

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SISTEMA SENSOR PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

por

LAURO RODRIGO GOMES DA SILVA LOURENÇO NOVO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: ANTONIO JERONIMO BELFORT DE OLIVEIRA, Ph.D.

Recife, outubro de 2009.

© Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo, 2009

N945s **Novo, Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço**

Sistema sensor para detecção de descargas atmosféricas em linhas de transmissão de energia elétrica / Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo. – Recife: O Autor, 2009.

xi, 131 f.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2009.

Inclui Referências Bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica. 2. Descargas Atmosféricas. 3. Linhas de Transmissão. 4. Bobina de Rogowski. 5. Modelos de Torres. 6. Sistema Eletrônico. I. Título.

UFPE

621.3 CDD (22.ed.)

BCTG/2010-077



Universidade Federal de Pernambuco
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

LAURO RODRIGO GOMES DA SILVA LOURENÇO NOVO

TÍTULO

**“SISTEMA SENSOR PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA”**

A comissão examinadora composta pelos professores: ANTONIO JERONIMO BELFORT DE OLIVEIRA, DES/UFPE, MARCOS TAVARES DE MELO, DES/UFPE e EDSON GUEDES DA COSTA, DEE/UFPG sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **LAURO RODRIGO GOMES DA SILVA LOURENÇO NOVO APROVADO.**

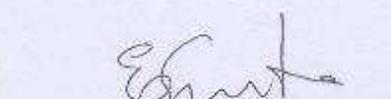
Recife, 30 de outubro de 2009.



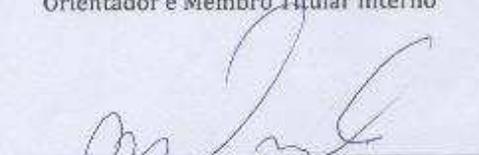
RAFAEL DUEIRE LINS
Coordenador do PPGEE



ANTONIO JERONIMO BELFORT DE OLIVEIRA
Orientador e Membro Titular Interno



EDSON GUEDES DA COSTA
Membro Titular Externo



MARCOS TAVARES DE MELO
Membro Titular Interno

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me concedido paz, saúde e equilíbrio mental para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Faço um agradecimento especial aos meus pais, Manuel da Silva Lourenço Novo e Marinalva Gomes da Silva Lourenço e à minha família pelo apoio e compreensão nos momentos de ausência.

Ao professor e orientador Antonio Jeronimo Belfort de Oliveira, por confiar em mim, pela condução segura na orientação, pela compreensão e motivação nos momentos difíceis, pela oportunidade de desenvolver esta dissertação contribuindo para meu crescimento profissional.

Ao professor Marcos Tavares de Melo pela oportunidade de ser membro do Laboratório de Rádio e Micro-ondas do Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco.

Ao professor Edson Guedes da Costa e aos colegas George Lira e Tarso Vilela pelo apoio e oportunidade de poder realizar boa parte dos experimentos do trabalho de dissertação nas instalações do Laboratório de Alta Tensão, pertencente ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande.

À Chesf (Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco) em nome do Eng. José Felipe André Gomes Wavrik, pelo apoio financeiro e pela parceria firmada com a UFPE.

Aos colegas do Mestrado e do Laboratório de Micro-Ondas pelo ambiente agradável de trabalho que me foi proporcionado nesses anos, em especial aos estagiários Henrique Kelsen de Macedo e Silva e José Florêncio Coelho Neto pelo apoio na condução das atividades de programação dos microcontroladores utilizados.

Finalmente, à Capes pelo indispensável apoio financeiro e aos professores e funcionários do PPGEE por toda colaboração prestada.

Resumo da dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

SISTEMA SENSOR PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

LAURO RODRIGO GOMES DA SILVA LOURENÇO NOVO

Outubro/2009

Orientador: Antonio Jeronimo Belfort de Oliveira, Ph.D.

Área de Concentração: Fotônica.

Palavras-chave: Descargas Atmosféricas, Linhas de Transmissão, Bobina de Rogowski, Modelos de Torres, Sistema Eletrônico.

Número de Páginas: 142.

RESUMO: A presença de descargas atmosféricas, quer seja por incidência direta pelo golpe (*strike*) de descarga atmosférica, quer seja indireta, por meio do surgimento de correntes induzidas nas estruturas das linhas de transmissão, traz grande preocupação às empresas geradoras e transmissoras de energia elétrica. Essas linhas sofrem, por vezes, desligamentos provocados por surtos de manobra e surtos atmosféricos. Na situação de ocorrência de descarga atmosférica, é de interesse identificar sobre qual torre ou vão de L.T. essa descarga ocorreu com o objetivo de melhorar a qualidade do serviço de manutenção e promover em tempo hábil o religamento das linhas. Esta dissertação apresenta, assim, a concepção e construção de um sistema de detecção de descargas atmosféricas sobre uma torre ou um vão de L.T, determinando a intensidade da corrente de pico da descarga correspondente. Além disso, um sistema de R.F. foi projetado e construído para transmitir esses dados a um sistema de recepção. O sistema completo consiste em uma bobina de Rogowski conectada a um circuito eletrônico condicionador de sinal que, por sua vez, alimenta um circuito eletrônico microcontrolado, o qual se conecta ao sistema de R.F.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

SENSOR SYSTEM FOR LIGHTNING DISCHARGES DETECTION ON POWER TRANSMISSION LINES

LAURO RODRIGO GOMES DA SILVA LOURENÇO NOVO

October/2009

Supervisor: Antonio Jeronimo Belfort de Oliveira, Ph.D.

Concentration Area: Fotonica.

Keywords: Lightning Discharges, Power Transmission Lines, Detection, Rogowski Coil, Tower Models, Electronic System.

Number of Pages: 142.

ABSTRACT: The presence of electric discharge, whether by direct incidence of a lightning strike or by indirect incidence originated from induced currents on power transmission lines structures, is of great concern to electric power generation and transmission companies. The main reason for this concern is that power transmission systems may be disconnected by switching and lightning surges. There is, therefore, a concern by such companies to minimize effects caused by switching and lightning surges. Furthermore, in case of a lightning discharge on the transmission system, it is of interest to know how to identify precisely which transmission tower was affected by the discharge in order to improve the quality of the maintenance service and to return the transmission lines to operational mode as fast as possible. Therefore, this dissertation presents the conception and construction of a system to detect lightning discharges on a transmission line by measuring the current peak value of the discharge. Besides that, a radiofrequency system was designed to send the desired data to a reception point away from the discharge. The complete electronic system consists in a Rogowski coil, a signal conditioning electronic circuit, a microcontrolled circuit and a R.F system.

ÍNDICE

Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Conceito Básico e Caracterização das Descargas Atmosféricas	6
2.1. Conceito Básico	6
2.2. Caracterização das Descargas Atmosféricas	7
2.2.1. Sinal Típico de uma Descarga Atmosférica	7
2.2.2. Tipificação das Descargas Atmosféricas	9
2.3. Mecanismo Básico de Formação de Uma Descarga Atmosférica – A	11
Descarga Negativa Descendente [2]	
Capítulo 3 - Efeitos Relacionados e Descrição das Principais Características da Ocorrência de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão	15
3.1. Magnitudes das Descargas Atmosféricas	17
3.2. Descarga no Topo de uma Torre	17
3.3. Descarga em um Condutor Fase	18
3.4. Efeito dos Cabos de Cobertura	18
3.5. Efeito da Resistência de Pé de Torre	20
3.6. Efeito de Torres Adjacentes	22
3.7. Representação Simplificada da Torre	23
3.8. Tensões através das Cadeias de Isoladores	25
Capítulo 4 - Comportamento Elétrico de uma Torre de Linha de Transmissão diante de uma Descarga Atmosférica.	29
4.1. Análise em Frequência de um Sinal Típico de Descarga Atmosférica	29
4.2. Modelagem da Torre de Linha de Transmissão para Avaliação de seu Comportamento frente a uma Descarga Atmosférica	37
4.2.1. Modelo de Linha de Transmissão para Torre	38
Capítulo 5 - O Sistema Sensor Dedicado à Detecção de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão.	53
5.1. Primeiros Testes com o Circuito Integrador Ativo	72
5.2. Primeiros Testes com o Circuito Detector de Pico	76
5.3. Testes com o Circuito Integrador Ativo em PCI	84
5.4. Testes com o Circuito Detector de Pico em PCI	87
5.5. Testes com o Circuito Eletrônico Condicionador de Sinais e o Circuito Eletrônico Microcontrolado, ambos em PCI	90
Capítulo 6 - Testes em Laboratório de Alta Tensão com o Sistema Eletrônico de Detecção de Descargas Atmosféricas	99
6.1. Testes com o Sensor Bobina de Rogowski no Laboratório de Geração de Corrente Impulsiva da UFCG	101
6.1.1. Testes de Corrente Impulsiva com Sensor Bobina de Rogowski	101
6.1.2. Testes em AC sobre o Sensor Bobina de Rogowski em Laboratório de Alta Tensão na UFCG	112
6.2. Testes sobre o Conjunto Formado pelo Sensor Bobina de Rogowski e o Circuito Eletrônico Condicionador de Sinais para Correntes Impulsivas	114
Capítulo 7 - Conclusões	125
Referências Bibliográficas	127

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – <i>Back Flashover</i> entre a linha (cabos) ativa e a estrutura metálica da torre de linha de transmissão.	2
Fig. 2 – Representação do percurso de uma descarga atmosférica típica nuvem-solo [2].	6
Fig. 3 – Forma de onda típica de um sinal de descarga atmosférica.	8
Fig. 4 – Percursos das descargas atmosféricas [2].	9
Fig. 5 – Fotografia que mostra ramificações de baixo para cima, indicando uma descarga ascendente [2].	10
Fig. 6 - Fotografia que mostra ramificações de cima para baixo, indicando uma descarga descendente [2].	11
Fig. 7 – Distribuição típica de cargas no interior de uma nuvem carregada [2].	13
Fig. 8 – Campo elétrico induzido entre nuvem e solo pelo carregamento da base da nuvem [2].	13
Fig. 9 – Aparecimento do canal precursor de descarga na base da nuvem carregada [2].	13
Fig. 10 – Etapas que antecedem o encontro entre o canal precursor descendente e o canal ascendente [2].	14
Fig. 11 - Descarga no topo de uma torre de linha de transmissão.	17
Fig. 12 - Redução no potencial no topo da torre pela divisão da corrente de descarga.	19
Fig. 13 - Esboço dos caminhos percorridos pela corrente de descarga ao atingir a torre, e o esquema elétrico correspondente.	20
Fig. 14 – Esquema elétrico da linha de transmissão considerando a resistência de pé de torre quando da incidência direta de uma descarga atmosférica no topo da torre.	21
Fig. 15 - Esboço simplificado da torre e esquema de descarga sobre a torre.	23
Fig. 16 – Diagrama geométrico para cálculo do acoplamento entre o cabo guarda e o condutor fase.	27
Fig. 17 - Representação de um sinal típico de descarga atmosférica obtido a partir da combinação de funções exponenciais.	30
Fig. 18 - Representação simplificada de um sinal típico de descarga atmosférica obtido de funções afim.	31
Fig. 19 – Gráfico da resposta em magnitude da Transformada de $x(t)$ para uma faixa de frequências de 10 MHz.	34
Fig. 20 – Gráfico da resposta em magnitude da Transformada de $x(t)$ para uma faixa de frequências de 1 MHz.	35
Fig. 21 – Gráfico da resposta em fase da Transformada de $x(t)$ para uma faixa de frequência de 2 MHz.	35
Fig. 22 – Gráfico da resposta em fase do sinal $x(t)$ para um tempo de crista de 10 μ s.	36
Fig. 23 – Gráfico da resposta em magnitude da Transformada de $x(t)$ para uma faixa de frequência de 1 MHz e tempo de meia cauda de 20 μ s.	37
Fig. 24 – Diagrama elétrico básico para o cálculo das reflexões no topo e base da torre, e Diagrama em Treliças associado.	39
Fig. 25 – Forma de onda de corrente de descarga para a representação por rampas.	43
Fig. 26 – Forma de onda de corrente no topo da torre.	43
Fig. 27 – Forma de onda de corrente na base da torre.	44
Fig. 28 – Forma de onda de corrente no meio da torre.	44
Fig. 29 – Gráfico ampliado da forma de onda de corrente na base da torre.	45
Fig. 30 – Gráfico ampliado da forma de onda de corrente no meio da torre.	45

Fig. 31 - Forma de onda de corrente que flui pela torre para uma corrente de descarga apresentada na Fig. 25.	47
Fig. 32 – Forma de onda de corrente no topo da torre.....	47
Fig. 33 – Forma de onda de corrente na base da torre.....	48
Fig. 34 – Forma de onda de corrente no meio da torre.....	48
Fig. 35 – Gráfico ampliado da forma de onda de corrente na base da torre.....	49
Fig. 36 – Gráfico ampliado da forma de onda de corrente no meio da torre.....	49
Fig. 37 – Dimensões da torre de linha de transmissão da CHESF de 230 kV.	51
Fig. 38 - Diagrama em blocos do sistema eletrônico proposto para detecção de descargas atmosféricas em linhas de transmissão de energia elétrica.....	53
Fig. 39 – Fotografia do circuito gerador de impulsos de corrente, Laboratório de Alta Tensão, UFCG.	55
Fig. 40 – Fotografia do conjunto de componentes de montagem dados por sensor bobina de Rogowski, varistor e haste metálica.	56
Fig. 41 - Diagrama de uma bobina de Rogowski [30].....	56
Fig. 42 – Fotografia do sensor bobina de Rogowski utilizado nos testes realizados no Laboratório de Alta Tensão.	58
Fig. 43 – Esquema elétrico do circuito eletrônico condicionador de sinais.	60
Fig. 44 – Esquema elétrico do circuito eletrônico microcontrolado.....	64
Fig. 45 – Fotografia do transceptor TRF 2.4G e seus pinos de comunicação.....	65
Fig. 46 – Níveis TTL dos bits de dados que trafegam na porta USART do microcontrolador.	67
Fig. 47 – Níveis EIA-RS232 dos bits de dados que trafegam na porta de comunicação serial do PC.	67
Fig. 48 - Diagrama de conexão entre o PIC e transceptor TRF 2.4G.....	68
Fig. 49 – Esquema para testes do sistema transceptor de R.F.	69
Fig. 50 – Fluxograma do circuito transmissor de R.F.	70
Fig. 51 – Fluxograma do circuito receptor de R.F.	71
Fig. 52 – Imagem obtida da tela de PC para testes com o sistema transceptor de R.F.	72
Fig. 53 – Esquema elétrico do circuito integrador ativo utilizado para implementação e testes.	73
Fig. 54 – Resposta ampliada obtida com osciloscópio para o circuito integrador ativo condicionado aos parâmetros de ajuste apresentados e pulso positivo de 4,8 V e 24 μ s de período de duração.....	74
Fig. 55 – Resposta ampliada no tempo obtida com osciloscópio para o circuito integrador ativo condicionado aos parâmetros de ajuste apresentados e pulso positivo de 4,8 V e 24 μ s de período de duração.....	75
Fig. 56 – Resposta deslocada no tempo obtida com osciloscópio para o circuito integrador ativo condicionado aos parâmetros de ajuste apresentados e pulso positivo de 4,8 V e 24 μ s de período de duração.....	75
Fig. 57 – Esquema elétrico do circuito detector de pico utilizado para implementação e testes.	77
Fig. 58 – Pulso positivo gerado pelo microcontrolador utilizado e aplicado à entrada do circuito detector de pico sob testes.	78
Fig. 59 – Resposta obtida com osciloscópio para o circuito detector de pico condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração.....	79
Fig. 60 – Resposta ampliada no tempo obtida com osciloscópio para o circuito detector de pico condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração.....	79

Fig. 61 – Resposta obtida com osciloscópio para o circuito detector de pico, condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração, para razão 1/10 do circuito divisor de tensão de entrada.	80
Fig. 62 – Resposta obtida com osciloscópio para o circuito detector de pico, condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração, para razão unitária do circuito divisor de tensão de entrada. Desta vez, porém, com o sinal de entrada invertido.	81
Fig. 63 – Resposta obtida com osciloscópio para o circuito detector de pico condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração, para razão unitária do circuito divisor de tensão de entrada. Desta vez, porém, com o sinal de entrada invertido e o superdiodo reversamente polarizado.	82
Fig. 64 – Resposta obtida com osciloscópio para o circuito detector de pico condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração, para razão unitária do circuito divisor de tensão de entrada. Desta vez, porém, porém com o sinal de entrada invertido sem a presença do circuito superdiodo.	83
Fig. 65 – Resposta obtida com osciloscópio para o circuito detector de pico condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração, para razão unitária do circuito divisor de tensão de entrada com RD = 1 k Ω	84
Fig. 66 - Esquema elétrico do circuito detector de pico utilizado para implementação e testes.	85
Fig. 67 – Resposta obtida com osciloscópio para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo, integrador ativo e buffer não-inversor 1x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 μ s de período de duração.	86
Fig. 68 - Resposta obtida com o osciloscópio para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo, integrador ativo e buffer inversor 1x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 μ s de período de duração.	86
Fig. 69 – Fotografia do circuito eletrônico condicionador de sinais em PCI.	87
Fig. 70 - Resposta obtida com osciloscópio para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo e detector de pico, com pulso positivo de 3,3 V e 6 μ s de período de duração.	88
Fig. 71 - Resposta obtida com osciloscópio para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo, detector de pico e buffer não-inversor 1x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 μ s de período de duração.	89
Fig. 72 – Resposta obtida com osciloscópio para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo, detector de pico e buffer não-inversor 2x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 μ s de período de duração.	89
Fig. 73 – Fotografia da montagem para testes dos circuitos eletrônicos condicionador de sinais e microcontrolado.	91
Fig. 74 - Fotografia do circuito eletrônico microcontrolado em PCI.	91
Fig. 75 – Resposta de teste com os circuitos eletrônicos condicionador de sinais e microcontrolado para os circuitos divisor de tensão 1:3, superdiodo, detector de pico e buffer não-inversor 1x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 μ s de período de duração.	92
Fig. 76 – Resposta de teste sobre os circuitos eletrônicos condicionador de sinais e microcontrolado para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo, detector de pico e buffer não-inversor 1x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 μ s de período de duração.	92
Fig. 77 – Imagem da tela do PC como resposta do circuito eletrônico microcontrolado correspondente ao teste apresentado na Fig. 75.	93
Fig. 78 – Imagem da tela do PC como resposta do circuito eletrônico microcontrolado correspondente ao teste apresentado na Fig. 76.	94
Fig. 79 – Fotografia do sistema sensor completo sob testes no Laboratório de Fotônica.	96
Fig. 80 – Fotografia do circuito transmissor de R.F em PCI.	97
Fig. 81 - Fotografia do circuito receptor de R.F em PCI.	98

Fig. 82 – Fotografia da mesa de controle do circuito gerador de impulsos de corrente pertencente ao Laboratório de Alta Tensão, UFCG [31].....	100
Fig. 83 – Bobina de Rogowski submetida a uma corrente em seus enrolamentos.....	101
Fig. 84 – Diagrama em blocos do cenário de testes com a bobina de Rogowski no Laboratório Alta Tensão, UFCG.	102
Fig. 85 – Fotografia do cenário de testes com a bobina de Rogowski no Laboratório de Alta Tensão, UFCG.	102
Fig. 86 – Esquema básico de montagem para testes.....	103
Fig. 87 – Esquema de teste com terminal negativo (preto) da bobina de Rogowski aterrado.	104
Fig. 88 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 1.....	104
Fig. 89 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 2.....	106
Fig. 90 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 3.....	107
Fig. 91 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 4.....	108
Fig. 92 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 5.....	109
Fig. 93 – Valores de pico positivo da tensão V_b em função das correntes impulsivas.....	111
Fig. 94 – Valores de pico negativo da tensão V_b em função das correntes impulsivas.....	111
Fig. 95 – Diagrama elétrico para os testes de corrente AC sobre a bobina de Rogowski.	113
Fig. 96 – Fotografia da montagem para testes de corrente AC sobre a bobina de Rogowski.	114
Fig. 97 – Esquema elétrico básico de montagem para testes.....	115
Fig. 98 – Diagrama em blocos do cenário de testes sobre o conjunto sensor bobina de Rogowski e o circuito eletrônico condicionador de sinais realizados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG.	115
Fig. 99 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 1.....	116
Fig. 100 – A imagem obtida com o osciloscópio para Teste 2.....	117
Fig. 101 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 3.....	119
Fig. 102 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 4.....	120
Fig. 103 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 5.....	121
Fig. 104 – Valores de Pico da Tensão V_e (V) em função das Correntes Impulsivas (kA). ...	123
Fig. 105 – A imagem obtida com osciloscópio para Teste 6.....	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise pontual e temporal sobre o Diagrama em Treliças.....	40
Tabela 2 – Comparação entre a bobina de Rogowski e sensores usuais de corrente de descarga atmosférica [30].....	58
Tabela 3 – Pinos de seleção do modo de comunicação do transceptor TRF 2.4G.....	69
Tabela 4 – Dados obtidos com osciloscópio da sequência de testes realizados.....	110
Tabela 5 – Correntes impulsivas calculadas para a referida sequência de testes.....	110
Tabela 6 – Dados obtidos de osciloscópio da sequência de testes a partir do Teste 2.....	122
Tabela 7 – Correntes impulsivas calculadas para a referida sequência de testes.....	122

Capítulo 1

Introdução

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais que não podem ser evitados pela ação humana. No entanto, conhecer o comportamento da corrente de descarga e os campos eletromagnéticos a ela associados possibilita aos profissionais de Engenharia do setor elétrico fazerem uso de métodos e modelos que os auxiliem na proteção dos sistemas elétricos e na redução dos danos por eles causados. Isso se traduz na construção de ferramentas e dispositivos que detectem a presença dessas descargas, como também na construção de outros que minimizem seus efeitos.

O raio, ou a descarga atmosférica, mostra-se às pessoas como uma gigantesca faísca elétrica dissipada rapidamente sobre a Terra, causando efeitos danosos. Pode-se dizer que, quando da ocorrência de um raio, a nuvem e a Terra estão eletricamente curto-circuitadas. Esses fenômenos de natureza impulsiva sobre os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica sempre trouxeram às companhias do setor elétrico preocupação especial. Eles geram vários problemas, prejudicando a qualidade do fornecimento de energia, podendo até mesmo interrompê-lo.

As consequências mais comuns associadas aos problemas citados são: acidentes em usuários, em técnicos e profissionais desses sistemas; punições pela ANEEL ou pela ONS, impostas sobre a companhia provedora de energia, geralmente na forma de multas; perda de receita decorrente da interrupção do fornecimento da energia elétrica correspondente ao período em que as linhas estiveram fora de operação; multas e indenizações referentes aos distúrbios eletromagnéticos provocados no sistema elétrico capazes de provocar perda parcial ou total de equipamentos conectados ao sistema; e gastos com manutenção corretiva sobre as estruturas atingidas pelas descargas atmosféricas, tais como cadeias de isoladores e cabos ativos após sofrerem curto-circuito entre fase e torre. Este último fenômeno é conhecido como *flashover* ou *back flashover* e se caracteriza pela formação de um arco voltaico entre o cabo ativo e a estrutura metálica da torre de linha de transmissão ou distribuição. Esse arco voltaico é devido ao intenso campo elétrico provocado pela alta tensão de descarga sobre o ponto de conexão entre a torre e a cadeia de isoladores que ioniza o ar circulante na superfície externa dos isoladores, quebrando assim a rigidez dielétrica do ar. A Fig. 1 mostra um *flashover* ocorrido entre a linha ativa e a estrutura metálica de uma torre de linha de transmissão.



Fig. 1 – Back Flashover entre a linha (cabos) ativa e a estrutura metálica da torre de linha de transmissão.

Nesse contexto, há a necessidade de se identificar de forma mais eficiente quando um desligamento se origina de uma descarga atmosférica. Isso requer a adoção de uma metodologia que identifique a localização, em tempo real, do fenômeno de descarga atmosférica sobre as estruturas da linha de transmissão como, por exemplo, em qual vão ou torre a descarga foi mais intensa. Essa identificação visa reduzir o número de intervenções por sobretensões transitórias, pois, dessa forma, manutenções preventivas seriam realizadas nas estruturas desgastadas pela passagem da corrente de descargas atmosféricas sobre elas melhorando, assim, o índice de desempenho operacional e, conseqüentemente, contribuindo para uma melhor qualidade de fornecimento de energia elétrica.

Atualmente, existem sistemas para detecção e localização de descargas atmosféricas instalados numa dada região e que registram a presença dos campos eletromagnéticos intensos gerados pelas descargas, e existem outros sistemas que fazem esse reconhecimento com o uso de tecnologia por satélites [2]. Esses sistemas, que serão aqui apresentados, são projetados para levantamento da atividade atmosférica de uma região de cobertura e, como atuam em áreas geográficas extensas, possuem baixa precisão para uso na detecção de descargas atmosféricas em linhas de transmissão.

Para medições de descargas diretas em linhas de transmissão, existe atualmente instalada [13] uma torre instrumentada pertencente à linha de transmissão *Transvaal Highveld*, na África do Sul. O sistema de medição instalado nessa torre é composto basicamente por um TC, centelhadores, elos magnéticos, todos com a função de sensor de parâmetros da corrente de descarga, e um sistema digital de aquisição e tratamento dos dados

colhidos dessas descargas atmosféricas. O TC se encontra na base da torre, os centelhadores e os elos magnéticos foram instalados no seu topo, enquanto o referido sistema digital está isolado dentro de um contêiner próximo à torre [13]. Esse sistema sofreu alterações com o objetivo de medir um maior número de parâmetros associados às descargas atmosféricas incidentes na torre, onde ele se encontra instalado. Atualmente registra parâmetros como: valor de pico da corrente e sua taxa temporal de crescimento, carga, polaridade, multiplicidade e energia por unidade de impedância das descargas. Possui também um contador de descargas para alimentar o histórico do índice cerâmico da região. Pelo fato de ser um sistema robusto, sua instalação em maior escala, de maneira a cobrir parte ou toda a linha de transmissão, tornar-se-ia financeiramente pouco viável.

Na Suíça, foi adotado o sistema LPATS (*Lightning Position and Tracking System*) para detecção e localização de descargas atmosféricas, instalado em seis pontos espalhados estrategicamente pelo território suíço. As informações do sistema LPATS são a data e a hora de ocorrência do fenômeno em cada ponto de medição, e essas informações são fornecidas à central de operações por um satélite de televisão. O sistema LPATS é um sistema que possui um custo relativamente alto, sua operação é difícil e sua precisão o torna pouco atrativo para a localização de uma descarga sobre torres ou vãos de linha de transmissão de energia elétrica [2].

No Brasil, a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) em conjunto com a Universidade Federal de Minas Gerais possui uma torre instrumentada e uma estação de pesquisas na região conhecida como Morro do Cachimbo, em Belo Horizonte. Nela foram realizadas pesquisas concernentes à modelagem do solo sob a torre instrumentada [14]; modelagem da torre; estudos referentes à distribuição da corrente de descarga ao longo da torre e do canal de descarga em parceria com o INPE [16]; análise estatística da ocorrência das descargas tomando por base os dados já coletados na torre [17]; e a avaliação da corrente de descarga com o uso do EMTP (programa dedicado a simulações com transientes eletromagnéticos). Sua utilização para a localização de descargas atmosféricas necessitaria de adaptações que tornassem esse sistema operacional e financeiramente mais atrativo.

Na Universidade de São Paulo, foi instalada uma linha de distribuição instrumentada para análise de sobretensões transitórias provocadas por descargas atmosféricas. O *campus* da USP possui também uma torre instrumentada com resistor *shunt* e uma estrutura blindada para tratamento dos dados colhidos sobre a detecção de descargas atmosféricas na região [2]. Essa estrutura foi criada para que se pudesse conhecer o comportamento de sobretensões transitórias sobre o isolamento da linha de distribuição e também detectar sinais de descargas

atmosféricas na torre instrumentada para se poder estudá-los. Esse projeto é oneroso e por isso sua implantação em larga escala seria inviável. Essa implantação consistiria em instalá-lo em diversas torres de uma de linha de transmissão.

Esta dissertação trata da concepção, construção e testes de um sistema eletrônico detector de descargas atmosféricas e discriminador dos picos de corrente a elas associadas, incidentes em estruturas elevadas de linhas de transmissão. Ele foi concebido para ser instalado em torres de uma linha de transmissão e é capaz não apenas de perceber a presença de uma descarga atmosférica, mas também registrar o valor de pico da corrente correspondente a essa descarga. Além disso, esta dissertação descreve um sistema de comunicação por radiofrequência projetado, construído e testado, com o objetivo de transmitir as informações associadas à ocorrência do fenômeno para um centro de controle da operadora de transmissão de energia.

O sistema completo tem como característica atrativa ser pouco oneroso e utilizar componentes eletrônicos de simples manuseio, operação e aquisição. Por essa razão, pode ser instalado em um grande número de torres que se intercomunicam pelo sistema de R.F, até que as informações alcancem o centro de controle da empresa de energia elétrica. Se o sistema de detecção a ser desenvolvido seria instalado em todas as torres ou em torres alternadas, ou mesmo seguindo outra orientação, seria uma decisão a ser tomada pela empresa envolvida, e não é assunto a ser tratado na dissertação.

O sistema proposto consiste em um sensor de descarga elétrica (bobina de Rogowski), um circuito condicionador de sinais que trata o sinal de tensão colhido dos terminais da bobina para ser lido, um circuito leitor do sinal e um sistema de R.F de transmissão de informações para um sistema de recepção distante. Testes com a bobina de Rogowski e com o circuito condicionador de sinais foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande, onde impulsos de correntes podem ser gerados, simulando descargas atmosféricas. Testes com o circuito leitor e o circuito de R.F foram realizados no Laboratório de Fotônica do Dep. de Eletrônica e Sistemas da UFPE. Testes com o protótipo do sistema completo envolvendo o circuito detector e o de R.F. serão realizados posteriormente.

A dissertação está organizada em sete capítulos cujos conteúdos são descritos a seguir.

O Capítulo 1 introduz o tema da dissertação, descreve alguns sistemas existentes para a detecção de descargas atmosféricas e apresenta seus objetivos.

O Capítulo 2 traz uma descrição das descargas atmosféricas e sua caracterização.

O Capítulo 3 descreve os principais efeitos relacionados à ocorrência de descargas atmosféricas do tipo nuvem-solo sobre uma torre, bem como suas principais características.

O Capítulo 4 traz uma análise matemática do sinal de descarga atmosférica para conhecer seu comportamento no domínio da frequência. Além disso, faz uso de modelos existentes na literatura para o tratamento de uma torre de linha de transmissão, visando conhecer as características da corrente de surto ao longo de sua extensão. Com esse estudo, foi possível projetar o circuito eletrônico detector de descargas.

O Capítulo 5 apresenta a concepção, construção e testes dos circuitos eletrônicos desenvolvidos para compor o sistema sensor, dedicado à detecção de descargas atmosféricas. Essa etapa de projeto e de testes foi realizada no Laboratório de Fotônica do Dep. de Eletrônica e Sistemas da UFPE. Resultados dos testes realizados com o sistema de radiofrequência são também aqui apresentados.

O Capítulo 6 traz os resultados dos testes realizados no Laboratório de Alta Tensão do Dep. de Engenharia Elétrica da UFCG. Esses testes foram feitos tanto com o circuito eletrônico de detecção construído conectado à bobina, quanto com o sensor bobina de Rogowski isoladamente. Aqueles feitos com a bobina isoladamente foram divididos em testes de corrente impulsiva e testes em corrente AC, para se conhecer o comportamento do sensor nas duas situações.

O Capítulo 7 contém a conclusão da dissertação e sugestões para trabalhos futuros relacionados com o tema aqui desenvolvido.

Capítulo 2

Conceito Básico e Caracterização das Descargas Atmosféricas

2.1. Conceito Básico

Descarga atmosférica é uma intensa descarga elétrica que ocorre na atmosfera. Consiste em um fenômeno complexo e se apresenta como o fluxo de uma corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração cujo percurso de alguns quilômetros parte de uma nuvem e pode atingir a superfície terrestre. A Fig. 2 mostra uma representação de uma descarga atmosférica do tipo nuvem-solo [2].

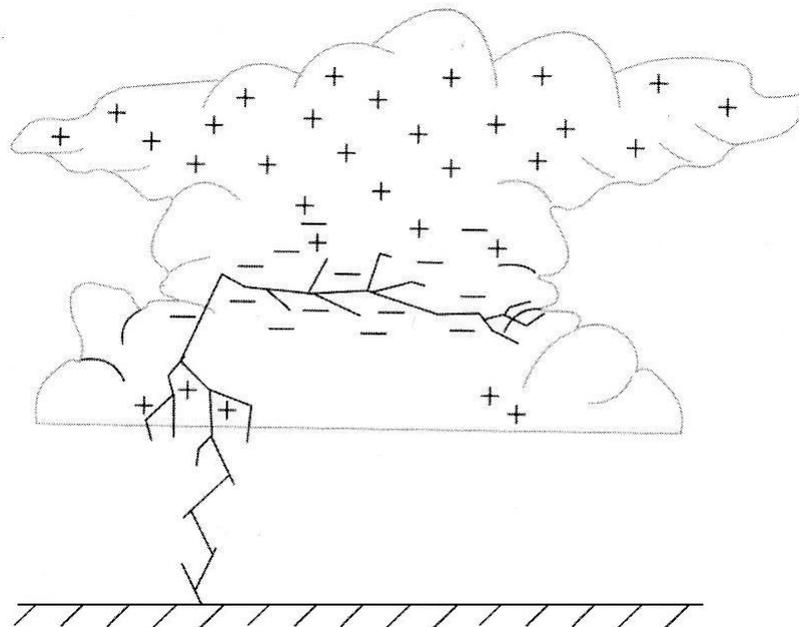


Fig. 2 – Representação do percurso de uma descarga atmosférica típica nuvem-solo [2].

As descargas atmosféricas, em sua maioria, possuem origem nas nuvens de tempestade, conhecidas como *Cumulus Nimbus*, sendo também registrada sua ocorrência em condições tais como durante erupções vulcânicas e tempestades de areia em desertos. O percurso das descargas pode ser estabelecido entre nuvem e solo, como apresentado na Fig. 2, internamente à nuvem, entre nuvens e da nuvem para regiões ionizadas da atmosfera terrestre

[2]. Como pode ser visualizado na Fig. 2, elétrons são deslocados da base da nuvem para o solo, descarregando-a.

A corrente de descarga atmosférica possui formato impulsivo. Essa característica é assegurada pelo fato de num reduzido período de tempo, da ordem de alguns microssegundos, a amplitude dessa corrente atingir seu valor máximo ou de pico, conhecido como valor de crista [2]. Depois de atingido o valor de crista, a amplitude da corrente de descarga atmosférica decai mais lentamente alcançando valores muito pequenos em centenas ou milhares de microssegundos. O tempo médio de ocorrência de uma descarga é de 500 ms [2].

Uma característica importante envolvendo o fenômeno de descarga atmosférica é que o fluxo de corrente pelo canal ionizado, correspondente ao percurso da descarga, gera intenso aquecimento. No canal de descarga são atingidas temperaturas elevadas, superiores a 3.000°C. O aquecimento associado resulta num efeito luminoso, conhecido por relâmpago, e também na expansão abrupta do ar circunvizinho ao canal com o deslocamento de uma onda sonora, conhecida por trovão.

2.2. Caracterização das Descargas Atmosféricas

2.2.1. Sinal Típico de uma Descarga Atmosférica

Existem algumas formas de se representar um sinal de descarga atmosférica. Entre as formas de representação, tem-se: a descarga como a combinação de funções rampa, a soma de duplas exponenciais e as funções de Heidler. A Fig. 3 apresenta a descarga atmosférica como a soma de duplas exponenciais. A partir dessa representação, será realizada uma descrição sucinta de alguns parâmetros relacionados à forma de onda de um sinal de descarga atmosférica.

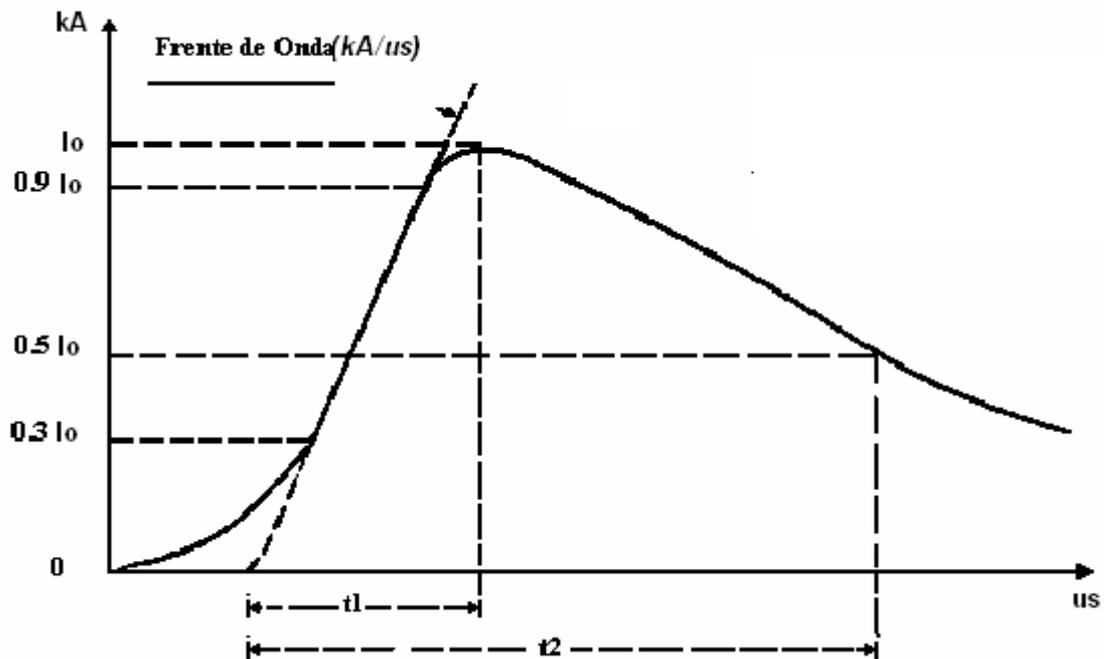


Fig. 3 – Forma de onda típica de um sinal de descarga atmosférica.

Os parâmetros usuais para um sinal típico de descarga atmosférica são: tempo de frente, valor de crista, cauda do raio e tempo de meia cauda. Esses parâmetros auxiliam os profissionais que atuam no setor elétrico, por exemplo, a tipificar as descargas para poder estimar os danos por elas causados [2].

O tempo de frente é calculado da seguinte forma: depois de obtida a forma de onda da descarga, tomam-se os pontos sobre a curva desse sinal cujos valores são $0,3 I_0$ e $0,9 I_0$, onde I_0 é o valor de pico da corrente de descarga. Traça-se uma reta que contenha esses pontos e que deve cruzar o eixo das abscissas, eixo dos tempos. O intervalo de tempo desde o ponto concorrente entre a reta traçada e o eixo das abscissas até o ponto obtido da reta perpendicular que cruza o eixo das abscissas e passa pelo ponto referente ao pico de corrente, é o tempo de frente da corrente de descarga. Na Fig. 3, o tempo de frente é dado pelo parâmetro t_1 [2].

O valor de crista é o valor de pico da corrente de descarga. Na Fig. 3, esse parâmetro está representado por I_0 . A cauda do raio mostra o formato mais suave da descarga, e ela começa após a passagem do pico da corrente de descarga. Quanto maior for o intervalo de tempo a ela associado maior será a suavidade da corrente de descarga. O tempo de meia cauda é o tempo decorrido desde praticamente o início da descarga até o valor de meia cauda, ou melhor, o valor de 50% do valor de pico da corrente, após a passagem pela crista (pico) da descarga. O tempo de meia cauda é representado na Fig. 3 pelo parâmetro t_2 [2].

2.2.2. Tipificação das Descargas Atmosféricas

Quanto ao Percurso da Descarga na Atmosfera

Uma descarga atmosférica é definida como uma intensa descarga elétrica que ocorre na atmosfera e que parte de uma nuvem. A direção de propagação da descarga, portanto, pode ser para a Terra, sendo esse tipo de descarga, descarga nuvem-solo, a forma mais agressiva, ou simplesmente para outras regiões atmosféricas. A Fig. 4 apresenta descargas em várias direções na atmosfera e será dada a denominação para cada tipo de percurso de descarga [2].

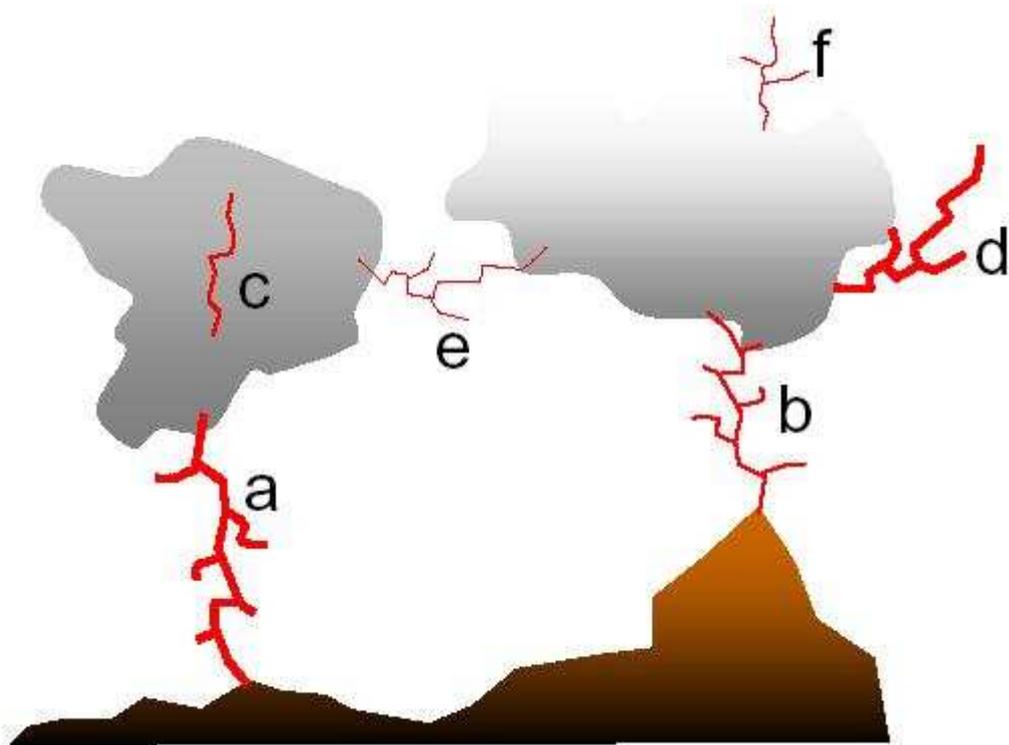


Fig. 4 – Percursos das descargas atmosféricas [2].

Os percursos das descargas visualizadas na Fig. 4 estão relacionados a letras, e a cada letra será atribuída uma descarga. A descarga “a” é uma descarga do tipo nuvem-solo e atinge regiões de menores altitudes da superfície terrestre. A descarga “b” é também uma descarga do tipo nuvem-solo, porém se caracteriza por atingir regiões mais elevadas da Terra. Como pode ser visto na Fig. 4, a descarga “a” se apresenta geralmente mais intensa que a descarga “b” e juntas representam 20% das descargas atmosféricas. A descarga “c” é o tipo mais

frequente de ocorrência, e é conhecida como descarga intranuvem. As descargas “d” e “f” se dispersam para a atmosfera, porém a “d” é atraída para regiões ionizadas próximas à nuvem e a “f” é atraída em direção à ionosfera. Por fim, a descarga “e” é um tipo bastante comum e ocorre entre nuvens, devido à atração de centros de cargas de cada nuvem que possuam sinais opostos [2].

Quanto à Direção de Propagação para a Superfície Terrestre

As descargas atmosféricas do tipo nuvem-solo são as mais importantes para a humanidade. Elas são classificadas quanto à sua direção de propagação até atingirem a superfície terrestre. As descargas cujo canal precursor se inicia no solo são denominadas descargas ascendentes, e aquelas cujo canal precursor se inicia a partir dos centros de carga da nuvem são chamadas descargas descendentes. As descargas descendentes, porém, são mais comuns que as ascendentes. A Fig. 5 mostra uma fotografia de uma descarga atmosférica cuja ramificação sugere ser uma descarga ascendente. A Fig. 6, por sua vez, apresenta uma fotografia em que se leva a crer que a descarga é do tipo descendente [2].



Fig. 5 – Fotografia que mostra ramificações de baixo para cima, indicando uma descarga ascendente [2].

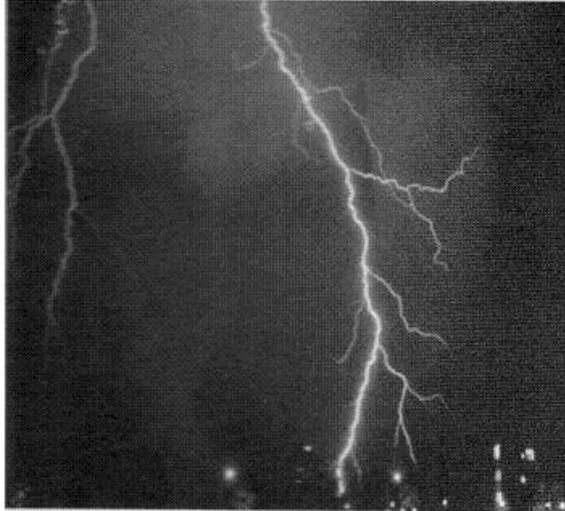


Fig. 6 - Fotografia que mostra ramificações de cima para baixo, indicando uma descarga descendente [2].

Quanto ao Sinal da Carga Transferida à Superfície Terrestre

Conceitualmente, a classificação de uma descarga atmosférica quanto à sua polaridade, se positiva ou negativa, é dada segundo o sinal da carga transferida da nuvem para o solo. A descarga positiva transfere elétrons da Terra para a nuvem, e a descarga negativa transfere elétrons da nuvem para a Terra, pois apenas se verifica a transferência de cargas negativas, elétrons, numa descarga atmosférica. A maioria das descargas nuvem-solo é de polaridade negativa [2].

2.3. Mecanismo Básico de Formação de Uma Descarga Atmosférica – A Descarga Negativa Descendente [2]

O mecanismo de estabelecimento de uma descarga atmosférica do tipo nuvem-solo negativa descendente será apresentado a seguir, sendo esse o tipo mais comum de descarga registrada.

Uma nuvem, carregada com cargas elétricas negativas em sua base, induz no solo uma enorme concentração de cargas elétricas de sinal contrário que se traduz com a repulsão de elétrons na superfície do solo considerada. A Fig. 7 mostra a distribuição de cargas no interior de uma nuvem carregada. Há, portanto, a criação de duas regiões cujas cargas possuem

polaridades opostas, gerando assim um intenso campo elétrico, sob várias centenas de megavolts, cujo sentido do vetor a ele associado é do solo para a nuvem. A Fig. 8 esboça o campo elétrico induzido entre nuvem e solo pelo carregamento da base da nuvem. Esse enorme campo elétrico provoca o início de descargas no interior da nuvem, nas proximidades do centro de carga negativa em sua base, que se estendem por dezenas de metros no sentido oposto ao do campo elétrico, devido ao sinal negativo dessas cargas elétricas. Essas descargas se propagam até atingirem o ambiente exterior à nuvem e, a partir daí, inicia-se o canal precursor de descarga. A Fig. 9 apresenta o aparecimento do canal precursor de descarga na base da nuvem carregada. O canal de descarga, sempre sob a influência do alto campo elétrico existente, cresce até o solo e, devido ao poder das pontas no início do canal de descarga, surge um canal ascendente originado a partir do solo. Esse canal é formado por uma região eletricamente positiva, de sinal contrário ao das cargas do canal precursor descendente onde os elétrons livres próximos ao solo são para ele arrastados. Os canais se propagam até atingirem uma distância entre eles, conhecida como distância crítica de salto, onde são rapidamente conectados e fica então criado um caminho elétrico, curto-circuito, caracterizado por uma região de baixa impedância entre nuvem e solo. Essa conexão é conhecida como *attachment*. A Fig. 10 mostra as etapas que antecedem o encontro entre o canal precursor descendente e o canal ascendente. Nesse momento, a carga elétrica negativa da base da nuvem começa a ser transferida para o solo, e a corrente de descarga é mais intensa que aquela observada para a geração do canal precursor descendente, sendo conhecida como corrente de retorno. O termo “corrente de retorno” vem do fato de na Engenharia Elétrica se considerar o sentido convencional da corrente em um circuito elétrico como o das cargas positivas, representadas por lacunas (falta de elétrons). Aqui a corrente foi considerada aquela que parte da nuvem para o solo e é formada por cargas negativas.

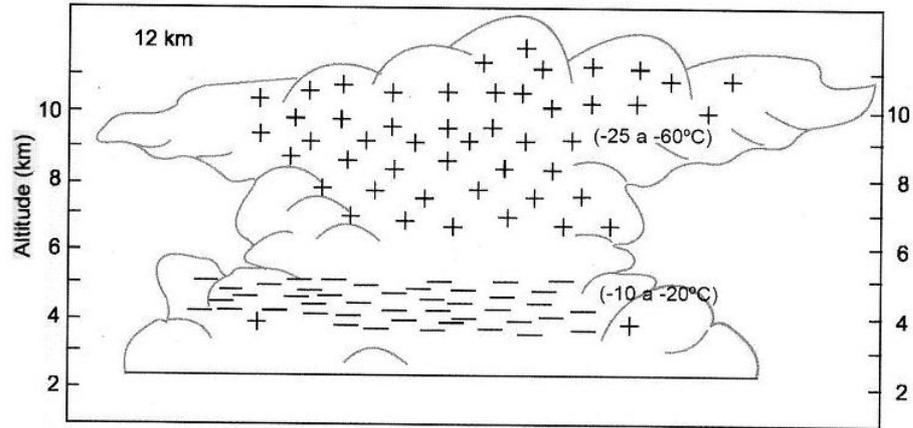


Fig. 7 – Distribuição típica de cargas no interior de uma nuvem carregada [2].

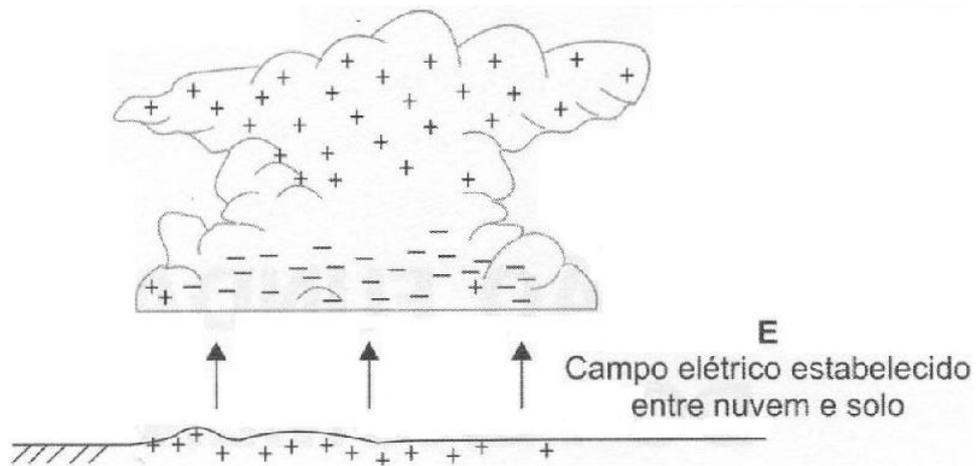


Fig. 8 – Campo elétrico induzido entre nuvem e solo pelo carregamento da base da nuvem [2].

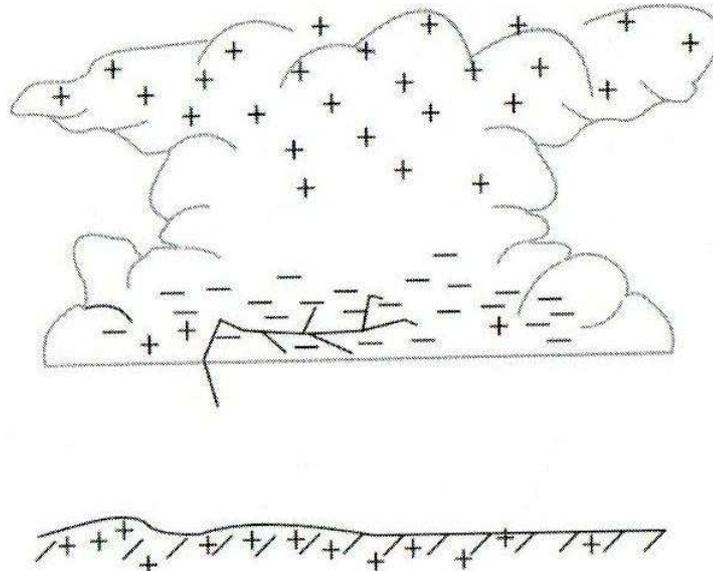


Fig. 9 – Aparecimento do canal precursor de descarga na base da nuvem carregada [2].

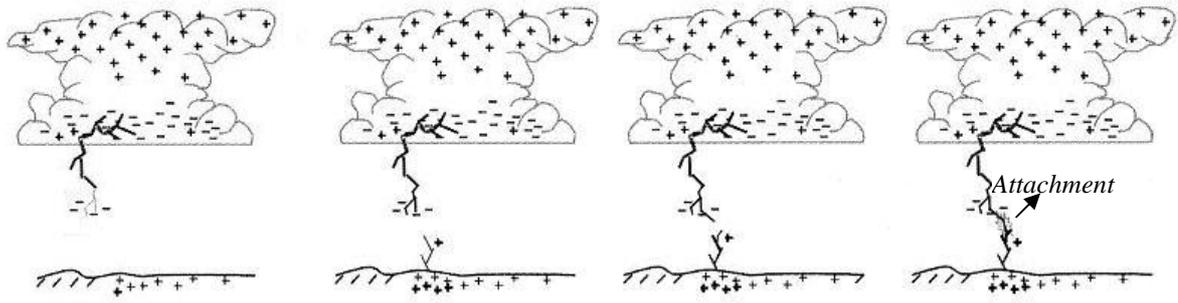


Fig. 10 – Etapas que antecedem o encontro entre o canal precursor descendente e o canal ascendente [2].

Capítulo 3

Efeitos Relacionados e Descrição das Principais Características da Ocorrência de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão

Os efeitos de sobretensões mais frequentes em linhas de transmissão e de distribuição são originados de fenômenos externos, conhecidos como descargas atmosféricas. Basta que existam nuvens sobre as estruturas de linhas de transmissão e de distribuição para que seja possível a ocorrência de uma descarga atmosférica [3].

As sobretensões por fenômenos externos podem apresentar-se de três formas: a) por carga estática; (b) por descarga indireta; e (c) por descarga direta.

- a) Sobretensões provocadas por carga estática: Essas sobretensões se apresentam nas instalações de linhas de transmissão e de distribuição pelo simples fato de que existem nuvens carregadas sobre elas e que estão em constante movimento devido à presença de correntes de vento. Esse caso é o menos perigoso, uma vez que seus efeitos são consideravelmente atenuados com a proteção oferecida pelos cabos para-raios nessas instalações. O sistema de aterramento por cabos para-raios permite um meio de descarga natural para essas sobretensões, pois são sempre acompanhados de uma estrutura de aterramento mais eficaz nas subestações [3].
- b) Sobretensões provocadas por descargas indiretas: As descargas indiretas agem sobre as instalações e estruturas de linhas de transmissão e de distribuição pelo efeito de indução eletrostática e eletromagnética quando da ocorrência de descargas atmosféricas nas proximidades das linhas. Essas descargas geram sobretensões transitórias nas referidas linhas e são o tipo de sobretensão provocadas por descargas atmosféricas mais frequente percebidas em linhas de transmissão e distribuição [3]. A severidade das sobretensões provocadas por descargas indiretas depende da intensidade da descarga que a originou e da distância entre o ponto de descarga e a estrutura mais próxima da linha. Há relatos de medições em campo que apontam sobretensões desse tipo de até 200 kV, com correntes entre 25 kA e 75 kA [3].
- c) Sobretensões provocadas por descargas diretas: As descargas diretas em linhas de transmissão e distribuição são menos frequentes. Os danos relacionados a elas, no entanto, são os mais agressivos às estruturas e instalações das linhas. As correntes instantâneas geradas pelas sobretensões devidas às descargas diretas alcançam valores da ordem de 100 kA. As altas correntes, por sua vez, introduzem efeitos

dinâmicos e térmicos indesejáveis às referidas linhas. Geralmente uma descarga direta sobre os cabos guarda ou torre de uma linha de transmissão provoca uma onda de sobretensão. Essa onda de sobretensão se divide em duas outras, ondas viajantes, que viajam em cada um dos sentidos da linha, uma para a direita e a outra para a esquerda do ponto de aplicação da descarga sobre a linha. A velocidade das ondas viajantes é a mesma que a velocidade da luz no espaço livre [3].

Há outros efeitos, verificados em linhas de transmissão de energia elétrica, que são provocados por sobretensões geradas pelas descargas atmosféricas. Dentre esses efeitos, podem-se citar: esforços dinâmicos e térmicos sobre as instalações das linhas de transmissão devidos ao fato de serem os valores instantâneos das correntes de descargas bastante altos, exigindo para a diminuição desse efeito um projeto mais adequado dessas instalações; forças de atração e repulsão sobre os condutores, devidas aos esforços dinâmicos supracitados, podendo chegar a romper os suportes mecânicos das cadeias de isoladores; e falha de isolamento das cadeias de isoladores devida à grande quantidade de energia calorífica desprendida pela corrente de descarga sobre as estruturas das linhas de transmissão, podendo em alguns casos chegar a destruir-se por explosão ao não conseguir descarregar a energia acumulada.

As descargas atmosféricas podem ser consideradas como um pulso de corrente que flui através de um caminho ionizado da atmosfera que se encontra entre a nuvem carregada e a torre golpeada pela descarga. Existem vários tipos de descargas atmosféricas. No entanto, as mais importantes para a humanidade, pois são essas descargas as que mais a agredem e geram transtornos, são aquelas que ocorrem entre a nuvem e a Terra [1,19,20]. A forma de onda e as magnitudes alcançadas pelas descargas atmosféricas são importantes parâmetros para o conhecimento desses fenômenos, bem como dos efeitos característicos sobre estruturas e instalações de linhas de transmissão. Uma descarga atmosférica se desenvolve lentamente numa série de etapas, cada uma correspondendo a uma trajetória de percurso na atmosfera até atingir o objeto sobre a Terra [1].

3.1. Magnitudes das Descargas Atmosféricas

As descargas atmosféricas têm apresentado valores de pico entre 2 kA e 200 kA, e a frente de onda das correntes de descargas cresce escalonadamente e decresce mais vagorosamente para um tempo entre 1 e 10 μ s e para metade desse valor de pico para um tempo entre 20 e 200 μ s, respectivamente. Vale ressaltar, entretanto, que medições realizadas mostram que uma descarga atmosférica é comumente múltipla, desdobrando-se em vários pulsos de corrente, descarregando-se totalmente em poucos segundos [1,21].

3.2. Descarga no Topo de uma Torre

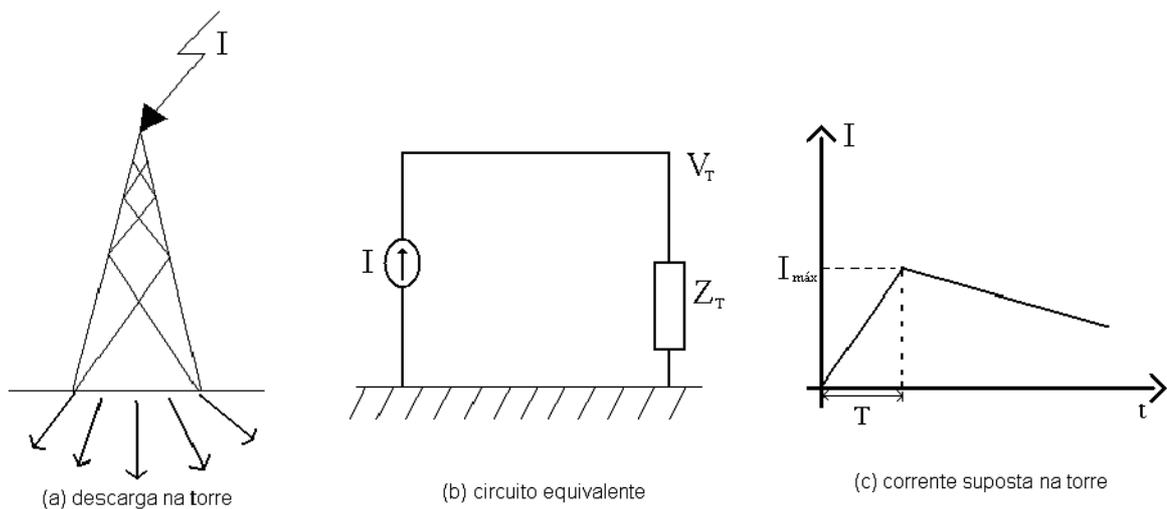


Fig. 11 - Descarga no topo de uma torre de linha de transmissão.

A análise que se segue nesta seção, para obtenção do potencial de topo de torre desejado, por motivo de simplicidade de compreensão, considera a torre como um condutor elétrico que possui uma impedância Z_T , conhecida como impedância de surto, quando a torre é golpeada por uma corrente I de descarga atmosférica [1].

A Fig. 11 (a) mostra um esboço esquemático de como uma torre é atingida por uma descarga atmosférica. Deseja-se, portanto, conhecer a tensão produzida no topo da torre relativa ao potencial de Terra. A corrente de descarga sobre a estrutura produz uma elevação de tensão devida a sua impedância de surto. Um valor típico de impedância de surto de torre é

de 150 ohms [1]. A Fig. 11 (b) apresenta o circuito equivalente produzido pela descarga na torre, e a Fig. 11 (c) mostra um formato comum de rampa dupla usada em certos modelos [1].

Para uma impedância de surto Z_T , e uma corrente de descarga I , o potencial no topo da torre é dado, de acordo com o diagrama elétrico apresentado na Fig. 11, por $V_T = I \times Z_T$. As análises apresentadas nesta seção foram realizadas desconsiderando-se os efeitos dos cabos de cobertura, da resistência de pé de torre e das torres adjacentes.

3.3. Descarga em um Condutor Fase

Uma descarga atmosférica quando incide sobre um condutor fase de uma linha de transmissão gera, devido à impedância de surto do próprio condutor, uma tensão sobre ele em relação ao potencial de terra dada pela expressão: $V_{COND} = I \times Z_C/2$, onde Z_C é a impedância de surto de um condutor horizontal acima da Terra cujo valor típico é de 360 ohms. Cálculos mostram que para descargas atmosféricas da ordem de 10 kA, V_{COND} assume valores que chegam a 1,8 MV, suficientes para superar a tensão suportável de cadeias de isoladores de vários sistemas elétricos de transmissão [1].

Para evitar, portanto, maiores problemas relacionados à ocorrência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão, as companhias detentoras dessas linhas instalaram na quase totalidade de suas linhas, cabos para-raios, também conhecidos como cabos-guarda ou cabos de cobertura. A presença dos cabos, além de reduzir a probabilidade de incidência direta de descargas atmosféricas sobre os condutores fase, ajudam a escoar parte da corrente de descarga sobre eles, reduzindo a fração de corrente de descarga que flui sobre a torre, e, conseqüentemente, reduzindo o valor de potencial gerado pelas descargas nas instalações e estruturas de linhas de transmissão [1].

3.4. Efeito dos Cabos de Cobertura

A função dos cabos de cobertura, ou para-raios, é desviar ambas as correntes, a de descarga que cai sobre a LT e a corrente de curto-circuito entre um ou mais condutores fase, com a torre. Esse desvio pode ser interpretado como o aterramento dessas correntes nas

subestações mais próximas da torre onde elas surgiram, pois há nessas subestações estruturas de aterramento mais seguras.

A presença dos cabos faz com que apenas uma porção da corrente de descarga (I_T) flua através da impedância de surto da torre, Z_T , e o potencial em seu topo é, então, reduzido para $V_T = I_T \times Z_T$. A fração de corrente sobre a torre é inicialmente dependente da impedância de surto relativa ao cabo de cobertura, sofrendo seguidas reduções provocadas pela presença de torres adjacentes [1].

O potencial no topo foi, assim, reduzido pela divisão da parte da corrente de descarga. As torres da Fig. 12 estão sendo eletricamente representadas por suas respectivas impedâncias de surto, Z_T .

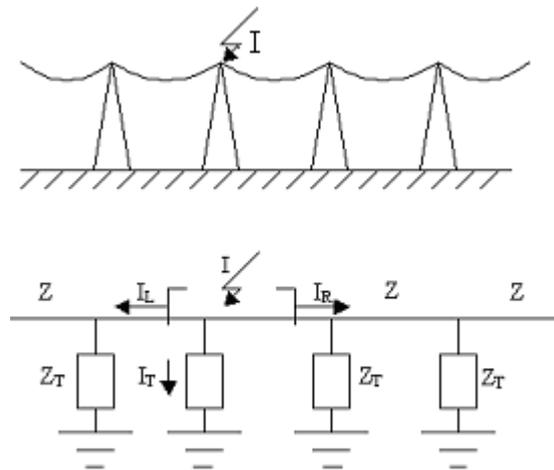


Fig. 12 - Redução no potencial no topo da torre pela divisão da corrente de descarga.

A maioria das linhas de transmissão conhecidas possui dois cabos de cobertura. Isso implica que a impedância de surto equivalente, obtida pela combinação dos dois cabos em paralelo em cada direção de propagação da corrente de descarga (I_R = corrente de descarga à direita da descarga; e I_L = corrente de descarga à esquerda), é redefinida como a combinação também em paralelo das impedâncias Z_{oH} e Z'_{oH} , onde Z_{oH} e Z'_{oH} são as impedâncias de surto de um cabo e dois cabos guarda, respectivamente, como apresentado na Fig. 13.

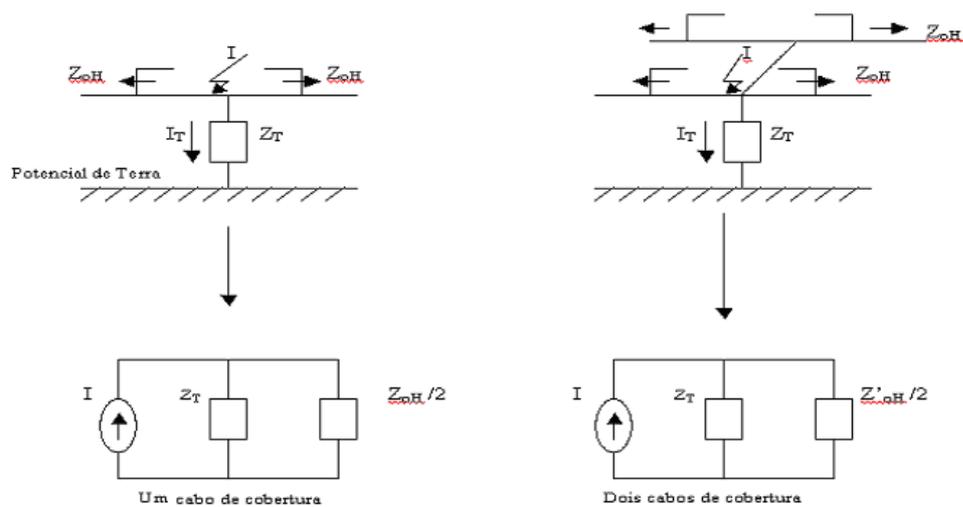


Fig. 13 - Esboço dos caminhos percorridos pela corrente de descarga ao atingir a torre, e o esquema elétrico correspondente.

A presença dos cabos guarda reduz o potencial de topo da torre, por ter sido criado um novo caminho para a passagem da corrente de descarga, reduzindo a impedância vista pela corrente e, conseqüentemente, a tensão por ela gerada. Como a tensão sobre a cadeia de isoladores é proporcional à tensão de topo, então a tensão sobre os isoladores é também reduzida pela mesma razão [1].

3.5. Efeito da Resistência de Pé de Torre

Um importante parâmetro para se estudarem os efeitos de descargas sobre instalações e estruturas de linhas de transmissão é a resistência vista pela corrente de descarga desde sua chegada a cada torre até atingir o solo. As conexões de aço treliçadas das torres possuem uma resistência elétrica desprezível frente à sua reatância de surto e também ao valor típico de resistência de aterramento a qual é diretamente proporcional à resistividade do solo onde se encontra instalada a torre específica. A literatura técnica relata que essa resistividade varia largamente com valores numa faixa entre 100 Ω .m, terrenos úmidos e arenosos, e 10.000.000 Ω .m, terrenos secos e rochosos [3].

A resistência de pé de torre, ou resistência de aterramento, surge do fato de as fundações da torre serem feitas diretamente no solo, o qual possui uma resistividade própria. Resistências típicas variam entre 1 e 50 ohms [1]. A Fig. 14 esboça o modelo elétrico da incidência direta de uma descarga atmosférica no topo de uma torre de linha de transmissão,

considerando a resistência de pé de torre e seu esquema elétrico representado pelas impedâncias de surto dos cabos para-raios, da torre e do solo, respectivamente, Z , Z_T e R_G . A corrente incidente de descarga atmosférica, I , divide-se em duas componentes que viajam para a esquerda, I_L , e para a direita, I_R , do ponto de incidência da descarga.

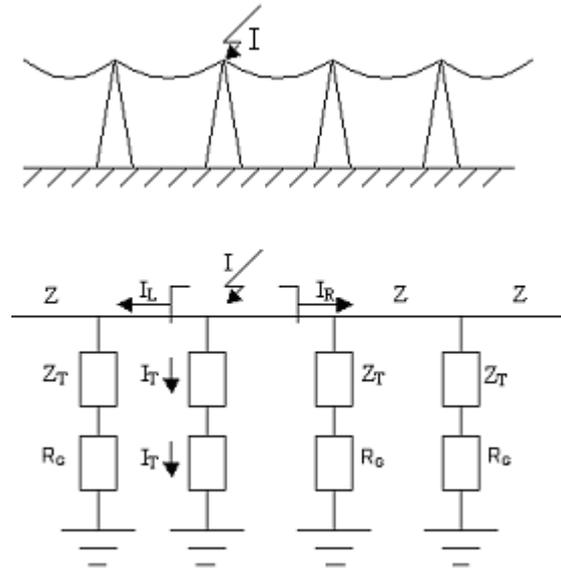


Fig. 14 – Esquema elétrico da linha de transmissão considerando a resistência de pé de torre quando da incidência direta de uma descarga atmosférica no topo da torre.

A onda de tensão, $V_T = I_T Z_T$, viaja através da torre em direção a sua base, encontra uma resistência de aterramento R_G , e é refletida com um coeficiente de reflexão k conhecido. Como R_G é normalmente menor que Z_T , k será negativo e essa onda de tensão refletida viajará de volta para o topo da torre e reduzirá seu potencial, pois a onda refletida será dada por k vezes a onda incidente. Como k é negativo, a onda refletida sempre terá polaridade oposta à onda incidente. O valor de k é dado pela seguinte expressão: $k = \frac{R_G - Z_T}{R_G + Z_T}$.

A maioria dos modelos apresentados para o canal de descarga atmosférica entre nuvem e torre sugere que ele pode ser tratado como uma impedância infinita (muito alta) o que garante um coeficiente de reflexão no topo da torre, devido à influência do canal, de valor unitário. Isso implica que o canal não influencia o comportamento das ondas de tensão e corrente sobre a torre, pois para um coeficiente de tensão unitário toda a onda retorna à torre e nenhuma parte da onda volta para o referido canal [1].

Para as torres baixas, as ondas de tensão, viajando para cima e para baixo, reduzirão rapidamente o potencial de topo para o valor: $V_T = I_T R_G$. Isso explica por que em muitos cálculos de descargas atmosféricas (por exemplo, os que consideram torres baixas ou

descargas com tempos de frente longos), a impedância de surto da torre, sendo representada por sua reatância de surto – parte imaginária da impedância de surto – pode ser desprezada. Isto quer dizer que, em torres baixas, a onda refletida viaja mais rapidamente sobre a torre anulando a onda incidente sobre ela. Já para o caso em que o tempo de subida (de crista) das descargas, por ser longo, implica uma resposta em frequência da corrente de descarga com um valor de frequência menor, reduzindo a parte imaginária da impedância de torre, sendo esta parte a mais expressiva [1].

3.6. Efeito de Torres Adjacentes

O conceito de ondas viajantes, até então aplicado sobre o fenômeno de ocorrência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão de energia elétrica, evidencia que o potencial no topo da torre gerado por uma descarga é influenciado não apenas pela torre golpeada e pela resistividade do solo onde essa torre está instalada, mas também pela presença dos cabos guarda e das torres adjacentes. Essa influência é tanto maior quanto mais próxima estiver a torre daquela golpeada [1]. O diagrama do circuito gerado pela incidência direta de uma descarga atmosférica no topo de uma torre de linha de transmissão considerando o efeito das torres adjacentes pode ser visto na Fig. 14.

Segundo o conceito de ondas viajantes, a onda de corrente de descarga leva um tempo Δt para atingir as primeiras torres adjacentes, onde esse tempo é dado por: $\Delta t = \frac{\text{comprimento do vão}}{\text{velocidade da luz}}$. Para o exemplo de uma descarga direta sobre uma torre de linha de

transmissão, e considerando vãos equidistantes, em $t = 2\Delta t$ as primeiras reflexões das duas torres adjacentes mais próximas chegarão à torre golpeada. Em $t = 4\Delta t$, as reflexões ocorridas nas segundas torres mais próximas incidirão sobre a torre golpeada, e assim sucessivamente com as demais torres. O coeficiente de reflexão no topo de cada torre será dado pela combinação paralela entre a impedância de surto do conjunto torre e resistência de pé de torre, e a impedância de surto produzida pelos cabos de cobertura. Para valores típicos de impedância desses elementos, tais como resistência de pé de torre de 20Ω e impedância de surto dos cabos-guarda de 400Ω , o coeficiente de reflexão em cada topo de torre é tipicamente dado por $k = -0,9$ (esse valor de k não levou em consideração a impedância de surto da torre, por motivo de simplificação). Isso implica que o valor da tensão sobre a

primeira torre adjacente é, portanto, apenas 10% da tensão esperada na torre golpeada, enquanto que o valor de tensão na torre golpeada terá uma declinação tal que seu valor final continua relativamente alto [1]. Será desenvolvida em capítulo posterior uma análise fundamentada no conceito de ondas viajantes para a ocorrência de descargas atmosféricas em uma torre de linha de transmissão.

3.7. Representação Simplificada da Torre

A Fig. 15 ilustra a representação simplificada de uma torre, largamente utilizada a partir do uso do conceito de ondas viajantes em linhas de transmissão. A torre propriamente dita é representada por um condutor equivalente, com impedância de surto dependente de suas dimensões e do tempo de viagem ΔT , sendo este tempo a razão entre a altura h da torre e a velocidade da luz. O uso do modelo simplificado facilita o uso dos conceitos de ondas viajantes para o efeito do tipo e da altura da torre no desempenho da descarga. A impedância de surto, própria para o condutor equivalente, pode ser usada para configurações simples de torres [1].

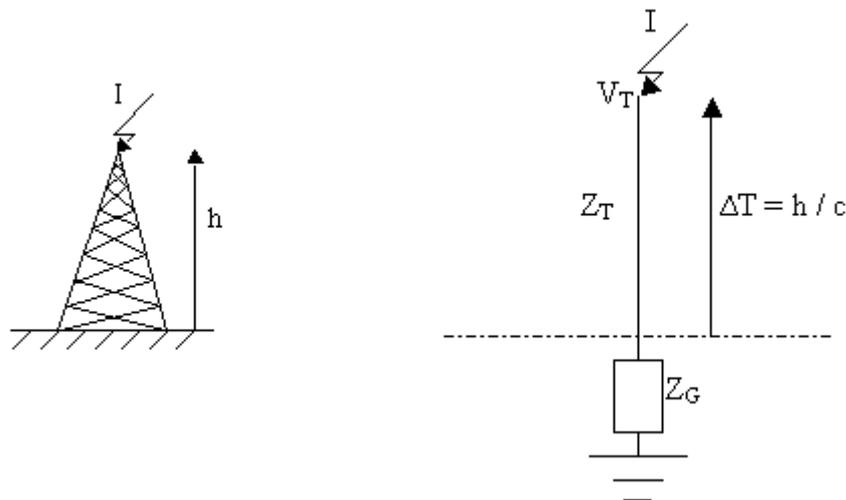


Fig. 15 - Esboço simplificado da torre e esquema de descarga sobre a torre.

Para uma torre cilíndrica de raio R_T e altura h , a impedância de surto equivalente para descargas incidentes diretamente no seu topo é dada por [22]:

$$Z_T = 60 \ln \sqrt{2} \frac{2h}{R_T}. \quad \text{Eq. 1}$$

A impedância de surto equivalente é assim chamada, pois a impedância de surto verdadeira, definida pela raiz quadrada da razão entre a indutância e a capacitância em cada ponto da torre, não é a mesma em todos os pontos da torre, mas decresce do topo para a base, assim como aumenta a capacitância por unidade de comprimento relativa à base [1].

Uma descarga atmosférica atingindo uma torre de linha de transmissão resultará, portanto, numa tensão de surto inicial dada pela expressão $V_T = I \times Z_T$, viajando na torre e atingindo a resistência de aterramento, R_G , após um período Δt dado pela relação entre a altura da torre e a velocidade da frente de onda de corrente de descarga atmosférica cujo valor é o mesmo que a velocidade da luz. Após um tempo de $2\Delta t$, a onda refletida por R_G atinge o topo da torre reduzindo o seu valor de tensão de surto inicial dado pela expressão $V_T = I \times Z_T$ devido ao fato de se ter R_G menor que o módulo de Z_T . A torre, portanto, atua para retardar o efeito benéfico de uma baixa resistência de aterramento, um retardo que é tanto mais sério quanto menor o tempo de crista da forma de onda da corrente de descarga e quanto mais alta for a torre. Nesse aspecto, a estrutura atua mais como uma indutância, pois se sabe que uma indutância provoca o surgimento de uma tensão elétrica proporcional ao módulo da indutância e à variação temporal da corrente elétrica que flui pelo elemento indutor. Essa tensão é dada por $V_L = L \cdot \frac{dI}{dt}$. Assim, para variações temporais maiores de corrente e para torres mais altas, a tensão resultante no topo da torre será mais elevada [1].

As seguintes observações acerca da discussão realizada podem ser feitas:

- 1) *O potencial no topo da torre aumenta com sua altura, porque aumenta sua impedância de surto, bem como o tempo viajante.* Essa observação é pertinente visto que a impedância de surto tende a se comportar como uma indutância; e sabe-se que, quanto maior o comprimento do indutor, maior também será sua indutância. Além disso, para torres maiores, necessariamente as ondas de corrente levam mais tempo para atingir suas extremidades, solo e topo. Isso permite que a tensão provocada inicialmente pela corrente de descarga tenha seu módulo reduzido tardiamente pelas reflexões provocadas no solo.
- 2) *O aumento de tensão devido à torre é proporcional à taxa de subida da corrente de descarga atmosférica.* Como se sabe, a impedância de surto da

torre possui uma característica mais indutiva e, portanto, a tensão de surto será dada por $V_L = L \cdot \frac{dI}{dt}$. É observado, então, que variações bruscas de corrente de descarga atmosférica provocam tensões no topo da torre mais agressivas.

- 3) *A influência relativa da torre é menor para baixas resistências de aterramento.* Essa conclusão se baseia no fato de que o efeito da torre, ou melhor, de sua impedância de surto, é retardar o efeito benéfico de uma resistência baixa de aterramento, um retardo que é tanto mais lento quanto mais inclinada for a frente de onda de corrente de descarga $\left(\frac{dI}{dt}\text{ elevado}\right)$ e quanto mais alta for a torre, como já sabido. Porém, da teoria de ondas viajantes, o coeficiente de reflexão que atinge o topo da torre pelo fato de a onda de corrente ter atingido o solo, é tanto mais negativo quanto menor for a resistência de pé de torre. O coeficiente de reflexão diminuirá o estresse de tensão no topo da torre cada vez que a onda de corrente refletida atingir seu topo, e essa redução será tanto maior quanto mais negativo for o referido coeficiente de reflexão. Portanto, conclui-se que, mesmo para torres com alta impedância de surto, o que obviamente provoca uma maior tensão em seu topo quando golpeada por uma onda de corrente de descarga atmosférica se a resistência de aterramento for relativamente baixa, a influência da torre será atenuada pela presença benéfica da baixa resistência de pé de torre.

3.8. Tensões através das Cadeias de Isoladores

O propósito de estudar o fenômeno de descargas atmosféricas em estruturas de linhas de transmissão de energia elétrica se deve aos problemas por elas gerados. O enfoque dado para se calcular a tensão de surto no topo da torre, V_T , é para se fazer uma estimativa das tensões sobre as cadeias de isoladores que separam fisicamente os condutores-fase da estrutura metálica da torre. A capacidade de isolamento das cadeias frente a descargas atmosféricas depende não só do projeto das cadeias de isoladores, mas também das intempéries ambientais a que estão sujeitas, das características da torre, da resistência de

aterramento, da impedância de surto dos cabos de cobertura e do acoplamento eletrostático entre os condutores fase e os cabos guarda [1].

Do ponto de vista de projeto, o desempenho da descarga em uma linha pode ser melhorado reduzindo-se o valor da tensão de surto no topo da torre. Para isto, devem-se considerar torres mais baixas, resistências de aterramento menores, cabos de cobertura com impedâncias de surto mais convenientes, bem como aumentando o acoplamento entre os cabos guarda e os condutores-fase. É conhecido que a resposta de tensão de surto no cabo guarda e em um condutor-fase é dada matricialmente por [1]:

$$\begin{bmatrix} V_{\phi} \\ V_g \end{bmatrix} = 60 \cdot \begin{bmatrix} \ln \frac{2H_{\phi}}{R_{\phi}} & \ln \frac{d'}{d} \\ \ln \frac{d'}{d} & \ln \frac{2H_g}{R_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_g \end{bmatrix}, \quad \text{Eq. 2}$$

em que V_{ϕ} e V_g , I_g , H_{ϕ} e H_g , R_{ϕ} e R_g , d e d' , são, respectivamente, a tensão de surto no condutor fase e no cabo de cobertura, corrente de surto no cabo-guarda, as alturas em relação ao solo do condutor fase e do cabo-guarda, raios do condutor fase e do cabo de cobertura, distâncias entre o cabo guarda e o condutor fase e entre o cabo de cobertura e a altura espelhada no solo do condutor fase. A equação matricial apresentada na Eq. 2 mostra inicialmente que a corrente de surto no condutor fase é nula. Essa conclusão vem do fato de a corrente de descarga não ter atingido o condutor-fase, e por se ter um acoplamento eletrostático entre o cabo guarda e o condutor fase, representado por uma diferença de potencial entre eles. A corrente sobre o cabo de cobertura, I_g , porém, devido à simetria considerada, divide-se em duas partes iguais a $I/2$, onde I é a corrente de descarga atmosférica. A Fig. 16 mostra o diagrama montado para cálculo das tensões e acoplamento.

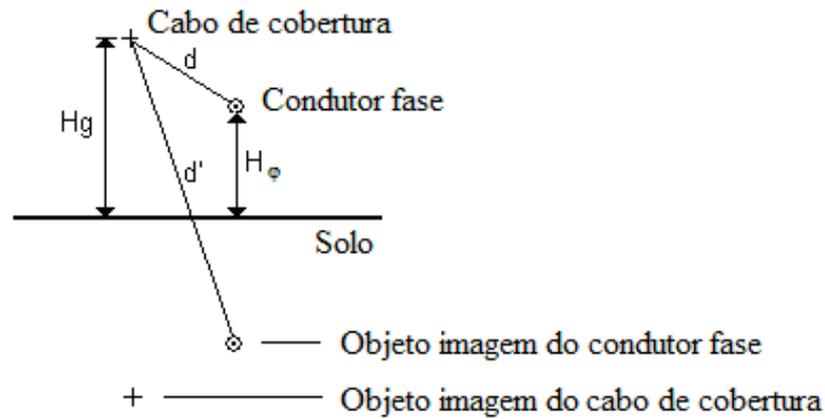


Fig. 16 – Diagrama geométrico para cálculo do acoplamento entre o cabo guarda e o condutor fase.

Da Eq. 2 se extraem as seguintes equações:

$$V_{\phi} = \frac{I}{2} \cdot 60 \ln \frac{d'}{d}, \quad \text{Eq. 3}$$

$$V_g = \frac{I}{2} \cdot 60 \ln \frac{2H_g}{R_g}. \quad \text{Eq. 4}$$

Combinando as Eqs. 3 e 4, obtém-se a Eq. 5:

$$V_{\phi} = \frac{\ln \frac{d'}{d}}{\ln \frac{2H_g}{R_g}} \cdot V_g. \quad \text{Eq. 5}$$

O fator de acoplamento, c , é definido por: $V_{\phi} = cV_g$. Da Eq. 5, c é dado por:

$$c = \frac{\ln \frac{d'}{d}}{\ln \frac{2H_g}{R_g}}. \quad \text{Eq. 6}$$

O fator de acoplamento, no entanto, possui valores típicos entre 0,2 e 0,3. A falta de um acoplamento mais conveniente provoca a abertura do *back flashover* nas cadeias de

isoladores em função de altas diferenças de potencial entre V_ϕ e V_g . As altas diferenças de potencial são provocadas por altas tensões de surto de topo de torre quando da ocorrência de uma descarga atmosférica na linha e em combinação, muitas vezes, com uma condição de tensão no condutor-fase que aumenta essa discrepante diferença de tensão entre as tensões de surto V_ϕ e V_g . Isso se deve ao fato de o surto de descarga ocorrer mais rapidamente que as variações dos níveis de tensão no condutor-fase na frequência industrial. Essa é, portanto, a grande preocupação das companhias transmissoras de energia elétrica com o fenômeno de descarga atmosférica em suas estruturas de linhas de transmissão. A abertura do *back flashover* provoca a quebra da rigidez dielétrica da atmosfera circunvizinha à cadeia de isoladores levando a um curto circuito entre o condutor-fase e a estrutura metálica da torre.

Capítulo 4

Comportamento Elétrico de uma Torre de Linha de Transmissão diante de uma Descarga Atmosférica

Esta dissertação tem como foco desenvolver um sistema sensor capaz de identificar uma descarga atmosférica direta em elementos de linhas de transmissão de energia elétrica. Entre esses elementos, está a torre de linha de transmissão onde será instalado o sistema sensor. É necessário, portanto, conhecer o comportamento elétrico tanto do sinal de corrente de descarga atmosférica quanto da torre. A seguir, serão realizadas a análise do sinal típico de descarga atmosférica e a modelagem da torre de linha de transmissão para se poder avaliar seu comportamento frente a uma corrente de descarga atmosférica.

4.1. Análise em Frequência de um Sinal Típico de Descarga Atmosférica

Um sinal de corrente de descarga típico é dado pela combinação de funções exponenciais, ou de maneira mais próxima do sinal real de corrente de descarga, pela conhecida Função de Heidler. A Eq. 7 mostra essa função.

$$i(t) = \frac{I}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_f}\right)^{\frac{1}{n}}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_f}\right)^n} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right), \quad \text{Eq. 7}$$

$$\text{em que } \eta = \exp\left[-\left(\frac{\tau_f}{\tau_d}\right) \cdot \left(n \cdot \frac{\tau_d}{\tau_f}\right)^{\frac{1}{n}}\right].$$

A Fig. 17, no entanto, ilustra a representação de um sinal típico de descarga atmosférica, obtido a partir da combinação de funções exponenciais.

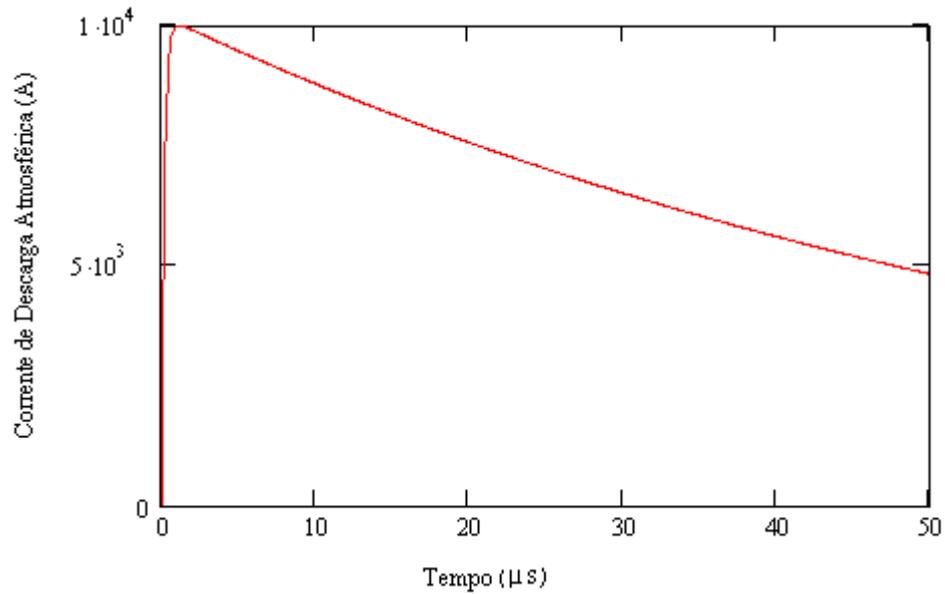


Fig. 17 - Representação de um sinal típico de descarga atmosférica, obtido a partir da combinação de funções exponenciais.

Existe, porém, outra representação de sinal de corrente de descarga atmosférica que facilita a compreensão de seu comportamento fortemente transitório. A onda de corrente de descarga atmosférica é representada por duas funções rampa, sendo uma crescente e com elevação bastante íngreme, e a segunda decrescente com aspecto mais suave. Essas funções rampa na realidade são funções conhecidas como funções afim e apresentam variações temporais extremamente positiva e suavemente negativa, ilustrando respectivamente a subida e a descida da amplitude do sinal de corrente de descarga atmosférica. A Fig. 18 ilustra o sinal de descarga atmosférica típico, esboçado a partir de sua representação pelas funções afim explícitas na Eq. 8.

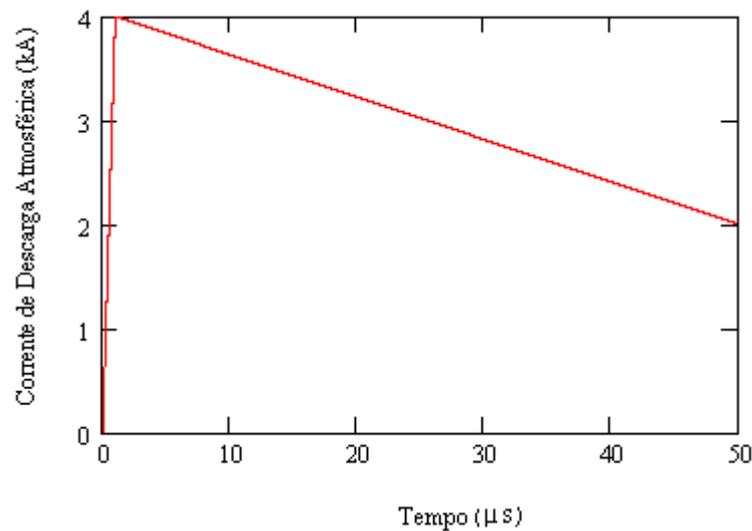


Fig. 18 - Representação simplificada de um sinal típico de descarga atmosférica obtido de funções afim.

$$x(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ at, & 0 \leq t < t_0; \\ \frac{at_0(t-t_1)}{t_1-t_0}, & t_0 \leq t < t_1; \\ 0, & t > t_1. \end{cases} \quad \text{Eq. 8}$$

De posse do formato, amplitude e magnitude do sinal de corrente de descarga atmosférica dado pela Eq. 8 e ilustrado pela Fig. 18, pode-se iniciar as análises do sinal nos domínios temporal e frequencial. As análises possuem como principal objetivo conhecer bem o sinal de descarga atmosférica para que se possam dimensionar os futuros componentes elétricos e eletrônicos, principalmente aqueles considerados ativos, pois existem parâmetros específicos para tratamento dos vários tipos de sinais a partir do seu comportamento, tanto temporal quanto frequencial. Alguns dos parâmetros são o *slew rate* e a largura de banda, respectivamente parâmetros temporal e frequencial de um amplificador operacional, por exemplo. Na Fig. 18, os parâmetros temporais t_0 e t_1 possuem valores $1 \mu\text{s}$ e $99 \mu\text{s}$, respectivamente.

O *slew rate* é a taxa de variação da saída em função da variação ocorrida na entrada de um dado dispositivo ou circuito. Essa taxa mostra o quanto um dispositivo é rápido o suficiente para poder recuperar um sinal que possui uma variação temporal razoavelmente brusca, como é o caso de um sinal obtido nos terminais de uma bobina de Rogowski quando da passagem de uma corrente impulsiva em seus enrolamentos a partir de uma descarga

atmosférica. A largura de banda é a faixa de frequências de sinais em que o dispositivo ou circuito pode reconhecer e tratar com atenuação ou perdas dentro do previsto no projeto.

A análise temporal do referido sinal mostra que se está tratando de sinais com elevada variação temporal. Para o sinal considerado na análise que se segue, a taxa de subida é dada por $\frac{4kA}{1\mu s}$. Essa taxa é bastante atenuada com a utilização da bobina de Rogowski como sensor do sinal de corrente de descarga.

A análise no domínio da frequência será feita pela Transformada Contínua de Fourier. Ela permite conhecer o comportamento no espectro de frequências de sinais contínuos finitos no tempo. A seguir será apresentada a análise em frequência do sinal mostrado na Fig. 18 e definido pela Eq. 8.

Se $x(t)$ for o sinal que se quer representar no espectro de frequências, $X(\omega)$ será chamado de Transformada de Fourier de $x(t)$. Daí se tem:

$$x(t) \xrightarrow{F} X(\omega).$$

$X(\omega)$ é definido por [23]:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt. \quad \text{Eq. 9}$$

Para o sinal $x(t)$ considerado, pode-se dividir a integral de transformação nos intervalos de tempo convenientes para facilitar sua obtenção:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^0 0 \cdot e^{-j\omega t} dt + \int_0^{t_0} a t e^{-j\omega t} dt + \int_{t_0}^{t_1} -\frac{at_0}{t_1 - t_0} (t - t_1) e^{-j\omega t} dt + \int_{t_1}^{+\infty} 0 \cdot e^{-j\omega t} dt \Rightarrow$$

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt = a \int_0^{t_0} t e^{-j\omega t} dt + \frac{at_0 t_1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} e^{-j\omega t} dt - \frac{at_0}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} e^{-j\omega t} dt \Rightarrow$$

$$* \int t e^{-j\omega t} dt = \frac{t e^{-j\omega t}}{-j\omega} - \int \frac{e^{-j\omega t}}{-j\omega} dt = \frac{e^{-j\omega t}}{\omega^2} + j \frac{t e^{-j\omega t}}{\omega};$$

$$** \int e^{-j\omega t} dt = j \frac{e^{-j\omega t}}{\omega};$$

Segue, então:

$$\begin{aligned}
 X(\omega) &= a \left[\frac{e^{-j\omega\alpha}}{\omega^2} + j \frac{te^{-j\omega\alpha}}{\omega} \right]_0^{t_0} + \frac{at_0 t_1}{t_1 - t_0} \cdot j \frac{e^{-j\omega\alpha}}{\omega} \Big|_{t_0}^{t_1} - \frac{at_0}{t_1 - t_0} \left[\frac{e^{-j\omega\alpha}}{\omega^2} + j \frac{te^{-j\omega\alpha}}{\omega} \right]_{t_0}^{t_1} \Rightarrow \\
 X(\omega) &= a \left[\frac{e^{-j\omega\alpha_0}}{\omega^2} + j \frac{t_0 e^{-j\omega\alpha_0}}{\omega} - \frac{1}{\omega^2} - 0 \right] + j \frac{at_0 t_1}{t_1 - t_0} \left[\frac{e^{-j\omega\alpha_1} - e^{-j\omega\alpha_0}}{\omega} \right] - \\
 &- \frac{at_0}{t_1 - t_0} \left[\frac{e^{-j\omega\alpha_1}}{\omega^2} + j \frac{t_1 e^{-j\omega\alpha_1}}{\omega} - \frac{e^{-j\omega\alpha_0}}{\omega^2} - j \frac{t_0 e^{-j\omega\alpha_0}}{\omega} \right] \Rightarrow \\
 X(\omega) &= a \frac{e^{-j\omega\alpha_0}}{\omega^2} - \frac{a}{\omega^2} + j \frac{at_0 e^{-j\omega\alpha_0}}{\omega} + j \frac{at_0 t_1}{\omega(t_1 - t_0)} e^{-j\omega\alpha_1} - j \frac{at_0 t_1}{\omega(t_1 - t_0)} e^{-j\omega\alpha_0} - \frac{at_0}{\omega^2(t_1 - t_0)} e^{-j\omega\alpha_1} - \\
 &- j \frac{at_0 t_1}{\omega(t_1 - t_0)} e^{-j\omega\alpha_1} + \frac{at_0}{\omega^2(t_1 - t_0)} e^{-j\omega\alpha_0} + j \frac{at_0^2}{\omega(t_1 - t_0)} e^{-j\omega\alpha_0} \Rightarrow \\
 X(\omega) &= a \frac{e^{-j\omega\alpha_0}}{\omega^2} - \frac{a}{\omega^2} + j \frac{at_0 e^{-j\omega\alpha_0}}{\omega} \left[1 - \frac{t_1}{t_1 - t_0} + \frac{t_0}{t_1 - t_0} \right] + \frac{at_0}{\omega^2(t_1 - t_0)} e^{-j\omega\alpha_0} - \frac{at_0}{\omega^2(t_1 - t_0)} e^{-j\omega\alpha_1} \Rightarrow \\
 X(\omega) &= a \frac{e^{-j\omega\alpha_0}}{\omega^2} \left[1 + \frac{t_0}{(t_1 - t_0)} \right] - \frac{at_0}{(t_1 - t_0)} e^{-j\omega\alpha_1} - \frac{a}{\omega^2}.
 \end{aligned}$$

$$X(\omega) = \frac{at_1}{(t_1 - t_0)} \frac{e^{-j\omega\alpha_0}}{\omega^2} - \frac{at_0}{(t_1 - t_0)} e^{-j\omega\alpha_1} - \frac{a}{\omega^2}. \quad \text{Eq. 10}$$

Agora, a expressão acima será trabalhada para que seja possível expressá-la em função de suas componentes reais e imaginárias separadamente.

Sabe-se que $e^{-j\omega\alpha} = \cos \omega\alpha - j \text{sen} \omega\alpha$. Assim, a expressão de $X(\omega)$ pode ser dada por:

$$X(\omega) = \frac{at_1}{\omega^2(t_1 - t_0)} (\cos \omega\alpha_0 - j \text{sen} \omega\alpha_0) - \frac{at_0}{(t_1 - t_0)} (\cos \omega\alpha_1 - j \text{sen} \omega\alpha_1) - \frac{a}{\omega^2}.$$

As eqs. 11, 12 e 13 apresentam $X(\omega)$ na sua representação retangular e as partes real e imaginária de $X(\omega)$, $\text{Re}[X(\omega)]$ e $\text{Im}[X(\omega)]$, respectivamente.

$$X(\omega) = \frac{a}{\omega^2} \left[\frac{t_1 \cos t_0 \omega - t_0 \cos t_1 \omega}{(t_1 - t_0)} - 1 \right] + j \left[\frac{a}{\omega^2 (t_1 - t_0)} (t_0 \operatorname{sen} t_1 \omega - t_1 \operatorname{sen} t_0 \omega) \right], \quad \text{Eq. 11}$$

$$\operatorname{Re}[X(\omega)] = \frac{a}{\omega^2} \left[\frac{t_1 \cos t_0 \omega - t_0 \cos t_1 \omega}{(t_1 - t_0)} - 1 \right], \quad \text{Eq. 12}$$

$$\operatorname{Im}[X(\omega)] = \left[\frac{a}{\omega^2 (t_1 - t_0)} (t_0 \operatorname{sen} t_1 \omega - t_1 \operatorname{sen} t_0 \omega) \right]. \quad \text{Eq. 13}$$

A partir da expressão de $X(\omega)$, foram plotados os gráficos de magnitude e fase de $X(\omega)$, num intervalo de frequências de 1 MHz a 10 MHz. Eles estão mostrados nas Figs. 19, 20 e 21.

Para o caso considerado, admitiu-se um sinal de amplitude 4 kA e um tempo de frente de 1 μ s. O tempo de meia cauda nesse caso foi de 50 μ s.

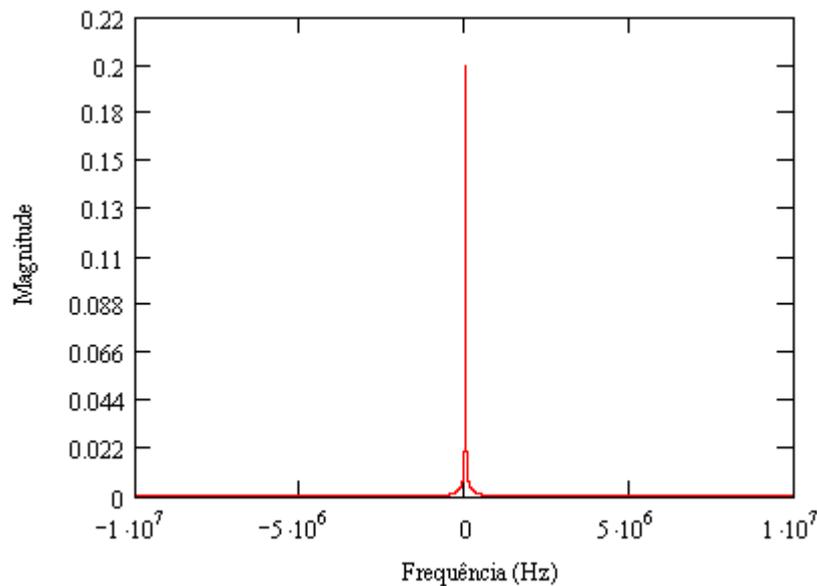


Fig. 19 – Gráfico da resposta em magnitude da Transformada de $x(t)$ para uma faixa de frequências de 10 MHz.

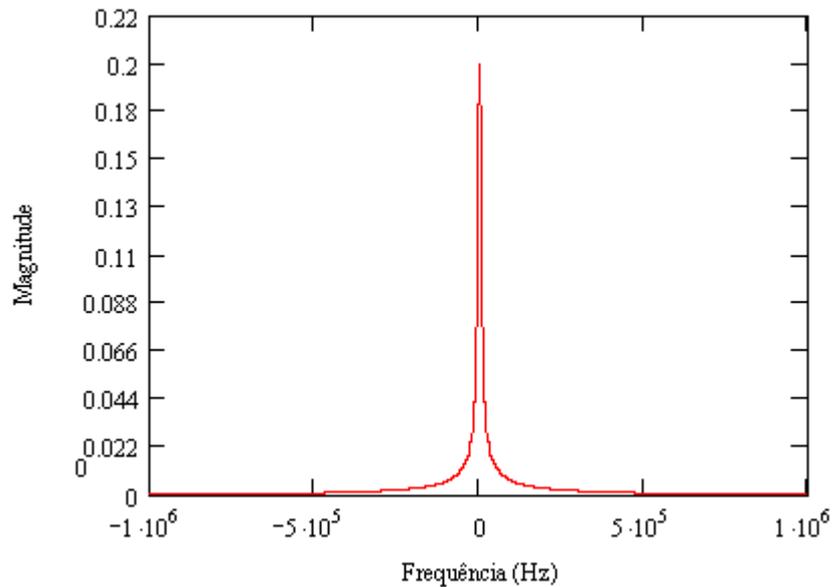


Fig. 20 – Gráfico da resposta em magnitude da Transformada de $x(t)$ para uma faixa de frequências de 1 MHz.

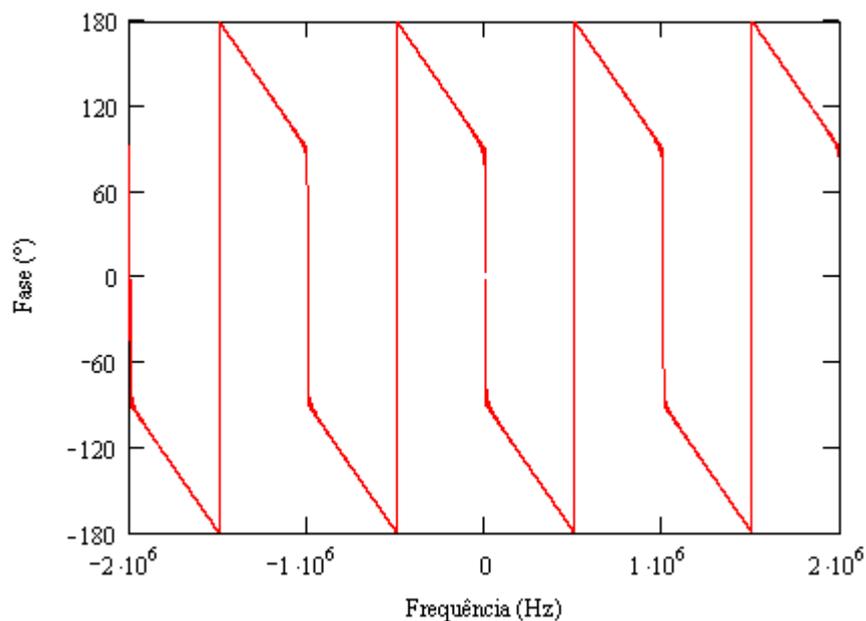


Fig. 21 – Gráfico da resposta em fase da Transformada de $x(t)$ para uma faixa de frequência de 2 MHz.

Percebe-se, a partir dos gráficos apresentados nas figuras acima, que a maior parte do sinal está concentrada, mostrando uma queda fortemente exponencial com a frequência. Isso reflete a ideia de que, para a implementação dos dispositivos e circuitos necessários para se realizar a detecção de sinais de corrente de descarga atmosférica, os dispositivos e componentes elétricos e eletrônicos a serem utilizados não necessitam possuir largura de banda expressiva.

Uma observação interessante é que a fase da Transformada do sinal analisado se repete a cada 1 MHz. Essa frequência é justamente aquela dada pelo inverso do tempo de crista do sinal $x(t)$. Esse cálculo simples é uma forma de se prever a periodicidade na frequência de um sinal tipo pulso. A Fig. 22 mostra a resposta em fase do sinal $x(t)$ para um tempo de crista de 10 μs .

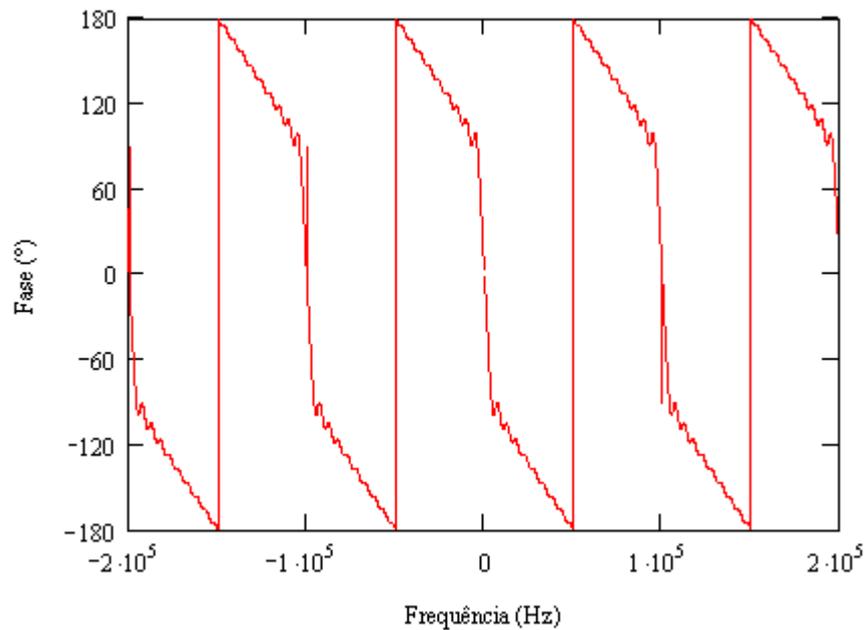


Fig. 22 – Gráfico da resposta em fase do sinal $x(t)$ para um tempo de crista de 10 μs .

Como pode ser observada, a fase da Transformada tem se repetido a cada 100 kHz, seguindo a mesma ideia do cálculo apresentado acima para o sinal cujo tempo de crista é de 1 microssegundo.

O tempo de meia cauda, no entanto, tem uma maior influência sobre o espalhamento visto na magnitude de $X(\omega)$, pois se esse tempo duplicar, o espalhamento será menor e há uma maior concentração em torno da origem do gráfico, mostrando que esse tempo influencia nas componentes de alta frequência do sinal de descarga. A Fig. 23 mostra a magnitude de $X(\omega)$ para um $x(t)$ tal que o tempo de meia cauda seja de 20 μs . A queda de amplitude na origem e o maior espalhamento da função magnitude de $X(\omega)$ verificados na Fig. 23 é aproximadamente proporcional à relação entre os tempos de meia cauda envolvidos na análise, 20 μs e 50 μs $\left(\frac{20\mu\text{s}}{50\mu\text{s}}, 40\%\right)$.

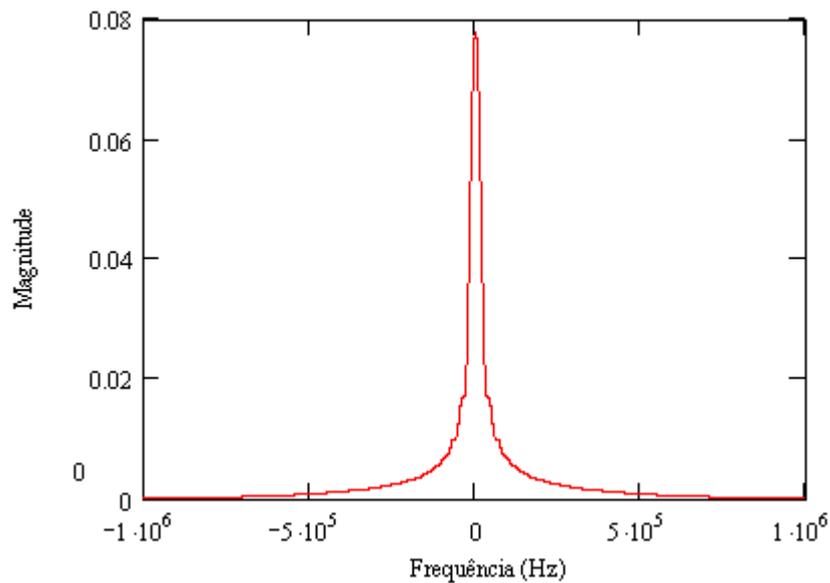


Fig. 23 – Gráfico da resposta em magnitude da Transformada de $x(t)$ para uma faixa de frequência de 1 MHz e tempo de meia cauda de 20 μ s.

As análises realizadas mostram que a magnitude da Transformada de Fourier de $x(t)$, $X(\omega)$, possui forte dependência com o segundo momento de descarga, bastante influenciado pelo tempo de meia cauda. Além disso, nota-se também que a periodicidade da fase do sinal de descarga proposto, no domínio frequencial, é dada pelo valor do inverso do tempo de crista de $x(t)$. A resposta em magnitude foi encontrada também por outros autores [2].

4.2. Modelagem da Torre de Linha de Transmissão para Avaliação de seu Comportamento frente a uma Descarga Atmosférica

O objetivo principal da pesquisa realizada para essa dissertação é o desenvolvimento de um sistema composto de sensor e circuitos eletrônicos capazes de perceber a presença e identificar a localização de uma descarga atmosférica que incidiu diretamente sobre uma linha de transmissão. Dentre os circuitos eletrônicos propostos, pretende-se construir um circuito eletrônico tal que sua função seja fornecer o primeiro tratamento eletrônico ao sinal obtido dos terminais do sensor bobina de Rogowski a partir da passagem de uma corrente de descarga atmosférica sobre o sensor, instalado na estrutura metálica que compõe a torre.

Diante do exposto, é essencial, portanto, conhecer como uma torre de linha de transmissão se comportará eletricamente frente à passagem de uma corrente de descarga atmosférica em sua estrutura, pois, dependendo da forma de onda do sinal de corrente obtido em cada trecho da torre, o circuito dedicado à detecção da corrente terá uma composição diferente, de maneira a atender aos requisitos exigidos. Daí, a necessidade de se realizar a modelagem de uma torre de linha de transmissão. A seguir, será apresentado um modelo elétrico de uma torre típica [1] para análise na situação citada. O modelo trata a torre como uma linha de transmissão cujo comprimento da linha é dado pela altura da torre, e em uma de suas extremidades encontra-se a resistência de pé de torre, e na extremidade seguinte a fonte de corrente impulsiva. Um segundo modelo é apenas aqui apresentado sucintamente, e representa a torre como um conjunto de indutâncias e capacitâncias distribuídas ao longo de sua estrutura, onde cada conjunto está representando um determinado trecho da torre. Este segundo modelo foi desenvolvido por Zhang et al [27].

4.2.1. Modelo de Linha de Transmissão para Torre

Na representação da torre por uma linha de transmissão, utiliza-se o conceito extraído da Teoria de Ondas Viajantes em linhas de transmissão. Esse conceito é apresentado pela própria teoria eletromagnética na qual uma onda eletromagnética ao percorrer um meio sofrerá reflexões entre esse meio e o meio seguinte [24]. A análise a ser apresentada é baseada na construção de um diagrama temporal do comportamento da corrente nos pontos de descontinuidade de impedância da torre, conhecido por Diagrama de Treliças. Nesse caso, os pontos de descontinuidade da torre são o topo e a base dela.

Expressão da Corrente Elétrica de Descarga em qualquer Instante e Ponto da Torre de L.T.

Aqui se pretende desenvolver uma formulação para obter a expressão da corrente elétrica, gerada por uma corrente de descarga atmosférica, em qualquer instante de tempo e ponto ao longo da torre de linha de transmissão, especialmente nos casos particulares, topo, base e meio da torre, a partir do uso do Conceito de Ondas Viajantes e Diagrama de Treliças.

O modelo, aqui descrito, de representação da distribuição de correntes num condutor elevado golpeado por uma descarga atmosférica, visa conhecer as características de corrente e tensão sobre a torre de linha de transmissão que dá suporte a esse condutor. Pretende-se, portanto, calcular a resposta de corrente da torre para a aplicação de uma descarga atmosférica em seu topo. Inicialmente, será feita a análise para uma excitação de corrente idealizada por rampas e, por fim, serão simulados e obtidos os gráficos de resposta de corrente da torre para os pontos de maior interesse, topo, base e meio da torre, para o caso de impedâncias de canal de descarga ideal e real. A Fig. 24 mostra um diagrama elétrico básico para o cálculo de reflexões em objetos visando à obtenção do respectivo Diagrama de Treliças [1,26].

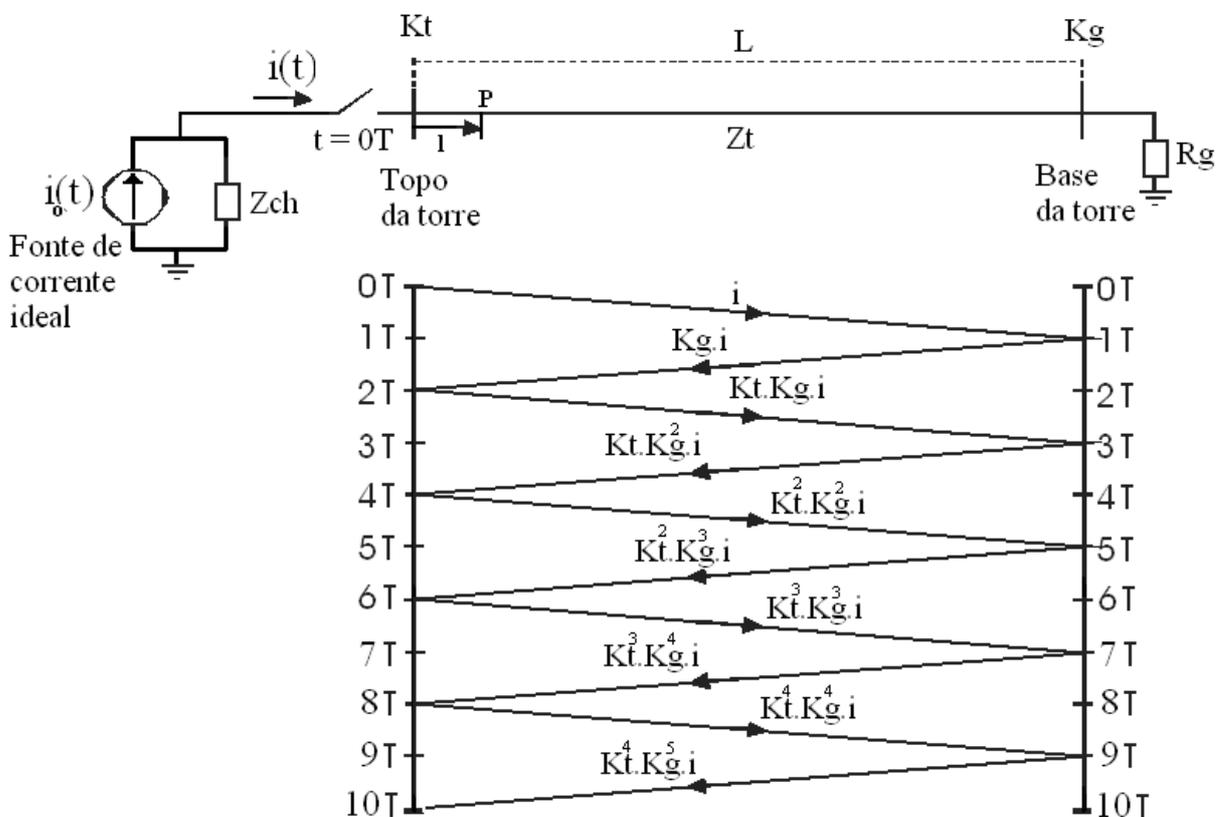


Fig. 24 – Diagrama elétrico básico para o cálculo das reflexões no topo e base da torre, e Diagrama em Treliças associado.

A partir do diagrama em treliças dado na Fig. 24, pode-se realizar uma análise pontual e temporal sobre o fenômeno de descarga atmosférica direta em uma torre de linha de transmissão. A Tabela 1 apresenta o resultado da análise proposta. O resultado se encontra na Tabela 1 e merece algumas considerações:

- i. A corrente de descarga que atinge o topo da torre é $i_0(t)$. Porém, haverá inicialmente um divisor de corrente entre as impedâncias de canal e de surto da torre, respectivamente Z_{CH} e Z_T , o qual implicará uma onda viajante sobre a torre associada apenas à corrente $i(t)$.
- ii. A análise se dará em dois momentos, com relação aos dois valores considerados de impedância de canal, Z_{CH} . No primeiro momento, a análise será realizada para a fonte de corrente de descarga ideal e para uma impedância de canal infinita. No segundo momento, a análise considerará a impedância de canal finita, e seu valor pode ser estimado por ser três vezes o valor da impedância de surto da torre [25].
- iii. A torre será modelada por uma linha de transmissão cuja impedância característica será dada pela impedância de surto dela [1,2].
- iv. Os coeficientes de reflexão de corrente no topo e na base da torre, respectivamente, K_T e K_g , são constantes. T é o tempo de percurso da corrente entre topo e base da torre.

Tabela 1 – Análise pontual e temporal sobre o Diagrama em Treliças.

Intervalo considerado	Corrente no topo da torre [$i_T(t)$]	Intervalo considerado	Corrente na base da torre [$i_T(t)$]
$0 \leq t < 2T$	$i(t)$	$0 \leq t < T$	0
$2T \leq t < 4T$	$i_{anterior} + K_g i(t - 2T) + K_T K_g i(t - 2T)$	$T \leq t < 3T$	$i_{anterior} + i(t - T) + K_g i(t - T)$
$4T \leq t < 6T$	$i_{anterior} + K_T K_g^2 i(t - 4T) + K_T^2 K_g^2 i(t - 4T)$	$3T \leq t < 5T$	$i_{anterior} + K_T K_g i(t - 3T) + K_T K_g^2 i(t - 3T)$
$6T \leq t < 8T$	$i_{anterior} + K_T^2 K_g^3 i(t - 6T) + K_T^3 K_g^3 i(t - 6T)$	$5T \leq t < 7T$	$i_{anterior} + K_T^2 K_g^2 i(t - 5T) + K_T^2 K_g^3 i(t - 5T)$

$8T \leq t < 10T$	$i_{anterior} + K^3_T K^4_g i(t-8T) + K^4_T K^4_g i(t-8T)$	$7T \leq t < 9T$	$i_{anterior} + K^3_T K^3_g i(t-7T) + K^3_T K^4_g i(t-7T)$
-------------------	------------------------------------------------------------	------------------	------------------------------------------------------------

A partir das expressões obtidas da análise realizada sobre o Diagrama em Treliças acima, pode-se construir uma expressão para a corrente elétrica resultante no topo e base da torre, e também obter uma expressão geral para a corrente em qualquer ponto da torre, com o intuito especificamente de se calcular a corrente resultante no meio da torre. A Eq. 14 traz a expressão de corrente para o topo da torre. A Eq. 15 apresenta a expressão da corrente para a base da torre, e a Eq. 16, por sua vez, mostra a expressão desenvolvida para a corrente resultante em qualquer ponto P da torre.

$$i_{TOPO}(t) = i(t) + K_g i(t-2T) + K_T K_g i(t-2T) + K_T K^2_g i(t-4T) + K^2_T K^2_g i(t-4T) + K^2_T K^3_g i(t-6T) + K^3_T K^3_g i(t-6T) + K^3_T K^4_g i(t-8T) + K^4_T K^4_g i(t-8T) + \dots$$

$$i_{TOPO}(t) = \underbrace{i(t)}_{\text{Corrente injetada na torre}} + \underbrace{\sum_{n=1}^N (K_g)^n (K_T)^{n-1} i(t-2nT)}_{\text{Somatório das reflexões oriundas da base da torre}} + \underbrace{\sum_{n=1}^N (K_g)^n (K_T)^n i(t-2nT)}_{\text{Somatório das reflexões ocorridas no topo da torre}}$$

$$i_{TOPO}(t) = i(t) + (1 + K_T) \sum_{n=1}^N (K_g)^n (K_T)^{n-1} i(t-2nT). \quad \text{Eq. 14}$$

$$i_{BASE}(t) = i(t-T) + K_g i(t-T) + K_T K_g i(t-3T) + K_T K^2_g i(t-3T) + K^2_T K^2_g i(t-5T) + K^2_T K^3_g i(t-5T) + K^3_T K^3_g i(t-7T) + K^3_T K^4_g i(t-7T) + \dots$$

$$i_{BASE}(t) = \underbrace{i(t-T)}_{\text{Corrente inicial na base da torre}} + \underbrace{\sum_{n=1}^N (K_g)^n (K_T)^{n-1} i(t-(2n-1)T)}_{\text{Somatório das reflexões ocorridas na base da torre}} + \underbrace{\sum_{n=1}^N (K_g)^n (K_T)^n i(t-(2n+1)T)}_{\text{Somatório das reflexões oriundas do topo da torre}}$$

$$i_{BASE}(t) = (1 + K_g) \left[i(t-T) + \sum_{n=1}^N (K_g)^n (K_T)^n i(t-(2n+1)T) \right]. \quad \text{Eq. 15}$$

$$i_{ponto P}(t) = \underbrace{i(t-T')}_{\text{Corrente inicial no ponto P}} + \underbrace{\sum_{n=1}^N (K_g)^n (K_T)^{n-1} i(t-2nT+T')}_{\text{Somatório das reflexões oriundas da base da torre}} + \underbrace{\sum_{n=1}^N (K_g)^n (K_T)^n i(t-2nT-T')}_{\text{Somatório das reflexões oriundas do topo da torre}}, \quad \text{Eq. 16}$$

onde: $T = \frac{L}{c}$; $T' = \frac{L-h}{c} = \frac{l}{c}$; h é a altura onde se encontra o ponto P;

l é o comprimento inicial até o ponto P; c é a velocidade da luz;

As expressões para os coeficientes de reflexão de corrente no topo e na base da torre, respectivamente K_T e K_g , são, então, dadas pela Eq. 17 [26].

$$K_T = \frac{Z_T - Z_{CH}}{Z_T + Z_{CH}}; \quad K_g = \frac{Z_T - R_g}{Z_T + R_g}. \quad \text{Eq. 17}$$

Para a primeira análise quando não se considera a influência do canal; isto é, a impedância de canal sendo, portanto, infinita (o que provoca a injeção de toda a corrente de descarga para a torre, $i(t) = i_0(t)$), as expressões para os coeficientes de reflexão de corrente no topo e na base da torre, respectivamente K_T e K_g , são, então, dadas por:

$$K_T = -1; \quad K_g = \frac{200 - 20}{200 + 20} = \frac{180}{220} = 0,82. \quad \text{Eq. 18}$$

A partir dos valores obtidos para os coeficientes de reflexão nos pontos de descontinuidade da torre, topo e base, podem-se iniciar os cálculos necessários para a obtenção das correntes nos pontos desejados: topo, base e meio da torre. A análise se dará para uma corrente impulsiva de descarga apresentada na Fig. 25, com $K_t = -1$, $K_g = 0,82$, $T = 0,15 \mu\text{s}$ e o tempo variando de $-1 \mu\text{s}$ a $100 \mu\text{s}$.

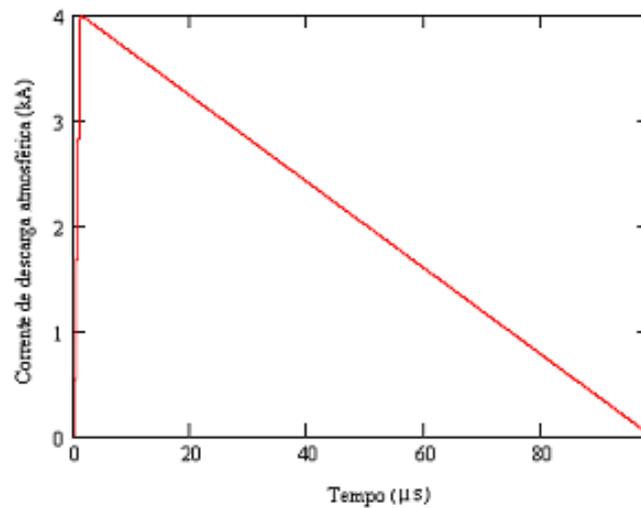


Fig. 25 – Forma de onda de corrente de descarga para a representação por rampas.

De posse dos dados necessários para iniciar a análise desejada sobre o comportamento da corrente que flui ao longo da torre a partir da aplicação de uma corrente impulsiva de descarga atmosférica, serão apresentadas as respostas da análise nas Figs. 26, 27 e 28, que são as respostas de corrente para o topo, a base e o meio da torre, respectivamente. As Figs. 29 e 30 representam os gráficos ampliados das formas de onda das correntes na base e no meio da torre, respectivamente.

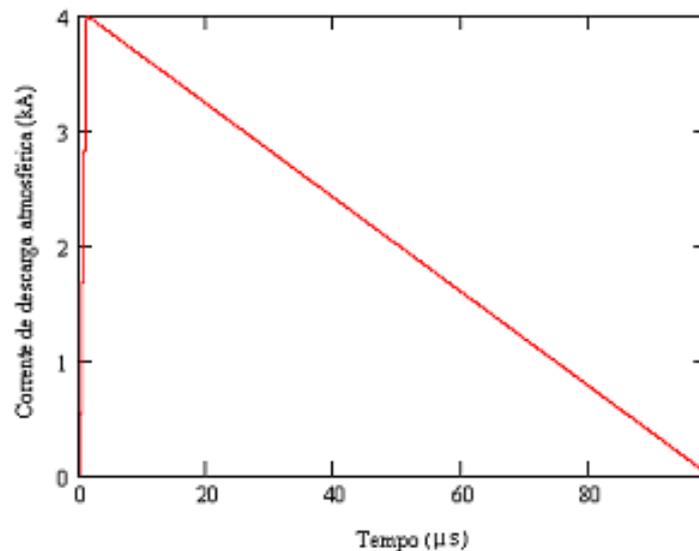


Fig. 26 – Forma de onda de corrente no topo da torre.

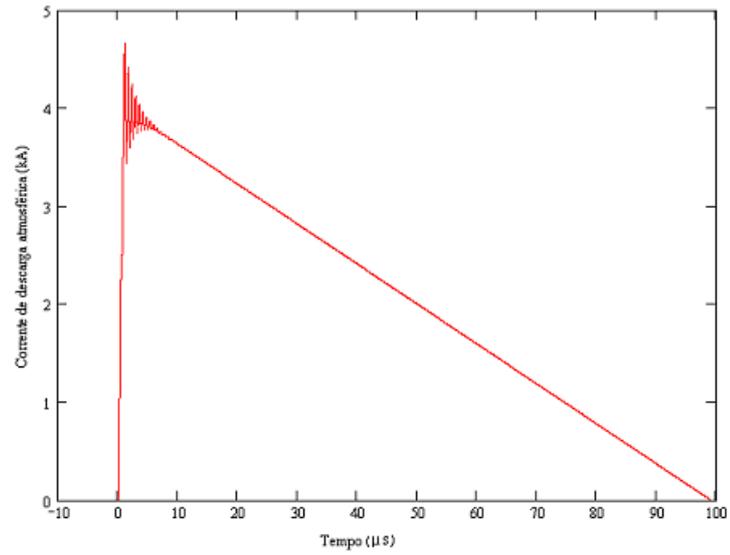


Fig. 27 – Forma de onda de corrente na base da torre.

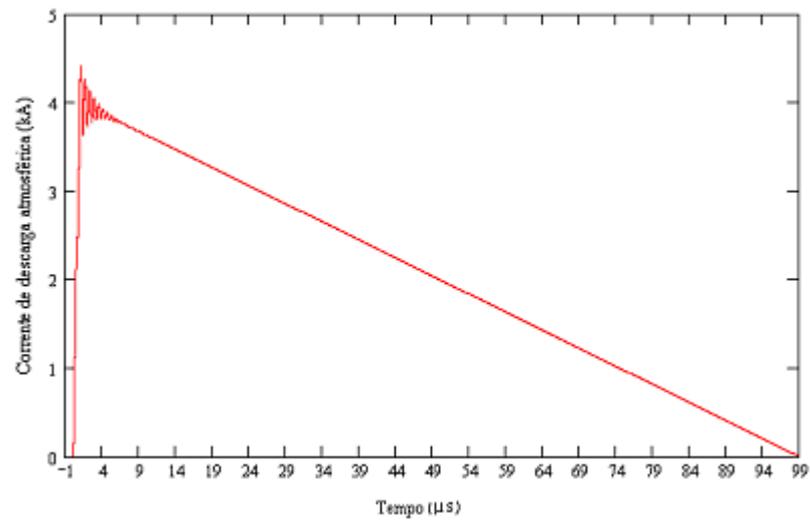


Fig. 28 – Forma de onda de corrente no meio da torre.

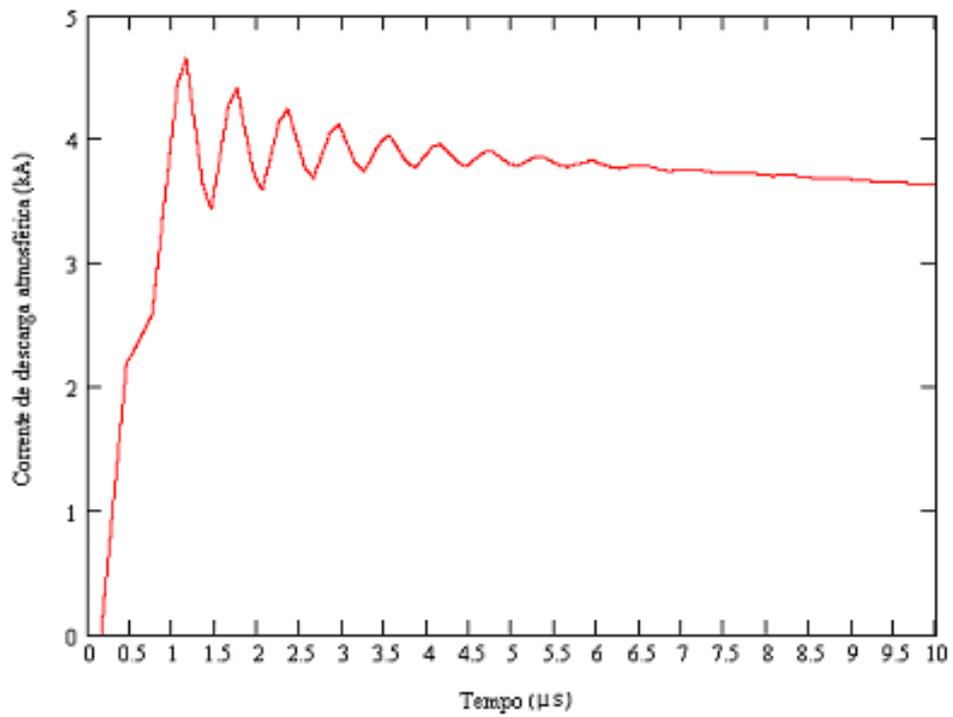


Fig. 29 – Gráfico ampliado da forma de onda de corrente na base da torre.

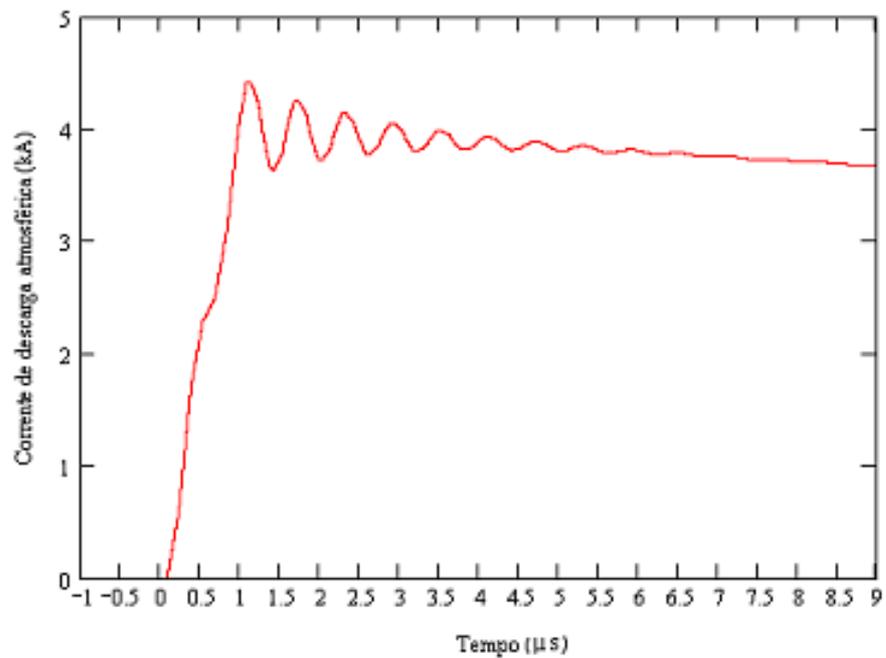


Fig. 30 – Gráfico ampliado da forma de onda de corrente no meio da torre.

As oscilações apresentadas nos gráficos das correntes de descarga no meio e na base da torre se concentram nos primeiros instantes da descarga e são devidas ao fato de as primeiras contribuições das reflexões, ocorridas nos pontos de descontinuidade de impedância da torre, serem mais expressivas que os demais valores de reflexões. Além disso, a cada reflexão no topo, há uma inversão do sinal da onda refletida o que garante contribuições positivas e negativas à onda incidente resultando num comportamento oscilatório da corrente resultante. Isso se deve aos próprios valores dos coeficientes de reflexão no topo e base da torre possuírem módulos menores ou iguais à unidade.

A segunda análise considera a impedância de canal, Z_{CH} , finita, cujo valor é três vezes o valor da impedância de surto (característica) da torre. O novo valor de impedância de canal gerará um valor diferente da primeira análise para o coeficiente de reflexão no topo da torre. Os valores dos coeficientes de reflexão no topo e na base da torre são, portanto, dados por:

$$K_T = -0,5; \quad K_g = 0,82. \quad \text{Eq. 19}$$

A corrente de descarga atmosférica, $i_0(t)$, que atinge o topo da torre tem sua forma de onda dada pela Fig. 25. Há, porém, um divisor de corrente gerado entre as impedâncias de canal e de surto da torre fazendo com que apenas parte da corrente $i_0(t)$ seja transferida, ou flua, pela torre. A corrente que flui pelo corpo da torre foi denominada $i(t)$, e seu valor é dado pela Eq. 20. A Fig. 31 esboça, portanto, o gráfico correspondente à corrente $i(t)$ para $K_t = -0,5$, $K_g = 0,82$, $T = 0,15 \mu\text{s}$ e o tempo variando de $-1 \mu\text{s}$ a $100 \mu\text{s}$.

$$i(t) = \left(\frac{Z_{CH}}{Z_{CH} + Z_T} \right) i_0(t) = \frac{3}{4} i_0(t). \quad \text{Eq. 20}$$

Conhecidos os dados necessários para iniciar a análise sobre o comportamento da corrente que flui pela torre a partir da aplicação de uma corrente impulsiva de descarga atmosférica para uma impedância de canal finita, pode ser calculada a corrente nos pontos de interesse da torre. As respostas da análise de corrente estão apresentadas nas Figs. 32, 33 e 34,

respectivamente as respostas de corrente para o topo, a base e o meio da torre. As Figs. 35 e 36 representam os gráficos ampliados das formas de onda das correntes na base e no meio da torre, respectivamente.

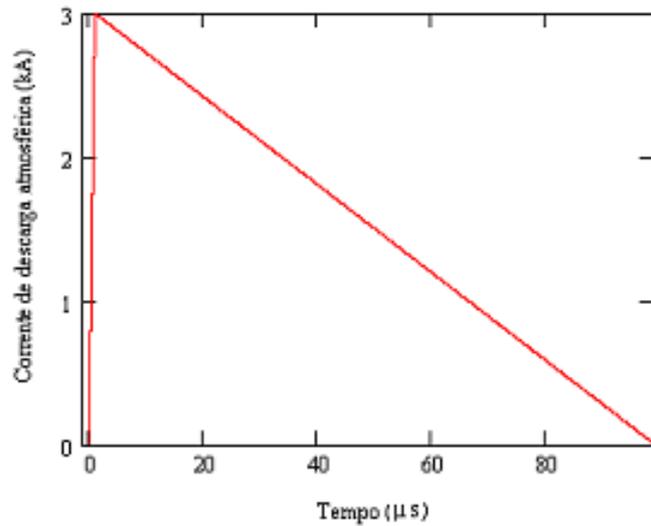


Fig. 31 - Forma de onda de corrente que flui pela torre para uma corrente de descarga apresentada na Fig. 25.

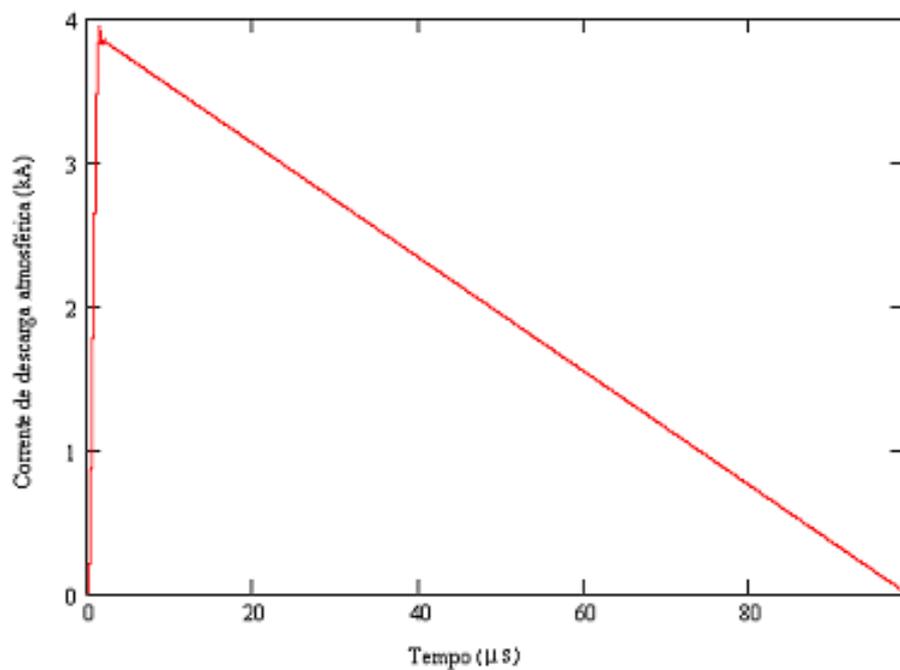


Fig. 32 – Forma de onda de corrente no topo da torre.

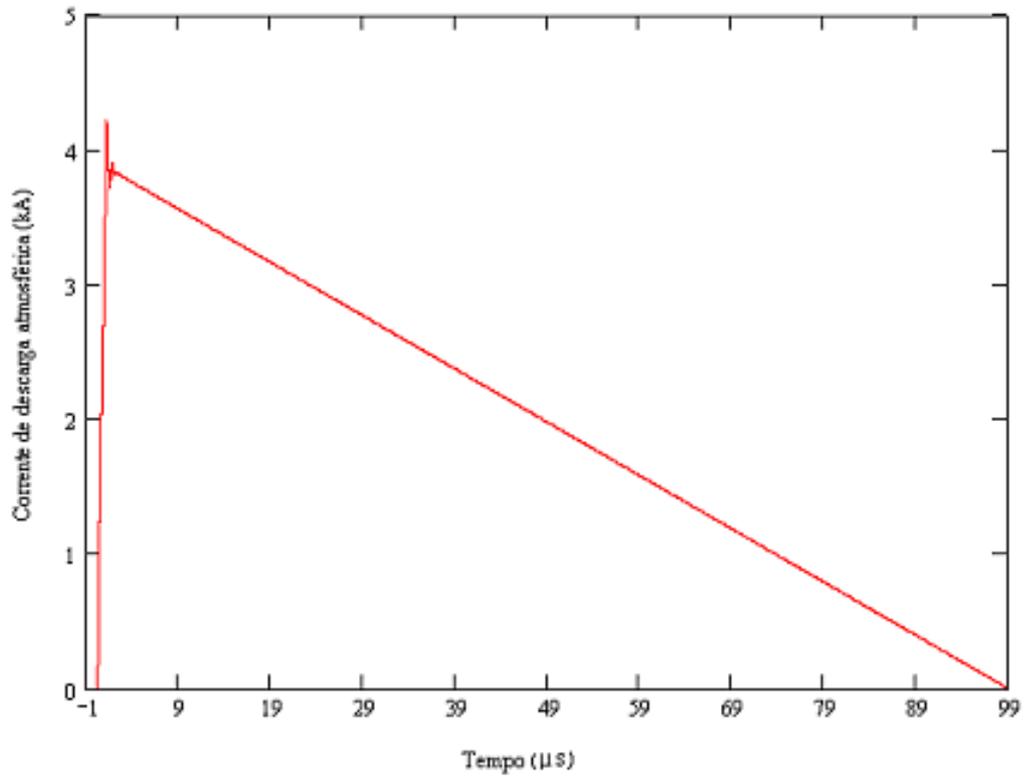


Fig. 33 – Forma de onda de corrente na base da torre.

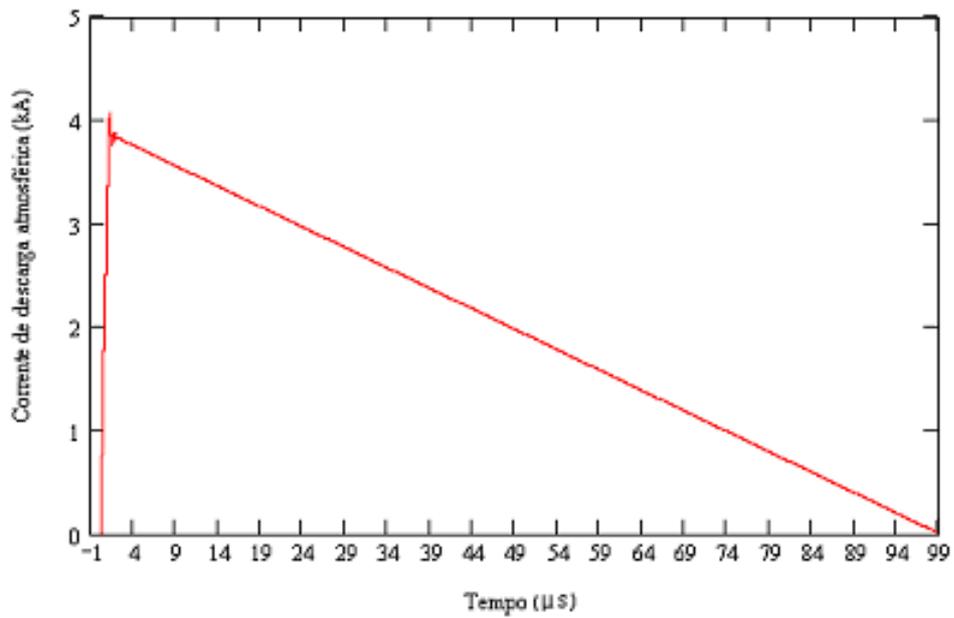


Fig. 34 – Forma de onda de corrente no meio da torre.

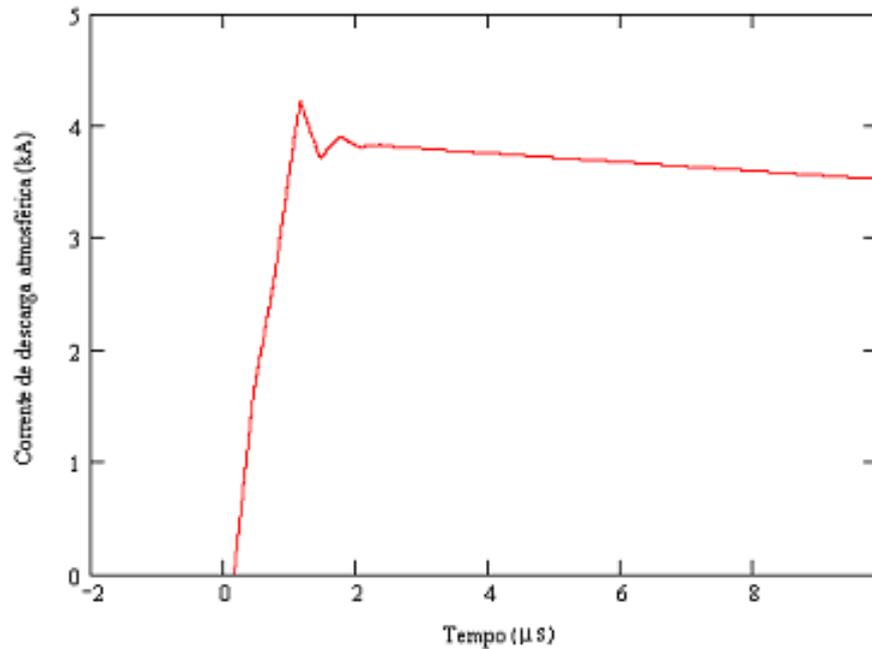


Fig. 35 – Gráfico ampliado da forma de onda de corrente na base da torre.

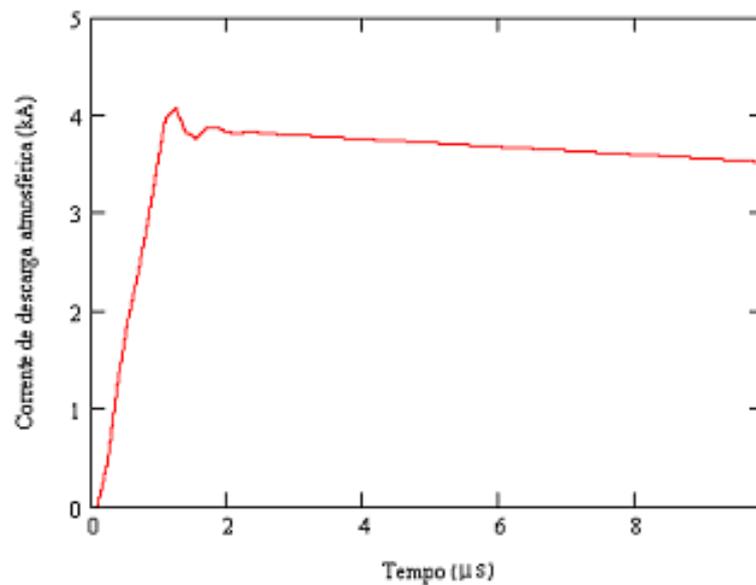


Fig. 36 – Gráfico ampliado da forma de onda de corrente no meio da torre.

Novamente, percebeu-se um comportamento oscilatório para os instantes iniciais da corrente de descarga atmosférica nas correntes de descarga no topo, na base e no meio da torre. Essas oscilações são menores e possuem uma duração menor que aquelas oscilações apresentadas nas correntes de descarga para o caso em que se tinha o canal de descarga ideal. Isso é devido a, pelo fato de o canal de descarga ser real, o coeficiente de reflexão no topo

possuir menor módulo que para o caso do canal de descarga ideal. Por esse motivo as reflexões são menos expressivas, apresentando oscilações menores.

Os resultados obtidos das simulações computacionais sobre as respostas de corrente elétrica para os pontos de maior interesse em uma torre de linha de transmissão, topo, base e meio da torre, para as duas condições analisadas, impedância de canal ideal e real, mostraram que a corrente de descarga atmosférica que atinge a torre, $i_0(t)$, não sofre mudanças consideráveis na sua forma em seu percurso sobre a torre de linha de transmissão de energia elétrica. Esse comportamento permite desenvolver circuitos eletrônicos dedicados à detecção de descargas atmosféricas com base no próprio sinal de corrente da descarga associada $i_0(t)$ e evita maiores especulações acerca do sinal de corrente que flui pela torre decorrente de uma descarga atmosférica.

O modelo de simulação computacional adotado para obtenção do valor de corrente que flui sobre a torre em seu topo, meia altura e base (pé da torre), desenvolvido por Zhang et al [27], calcula a impedância de uma torre da linha de transmissão a partir de um modelo computacional, modelo este que permite obter tanto informação de tensão quanto de corrente entre dois pontos e em algum trecho entre duas alturas da torre, respectivamente. O modelo foi desenvolvido para que a torre da linha de transmissão fosse vista pela corrente de descarga incidente no topo da torre como um conjunto de indutâncias e capacitâncias distribuídas ao longo de um comprimento, além da inserção obrigatória de uma resistência de terra. Ou seja, para cada trecho de torre está associado um conjunto LC, e por fim, tem-se conectada uma resistência de terra, R. O número de conjuntos LC é tanto maior quanto maior for a altura da torre e menor for o trecho de torre a ser representado por cada conjunto. A Fig. 37 mostra um desenho de uma das torres de linha de transmissão utilizadas pela CHESF em 230 kV com as suas respectivas dimensões.

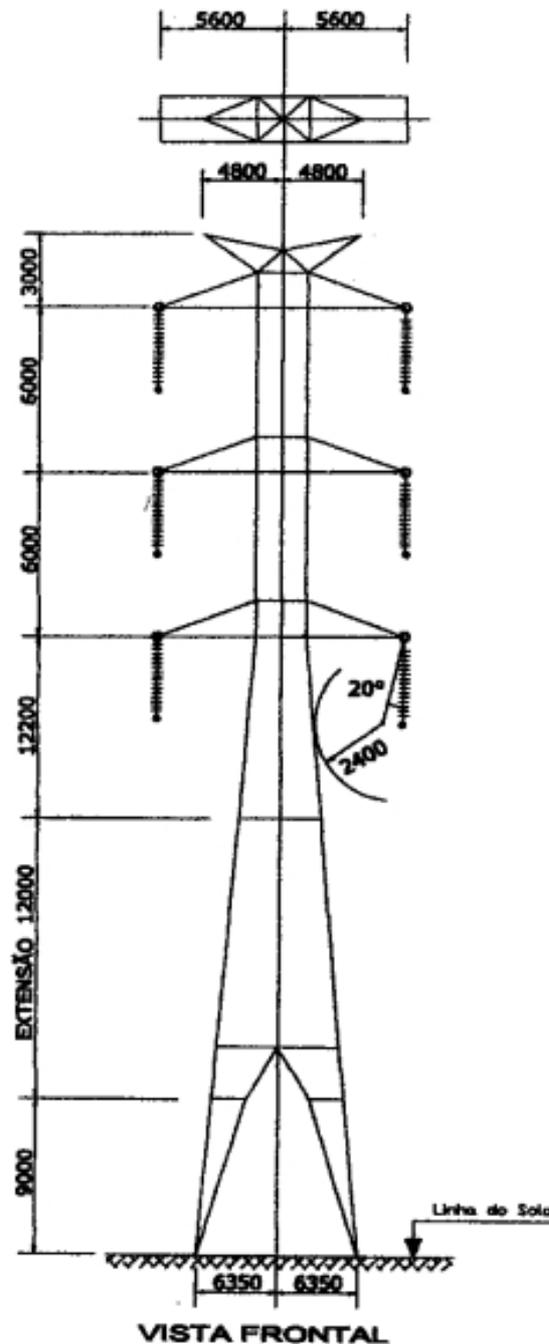


Fig. 37 – Esboço de torre de linha de transmissão da CHESF de 230 kV e suas dimensões.

Para o caso da torre de uma linha de transmissão de tensão nominal de 230 kV da CHESF, cuja altura é de 48 m e formato como mostrado na Fig. 37, foram calculados os valores de cada conjunto LC, em que cada um desses conjuntos representa um trecho de 2 m de torre e, juntos, totalizam 24 conjuntos ($n = 24$). A resistência de pé de torre escolhida foi de 20 Ω . O sinal de corrente de descarga injetada no topo da torre possui forma de onda dada

por uma descarga atmosférica típica, $8/20 \mu s$ e 10 kA de pico de corrente. No pé (base) da torre, no entanto, encontra-se a resistência de aterramento cujo valor escolhido foi de 20Ω .

Os resultados das simulações para o modelo de reatâncias distribuídas para representação de uma torre de linha de transmissão de energia elétrica serão aqui omitidos, mas mostraram boa concordância com aqueles obtidos das simulações realizadas sobre o modelo de linha de transmissão apresentado anteriormente [28,29]. Esses modelos, portanto, validam a ideia de que o formato e magnitude do sinal de corrente de descarga atmosférica ao atingir uma torre de linha de transmissão não sofrem consideráveis modificações. As simulações permitiram iniciar a concepção do sistema eletrônico proposto dedicado a detectar uma descarga atmosférica incidente sobre as estruturas de uma linha de transmissão de energia elétrica, uma vez que já é conhecido o sinal de corrente elétrica que flui sobre a torre, decorrente de uma descarga atmosférica.

Capítulo 5

O Sistema Sensor Dedicado à Detecção de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão

De posse dos resultados obtidos dos modelos de simulação adotados, pôde-se conhecer o comportamento da corrente que flui sobre a torre de linha de transmissão quando da ocorrência de descargas atmosféricas. A partir desse conhecimento, iniciou-se a fase de desenvolvimento do sistema eletrônico dedicado à detecção de descargas atmosféricas no tocante inicialmente à sua concepção. Essa etapa de concepção e implementação do sistema sensor foi realizada no Laboratório de Fotônica do Dep. de Eletrônica e Sistemas da UFPE, sendo os blocos 1 e 2 do diagrama da Fig.29 apenas testados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG posteriormente. Esse diagrama permite visualizar as partes do sistema isoladamente para melhor compreender seu funcionamento, e é desenvolvido para os testes visando à obtenção dos resultados experimentais a serem realizados no Laboratório de Alta Tensão. Os resultados experimentais serão apresentados em capítulo posterior. A Fig. 38 apresenta o diagrama em blocos do sistema eletrônico dedicado à detecção de descargas atmosféricas.

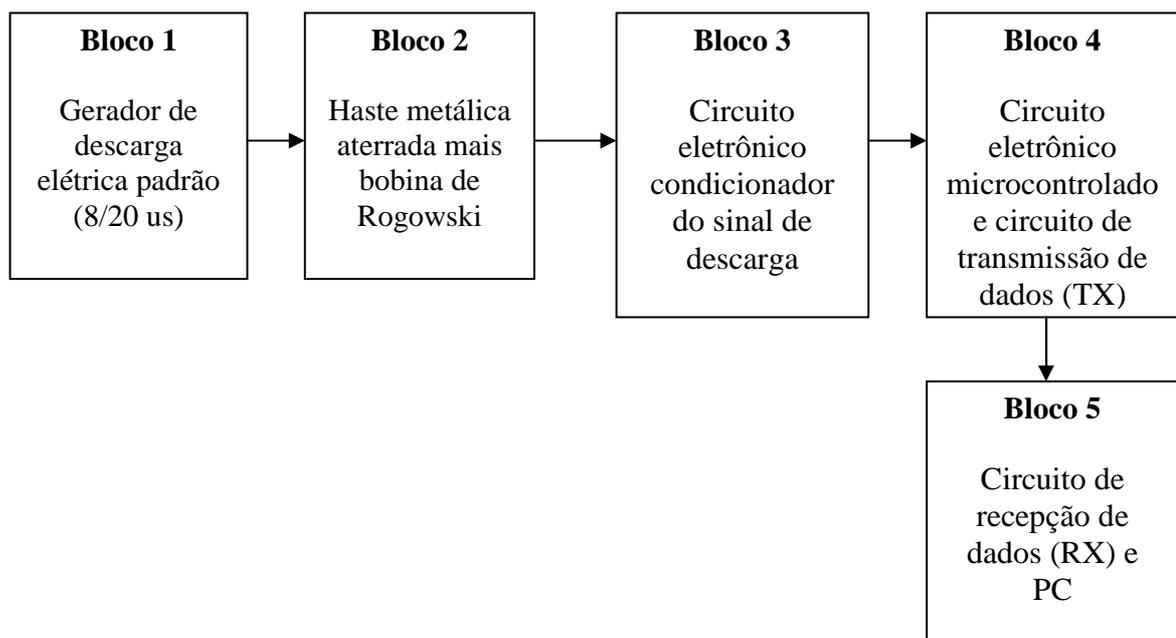


Fig. 38 - Diagrama em blocos do sistema eletrônico proposto para detecção de descargas atmosféricas em linhas de transmissão de energia elétrica.

O diagrama em blocos apresentado na Fig. 38 já foi elaborado para mostrar a sequência dos testes a serem realizados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG. A partir da geração do sinal de descarga atmosférica, o sinal incidirá sobre uma haste metálica devidamente aterrada. A bobina de Rogowski que envolve a haste em sua meia altura fornecerá um sinal de tensão proporcional à corrente de descarga atmosférica aplicada à haste. Os terminais da bobina de Rogowski, por sua vez, estarão conectados ao circuito eletrônico cuja função é condicionar o sinal de descarga para que ele possa ser medido pelo próximo estágio, o circuito eletrônico microcontrolado. Por fim, acoplado ao circuito microcontrolado, encontra-se um PC, em cuja tela se poderá visualizar o pico do sinal de descarga.

Descrição da função de cada bloco será feita a seguir.

Bloco Gerador de Descarga Elétrica:

O gerador de descarga elétrica, na realidade mais conhecido por gerador de correntes impulsivas ou gerador de descargas, é um equipamento normalmente presente nas instalações de um laboratório de alta tensão. Os sinais de corrente impulsiva a serem gerados para os testes sobre o sistema eletrônico proposto segue o padrão $8/20 \mu s$ com valores de pico inferiores a 10 kA.

O gerador é composto por um conjunto de capacitores conectados a duas esferas metálicas com pequena separação entre elas, separação esta ajustada por um operador humano à distância. Os capacitores são fortemente carregados e, quando o espaçamento entre as esferas for pequeno suficiente para criar no centelhador (*sparkgap*) um campo elétrico que rompa a rigidez dielétrica do ar, dá-se a descarga que simula uma descarga atmosférica. Além dos capacitores e esferas metálicas, acompanham a montagem dos experimentos um varistor, que tem o papel de limitar a corrente de descarga, uma haste metálica em série com as esferas, um sensor bobina de Rogowski, um resistor *shunt* para ser conhecida a corrente de descarga sobre a haste, e um divisor de tensão universal para medir a tensão sobre o varistor. Quando ocorre a descarga dos capacitores pela quebra da rigidez dielétrica do ar, a corrente originada é limitada pelo varistor. A corrente flui pela haste metálica que está circundada pela bobina de Rogowski. A corrente, pela Lei de Ampère, gera um campo magnético variante no tempo sobre os enrolamentos da bobina

que, pela Lei de Faraday, fica submetida a uma tensão elétrica cujo pico, como será discutido, é proporcional ao pico da corrente de descarga elétrica.

O divisor de tensão universal é um componente de montagem redundante para se conhecer a tensão sobre o varistor.

A Fig. 39 mostra uma vista geral do gerador de impulso do Laboratório de Alta Tensão.



Fig. 39 – Fotografia do circuito gerador de impulsos de corrente, Laboratório de Alta Tensão, UFCG.

Bloco Haste Metálica Aterrada e Sensor Bobina de Rogowski:

Esse bloco consiste em uma bobina de Rogowski acoplada a uma haste metálica (aço) aterrada, sobre a qual fluirá a corrente de descarga atmosférica. Além disso, há um limitador da corrente de descarga atmosférica dado por um varistor.

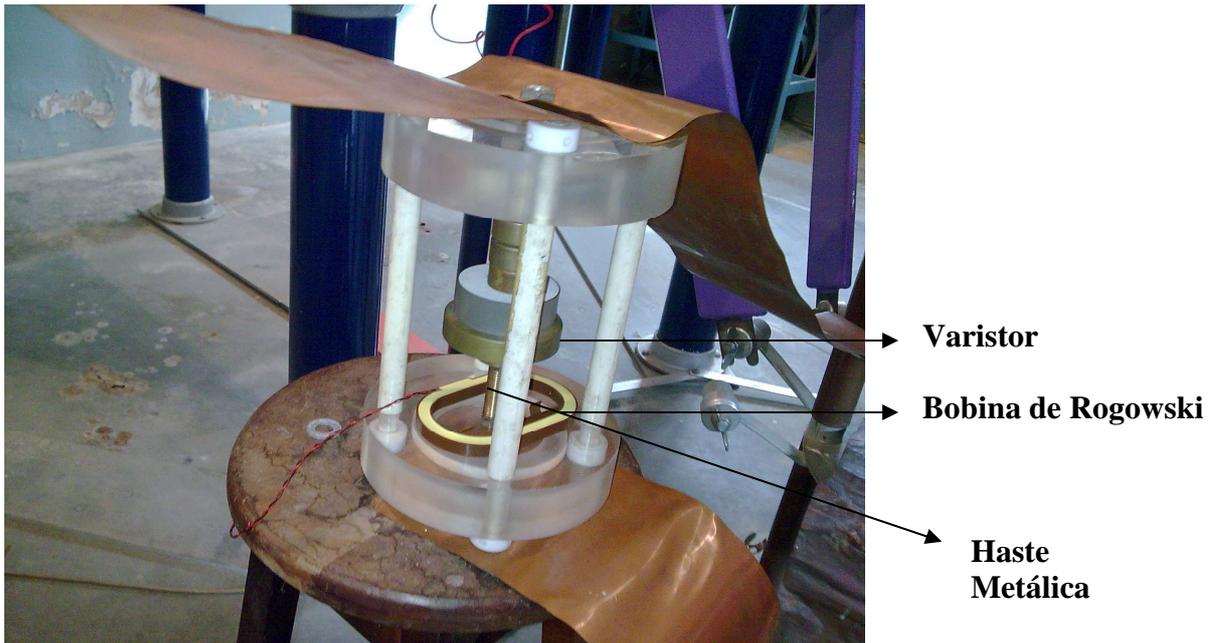


Fig. 40 – Fotografia do conjunto de componentes de montagem dados por sensor bobina de Rogowski, varistor e haste metálica.

O Sensor Bobina de Rogowski

A bobina de Rogowski é um sensor de simples construção e funcionamento, porém bastante eficaz em diversas aplicações. Seu princípio de funcionamento se baseia nas Leis de Ampère e de Faraday. A Fig. 41 apresenta o diagrama de uma bobina de Rogowski.

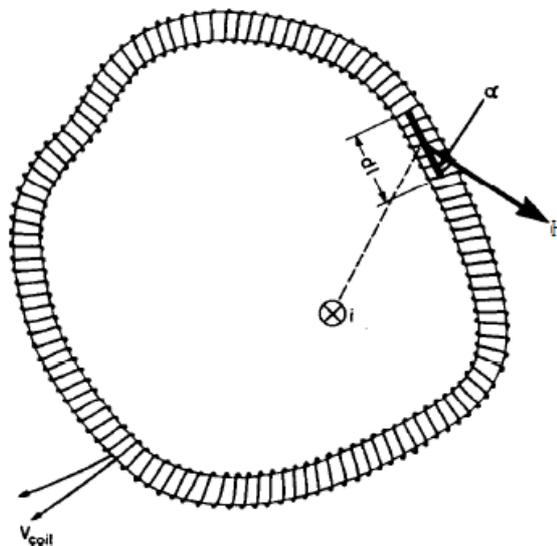


Fig. 41 - Diagrama de uma bobina de Rogowski [30].

Uma corrente elétrica i , variante no tempo, ao fluir através da região circundada pela bobina, produzirá um campo magnético \vec{H} no interior da bobina, de acordo com a Lei de Ampère, e esse campo, pela Lei de Faraday, criará uma tensão elétrica nos enrolamentos da bobina. As Eqs. 21, 22 e 23 mostram as equações que regem as Leis do Eletromagnetismo aplicadas à bobina de Rogowski.

$$\oint H \cos \alpha dl = i, \quad \text{Eq. 21}$$

$$\Phi = \int d\Phi = \mu_0 n A \int H \cos \alpha dl = \mu_0 n A i, \quad \text{Eq. 22}$$

$$v_{coil} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 n A \frac{di}{dt} = -M \frac{di}{dt}. \quad \text{Eq. 23}$$

A bobina de Rogowski possui, portanto, como resposta a uma corrente elétrica variante no tempo i atravessando-a em seu plano, uma tensão elétrica proporcional à taxa de variação temporal da corrente, tendo como constante de proporcionalidade a indutância mútua M dada na Eq. 23.

A bobina de Rogowski foi escolhida como sensor, porque sua característica de linearidade atende satisfatoriamente às necessidades de medição do sistema eletrônico proposto. A Tabela 2 compara a bobina com outros sensores, sob aspectos importantes para instrumentação e medição de corrente de descarga atmosférica.

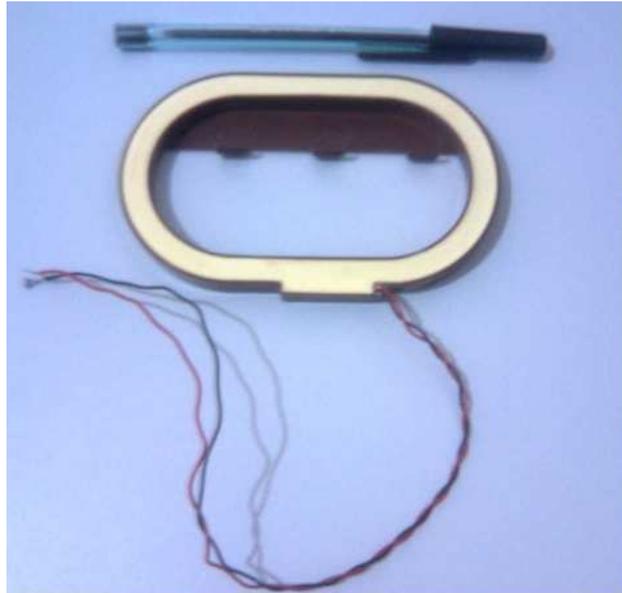


Fig. 42 – Fotografia do sensor bobina de Rogowski utilizado nos testes realizados no Laboratório de Alta Tensão.

Tabela 2 – Comparação entre a bobina de Rogowski e sensores usuais de corrente de descarga atmosférica [30].

	Resistor <i>Shunt</i>	TC	Sensor de Efeito Hall	Bobina de Rogowski
Isolação elétrica	☹	☺	☺	☺
Peso	☹	☺	☺	☺
Resposta em baixas frequências	☺	☺	☺	☺
Resposta a correntes impulsivas	☺	☹/☺	☺	☺
Resposta de saída	Tensão	Corrente	Tensão	Tensão
Instalação	☹	☺	☺	☺
Custo	☹	☺	☺	☺

☹ = pior

☺ = melhor

A Tabela 2 mostra que a escolha da bobina de Rogowski como sensor para o sistema eletrônico de detecção de descargas atmosféricas em linhas de transmissão foi acertada, pois suas características respondem à altura às exigências impostas pelo comportamento do sinal de corrente de descarga atmosférica que flui sobre a estrutura

da torre de linha de transmissão. O sistema eletrônico proposto ficará instalado sobre a estrutura metálica treliçada da torre.

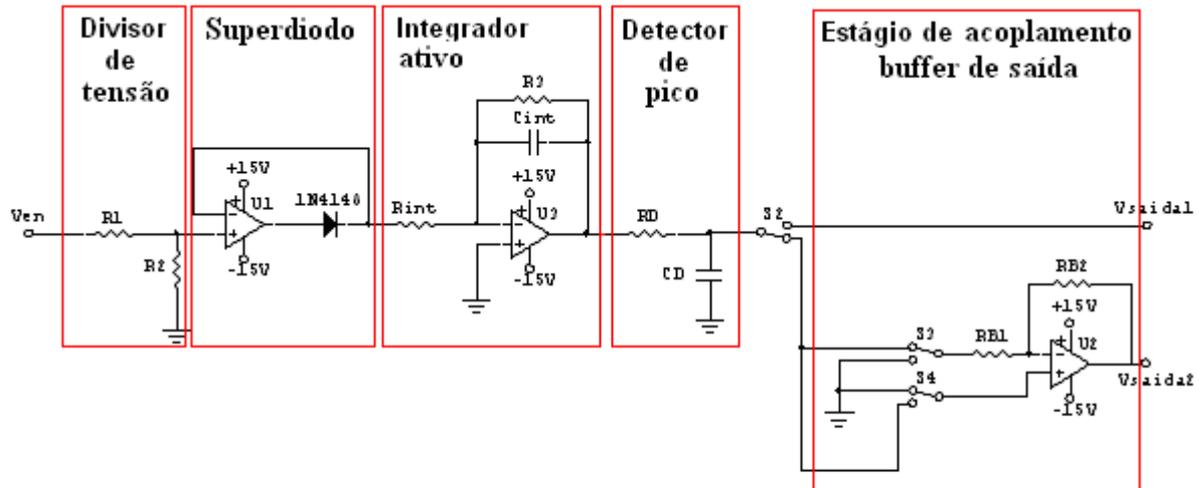
Bloco Circuito Eletrônico Condicionador de Sinais

O circuito eletrônico condicionador de sinais foi concebido de maneira a condicionar o sinal de descarga obtido nos terminais da bobina de Rogowski de forma a ser tratado e lido pelo circuito eletrônico microcontrolado. O referido circuito é composto por um conjunto de outros circuitos cuja função é aferir o sinal de descarga e seu respectivo valor de pico.

O circuito eletrônico condicionador de sinais tem a função de condicionar o sinal de descarga a valores de tempo que sejam superiores àqueles correspondentes aos limites de temporização do microcontrolador utilizado, que é da ordem de 20 μ s. Esse tempo já é superior ao tempo de crista do sinal de descarga, o que afetaria as medições sem a presença de um circuito RC como detector de pico.

O menor sinal medido pela entrada analógica do microcontrolador é da ordem de 20 mV, sendo o intervalo entre dois sinais que serão discriminados pelo microcontrolador. O valor de 20 mV é, portanto, um parâmetro de precisão do circuito microcontrolado. A seguir será apresentado o esquema elétrico do circuito eletrônico condicionador de sinais.

O circuito eletrônico condicionador de sinais é composto de circuitos amplificadores (amplificadores operacionais e resistores) cuja função é manter em níveis razoáveis os valores de amplitudes do sinal de descarga para que o circuito microcontrolado possa lê-lo. O circuito condicionador de sinais é um circuito detector de pico cuja função é atrasar o sinal de descarga de maneira que haja tempo suficiente para o circuito microcontrolado ler o sinal de descarga e manter estável a amplitude a ser medida e os estágios de acoplamento elétrico (*buffers*) para evitar descasamento de impedâncias. Um superdiodo é usado para eliminar a parte negativa do sinal de entrada obtido dos terminais da bobina de Rogowski e também eliminar a tensão reversa do diodo utilizado. A Fig. 43 mostra o esquema elétrico desenvolvido para o circuito eletrônico condicionador de sinais.



Valores obtidos após testes no Laboratório de Eletrônica:

$R_D = 330\Omega$ e $C_D = 100\text{nF}$;
 $R_3 = 1\text{M}$; $R_{int} = 4\text{k}\Omega$; $C_{int} = 1\text{nF}$;
 $R_1 = 100\text{k}$; $R_2 = 1\text{k}$;
 $U_1 = U_2 = \text{LF351}$;

Fig. 43 – Esquema elétrico do circuito eletrônico condicionador de sinais.

O esquema elétrico mostrado na Fig. 43 apresenta seus circuitos internos para se ter melhor clareza do seu funcionamento. Será feita a seguir a descrição de cada circuito interno do circuito eletrônico condicionador de sinais.

i. Circuito Divisor de Tensão

Os testes realizados sobre o sensor bobina de Rogowski mostraram que para uma faixa de valores de pico de amplitude da corrente impulsiva entre 2 kA e 8 kA, os valores de pico de amplitude de tensão correspondentes oscilaram entre 150 V e 400 V.

Como pode ser visto no esquema elétrico da Fig. 43, os circuitos que possuem amplificador operacional, trazem com eles a limitação imposta pela alimentação DC dos amplificadores. Isso quer dizer que, os sinais de tensão atuantes nas entradas dos operacionais, para o caso do circuito da Fig. 43, estão limitados superior e inferiormente a +15 V e – 15 V, respectivamente.

A imposição dos amplificadores operacionais justifica a adição, à entrada do circuito eletrônico condicionador de sinais, do circuito divisor de tensão pelos resistores R_1 e R_2 visualizados na Fig. 43.

ii. O Circuito Superdiodo

O circuito superdiodo consiste, na realidade, em um diodo utilizado como uma chave eletrônica por onde sinais polarizados positivamente ao diodo são conduzidos à sua saída, e sinais de polarização negativa ao terminal positivo do diodo são aterrados. A vantagem do superdiodo está no fato de ele poder atuar como retificador para sinais de poucos milivolts, enquanto que apenas o diodo tem a limitação de eliminar sinais, para o caso do diodo de silício, que possuam amplitude inferior a 0,7 V.

O propósito, porém, de se utilizar o circuito superdiodo está em poder selecionar sinais cujo valor de amplitude seja da ordem de poucos milivolts, mas também servir como um estágio de acoplamento para o sinal de entrada proveniente do sensor bobina de Rogowski e do divisor de tensão entre R1 e R2.

iii. Integrador Ativo

O circuito integrador ativo tem a função de realizar a operação de integração do sinal de saída do circuito divisor de tensão para obter a tensão correspondente à corrente impulsiva cujo valor de pico de amplitude se deseja medir. Sabe-se que o sinal obtido dos terminais do sensor bobina de Rogowski é proporcional à derivação temporal do sinal de corrente impulsiva circundado pela bobina.

O circuito integrador é dito ativo pelo fato de possuir um componente ativo em sua composição: nesse caso, o amplificador operacional. A resposta de saída do circuito integrador ativo é dada por:

$$v_{saída} = -\frac{1}{R_{int} C_{int}} \int v_{entrada} dt . \quad \text{Eq. 24}$$

A tensão de entrada será dada por:

$$v_{entrada} = v_{coil} \cdot \frac{R2}{R1 + R2}. \quad \text{Eq. 25}$$

A tensão de saída do circuito integrador ativo será dada por:

$$v_{saída} = -\frac{1}{R_{int} C_{int}} \int v_{coil} \cdot \frac{R2}{R1 + R2} dt = -\frac{R2}{R_{int} C_{int} (R1 + R2)} \int v_{coil} dt. \quad \text{Eq. 26}$$

A Eq. 26 mostra que existem quatro parâmetros de ajuste para a tensão de saída do circuito integrador ativo. Esta tensão deve ser ajustada de forma a não ser superior a +15 V e nem ser inferior a -15 V, pois sinais fora dessa faixa serão ceifados pelo circuito integrador. Os parâmetros são: R1, R2, R_{int} e C_{int}.

O resistor R3 tem a função de assegurar a continuação da realimentação negativa, pois foi visto anteriormente pela Transformada de Fourier que o sinal a ser medido possui grande concentração de componente DC, e sendo então utilizado um capacitor entre os terminais de entrada e saída do amplificador operacional, este último componente seria conduzido à condição de saturação e sua funcionalidade estaria comprometida. A inserção do resistor R3 na malha de realimentação negativa do amplificador operacional tem apenas a condição de se ter R3 com um valor muito grande, da ordem de megaohms.

iv. Circuito Detector de Pico

O circuito detector de pico utilizado está em sua configuração mais simples que compreende um estágio anterior com um superdiodo e circuito RC, como pode ser visto na Fig. 43. O conjunto formado pelo resistor e capacitor pode também ser chamado de integrador passivo ou filtro passa-baixas devido, sobretudo, às suas características de resposta em frequência.

A função do circuito detector de pico é estabilizar o valor de tensão medido obtido da saída do circuito integrador ativo para o valor de pico correspondente, e assim disponibilizar uma tensão razoavelmente constante

para que possa ser medida com boa precisão pelo circuito eletrônico microcontrolado.

v. **Estágio de Acoplamento de Saída**

A necessidade de se utilizar um estágio de acoplamento para a saída do circuito eletrônico condicionador de sinais está em evitar um descasamento de impedâncias entre a saída desse circuito e a entrada analógica do circuito eletrônico microcontrolado. Além disso, a polaridade do sinal na saída do circuito eletrônico condicionador de sinais poderá ser negativa, enquanto o microcontrolador que está disponível para a realização dos testes sobre os circuitos trabalha com tensões de polaridade positiva apenas. A ideia, porém, é substituir futuramente o microcontrolador por outro mais avançado ou acoplar ao circuito eletrônico condicionador de sinais um estágio multiplicador, onde o sinal seria multiplicado por ele próprio e assim sua polaridade seria sempre positiva.

Bloco Circuito Eletrônico Microcontrolado e Circuito de R.F para a Transmissão de Dados (TX)

O circuito eletrônico microcontrolado possui como principal componente um microcontrolador do tipo PIC16F873/877 cuja função é distinguir os vários níveis de tensão dos sinais que chegam a sua entrada analógica. A resolução é de aproximadamente 20 mV. Sua implantação e operação são relativamente simples, além de ser bastante familiar entre os alunos e profissionais de Eletrônica.

O circuito microcontrolado consiste essencialmente em um dispositivo microcontrolador, como aqueles comercialmente disponíveis da família PIC, e seus circuitos auxiliares de funcionamento. O circuito eletrônico microcontrolado é composto por duas interfaces: uma delas é o próprio PC (ou *notebook*) cuja comunicação é realizada por meio de sua porta serial RS-232 com o auxílio de um *software* de *hyperterminal* conhecido por RogerCom Serial; a segunda interface dá acesso aos pinos disponíveis do tranceptor TRF 2.4G, da empresa *Nordic*, que é

configurado como transceptor no modo de transmissão (TX). A Fig. 44 apresenta o diagrama elétrico do circuito eletrônico microcontrolado. Esse circuito é composto basicamente de um microcontrolador PIC16F873A e seus circuitos auxiliares, um conversor TTL/RS-232 e circuitos auxiliares, o próprio conector de comunicação serial DB-9 e a interface de comunicação do microcontrolador e o transceptor utilizado. A entrada analógica do circuito recebe o sinal de tensão correspondente ao sinal de corrente de descarga atmosférica. Para não tornar densa a Fig. 44, é omitida no esquema elétrico a interface composta pelo transceptor. As conexões do esquema serão mais bem detalhadas posteriormente.

A programação do microcontrolador, tanto para atuar no circuito eletrônico microcontrolado, como para servir de dispositivo de controle no circuito de transmissão de dados (módulo transmissor), foi feita em linguagem de programação C, linguagem de alto nível e que possibilita ao projetista melhor monitoração e manipulação do funcionamento do dispositivo microcontrolador dentro de sua função em cada circuito.

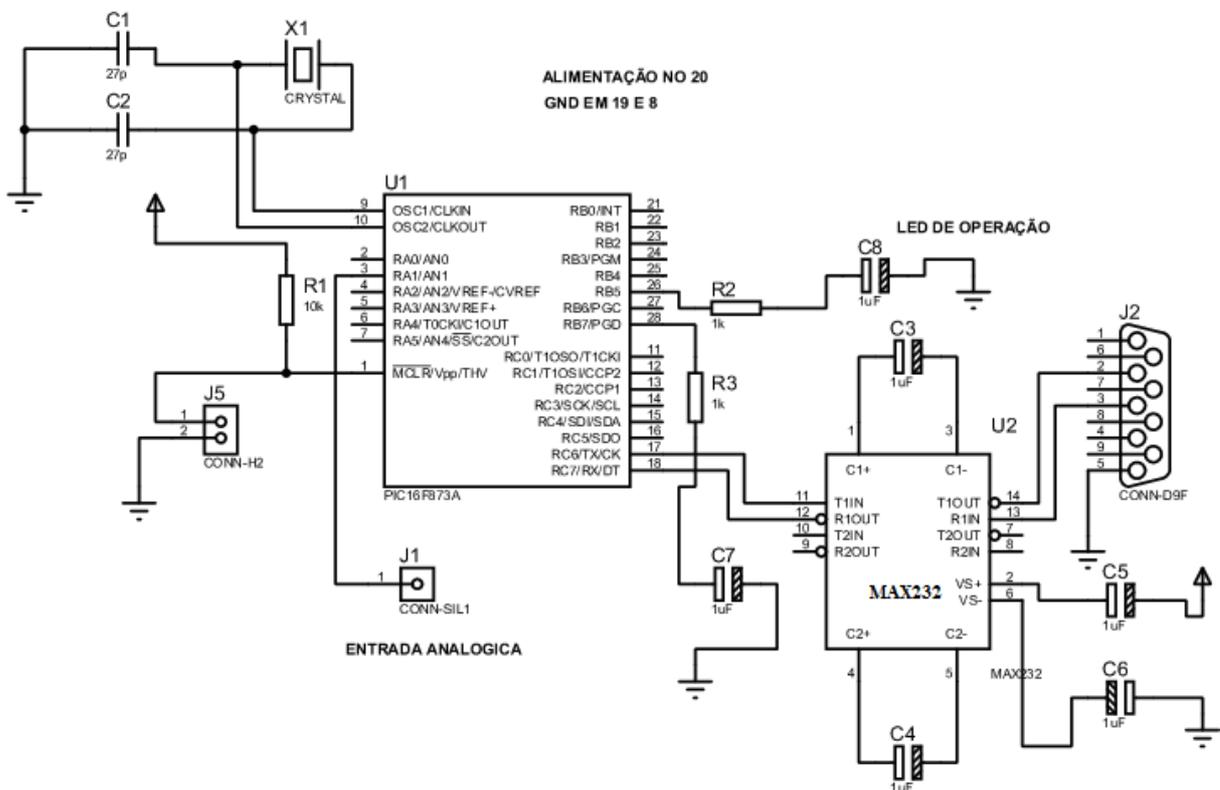


Fig. 44 – Esquema elétrico do circuito eletrônico microcontrolado.

Antes de apresentar o transceptor TRF 2.4G, uma visão geral do sistema transceptor em si que utilize o TRF 2.4G para a aplicação desejada será mostrada. Um sistema de R.F. é caracterizado pelo envio e recebimento de dados via ondas de rádio. O sistema transceptor proposto trabalhar no modo *half duplex* no qual um dos módulos transceptores está configurado como transmissor (TX) e o segundo módulo como receptor (RX). O módulo transmissor recebe os dados do circuito eletrônico microcontrolado e o módulo receptor disponibiliza os dados por meio de um PC. Cada módulo transceptor opera na banda de frequência conhecida por ISM cuja frequência central é 2,45 GHz.

A operação do sistema transceptor é de simples compreensão e será descrita a seguir. Ao ser ligado o circuito que contém o módulo transmissor, o transceptor entra em modo de transmissão, e ao receber dados do circuito eletrônico microcontrolado este módulo envia os dados via ondas de R.F. ao módulo receptor. Este, por sua vez, ao ser ligado, entra no modo de recepção. Ao receber os dados do módulo transmissor, o módulo receptor envia os dados, através da comunicação serial RS-232, para o PC ou *notebook* o que permite ao operador humano visualizar os dados dos testes do sistema sensor.

O transceptor TRF 2.4G consiste em uma antena, um sintetizador de frequência integrado, um amplificador de potência, um oscilador de cristal e um modulador. A potência de saída e os canais de frequência são facilmente programáveis utilizando 3 pinos de comunicação da interface serial. O consumo de corrente é baixo, apenas 10 mA, com uma potência de transmissão de 5 dBm.

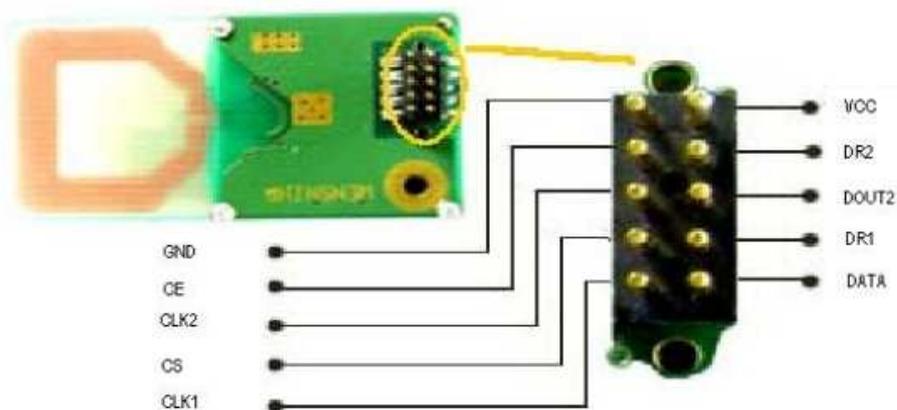


Fig. 45 – Fotografia do transceptor TRF 2.4G e seus pinos de comunicação.

As características gerais do dispositivo TRF 2.4G são:

- Alimentação de 1,9 a 3,3V;
- 125 canais ajustáveis na faixa de 2.400 MHz até 2.525 MHz;
- Comunicação *Half Duplex*;
- Modulação FSK;
- Taxa de dados: 1 Mbps ou 250 Kbps;
- Sensibilidade de -90 dBm.

O sistema transceptor composto dos módulos transmissor e receptor de R.F. é um sistema formado por diversos dispositivos de maneira a implementar um meio de comunicação sem fio entre um sistema sensor para detecção de descargas atmosféricas e um PC para visualização das informações referentes ao sistema sensor. Entre os dispositivos utilizados no sistema transceptor, pode-se destacar o microcontrolador, cuja função é configurar o módulo, controlar o acesso dos periféricos ao barramento de dados e empacotar os dados no protocolo próprio do TRF 2.4G. O dispositivo MAX232 tem a finalidade de compatibilizar eletricamente os dados trocados entre os elementos do circuito. O dispositivo R.F., por sua vez, é o responsável por efetivamente realizar o *link wireless* podendo operar nos modos de transmissão ou recepção. O sistema transceptor opera em comunicação fim-a-fim, onde toda comunicação de dados e configuração é realizada bit a bit. Desse modo, destaca-se como um dispositivo ágil e versátil e de configuração detalhada em matéria de transceptores de R.F.

A configuração escolhida e o controle do dispositivo de R.F. são tarefas do microcontrolador, cuja função durante a inicialização do sistema é configurar o dispositivo R.F. conforme as necessidades do projeto. Os requisitos de configuração são descritos a seguir:

- Taxa de dados de 1 Mbps;
- 8 bits de endereço, 8 bits de dados;
- Transceiver ID 0xE7;
- Portadora FSK em 2,4 GHz (ISM Norte-Americana);
- Serviço de código de redundância cíclica para veracidade dos dados recebidos.

Os microcontroladores utilizados nos circuitos transmissor e receptor, o PIC16F873A e o PIC16F877A respectivamente, possuem uma porta de comunicação serial USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*) também conhecida como SCI (*Serial Communications Interface*) que pode ser compatibilizada com o protocolo EIA-RS232C com a ajuda de um único *chip*, visto que os protocolos de comunicação da porta USART do microcontrolador, cujos dados estão no nível TTL, e da porta serial do PC, no nível EIA-RS232, são os mesmos. Os níveis de tensão da interface elétrica é que são diferentes. As Figs. 46 e 47 mostram como os bits de dados trafegam na porta USART do microcontrolador e na porta de comunicação serial do PC, respectivamente. Nota-se o mesmo formato de pacote de dados, mesmo protocolo, porém com os níveis lógicos “0” e “1” mapeados em níveis de tensão elétrica distintos.

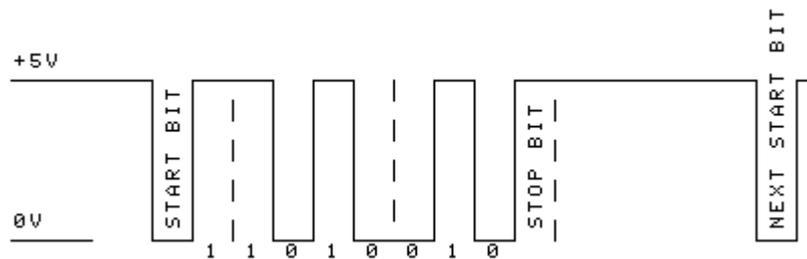


Fig. 46 – Níveis TTL dos bits de dados que trafegam na porta USART do microcontrolador.

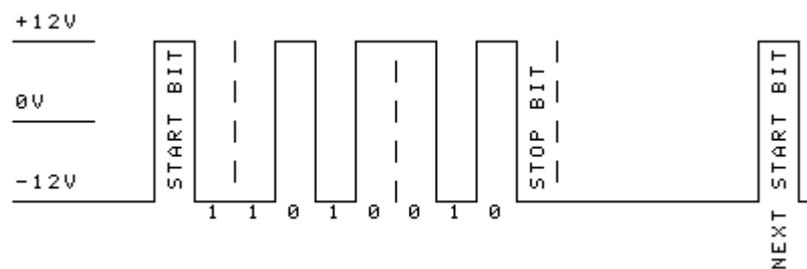


Fig. 47 – Níveis EIA-RS232 dos bits de dados que trafegam na porta de comunicação serial do PC.

O conector utilizado para a comunicação serial com o PC é o conector DB-9 padrão no qual apenas as linhas de *Transmit Data*, *Receive Data* e *Signal Ground* são utilizados.

O microcontrolador faz o controle dos dois dispositivos por meio de uma única porta de comunicação, utilizando a arquitetura em barramento de dados, onde o árbitro do acesso ao barramento é o próprio microcontrolador, permitindo que o envio ou

recebimento de dados pro meio do PIC ocorra ora com o PC, ora com o transceptor de R.F.

Uma etapa comum aos módulos de transmissão e recepção de R.F. é a configuração do transceptor realizada a partir de comandos enviados pelo microcontrolador PIC. A Fig. 48 mostra as conexões entre o PIC e o transceptor.

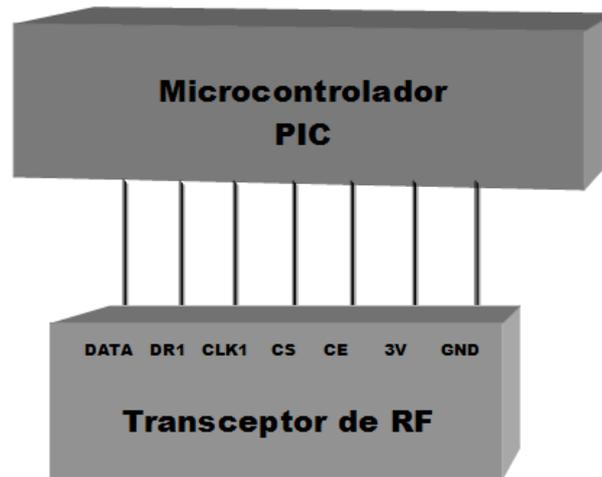


Fig. 48 - Diagrama de conexão entre o PIC e transceptor TRF 2.4G.

Os pinos de comunicação do transceptor TRF 2.4G possuem as seguintes funções:

- DATA: linha de dados de transmissão ou recepção;
- DR1: atua apenas no modo recepção, usado pelo microcontrolador para verificar se ocorreu recepção de dado pelo TRF;
- CLK1: sinal do *clock* fornecido ao transceptor de R.F. pelo microcontrolador.
- CS, CE: pinos seletores dos modos de transmissão, recepção e *stand by* dos módulos transceptores. A Tabela 3 mostra a tabela verdade de configuração do modo de comunicação do transceptor TRF 2.4G.

Tabela 3 – Pinos de seleção do modo de comunicação do transceptor TRF 2.4G.

CE	CS	Modo operação
1	0	Ativa transmissão ou recepção
0	1	Configuração
0	0	Stand by
1	1	Proibido

A Fig. 49 apresenta o esquema de montagem para os testes com o sistema transceptor de R.F. O diagrama mostra o sistema transceptor testado com a utilização de dois PCs: um PC, conectado ao circuito transmissor, e que é usado para inserção de dados de transmissão, e outro PC, conectado ao circuito receptor para visualização do recebimento dos dados transmitidos. Além disso, pode-se substituir o primeiro PC utilizado em conjunto com o circuito transmissor, pelo circuito eletrônico microcontrolado, o qual envia uma palavra originada da leitura que o microcontrolador realizou sobre a saída do circuito eletrônico condicionador de sinais.

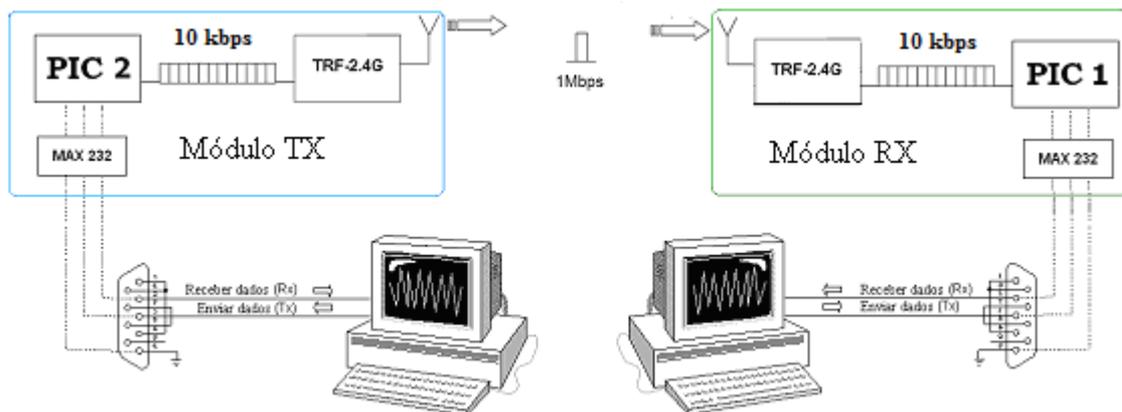


Fig. 49 – Esquema para testes do sistema transceptor de R.F.

A Fig. 50 apresenta o fluxograma do circuito transmissor onde se pode notar a dinâmica de operação do microcontrolador e do transceptor TRF 2.4G. A descrição do fluxograma é simples e vem a seguir.

Inicialmente ao ser ligado, o microcontrolador configura o transceptor para o modo de transmissão. Ao receber sinal do circuito eletrônico microcontrolado, como parte do sistema sensor, o microcontrolador converte a palavra recebida para o

protocolo próprio do transceptor e envia os dados da palavra ao transceptor. O transceptor no modo de transmissão está configurado para, depois do recebimento dos dados obtidos do microcontrolador, enviar esses dados ao transceptor de recepção. Depois disso, o microcontrolador volta a esperar algum sinal de tensão do circuito eletrônico microcontrolado para que o processo se repita.

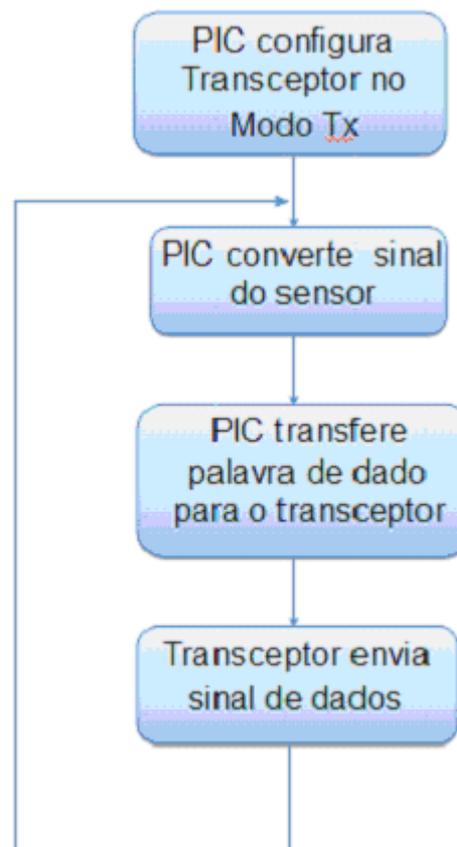


Fig. 50 – Fluxograma do circuito transmissor de R.F.

Bloco Circuito de Recepção de Dados e PC

Sua função é obter o valor de pico medido da descarga e disponibilizá-lo na tela de um PC para que se possa visualizá-lo. Na realidade, esse bloco representa uma interface visual do circuito eletrônico microcontrolado e do sistema transceptor.

O circuito receptor de R.F. possui características semelhantes às do circuito transmissor de R.F. já apresentado. Entre algumas alterações, estão: o microcontrolador utilizado no circuito receptor é o PIC16F877A e o do circuito

transmissor é o PIC16F873A; o circuito receptor de R.F. está acoplado a um PC e o transmissor ao circuito eletrônico microcontrolado; e o modo de recepção, utilizado pelo circuito receptor, possui um fluxograma diferente daquele criado para o circuito transmissor. A Fig. 51 apresenta o fluxograma utilizado para o modo de recepção do circuito receptor de R.F. As conexões do circuito receptor com o PC podem ser visualizadas na Fig. 49.

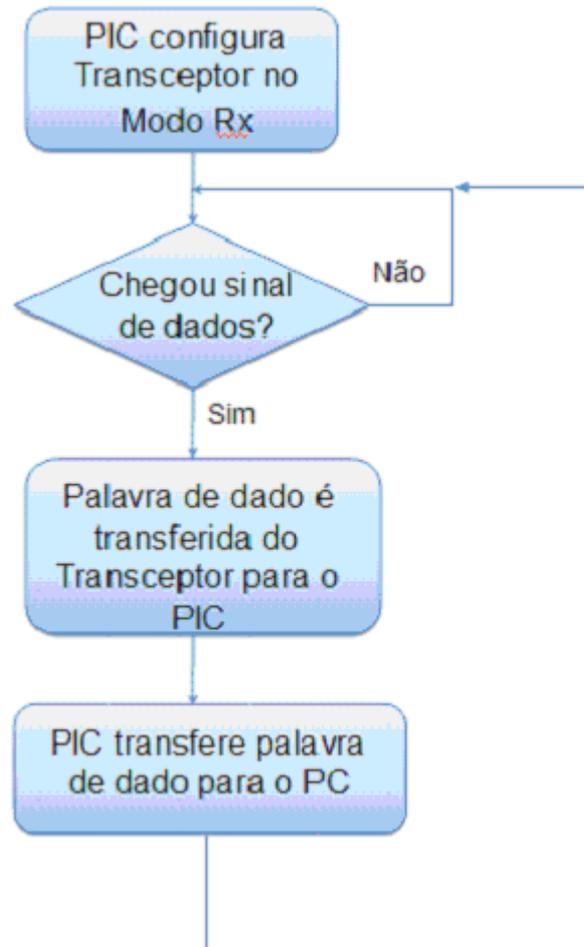


Fig. 51 – Fluxograma do circuito receptor de R.F.

A seguir, serão apresentados os resultados dos testes realizados no Laboratório de Fotônica do Dep. de Eletrônica e Sistemas da UFPE com os circuitos: integrador ativo e detector de pico, circuito eletrônico microcontrolado e circuito transceptor de R.F. O circuito integrador ativo e o circuito detector de pico foram montados em *protoboard* nas dependências do Laboratório de Fotônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas da UFPE. Nessa etapa, utilizou-se um microcontrolador da

família PIC16F628A para a geração de um pulso positivo para de fato se ter uma ideia de como os circuitos funcionariam quando da aplicação à sua entrada de pulsos da ordem de poucos microssegundos. Testes também foram realizados com o circuito eletrônico condicionador de sinais, o circuito eletrônico microcontrolado e o circuito transceptor de R.F., todos instalados em PCIs, placas de circuito impresso. Fotografias das montagens serão mostradas posteriormente. A Fig. 52 apresenta imagem da tela de PC com resultado de teste com o circuito transceptor de R.F projetado.

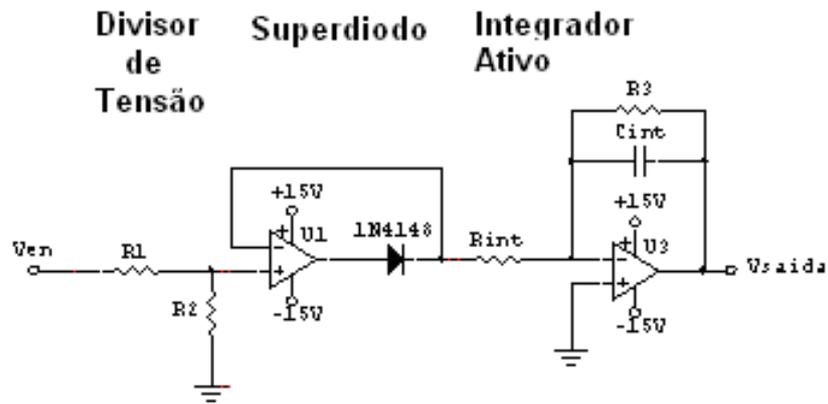


Fig. 52 – Imagem obtida da tela de PC para testes com o sistema transceptor de R.F.

5.1. Primeiros Testes com o Circuito Integrador Ativo

Inicialmente, foram realizadas a montagem e os testes com o circuito integrador ativo. O circuito é composto por um amplificador operacional LF351, um conjunto RC para

integração R_{int} e C_{int} , e um resistor de realimentação R_3 . Além dos componentes citados, foi utilizado um microcontrolador para geração do pulso de entrada. A Fig. 53 mostra o esquema elétrico do circuito integrador ativo construído para os testes.



Valores obtidos de testes no Laboratório de Eletrônica:

$R_D = 330R$ e $C_D = 100nF$;
 $R_3 = 1M$; $R_{int} = 4k7$; $C_{int} = 1nF$;
 $R_1 = 100k$; $R_2 = 1k$;
 $U_1 = U_2 = LF351$;

Fig. 53 – Esquema elétrico do circuito integrador ativo utilizado para implementação e testes.

O microcontrolador a ser utilizado para a leitura do sinal de saída, $V_{saída}$ na Fig. 53, possui um fator limitante que é de 5 V, sendo esta também a máxima tensão de saída do circuito eletrônico condicionador de sinal. Sabe-se que a resposta do circuito integrador ativo é a razão entre a integração temporal do sinal obtido do sensor bobina de Rogowski, V_{en} na Fig. 53, e a constante $R_{int}C_{int}$. Essa constante é dada pelo produto do valor da resistência em ohms do resistor R_{int} e da capacitância em faradays do capacitor C_{int} .

Os testes no Laboratório de Fotônica, os cálculos de ajuste dos parâmetros acima e a característica de resposta de tensão da bobina de Rogowski indicaram, portanto, os valores para os quatro parâmetros de ajuste mostrados na Fig. 53. São apresentados a seguir os resultados de alguns testes realizados para o circuito integrador ativo, além dos resultados para os circuitos, divisor de tensão e superdiodo, esboçados na Fig. 53.

Para os resultados dos testes de condicionamento apresentados a seguir para o circuito integrador ativo como parte do circuito eletrônico condicionador de sinais, foram utilizados os valores dos parâmetros de ajuste mostrados na Fig. 53. Como valor de tensão de entrada, foi

utilizado um pulso positivo de amplitude 4,8 V. Diante dessas condições, esperava-se como resultado uma tensão de saída dada por uma função linear, função afim, para o período de duração do pulso positivo e um valor estabilizado de 24 mV de tensão de saída para tempo superior à duração do pulso. O tempo do pulso positivo aplicado à entrada do circuito foi de 24 μ s. As respostas dos testes para a configuração de circuito apresentada são vistas nas Figs.54, 55 e 56. Foram elas obtidas com o osciloscópio da *Tektronix* modelo TDS3052B.

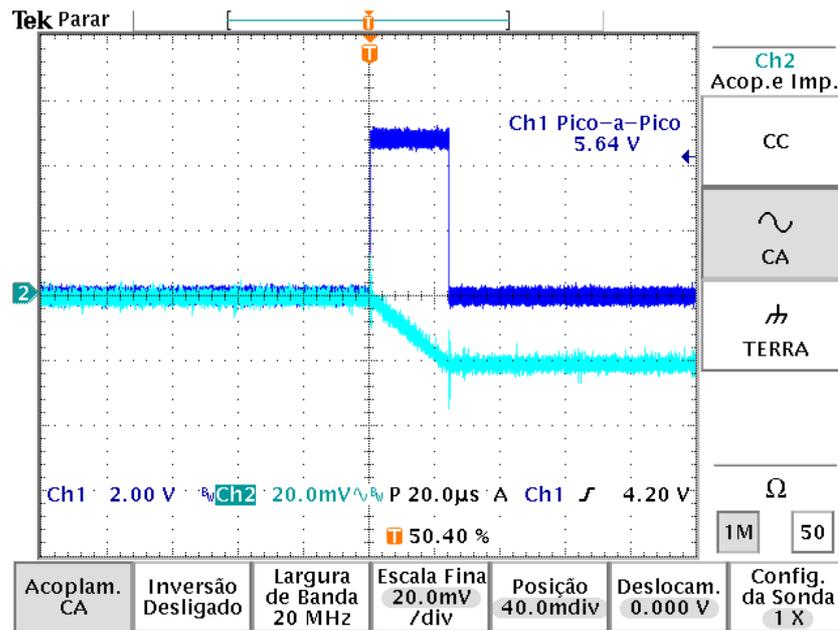


Fig. 54 – Resposta ampliada obtida com osciloscópio para o circuito integrador ativo condicionado aos parâmetros de ajuste apresentados e pulso positivo de 4,8 V e 24 μ s de período de duração.

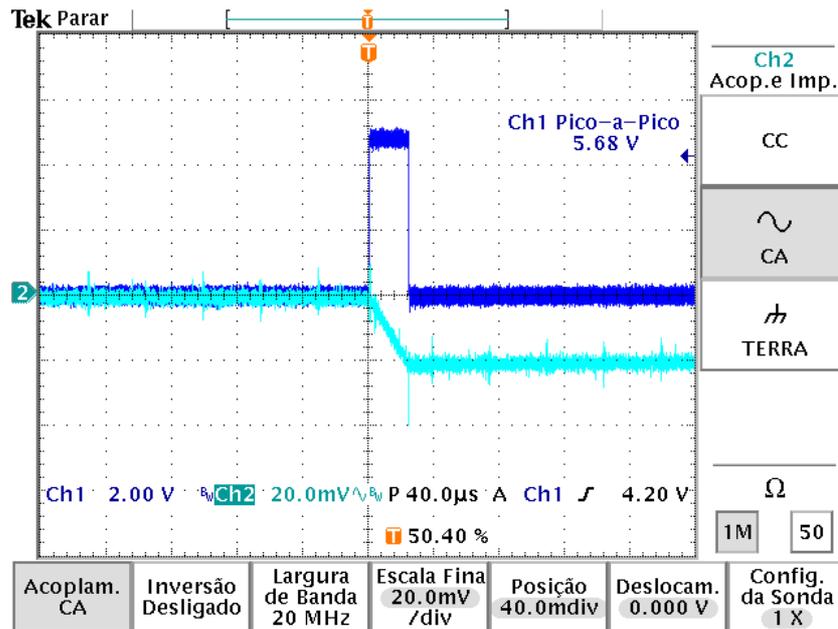


Fig. 55 – Resposta ampliada no tempo obtida com osciloscópio para o circuito integrador ativo condicionado aos parâmetros de ajuste apresentados e pulso positivo de 4,8 V e 24 μs de período de duração.

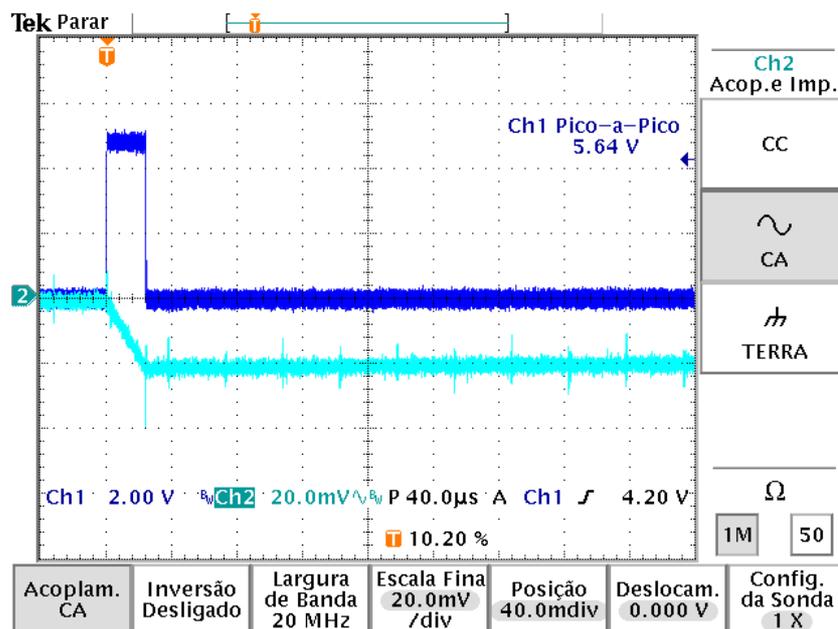


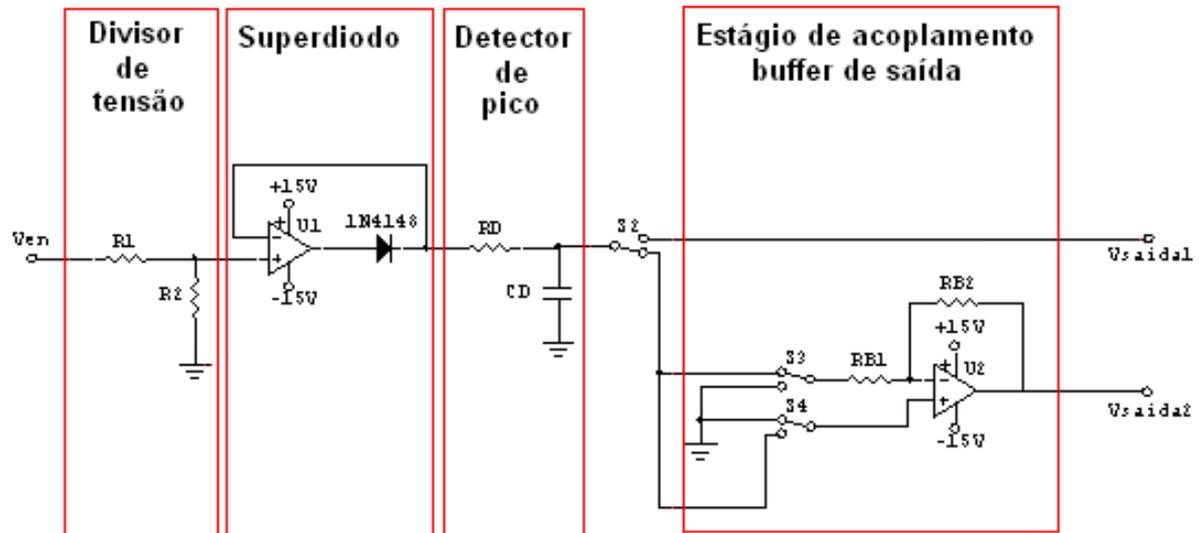
Fig. 56 – Resposta deslocada no tempo obtida com osciloscópio para o circuito integrador ativo condicionado aos parâmetros de ajuste apresentados e pulso positivo de 4,8 V e 24 μs de período de duração.

As respostas do circuito integrador ativo, além dos circuitos, divisor de tensão e superdiodo, demonstraram concordância com a forma de onda e os valores de amplitude esperados. Nas figuras apresentadas, vê-se que o integrador realizou sua tarefa de integrar o pulso positivo de entrada dado por uma função constante em seu período de duração; ou seja, nos primeiros 24 μs e, depois desse tempo, a tensão de saída do circuito se mantém estável em aproximadamente 22 mV.

Esperava-se estabilidade em 24 mV; todavia, existem certas perdas não consideradas nos cálculos como, por exemplo, o divisor de tensão de entrada não é exatamente um divisor com o valor estimado, pois os valores de resistência dos seus resistores componentes possuem uma variação de 10% cada um; o sinal de entrada de 4,8 V é uma leitura de tensão feita por multímetro de bancada, o que não garante que a tensão seja exatamente aquela que está sendo lida pelo circuito integrador ativo; a constante RC é formada por um resistor e um capacitor cujos valores de resistência e capacitância também flutuam em 10% de seu valor nominal; e, também, o resistor R3, utilizado para manter ativa a malha de realimentação negativa do amplificador operacional, componente do circuito integrador ativo, atua como um atenuador do sinal de saída do integrador. Atribui-se, portanto, a esses fatos a diferença de valor obtida na tensão de saída do circuito integrador ativo, onde se esperava um valor de 24 mV e se obteve um valor de 22 mV.

5.2. Primeiros Testes com o Circuito Detector de Pico

Da mesma forma com que foram feitos os procedimentos de testes para o circuito integrador ativo, foi realizada a montagem e os testes com o circuito detector de pico. Esse circuito é composto por um conjunto RC, dado por RD e CD. Além dos componentes citados, foi utilizado um microcontrolador para a geração do pulso de entrada. A Fig. 57 mostra o esquema elétrico do circuito integrador ativo desenvolvido para os testes.



Valores obtidos após testes no Laboratório de Eletrônica:

RD = 330R e CD = 100nF ;
R3 = 1M; Rint = 4k7; Cint = 1nF ;
R1 = 100k; R2 = 1k;
U1 = U2 = LF351;

Fig. 57 – Esquema elétrico do circuito detector de pico utilizado para implementação e testes.

Para a forma de onda do pulso utilizado na entrada do circuito detector de pico, sob teste, algumas alterações foram realizadas nos valores dos parâmetros de ajuste do circuito divisor de tensão, com o objetivo de verificar o funcionamento do circuito em algumas condições. Inicialmente, foi obtida com o osciloscópio do Laboratório de Fotônica a forma de onda do sinal de entrada disponibilizado na saída do microcontrolador PIC16F628A utilizado como gerador de pulsos. A forma de onda do pulso de entrada está mostrada na Fig. 58. Como pode ser visto, foi gerado um pulso de largura $6 \mu\text{s}$ e amplitude de $4,8 \text{ V}$.

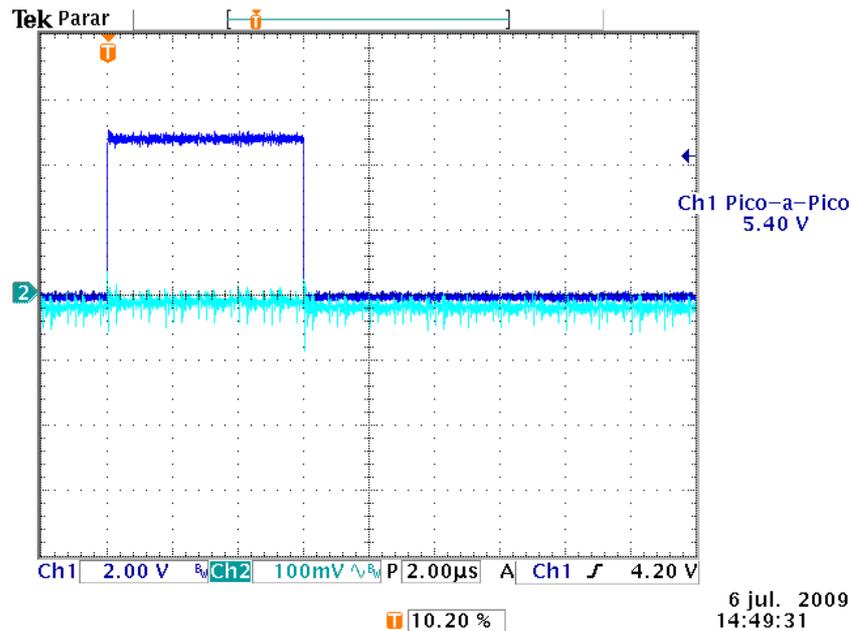


Fig. 58 – Pulso positivo gerado pelo microcontrolador utilizado e aplicado à entrada do circuito detector de pico sob testes.

A Fig. 59 apresenta a resposta do pulso positivo, obtida com o osciloscópio, para o circuito detector de pico mostrado na Fig. 57. Para isso, foram escolhidos $R1$ e $R2$ iguais; ou seja, razão unitária para o circuito divisor de tensão, e também R_D e C_D , de valores $330\ \Omega$ e $100\ \text{nF}$, respectivamente. Os valores de R_D e C_D foram escolhidos após vários testes de condicionamento para os valores de tensão dos sinais de entrada ao circuito detector de pico. Os valores de tensão são limitados pela tensão de operação do microcontrolador a ser utilizado como dispositivo leitor em estágio posterior ao circuito eletrônico condicionador de sinais conhecido como circuito eletrônico microcontrolado. A Fig. 60 apresenta a resposta para a mesma configuração de teste dada na Fig. 59, porém ampliada no tempo para se verificar o quão estável é a resposta do circuito detector de pico depois da passagem do pulso positivo de entrada.

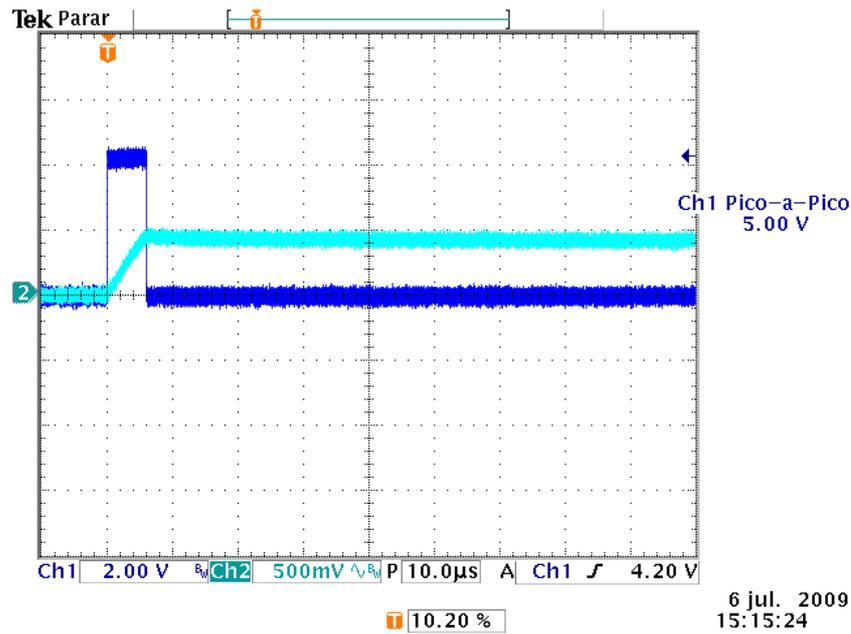


Fig. 59 – Resposta obtida com osciloscópio para o circuito detector de pico condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração.

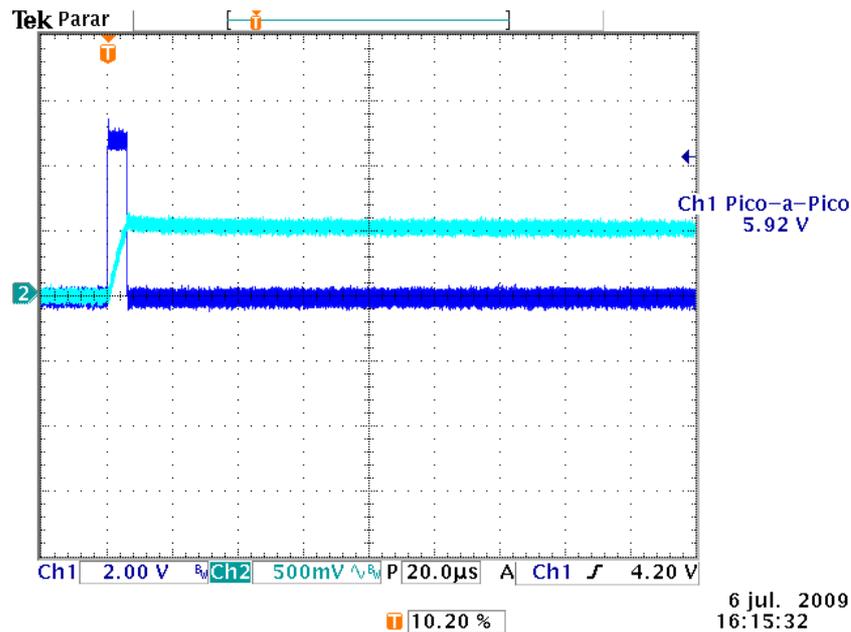


Fig. 60 – Resposta ampliada no tempo obtida com osciloscópio para o circuito detector de pico condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração.

A Fig. 61 mostra a resposta para a mesma configuração de teste dada nas Figs. 58 e 59. Foi utilizada, entretanto, uma razão de 1/10 para o circuito divisor de tensão de entrada, o que justifica o valor de tensão de saída do circuito detector de pico estabilizar-se em 50 mV

em vez dos 500 mV, antes apresentados para uma razão unitária de divisão de tensão de entrada. Vê-se, contudo, forte oscilação do sinal de saída, justificada pela inserção de ruídos no circuito devida à rede elétrica ruidosa de um Laboratório de Fotônica.

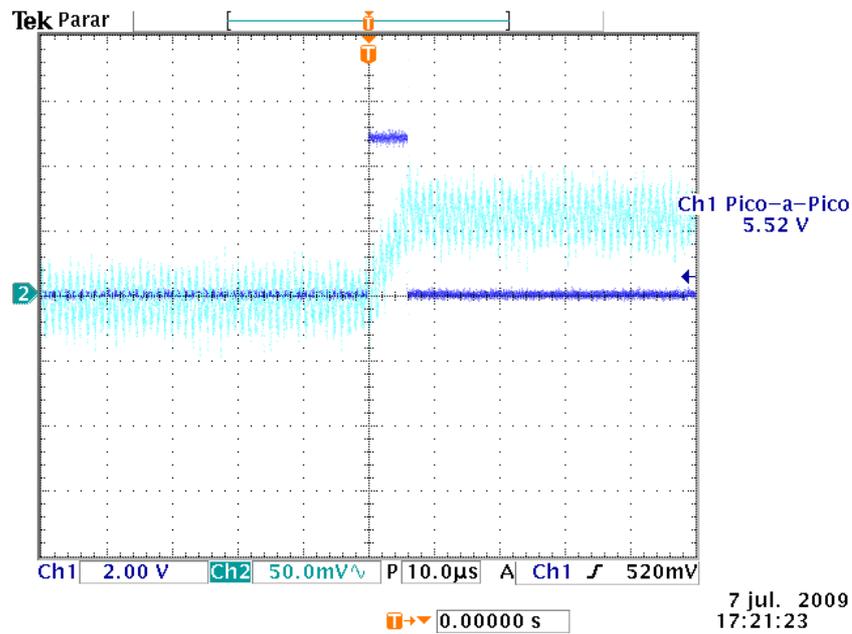


Fig. 61 – Resposta obtida com osciloscópio para o circuito detector de pico, condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração, para razão 1/10 do circuito divisor de tensão de entrada.

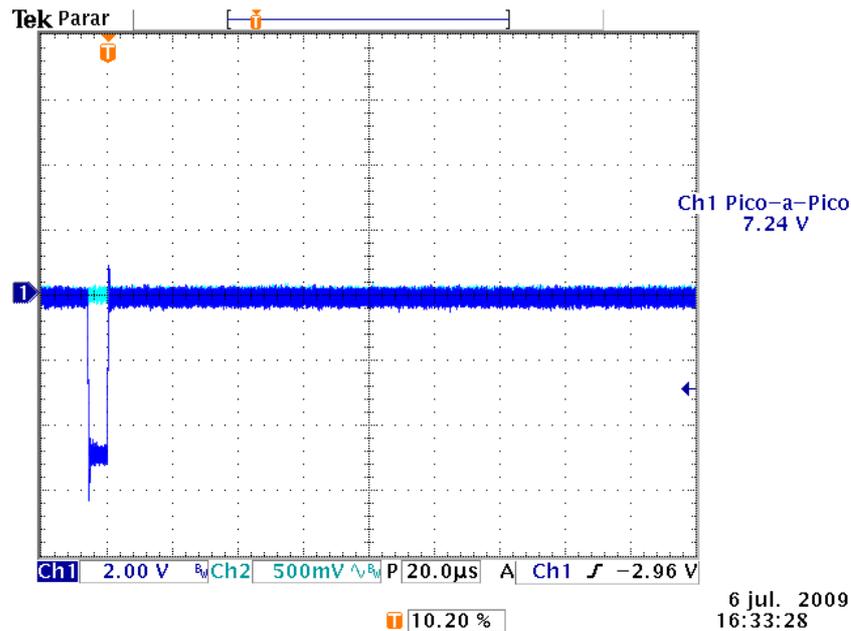


Fig. 62 – Resposta obtida com osciloscópio para circuito detector de pico, condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração, para razão unitária do circuito divisor de tensão e pulso invertido de entrada.

A Fig. 62 esboça um teste realizado para verificar a funcionalidade do circuito superdiodo. Nota-se claramente que o sinal de saída é aterrado, visto que o superdiodo apenas permite a passagem dos sinais que possuem polaridade positiva e aterra, bloqueia, aqueles sinais com polaridade negativa.

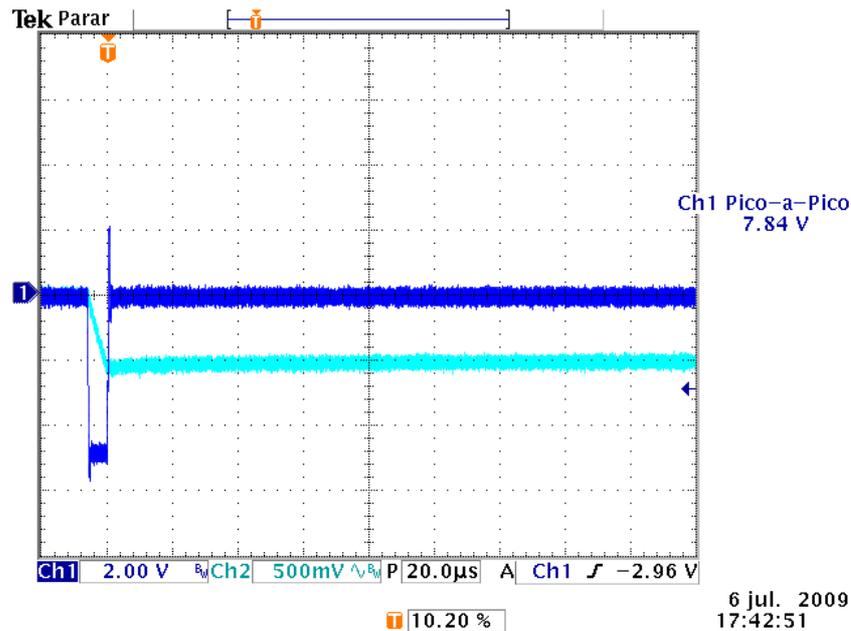


Fig. 63 – Resposta obtida com osciloscópio para circuito detector de pico condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 µs de período de duração, para razão unitária do circuito divisor de tensão, sinal de entrada invertido e superdiodo reversamente polarizado.

A Fig. 63 mostra a resposta dos testes realizados com o circuito detector de pico para razão unitária do circuito divisor de tensão de entrada, porém com o sinal de entrada invertido e o superdiodo reversamente polarizado. Para se obter a inversão de polaridade do circuito superdiodo, basta apenas inverter os terminais do diodo 1N4148 utilizado e, assim, ele permitirá a passagem apenas de sinais de entrada negativos em relação ao terminal terra, referência, do circuito detector de pico.

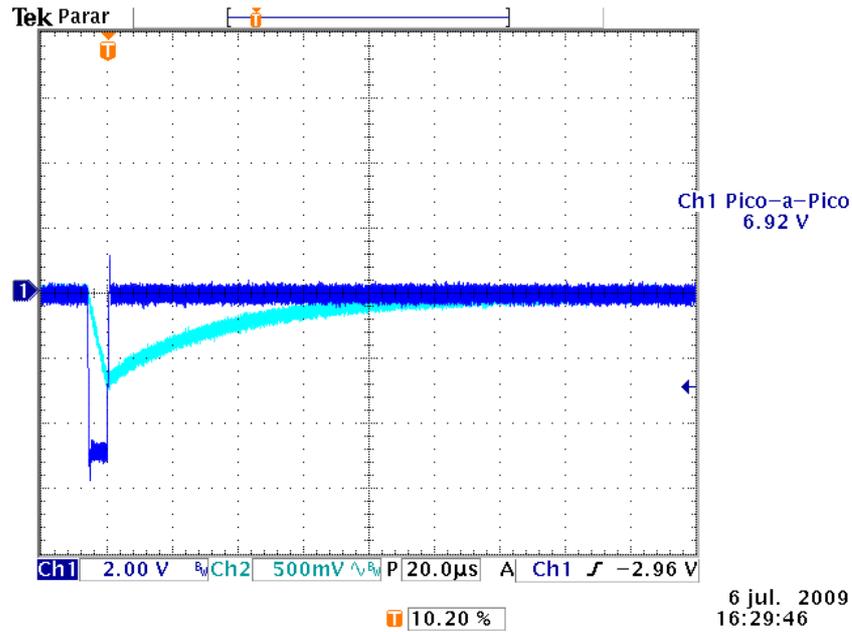


Fig. 64 – Resposta obtida com osciloscópio para circuito detector de pico condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 μ s de período de duração, para razão unitária do circuito divisor de tensão, sinal de entrada invertido e sem a presença do superdiodo.

A Fig. 64 mostra o comportamento do circuito detector de pico sem a presença do superdiodo. O superdiodo é essencial, portanto, para a manutenção do sinal de saída depois da passagem do pulso positivo de entrada, visto que o diodo impede o descarregamento do capacitor CD através das resistências a ele conectadas.

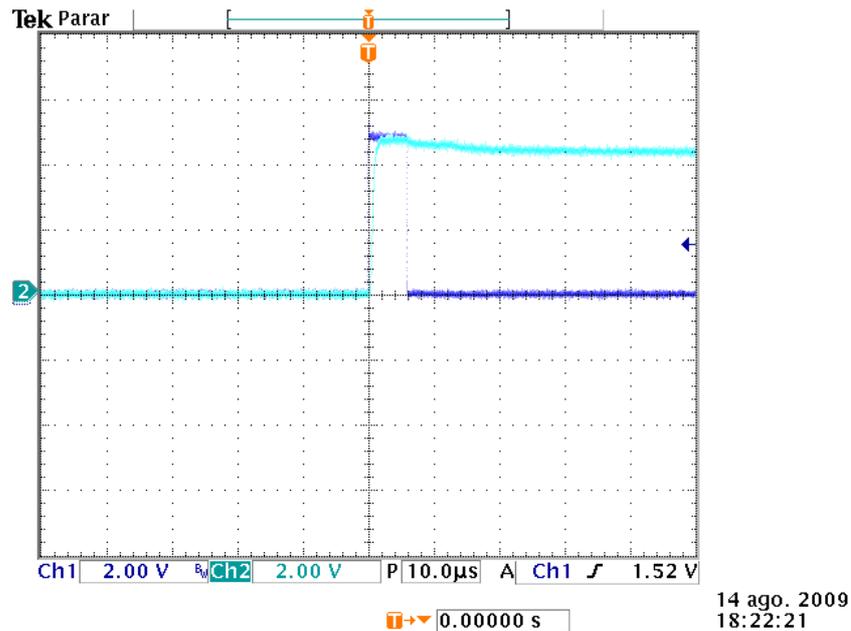
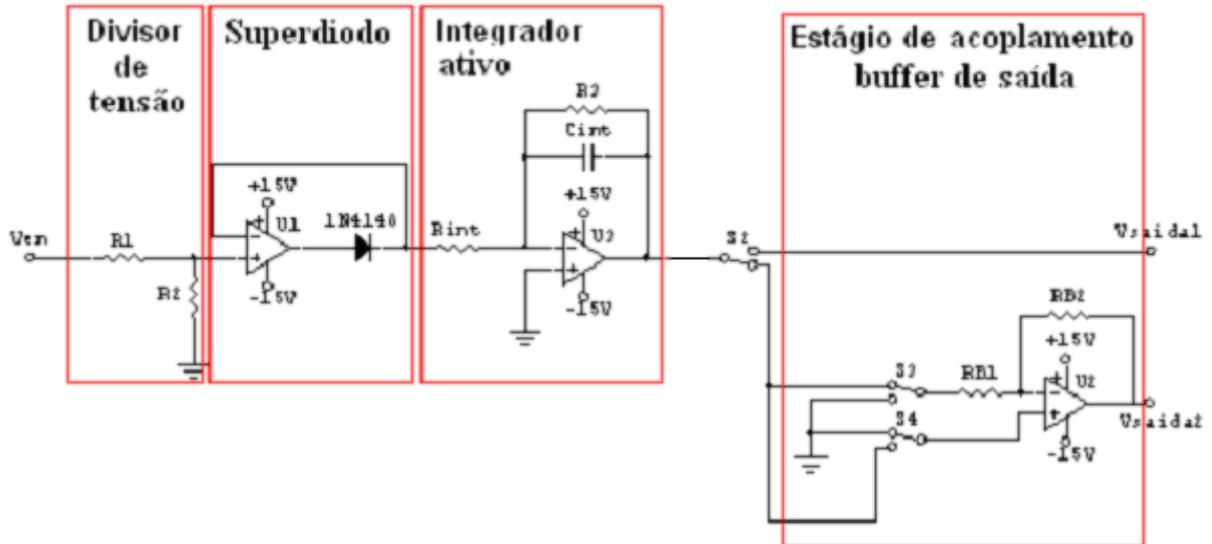


Fig. 65 – Resposta obtida com osciloscópio para o circuito detector de pico condicionado ao pulso positivo de 4,8 V e 6 µs de período de duração, para razão unitária do circuito divisor de tensão de entrada com $RD = 1 \text{ k}\Omega$.

A Fig. 65 traz um resultado de teste bastante interessante. Nota-se da resposta de tensão obtida para o circuito detector de pico uma maior proximidade da sua função como detecção de pico para o novo valor de RD. No entanto, há uma maior flutuação e queda do valor de amplitude o que não é uma boa característica de resposta para o próximo estágio do sistema eletrônico que será o circuito eletrônico microcontrolado. Diante do exposto, preferiu-se manter o valor de RD em 330 Ω , porém com a possibilidade de fazer sua substituição durante os futuros testes de condicionamento do sistema eletrônico na UFCG.

5.3. Testes com o Circuito Integrador Ativo em PCI

Os testes a seguir foram realizados com o circuito integrador ativo. Ele agora se encontra montado em PCI, como parte do circuito eletrônico condicionador de sinais. A Fig. 66 mostra os circuitos que foram testados juntamente com o circuito integrador ativo.



Valores obtidos após testes no Laboratório de Eletrônica:

$R_D = 330\Omega$ e $C_D = 100\text{nF}$;
 $R_3 = 1\text{M}$; $R_{int} = 4\text{k}\Omega$; $C_{int} = 1\text{nF}$;
 $R_1 = 100\text{k}$; $R_2 = 1\text{k}$;
 $U_1 = U_2 = \text{LF351}$;

Fig. 66 - Esquema elétrico do circuito detector de pico utilizado para implementação e testes.

Com o objetivo de testar cada parte do circuito na PCI, foram realizados alguns testes e suas respostas foram visualizadas na tela do osciloscópio e obtidas no PC por meio de comunicação *ethernet*. Dois desses testes estão com suas respostas mostradas nas Figs. 67 e 68. A Fig. 69 mostra a fotografia do circuito eletrônico condicionador de sinais em PCI cujo esquema elétrico traz o circuito integrador ativo e o circuito detector de pico.

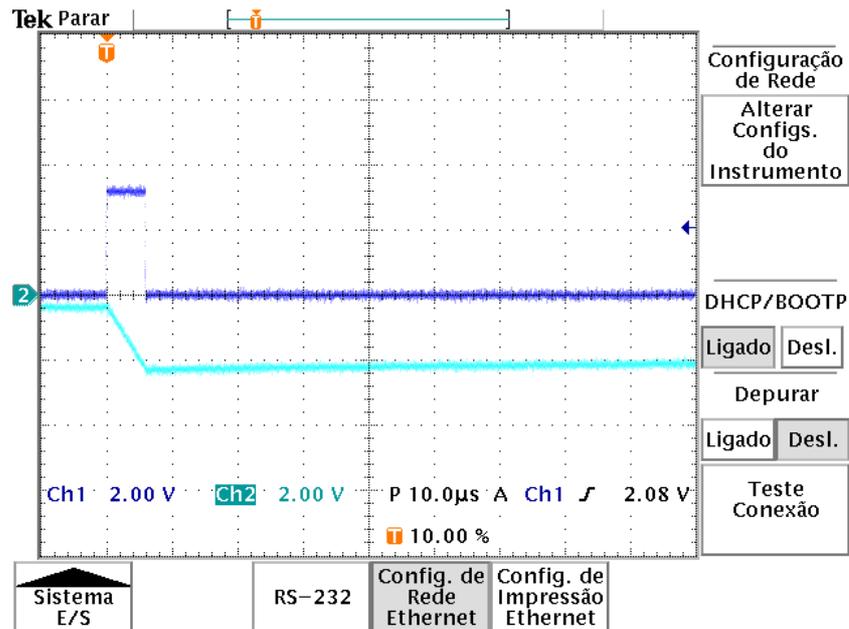


Fig. 67 – Resposta obtida com osciloscópio para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo, integrador ativo e buffer não-inversor 1x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 µs de período de duração.

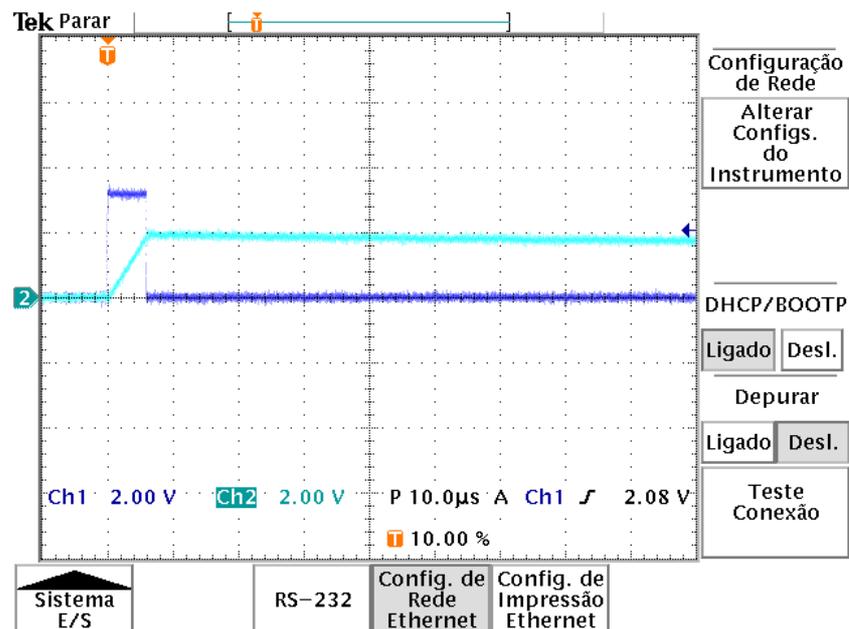


Fig. 68 - Resposta obtida com o osciloscópio para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo, integrador ativo e buffer inversor 1x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 µs de período de duração.

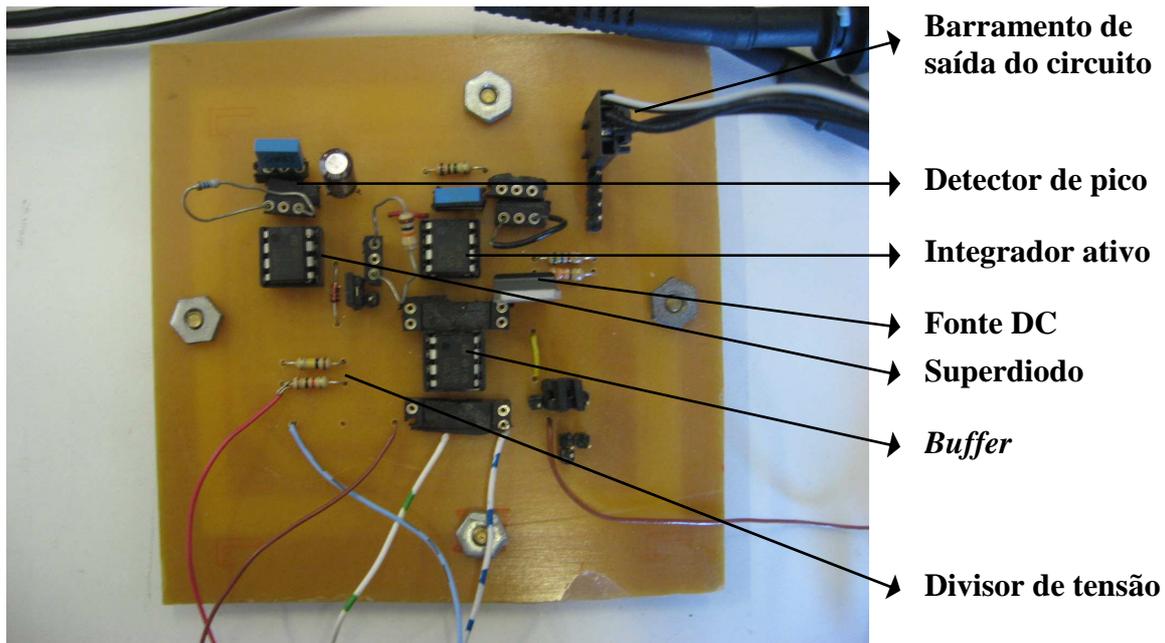


Fig. 69 – Fotografia do circuito eletrônico condicionador de sinais em PCI.

O resultado do teste apresentado na Fig. 67 é exatamente aquele esperado. Isso pode ser validado pela Eq. 24 onde se tem a resposta do circuito integrador da pela razão entre a integração temporal do sinal que chega à sua entrada e sua constante RC. Para o tempo compreendido entre 0 e 6 μ s, vê-se uma função linear, que é a integração temporal do sinal de entrada que, para esse período, é uma função constante. Depois de 6 μ s, o sinal de entrada se anula e o capacitor do integrador fica carregado por grande período com o valor obtido da integração. Essa característica é muito importante para o funcionamento de circuito eletrônico microcontrolado, que será acoplado ao circuito eletrônico condicionador de sinais.

A Fig. 68 mostra a resposta esperada para o teste realizado, pois se tem o mesmo formato de resposta que aquele apresentado na Fig. 67, porém com sinal de tensão, invertido em função de o *buffer* estar configurado como inversor.

5.4. Testes com o Circuito Detector de Pico em PCI

Os testes a seguir foram realizados com o circuito detector de pico. Ele agora se encontra montado em PCI, como parte do circuito eletrônico condicionador de

sinais. A Fig. 57 mostra os circuitos que foram testados juntamente com o circuito detector de pico.

Mais uma vez, com objetivo de testar cada parte do circuito na PCI, foram realizados alguns testes e suas respostas foram visualizadas na tela do osciloscópio e obtidas no PC por meio de comunicação *ethernet*. Três desses testes estão com suas respostas mostradas nas Figs. 70, 71 e 72.

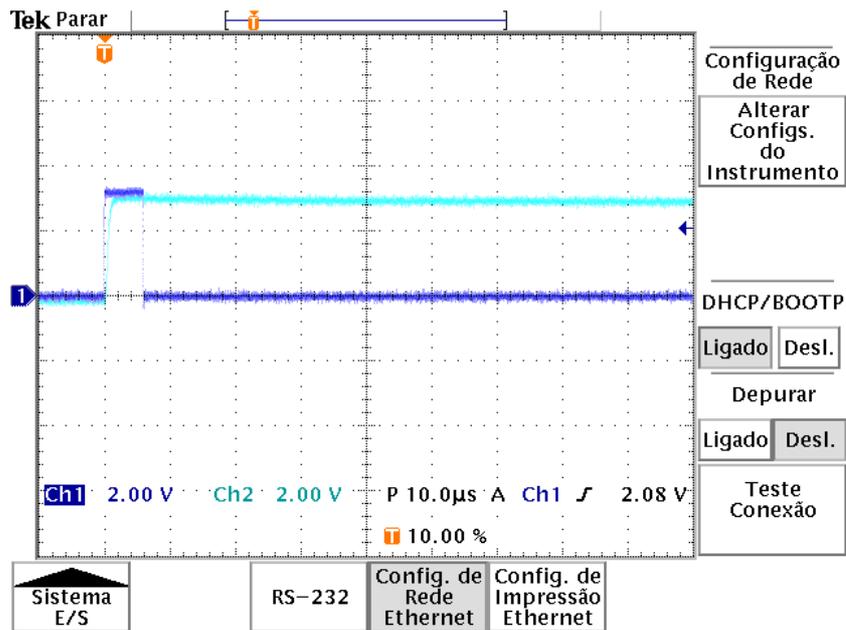


Fig. 70 - Resposta obtida com osciloscópio para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo e detector de pico, com pulso positivo de 3,3 V e 6 µs de período de duração.

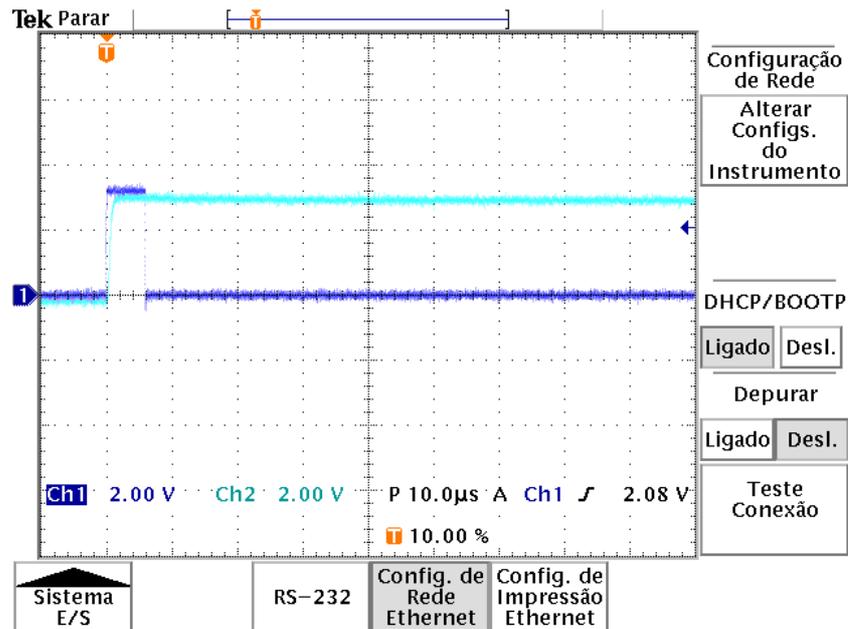


Fig. 71 - Resposta obtida com osciloscópio para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo, detector de pico e buffer não-inversor 1x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 μ s de período de duração.

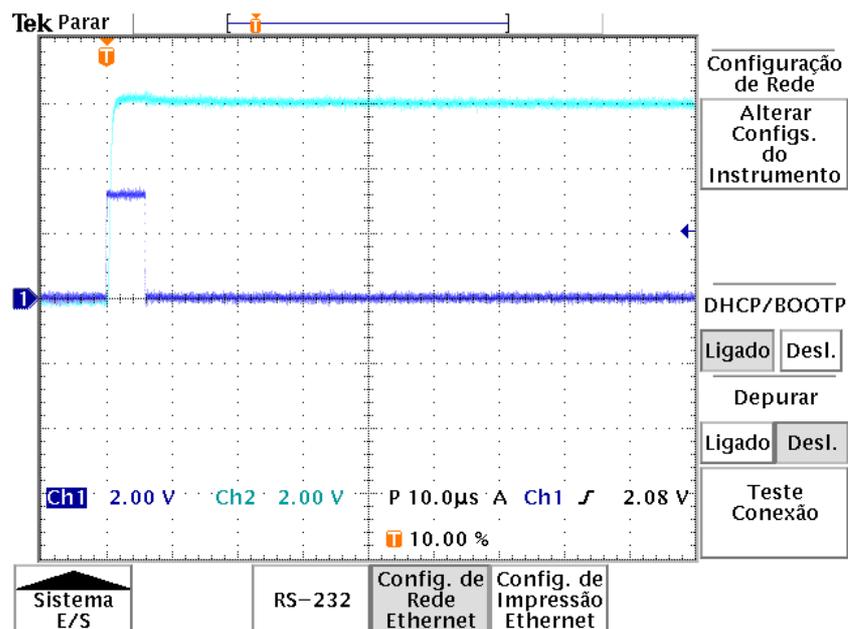


Fig. 72 – Resposta obtida com osciloscópio para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo, detector de pico e buffer não-inversor 2x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 μ s de período de duração.

As respostas apresentadas para os testes com o circuito detector de pico, como podem ser visualizadas, foram satisfatórias uma vez que a função do circuito é simplesmente apresentar uma tensão no mesmo nível da tensão do pulso de entrada, porém constante por um longo período de tempo para que o circuito eletrônico microcontrolado tenha tempo de lê-lo corretamente.

5.5. Testes com o Circuito Eletrônico Condicionador de Sinais e o Circuito Eletrônico Microcontrolado, ambos em PCI

Os testes a seguir apresentam as respostas do circuito eletrônico condicionador de sinais, obtidas na tela do osciloscópio, e as respostas correspondentes do circuito eletrônico microcontrolado vistas na tela do PC. Para isso, pulsos de tensão foram aplicados, na entrada do circuito eletrônico condicionador de sinais. Os testes visam comparar as respostas na saída do circuito microcontrolado com aquelas correspondentes na saída do circuito eletrônico condicionador de sinais. Para facilitar a compreensão desses testes, o circuito eletrônico condicionador de sinais foi testado como detector de pico, visto que sua configuração como integrador ativo foi também testada com sucesso, e testes com esse último circuito em conjunto com o circuito eletrônico microcontrolado seriam redundantes.

A Fig. 73 mostra a fotografia da montagem e interligação das PCIs dos circuitos eletrônicos condicionador de sinais e microcontrolado para os testes.

A Fig. 75 apresenta a resposta obtida com osciloscópio para testes com o circuito eletrônico condicionador de sinais. E a Fig. 77, a resposta correspondente vista na tela do PC com auxílio de um *software* de terminal para a comunicação serial.

A Fig. 76 representa imagem de novo teste com o circuito eletrônico condicionador de sinais. E a Fig. 78, a resposta correspondente do circuito eletrônico microcontrolado obtida na tela do PC.

A Fig. 74 traz a fotografia da PCI do circuito eletrônico microcontrolado.

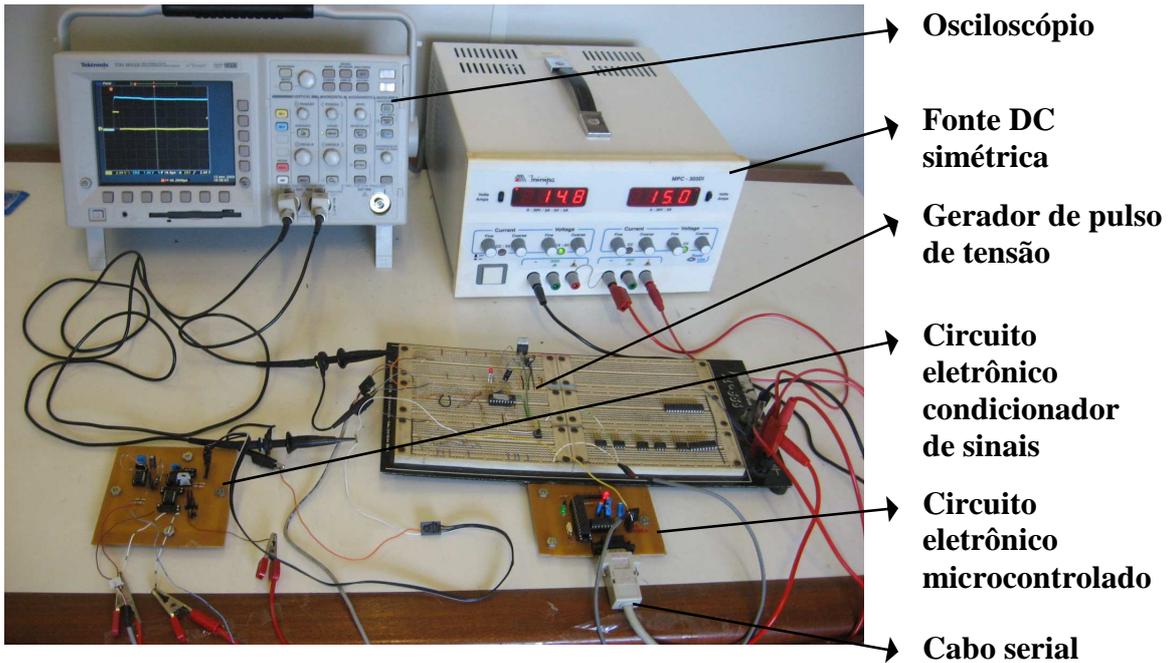


Fig. 73 – Fotografia da montagem para testes dos circuitos eletrônicos condicionador de sinais e microcontrolado.

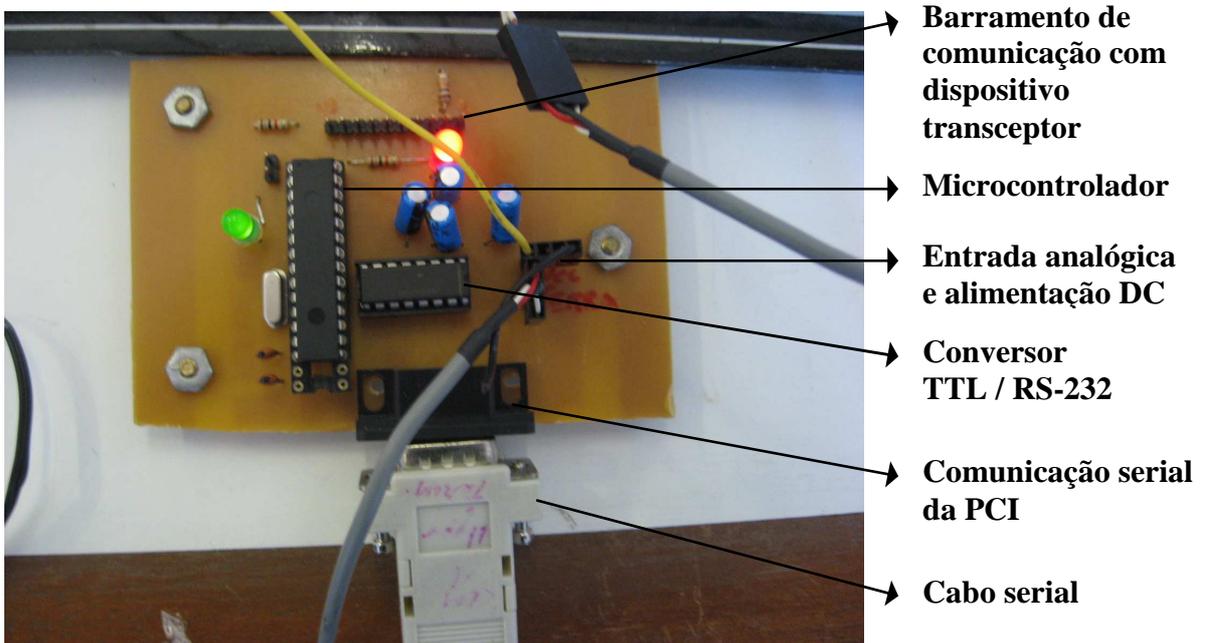


Fig. 74 - Fotografia do circuito eletrônico microcontrolado em PCI.

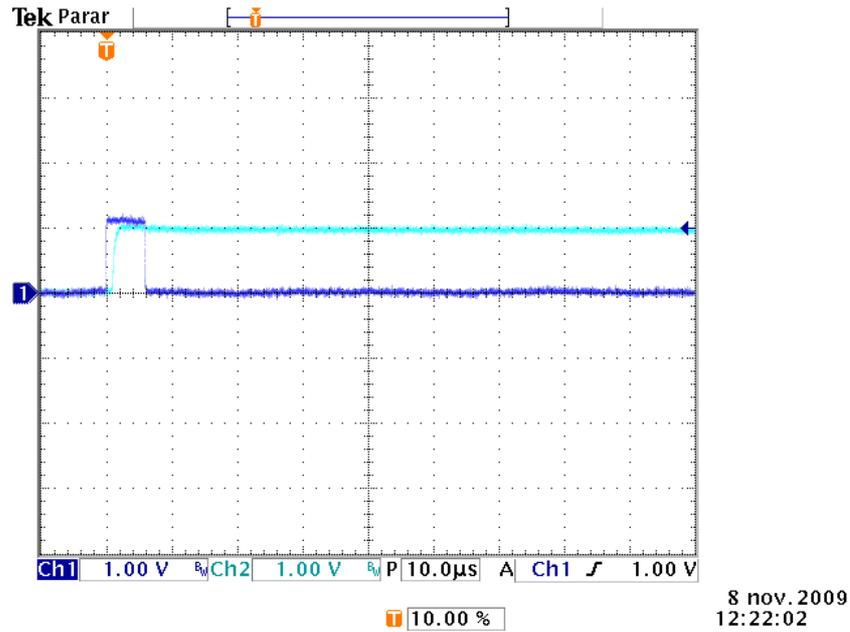


Fig. 75 – Resposta obtida com osciloscópio para teste com os circuitos eletrônicos condicionador de sinais e microcontrolado para os circuitos divisor de tensão 1:3, superdiodo, detector de pico e buffer não-inversor 1x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 µs de período de duração.

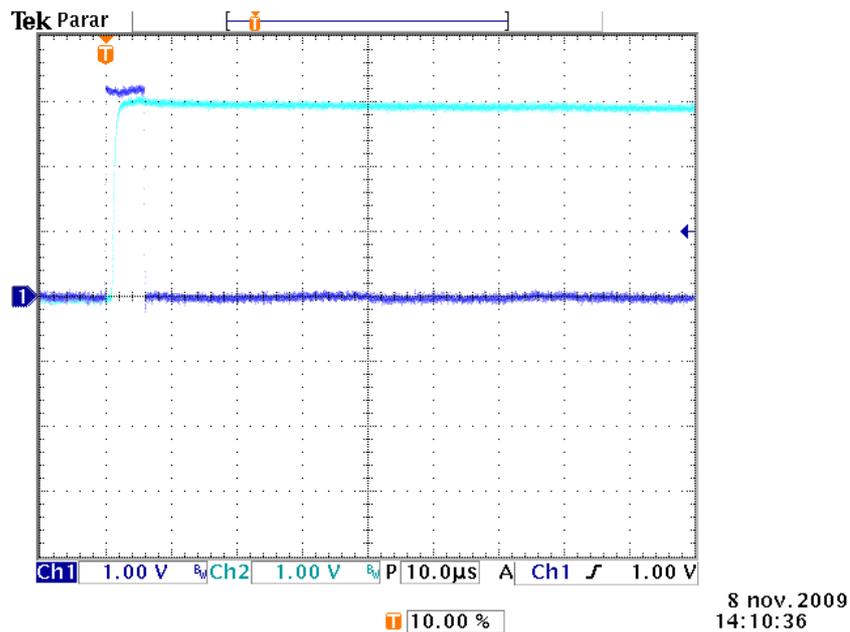


Fig. 76 – Resposta obtida com osciloscópio para teste sobre os circuitos eletrônicos condicionador de sinais e microcontrolado para os circuitos divisor de tensão 1:1, superdiodo, detector de pico e buffer não-inversor 1x, com pulso positivo de 3,3 V e 6 µs de período de duração.



Fig. 77 – Imagem da tela do PC como resposta do circuito eletrônico microcontrolado correspondente ao teste apresentado na Fig. 75.



Fig. 78 – Imagem da tela do PC como resposta do circuito eletrônico microcontrolado correspondente ao teste apresentado na Fig. 76.

Os testes apresentados pretendiam essencialmente verificar o poder de discriminação de tensão do circuito eletrônico microcontrolado quando acoplado ao circuito eletrônico condicionador de sinais. Por meio de uma simples conversão de valores, pode-se conferir se o circuito eletrônico microcontrolado apresenta como resposta o mesmo nível de sinal de resposta de tensão do circuito eletrônico condicionador de sinais. A conversão é feita em função do número máximo de níveis a serem discriminados pelo conversor do microcontrolador e de sua tensão de alimentação. Para esses testes, a tensão de alimentação do microcontrolador foi de 3,2 V. Sendo de oito bits o conversor analógico/digital do microcontrolador, sua conversão possui 2^8 níveis distintos de tensão (255 níveis não-nulos). O primeiro teste apresenta uma conversão dada da seguinte forma:

$$3,2 \text{ V} \times \frac{79}{255} = 0,99 \text{ V},$$

em que 79 é valor lido no PC, como mostra a Fig. 77.

Da Fig. 75, é possível notar um nível de tensão na saída do circuito eletrônico condicionador de sinais muito próximo de 1 V, sendo, portanto, os 0,99 V esperados.

O segundo teste apresenta a seguinte conversão:

$$3,2 \text{ V} \times \frac{232}{255} = 2,91 \text{ V} ,$$

em que 232 é valor lido no PC, como mostra a Fig. 78.

Da Fig. 76, verifica-se um nível de tensão na saída do circuito eletrônico condicionador de sinais de 2,9 V, sendo, portanto, os 2,91 V esperados.

A etapa de testes com o circuito eletrônico microcontrolado é a mais crítica do sistema sensor, pois é essencial uma boa leitura do nível de tensão do sinal de saída do circuito eletrônico condicionador de sinais, realizada pelo circuito eletrônico microcontrolado para que se possa ter pequena margem de erro na medição dos picos de descarga atmosférica.

A Fig. 79 apresenta a imagem obtida, no Laboratório de Fotônica, de fotografia do sistema sensor completo.

A Fig. 80 esboça a fotografia da PCI que comporta o circuito transmissor de R.F. Nessa mesma PCI, encontra-se também o circuito eletrônico microcontrolado (o circuito leitor). A função da PCI, portanto, é ler a tensão obtida do circuito eletrônico condicionador de sinais; realizar conversão analógica/digital sobre essa leitura de tensão; e enviar a informação referente a essa medição por meio do circuito transmissor de R.F ao seu receptor.

A Fig. 81 apresenta a fotografia da PCI que contém o circuito receptor de R.F. Por meio da PCI, a informação referente à medição de descarga atmosférica torna-se disponível ao conhecimento do operador humano através da tela de um PC.

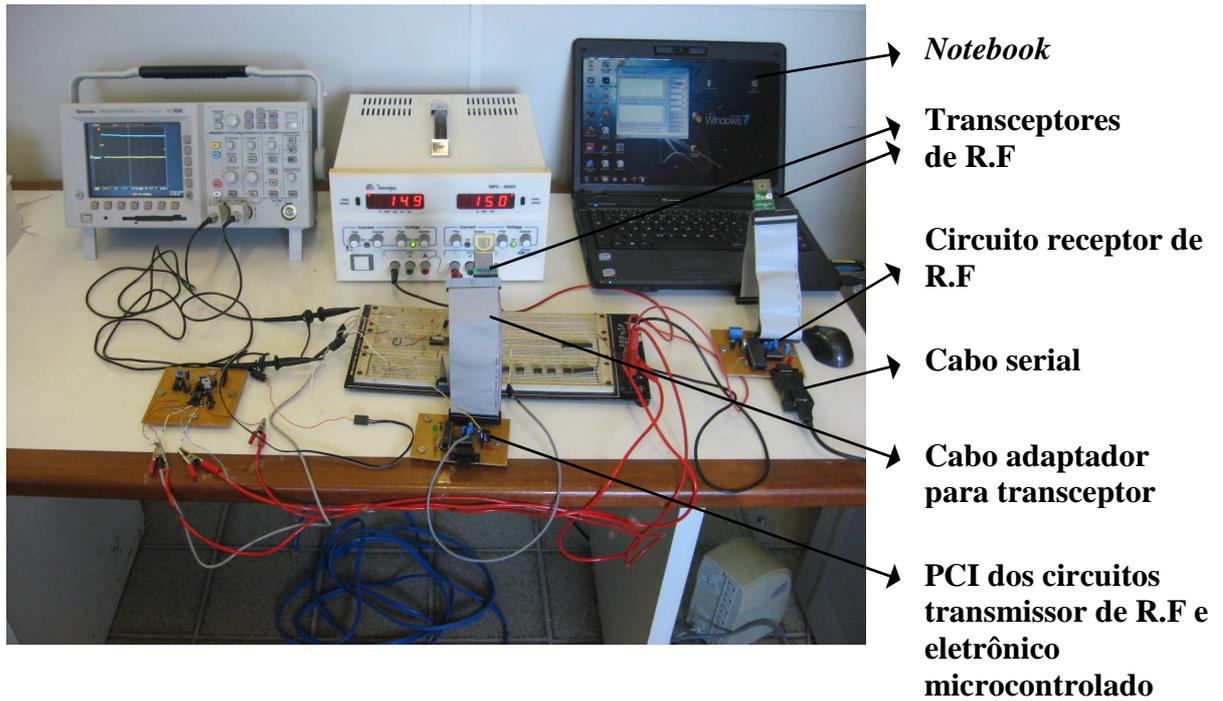


Fig. 79 – Fotografia do sistema sensor completo sob testes no Laboratório de Fotônica.

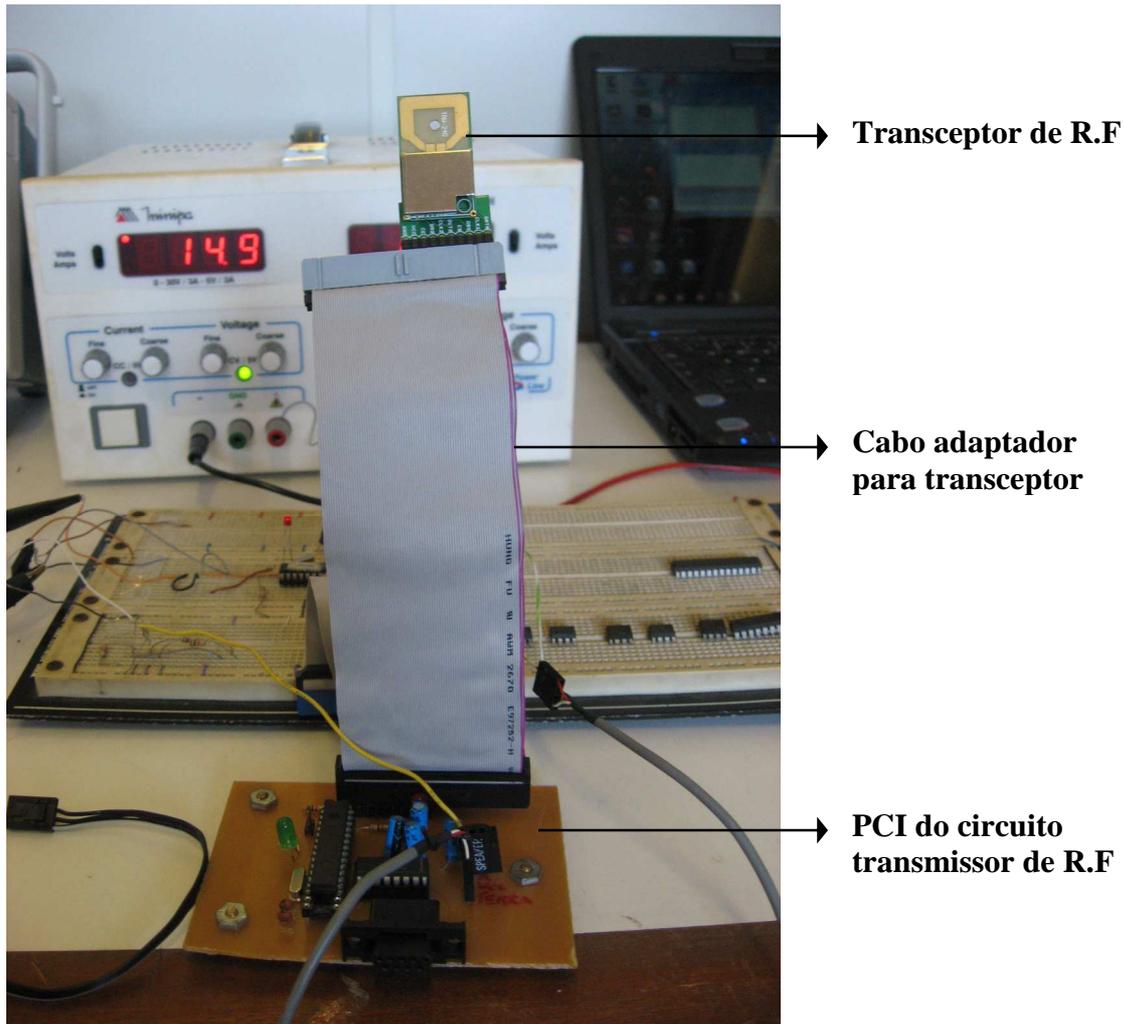


Fig. 80 – Fotografia do circuito transmissor de R.F em PCI.

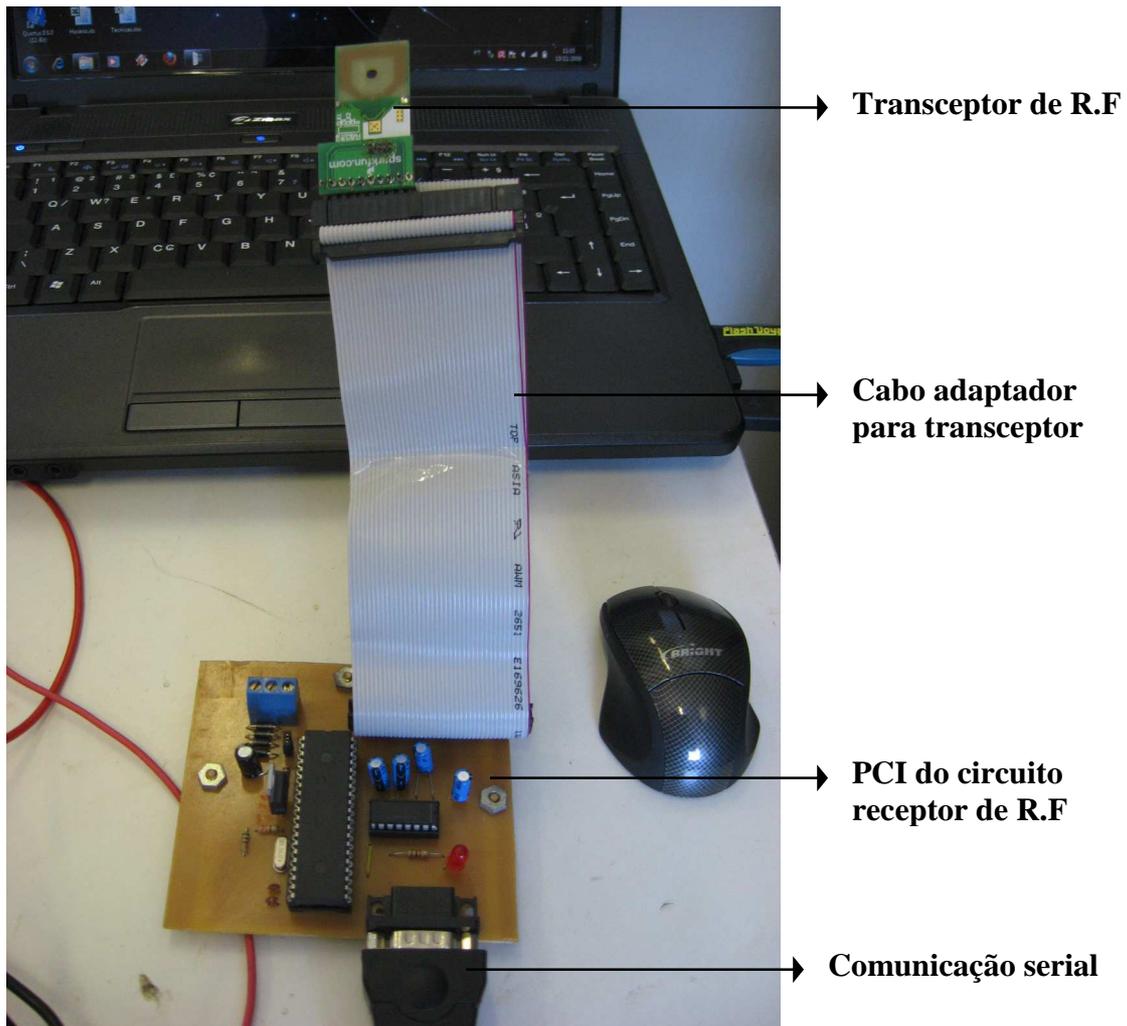


Fig. 81 - Fotografia do circuito receptor de R.F em PCI.

Capítulo 6

Testes em Laboratório de Alta Tensão com o Sistema Eletrônico de Detecção de Descargas Atmosféricas

A etapa de concepção do sistema sensor proposto foi importante no projeto do sistema eletrônico proposto capaz de realizar a detecção de descargas atmosféricas em estruturas de linha de transmissão de energia elétrica. Os circuitos que compõem o sistema foram construídos e testados individualmente no Laboratório de Fotônica ainda em fase de prototipagem. Posteriormente foram transferidos para PCIs, placas de circuito impresso, quando puderam então ser testados no Laboratório de Geração de Corrente Impulsiva pertencente ao Laboratório de Alta Tensão da UFCG.

Testes iniciais foram realizados com a bobina de Rogowski no Laboratório de Alta Tensão da UFCG, para que se pudesse conhecer não apenas a curva de resposta de tensão da bobina frente à passagem por ela de correntes impulsivas, mas também saber a sensibilidade da bobina quando submetida a correntes na frequência industrial. Os testes de corrente AC sobre a bobina visavam elucidar as suspeitas sobre sua sensibilidade às correntes AC que fluem sobre torres de linhas de transmissão, especialmente aquelas aparelhadas com cabos para-raios em contato direto com a estrutura metálica da torre, onde foi verificada a passagem de uma corrente AC na frequência industrial com amplitudes de até 50 A [26].

Os testes de corrente impulsiva sobre o sensor bobina de Rogowski e a associação deste sensor com o circuito eletrônico condicionador de sinais foram realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG. Esse laboratório possui um circuito gerador de impulsos de corrente da empresa *Haefely* cuja especificação é dada por 80 kJ/100 kV. O gerador é composto por: oito capacitores de 2 μ F com tensão máxima nominal de 100 kV, e resistores que dependendo da necessidade da forma de onda seu valores de resistência podem ser alterados; um diodo retificador; um indutor de indutância L; uma fonte de alimentação AC ajustável e um transformador elevador de tensão [31].

A função de cada componente do circuito gerador de impulso de corrente é descrita a seguir: os estágios de carregamento acumulam a energia necessária para provocar a descarga no centelhador (sparkgap); o diodo retifica a tensão obtida dos terminais do enrolamento secundário o transformador elevador; o indutor L e resistor R em conjunto com os oito

estágios ajustam a forma de onda de impulso de corrente; por fim, a fonte alimenta o enrolamento primário do transformador elevando a tensão em seu secundário para alimentar os oito capacitores. A Fig. 82 apresenta a mesa de controle usada para as etapas de carregamento e descarregamento do gerador de impulso de corrente [31].



Fig. 82 – Fotografia da mesa de controle do circuito gerador de impulsos de corrente pertencente ao Laboratório de Alta Tensão, UFCG [31].

O funcionamento do circuito do gerador de impulso de corrente é feito da seguinte forma: o operador técnico insere por meio da mesa de controle uma tensão de carregamento. A partir daí é realizada o afastamento das esferas e o carregamento dos capacitores é iniciado. A mesa de controle acusa ao técnico o nível de carregamento e este cessa o carregamento e inicia o descarregamento dos capacitores. Nesse momento, a fonte é desligada e as esferas são gradativamente aproximadas até que a descarga ocorra entre elas [31].

Resultados dos testes com a bobina de Rogowski, para correntes impulsivas e correntes AC, e posteriormente com o circuito eletrônico condicionador de sinal acoplado à bobina, são aqui apresentados. Os resultados foram obtidos no Laboratório de Alta Tensão da UFCG.

6.1. Testes com o Sensor Bobina de Rogowski no Laboratório de Geração de Corrente Impulsiva da UFCG

6.1.1. Testes de Corrente Impulsiva com Sensor Bobina de Rogowski

Os testes para a obtenção das características de resposta de tensão do sensor bobina de Rogowski foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG. O objetivo dos testes era conhecer a resposta de tensão do sensor bobina de Rogowski quando da passagem de uma corrente elétrica na direção de seu eixo axial, ver Fig. 83. Correntes foram geradas tanto de forma impulsiva, como descrito anteriormente, quanto em regime permanente na frequência industrial, pois se queria determinar as respostas da bobina em ambas as situações.

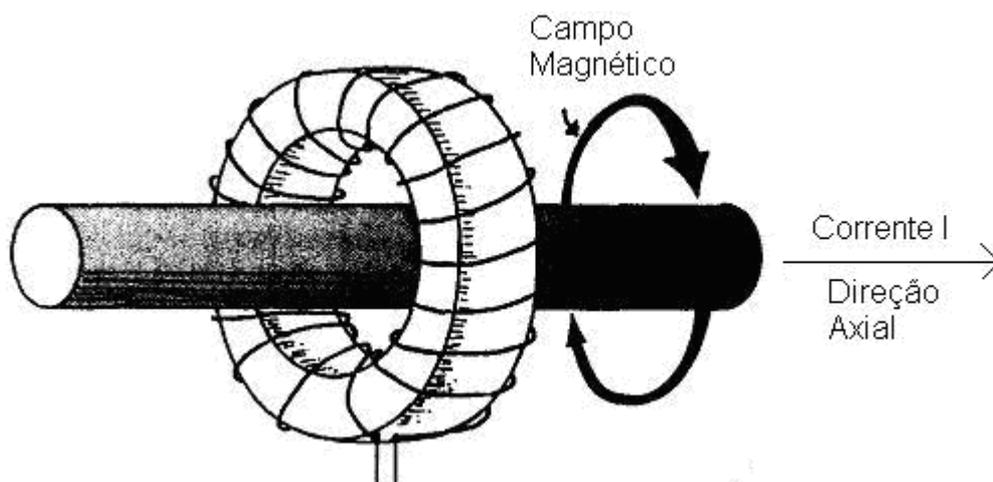


Fig. 83 – Bobina de Rogowski submetida a uma corrente em seus enrolamentos.

A Fig. 84 mostra o diagrama de blocos para o procedimento de testes com a bobina de Rogowski.

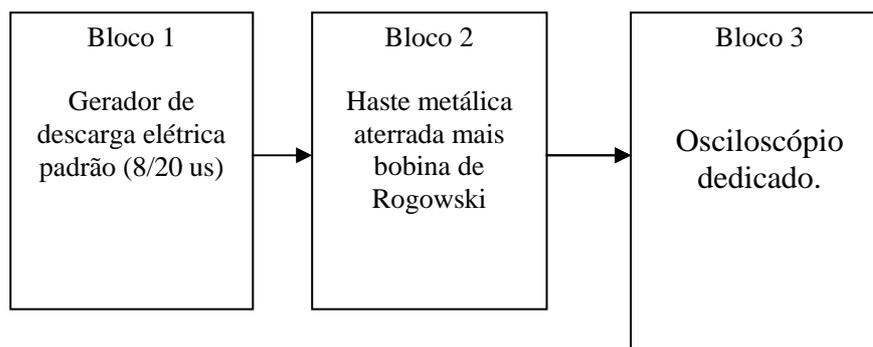


Fig. 84 – Diagrama em blocos do cenário de testes com a bobina de Rogowski no Laboratório Alta Tensão, UFCG.

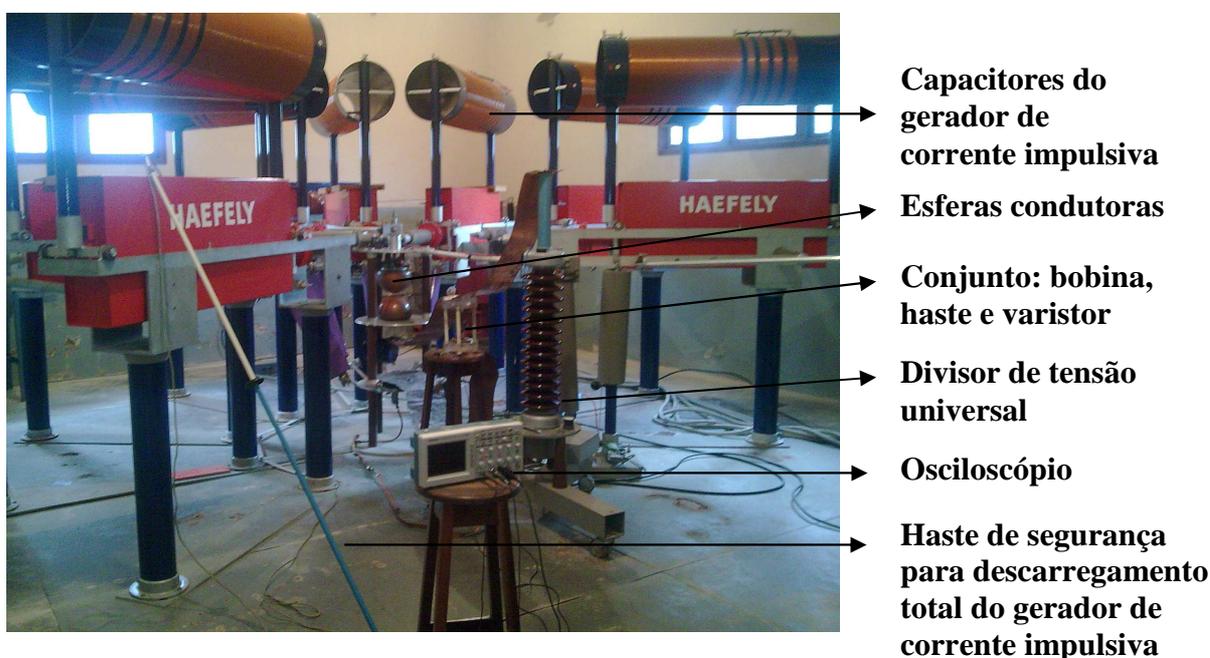


Fig. 85 – Fotografia do cenário de testes com a bobina de Rogowski no Laboratório de Alta Tensão, UFCG.

As correntes impulsivas geradas para a realização dos testes sobre o sensor bobina de Rogowski são correntes típicas de $8/20 \mu\text{s}$ e foram injetadas por um aparato composto de um circuito de geração impulsiva de corrente propriamente dito, esferas condutoras, varistor (como limitador de corrente), resistor shunt (utilizado para se obter com osciloscópio o valor de tensão proporcional à corrente impulsiva), haste metálica e bobina de Rogowski.

Além desses componentes de montagem necessários para a realização dos testes, contou-se com a presença de um circuito divisor de tensão universal para verificar a tensão colhida nos terminais do varistor, como forma redundante de medição. A

Fig. 86 mostra o esquema de montagem básico para a realização dos testes.

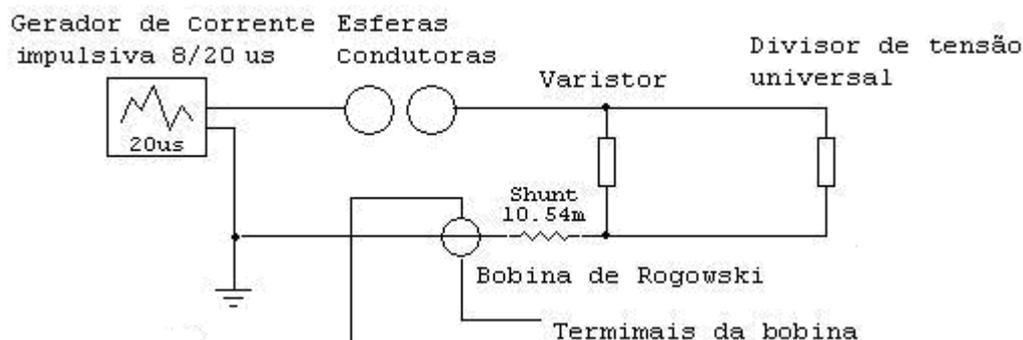


Fig. 86 – Esquema básico de montagem para testes.

Para a realização dos testes, um banco de capacitores é carregado por um técnico especializado até alcançar uma tensão V_c . O espaçamento entre as esferas metálicas é então reduzido pelo técnico até atingir um valor de campo elétrico entre elas capaz de romper a rigidez dielétrica do ar. Quando isso acontece, dá-se a descarga dos capacitores cuja corrente é conduzida por condutores à esfera conectada a esse banco de capacitores e, dessa forma, a partir do rompimento da rigidez dielétrica do ar entre as esferas, a segunda esfera é golpeada pela corrente impulsiva, sendo essa corrente dirigida por meio de uma fina chapa de cobre até uma haste metálica que fura o plano da bobina de Rogowski, criando um campo magnético variante no tempo que, por sua vez, induz uma tensão nos terminais da bobina. Essa corrente antes de fluir pela haste, passa pelo varistor, de contenção da corrente, e pela resistência *shunt*, cuja tensão gerada V_s é registrada no osciloscópio. A razão entre o pico dessa tensão V_s e o valor dessa resistência ($10,54 \text{ m}\Omega$) fornece o valor de pico da corrente impulsiva gerada. A tensão colhida nos terminais da bobina, V_b é também registrada no osciloscópio, bem como a forma de onda da tensão sobre o varistor obtida a partir do divisor de tensão universal, dada por V_{var} .

Uma sequência de testes será realizada, e os valores de pico das quantidades de interesse serão informados.

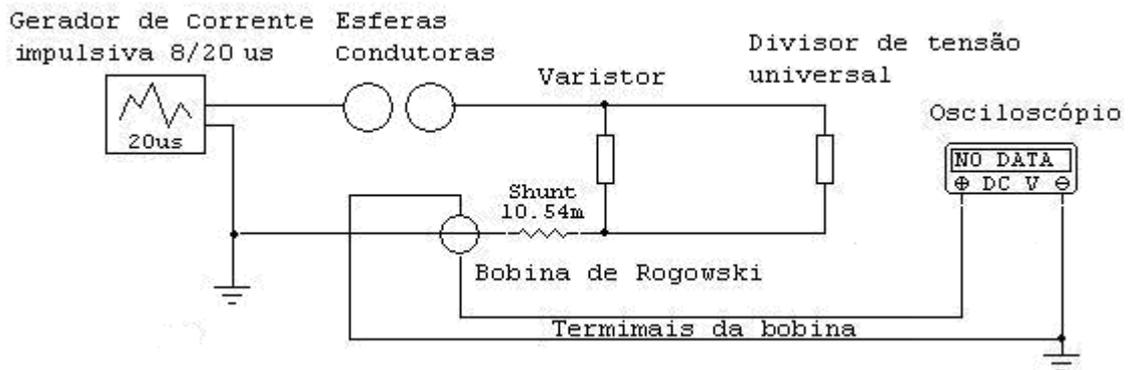


Fig. 87 – Esquema de teste com terminal negativo (preto) da bobina de Rogowski aterrado.

Teste 1

CH1: Tensão V_{var} (varistor);

CH2: Tensão V_s (resistor shunt);

CH3: Tensão V_b (bobina de Rogowski);

V_s (pico) = 30 V. V_b (pico): +154 V; V_b (pico): -15 V; V_c : 10 kV.

V_c é a tensão de carregamento do gerador de corrente impulsiva.

A Fig. 88 exibe os dados obtidos do Teste 1 na tela de um osciloscópio dedicado.

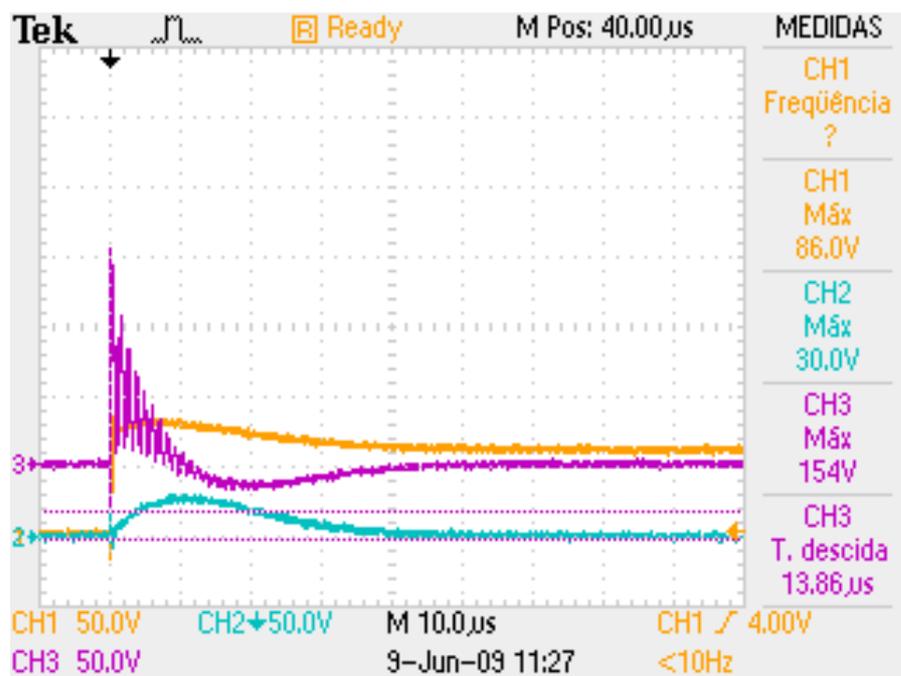


Fig. 88 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 1.

$$I(\text{pico}) = \frac{V_s}{R_s} = \frac{30V}{10,54m\Omega} = 2,85kA.$$

Conclusão do Teste 1

O Teste 1 forneceu como resultado uma forma de onda de tensão nos terminais da bobina com picos positivo e negativo e uma característica de oscilação com amortecimento. Foi observado na resposta da bobina um comportamento esperado, pois se sabe que a resposta de sua tensão é proporcional à derivada da corrente que a atravessa. Como pode ser visto na Fig. 88, a corrente impulsiva cresce até seu valor de pico e depois decai até sua amplitude se anular. A resposta da bobina possui um crescimento inicial intenso, anula-se, e depois sua amplitude se torna negativa. Esse comportamento traduz a derivada do sinal de corrente impulsiva medido. Outra observação a ser feita é quanto ao comportamento oscilante da tensão na bobina nos tempos iniciais. Essa oscilação pode ser explicada pelo modelo de linha de transmissão para a torre, visto que, na montagem dos testes realizados, a haste metálica substitui a estrutura metálica da torre. No modelo de torre apresentado em capítulo anterior, uma torre de 48 m foi modelada como uma linha de transmissão e suas respostas de corrente apresentaram uma oscilação semelhante à da tensão da bobina, também nos tempos iniciais do sinal medido.

Teste 2

CH1: Tensão V_{var} (varistor);

CH2: Tensão V_s (resistor shunt);

CH3: Tensão V_b (bobina de Rogowski);

V_s (pico) = 44 V. V_b (pico): +222 V; V_b (pico): -28 V; V_c : 13 kV.

A Fig. 89 exibe os dados obtidos do Teste 2 em tela de osciloscópio dedicado.

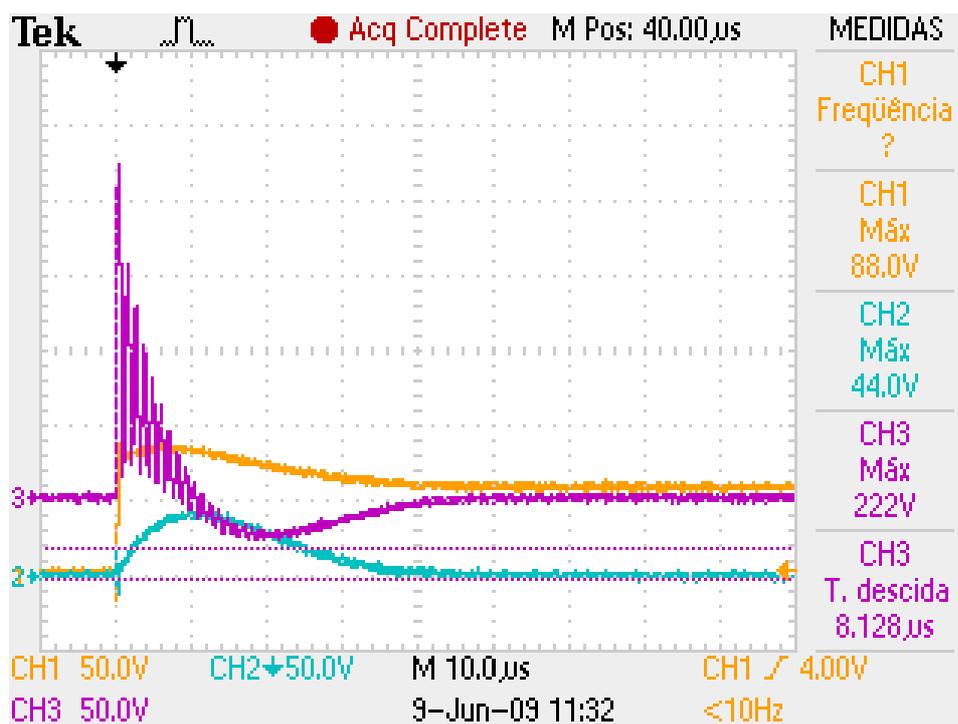


Fig. 89 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 2.

$$I(\text{pico}) = \frac{V_s}{R_s} = \frac{44\text{V}}{10,54\text{m}\Omega} = 4,2\text{ kA}.$$

Conclusão do Teste 2

O Teste 2 obteve como resultado uma forma de onda de tensão dos terminais da bobina semelhante àquela obtida do Teste 1, porém com maior valor de pico de amplitude.

Teste 3

CH1: Tensão V_{var} (varistor);

CH2: Tensão V_s (resistor shunt);

CH3: Tensão V_b (bobina de Rogowski);

V_s (pico) = 54 V. V_b (pico): +272 V; V_b (pico): -30 V; V_c : 15 kV.

A Fig. 90 exibe os dados obtidos do Teste 3 em tela de osciloscópio dedicado.

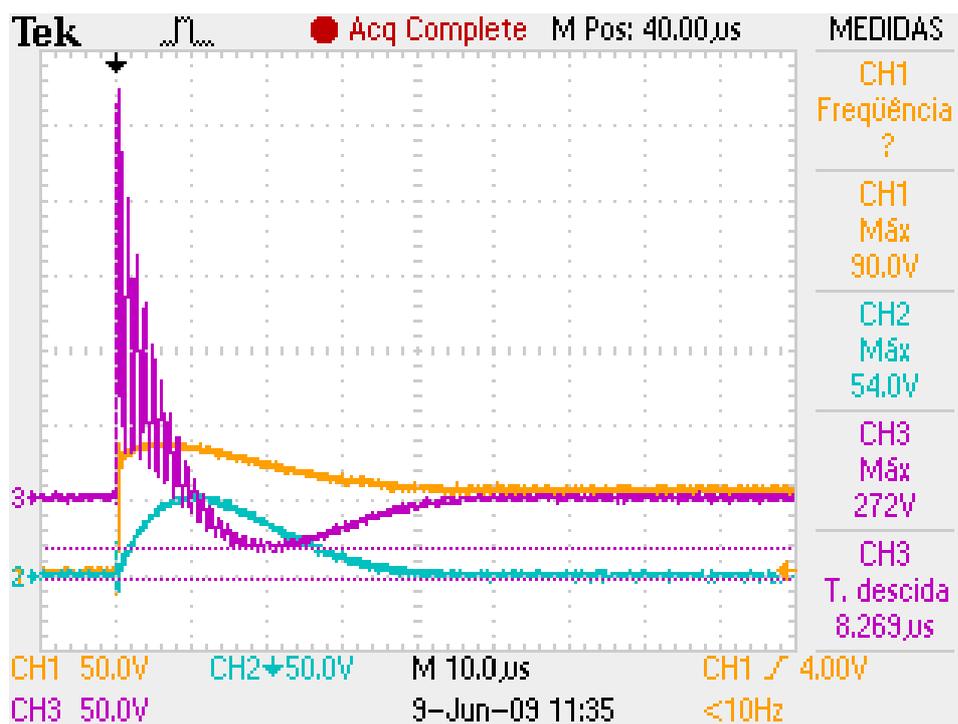


Fig. 90 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 3.

$$I(\text{pico}) = \frac{V_s}{R_s} = \frac{54V}{10,54m\Omega} = 5,15 \text{ kA}.$$

Conclusão do Teste 3

O Teste 3 obteve como resultado uma forma de onda de tensão dos terminais da bobina semelhante àquela obtida do Teste 2, porém com maior valor de pico de amplitude.

Teste 4

CH1: Tensão V_{var} (varistor);

CH2: Tensão V_s (resistor shunt);

CH3: Tensão V_b (bobina de Rogowski);

V_s (pico) = 72 V. V_b (pico): +352 V; V_b (pico): -50 V; V_c : 18 kV.

A Fig. 91 exibe os dados obtidos do Teste 4 em tela de osciloscópio dedicado.

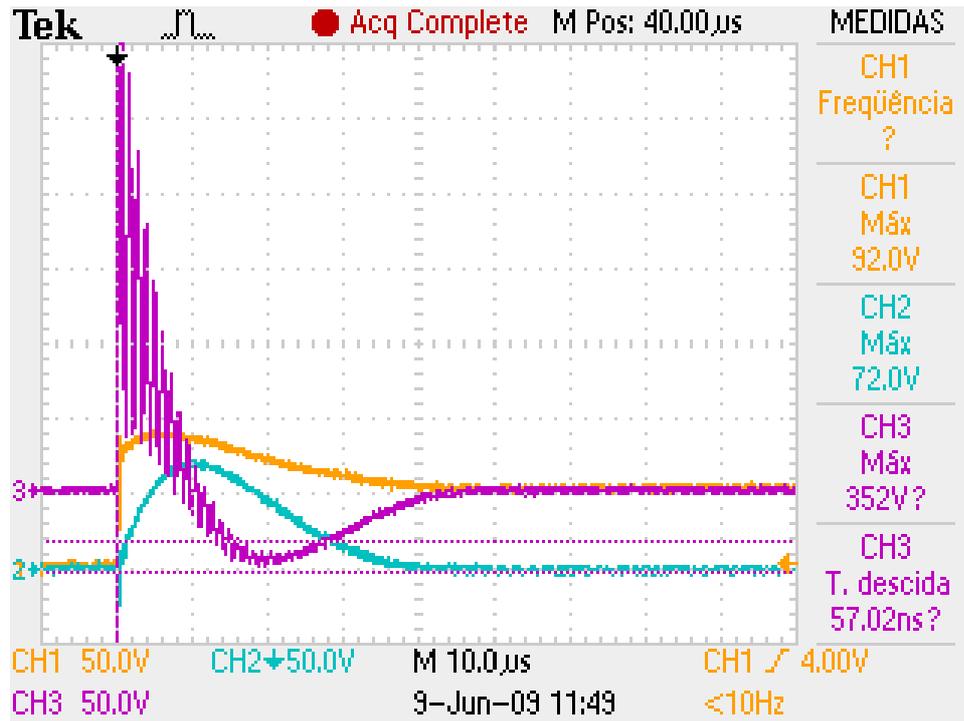


Fig. 91 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 4.

$$I(\text{pico}) = \frac{V_s}{R_s} = \frac{72\text{V}}{10,54\text{m}\Omega} = 6,85\text{kA}.$$

Conclusão do Teste 4

O Teste 4 obteve como resultado uma forma de onda de tensão dos terminais da bobina semelhante àquela obtida do Teste 3, porém com maior valor de pico de amplitude.

Teste 5

CH1: Tensão V_{var} (varistor);

CH2: Tensão V_s (resistor shunt);

CH3: Tensão V_b (bobina de Rogowski);

V_s (pico) = 88 V. V_b (pico): +392 V; V_b (pico): -60 V; V_c : 20 kV.

A Fig. 92 exhibe os dados obtidos do Teste 5 em tela de osciloscópio dedicado.

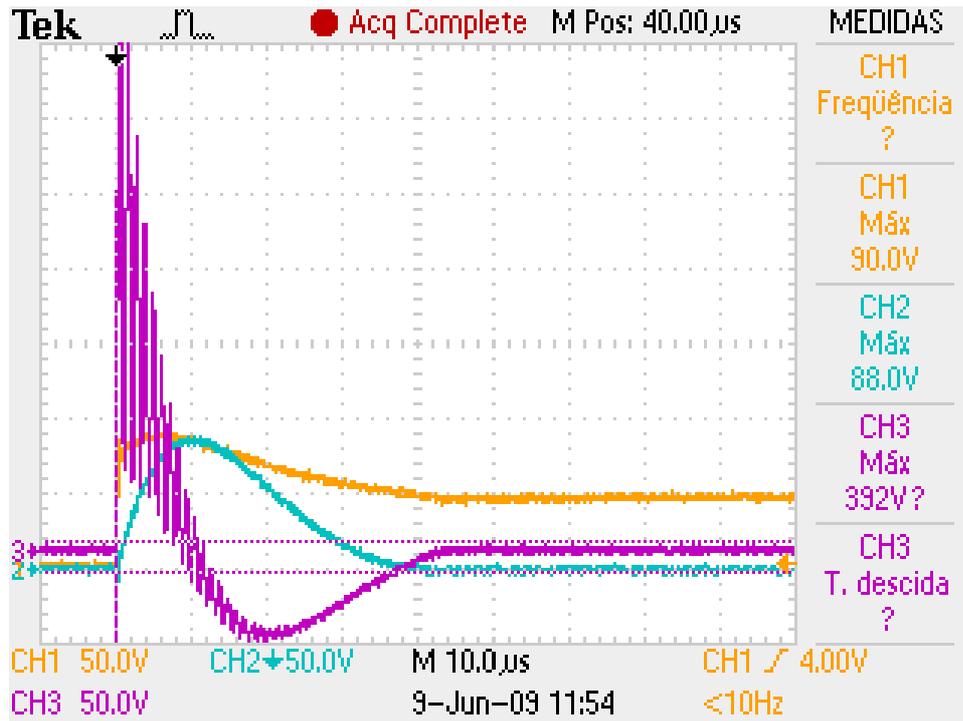


Fig. 92 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 5.

$$I(\text{pico}) = \frac{V_s}{R_s} = \frac{88V}{10,54m\Omega} = 8,35kA .$$

Conclusão do Teste 5

O Teste 5 obteve como resultado uma forma de onda de tensão dos terminais da bobina semelhante àquela obtida do Teste 4, porém com maior valor de pico de amplitude.

Dados Obtidos para a Sequência de Testes

A Tabela 4 mostra os dados obtidos na sequência de testes realizada.

Tabela 4 – Dados obtidos com osciloscópio da sequência de testes realizados

Testes realizados	Vs (V)	Vb (pico) (V)	Vb (pico) (V)	Vc (kV)
Teste 1	30	+154	-15	10
Teste 2	44	+222	-28	13
Teste 3	54	+272	-30	15
Teste 4	72	+352	-50	18
Teste 5	88	+392	-60	20

A Tabela 5 mostra as correntes obtidas na sequência de testes.

Tabela 5 – Correntes impulsivas calculadas para a referida sequência de testes.

Testes realizados	I (kA)
Teste 1	2,85
Teste 2	4,2
Teste 3	5,15
Teste 4	6,85
Teste 5	8,35

As Figs. 93 e 94 mostram a relação entre os valores de corrente impulsiva gerados em cada teste e os valores de pico positivo e negativo, respectivamente.

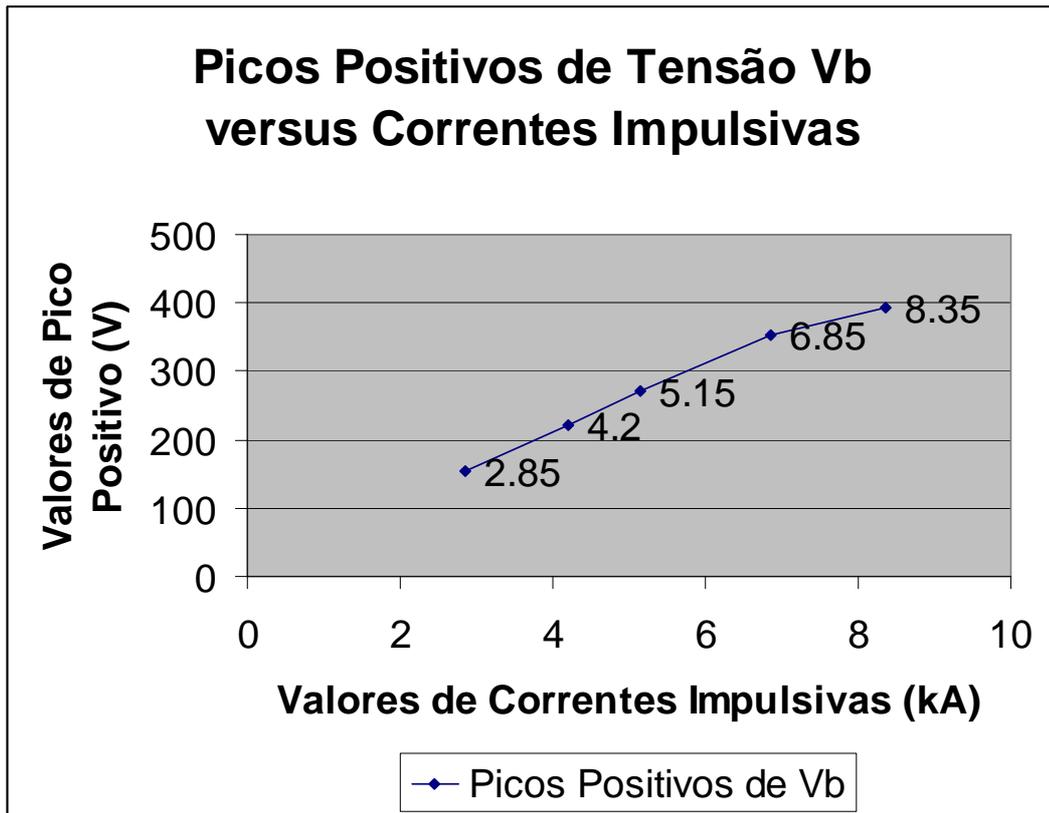


Fig. 93 – Valores de pico positivo da tensão Vb em função das correntes impulsivas.

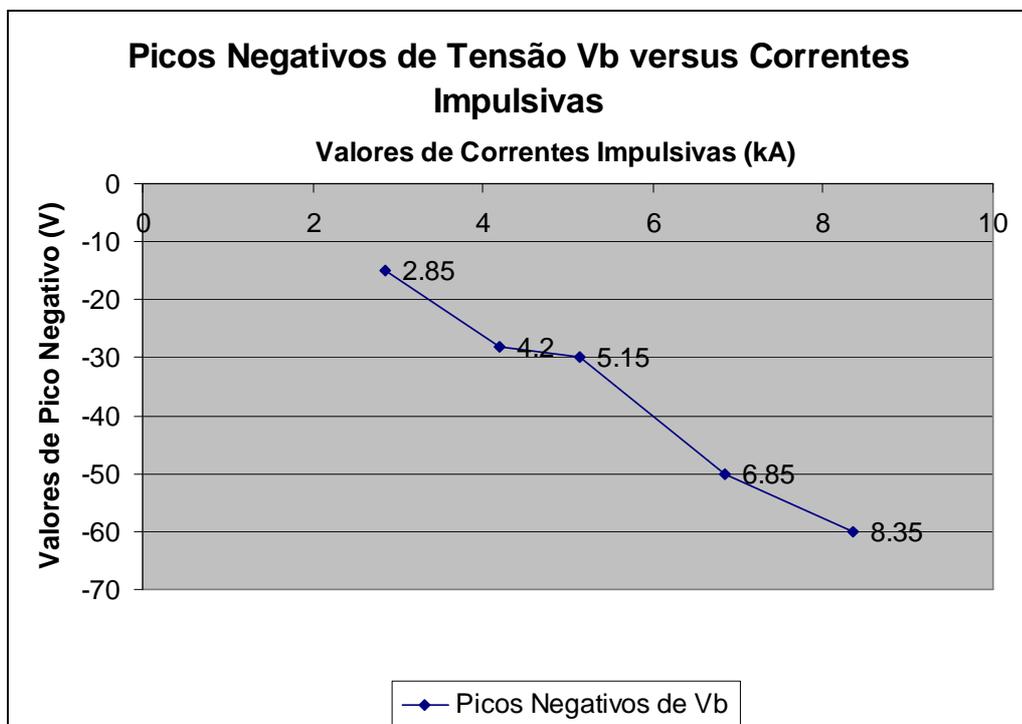


Fig. 94 – Valores de pico negativo da tensão Vb em função das correntes impulsivas.

Conclusão para a Sequência de Testes

A sequência de testes que se inicia pelo Teste 1 e termina no Teste 5, mostra uma relação quase linear entre os picos da corrente impulsiva que flui pelo plano da bobina de Rogowski e os respectivos valores de pico positivo da tensão medida nos terminais da bobina. Os picos negativos de tensão sofreram flutuações quanto à linearidade observada para as respostas sobre os valores dos picos positivos. São, entretanto, flutuações aceitáveis e não comprometem o desempenho prático da bobina em relação à corrente impulsiva gerada.

Conseguiu-se, assim, elaborar as curvas que caracterizam o comportamento da resposta de tensão do sensor bobina de Rogowski em função da passagem de correntes impulsivas pelo interior da bobina. O comportamento da resposta da tensão na bobina de Rogowski reforça a intenção de se manter o circuito eletrônico condicionador de sinais como aquele já apresentado na etapa de concepção, pois as respostas obtidas da bobina de Rogowski traduzem o comportamento esperado de tensão referente à passagem de uma corrente impulsiva pelo plano do toróide da bobina. As respostas são de fato proporcionais à derivada temporal da corrente impulsiva.

Novos testes e resultados com a bobina de Rogowski para excitação do circuito com corrente AC industrial serão apresentados a seguir.

6.1.2. Testes em AC sobre o Sensor Bobina de Rogowski em Laboratório de Alta Tensão na UFCG

O objetivo principal dos testes de validação das respostas do sensor bobina de Rogowski era verificar qual a sensibilidade da bobina diante da aplicação de correntes AC, na frequência industrial, à haste de excitação. Esperava-se que o sensor pudesse suportar algumas dezenas de corrente AC de maneira a não produzir nenhuma resposta em sua saída. Caso isso não acontecesse, seria necessária a inserção de um filtro que atenuasse essas correntes AC, pois elas poderiam ser vistas como provenientes de uma descarga atmosférica, o que exigiria um processo mais laborioso de discriminação dos efeitos.

Os testes em AC são essenciais, pois é sabido que em linhas de transmissão de energia elétrica quando tais linhas são equipadas com cabos para-raios, estando os cabos numa configuração tal que exista o contato elétrico entre eles e a torre de linha de transmissão, há

sempre a passagem de uma corrente elétrica permanente fechando o circuito torre-cabo para-raios e o solo [26].

Os testes foram realizados a partir de um esquema elétrico visualizado na Fig. 95 cujos componentes são: um transformador de potencial (TP), um cabo de alta suportabilidade elétrica de corrente, um sistema de medição com multímetro e alicate amperímetro, um osciloscópio, e, por fim, a bobina de Rogowski.

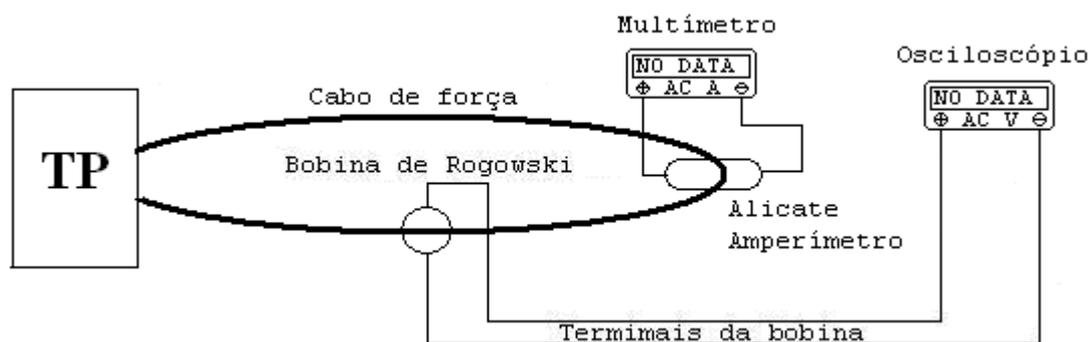


Fig. 95 – Diagrama elétrico para os testes de corrente AC sobre a bobina de Rogowski.

Os testes iniciaram com a alimentação elétrica do TP que por sua vez produziu a passagem de uma corrente elétrica pelo cabo de força. Este cabo de força, de alta suportabilidade elétrica, foi inserido pelo interior da bobina de Rogowski e do alicate amperímetro. Conectou-se o alicate amperímetro ao multímetro e os terminais da bobina de Rogowski ao osciloscópio. As correntes lidas pelo multímetro conectado ao alicate amperímetro oscilaram em valores de dezenas de ampères até ao valor máximo de 380 A devido a limitações do alicate amperímetro. O sinal de tensão, observado na tela do osciloscópio e colhido nos terminais da bobina de Rogowski, não traduzia nenhuma reação da bobina à corrente que fluía em seu centro através do cabo, visto que ao se desligar e ligar novamente a alimentação do circuito este sinal não se alterava. A conclusão a que se chegou é de que os sinais observados no osciloscópio eram devidos apenas a fatores externos, como interferências e ruídos. Ou seja, a resposta AC da bobina não foi visível para os valores de corrente de até 380A.

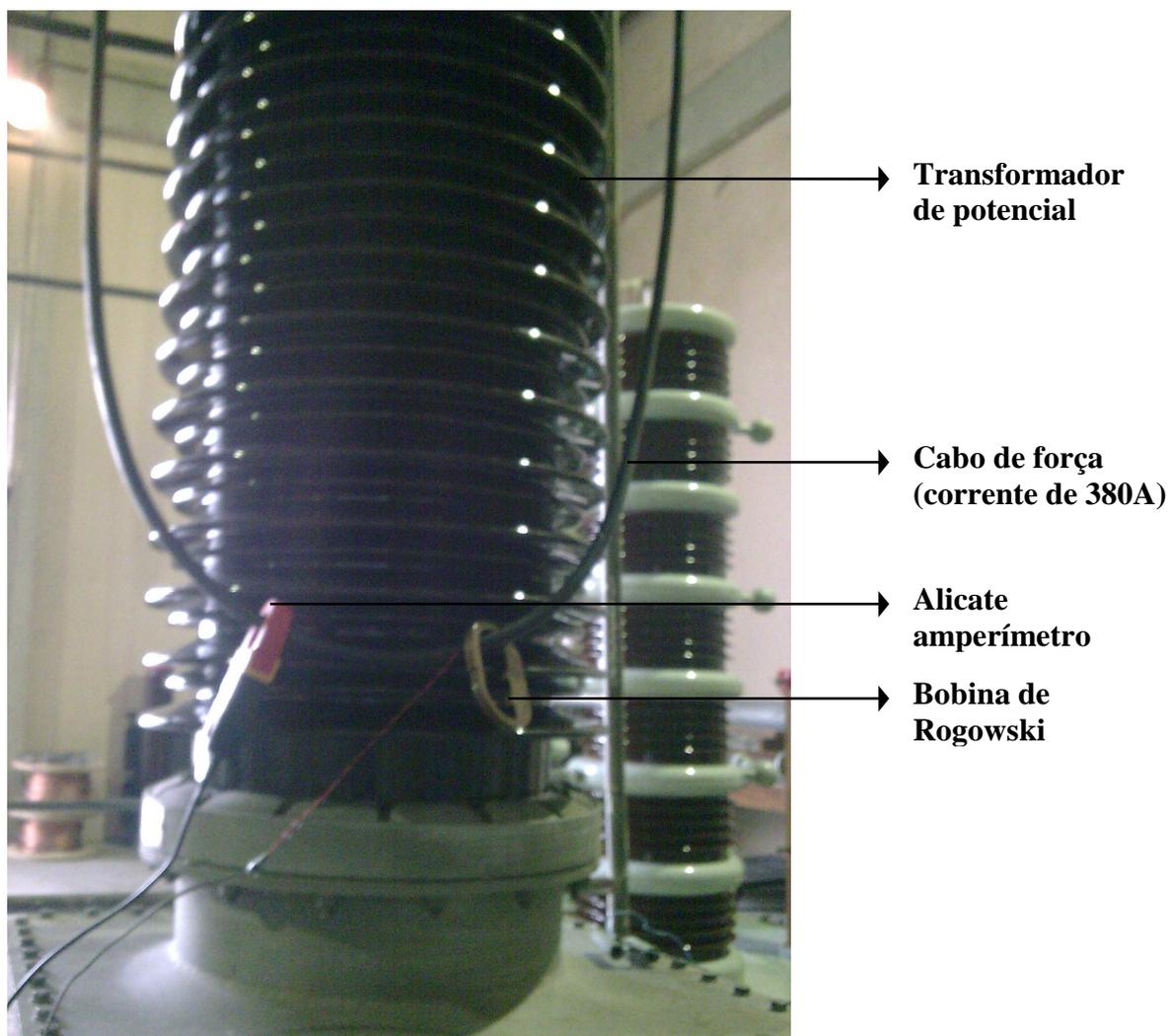


Fig. 96 – Fotografia da montagem para testes de corrente AC sobre a bobina de Rogowski.

6.2. Testes sobre o Conjunto Formado pelo Sensor Bobina de Rogowski e o Circuito Eletrônico Condicionador de Sinais para Correntes Impulsivas

Da mesma forma em que foram realizados os testes sobre apenas o sensor bobina de Rogowski, foram feitos também os testes sobre o conjunto formado pela bobina e o circuito eletrônico condicionador de sinais. Esses testes ocorreram no Laboratório de Alta Tensão da UFCG. As correntes impulsivas geradas para a realização dos testes possuíam valores típicos $8/20 \mu\text{s}$, variaram em amplitude entre 2,5 kA e 8,5 kA, e foram injetadas pelo mesmo sistema com o qual se testou a bobina de Rogowski apenas, ou seja: o gerador de corrente impulsiva,

os centelhadores, varistor (como limitador de corrente), o resistor shunt (utilizado para se obter em osciloscópio o valor de tensão proporcional à corrente impulsiva), a haste metálica e a bobina de Rogowski.

Além desses componentes de circuito necessários para a realização dos testes, contou-se também com um circuito divisor de tensão universal que verifica, de maneira redundante, a tensão colhida nos terminais do varistor. A Fig. 97 mostra o esquema elétrico desenvolvido para a realização dos testes e a Fig. 98 mostra o diagrama em blocos do cenário de testes sobre o sensor bobina de Rogowski e o circuito eletrônico condicionador de sinais.

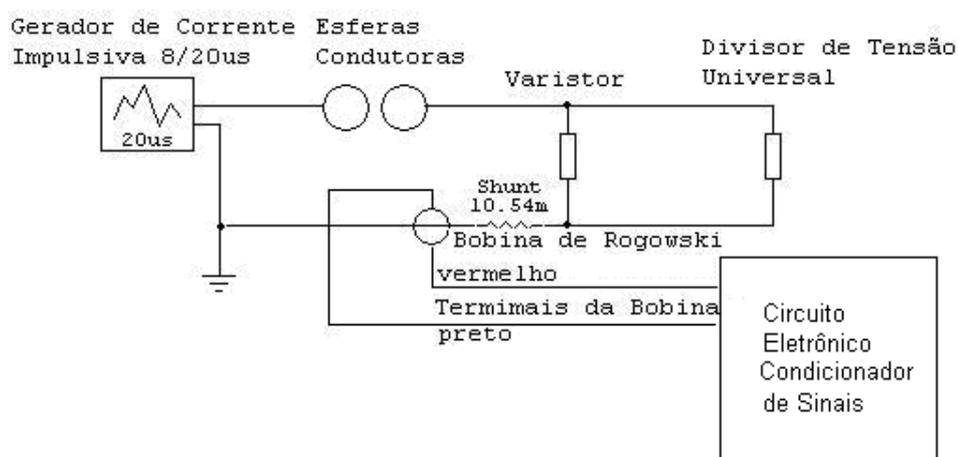


Fig. 97 – Esquema elétrico básico de montagem para testes.

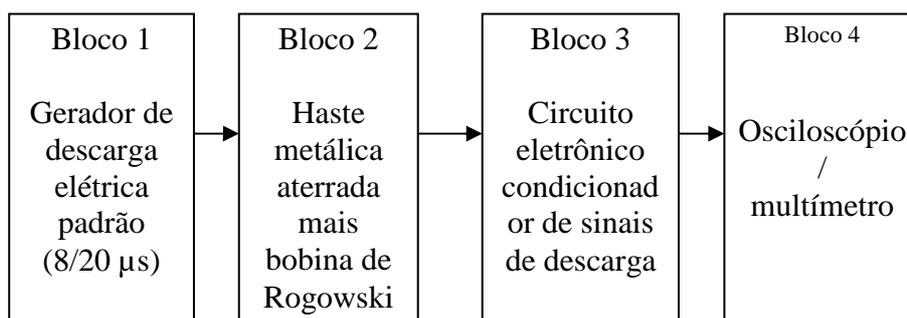


Fig. 98 – Diagrama em blocos do cenário de testes sobre o conjunto sensor bobina de Rogowski e o circuito eletrônico condicionador de sinais realizados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG.

Similarmente ao que foi feito nos testes realizados anteriormente com a bobina de Rogowski apenas, as formas de onda observadas e registradas no osciloscópio utilizado são referentes à tensão sobre resistor shunt (Vs), para que se possa estimar o valor da corrente I impulsiva que atravessa axialmente a bobina; à tensão nos terminais da bobina de Rogowski

(Vb), para se conhecer forma e amplitude dessa tensão; à tensão sobre o varistor utilizado (Vvar); e à tensão de saída do circuito eletrônico condicionador de sinais (Ve).

Teste 1

CH1: Tensão Vvar (varistor);

CH2: Tensão Vs (resistor shunt);

CH3: Tensão Vb (bobina de Rogowski);

CH4: Tensão Ve (saída do circuito eletrônico condicionador de sinais).

$V_s(\text{pico}) = 37,6 \text{ V}$;

Constante de tempo do circuito integrador ativo $RC = 4,7 \text{ k}\Omega \cdot 10 \text{ nF} = 47 \text{ }\mu\text{s} = 47 \cdot 10^{-6} \text{ s}$;

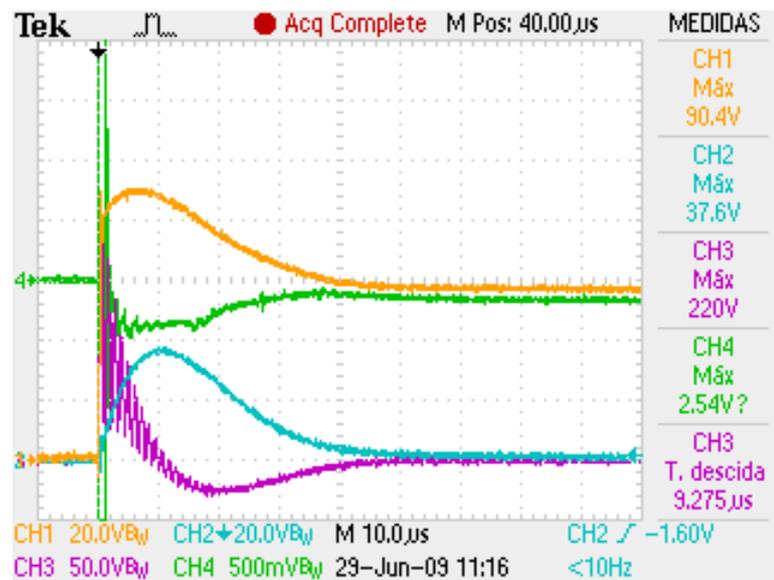


Fig. 99 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 1.

$$I(\text{pico}) = \frac{V_s}{R_s} = \frac{37,6V}{10,54m\Omega} = 3,6kA; \quad V_e(\text{cte}) = -180 \text{ mV}.$$

Conclusão do Teste 1

O Teste 1 apresentou para as tensões Vs, Vvar e Vb, valores e formas dentro do esperado. No entanto, a tensão Ve apresentou forma de onda com um transiente inicial não esperado. Seu comportamento, porém, em geral foi regular. Percebe-se pela Fig. 99 que a tensão de saída do circuito eletrônico condicionador de sinais se torna praticamente constante

para um tempo de $30 \mu\text{s}$ (esse valor é de -180 mV e pode ser visto pelo gráfico CH4, de cor verde, referente à resposta do circuito eletrônico condicionador de sinais).

As características da resposta do circuito testado possibilitarão, futuramente, que o circuito eletrônico microcontrolado leia (meça), as tensões originadas do circuito eletrônico condicionador de sinais, de maneira a discriminar os valores das correntes de descargas. A tensão de saída é negativa, pois o integrador ativo é também um circuito inversor.

Teste 2

CH1: Tensão V_{var} (varistor);

CH2: Tensão V_s (resistor shunt);

CH3: Tensão V_b (bobina de Rogowski);

CH4: Tensão V_e (saída do circuito eletrônico condicionador de sinais).

$V_s(\text{pico}) = 36,8 \text{ V}$;

Constante de tempo do circuito integrador ativo $RC = 4,7 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ nF} = 4,7 \mu\text{s} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ s}$;

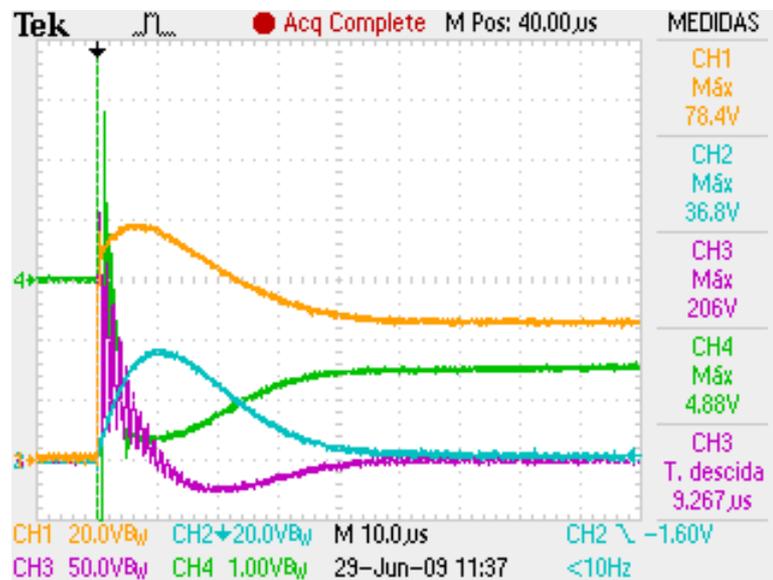


Fig. 100 – A imagem obtida com o osciloscópio para Teste 2.

$$I(\text{pico}) = \frac{V_s}{R_s} = \frac{36,8 \text{ V}}{10,54 \text{ m}\Omega} = 3,5 \text{ kA}; \quad V_e(\text{cte}) = -1,4 \text{ V}.$$

Conclusão do Teste 2

O Teste 2 apresentou para as tensões V_s , V_{var} e V_b valores e formas dentro do esperado. No entanto, a tensão V_e apresentou forma de onda com um transiente inicial não esperado. Porém, em geral, seu comportamento foi regular. Percebe-se pela Fig. 100 que a tensão de saída do circuito eletrônico condicionador de sinais se torna praticamente constante para um tempo de $30 \mu s$ (esse valor é de $-1,4 V$ e pode ser visto pelo gráfico CH4, de cor verde, referente à resposta do circuito eletrônico condicionador de sinais).

A relação de tensão se manteve da ordem de 8 vezes, e pelo fato de se ter uma constante RC dez vezes menor agora (o que eleva o valor de tensão em dez vezes) e uma corrente impulsiva um pouco menor, esperava-se uma resposta de valor de tensão de aproximadamente $-1,8V$. Pode-se supor que os fatores que levaram a essa variação sejam os componentes lineares utilizados, resistor e capacitor, pois eles possuem uma tolerância de 10% cada um. Além disso, não há uma relação linear entre o crescimento dos picos positivos e negativos da tensão colhida nos terminais da bobina de Rogowski, sendo essa a tensão que está sendo integrada pelo circuito eletrônico condicionador de sinais.

Teste 3

CH1: Tensão V_{var} (varistor);

CH2: Tensão V_s (resistor shunt);

CH3: Tensão V_b (bobina de Rogowski);

CH4: Tensão V_e (saída do circuito eletrônico condicionador de sinais).

$V_s(\text{pico}) = 47,2 V$;

Constante de tempo do circuito integrador ativo $RC = 4,7 k\Omega \cdot 1 \eta F = 4,7 \mu s = 4,7 \cdot 10^{-6} s$;

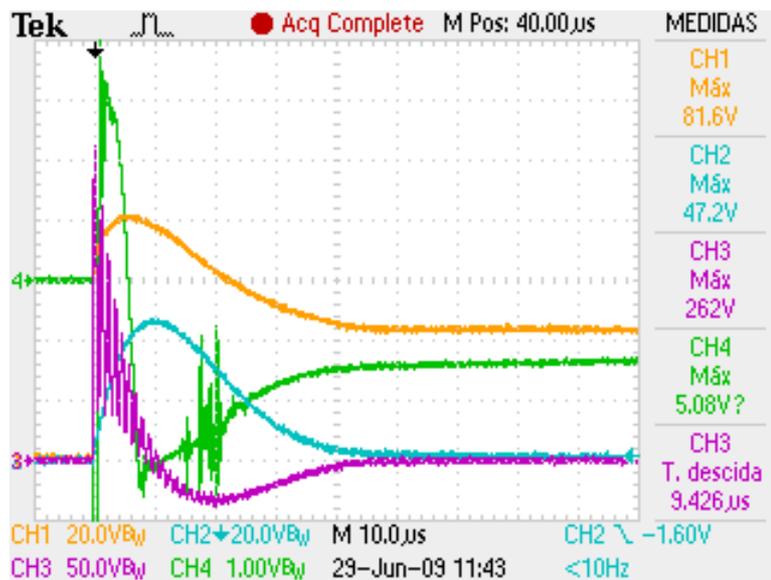


Fig. 101 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 3.

$$I(\text{pico}) = \frac{V_s}{R_s} = \frac{47,2V}{10,54m\Omega} = 4,5kA; \quad V_e(\text{cte}) = -1,4V.$$

Conclusão do Teste 3

O Teste 3 apresentou para as tensões V_s , V_{var} e V_b , valores e formatos dentro do esperado. No entanto, a tensão V_e além de ter apresentado forma de onda com um transiente inicial não esperado, possui aspecto um pouco diferente das respostas dos Testes 1 e 2. Percebe-se pela Fig. 101 que a tensão de saída do circuito eletrônico condicionador de sinais torna-se praticamente constante para um tempo de $30\ \mu s$ (este valor é de $-1,4V$ e pode ser visto pelo gráfico CH4, de cor verde, referente à resposta do circuito eletrônico condicionador de sinais).

Novamente, a informação conflitante foi que a relação de tensão se manteve da ordem de 8 vezes sendo a mesma resposta para o Teste 3, porém pelo fato de se ter uma corrente impulsiva 25% maior, esperava-se um valor de tensão do circuito eletrônico condicionador igualmente maior. Bem, a conclusão é de que os fatores que levaram a essa variação são: os componentes lineares utilizados, resistor e capacitor, possuem uma tolerância de 10% cada; e de não há uma relação linear entre o crescimento dos picos positivos e negativos da tensão colhida nos terminais da bobina de Rogowski, sendo essa a tensão integrada pelo circuito eletrônico condicionador de sinais. Além disso, o comportamento da tensão de saída do integrador foi um pouco distinto das tensões apresentadas nos Testes 1 e 2.

Teste 4

CH1: Tensão V_{var} (varistor);

CH2: Tensão V_s (resistor shunt);

CH3: Tensão V_b (bobina de Rogowski);

CH4: Tensão V_e (saída do circuito eletrônico condicionador de sinais).

$V_s(\text{pico}) = 64,8 \text{ V}$;

Constante de tempo do circuito integrador ativo $RC = 4,7 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ nF} = 4,7 \mu\text{s} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ s}$;

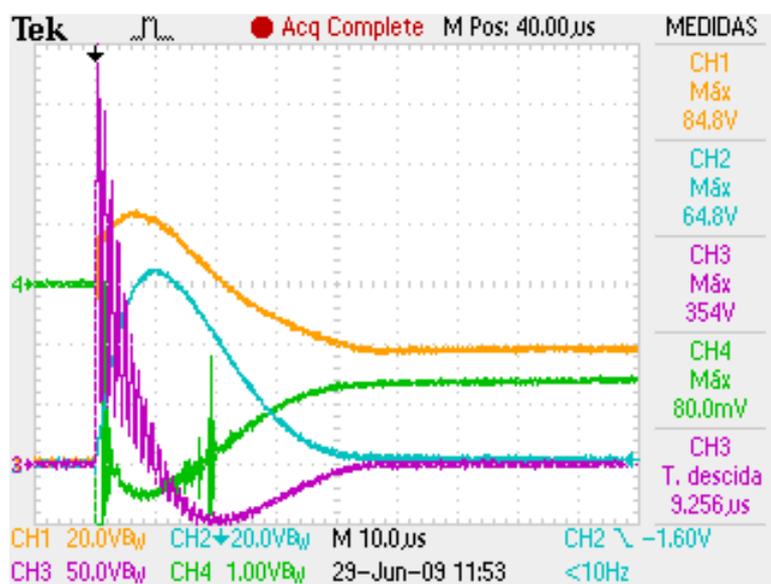


Fig. 102 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 4.

$$I(\text{pico}) = \frac{V_s}{R_s} = \frac{64,8 \text{ V}}{10,54 \text{ m}\Omega} = 6,15 \text{ kA}; \quad V_e(\text{cte}) = -1,6 \text{ V}.$$

Conclusão do Teste 4

A conclusão do Teste 4 é a mesma apresentada para o Teste 3. No Teste 4, porém, foi injetada uma corrente impulsiva cujo pico foi de 6,15 kA e a tensão colhida foi de -1,6 V. Houve, portanto um aumento de 15% sobre o valor da tensão, para um aumento de 35% sobre o valor de pico de corrente impulsiva. Novamente, percebe-se, na resposta de tensão do Teste 4, uma forma de onda semelhante ao Teste 3 com algumas oscilações que podem estar influenciado o valor final estabilizado dessa tensão.

Teste 5

CH1: Tensão V_{var} (varistor);

CH2: Tensão V_s (resistor shunt);

CH3: Tensão V_b (bobina de Rogowski);

CH4: Tensão V_e (saída do circuito eletrônico condicionador de sinais).

$V_s(\text{pico}) = 87,2 \text{ V}$;

Constante de tempo do circuito integrador ativo $RC = 4,7 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ }\mu\text{F} = 4,7 \text{ }\mu\text{s} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ s}$;

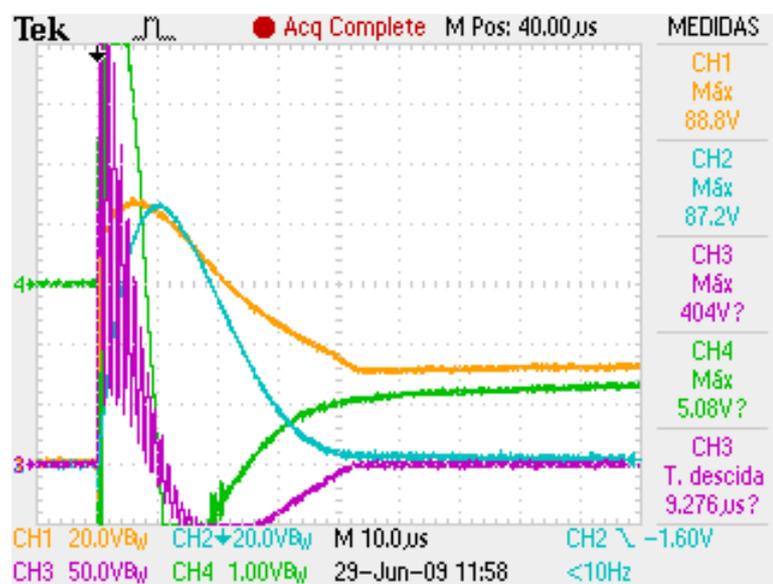


Fig. 103 – A imagem obtida de osciloscópio para Teste 5.

$$I(\text{pico}) = \frac{V_s}{R_s} = \frac{87,2\text{V}}{10,54\text{m}\Omega} = 8,25\text{kA}; \quad V_e(\text{cte}) = -1,8 \text{ V}.$$

Conclusão do Teste 5

A conclusão do Teste 5 é a mesma apresentada para o Teste 4, porém vale ressaltar as comparações. No Teste 5, teve-se uma corrente impulsiva de 6,15 kA e uma resposta de tensão de -1,6 V. No Teste 6, porém, foi injetada uma corrente impulsiva cujo pico foi de 8,25 kA e a tensão colhida foi de -1,8 V. Houve, portanto um aumento de 12,5% sobre o valor da tensão, para um aumento de 35% sobre o valor de pico de corrente impulsiva. Essa diferença de aumentos dos valores de pico da tensão de saída do integrador ativo e da corrente impulsiva pode ser melhor explicada com a realização de novos testes.

Dados Obtidos para a Sequência de Testes de 2 a 5

A Tabela 6 mostra os dados obtidos na sequência de testes realizada do Teste 2 ao Teste 5, pois possuem a mesma constante $RC = 4,7 k\Omega \cdot 1 \eta F = 4,7 \mu s = 4,7 \cdot 10^{-6} s$;

Tabela 6 – Dados obtidos de osciloscópio da sequência de testes a partir do Teste 2.

Testes Realizados	Vs (V)	Ve (cte) (V)	Vc (kV)
Teste 2	36,8	-1,4	14
Teste 3	47,2	-1,4	16
Teste 4	64,8	-1,6	20
Teste 5	87,2	-1,8	24

Vc: tensão de carregamento para o gerador de correntes impulsivas.

Análise para a Sequência de Testes

A Tabela 7 mostra as correntes obtidas na sequência de testes.

Tabela 7 – Correntes impulsivas calculadas para a referida sequência de testes.

Testes Realizados	I (kA)
Teste 2	3,5
Teste 3	4,5
Teste 4	6,15
Teste 5	8,25

Além desses dados e análises, a Fig. 104 mostra a relação entre os valores de corrente impulsiva e os valores de pico de tensão de saída do circuito eletrônico condicionador de sinais, gerados em cada teste, respectivamente.

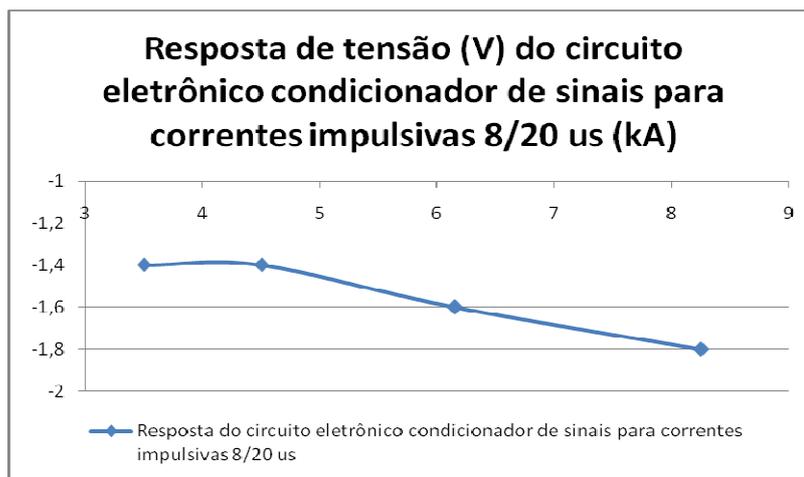


Fig. 104 – Valores de Pico da Tensão V_e (V) em função das Correntes Impulsivas (kA).

Teste sobre o Conjunto Sensor Bobina de Rogowski e Circuito Eletrônico Condicionador de Sinais para Circuito Próximo ao Gerador de Corrente Impulsiva

O teste a seguir foi realizado seguindo-se a mesma configuração de montagem e o mesmo cenário que os testes já realizados sobre o conjunto sensor bobina de Rogowski e circuito eletrônico condicionador de sinais. A diferença, porém, é que o circuito eletrônico foi colocado próximo às esferas condutoras que compõem o gerador de corrente impulsiva da UFCG. Esse teste é apresentado de acordo com sequência cronológica dos testes anteriores sendo, portanto, designado Teste 6.

Teste 6

CH1: Tensão V_{var} (varistor);

CH2: Tensão V_s (resistor shunt);

CH3: Tensão V_b (bobina de Rogowski);

CH4: Tensão V_e (saída do circuito eletrônico condicionador de sinais).

$V_s(\text{pico}) = 58,4 \text{ V}$;

Constante de tempo do circuito integrador ativo $RC = 4,7 \text{ k}\Omega \cdot 1 \text{ nF} = 4,7 \mu\text{s} = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ s}$;

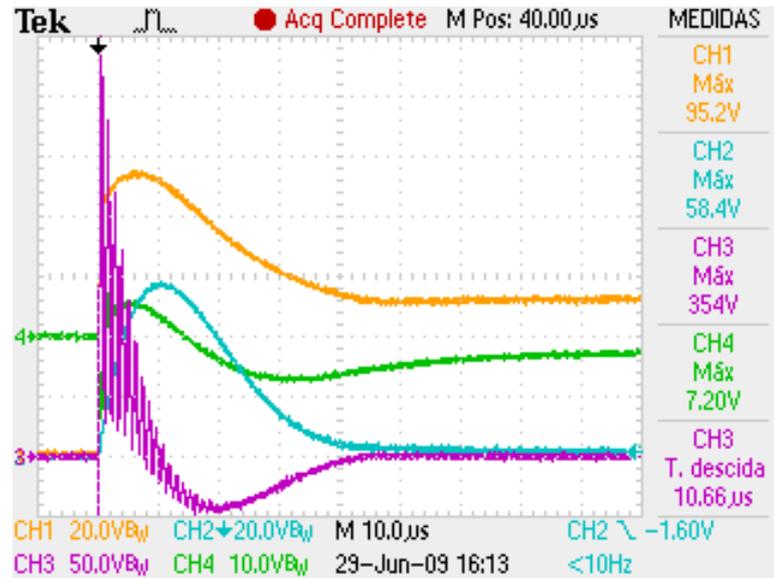


Fig. 105 – A imagem obtida com osciloscópio para Teste 6.

$$I(\text{pico}) = \frac{V_s}{R_s} = \frac{58,4V}{10,54m\Omega} = 5,6kA; \quad V_{e(\text{cte})} = -2V.$$

Conclusão do Teste 6

O Teste 6 apresentou para as tensões V_s , V_{var} e V_b , valores e formas dentro do esperado. No entanto, a tensão V_e mostrou-se mais estável que nos testes anteriores. Percebe-se pela Fig. 105 que a tensão de saída do circuito eletrônico condicionador de sinais torna-se praticamente constante para um tempo de $80\ \mu\text{s}$ (este valor é de $-2\ \text{V}$ e pode ser visto pelo gráfico CH4, de cor verde, referente à resposta do circuito eletrônico condicionador de sinais). Nota-se, portanto, um valor maior de tensão de saída do circuito eletrônico condicionador de sinais que pode ser explicado pelo fato de se ter uma maior indução devido à proximidade com o circuito gerador de corrente impulsiva.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

Esta dissertação apresentou a concepção, a construção e os testes de um sistema eletrônico sensor capaz de detectar a incidência de descargas atmosféricas em estruturas de linhas de transmissão de energia elétrica. Além disso, quando implantado em torres de uma linha de transmissão real, o sistema será capaz de encaminhar as informações colhidas relativas ao fenômeno por um sistema de transmissão de R.F., instalado também nessas torres, para um centro de recepção remoto que pode ser o centro de controle da empresa interessada.

Foi realizada inicialmente uma revisão bibliográfica estudo sobre descarga atmosférica, sendo apresentados os principais parâmetros envolvidos com a sua ocorrência e seus efeitos sobre as estruturas de linhas de transmissão. Apresentou-se também uma descrição sobre os procedimentos de medição direta de descargas atmosféricas conhecidos da literatura técnica pelo autor.

Descrição detalhada do sinal típico de uma descarga atmosférica foi nesta dissertação apresentada, com o cálculo de sua Transformada de Fourier, para que se pudessem escolher os tipos de componentes eletrônicos a serem usados no projeto, bem como seus valores, dentro da faixa de frequência correspondente à do espectro gerado pelo sinal de descarga. Além disso, para a concepção do sistema sensor, precisou-se conhecer o comportamento, forma de onda e amplitude das correntes a serem medidas na estrutura metálica da torre de linha de transmissão geradas pela corrente de descarga. Isto porque o sensor e os circuitos que compõem o sistema serão instalados em alguma parte na estrutura metálica da torre. Essa etapa foi desenvolvida quando se fez a modelagem da torre e foram obtidas as características da corrente de descarga sobre a torre.

A etapa de concepção e construção do sistema de detecção foi realizada no Laboratório de Fotônica da UFPE e os primeiros testes foram aí realizados, quando pulsos curtos de tensão foram gerados por circuitos eletrônicos simulando a resposta de tensão que seria obtida nos terminais da bobina quando da passagem de correntes impulsivas. Com resultados satisfatórios, iniciou-se a etapa de testes no Laboratório de Alta Tensão do Dep. de Engenharia Elétrica da UFCG.

Na UFCG, foram realizados inicialmente testes para caracterização da resposta de tensão da bobina de Rogowski, para os quais foram obtidos bons resultados. Os testes

forneceram a resposta de tensão dessa bobina a partir de impulsos de correntes sobre ela. Os testes mostraram resposta quase linear da tensão nos terminais da bobina em função do pico da corrente de descarga gerada no laboratório. Foi testada também a bobina quanto ao seu comportamento diante de corrente de estímulo AC. Seus resultados foram também satisfatórios, visto que ela não respondeu à corrente AC que lhe foi aplicada, como idealizado e projetado.

Em seguida, testes ainda na mesma Instituição foram realizados, desta vez, com o circuito eletrônico condicionador de sinais conectado aos terminais da bobina de Rogowski. Esse circuito tem como componente principal um integrador analógico ativo e um circuito divisor de tensão. Os testes realizados para caracterização da resposta de tensão dessa conexão apresentaram resultados satisfatórios. A relação, entre a tensão da resposta de saída do circuito eletrônico condicionador de sinais e a corrente impulsiva correspondente, foi quase linear, sendo esta uma importante característica do conjunto para fins de medição discriminada dos valores de pico das descargas atmosféricas a serem percebidas e medidas.

O circuito eletrônico condicionador de sinais tem como componente principal um integrador analógico ativo e um circuito divisor de tensão. Há fortes suspeitas de que o transiente inicial apresentado nas respostas de tensão de saída do circuito tenha sido provocado pelo amplificador operacional, em virtude de à entrada desse dispositivo ser aplicada uma tensão com comportamento bastante oscilatório como aquela tensão obtida dos terminais da bobina de Rogowski. Os próximos testes deverão ser realizados também na UFCG, desta vez com o circuito microcontrolado conectado à saída do circuito condicionador de sinais. O circuito eletrônico microcontrolado para fugir da instabilidade, verificada na resposta de saída do circuito eletrônico condicionador de sinais, deverá ser projetado de forma a ler o sinal disponível pelo primeiro após o intervalo de duração do transiente; ou seja, quando a resposta estiver estabilizada.

Outro ponto relevante é que as respostas do circuito eletrônico condicionador de sinais, quando próximos dos centelhadores, apresentaram a mesma forma que aquelas das respostas quando o circuito se encontrava longe delas. Isso mostra que o circuito condicionador de sinais não foi afetado de forma perceptível pelos campos eletromagnéticos gerados durante o surto de corrente. Isso pode não ser verdadeiro quando o circuito microcontrolado for testado quanto a isso, uma vez que o microcontrolador opera com correntes muito inferiores às do amplificador operacional. Esse estudo decidirá o quão cuidadosamente blindados deverão ser os circuitos do sistema proposto.

Uma descrição objetiva dos principais resultados e conclusões obtidos pela pesquisa realizada para este trabalho de dissertação, encontra-se a seguir:

- ✓ A bobina de Rogowski é eficaz na detecção de descargas elétricas cujas correntes possuem forma de onda semelhante àquela conhecida das descargas atmosféricas.
- ✓ Os circuitos eletrônicos desenvolvidos respondem satisfatoriamente ao estímulo de sinais de tensão que possuem uma característica impulsiva, sendo a concepção desses circuitos realizada a partir da análise espectral de um sinal típico de descarga atmosférica e da resposta de corrente de descarga ao longo de uma torre de L.T.
- ✓ Os primeiros testes com o circuito integrador ativo próximo aos centelhadores, realizados no Laboratório de Alta Tensão da UFCG, mostraram não sofrer perturbações por influência das descargas elétricas.
- ✓ O sistema eletrônico desenvolvido é formado por componentes usuais em laboratório de eletrônica, de baixo custo e fácil aquisição no comércio especializado.
- ✓ O sistema eletrônico completo de detecção de descargas foi testado e encontra-se em funcionamento no Laboratório de Fotônica da UFPE, onde foram aplicados, com o auxílio de um microcontrolador, pulsos de tensão à entrada do circuito simulando a resposta de tensão da bobina de Rogowski.
- ✓ A instalação do sistema eletrônico sensor de detecção de descargas atmosféricas proporcionará à companhia de transmissão de energia elétrica obter em tempo real informações relativas à incidência de descargas atmosféricas em seus vãos ou torres de L.T., auxiliando-a nas atividades de manutenção de suas linhas de transmissão.

Como se pôde notar nesta dissertação, a alimentação elétrica do sistema de detecção de descargas atmosféricas não foi discutida nem objeto de desenvolvimento. Esse tema será tratado em trabalhos futuros como será citado a seguir.

Como trabalhos futuros para o tema desta dissertação, podem-se relacionar:

- a. Implementação e testes de circuito de R.F. para transmissão dos dados obtidos da medição em conjunto com os circuitos eletrônicos condicionador de sinais e microcontrolado;
- b. Testes em estrutura real de torre de linha de transmissão adaptada com chave geradora de surtos de correntes sobre o sistema eletrônico sensor desenvolvido;

- c. Testes com o sistema sensor em linhas de transmissão de testes para verificar a comunicação entre cada sistema e a central de operação da empresa;
- d. Condicionamento do sistema sensor em linhas de transmissão em operação para verificar a comunicação entre cada sistema e a central de operação da empresa;
- e. Desenvolvimento de um circuito de alimentação de todo o sistema, e que já está em andamento, sem uso de baterias. O circuito deverá ser alimentado por tensão induzida, pelo campo magnético gerado pelas correntes das linhas trifásicas, em espiras convenientemente dimensionadas e instaladas na estrutura da torre.

Referências Bibliográficas:

- [1] Hedman, D. E., “Teoria de Linhas de Transmissão - II Série P.T.I., UFSM, RS, 1978.
- [2] Visacro Filho, S., “Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia”. Editora Artliber, São Paulo, 2006.
- [3] Gilberto E. H., “Técnica de las Altas Tensiones, Estudio de Sobretensiones de Transitorias en Sistemas Electricos y Coordinacion de Aislamiento”, Vol. II, ESIME, Mexico, 1978.
- [4] G. C. Simpson, “The mechanism of a thunderstorm”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1927, p. 376.
- [5] C. T. R. Wilson, “A theory of thundercloud electricity BY C. T. R. WILSON”, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1956, p. 1.
- [6] Uman, M. A., “The Lightning Discharge”, Academic Press, Inc. 377, 1987.
- [7] Berger, K., Anderson, R. B., Kröninger, H., Palva, V., “Parameters of lightning flashes”. Electra, n. 41, p. 23-37, 1975.
- [8] Fuchs, F., Landers, E. U., Schmid, R., Wiesinger, J., “Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes to tall structures relating to interference of electronic systems”. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 40, n. 4, p. 444-451, 1998.
- [9] Heidler, F., “Lightning current measurements at the Paissenberg telecommunication tower”. In: International Conference on Grounding and Earthing & 3rd. Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro, 2002. Proceedings.Ground’2002 and 3rd WAE. Rio de Janeiro, 2002. p. 117-122.
- [10] Beirl, O., “Front Shape parameters of negative subsequent strokes measured at the Peissenberg Tower”. In: International Conference on Lightning Protection, 21, 1992. Proceedings.ICLP. Berlin, 1992. p. 19-24.
- [11] Motoyama, H., Janischewskyj, W., Hussein, A. M., Rusan, R., Chisholm, W. A., Chang, J. S., “Electromagnetic field radiation model for lightning strokes to tall structures”. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 3, p. 1624-1632, 1996.
- [12] Rachidi, F., Janischewskyj, W., Hussein, A. M., Nucci, C. A., Guerrieri, S., Kordi B., Chang J. S., “Current and electromagnetic field associated with lightning – return stroke to tall towers”. IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 43, n. 3, p. 356-367, 2001.

- [13] Geldenhuys H. J., Eriksson, A. J., Bourn, G. W., “Fifteen years’ data of lightning current measurement on a 60 m mast”. In: International Conference on Lightning Protection, 19, Graz, 1988. Proceedings.ICLP. Graz, 1988, p. 451-456.
- [14] Soares Jr., A., Visacro, S., Cherchiglia, L. C. L., “Investigação de Configurações Otimizadas para o Aterramento das Torres do Sistema de Transmissão da CEMIG para Melhoria de Desempenho Frente a Descargas Atmosféricas”. *EletroEvolução* (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, v. 14, p. 58-63, 1998.
- [15] Soares Jr., A., Visacro F., S., Schroeder, M. A. O., “Lightning Response of Typical Brazilian Transmission Line Tower-footing Arrangements”. In: International Conference on Grounding and Earthing, 1998, Belo Horizonte. Proceedings I International Conference on Grounding and Earthing, 1998.
- [16] Guedes, D. G., Pinto Jr., O., Visacro F., S., “A Theoretical estimation of the lightning current on the bottom of an instrumented tower from the measured value on the top”. In: International Conference on Grounding and Earthing. 3rd Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro, 2002. Proceedings.Ground’2002 and 3rd WAE. Rio de Janeiro, 2002, p. 129-132.
- [17] Schroeder, M. A. O., Cherchiglia, L. C. L., “Lightning current statistical analysis: measurements of Morro do Cachimbo Station-Brazil”. In: International Conference on Lightning Protection, 26, Cracow, 2002. Proceedings.ICLP. Cracow, 2002, p. 20-23.
- [18] Diendorfer, G., Mair, M., Schulz, W., Hadrian, W., “Lightning current measurements in Austria – experimental setup and first results”. In: International Conference on Lightning Protection, 25, Rhodes, 2000. Proceedings.ICLP. Rhodes, 2000, p. 44-47.
- [19] “Electrical Transmission and Distribution Reference Book”, Westinghouse Electric Corporation.
- [20] Uman, M. A., “Understanding Lightning”, Bek Technical Publications, 1971.
- [21] Sargent, M., “The Frequency Distribution of Current Magnitudes of Lightning Strokes to Tall Structures”. *IEEE Trans.*, Paper T72 216-5.
- [22] Wagner C. F. and Hilleman A. R., “A new approach to the calculation of lightning performance of transmission line”. *AIEE Trans.* 1960, vol. 79, p. 589-603.
- [23] Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., Buck, J. R., “Discrete-time signal processing”. 2nd ed., 1998. Prentice Hall Signal Processing Series. ISBN 0-13-754920-2.
- [24] Cheng, D. K., “Field and wave electromagnetics”. 2nd ed., 1992. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. ISBN 0-201-12819-5.
- [25] Rakov and Uman, “Lightning: physics and effects”. 2007.

- [26] Fuchs, R. D., “Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente”. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos; 1979.
- [27] Zhang, Z., Sima, W., Zhang, Y., Shu, L., “The simulation for calculating the surge impedance of a tower”. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA, 2004.
- [28] Lauro R. G. S. L. Novo, José F. A. G. Wavrik, Antonio J. B. Oliveira, Marcos T. Melo. “Development of a sensor system for identifying lightning discharge locations on structures of a 230 kV transmission line”, X SIPDA, 2009.
- [29] Novo, L. R. G. S. L., Wavrik, F. A. G., Oliveira, A. J. B., Melo, M. T., Santos, K. V. “Desenvolvimento de sensor para identificação de pontos de descarga atmosférica sobre as estruturas em cada vão de L. T. de 230 kV e construção de sistema de transmissão remota dos dados obtidos através de enlace de rádio”, XX SNPTEE, 2009.
- [30] Ward, D., Exon, J. La T., “Using Rogowski coils for transient current measurements”. Engineering Science and Education Journal, p. 105-113. June, 1993.
- [31] Lira, George Rossany Soares, “Estimação de Parâmetros para um Modelo Dinâmico de Pára-Raios de Óxido de Zinco”. UFCG, Campina Grande, 2008.