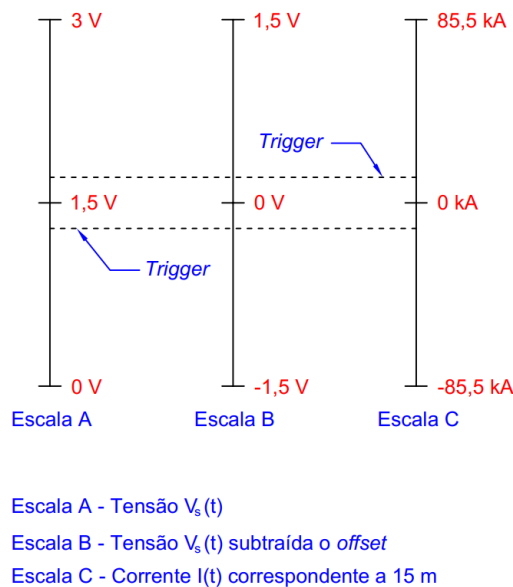


Figura 4.16 – Comparativos entre as escalas do dispositivo com antena loop.

O gerador de alta tensão disponível no laboratório não produz correntes impulsivas com amplitudes cuja ordem de grandeza seja representativa de correntes de descargas atmosféricas reais. Entretanto, se a distância entre o medidor e o fio

condutor de corrente for reduzida, campos eletromagnéticos equivalentes à situação real iluminam o dispositivo. Esse método de teste em escala reduzida foi utilizado para validar o desempenho do dispositivo e os resultados dos ensaios estão apresentados na seção 3.4.

O ensaio para regular o ganho de sinal do dispositivo consiste em aplicar uma corrente impulsiva de aproximadamente 500 A de valor de pico a um condutor posicionado a 0,3 m do centro da antena do medidor. Se o ganho estiver correto, o dispositivo deve indicar uma variação de tensão até o pico de aproximadamente 438 mV.

#### 4.4. Calibração do registrador de corrente quando se utiliza a bobina de Rogowski como sensor

A corrente medida da descarga atmosférica é obtida a partir da integração da tensão induzida gerada nos terminais da bobina de Rogowski, conforme indicado na equação 4.7.

$$i(t) = \frac{2\pi r}{A_e N \mu_o} \int fem(t) dt \quad \text{Equação 4.7}$$

$$i(t) = C_{1R} \int fem(t) dt \quad \text{Equação 4.8}$$

Parâmetros da equação 4.8:

$fem(t)$  – Tensão induzida medida nos terminais da bobina de Rogowski;

$i(t)$  – Corrente que fluiu pelo canal de descarga atmosférica;

$r$  – Raio da bobina de Rogowski;

$A_e$  – Área da espira;

$\mu_o$  – Permeabilidade do ar;

Nota-se, na equação 4.8, que a constante  $C_{1R}$  é definida em função dos parâmetros construtivos da bobina de Rogowski. Diferentemente da antena *loop*,

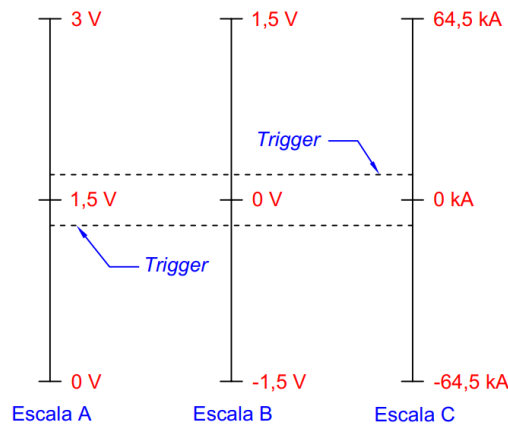
que depende de informações do local de instalação para obter  $C_{1L}$ , o valor  $C_{1R}$  é constante, independente de condições de instalação da bobina.

No caso do dispositivo desenvolvido para operar com a bobina de Rogowski, o circuito integrador ativo fornece um ganho constante à integral da tensão induzida, representado na equação 4.9 como o fator  $C_{2R}$ , que pode ser incluído na equação que permite recuperar  $i(t)$ .

$$i(t) = C_{1R} C_{2R} \int_{\text{Circuito Ativo}} fem(t) dt = C_{TR} \int_{\text{Circuito Ativo}} fem(t) dt \quad \text{Equação 4.9}$$

A determinação da constante  $C_{TR}$  foi feita experimentalmente por meio de ensaios laboratoriais controlados. Os ensaios estabeleceram o valor 43 para a constante  $C_{TR}$ , conforme é apresentado na equação 4.10, a qual retorna a corrente que fluiu pela torre em kA.

$$i(t) = C_{TR} \int fem(t) dt = 43 \times V_s(t) \quad \text{Equação 4.10}$$



Escala A - Tensão  $V_s(t)$   
 Escala B - Tensão  $V_s(t)$  subtraída o *offset*  
 Escala C - Corrente  $I(t)$

Figura 4.17 – Comparativo entre as escalas do sistema de medição com bobina de Rogowski.

Verificou-se o correto funcionamento do dispositivo quando foi aplicada uma corrente impulsiva de aproximadamente 10 kA de valor de pico a um condutor que atravessou a bobina de Rogowski. Para esta condição, o dispositivo indicou uma variação de tensão até o pico de aproximadamente 232 mV, conforme o esperado.

## 4.5. Instalação de equipamentos em MCS

As medições de correntes realizadas na torre instrumentada da estação MCS são apontadas como resultados de excelência pela literatura internacional. Com a finalidade de validar o registrador de corrente proposto neste trabalho, três equipamentos com antena loop foram instalados sobre o telhado do abrigo da estação e um outro, projetado para funcionar com a bobina de Rogowski, foi instalado na base da torre instrumentada. O desempenho dos medidores será avaliado a partir da comparação entre os resultados obtidos pelo sistema tradicional de medição e os alcançados pelos registradores.



Figura 4.18 – Dispositivos com antena loop instalados na estação de pesquisa MCS. (A) Vista geral. (B) Posicionamento da antena do equipamento 1. (C) Componentes internos referente ao equipamento 1.

A figura 4.18 (A) apresenta a posição de três equipamentos que foram instalados sobre o teto do abrigo da estação MCS. A figura 4.20 (B) mostra a disposição da antena do registrador em função da torre. O plano referente à área da espira deve estar completamente alinhado com a torre para que o campo magnético possa ter influência máxima. Assim, os ganhos ajustados em laboratório e descritos na seção 4.3 serão compatíveis com as medições em campo. Já a figura (C) exhibe a organização dos componentes do registrador dentro da caixa. O equipamento 1 foi instalado em novembro de 2017 e os outros dois (dispositivo 2 e 3) em junho de 2018.

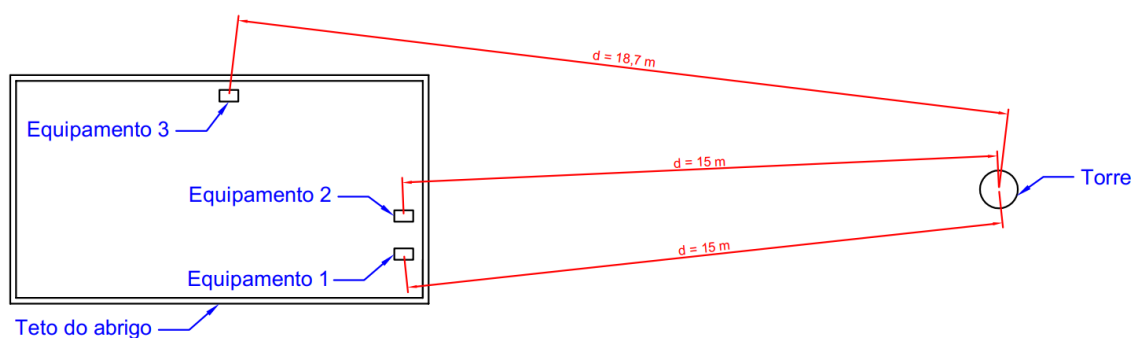


Figura 4.19 – Arranjo esquemático da instalação dos equipamentos na estação MCS e as respectivas distâncias até a torre.

Tendo como referência a figura 4.19, elaborou-se a tabela 4.2. A escala máxima de medição de corrente sem ocorrer saturação no circuito integrador foi determinada pela equação 4.7 em função da distância entre a posição de instalação do medidor e a torre. Nota-se que o equipamento 3 possui uma escala de medição maior que os demais. Isso decorre do fato dele estar mais distante da torre. Ao aumentar-se a escala de medição, diminui-se a qualidade nas medições de menores amplitudes. Observa-se, também, que o limiar de disparo para início da medição é diferente nos três equipamentos instalados. Isso foi programado no código do DSP de forma proposital para acompanhar a evolução e avaliar o desempenho do medidor a medida que as descargas forem atingindo a torre.

Tabela 4.2 – Comparação entre as características dos medidores com antena loop instalados na estação MCS.

<b>Equipamento</b>	<b>Distância até a torre</b>	<b>Escala máxima de corrente</b>	<b>Limiar de disparo para iniciar a aquisição dos dados</b>
1	15 m	-85,5 kA a +85,5 kA	23 kA
2	15 m	-85,5 kA a +85,5 kA	16 kA
3	18,7 m	-106,5 kA a +106,5 kA	25 kA

A figura 4.20.a ilustra a instalação da bobina de Rogowski na base da torre instrumentada de MCS. A figura 4.20.b consiste na ampliação da imagem apresentada em 4.20.a, na qual indica-se que o mesmo condutor de corrente da torre atravessa simultaneamente a bobina de Rogowski as tradicionais bobinas de Pearson. A unidade de gravação instalada dentro do abrigo é ilustrada na figura 4.20.c. Já a figura 4.20.d exhibe a organização dos componentes do registrador dentro da caixa.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.20 – Instalação da bobina de Rogowski e da unidade de gravação em MCS.

# 5. Medições realizadas em MCS: resultados e análises

O primeiro dispositivo desenvolvido foi instalado em MCS em dezembro de 2017 (figura 4.19). Este registrou o único evento de descarga descendente ocorrido em 2018. Os demais três dispositivos, dois com antena *loop* e um com bobina de Rogowski, foram instalados em 2018 após a ocorrência deste evento. Desde então, foram registrados quatro outros eventos de descargas descendentes, todos negativos.

Neste capítulo são analisados os resultados de medição de cada um dos equipamentos instalados, comparando-os com aqueles obtidos pelo sistema de medição de referência da torre instrumentada.

## 5.1. Evento 1: Descarga descendente negativa registrada em 03/02/2018

Em fevereiro de 2018, o sistema de medição proposto nesta tese registrou a primeira forma de onda da corrente de retorno de uma descarga descendente negativa, de um único pulso.



### 5.1.1. Análise geral do evento

A figura 5.1 apresenta a corrente medida pelo dispositivo e pelo sistema de referência da estação do Morro do Cachimbo.

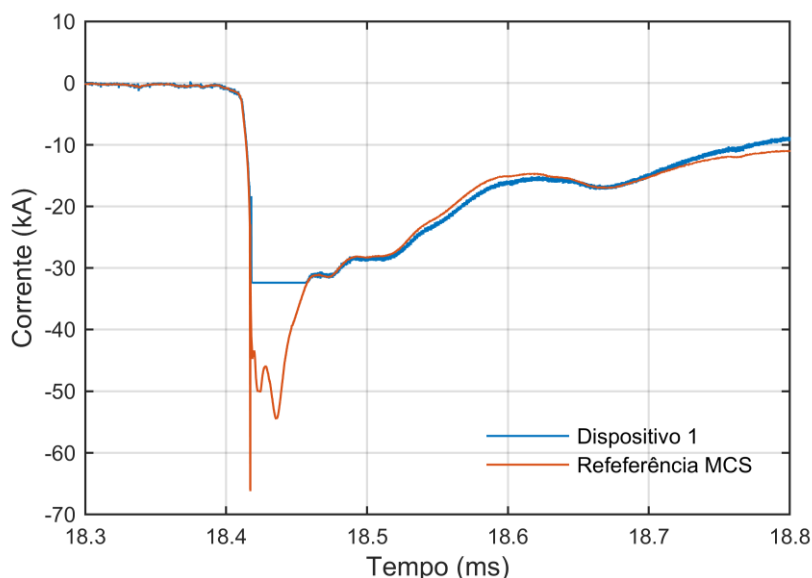


Figura 5.1 – Comparação entre as formas de onda de primeira corrente de retorno registradas pelo dispositivo 1 e pelo sistema de medição de MCS.

Este primeiro registro realizado pelo dispositivo 1 teve dois problemas. Primeiramente, o sinal de corrente medido foi grampeado em -32 kA. O segundo problema refere-se ao desvio identificado na cauda da forma de onda de corrente registrada pelo dispositivo após o instante 18,8 ms, conforme ilustrado na figura 5.2. Por outro lado, exceto pelo grampeamento, a qualidade da medição foi significativa nos 400  $\mu$ s iniciais do sinal.

Com relação ao grampeamento, identificou-se que decorreu da operação do circuito de proteção dos componentes do dispositivo, cujo nível de operação havia sido configurado erroneamente para impedir medições acima do limiar de 32 kA. A solução deste problema constou simplesmente em se alterar o limiar de proteção para a escala máxima de 85,5 kA.

No que concerne ao desvio na cauda da onda de corrente registrada, notou-se, no registro, que o ganho em componentes de frequências mais baixas (componentes da cauda) era superior àquele das componentes de alta frequência

do sinal. Quando essa hipótese foi levantada, determinou-se por ensaio experimental a resposta em frequência de todo o dispositivo, a qual comprovou a hipótese. Foram realizados ajustes no circuito integrador do dispositivo para correção do desvio, como descrito na seção seguinte.

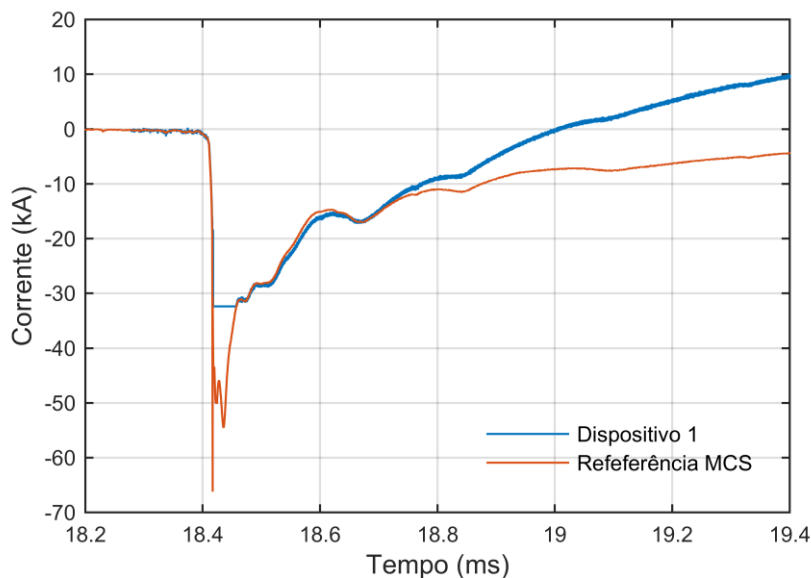


Figura 5.2 – Registro completo: comparação entre as formas de onda de primeira corrente de retorno registradas pelo dispositivo 1 e pelo sistema de medição de MCS.

### 5.1.2. Resposta em frequência do dispositivo e melhorias realizadas

Na configuração do dispositivo original, as componentes de baixa frequência possuíam um ganho maior do que as componentes de alta frequência. No caso em questão, observou-se que as componentes de aproximadamente 200 Hz são muito relevantes para recompor a cauda da onda de corrente de retorno. Parâmetros do circuito integrador foram ajustados para deslocar o ganho acentuado que ocorria em 200 Hz para aproximadamente 35 Hz, de forma a tornar a resposta em frequência plana de 100 Hz a aproximadamente 300 kHz. A frequência de corte inferior e superior do dispositivo passaram a ser 22 Hz e 400 kHz, respectivamente. A figura 5.3 apresenta a comparação entre a resposta em frequência do dispositivo antes e depois dos ajustes realizados.

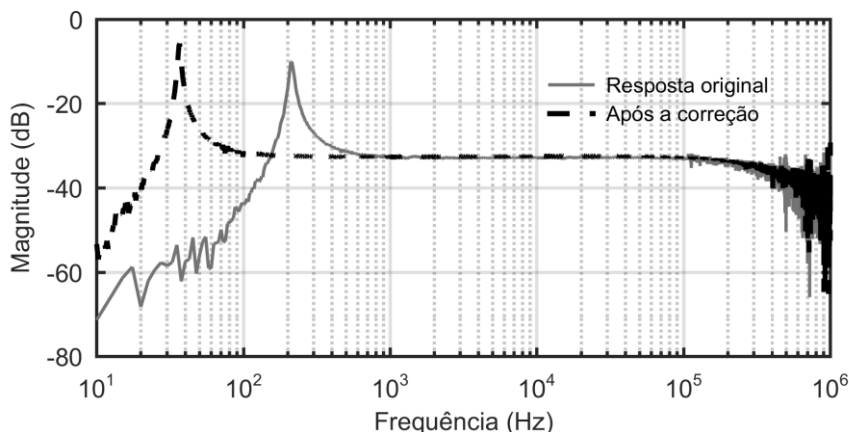


Figura 5.3 – Comparação da resposta em frequência do dispositivo antes e após ajustes.

Vale comentar que o comportamento inadequado na cauda não havia sido observado nos ensaios laboratoriais, devido à onda de corrente de teste utilizada. O tempo de meia onda da corrente impulsiva produzida pelo gerador de alta tensão fora ajustada para valor menor que 50  $\mu\text{s}$ , já que o valor mediano deste parâmetro das primeiras correntes de retorno medidas em MCS era 56.2  $\mu\text{s}$  [28]. Neste evento, em particular, a cauda é muito mais lenta, apresentando um valor incomum, cerca de 130  $\mu\text{s}$ .

### 5.1.3. Validação das ações realizadas por meio de ensaio laboratorial com correntes impulsivas com caudas lentas

Após os ajustes no circuito integrador do dispositivo, buscou-se avaliar o seu desempenho por meio de medições em laboratório, usando-se ondas de corrente impulsivas com tempo de meia onda superior a do evento. A figura 5.4 ilustra o resultado obtido no laboratório para uma corrente impulsiva de tempo de meia onda de aproximadamente 153  $\mu\text{s}$  e tempo de frente de 5  $\mu\text{s}$ . Nota-se que amplitude de corrente indicada na figura corresponde à situação em que a antena *loop* foi posicionada muito próxima ao condutor (vide figura 3.32), de modo que o campo magnético a que ela foi submetida fosse equivalente a uma situação real de 15 metros de distância da torre.

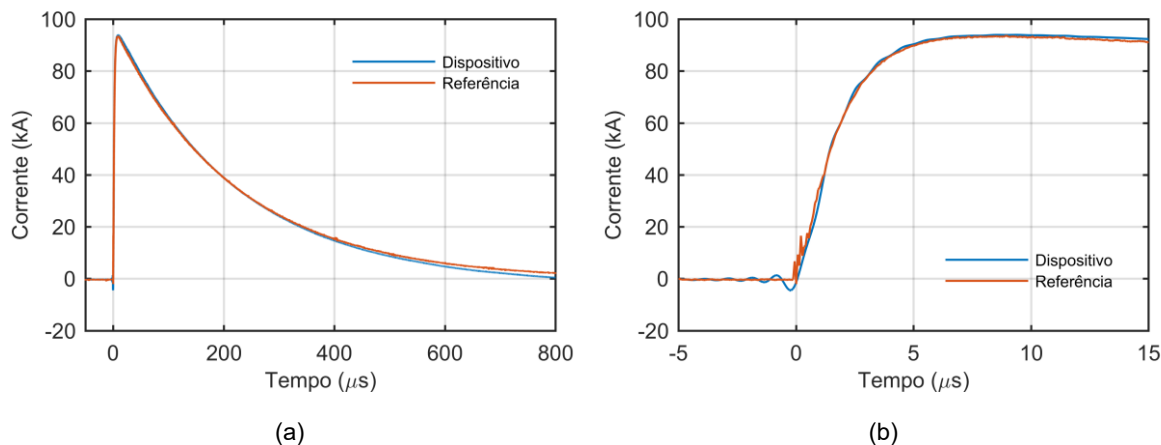


Figura 5.4 – Comparação entre a forma de onda de corrente obtida pelo dispositivo e pelo sistema de medição de referência.

Nota-se, na figura 5.4, que as duas curvas seguiram a mesma tendência, o que denota a efetividade dos ajustes realizados no circuito. Tais ajustes foram implementados em todos os dispositivos.

#### 5.1.4. Análise da fase inicial da corrente

É importante mencionar a boa qualidade de medição realizada na fase inicial da corrente medida. Tal resultado superou as expectativas, uma vez que o dispositivo foi desenvolvido para o registro de picos de corrente elevados (até 85,5 kA). A figura 5.5 (a) ilustra a ampliação do evento apresentado em 5.1 no período de 18,4 ms a 18,44 ms. Já a figura 5.5 (b) apresenta uma ampliação maior que compreende de 18,28 ms a 18,4 ms. As figuras mostram que as curvas seguiram a mesma tendência, indicando que o dispositivo conseguiu representar com qualidade os pulsos unipolares de corrente induzidos na torre instrumentada antes do início da descarga de retorno. Estes são decorrentes da resposta da estrutura aos passos do canal descendente que se aproxima do solo. Embora não seja o foco do dispositivo, o resultado apresentado aponta que é possível usar o dispositivo de forma dedicada para a medição de correntes menores, caso o interesse seja na fase inicial da corrente.

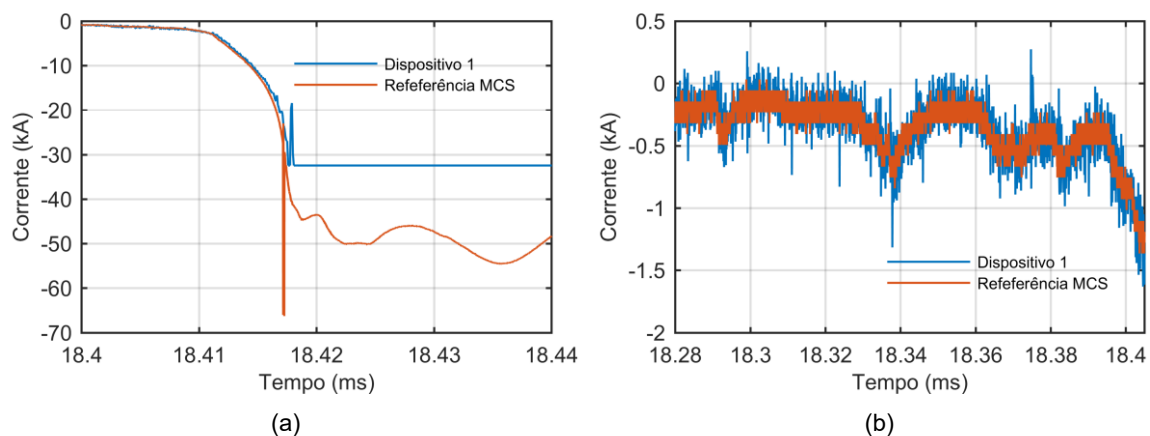


Figura 5.5 – Fase inicial da corrente: (a) apresenta a frente da onda e (b) ilustra os pulsos induzidos na torre instrumentada antes do início da descarga de retorno.

## 5.2. Evento 2: Descarga descendente negativa registrada em 20/01/2019

### 5.2.1. Análise geral do evento

A partir de junho de 2018 a estação de pesquisa passou a contar com mais 2 dispositivos de antena loop e mais 1 de bobina de Rogowski, totalizando 4 dispositivos independentes para realizar a medição de corrente.

Um novo evento de descarga descendente negativa ocorreu apenas em 20 de janeiro de 2019, quase 1 ano após a primeira medição realizada pelo dispositivo em MCS. Embora o tempo entre uma medição e outra tenha sido longo, o trabalho de desenvolvimento continuou e, por isso, novos dispositivos foram instalados em MCS. Como mostram as seções seguintes, a qualidade dos registros obtidos pelos dispositivos denota que as melhorias realizadas na resposta em frequência do dispositivo após o primeiro evento (03/2018) foram efetivas.

Dos 4 dispositivos aptos para realizar a medição, 3 registraram com qualidade a forma de onda de corrente. Os registros de cada um dos sistemas de medição são apresentados a seguir. O sistema de medição que utiliza antena *loop*, denominado como equipamento 2 na figura 4.19, apresentou mau funcionamento e o dispositivo

não efetuou registro. Atribui-se tal falha a problema eventual na fonte de alimentação externa que fornece energia para o dispositivo.

### 5.2.2. Medição realizada pelo dispositivo 1 (Antena *loop*)

A figura 5.6 mostra os registros de corrente obtidos pelo dispositivo 1 e pelas bobinas de Pearson de maior e menor escala. Como discutido no capítulo 2, a bobina de menor escala possui maior qualidade de medição para correntes de até 11 kA, enquanto a bobina de maior escala tem maior qualidade para correntes elevadas.

É importante ressaltar que melhorias realizadas no circuito integrador do dispositivo, após o evento de março de 2019, se mostraram bastante efetivas, sobretudo na cauda. Note que, após o instante 1,2 ms, as curvas do dispositivo e da bobina pequena são similares, e praticamente não há diferenças entre elas.

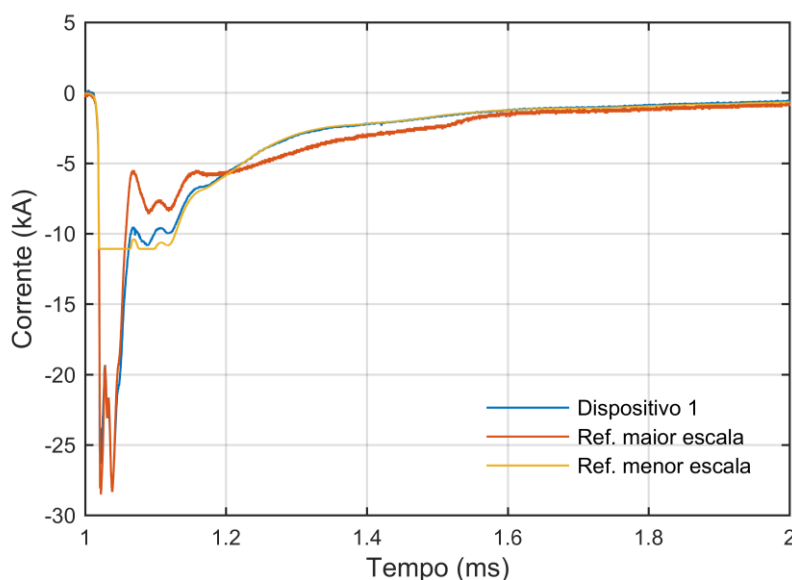


Figura 5.6 – Registro completo: comparação entre as formas de onda de primeira corrente de retorno registradas pelo dispositivo 1 e pelo sistema de medição de MCS.

A figura 5.7 ilustra com maior detalhe o intervalo de tempo entre 1 ms e 1,2 ms. Neste período de análise, a curva referente à menor escala saturou. Isto ocorreu porque a corrente medida ultrapassou o fundo de escala desse sistema de medição. No entanto, quando a corrente é maior que 11 kA, o registro obtido pela escala maior se torna a referência confiável. Nota-se que a curva obtida pelo dispositivo é

semelhante à corrente medida pelo sistema de referência de maior escala no período que compreende o intervalo de 1 ms a 1,05 ms. Houve um casamento perfeito entre as curvas no segundo pico da onda de corrente. Por outro lado, há uma diferença de 8,2% entre os registros no primeiro pico.

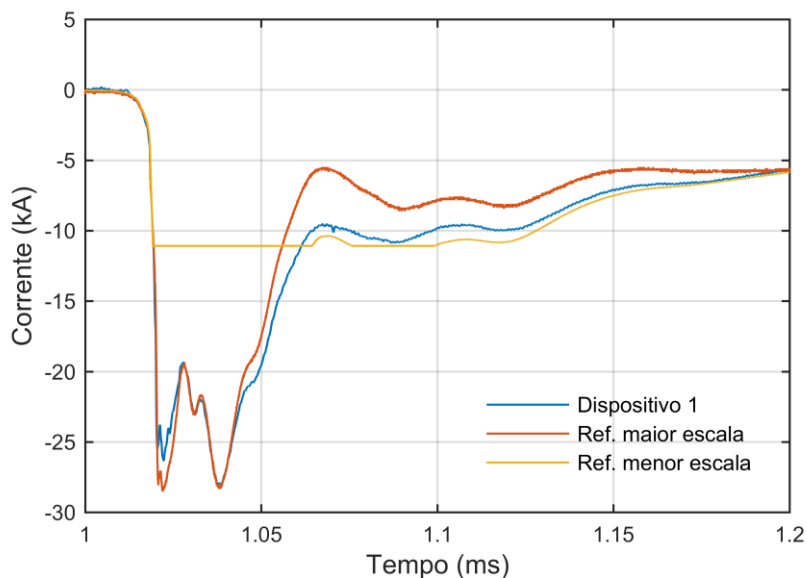


Figura 5.7 – Detalhe do evento apresentado na figura 5.6.

### 5.2.3. Medição realizada pelo dispositivo 3 (Antena *loop*)

A Figura 5.8 mostra o registro efetuado pelo dispositivo 3. Nota-se que as curvas seguem a mesma tendência e tem qualidade, também, no período que se refere à cauda da onda.

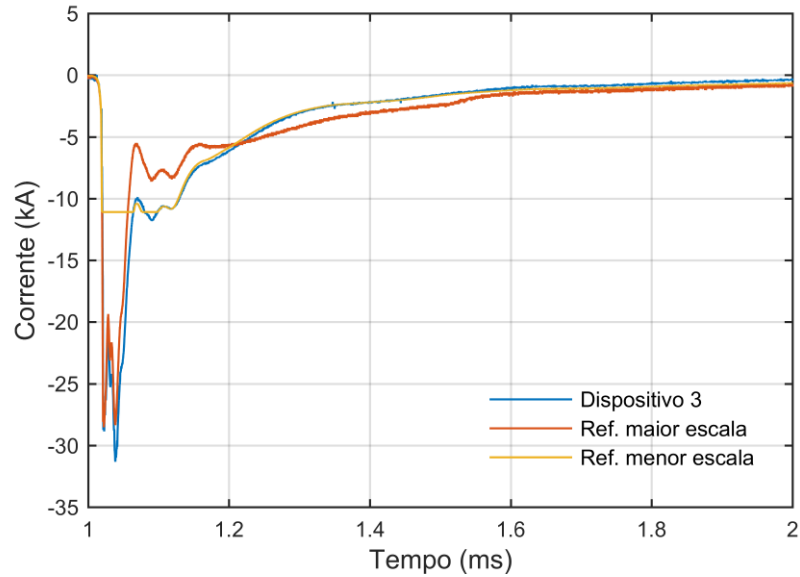


Figura 5.8 – Registros de correntes obtidos pelo dispositivo 3 e pelas bobinas de Pearson.

Como tal dispositivo está a uma distância de 18,7 metros da torre instrumentada, o fator multiplicativo utilizado para recuperar sua corrente dado pela equação 3.7 foi de 71,06. Nota-se um desvio de 10,3 % na amplitude da corrente registrada em relação àquela da referência, embora não haja desvio em relação ao primeiro pico, conforme ilustrado na figura 5.9.

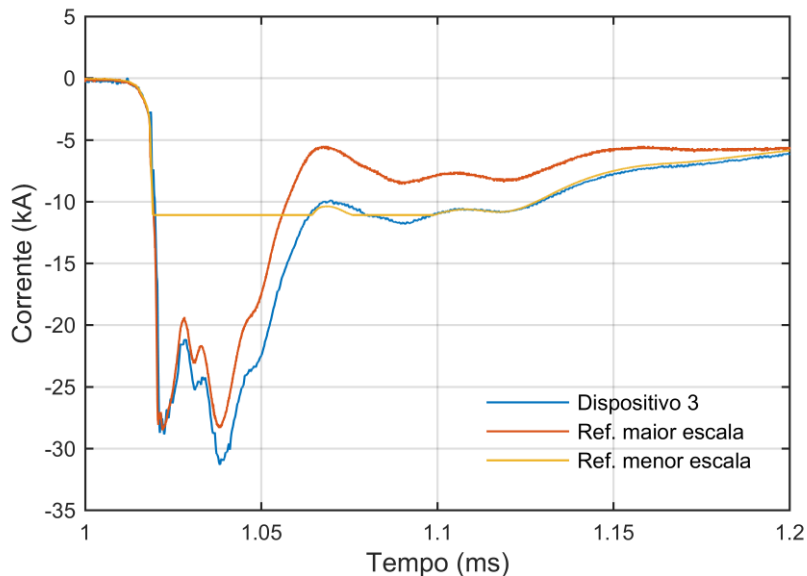


Figura 5.9 – Detalhes do evento apresentado na figura 5.8.



### 5.2.4. Medição realizada pelo dispositivo com a bobina de Rogowski

A figura 5.10 mostra a comparação entre os resultados obtidos pelo dispositivo com a bobina de Rogowski e pelo sistema de referência de MCS. Primeiramente, nota-se que as curvas são similares. Assim como discutido na seção anterior, observou-se que a forma de onda de corrente obtida pelo registrador tem maior semelhança com o sistema de referência de menor escala no período da cauda. No período correspondente à frente da onda, o registro é similar ao obtido pelo sistema de maior escala. Diferentemente do resultado alcançado pelo dispositivo com antena *loop*, uma oscilação foi identificada no instante anterior ao primeiro pico, conforme ilustrado na figura 5.11. Acredita-se que essa oscilação seja causada por interferência nos cabos coaxiais submetidos aos campos eletromagnéticos muito elevados. Tais cabos são responsáveis por conduzirem o sinal de tensão induzida da bobina de Rogowski até a unidade de gravação.

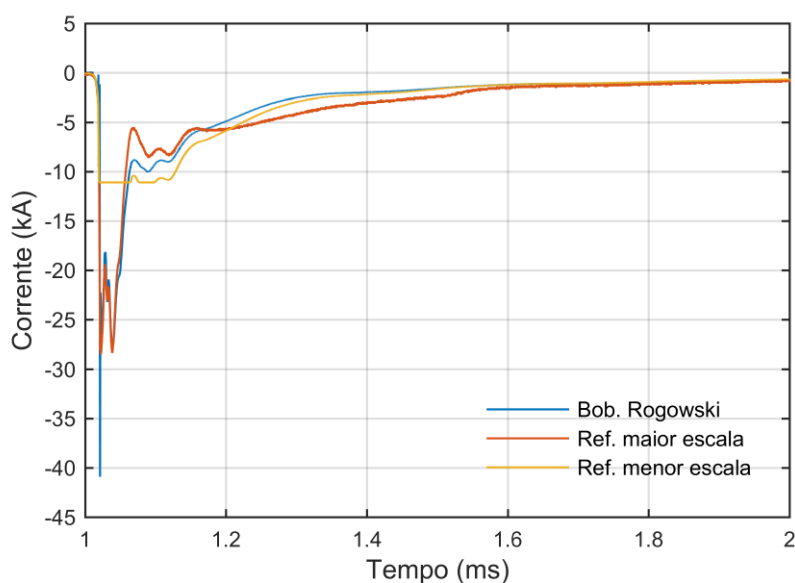


Figura 5.10 – Registros de correntes obtidos pelo dispositivo com a bobina de Rogowski e pelas bobinas de Pearson.

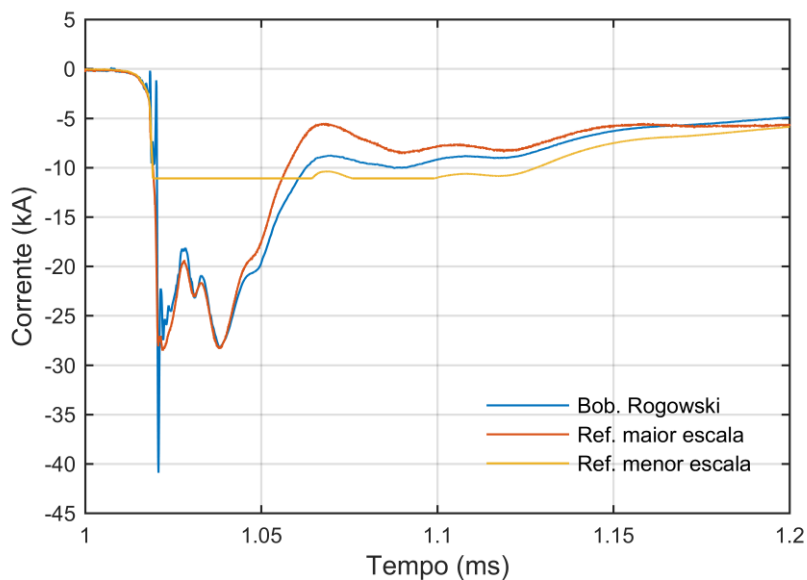


Figura 5.11 – Detalhes do evento apresentado na figura 5.10.

### 5.2.5. Comparação entre os registros obtidos pelos dispositivos

Uma importante análise refere-se à precisão dos dispositivos. Esta pode ser avaliada a partir da comparação dos resultados obtidos por cada dispositivo para um mesmo evento, já que cada um dos sistemas de medição instalados em MCS opera de forma independente. A figura 5.12 mostra um comparativo entre as formas de onda de correntes medidas pelos dispositivos, as quais foram normalizadas em função do valor máximo de pico. As curvas são bastante semelhantes, o que configura um indicativo de alta precisão do dispositivo.

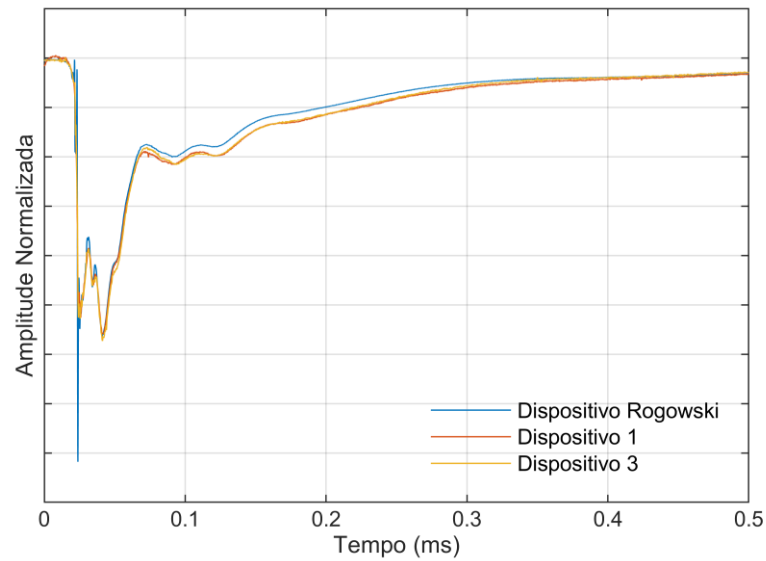


Figura 5.12 – Registros de correntes obtidos pelos dispositivos.

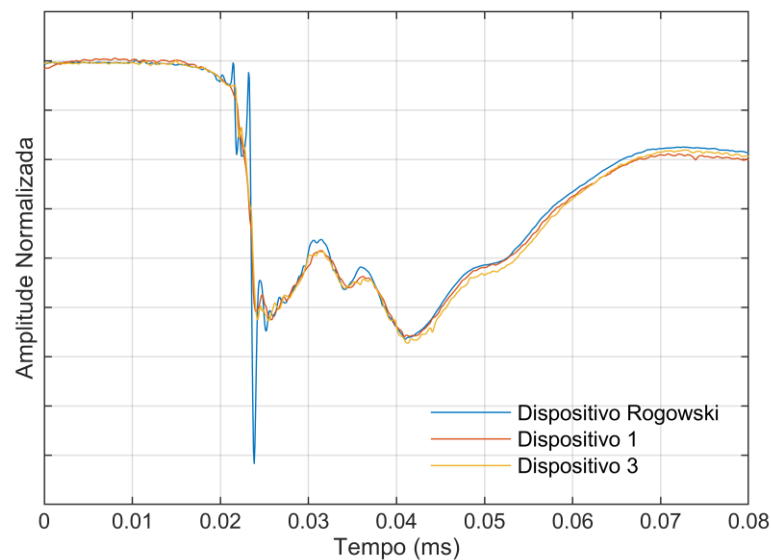


Figura 5.13 – Detalhe da frente da onda de corrente de correntes obtidos pelos dispositivos.

Há uma única diferença significativa entre as curvas da figura 5.13, que ocorre no período anterior ao primeiro pico da onda. Esta corresponde à oscilação identificada no registro obtido pelo dispositivo com bobina de Rogowski. Novas topologias de filtros estão em testes no laboratório para mitigar este problema e aumentar a qualidade das medições do dispositivo.

### 5.2.6. Comparação entre os parâmetros obtidos por cada sistema de medição

Um dos principais objetivos do desenvolvimento do dispositivo de medição de corrente de raios é obter os parâmetros associados à primeira corrente de retorno. Construiu-se a tabela 5.1 a partir dos registros de corrente de cada um dos sistemas de medição apresentados nas seções anteriores. A tabela indica o valor máximo de pico da onda  $I_p$ , o tempo de frente  $T_{d10}$ , o tempo de frente  $T_{d30}$  e o tempo de meia onda  $T_{50}$ .

Tabela 5.1 – Parâmetros da primeira corrente de retorno de descargas atmosféricas registrada pelos sistemas de medição instalados em MCS.

Sistema de medição	Parâmetros			
	$I_p$ (kA)	$T_{d10}$ ( $\mu$ s)	$T_{d30}$ ( $\mu$ s)	$T_{50}$ ( $\mu$ s)
Dispositivo 1: Antena Loop	-28,0	3,6	2,4	48,8
Dispositivo 3: Antena Loop	-31,3	2,8	2,3	45,8
Dispositivo: Bobina de Rogowski	-28,2*	-	-	46,0
Referência MCS	-28,5	3,3	2,6	45,9

\* Desconsiderou-se a oscilação para obter este valor.

Notou-se que as oscilações medidas pelo dispositivo com bobina de Rogowski ocorreram na fase inicial, durante o crescimento da onda de corrente. Determinou-se o valor de pico da onda desconsiderando este período inicial, visto que o valor de pico máximo da onda ocorre, geralmente, no segundo pico.

Observou-se que os parâmetros obtidos pelos dispositivos são bastante próximos aos valores de referência da torre instrumentada. Isto indica consistência e valida a operação do sistema de medição desenvolvido no doutorado. Em termos de valor máximo do pico da onda de corrente, apenas o dispositivo 3 indicou uma discrepância, uma vez que este desvio foi de 8,7 % em relação à referência.

### **5.3. Evento 3: Descarga descendente negativa registrada em 20/02/2019**

#### **5.3.1. Análise geral do evento**

Apresenta-se, nesta seção, a comparação entre as formas de onda de primeira corrente de retorno de descarga atmosférica registradas pelo sistema de referência de MCS e pelos equipamentos instalados. Ressalta-se que todos os quatro equipamentos instalados na estação registraram o evento. Além da forma de onda medida, extraíram-se todos os dados dos dispositivos de forma remota por meio de internet. Após o evento, testou-se a operação correta do dispositivo com envio do comando autoteste, o qual foi descrito na seção 4.2.6.

Após a medição, todos dispositivos continuaram aptos a realizar o registro de um novo evento. Essa estabilidade de operação é bastante relevante para assegurar confiabilidade em termos de suportabilidade contra as interferências eletromagnéticas.

#### **5.3.2. Medição realizada pelo dispositivo 1 (Antena *loop*)**

A figura 5.14 mostra a comparação entre as curvas de corrente obtidas pelo sistema de referência e pelo dispositivo 1. No caso em questão, a cauda da onda do registro obtido pelo dispositivo não coincidiu com a medida pelo sistema de menor escala. Aparentemente houve saturação dessa bobina, que levou à inversão de polaridade na cauda. Entretanto, nota-se certa similaridade entre as curvas até o instante 0,15 ms.

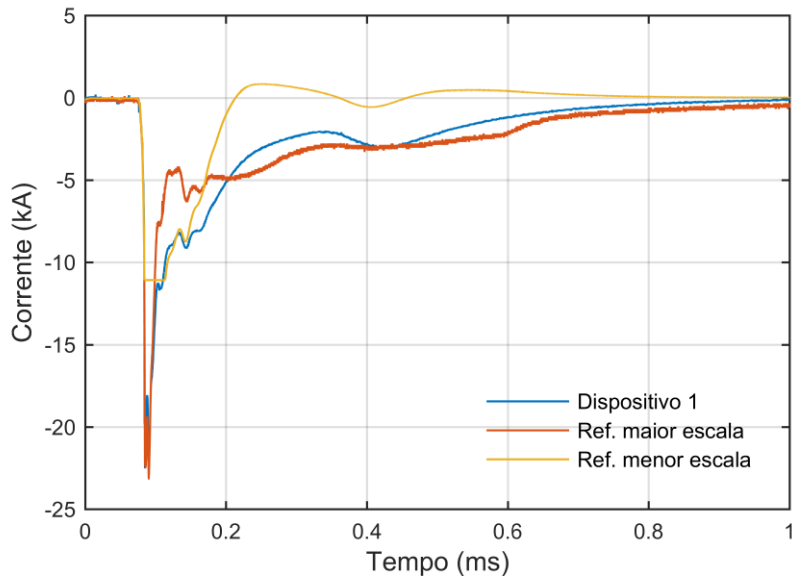


Figura 5.14 – Registros de correntes obtidos pelo dispositivo 1 e pelas bobinas de Pearson.

A figura 5.15 mostra detalhes da forma de onda de corrente entre o intervalo de 0,05 ms a 0,2 ms. Nota-se que o registro obtido pelo dispositivo representou com qualidade a frente da onda de corrente quando se considera como referência a curva medida pelo sistema de maior escala. No entanto, observou-se uma pequena diferença no segundo pico.

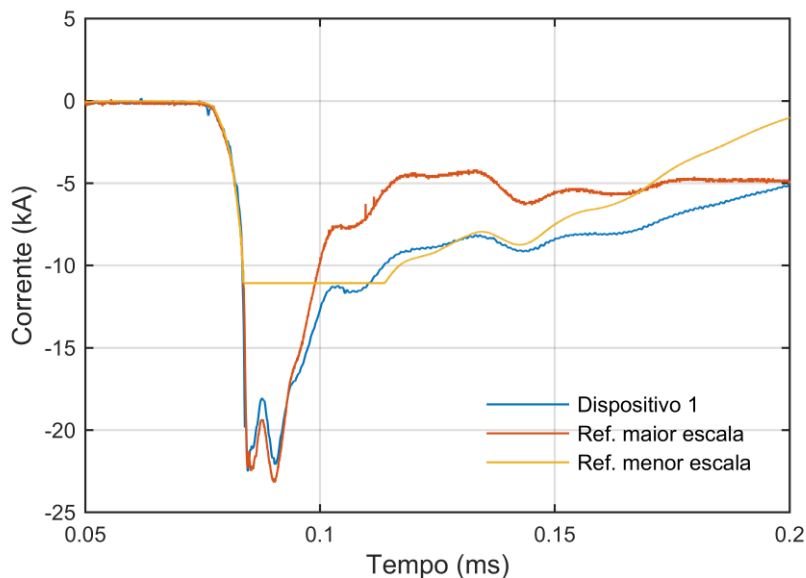


Figura 5.15 – Detalhes do evento apresentado na figura 5.14.

### 5.3.3. Medição realizada pelo dispositivo 2 (Antena *loop*)

A figura 5.16 apresenta os registros de primeira corrente de retorno obtidos pelo dispositivo 2 e pelo sistema de medição de MCS. Com relação a cauda da onda, notou-se um comportamento muito similar ao dispositivo 1. A diferença significativa entre os resultados é a oscilação do sinal medido na frente da onda, a qual pode ser visualizada com maior detalhe na figura 5.17.

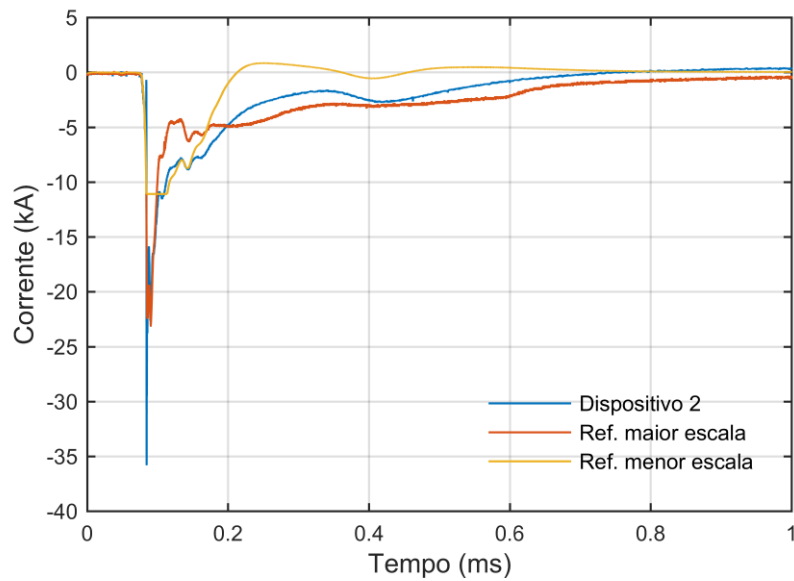


Figura 5.16 – Registros de correntes obtidos pelo dispositivo 2 e pelas bobinas de Pearson.

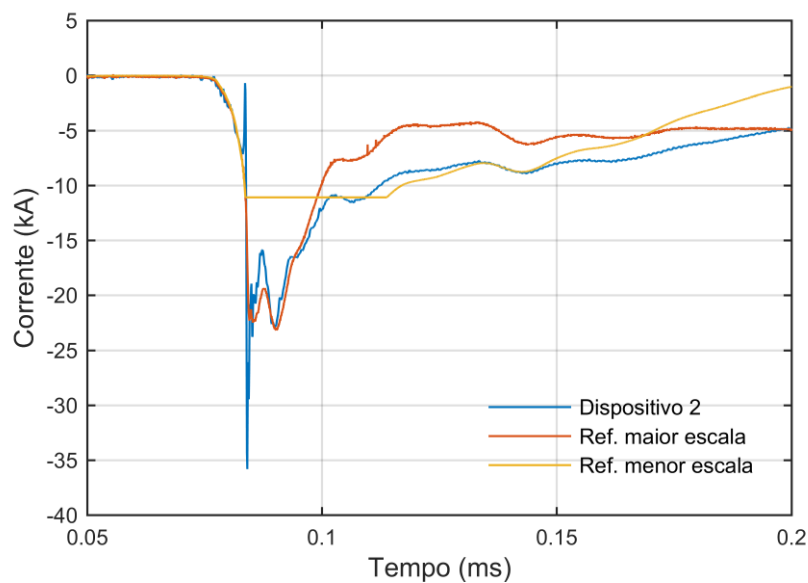


Figura 5.17 – Detalhes do evento apresentado na figura 5.16.

### 5.3.4. Medição realizada pelo dispositivo 3 (Antena *loop*)

A figura 5.18 apresenta os registros de primeira corrente de retorno obtidos pelo dispositivo 2 e pelo sistema de referência. Nota-se que a curva obtida pelo equipamento apresentou boa qualidade em termos da relação sinal-ruído, uma vez que nenhuma oscilação foi identificada.

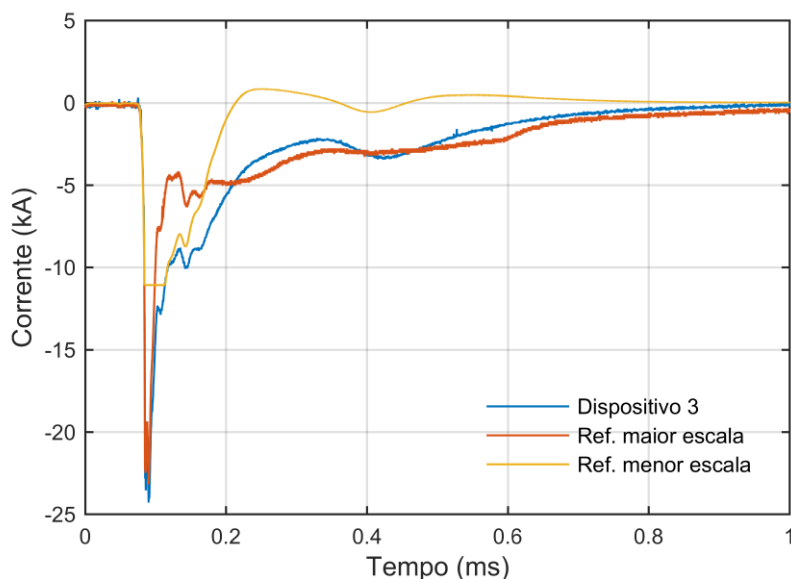


Figura 5.18 – Registros de correntes obtidos pelo dispositivo 3 e pelas bobinas de Pearson.

Na figura 5.19, observa-se que a forma de onda medida pelo equipamento 3 registrou com qualidade a frente da onda de corrente, uma vez que a curva é bastante similar a curva obtida pelo sistema de referência de escala maior. Já o segundo pico da onda foi superestimado pelo dispositivo, tal desempenho é similar ao do mesmo dispositivo 3, quando este registrou o evento em 20 de janeiro de 2019.



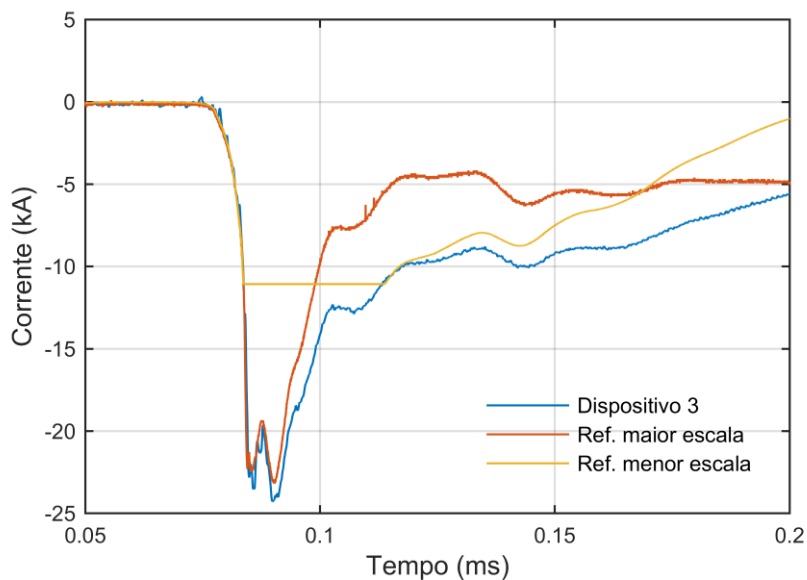


Figura 5.19 – Detalhes do evento apresentado na figura 5.18.

### 5.3.5. Medição realizada pelo dispositivo com a bobina de Rogowski

A figura 5.20 mostra a comparação entre os resultados obtidos pelo dispositivo com a bobina de Rogowski e pelo sistema de referência de MCS. Nota-se que a cauda da curva obtida pelo dispositivo segue a mesma tendência das formas de onda de corrente registradas pelo sistema de referência. Já na frente da onda, observou-se novamente uma perturbação na corrente registrada. Detalhes desta oscilação podem ser vistos na figura 5.21.

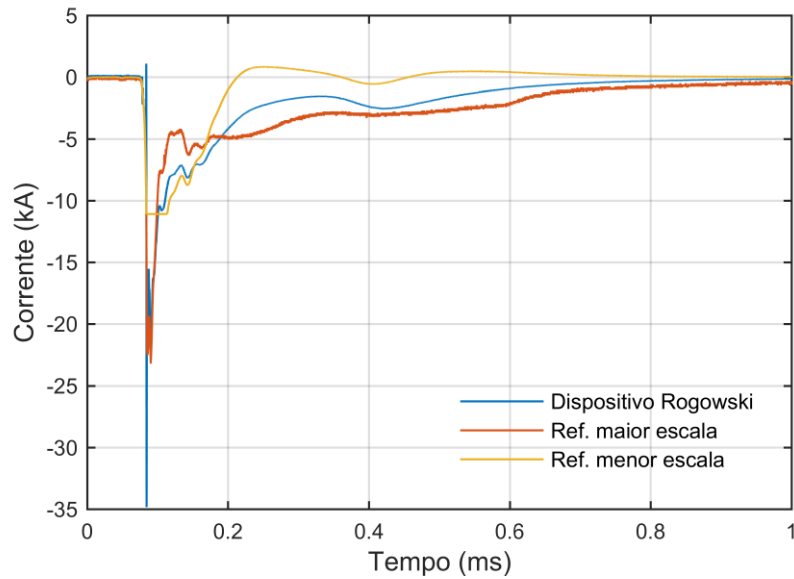


Figura 5.20 – Registros de correntes obtidos pelo dispositivo com a bobina de Rogowski e pelas bobinas de Pearson.

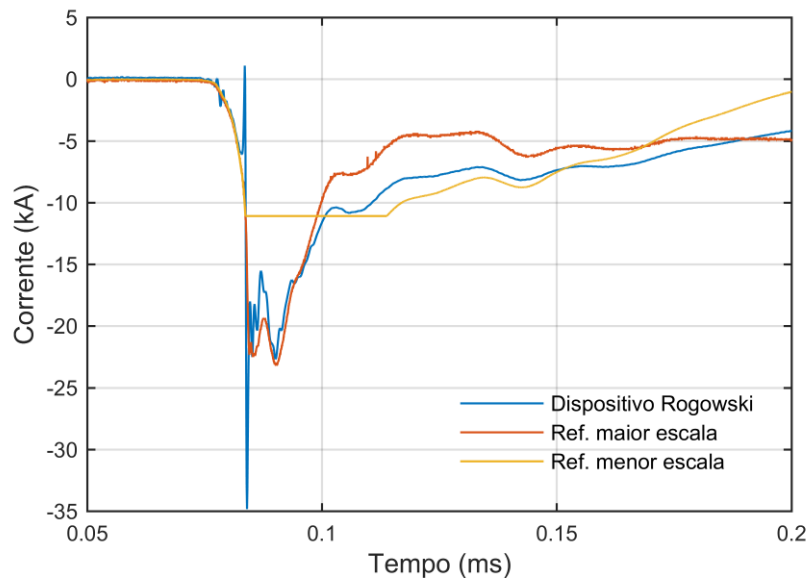


Figura 5.21 – Detalhes do evento apresentado na figura 5.20.

### 5.3.6. Comparação entre os registros obtidos pelos dispositivos

A figura 5.22 apresenta a comparação entre os registros normalizados obtidos pelos dispositivos. Observou-se que a cauda da onda é praticamente idêntica entre todas as curvas, o que indica alto grau de precisão. Conforme apresentado na seção

referente ao evento registrado no dia 20 de janeiro de 2019, identificou-se comportamento similar em termos de precisão.

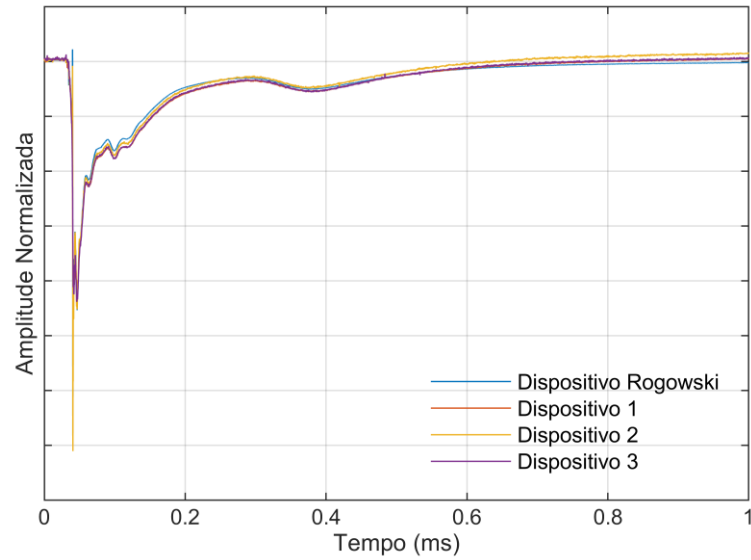


Figura 5.22 – Registros de correntes obtidos pelos dispositivos.

A figura 5.23 apresenta detalhes frente da onda de corrente obtida por cada um dos dispositivos. Notou-se semelhança significativa entre as curvas obtidas pelos dispositivos 1 e 3 por não apresentarem oscilações.

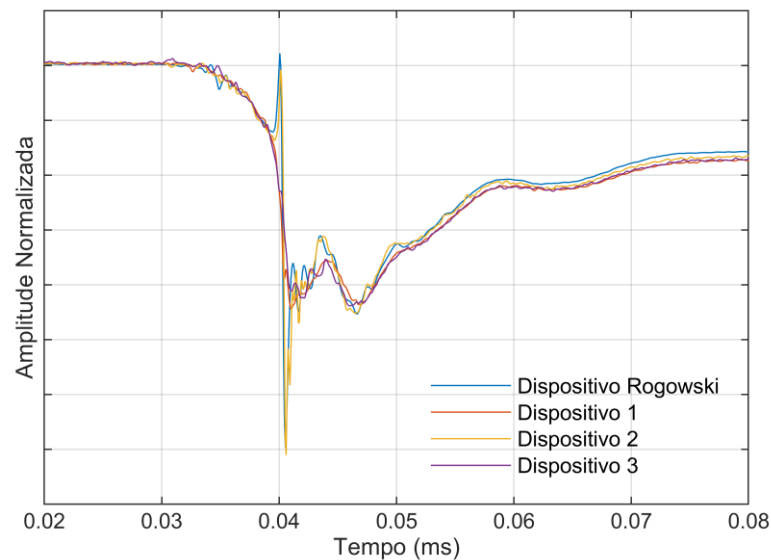


Figura 5.23 – Detalhe da frente da onda de corrente de correntes obtida pelos dispositivos.

### 5.3.7. Comparação entre os parâmetros obtidos por cada sistema de medição

A tabela 5.2 apresenta a comparação entre os parâmetros associados à primeira corrente de retorno obtidos por cada sistema de medição. Nesta tabela pode-se comparar o valor máximo de pico da onda  $I_p$ , o tempo de frente  $T_{d10}$ , o tempo de frente  $T_{d30}$  e o tempo de meia onda  $T_{50}$ .

Tabela 5.2 – Parâmetros da primeira corrente de retorno de descargas atmosféricas registrada pelos sistemas de medição instalados em MCS.

Sistema de medição	Parâmetros			
	$I_p$ (kA)	$T_{d10}$ ( $\mu$ s)	$T_{d30}$ ( $\mu$ s)	$T_{50}$ ( $\mu$ s)
Dispositivo 1: Antena Loop	-22,1	5,3	2,4	35,4
Dispositivo 2: Antena Loop	-22,9*	-	-	25,9
Dispositivo 3: Antena Loop	-24,2	5,9	2,7	35,8
Dispositivo: Bobina de Rogowski	-22,6*	-	-	26,4
Referência MCS	-23,2	5,4	2,7	24,4

\* Desconsiderou-se a oscilação para obter este valor.

Os valores de pico da onda obtidos pelos dispositivos desenvolvidos são bastante similares ao valor registrado pelo sistema de referência. Isto denota a consistência de operação dos equipamentos. O tempo de frente da onda  $T_{d10}$  das correntes registradas pelos dispositivos 1 e 3 apresentaram um erro menor que 8 % em relação ao valor indicado pelo sistema de referência. Não foi possível determinar o tempo de frente da onda para os dispositivos 2 e com bobina de Rogowski devido às oscilações identificadas no sinal medido. Com relação ao tempo de meia onda, notou-se que os dispositivos que apresentaram oscilações, retornaram valores mais próximos do valor de referência.

## **5.4. Evento 4: Descarga descendente negativa registrada em 19/11/2019**

### **5.4.1. Análise geral do evento**

Em novembro de 2019, registrou-se o quarto evento relacionado à primeira corrente de retorno de uma descarga descendente obtido pelo sistema de medição desenvolvido no doutorado.

No dia da ocorrência do evento, os quatro dispositivos estavam em operação. No entanto, apenas o dispositivo 3 registrou a forma de onda. Coincidentemente, houve algum distúrbio com o sistema de medição de referência da estação de Pesquisa, o qual gerou ruídos significativos nas formas de ondas obtidas, o que inviabilizou comparações. Aparentemente, o mesmo problema afetou a alimentação dos outros três dispositivos. Discute-se nesta seção a análise do resultado obtido pelo dispositivo 3. A partir deste registro, calcularam-se os parâmetros da corrente de retorno.

### **5.4.2. Medição realizada pelo dispositivo 3 (Antena *loop*)**

A figura 5.24 apresenta a forma de onda obtida pelo dispositivo 3. Embora não tenha um registro de referência para assegurar fidedignidade, a curva exibe características, tais como a forma de onda, o valor de pico e o tempo de meia onda, similares aos parâmetros típicos de primeiras correntes de retorno tradicionalmente registradas em MCS. Tais valores são apresentados na seção 5.4.5.

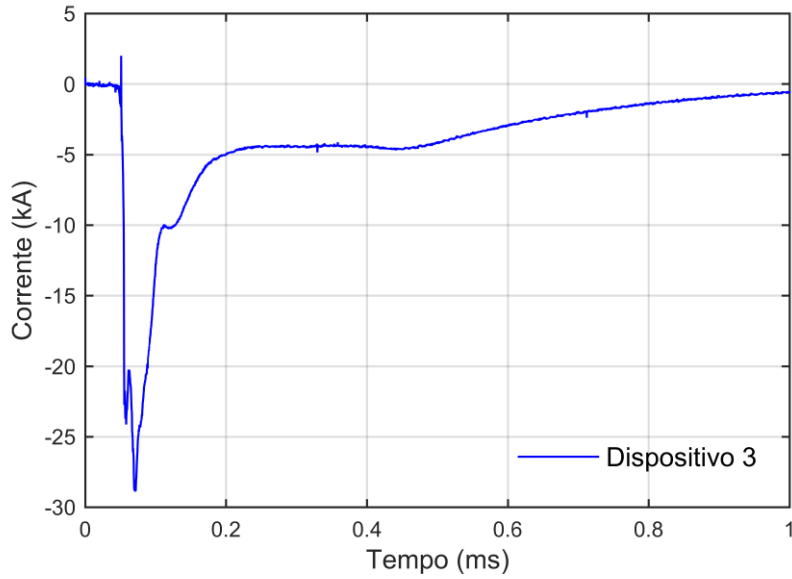


Figura 5.24 – Registro de corrente obtido pelo dispositivo 3.

A figura 5.25 exibe com maior detalhe o período referente à frente da onda de corrente apresentada em 5.24. Observou-se a boa qualidade no registro, uma vez que praticamente não há oscilações na frente da onda.

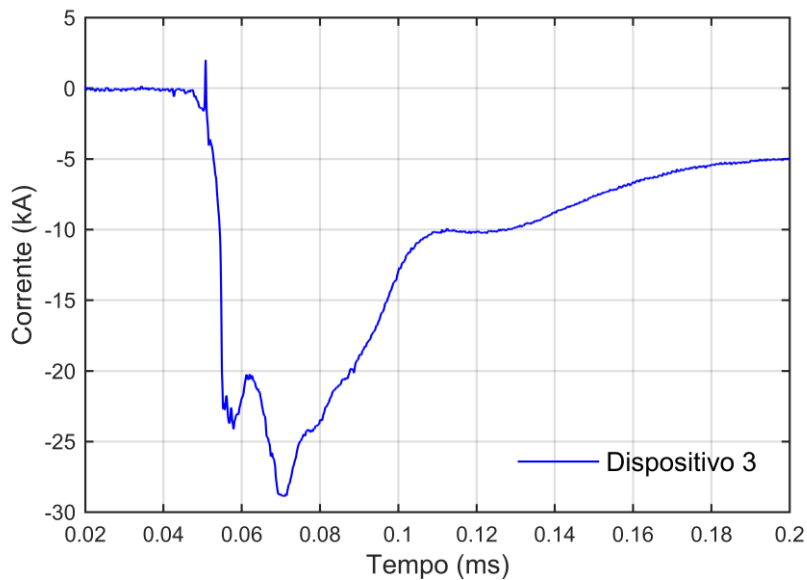


Figura 5.25 – Detalhes do evento apresentado na figura 5.24.

### 5.4.1. Parâmetros obtidos a partir da forma de onda registrada pelo dispositivo 3

A partir das figuras 5.24 e 5.25, obtiveram-se os valores dos parâmetros associados à corrente de retorno registrada pelo dispositivo 3, os quais são apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros da primeira corrente de retorno de descargas atmosféricas registrada pelo dispositivo 3.

Sistema de medição	Parâmetros			
	$I_p$ (kA)	$T_{d10}$ ( $\mu$ s)	$T_{d30}$ ( $\mu$ s)	$T_{50}$ ( $\mu$ s)
Dispositivo 3: Antena Loop	-28,8	4,8	2,4	54,2

A literatura internacional recente, especificamente no trabalho [28], indica que os valores medianos para os parâmetros de  $I_p$ ,  $T_{d10}$  e  $T_{50}$  para primeira corrente de retorno de descargas atmosféricas medidas em MCS são 43,3 kA, 6,4  $\mu$ s e 56,2  $\mu$ s, respectivamente. O valor de pico medido pelo dispositivo corresponde a 66,5 % do valor mediano de MCS. Já o tempo de meia onda foi consistente com a mediana histórica, cujo valor apresentou uma diferença menor que 4%.

## 5.5. Evento 5: Descarga descendente negativa registrada em 02/01/2020

### 5.5.1. Análise geral do evento

Registrou-se, em 02 de janeiro de 2020, mais uma forma de onda de primeira corrente de retorno. No evento em questão, apenas os dispositivos 1 e com bobina de Rogowski registraram a forma de onda de corrente. Pela segunda vez consecutiva, houve falha na operação do sistema de medição de referência da estação de Pesquisa. Esta resultou em distúrbios significativos nas formas de ondas de corrente medidas, que inviabilizaram comparações. Discute-se nesta seção a análise dos resultados obtidos pelos dispositivos 1 e com a bobina de Rogowski. A partir destes registros, calcularam-se os parâmetros da corrente de retorno.

### 5.5.2. Medição realizada pelo dispositivo 1 (Antena *loop*)

A figura 5.24 apresenta a forma de onda obtida pelo dispositivo 1. Como discutido no evento 4, embora não se tenha um registro de referência para assegurar fidedignidade, a curva exibe características, tais como a forma de onda, o valor de pico e o tempo de meia onda, similares aos parâmetros típicos de primeiras correntes de retorno tradicionalmente registradas em MCS. Tais valores são apresentados na seção 5.5.5.

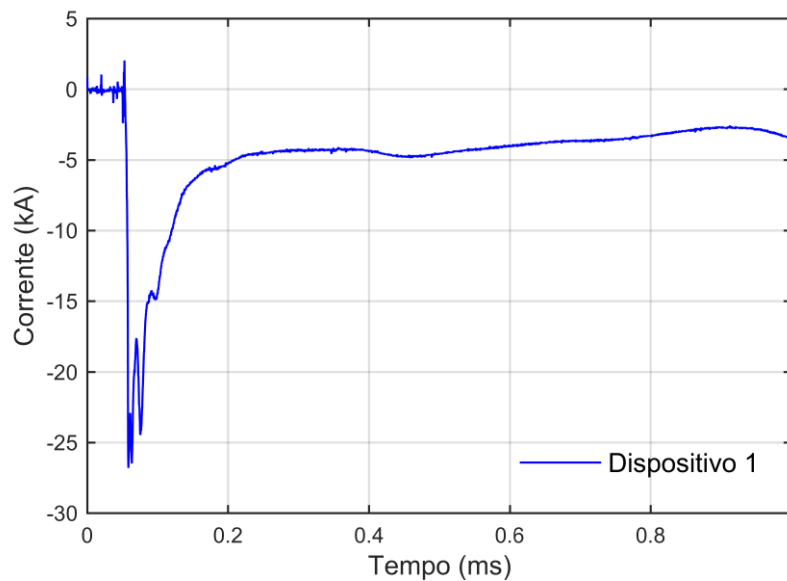


Figura 5.26 – Registro de corrente obtido pelo dispositivo 1.

A figura 5.27 mostra detalhes da frente da onda registrada pelo dispositivo 1. Nota-se que a relação sinal-ruído é alta, uma vez que as perturbações no sinal são extremamente baixas.



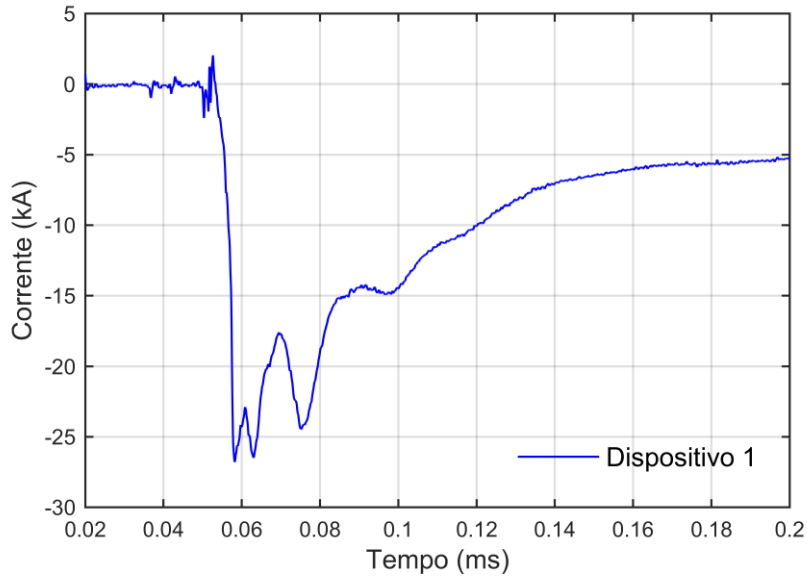


Figura 5.27 – Detalhes do evento apresentado na figura 5.26.

### 5.5.3. Medição realizada pelo dispositivo com a bobina de Rogowski

A figura 5.28 apresenta a forma de onda de corrente obtida pelo dispositivo com a bobina de Rogowski.

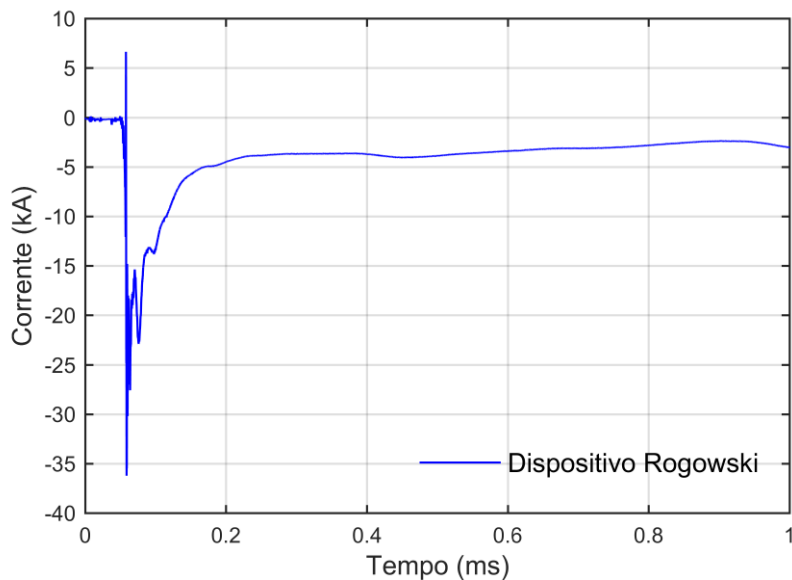


Figura 5.28 – Registro de corrente obtido pelo dispositivo com bobina de Rogowski.

A figura 5.29 mostra detalhes da frente da onda registrada pelo dispositivo com a bobina de Rogowski. Observou-se, novamente, que este registrador apresentou ruídos na frente da onda. Tal perturbação na forma de onda de corrente foi comum em todos os registros dos eventos medidos pela bobina de Rogowski.

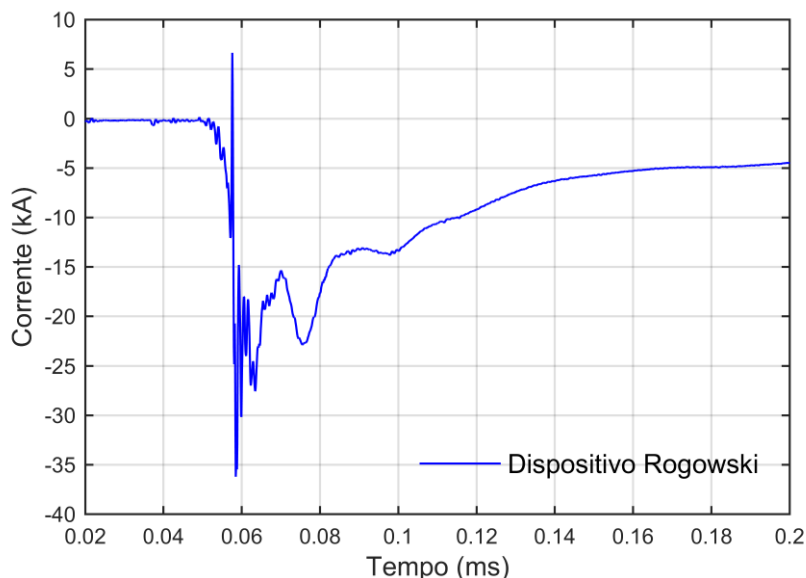


Figura 5.29 – Detalhes do evento apresentado na figura 5.28.

#### 5.5.4. Comparação entre os registros obtidos pelos dispositivos 1 e com a bobina de Rogowski

As figuras 5.30 e 5.31 apresentam a comparação entre os registros normalizados obtidos pelos dispositivos. Observou-se que a cauda da onda é similar entre todas as curvas, o que indica alto grau de precisão. Novamente, a oscilação na frente da onda de corrente registrada pelo dispositivo com a bobina de Rogowski é a principal diferença entre os registros.

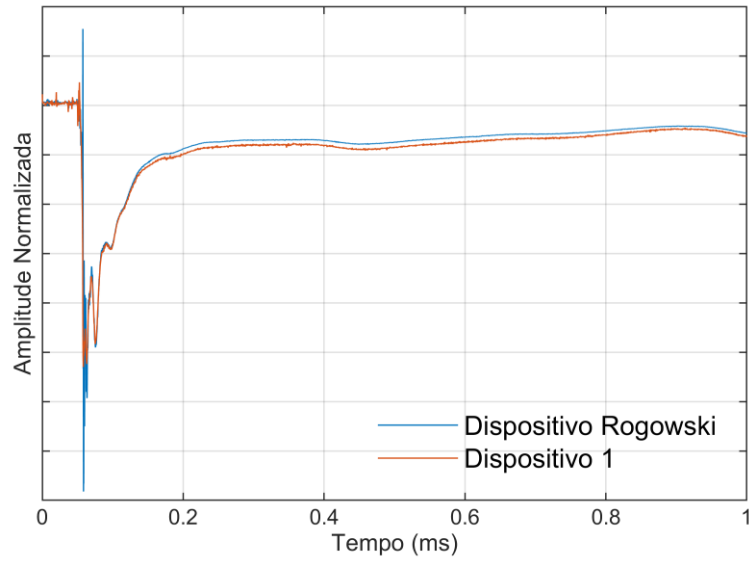


Figura 5.30 – Registros de correntes obtidos pelos dispositivos.

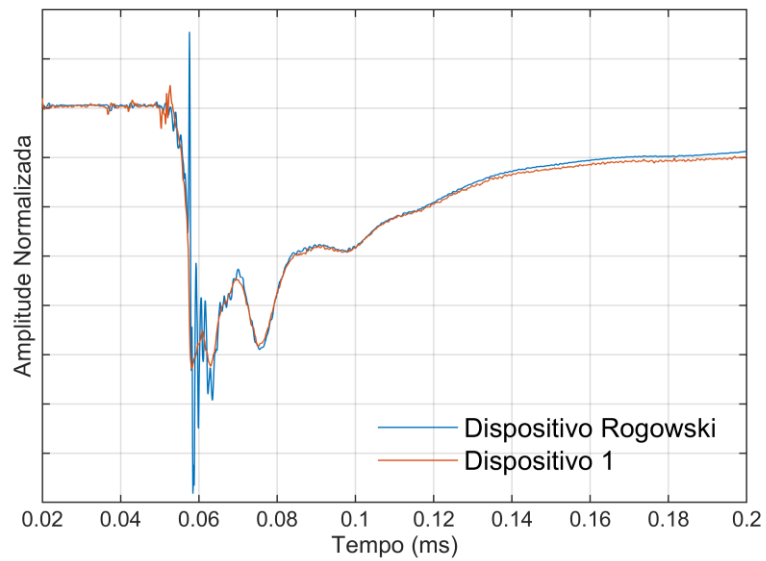


Figura 5.31 – Detalhe da frente da onda de corrente de correntes obtida pelos dispositivos.

### 5.5.5. Parâmetros obtidos a partir da forma de onda registrada pelo dispositivo 1 com a bobina de Rogowski

A partir dos registros das formas de onda de corrente do dispositivo 1 e com a bobina de Rogowski, calcularam-se os parâmetros  $I_p$ ,  $T_{d10}$ ,  $T_{d30}$  e  $T_{50}$ , os quais estão apresentados na tabela 5.4. Embora não haja o registro de MCS de referência, observou-se que os valores obtidos são consistentes aos valores medianos da estação de Pesquisa.

Tabela 5.4 – Parâmetros da primeira corrente de retorno de descargas atmosféricas registrada pelos dispositivos 1 e com a bobina de Rogowski.

Sistema de medição	Parâmetros			
	$I_p$ (kA)	$T_{d10}$ ( $\mu$ s)	$T_{d30}$ ( $\mu$ s)	$T_{50}$ ( $\mu$ s)
Dispositivo 1: Antena Loop	-26,8	4,0	2,5	52,9
Dispositivo: Bobina de Rogowski	-27,6	-	-	37,7

\* Desconsiderou-se a oscilação para obter este valor.

## 6. Conclusões e propostas de continuidade

O presente trabalho descreve o dispositivo desenvolvido pela equipe do LRC, projetado especificamente para medir e registrar a forma de onda da primeira corrente de retorno de descargas atmosféricas. O custo reduzido viabiliza a instalação de redes de dispositivos para a acelerar a aquisição de um grande número registros de formas de onda de primeira onda de corrente de uma determinada região.

Projetaram-se dois sistemas de medição a partir de uma mesma unidade de gravação. Basicamente, a diferença entre eles é o transdutor para obtenção do sinal da tensão induzida pelo campo magnético gerado pela corrente de retorno: a antena *loop* e a bobina de Rogowski.

As definições realizadas para o registro de primeira corrente de retorno afetaram todas as características do projeto, tais como a resolução do tempo do conversor ADC (aquisição de uma amostra a cada 80 nanossegundos), a duração total do pulso (1,2 ms) e a resposta em frequência do dispositivo (frequência de corte inferiores e superiores de 22 Hz e 400 kHz). Com relação ao valor máximo do pico da corrente medida pelo dispositivo com antena *loop*, este depende da distância entre o dispositivo e percurso vertical da corrente do raio. No caso do dispositivo com a bobina de Rogowski, determina-se o valor máximo de pico em função das características construtivas da bobina.

Definiram-se 85,5 kA e 64,5 kA como limites da escala de medição para os dispositivos com antena *loop* (considerando 15 m de distância entre o equipamento

e a torre) e com bobina de Rogowski, respectivamente. É importante mencionar que não há limitação nas escalas máximas de medição dos dispositivos em termos de projeto, a eletrônica desenvolvida permite o condicionamento do sinal de correntes maiores. No caso da tese de doutorado, as escalas foram definidas para serem maiores do que o valor mediano registrado em MCS para o pico máximo da primeira corrente de retorno. Embora haja medições anteriores realizadas em MCS de primeira corrente de retorno com valor de pico da ordem de 150 kA, optou-se por limitar-se a escala para se obter dados com maior qualidade de correntes menores.

A frequência de corte superior de 400 kHz inviabiliza a medição de correntes subsequentes, no entanto, caso haja interesse em realizar medições dessas correntes, ajustes no circuito eletrônico, especificamente no circuito integrador, podem ser realizados. Uma versão aprimorada do dispositivo demonstra bom desempenho para medições de correntes com tempo de frente reduzido, condizente com o tempo de frente de correntes subsequentes. Tal versão ainda não foi submetida a descargas naturais em MCS.

Recomenda-se que o dispositivo antena loop seja instalado de 10 m a 20 m da estrutura percorrida pela corrente do raio, a fim de atingir uma intensidade de tensão induzida nos terminais da antena *loop* com uma relação sinal-ruído apropriada para uma medição confiável. Além disso, a estrutura deve ser alta e relativamente esguia. Não é necessária uma simetria geométrica perfeita da estrutura, mas a variação de suas dimensões horizontais deve ser pequena em relação à distância ao dispositivo (pelo menos três vezes). Tal estrutura deve, também, ser isolada para impedir que o dispositivo detecte os efeitos de incidência em outras estruturas próximas. A instalação do dispositivo próximo a torres e postes isolados de telecomunicações e de telefones celulares localizados sobre morros remove a maioria das limitações relacionadas à instalação.

O dispositivo com a bobina de Rogowski requer apenas que a bobina percorra um caminho fechado no entorno da estrutura, não estando sujeitos às limitações citadas anteriormente. Entretanto, no caso de estruturas com vários pontos de fixação no solo (como torres estaiadas) há dificuldade na instalação da bobina.

Uma característica importante desse dispositivo é a comunicação remota que possibilita transferir os registros de corrente de retorno detectados através da

Internet. A transferência direta de registros do dispositivo para um *notebook* no local da instalação também é possível. Além disso, esse recurso de comunicação remota permite monitorar a operação do dispositivo por meio de comandos de autotestes.

Instalaram-se quatro dispositivos de medição em MCS, sendo que três correspondem ao dispositivo antena *loop* e um com o transdutor bobina de Rogowski. Desde a instalação de tais dispositivos, houve cinco eventos de descargas descendentes negativas, em todos os casos os dispositivos mediram e registraram a forma de onda da primeira corrente de retorno. Os gráficos apresentados no capítulo 5 ilustram o bom desempenho dos dispositivos em termos de exatidão e precisão.

O primeiro evento registrado em MCS apresentou alta qualidade, embora a corrente tenha sido grampeada devido à operação inadequada da proteção do sistema. Além da saturação da corrente, observou-se problemas na resposta em frequência do dispositivo. Apesar de tais ocorrências serem indesejáveis, é natural que ocorram problemas durante o período de desenvolvimento. Ajustes no circuito eletrônico da unidade de gravação foram realizados a fim de promover melhorias no sistema de proteção e na resposta em frequência do dispositivo. Já na medição do evento seguinte, verificou-se a efetividade das ações corretivas no sistema de medição.

No que diz respeito aos eventos 2 e 3, notou-se alta similaridade entre as formas de ondas registradas pelos dispositivos instalados em MCS e àquelas obtidas pelo sistema de referência da torre instrumentada. As curvas obtidas mostram que o dispositivo foi capaz de registrar com qualidade a frente e a cauda da onda de corrente impulsiva. Em termos de valor máximo de pico da onda de corrente, nenhum dispositivo apresentou um desvio maior 9% em relação à referência.

Apenas o dispositivo 3 registrou a forma de onda de corrente do evento 4. Coincidentemente houve falha na operação do sistema de medição de referência da estação de Pesquisa. Esta resultou em distúrbios significativos nas formas de ondas de corrente medidas, que inviabilizaram comparações. Embora não tenha um registro de referência para assegurar fidedignidade, a curva exibe características, tais como a forma de onda, o valor de pico e o tempo de meia onda, similares aos

parâmetros típicos de primeiras correntes de retorno tradicionalmente registradas em MCS. Ressalta-se, também, a qualidade em termos do sinal adquirido, não houve ruído significativo no registro de corrente apresentado.

Os dispositivos 1 e com bobina de Rogowski registraram a forma de onda de corrente do evento 5. Novamente, assim como ocorreu no evento 4, não foi possível realizar comparações entre os resultados obtidos pelos dispositivos com os de referência. É importante mencionar que os equipamentos reproduziram a forma de onda de corrente com qualidade.

Identificaram-se oscilações no período anterior ao primeiro pico da onda em todos os registros de corrente obtidos pelos dispositivos com bobina de Rogowski. Acredita-se que essas oscilações sejam causadas por interferências nos cabos coaxiais submetidos aos campos eletromagnéticos muito elevados. Tais cabos são responsáveis por conduzirem o sinal de tensão induzida da bobina de Rogowski até a unidade de gravação.

Embora os registros obtidos pelos dispositivos 2 e com a bobina de Rogowski apresentem oscilações que corrompem a frente da onda, o restante do sinal medido apresentou boa qualidade com baixo ruído. Notou-se que tais perturbações ocorrem no período da onda em que se tem máxima derivada da corrente, precedendo ao primeiro pico. Portanto, desconsiderando-se a oscilação, foi possível determinar o valor de pico da onda de corrente.

Observou-se alto grau de precisão dos dispositivos em todos os eventos apresentados em que houve a medição por mais de um dispositivo. Isto denota consistência entre os dispositivos desenvolvidos já que eles operam de maneira independente.

Os dispositivos mostraram-se robustos, pois efeitos significativos de interferências eletromagnéticas não foram detectados durante a medição das correntes de raios. Além disso, os sistemas de comunicação e transferência de dados continuaram funcionando corretamente após cada evento registrado MCS.

A medição da corrente de retorno de descargas atmosféricas sempre requer investimentos muito elevados para obtenção de resultados de qualidade. Isto limita a difusão deste tipo de medição e, por conseguinte, a disponibilidade de bases de



dados extensas para melhor caracterização da parcela impulsiva da corrente de descarga. Neste contexto, o sistema de medição desenvolvido nesta tese de doutorado pode ser uma alternativa importante para o aumento considerável de registros da forma de onda de primeiras correntes de retorno. O preço da unidade de medição apresentada neste texto é de aproximadamente R\$ 2500,00, considerando-se apenas os custos dos componentes. Tal valor se refere à unidade que está sob avaliação de desempenho. Estima-se que em sua versão final, o preço poderia ser menor que R\$ 1500,00. Tais estimativas se referem a janeiro de 2020.

## Propostas de continuidade

Pela complexidade das realizações deste trabalho e o limite de tempo de uma tese de doutorado, alguns aspectos que podem influenciar o resultado de medição do dispositivo desenvolvido não puderam ser analisados em profundidade. Neste sentido, vale mencionar que o efeito dos eletrodos de aterramento da estrutura especificamente sobre o sistema de medição que utiliza o transdutor antena *loop* requer ainda uma melhor análise, por meio de futuro trabalho. Além disso, deve se considerar que correntes induzidas nas ferragens de parede de edificações nas proximidades do dispositivo podem gerar interferências no sinal medido pelo dispositivo. Entretanto, os resultados preliminares obtidos na estação MCS mostram que influência foi muito reduzida.

Há algumas possibilidades de aprimoramento a serem implementadas no dispositivo. Dentre as possibilidades, as seguintes são as mais relevantes:

- Normalmente, em uma mesma medição de corrente de descargas descendentes negativas ou positivas não ocorre inversão de polaridade na corrente. Nessa perspectiva, não seria necessário criar o nível de tensão contínua de 1,5 V na saída do integrador, conforme descrito na seção 4.2.2. Assim a escala de medição seria o dobro da atual, aumentando-se consideravelmente a qualidade das medições realizadas. Desse modo, em vez operar como uma escala de -85,5 kA a 85,5 kA, o dispositivo teria a escala de 0 a 85,5 kA no caso do dispositivo com a antena *loop* instalada a 15 m da torre. A proposta de melhoria baseia-se

em programar o microcontrolador para indicar prontamente a polaridade da corrente que fluiu pela estrutura elevada, além do registro completo de corrente.

- Embora o equipamento esteja preparado para medir correntes com valor de pico de até 85,5 kA, registros de correntes menores podem ocorrer. Nesses casos, sobretudo naquelas correntes onde o pico é menor que 30 kA, as medições ficariam com qualidade baixa devido à resolução. Uma alternativa interessante para tornar o registrador capaz de medir ondas de correntes com maior resolução é utilizar o conversor analógico digital configurado para adquirir dados em dois canais simultâneos. Contudo, há uma redução na taxa de amostragem do sinal analógico. Neste caso, a taxa corresponderia à 6,25 MHz. Um canal operaria com escala que varre de 0 kA a 85,5 kA e o outro de 0 kA a 40 kA, por exemplo.
- Com relação ao software de gerenciamento do registrador, novos protocolos de comunicação estão sendo desenvolvidos para minimizar o tempo de transferência de dados entre o dispositivo e o servidor. Atualmente o sistema necessita de cerca de 30 segundos para realizar a transferência dos registros de um evento.
- Há a necessidade de aprimorar o desempenho do dispositivo com bobina de Rogowski, visto que se identificou oscilação na frente da onda em todos os registros obtidos por este sistema de medição em MCS. A proposta de melhoria seria no desenvolvimento de filtros analógicos mais efetivos nos casos em que se utiliza cabos coaxiais.

Como continuidade natural deste trabalho, propõe-se a instalação de medidores em várias regiões de Belo Horizonte. Desse modo, uma rede integrada de medidores poderia registrar ondas de correntes de descargas atmosféricas de diferentes localidades da cidade para aumentar a base de dados de medição. Todos equipamentos seriam operados por acesso remoto via internet, o que reduziria consideravelmente os custos de deslocamento para inspeção de operação de cada dispositivo.

Outra realização prevista consiste na investigação e desenvolvimento de bobinas de Rogowski de raios maiores, de pelo menos 2,5 m, para medição de alta qualidade de correntes impulsivas. Dessa forma, poderia viabilizar-se a aplicação do

correspondente sistema de medição numa gama mais ampla de estruturas, notadamente em postes de telefonia celular.

# 7. Referências Bibliográficas

- [1] S. Visacro, C. R. Mesquita, A. De Conti, and F. H. Silveira, “Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station,” *Atmos. Res.*, vol. 117, pp. 55–63, 2012, doi: 10.1016/j.atmosres.2011.07.010.
- [2] C. R. de Mesquita, R. N. Dias, and S. Visacro, “Comparison of peak currents estimated by lightning location system and ground truth references obtained in Morro do Cachimbo station,” *Atmos. Res.*, vol. 117, pp. 37–44, 2012, doi: 10.1016/j.atmosres.2011.07.005.
- [3] C. R. Mesquita, L. De Araújo, S. Visacro, M. Helena, and A. R. Nóbrega, “A low-cost device to measure and record lightning currents,” in *GROUND’2014 & 6th LPE - International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on Lightning Physics and Effects*, 2014.
- [4] J. L. Silvino, C. R. de Mesquita, and S. Visacro, “Non-direct lightning current measurement for LLS gauging purpose,” in *GROUND’2002 & 3rd WAE - International Conference on Grounding and Earthing & 3rd Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity*, 2002, pp. 133–138.
- [5] S. Visacro, J. L. Silvino, C. R. Mesquita, R. N. Dias, L. C. L. Cherchiglia, and V. J. Souza, “Nova metodologia de medição indireta da corrente de descarga atmosférica para fins de calibração de SLT’s,” in *II CITENEL - II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, 2003, pp. 484–489, [Online]. Available: [http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el\\_20030359](http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el_20030359).
- [6] J. L. Silvino, C. R. Mesquita, and S. F. Visacro, “Non-direct lightning current

- measurement for lightning location systems calibration,” *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 6, p. 504, 2003, doi: 10.1049/el:20030359.
- [7] S. Visacro, *Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia*. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2005.
- [8] M. Guimarães, L. Araujo, C. Pereira, C. Mesquita, and S. Visacro, “Assessing currents of upward lightning measured in tropical regions,” *Atmos. Res.*, vol. 149, pp. 324–332, 2014, doi: 10.1016/j.atmosres.2014.01.005.
- [9] S. Visacro, L. Araujo, M. Guimarães, and M. H. M. Vale, “M-component currents of first return strokes in natural negative cloud-to-ground lightning,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, no. 21, pp. 12132–12138, 2013, doi: 10.1002/2013JD020026.
- [10] S. Visacro, A. Soares Jr, M. A. Schroeder, L. Cherchiglia, and V. Sousa, “Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station,” *J. Geophys. Res.*, vol. 109, no. D1, p. D01105, 2004, doi: 10.1029/2003JD003662.
- [11] V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning Physics and Effects*. Cambridge, 2003.
- [12] H. W. Kasemir, “Electrostatic Model of Lightning Flashes Triggered from the Ground,” in *Eos*, vol. 95, no. 17, 2013, pp. 547–555.
- [13] M. Guimarães, “Observação e Modelagem dos Processos Físicos Envolvidos na Formação das Descargas Atmosféricas,” Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG- Tese de Doutorado, 2017.
- [14] S. Visacro, M. Guimaraes, and M. H. Murta Vale, “Features of Upward Positive Leaders Initiated From Towers in Natural Cloud-to-Ground Lightning Based on Simultaneous High-Speed Videos, Measured Currents, and Electric Fields,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, pp. 1–15, Dec. 2017, doi: 10.1002/2017JD027016.
- [15] Q. Chen, H. Bin Li, M. M. Zhang, and Y. Bin Liu, “Design and characteristics of two Rogowski coils based on printed circuit board,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, no. 3, pp. 939–943, 2006, doi: 10.1109/TIM.2006.873788.
- [16] W. F. Ray and C. R. Hewson, “High performance Rogowski current

- transducers,” *Conf. Rec. 2000 IEEE Ind. Appl. Conf. Thirty-Fifth IAS Annu. Meet. World Conf. Ind. Appl. Electr. Energy (Cat. No.00CH37129)*, vol. 5, no. C, pp. 3083–3090, 2000, doi: 10.1109/IAS.2000.882606.
- [17] I. A. Metwally, “Design of different self-integrating and differentiating rogowski coils for measuring large-magnitude fast impulse currents,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 8, pp. 2303–2313, 2013, doi: 10.1109/TIM.2013.2255994.
- [18] E. Hemmati and S. Mohammad Shahrtash, “Digital compensation of Rogowski coil’s output voltage,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2013, doi: 10.1109/TIM.2012.2212502.
- [19] K. Draxler, R. Styblikova, J. Hlavacek, and R. Prochazka, “Calibration of Rogowski coils with an integrator at high currents,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 7, pp. 2434–2438, 2011, doi: 10.1109/TIM.2011.2126090.
- [20] W. F. Ray, “The use of Rogowski coils for low amplitude current waveform measurement,” *Meas. Tech. Power Electron. IEE Colloq.*, pp. 6/1-6/5, 1991, [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/182328/?reload=true>.
- [21] J. D. Ramboz, “Machinable rogowski coil, design, and calibration,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1996, doi: 10.1109/19.492777.
- [22] C. Pereira, *Redes Elétricas no Domínio da Frequencia - Técnicas de Análise - Modelos de Componentes - Técnicas Computacionais*. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2015.
- [23] E. Abdi-Jalebi and R. McMahon, “High-performance low-cost Rogowski transducers and accompanying circuitry,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 3, pp. 753–759, 2007, doi: 10.1109/TIM.2007.894801.
- [24] T. V. de M. Neto, “Investigação de Metodologias para Avaliação da Resposta de Aterramento de Linhas de Transmissão,” Universidade Federal de Minas Gerais - Dissertação de Mestrado, 2017.
- [25] B. D. Rodrigues, “Concepção e desenvolvimento de um medidor de

- impedância impulsiva de aterramentos de linhas de transmissão,” Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG- Tese de Doutorado, 2014.
- [26] C. R. de Mesquita, “Nova Metodologia para Calibração de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas,” Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG- Tese de Doutorado, 2006.
- [27] L. S. Araújo, “Avanços na Investigação de Componentes M e de Descargas Atmosféricas Ascendentes por meio de Registros Sincronizados de Campo Elétrico, de Corrente e de Vídeos,” Universidade Federal de Minas Gerais - Dissertação de Mestrado, 2013.
- [28] F. H. Silveira and S. Visacro, “Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/temc.2019.2926665.