

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

## Sensor para Medição do Campo Elétrico

Autor: Valéria Cristiane Silva  
Orientador: Prof. Dr. José Pissolato Filho

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

## Sensor para Medição do Campo Elétrico

Autor: Valéria Cristiane Silva

Orientador: José Pissolato Filho

Curso: Engenharia Elétrica

Área de concentração: Energia Elétrica

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, 2009

S.P. - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Si38s Silva, Valéria Cristiane  
Sensor para medição do campo elétrico / Valéria  
Cristiane Silva. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: José Pissolato Filho.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de  
Computação.

1. Instrumentos de medição. 2. Descargas elétricas.  
3. Raio. I. Pissolato Filho, José. II. Universidade  
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica  
e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Sensor of field mill measurement

Palavras-chave em Inglês: Electric Field Mill, Atmospheric Discharges, Loaded Origin  
in Clouds, Formation of Rays

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: José Antônio Donizete Rossi, Peter Jurgen Tatsch

Data da defesa: 05/03/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

**Candidata:** Valéria Cristiane Silva

**Data da Defesa:** 5 de março de 2009

**Título da Tese:** "Sensor para Medição do Campo Elétrico"

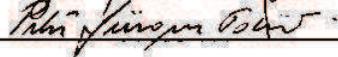
Prof. Dr. José Pissolato Filho (Presidente):



Dr. José Antônio Donizete Rossi:



Prof. Dr. Peter Jürgen Tatsch:



## Dedicatória

Dedico este trabalho primeiramente à Deus, aos meus pais, Sebastião e Marta, à minha irmã, Vanessa, e à minha sobrinha Giovana.

## Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, proporcionando-me sempre lições e experiências que me fazem crescer e aprender a cada dia mais.

Aos meus pais, que representam toda minha essência, pelo carinho e atenção dedicados a mim durante anos, muitas vezes sacrificando seus sonhos e objetivos em troca dos meus sorrisos. Não saberia descrever tudo que gostaria de agradecê-los, porque foi esse amor intenso que me oferecem, o combustível para que eu pudesse trilhar meu caminho até aqui, fortalecendo-me sempre em cada dificuldade.

A minha irmã Vanessa, pelo amor incondicional, sempre me apoiando a seguir meu caminho. Foi esse elo de irmandade e amizade que me ajudou a sempre lutar por meus objetivos.

Ao meu querido orientador, professor Pissolato, pelo apoio e orientação, estando sempre presente, sanando dúvidas e motivando-me a seguir sempre em frente, quesitos que me fizeram crescer tanto pessoal quanto profissionalmente.

Aos colegas do DEMIC, especialmente ao Felipe, Rodrigo e professor Siqueira pela ajuda nas dúvidas, por serem pessoas excepcionais na arte de ensinar e exercer a palavra amizade. Obrigada por dedicarem tempo e espaço físico para que eu pudesse realizar meus testes. Pessoas como vocês são agraciadas constantemente pelo caminho da vida.

A minha companheira de república, Renata, por todos os momentos vividos, principalmente pelas conversas descontraídas e passeios realizados. Sua companhia foi remédio para momentos difíceis, em que estar só seria uma dor na alma.

Ao João, pessoa que sempre acreditou em mim, e me fez entender uma simples coisa da vida: encarar os obstáculos de frente com a cabeça tranquila é o grande segredo da humanidade, porém temos o dom de complicar até as coisas mais simples, tornando árdua nossa jornada. Ensino este que carregarei para o resto da minha vida.

Aos meus grandes e verdadeiros amigos, destacando meus companheiros de laboratório, Allan, Rodrigo, Michell e Leonardo, meus "irmãos" Carlos Eduardo e Gabriel ("*Mestre*") e a minha grande amiga Dina. Todos vocês são simplesmente únicos em minha vida e fonte de agradecimento à Deus por terem seus caminhos interlaçados ao meu.

*“All we have to decide is what to do with the time that is given to us”*  
(O Senhor dos Anéis - A Sociedade do Anel, J. R. R. Tolkien)

## Resumo

Este trabalho apresenta a elaboração e a construção de um sensor utilizado na detecção de intensidade de campo elétrico e consequentemente de descargas atmosféricas. O sensor de diâmetro igual a 10 cm é constituído por uma placa girante composta por quatro aletas, que tem seu movimento de rotação controlado por um mini motor de 12000 rpm, e uma placa fixa, denominada placa de medição, composta por oito aletas que são responsáveis por produzir uma tensão alternada referente ao campo elétrico ao qual o sensor está submetido. Quando o rotor (placa girante) gira sobre o estator (placa de medição), ele expõe a placa de medição ao campo elétrico e isola-o deste campo quando está sobre ele. Dessa forma corta-se o campo elétrico normal estático ou que varia muito lentamente. O medidor de campo elétrico (EFM - do inglês *Electric Field Mill*) cria um campo "variável" que irá induzir uma carga elétrica no estator. A magnitude e polaridade da carga são dependentes da magnitude e polaridade do campo elétrico. A placa de medição gera um sinal da ordem de milivolts, sendo necessário a utilização de amplificadores para torná-lo significativo para análise. O sinal amplificado será então digitalizado e enviado à um software para visualização dos dados gerados pelo sensor. Neste trabalho apresenta-se também um estudo sobre origem de cargas nas nuvens, formação de tempestade, assim como formação e classificação dos raios.

### *Palavras chaves:*

Medidor de Campo Elétrico, Descargas Atmosféricas, Origem de Cargas nas Nuvens, Formação de Raios.

## Abstract

This paper presents the development and construction of a sensor used to detect intensity of electric field and consequently of lightning. The sensor diameter of 10 cm consists of a plate consisting of four revolving vanes that has its rotation controlled by a small motor to 12000 rpm and a fixed plate, called a measuring board, composed of eight vanes that are responsible for produce a alternating voltage electric field concerning which the sensor is subjected. When the rotor (revolving vanes) turns on the stator (plate measurement), it exposes the plate for measuring the electric field alone, and the field when this is over it. Thus is cut to the normal static electric field or which varies very slowly. The electric field meter (EFM - the English Electric Field Mill) creates a field "variable" that will induce an electric charge in the stator. The magnitude and polarity of the load are dependent on the magnitude and polarity of the electric field. The measurement plate generates a measurement signal of the order of millivolts, requiring the use of amplifiers to make it significant for analysis. The amplified signal is then digitized and sent to a software for visualization of data generated by the sensor. In this work it is also a study of origin of cargoes in the clouds, formation of storm as well as training and classification of rays.

*Key words:*

Electric Field Mill, Atmospheric Discharges, Loaded Origin in Clouds, Formation of Rays

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Relevância do Tema . . . . .	2
1.2	Objetivos . . . . .	3
1.3	Estrutura do Trabalho . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica - Efeitos Atmosféricos</b>	<b>5</b>
2.1	Classificação das Nuvens . . . . .	6
2.2	Formação de Cargas nas Nuvens . . . . .	9
2.3	Tempestades . . . . .	14
2.3.1	Ciclo de Vida da Nuvem de Tempestade . . . . .	16
2.4	Raios . . . . .	17
2.4.1	Histórico do Raio . . . . .	19
2.4.2	Formação dos Raios . . . . .	20
2.4.3	Estudo dos Raios Através de Raios X . . . . .	22
2.4.4	Classificação dos Raios . . . . .	28
2.4.5	Descargas Elétricas em Linhas de Transmissão . . . . .	30
2.4.6	Raios no Brasil . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Medição de Descargas Atmosféricas Artificiais (Cachoeira Paulista)</b>	<b>33</b>
3.1	Introdução . . . . .	33
3.2	Histórico . . . . .	34
3.3	Sistema de Captação de Descargas Atmosféricas Trigadas Artificiais . . . . .	34
3.4	Sistema de Medição . . . . .	36
3.5	Equipamento de Filmagem (Câmera Rápida) . . . . .	38
3.6	Medidas Obtidas . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Medidor de Campo Elétrico</b>	<b>43</b>
4.1	Princípio de Funcionamento . . . . .	43

4.2	Processamento do Sinal . . . . .	48
4.3	Aplicação do EFM . . . . .	50
4.4	Outros Métodos de Medição do Campo Elétrico . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Construção e Implementação do Sensor de Campo Elétrico (Field Mill, EFM)</b>	<b>55</b>
5.1	Introdução . . . . .	55
5.2	Sensor de Campo Elétrico (Parte Mecânica) . . . . .	56
5.3	Circuito Eletrônico . . . . .	59
5.3.1	Formas de Onda do Sinal nos Estágios . . . . .	72
5.4	Apresentação dos Dados ao Usuário . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Testes e Resultados</b>	<b>83</b>
6.1	Linearidade do Sensor . . . . .	83
6.2	Teste Completo: Sensor e Aquisição de Dados . . . . .	87
6.2.1	Distância de 1,60 m da nuvem ao sensor . . . . .	89
6.2.2	Distância de 2,20 m da nuvem ao sensor . . . . .	94
6.3	Calibração para Instalação do Sensor em Campo . . . . .	98
<b>7</b>	<b>Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros</b>	<b>99</b>

# Lista de Figuras

2.1	Nuvem do tipo <i>Cirrostratus</i> [2] . . . . .	7
2.2	Nuvem do Tipo <i>Alto cumululus</i> e <i>Stratocumululus</i> [2] . . . . .	7
2.3	<i>Cumululus</i> e <i>Stratocumululus</i> [2] . . . . .	8
2.4	Nuvem do tipo <i>Cumululus</i> [2] . . . . .	8
2.5	Carga Negativa da Terra [2] . . . . .	9
2.6	Gota de água caindo [1] . . . . .	10
2.7	Fragmentação da gota [1] . . . . .	10
2.8	Formação da gota ascendente positiva [1] . . . . .	11
2.9	Nuvem Carregada [1] . . . . .	12
2.10	Separação de carga na nuvem que origina uma tempestade [5] . . . . .	13
2.11	(a) Uma gota pode se transformar em carga quando colidir com uma superfície inferior de uma partícula de granizo caindo (b) Quando uma gota de água começa a congelar, forma-se uma casca de gelo com a indicação das cargas. [5]	14
2.12	Geração de nuvem de tempestade [1] . . . . .	15
2.13	Ciclo de vida da nuvem de tempestade [1] . . . . .	16
2.14	Descarga Atmosférica [1] . . . . .	19
2.15	Indução de cargas positivas no solo [1] . . . . .	20
2.16	Túneis ionizados [1] . . . . .	21
2.17	Formação de descargas atmosféricas (raio) [6] . . . . .	24
2.18	Força exercida sobre o elétron x Energia do elétron [6] . . . . .	25
2.19	Descarga intra-nuvem [1] . . . . .	29
2.20	Descargas nuvem-solo [1] . . . . .	30
2.21	Descarga atmosférica em linha de transmissão . . . . .	31
2.22	Número relâmpagos nas estações meteorológicas [7] . . . . .	32
3.1	Campo elétrico da tempestade, que resultou no tiro 29 [10] . . . . .	35
3.2	Medidor de campo elétrico usado em Cachoeira Paulista [10] . . . . .	36
3.3	Antena capacitiva utilizada em Cachoeira Paulista [10] . . . . .	38

3.4	Descarga através do lançamento de um foguete [10] . . . . .	39
3.5	Gráfico do campo elétrico indicando o momento do tiro 33 [10] . . . . .	40
3.6	Foto do foguete sendo disparado [10] . . . . .	41
3.7	Fotos de descargas de um mesmo tiro trígado [10] . . . . .	41
4.1	Princípio de detecção de campo elétrico . . . . .	44
4.2	Princípio de detecção de campo elétrico com duas placas . . . . .	44
4.3	Field Mill [12] . . . . .	45
4.4	Área dos setores do rotor . . . . .	46
4.5	Esquema simplificado de um EFM . . . . .	48
4.6	Diagrama de blocos do circuito eletrônico . . . . .	49
4.7	Formas de Onda do circuito eletrônico . . . . .	50
4.8	Aplicação EFM na Industria . . . . .	51
4.9	Antenas para medição do campo elétrico [13] . . . . .	52
4.10	Antenas rotativas lançadas de pára-raios no interior das nuvens para medição do campo elétrico [14] . . . . .	53
5.1	Rotor e estator do protótipo EFM . . . . .	56
5.2	Esquema de montagem do EFM . . . . .	57
5.3	EFM - vista lateral . . . . .	57
5.4	Interconecção aletas placa de medição . . . . .	58
5.5	EFM - vista inferior evidenciando motor . . . . .	59
5.6	Diagrama de bloco do protótipo EFM . . . . .	60
5.7	Circuito Eletrônico do Protótipo EFM . . . . .	61
5.8	Primeiro estágio: amplificador de instrumentação . . . . .	62
5.9	Circuito interno do amplificador INA 121 [15] . . . . .	63
5.10	Representações do amplificador de instrumentação: INA 121 [15] . . . . .	64
5.11	Gráfico de rejeição de modo comum do INA 121 [15] . . . . .	65
5.12	Filtro ativo passa-baixas normalizado [16] . . . . .	66
5.13	Filtro ativo passa-altas normalizado [16] . . . . .	66
5.14	Filtro real passa-baixas . . . . .	67
5.15	Filtro real passa-altas . . . . .	68
5.16	Segundo estágio: filtro passa-faixa . . . . .	68
5.17	Terceiro estágio: Retificador de precisão de onda completa . . . . .	69
5.18	Circuito para sinal de entrada positivo . . . . .	69
5.19	Circuito para sinal de entrada negativo . . . . .	70
5.20	Quarto estágio: média do sinal retificado . . . . .	71

5.21	Quinto estágio: buffer de saída . . . . .	71
5.22	Formas de onda do circuito, através da simulação . . . . .	72
5.23	Sinal de saída do sensor . . . . .	73
5.24	Sinal de saída do amplificador de instrumentação . . . . .	74
5.25	Sinal de saída do filtro passa-faixa . . . . .	74
5.26	Sinal de saída do retificador . . . . .	75
5.27	Sinal de saída do estágio que compõe a média . . . . .	76
5.28	Dispositivo de aquisição de dados . . . . .	77
5.29	Dispositivo de aquisição de dados no diagrama de bloco . . . . .	78
5.30	Configuração da entrada . . . . .	78
5.31	Configuração do tipo de entrada . . . . .	79
5.32	Escolha da entrada física do DAQ para receber o sinal da placa eletrônica . . . . .	79
5.33	Criação do gráfico para leitura do sinal . . . . .	80
5.34	Diagrama de blocos com a elaboração do gráfico . . . . .	80
5.35	Interface com o usuário . . . . .	81
5.36	Interface criada para apresentação dos dados do EFM ao usuário . . . . .	82
6.1	Montagem referente ao primeiro teste do sensor EFM . . . . .	83
6.2	Circuito para energizar a nuvem . . . . .	84
6.3	Gráficos referentes ao primeiro teste do EFM . . . . .	86
6.4	Vista inferior do sensor blindado . . . . .	87
6.5	Posicionamento do sensor para medição do campo elétrico . . . . .	88
6.6	Montagem referente ao segundo teste do sensor EFM . . . . .	89
6.7	Resposta do sensor ao campo elétrico incidente variando na escala de 0kV/m a 3kV/m . . . . .	91
6.8	Sinal de resposta do sensor para campo elétrico incidente igual 6,3 kV/m . . . . .	92
6.9	Sinal de resposta do sensor para uma variação do campo elétrico incidente de 6,3 kV/m a 9,6 kV/m . . . . .	92
6.10	Sinal de resposta do sensor para campo elétrico incidente igual a 9,6 kV/m . . . . .	93
6.11	Sinal de resposta do sensor para campo elétrico incidente igual a 12,5 kV/m . . . . .	93
6.12	Sinal de resposta do sensor para simulação de uma descarga atmosférica . . . . .	94
6.13	Resposta do sensor a uma variação do campo elétrico de 0 kV/m a 20 kV/m . . . . .	96
6.14	Simulação de descarga atmosférica com campo incidente de 12,7 kV/m . . . . .	97
6.15	Simulação de descarga atmosférica com campo incidente de 10,2 kV/m . . . . .	97

# Lista de Tabelas

5.1	Valores dos componentes para filtro ativo passa-baixas de Butterworth [16] .	67
6.1	Resposta do EFM para uma distância de 3 m da nuvem . . . . .	85
6.2	Resposta do EFM para uma distancia de 2 m da nuvem . . . . .	85
6.3	Resposta do EFM para um distância de 1m da nuvem . . . . .	86
6.4	Valores de tensão (em kV) aplicados na nuvem para a distância nuvem-sensor igual a 1,6 m . . . . .	89
6.5	Valor de tensão na nuvem e respectivo valor de campo elétrico incidente sobre o sensor para distância nuvem-sensor igual a 1,6 m . . . . .	90
6.6	Campo elétrico incidente e respectiva resposta do sensor para distância nuvem-sensor igual a 1,6 m . . . . .	90
6.7	Valores de tensão aplicados na nuvem para a distância nuvem-sensor igual a 2,2 m . . . . .	95
6.8	Valor da tensão na nuvem e respectivo valor de campo elétrico incidente sobre o sensor, distância nuvem-sensor igual a 2,2 m . . . . .	95
6.9	Campo Elétrico incidente e respectiva resposta do sensor para distância nuvem sensor igual a 2,2 m . . . . .	95

## Abreviações

EFM	-	Eletric Field Mill
Amp.Op.	-	Amplificador Operacional
CC	-	Corrente Contínua
LAT	-	Laboratório de Alta Tensão

# Capítulo 1

## Introdução

As descargas atmosféricas estão intimamente ligadas com as atividades de trovoadas que por si, estão associadas com nuvens *Cumulonimbus*, diferente das outras nuvens por ter maior extensão vertical que geram chuvas fortes, trovões, raios e, ocasionalmente, granizos. Isto acontece quando o ar quente e úmido se eleva num ambiente instável, formando então uma tempestade. A causa necessária para iniciar o movimento de ar ascendente pode ser a desigualdade da superfície se aquecendo, o efeito do terreno, ou a ascensão do ar quente juntamente com a frente fria. Uma região favorável para o desenvolvimento de severa tempestade é ocasionada por uma deslocamento de massa de ar, pois conseqüentemente haverá uma convergência em baixos níveis. Vários destes mecanismos normalmente trabalham juntos para gerarem trovoadas severas [1].

A atmosfera é composta por um campo elétrico vertical. Este campo elétrico é baixo, em torno de 200 V/m, quando o tempo é considerado bom. Com a formação de tempestades o campo elétrico sofre um acréscimo elevado devido a formação de cargas elétricas presentes nas nuvens que dão origem à tempestade. Quando o campo elétrico de uma localidade atinge um valor aproximado de 4000 V/mm a probabilidade de uma descarga atmosférica ocorrer é significativa.

Existe uma estimativa de 2.000 tempestades em progresso a todo o momento. A maior proporção das mesmas ocorrem nos trópicos, onde calor, muita umidade e instabilidade estão sempre presentes. Cerca de 45.000 tempestades ocorrem todos os dias e mais de 16 milhões ocorrem anualmente no mundo inteiro. A cada segundo, cerca de 100.000 raios caem sobre a Terra, produzidos por cerca de 2.000 tempestades. A formação de cargas nas nuvens e sua conseqüente descarga (raio) à Terra, é um fenômeno normal e natural que assola a Terra e aflige a humanidade, causando prejuízos como: incendios em florestas, destruição de estruturas e árvores, colapso na rede de energia elétrica, interferência na rádio transmissão, acidentes na aviação, acidentes nas plataformas marítimas de petróleo, mortes

de seres humanos e animais [1].

Não há mecanismos que impeçam que determinada localidade seja atingida por um raio, contudo utilizando-se sensores de campo elétrico pode-se prever a incidência de descargas atmosféricas através de condições favoráveis à sua ocorrência em uma região específica. Por isso muito se tem investido no desenvolvimento desses sensores.

O princípio de funcionamento do sensor Medidor de Campo Elétrico (EFM - do inglês *Electric Field Mill*) tem como base a Segunda Lei de Maxwell. A segunda lei de Maxwell estabelece que quando um disco condutor é exposto a um campo elétrico variável, surgirá uma corrente induzida, nesse disco, proporcional à variação do fluxo do campo elétrico em relação ao tempo e à área do disco. A intensidade normal do campo elétrico da atmosfera varia muito lentamente para ser detectada, portanto ela não pode, normalmente, induzir quantidades detectáveis de corrente no disco condutor do medidor de campo elétrico. Este sensor cria, artificialmente, uma taxa alta de variação de campos elétricos alternados usando um servo-motor e um arranjo adequado de estator-rotor [2].

O EFM é formado por dois discos: rotor (placa girante) e o estator (placa de medição). A placa girante é composta por quatro aletas, sendo responsável pela exposição da placa de medição ao campo elétrico local de acordo com a sua posição. Quando o rotor sobrepõe o estator, as aletas da placa de medição estão isoladas do campo elétrico, portanto a exposição desta placa ao campo local ocorre quando o rotor não está sobre o estator. O rotor girando sobre o estator "corta" o campo elétrico estático de tempo em tempo, induzindo uma carga no estator de magnitude e polaridade referente ao campo elétrico local.

Essa carga induz uma corrente na placa de medição, tendo a forma de onda que se assemelha-se a uma senoide. A frequência deste sinal tem relação direta com o número de vezes por segundo que o campo elétrico é "cortado". O motor responsável pelo giro do rotor pode assumir valores de velocidades distintos. No protótipo construído a velocidade do motor é igual a 12000 rpm, portanto a frequência do sinal da corrente induzida é 200 Hz.

O sinal de saída do sensor é então amplificado através de um circuito eletrônico e posteriormente convertido para a forma digital. Através de um software os dados referentes ao campo elétrico onde o sensor está instalado podem ser vistos por um usuário em uma tela de um computador.

## 1.1 Relevância do Tema

A cada segundo cerca de 100.000 raios caem sobre a Terra. Só em 2001, mais de 20 pessoas foram atingidas direta ou indiretamente por descargas atmosféricas na região próxima à cidade de São Paulo . Este alto índice de acidentes ocorridos no sudeste do Brasil têm

mostrado cada vez mais a importância deste estudo principalmente para região sul e sudeste do país [3].

Segundo a CEMIG, cerca de 70% dos desligamentos de linhas de transmissão e 30% nas linhas de distribuição são devido a descargas atmosféricas . Já a Rede Bandeirante de Energia teve grandes prejuízos devido a queima de 300 transformadores somente no verão de 1998. Nota-se que cada vez mais as grandes cidades têm sofrido com a ocorrência de descargas atmosféricas e esta atividade elétrica tem migrado para as grandes cidades devido ao que denominamos de “Ilhas de Calor” [4].

Prever uma descarga atmosférica e ter acesso aos dados referentes ao campo elétrico em determinada região pode minimizar alguns acidentes. Um exemplo claro pode ser apresentado relacionando trabalhadores de plataformas petrolíferas. Com a utilização de sensores que medem o campo elétrico e conseqüentemente prevê descargas atmosféricas, trabalhadores podem estar salvos de uma descarga atmosférica nociva à eles e aos seus equipamentos. Isso também atua na redução de custos desnecessários, pois monitorando o campo elétrico pode-se informar de forma eficiente a ocorrência de determinada tempestade, impedindo que, em plataformas, funcionários e equipamentos de campo sejam retirados do processo apenas por uma possibilidade de chuva, interrompendo assim as atividades de trabalho.

## 1.2 Objetivos

- Objetivos gerais: Estudar a origem de cargas nas nuvens, formação de descargas atmosféricas (raios) e o funcionamento de medidores de campo elétrico.
- Objetivos específicos: Construir um sensor com tecnologia nacional capaz de medir o campo elétrico local e conseqüentemente identificar a possibilidade de descargas atmosféricas.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Este texto conta com sete capítulos assim estruturados:

**Capítulo 1:** Introdução. O propósito deste capítulo é fazer uma breve explanação sobre o tema e fornecer uma visão geral do problema.

**Capítulo 2:** Fundamentação Teórica - Efeitos Atmosféricos . Neste Capítulo serão apresentados a classificação e a nomenclatura adotadas internacionalmente para os diferentes tipos de nuvens. O processo de formação de cargas elétricas nas nuvens reponsáveis

pelo aumento do campo elétrico e como consequência a ocorrência de uma descarga elétrica de origem atmosférica, também serão abordados.

**Capítulo 3:** Medição de Descargas Atmosféricas Artificiais (Cachoeira Paulista). Aqui é discutido este sistema de medição, relatando procedimentos adotados em Cachoeira Paulista.

**Capítulo 4:** Medidor de Campo Elétrico. Aqui faz-se uma explanação sobre o princípio de funcionamento do sensor de campo elétrico e alguns equacionamentos para relação entre a tensão e o campo elétrico. Também será apresentado o diagrama de bloco e o circuito eletrônico para processamento do sinal de saída do sensor. Poderá ser verificado também possíveis aplicações para este sensor de campo elétrico.

**Capítulo 5:** Construção e Implementação do EFM. Apresentação do protótipo construído, composto pela parte mecânica e vários estágios para processamento do sinal, formado por um circuito eletrônico. Neste capítulo encontra-se também uma comparação entre o sinal de saída do medidor de campo elétrico processado por um software e este mesmo sinal processado pela placa eletrônica construída para o protótipo. A apresentação de dados ao usuário é mostrado em um ítem deste capítulo.

**Capítulo 6:** Testes e Resultados. Neste capítulo são discutidos alguns testes realizados no sensor de campo elétrico e os resultados adquiridos.

**Capítulo 7:** Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.

## Capítulo 2

# Fundamentação Teórica - Efeitos Atmosféricos

À medida que a altitude cresce em relação à superfície do planeta, pode-se dividir a atmosfera em regiões ou camadas, considerando seu perfil de temperatura. Essas camadas são:

- Troposfera: dentre as outras camadas, é a primeira em contato com a superfície terrestre. O aquecimento da superfície terrestre ocorre pela absorção da radiação solar, tornando-se então fonte de calor para esta camada que sofre aquecimento recebendo radiação de infravermelho emitido pela superfície da terra. Sua espessura varia como consequência do aquecimento, acalçando altitude média de 11 km e uma posição mais alta no verão do que no inverno.
- Tropopausa: denominada camada de transição entre a troposfera e a estratosfera. Sua espessura é de 3 a 5 km, sendo mais alta no Equador do que nos pólos.
- Estratosfera: tem início, aproximadamente, 15-20 km de altura e estende-se até próximo de 50 km de altitude.
- Estratopausa: é a camada de transição entre a estratosfera e a mesosfera, com espessura média de 3 a 5 km.
- Mesosfera: é a camada atmosférica que inicia a, aproximadamente, 50 km de altura e estende-se até próximo de 90 km.
- Mesopausa: é a camada de transição entre a mesosfera e a termosfera. Possui espessura média de 10 km com limites entre 80 e 90 km.

- Termosfera: inicia-se a, aproximadamente, 90 km de altura e tem seu topo entre 400 e 500 km de altitude.

A camada da atmosfera na qual o ser humano está diretamente imerso e sujeito a seu comportamento é a Troposfera. É justamente nesta camada que acontecem alguns fenômenos atmosféricos, dentre eles o raio. Este fenômeno que tanto impressiona a humanidade está associado a um tipo de nuvem, denominada *Cumulonimbus*.

## 2.1 Classificação das Nuvens

A classificação e a nomenclatura adotadas internacionalmente para os diferentes tipos e grupos de nuvens são [2]:

- *Cirrus, cirru*: indica uma nuvem constituída de cristais de gelo e, portanto são nuvens de grandes altitudes (8 km a 15 km), que aparece somente em altos níveis nos quais a temperatura é baixa o suficiente para a formação dos mesmos.
- *Strato, Stratus*: significa uma camada contínua de nuvens.
- *Alto*: refere-se a nuvens de média altitude.
- *Cumulo, cumulus* : são nuvens com estrutura vertical, onde indicam circulação vertical com correntes ascendentes localizadas isoladas ou repetindo-se em um padrão.
- *Nimbo*: indicam um tipo de nuvem produzindo precipitação.

*Cumulus* e *Cumulonimbus* diferem das outras nuvens por apresentarem considerável desenvolvimento vertical sobre uma determinada área. Elas constituem a categoria de nuvens convectivas, em oposição a nuvens de camadas ou estratificadas.

A seguir são apresentados alguns exemplos dos diversos tipos de nuvens.



Figura 2.1: Nuvem do tipo *Cirrostratus* [2]



Figura 2.2: Nuvem do Tipo *Altocumulus* e *Stratocumulus* [2]



Figura 2.3: *Cumulus* e *Stratocumulus* [2]



Figura 2.4: Nuvem do tipo *Cumulus* [2]

## 2.2 Formação de Cargas nas Nuvens

As informações e conceitos neste ítem, bem como nos ítems a seguir deste capítulo baseiam-se no informado por Potierj [1], a menos que seja explicitamente indicada outra referência bibliográfica.

A formação de cargas nas nuvens ainda é um fenômeno não totalmente conhecido. Existem várias teorias a respeito, apresentadas por alguns estudiosos como: G. C. Simpson, C. T. R. Wilson, W. A. Macky, Elster e Geitel.

A Terra tem excesso de cargas negativas, conforme mostra a Figura 2.5.

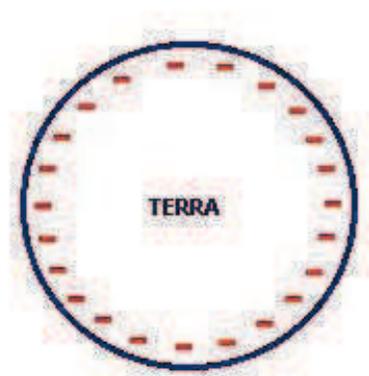


Figura 2.5: Carga Negativa da Terra [2]

As correntes de ar ascendentes carregam grande quantidade de umidade. Esta umidade, encontrando nas regiões mais altas uma temperatura baixa, se condensa formando várias gotículas de água, que ficam suspensas no ar. Estas gotículas aglomeram-se formando gotas maiores e, pela influência da gravidade, começam a cair. Ao caírem encontram outras gotículas, aumentando seu tamanho. Assim, a gota assumindo um tamanho considerável e o solo da Terra sendo negativo, são induzidas na gota de água cargas positivas na parte inferior e cargas negativas na parte superior, conforme apresenta a Figura 2.6.

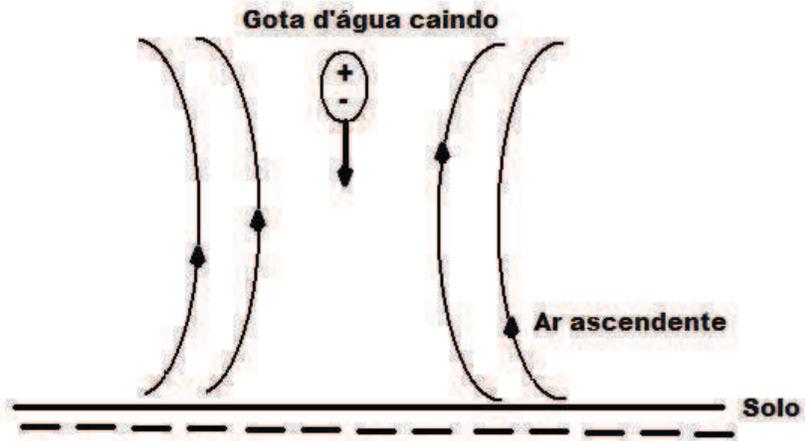


Figura 2.6: Gota de água caindo [1]

A gota aumenta de tamanho até ficar com um diâmetro de aproximadamente 5 mm, tornando-se instável e fragmentando-se em várias gotículas menores. No momento da fragmentação há formação de íons positivos na parte inferior e negativos na superior, conforme pode ser visto na Figura 2.7.

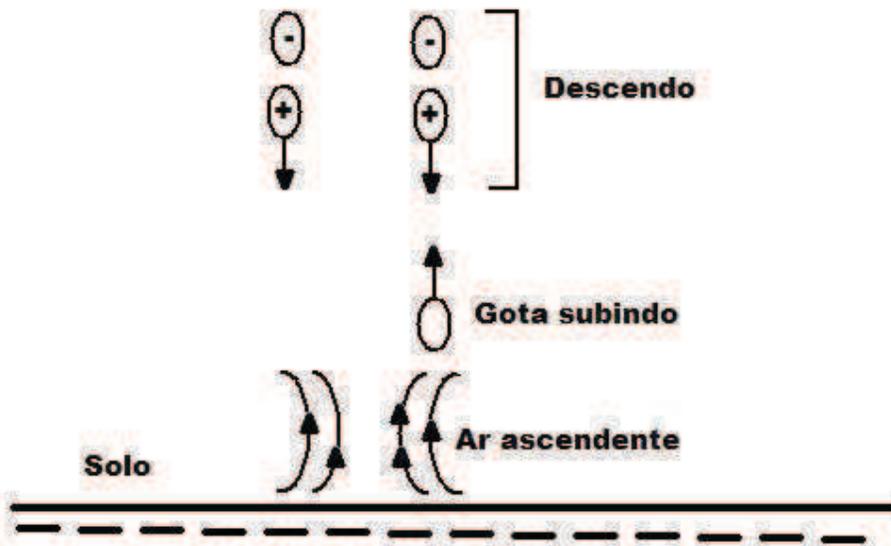


Figura 2.7: Fragmentação da gota [1]

Os íons positivos encontram grande quantidade de gotículas d'água arrastadas pelo ar

ascendente. A gota ascendente (neutra), durante o choque, entrega elétrons aos íons positivos descendentes. Desta maneira, a gota ascendente se torna positiva e o íon fica neutralizado. Isso se torna evidente olhando os estágios I e II da Figura 2.8.

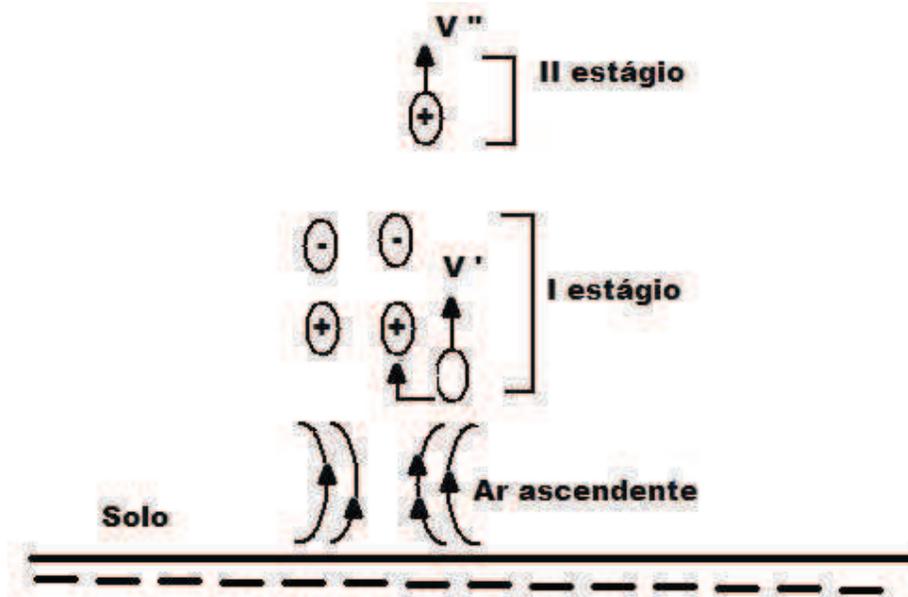


Figura 2.8: Formação da gota ascendente positiva [1]

Como estas gotas ascendentes (agora positivas) estão dotadas de grande energia cinética, conseguem subir até a parte superior da nuvem. Os íons negativos resultantes da fragmentação de uma grande gota descem até parar, subindo em seguida, também arrastados pelo ar ascendente. Como estes íons negativos tem menor energia cinética que as gotículas positivas, elas aglomeram-se na parte inferior da nuvem, ficando esta carregada positivamente na parte superior e negativamente na inferior. Aproximadamente, 95% das nuvens ficam carregadas como mostra a Figura 2.9.

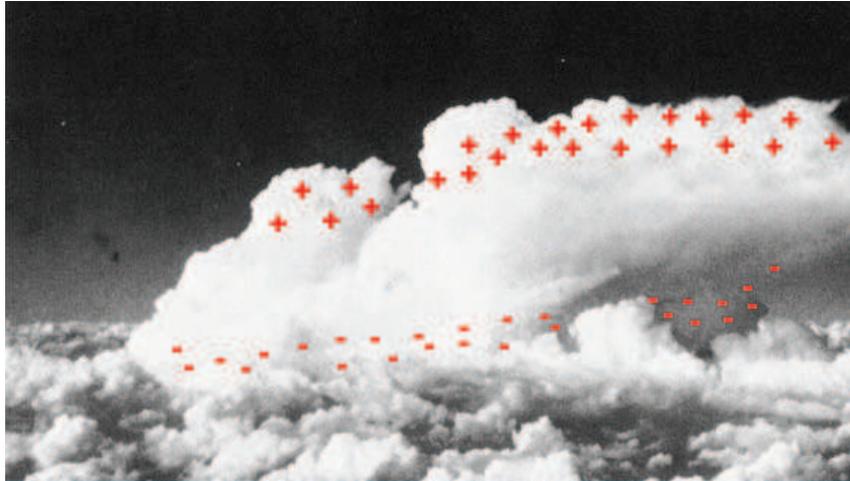


Figura 2.9: Nuvem Carregada [1]

Complementando esta teoria apresentada, há algumas informações que podem ser adicionadas, explicadas por John Wiley [5]. Uma importante característica da nuvem de tempestade é o aparecimento de grandes quantidades de carga na base e no topo da nuvem. As medições da carga dentro da nuvem, e do campo elétrico na superfície da Terra, mostram que a parte inferior da nuvem está carregada negativamente ( $N = -40\text{C}$ ), enquanto a parte superior é carregada positivamente ( $P = +40\text{C}$ ). Pode-se constatar também uma pequena carga positiva ( $p = 10\text{C}$ ) na base, como apresenta a Figura . O campo abaixo da nuvem de tempestade, que é oposto ao campo de tempo bom, tem uma força de aproximadamente  $104\text{V/m}$ . A diferença de potencial entre a base da nuvem e a terra é aproximadamente  $3\text{MV}$ .

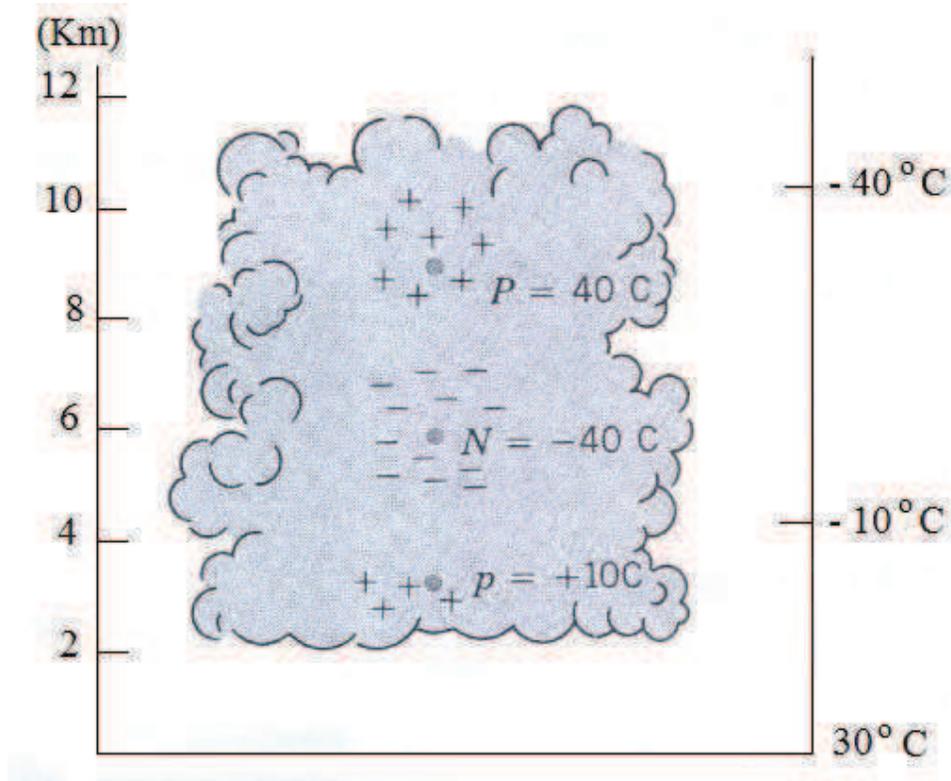


Figura 2.10: Separação de carga na nuvem que origina uma tempestade [5]

O mecanismo pelo qual a separação de cargas acontece não é clara. Menciona-se aqui, então, apenas uma explicação. Como uma partícula de gelo cai é polarizada por um campo de tempo bom existente: Sua base é positiva, visto que sua parte superior é negativa, como na Figura 2.11. Uma gota de água, ou um cristal de gelo minúsculo, podem colidir com a base da partícula de gelo e adquirir uma carga positiva. A partícula positivamente carregada é transportada para a parte superior da nuvem, mas a carga negativa continua a cair. O campo elétrico é fortalecido por esta separação de carga e produz assim grande polarização de partículas. Este processo envolve repetição positiva. Ions já presentes na atmosfera provavelmente contribuem para o efeito. Um mecanismo alternativo envolve o processo de congelamento. Sabe-se que quando há uma diferença da temperatura através de uma amostra de gelo, a extremidade morna se torna negativamente carregada. Isto ocorre porque os íons  $H^+$  são mais móveis do que íons  $OH^-$ . Os íons de  $H^+$  migram da extremidade mais quente em quantidades maiores, deixando assim a carga negativa desequilibrada. Quando uma partícula condensa, uma fina camada de gelo se forma em sua superfície. Como o interior líquido congela, ele libera o calor latente de fusão, de modo que a temperatura na superfície interna é maior do que sobre a superfície exterior. Devido a esse efeito termoeletrico, a

superfície exterior torna-se positivamente carregada. Uma colisão com outra gotícula pode romper a superfície da partícula permitindo formar pedaços de gelos de carga positiva.

Ambas estas situações se tornam insustentáveis se estabelecermos que a separação de cargas ocorre antes que haja uma formação de tempestade. Não há universalmente um mecanismo aceito.

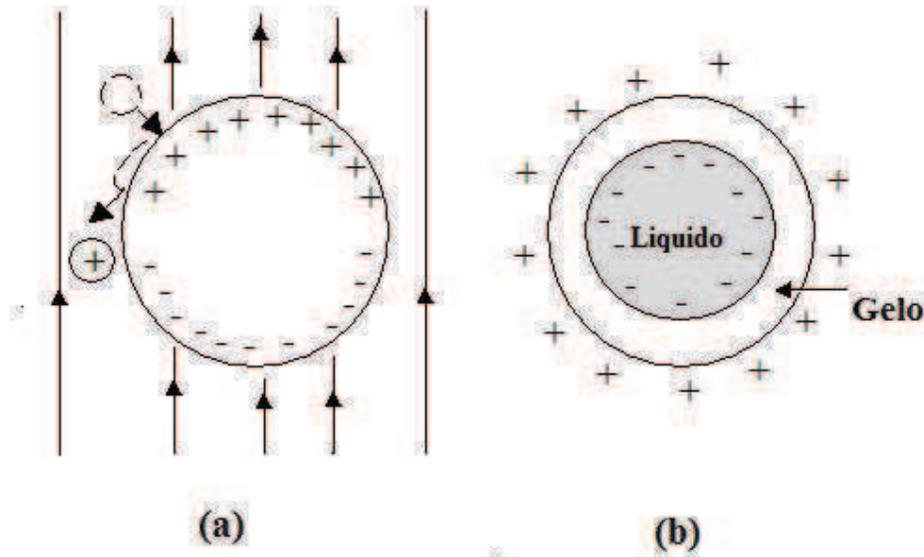


Figura 2.11: (a) Uma gota pode se transformar em carga quando colidir com uma superfície inferior de uma partícula de granizo caindo (b) Quando uma gota de água começa a congelar, forma-se uma casca de gelo com a indicação das cargas. [5]

## 2.3 Tempestades

Tempestades são caracterizadas por relâmpagos e trovões. Elas são produzidas por uma ou mais nuvens *Cumulonimbus* (Cb), também conhecidas como nuvens de tempestade. Uma típica nuvem de tempestade tem um diâmetro de 5-10 km, alcança altitudes de 10- 20 km, dura em média 30-60 minutos e move-se com uma velocidade de 40-50 km/h. Normalmente elas podem ser identificadas por seus largos e brilhantes topos esbranquiçados que se projetam na direção dos ventos formando uma saliência denominada bigorna. Cerca de 2.000 tempestades estão sempre ocorrendo, o que significa que 16 milhões ocorrem anualmente em nosso planeta. A frequência de tempestades em um dado local depende de vários fatores, dentre eles estão: a topografia, a latitude, a proximidade de massas de água e a continentalidade. Uma pequena percentagem das tempestades que ocorrem todo ano são consideradas tempestades severas, isto é, produzem ao menos uma das seguintes características: granizo

com diâmetro igual ou maior que 2 cm, ventos de ao menos 90 km/h ou tornados.

Nuvens de tempestade são formadas sempre que existir bastante movimento vertical, instabilidade e umidade, de modo a produzir uma nuvem que alcance altitudes com temperaturas abaixo do nível de congelamento. Estas condições são mais frequentemente encontradas no verão e durante à tarde e início da noite, mas podem ser encontradas em todas as estações e em todas as horas do dia. O movimento vertical pode ser causado por um gradiente no perfil de temperatura ou por processos de levantamento, tais como as brisas ao longo das costas, frentes frias ou quentes, áreas de baixa pressão com convergência horizontal de ventos e montanhas.

No primeiro caso, o ar mais quente (mais leve) próximo à superfície da Terra tende a deslocar-se para cima trocando de posição com o ar mais frio (mais pesado) nos níveis mais altos, que tende a deslocar-se para baixo. Tempestades formadas por este processo são geralmente chamadas tempestades associadas a massas de ar. Elas tendem a ser menos severas do que os outros tipos de tempestades, embora sejam ainda capazes de produzir rajadas. No processo de levantamento, o ar próximo à superfície da Terra é empurrado para cima por outra massa de ar ou ao se chocar com uma montanha. Algumas vezes mais de um processo de levantamento pode ocorrer simultaneamente. A Figura 2.12 e a Figura 2.13 mostra os dois estágios que compõe a formação e o ciclo de vida de uma nuvem de tempestade (*Cumulonimbus*).

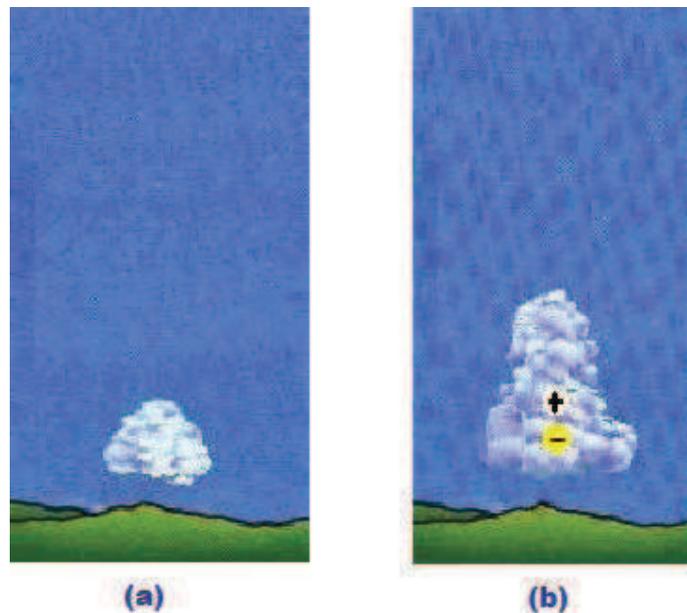


Figura 2.12: Geração de nuvem de tempestade [1]

(a) Nuvem *Cumulos*: Primeira etapa no processo de geração de uma nuvem de tempestade

com uma única célula.

(b) Nuvem de tempestade com uma única célula no estágio de desenvolvimento.

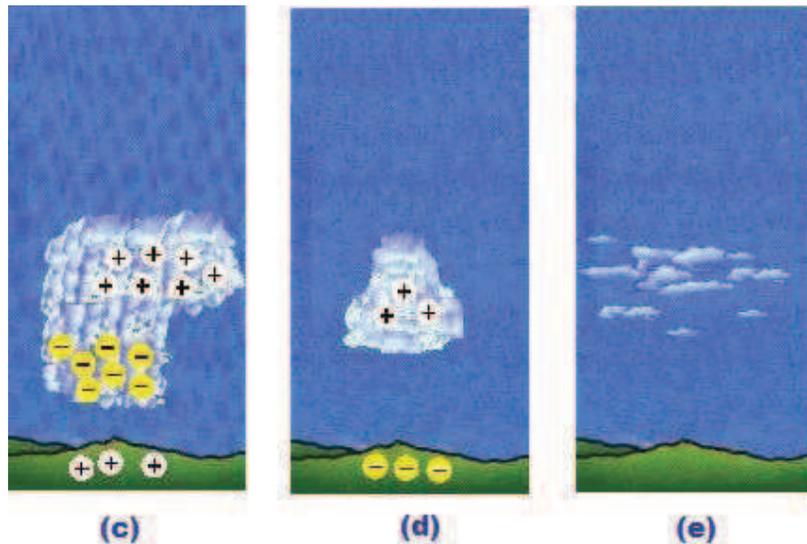


Figura 2.13: Ciclo de vida da nuvem de tempestade [1]

(c) Nuvem de tempestade com uma única célula no estágio maduro, apresentando dois centros de cargas elétricas.

(d) Nuvem de tempestade com uma única célula no estágio dissipativo. Em geral, somente cargas positivas permanecem dentro da nuvem neste estágio.

(e) Após a nuvem de tempestade com uma única célula se dissipar, a bigorna permanece na forma de nuvens *cirrostratus* e *altostratus*.

### 2.3.1 Ciclo de Vida da Nuvem de Tempestade

Uma nuvem de tempestade composta por uma única célula tem um ciclo de vida que consiste de três estágios: formação, maturação e dissipação.

No estágio de formação, as correntes de ar ascendentes predominam dentro da célula. Em geral pouca chuva e poucos ou mesmo nenhum relâmpago ocorrem.

No estágio maduro, ambos movimentos de ar ascendentes e descendentes ocorrem. A bigorna é, em geral, um aspecto proeminente, formado basicamente por cristais de gelo. É neste estágio que ocorrem a maioria das chuvas, relâmpagos, granizo, ventos fortes e tornados. A chuva e o granizo em precipitação arrastam o ar consigo para baixo, intensificando as correntes de ar descendentes e produzindo frentes de rajadas à medida que o ar espalha-se ao alcançar o solo.

Finalmente, no estágio dissipativo, o movimento do ar é predominantemente descendente e a intensidade da chuva e da atividade de relâmpagos diminui, embora permaneça significativa. A nuvem gradualmente se dissipa. Os ventos nos níveis superiores espalham os cristais de gelo, de modo que a bigorna é a última parte que resta da nuvem, tomando uma forma semelhante a nuvens *Cirrostratus* e *Altostratus*. Cada estágio dura em média de 10 a 20 minutos.

Nuvens de tempestade podem ocorrer sozinhas, em linhas ou em aglomerados. Uma nuvem de tempestade sozinha ou isolada pode ser formada por uma única célula, por várias células (multicelular) ou por uma supercélula. Enquanto que uma tempestade isolada, formada por uma única célula, dura normalmente menos de uma hora, tempestades isoladas multicelulares ou supercelulares, bem como tempestades em linhas ou em aglomerados, podem afetar uma região por várias horas.

Uma nuvem de tempestade multicelular consiste de várias células adjacentes umas às outras e em vários estágios de desenvolvimento. As células interagem entre si de tal modo que as correntes de ar descendentes de uma célula em dissipação pode intensificar as correntes de ar ascendentes de uma célula adjacente. A maioria das nuvens de tempestade tem mais de uma célula, isto é, são multicelulares. Diferentemente de uma tempestade formada por uma única célula, nuvens de tempestade multicelulares podem, algumas vezes, tornarem-se tempestades severas.

Nuvens de tempestade do tipo supercelulares são consideradas as maiores nuvens de tempestade. Elas são basicamente uma célula gigante, caracterizada por uma persistente corrente de ar ascendente com forte movimento giratório. Sua existência está relacionada ao perfil vertical de cisalhamento do vento e a instabilidade da atmosfera. Elas são frequentemente classificadas como tempestades severas, sendo responsáveis pela maioria dos largos tornados ou tempestades de granizo. Entretanto, nem toda nuvem de tempestade do tipo supercélula produz tornado. Nuvens de tempestade do tipo supercelulares são eletricamente mais ativas do que as nuvens de tempestades isoladas ou multicelulares. Existem vários fatores que influenciam a severidade de uma nuvem de tempestade do tipo supercélula e os principais fatores são: a intensidade das correntes de ar ascendentes e a velocidade dos ventos nos níveis superiores.

## 2.4 Raios

Raios, denominados como a luz vista quando acontece uma descarga atmosférica, podem ser considerados belos fenômenos da Natureza. Porém, por outro lado, eles podem desencadear incêndios em florestas, danificar instalações, prejudicar a prestação de serviços e ferir

ou matar pessoas e animais. Embora seja um fenômeno conhecido desde a origem do homem, a sua previsão de ocorrência ou de comportamento na atmosfera ainda não é possível. Hoje em dia, consegue-se previsão de chuva com bastante acerto, mas a previsão de raios é o que gostaríamos. Para esse entendimento do fenômeno, a ponto de se antecipar ou interferir na sua eletrodinâmica ou mesmo tirar proveito desse fenômeno, torna-se necessária a obtenção de informações da forma mais completa possível. Como auxílio para esses propósitos de segurança, de conhecimento e de aplicação, conta-se atualmente com vários recursos tecnológicos, técnicas e metodologias de observação e medição dos raios. Várias dessas técnicas de detecção lidam, em geral, como o registro de descargas elétricas atmosféricas nuvem solo, montando um banco de dados com registros de cada descarga detectada, organizados temporalmente.

Como uma síntese do que se conhece sobre os raios, pode-se informar que eles consistem de descargas elétricas atmosféricas, de caráter transiente, portando uma alta corrente elétrica (em geral, superior a várias dezenas de kA). Elas são decorrentes de cargas elétricas que se acumulam em nuvens *Cumulonimbus* ( $\cong 10-100$  C) e ocorrem quando o campo elétrico excede localmente a capacidade isolante do ar ( $> 4$  kV/mm).

Pode-se estimar a distância de incidência dos raios usando o método chamado "flashtobang" ou "relâmpago-trovão". Contando os segundos entre o "clarão" do raio e o trovão que se ouve e multiplicando por 300 tem-se a distância em metros do local onde ocorreu a descarga. Assim, visualizando o clarão e contando até oito, por exemplo, significa que o raio "caiu" a 2.400 metros do local onde você se encontra. Para contar os segundos pode-se usar a seqüência...Mil e um, mil e dois, mil e três etc...

Muito se confunde com os conceitos de raio, relâmpago e trovão. O raio é uma gigantesca faísca elétrica, dissipada rapidamente sobre a Terra, causando efeitos danosas. Relâmpago é a luz gerada pelo arco elétrico. Trovão é o ruído (estrondo) produzido pelo deslocamento do ar devido ao súbito aquecimento causado pela descarga do raio. Através da Figura 2.14 pode-se verificar a descarga atmosférica nuvem-solo.



Figura 2.14: Descarga Atmosférica [1]

### 2.4.1 Histórico do Raio

O raio sempre existiu, fazendo parte da própria evolução e formação da Terra. No início há milhões de anos, no processo de resfriamento do planeta, tempestades violentas existiam em abundância. Com o resfriamento da Terra as tempestades se estabilizaram mantendo-se num equilíbrio natural. Hoje, devido principalmente à ação humana, alterações rápidas neste equilíbrio estão sendo observadas, podendo produzir modificações no conteúdo da bagagem histórica até então registradas, alterando os parâmetros empíricos nos estudos estatísticos dos raios.

Como a ação do raio é acompanhada pela luminosidade e trovoadas, sua presença sempre foi respeitada e observada, tendo-se encontrado registros em 2000 a. C., na Mesopotâmia.

Na antiguidade, o raio estava sempre associado a deuses e divindades, sendo fartamente apresentado na literatura grega de 700 a C., onde os registros mitológicos mostram Zeus como sendo o deus do raio. Na mitologia chinesa, a deusa Tien Mu cuidava das trovoadas e Lien Tsu era o deus do trovão.

Com o decorrer dos anos os registros de raios passaram a ser rotinas, sendo citados inclusive na Bíblia e em outros documentos.

Antigamente os efeitos destrutivos dos raios eram associados às pedras incandescentes que violentamente caíam do céu na ponta do raio. Só no século XVIII começaram os pesquisadores a associar o raio aos fenômenos da descarga elétrica das cargas acumuladas nas nuvens. Deste modo, o arco elétrico associado à descarga explicou a luminosidade do raio, sendo o ruído

(trovoada) produzido pelo rápido aquecimento e expansão súbita do ar.

Neste mesmo século, as experiências de Benjamin Franklin (1706-1790) e Romas, mostraram através de uma pipa, a existência de cargas elétricas nas nuvens. A experiência foi feita durante uma tempestade, onde uma pipa foi içada conectada a um fio condutor. Franklin registrou que sentiu pequenas descargas elétricas intermitentes pelo seu corpo. Já o pesquisador russo G. W. Richman não teve a mesma sorte, pois ao repetir a experiência de Franklin, morreu fulminado pelo raio que caiu em sua pipa. Após este fato, vários pesquisadores amarravam balões e pipas a animais, como cavalos e ovelhas, para estudar o efeito e reação muscular devido ao raio.

Hoje, para estudar o raio, usa-se processo mais sofisticado, como o de criar entre o laboratório e a nuvem um caminho de ar ionizado produzido pelo lançamento de foguetes. Através do caminho de ar ionizado a probabilidade do raio escoar para a Terra é maior. Desta maneira, pode-se examinar melhor o raio através de máquinas fotográficas rotativas especiais de alta velocidade, que foram desenvolvidas para congelar várias tomadas sucessivas do raio, e oscilógrafos especiais podem acompanhar sua performance.

### 2.4.2 Formação dos Raios

A nuvem carregada induz no solo cargas positivas que ocupam uma área correspondente ao tamanho da nuvem. Como a nuvem é arrastada pelo vento, a região de cargas positivas no solo acompanha o deslocamento da mesma formando praticamente uma sombra de cargas positivas que segue a nuvem, como pode ser visto na Figura 2.15.

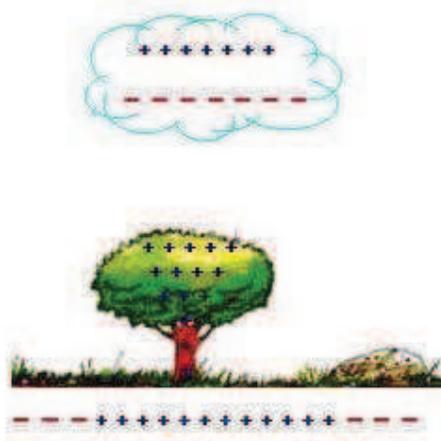


Figura 2.15: Indução de cargas positivas no solo [1]

Neste deslocamento, as cargas positivas induzidas vão escalonando árvores, pessoas, pontes, edifícios, pára-raios, morros, etc..., ou seja, o solo sob a nuvem fica com carga positiva. Entre a nuvem e a Terra formam-se diferenças de potenciais que variam de 10.000 a 1.000.000 kV, sendo que a nuvem se encontra entre 300 e 5.000 m de altura. Nota-se que para ocorrer a descarga não é necessário que o gradiente de tensão (campo elétrico) seja superior a rigidez dielétrica de toda a camada de ar entre a nuvem e o solo, bastando um campo elétrico bem menor. Isto é explicado pelo fato do ar entre a nuvem e a Terra não ser homogêneo, pois contém grande quantidade de impurezas, umidade e ar ionizado, que estão em constante agitação. Com isto o ar entre a nuvem e a Terra fica muito “enfraquecido” e um campo elétrico menor já é o suficiente para que o raio consiga perfurar o ar e descarregar na Terra.

Portanto, a queda do raio se dá devido ao fato da camada de ar, durante uma tempestade, estar “enfraquecida”. Primeiramente pequenos túneis de ar ionizados (mostrados na 2.16 ) ficam, pelo poder das pontas, com alta concentração de cargas que vão furando aos poucos a camada de ar a procura dos caminhos de menor resistência, isto é os canais ionizados, tentando se aproximar das cargas positivas do solo.

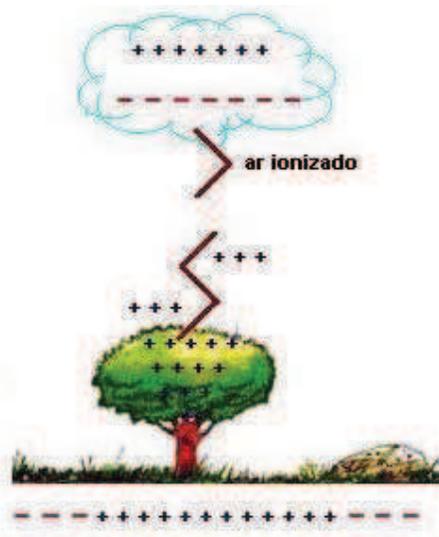


Figura 2.16: Túneis ionizados [1]

Nota-se na Figura 2.16 que os galhos das árvores formam pontas que acumulam cargas elétricas, propiciando assim a ionização do ar. Quando os dois canais estão pertos, a rigidez do ar é vencida, formando o raio piloto (líder), descarregando parte da carga da nuvem para o solo numa velocidade de 1500 km/s. Depois de formado o raio piloto, existe entre a nuvem e a Terra um túnel (canal) de ar ionizado, de baixa resistência elétrica, isto é, a nuvem está literalmente curto-circuitada à Terra. Deste modo ocorre o raio principal, ou descarga de

“retorno”, que vai da Terra para a nuvem através do canal ionizado, com uma velocidade de 30.000 km/s. No raio de retorno, as correntes são elevadíssimas, da ordem de 2.000 a 200.000 A. Após estas duas descargas podem existir outras, de curta duração, com correntes de 100 a 1000 A. Estas três descargas formam o chamado raio, que acontece em frações de micro-segundos, dando a impressão da existência de apenas uma descarga. Existe, além do já descrito, o raio de múltiplas descargas, isto é, nuvens grandes precisam de varias descargas para se descarregarem.

A maioria dos raios ocorre entre nuvens, formando descargas paralelas à superfície do solo. Isto se dá durante uma tempestade, onde nuvens se aproximam a uma distância tal que a rigidez do ar é quebrada pelo alto gradiente de tensão, com a conseqüente formação do raio, ocorrendo a neutralização das nuvens. Próximo do equador, da totalidade de raios de uma tempestade a maioria ocorrem entre nuvens do que entre nuvens e a Terra. Já com o aumento das latitudes esta tendência diminui.

Ao procurar um caminho para sua descarga, o raio atinge pontos mais altos e pontiagudos, onde existe maior concentração de cargas, como por exemplo: topo de morros, montanhas, sobre árvores isoladas, na ponta de pára-raios, em casa, etc. Assim ele pode cair em um lugar várias vezes.

A localização de áreas onde ocorrem descargas elétricas é determinada pela natureza dos seus solos e subsolos. Esses solos podem conter elementos magnéticos, condutores e radioativos, sendo o mais vulnerável o que contiver os três. É o efeito magnético que atrai os elétrons da superfície da Terra para um local específico, enquanto que a condutibilidade do subsolo os ajuda a chegar a este local. É por isso que Minas é considerado um dos estados onde mais cai raios. Além de estar em locais mais altos com muitas montanhas, é um lugar onde há bastante minério, um exemplo disto é o famoso Quadrilátero Ferrífero.

O fenômeno do poder das pontas ocorre porque em um condutor eletrizado a carga tende a se acumular nas regiões pontiagudas, criando um campo elétrico maior que nas regiões mais planas. Portanto, nas proximidades da região pontiaguda que o ar se tornará condutor e será através da ponta que a carga se escoará.

### **2.4.3 Estudo dos Raios Através de Raios X**

De acordo com Dwyer , apesar de toda familiaridade com os raios, ainda não se sabe a sua verdadeira originalidade. É um engano pensar que Benjamin Franklin resolveu o mistério quando conduziu seu famoso experimento com uma pipa em 1752. Embora Franklin tenha demonstrado que os raios são um fenômeno elétrico, os cientistas até hoje lutam para entender como tempestades geram carga e como os raios ocorrem. Os físicos cogitam que essas descargas atmosféricas (raios) possam até mesmo ser uma conexão com raios cósmicos

(partículas de alta energia que bombardeiam a Terra) que disparam cascatas de elétrons acelerados na atmosfera.

Os cientistas recentemente descobriram uma maneira de estudar raios: examinar raios X emitidos quando o raio parte das nuvens para o chão. Nos últimos anos, equipes de estudiosos mediram raios X tanto em descargas naturais quanto nos produzidos artificialmente. Os resultados sugerem que o raio traça canais condutores enviando jatos de elétrons em alta velocidade. Mas ainda não se sabe ao certo como os raios aceleram esses elétrons. Para descobrir, pesquisadores estão construindo uma rede de detectores de raios X na Flórida.

### **Quebra da Rigidez Dielétrica do ar**

A formação do campo elétrico acontece através do movimento de partículas de gelo e gotas de água quando estão movendo para cima e para baixo dentro da nuvem. Quando essas partículas se chocam umas com as outras, podem arrancar elétrons e ficar carregadas. As cargas positivas e negativas então são separadas por ventos ascendentes e pela gravidade, acarretando a formação do campo elétrico. Segundo estudos apresentados por Dwyer [6], décadas de medições feitas dentro das nuvens raramente encontram campos acima de 200 mil volts por metro, e esse valor é pequeno para que haja a quebra da rigidez do ar.

Até há pouco, os cientistas se concentravam em duas explicações para resolver esse dilema. A primeira é a de que é possível que campos elétricos mais fortes existam em tempestades, mas apenas em volumes relativamente pequenos, tornando-os difíceis de medir. Embora um cenário desses não possa ser checado por observação, ele não é de todo satisfatório, porque dessa forma substitui-se um problema por outro: como as nuvens produzem forte campo elétrico em espaço tão pequeno? A segunda explicação vem dos experimentos de laboratório que mostram que o campo elétrico necessário para produzir uma descarga é reduzido substancialmente quando há pingos ou partículas de gelo no ar, como nas tempestades. Infelizmente, a adição de chuva ou gelo compensa apenas parte da discrepância; os campos nas tempestades ainda parecem muito fracos para gerar uma descarga convencional.

Cientistas também estão incertos sobre como um raio se propaga por muitos quilômetros pelo ar. Conforme já mencionado, o processo começa com a formação de um "líder", um canal quente que pode ionizar o ar e transportar a carga por longas distâncias, como evidencia a Figura 2.17. Curioso é que o líder não viaja até o chão de maneira contínua, mas se move em uma série de passos discretos, mas ainda não se sabe ao certo como tudo isso ocorre. Existe um outro tipo de descarga mais incomum, a quebra de rigidez desenfreada, gerada por elétrons energéticos acelerados por múltiplas colisões.

# LUZES NO CÉU

Cientistas acreditam que os relâmpagos podem ser disparados por raios cósmicos, partículas de alta energia que bombardeiam a Terra.

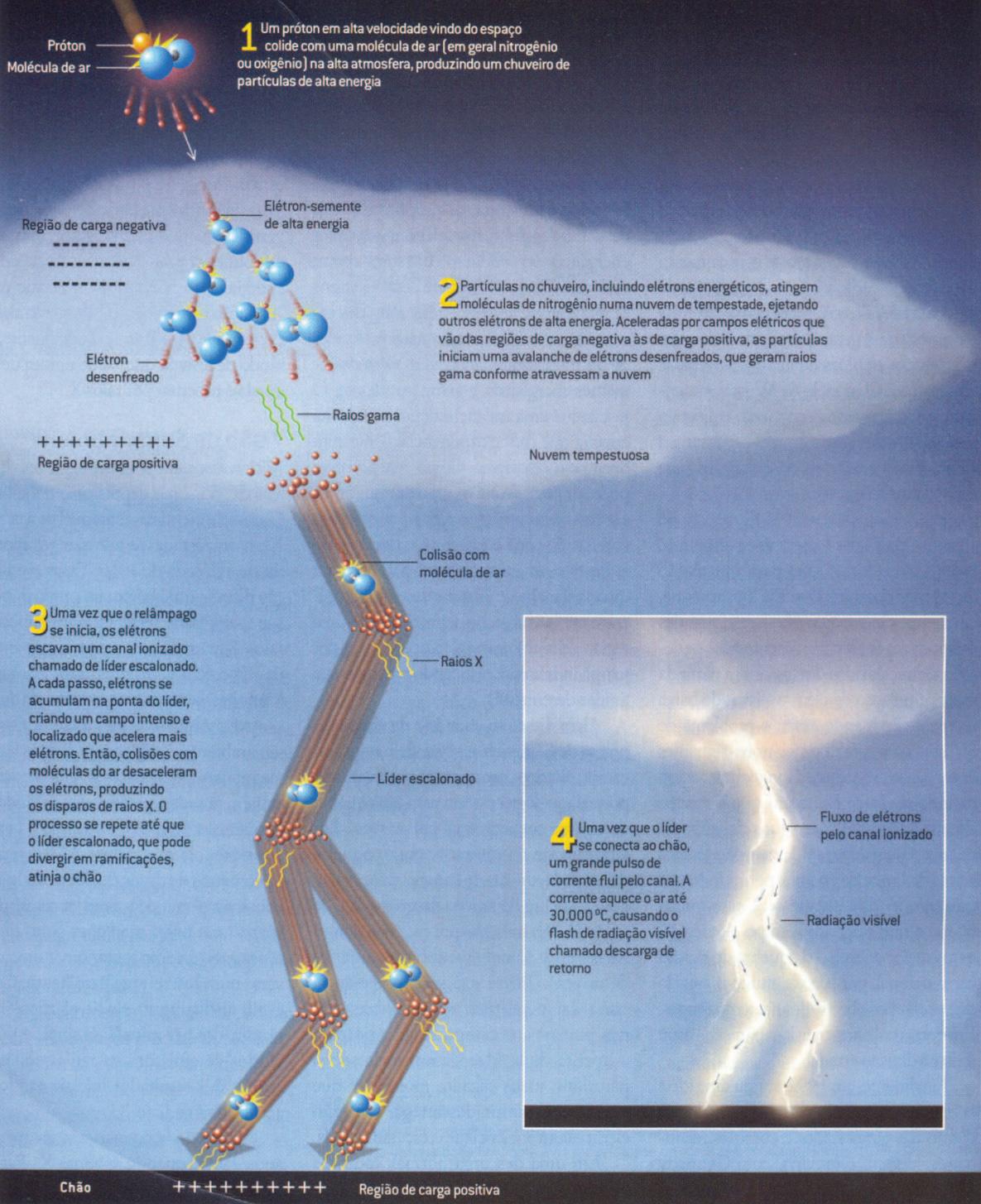


Figura 2.17: Formação de descargas atmosféricas (raio) [6]

Numa segunda descarga convencional, todos os elétrons se movem relativamente devagar, porque são bloqueados por constantes colisões com moléculas de ar. As colisões criam uma força de arrasto similar à de alguém que sente quando coloca a mão para fora da janela do carro: conforme o carro acelera, o arrasto aumenta, e conforme freia, diminui. Mas na eletricidade é diferente. Se a velocidade dos elétrons for suficientemente alta, pelo menos  $6 \cdot 10^3$  km/s ou cerca de 2% da velocidade da luz, a força de arrasto começa a diminuir conforme a velocidade dos elétrons aumenta, conforme como ser visto na Figura 2.18. Se um campo elétrico forte acelera um elétron de alta velocidade, a força de arrasto se torna melhor, o que permite ao elétron mover-se ainda mais depressa, reduzindo a força de arrasto ainda mais, e assim por diante. Esses elétrons desenfreados podem chegar quase a velocidade da luz, adquirindo enormes quantidades de energia e produzindo a chamada quebra de rigidez desenfreada. Esse processo, porém, precisa ser semeado por uma população inicial de elétrons com altas energias.

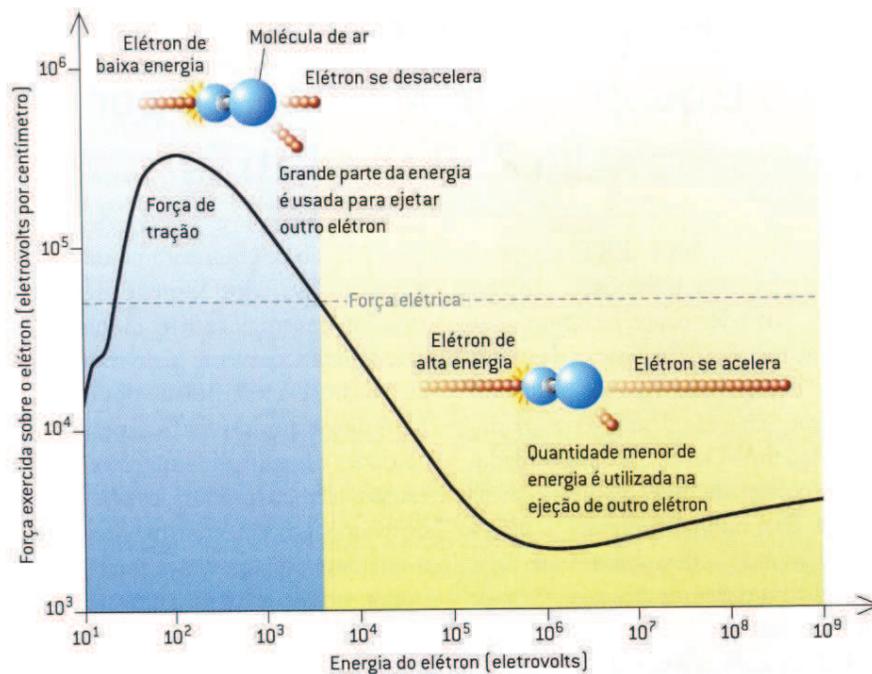


Figura 2.18: Força exercida sobre o elétron x Energia do elétron [6]

Em 1992 surgiu uma idéia com potencial para explicar o que acontece dentro das tempestades e como os raios surgem. Segundo essa teoria, os próprios elétrons desenfreados geram mais elétrons-sementes energéticos ao colidirem com força contra moléculas de ar e arrancarem outros elétrons de alta energia. Esses elétrons atingidos escapariam e colidiriam

com mais moléculas de ar, produzindo ainda mais elétrons-sementes energéticos e assim por diante. O resultado é uma avalanche de elétrons de alta energia que cresce exponencialmente com o tempo e com a distância. Como esse processo pode ser iniciado até mesmo por um único elétron-semente energético, constantes colisões de raios cósmicos e o decaimento radioativo seria suficientes para disparar uma avalanche de elétrons desenfreados. E enquanto a avalanche permanecer em uma região de forte campo elétrico, crescerá por tempo indefinido, resultando na quebra de rigidez desenfreada.

Essa teoria aponta que apenas um campo elétrico com apenas um décimo do porte daquele necessário para uma quebra de rigidez convencional em ar seco. Em altitudes de tempestades, com pequena densidade do ar, o campo necessário para a quebra de rigidez desenfreada é de cerca de  $150 \cdot 10^3 \text{V/m}$ , dentro da faixa de valores medidos no interior de nuvens. Talvez não seja coincidência que o campo elétrico máximo observado nas nuvens e o campo necessário para a quebra de rigidez desenfreada sejam parecidos.

Em uma descarga normal, todos os elétrons tem baixa energia e viajam relativamente devagar, de modo que a radiação eletromagnética emitida pela faísca vai apenas até a faixa do ultravioleta. Em uma quebra de rigidez por avalanche, no entanto, os elétrons em alta velocidade ionizam grandes quantidades de moléculas do ar e produzem os raios X e raios gama de alta energia, fenômeno este conhecido como "radiação de freamento", do termo alemão *Bremsstrahlung*. Consequentemente, um modo de testar a quebra de rigidez desenfreada é procurar por raios X.

### **Detecção de Raios X em Tempestades**

Cientistas tentam detectar raios X em tempestades de ráio desde a década de 1930. Essas medições são difíceis e há pouco produziam em sua maior parte resultados ambíguos. Os raios X não viajam muito longe através da atmosfera e em geral são absorvidos a poucas centenas de metros da fonte. Outro problema é que as tempestades são ambientes ruidosos em termos eletromagnéticos. Raios, em particular, emitem grandes quantidades de ruído em frequências de rádio, causando a famosa interferência em rádios AM a muitos quilômetros de distância. Detectar raios X envolve registrar pequenos sinais elétricos; tentar fazer essas medições perto de um raio é como tentar ouvir uma conversa em um ambiente barulhento. Como é difícil distinguir sinais elétricos reais produzidos por raios X de sinais espúrios vindos de emissões de radiofrequência, muitos dos resultados iniciais não foram aceitos de imediato.

A situação ficou mais interessante nos anos 80, quando George K. Parks e Michael P. McCarthy, da Universidade de Washington, fizeram observações em aeronaves dentro de tempestades. Depois, Kenneth B. Eack, coordenou uma série de sondagens de balão dentro de núvens tempestuosas. Essas observações forneceram dicas de que as tempestades de raios às

vezes produzem grandes disparos de raios X. A fonte dessa radiação não foi identificada com precisão, mas parecia estar associada aos campos elétricos acentuados dentro das nuvens. O interessante foi que a emissão de raios X algumas vezes começou antes de um raio ser observado e parou quando o raio surgiu, talvez porque o raio tenha reduzido os campos elétricos necessários para produzir a quebra de rigidez desenfreada.

Os pesquisadores não sabem de nenhum mecanismo capaz de produzir quantidades tão grandes de raios X na atmosfera além da quebra de rigidez desenfreada. Outros fenômenos associados aos raios não podem ser responsáveis pela emissões; apesar de um raio poder aquecer o ar até 30000°C (cinco vezes a temperatura do sol), quase nenhum raio X é produzido a essa temperatura.

Em 2001, finalmente os cientistas acharam um elo direto entre os raios X e as descargas atmosféricas, quando Charles B. Moore relatou a observação de radiação energética, presumivelmente raios X, em várias descargas naturais no topo de uma grande montanha. Ao contrário das observações anteriores, a radiação energética ali parecia ser produzida pela descarga em si e não pelos campos elétricos de larga escala na nuvem. Além disso, as emissões pareciam ocorrer durante a primeira fase da descarga, o movimento do líder da nuvem para o chão. Essa observação era algo inteiramente novo.

As energias desses raios X vão até 250 mil eletrovolts, cerca do dobro da usada para tirar uma radiografia do pulmão. Além do mais, a emissão de raios X não é produzida de modo contínuo, mas ocorre em rápidos disparos separados por um milionésimo de segundo. Se os humanos tivessem visão de raios X, os raios pareceriam bem diferentes daqueles que estamos acostumados a ver: durante a propagação do líder escalonado do raio para baixo, enxergaríamos uma série rápida de flashes brilhantes descendo das nuvens. Os flashes ficariam mais fortes perto do chão, terminando com um disparo muito intenso no instante em que a descarga de retorno começasse. Embora o pulso da corrente que se seguiria fosse brilhante em luz visível, pareceria escuro em raios X.

A observação dos raios X das descargas atmosféricas indica que alguma forma de quebra de rigidez por avalanche precisa estar envolvida para acelerar os elétrons o suficiente a fim de produzir a radiação de frenamento.

Em resumo, as emissões de raios X por descargas naturais são similares às de descargas induzidas. Está ficando claro que a quebra de rigidez desenfreada é um fenômeno comum em nossa atmosfera. Apesar das moléculas do ar atrapalharem a aceleração dos elétrons rápidos, vê-se evidências de quebra de rigidez desenfreada até mesmo perto do chão, onde o ar é mais denso. A maior parte dos raios que consegue-se observar no canal do raio vem de uma altitude abaixo de 100 metros. Logo a quebra de rigidez desenfreada deve acontecer até mais frequentemente em altitudes de tempestade.

Usar raios X para estudar descargas atmosféricas ainda é uma novidade, e, conseqüentemente, toda vez que se conduz um experimento, pode-se descobrir algo que até então era desconhecido. Já sabe-se que o raio não é uma faísca comum, pois este envolve uma espécie de descarga que produz elétrons desenfreados e raios X. Como os raios X permitem ver a descarga de um jeito novo, essa nova teoria pode ser de ajuda na resolução do quebra-cabeça iniciado por Benjamin Franklin dois séculos e meio atrás.

#### 2.4.4 Classificação dos Raios

A maioria dos raios ocorre dentro da nuvem, enquanto que mais ou menos 20% ocorrem entre a nuvem e solo. Uma descarga pode aquecer o ar até 30.000 °C, o que é cinco vezes mais quente do que a superfície solar. Esta elevação da temperatura causa a expansão explosiva do ar. Isso inicia uma onda de choque que se torna trovão que sai em todas as direções de um relâmpago.

Os raios podem ser classificados nas categorias:

- Raios em nuvens (intra-nuvem)

Os raios em nuvens são assim chamados por iniciarem dentro de uma nuvem. Eles são menos nocivos para os seres humanos, apenas os pilotos de aeronaves recebem treinamento especial caso enfrentem uma nuvem de tempestade durante o vôo e sejam atingidos por essa descarga elétrica. Nesse caso, o avião está protegido como uma blindagem natural. Os relâmpagos que esses raios geram podem ser vistos por nós e totalizam cerca de 70% do total que atingem nosso planeta. O fato de estarem escondidos pelas nuvens impossibilita que se saiba detalhes sobre sua formação. Suas descargas podem ocorrer de três maneiras: no interior das nuvens (chamados de descargas intra-nuvem), entre duas ou mais nuvens (as descargas nuvem-nuvem) e para fora da nuvem sem atingir o solo, denominadas de descargas para o ar. A Figura 2.19 apresenta uma descarga intra-nuvem.



Figura 2.19: Descarga intra-nuvem [1]

- Raios entre nuvem e solo

Este tipo de raio inicia na superfície de uma nuvem ou no chão, abaixo ou próximo de uma nuvem de tempestade. Sua denominação é feita de acordo com o sentido de movimento da carga que o origina. Dessa maneira, os raios entre nuvens e solo podem ser do tipo nuvem-solo ou solo-nuvem. Eles também se classificam quanto ao sinal da carga líder que inicia uma descarga, podendo ser negativos ou positivos. A maioria das descargas nuvem-solo é negativa. Esses raios são os que realmente preocupam os homens. Estimativas indicam que cerca de 100 milhões de raios nuvem-solo ocorrem no Brasil todo ano e a maior parte deles acontecem na Amazônia, talvez pelo fator climático da região. Nas cidades, já se comprovou que a poluição aumenta a quantidade de descargas elétricas na atmosfera. A formação de raios entre nuvens e solo é bem conhecida. Os nuvem-solo (mostrado na Figura 2.20) correspondem a quase 99% dessas descargas, enquanto que os solo-nuvem, denominados descarga de tempo bom, que são caracterizadas por restos da bigorna da *cumulus* com carga positiva, são raros, ocorrendo geralmente no topo de montanhas ou em estruturas altas, como torres e edifícios. Um solo-nuvem pode até ser "criado" por foguetes compostos por fios condutores e lançados na direção da nuvem de chuva. Isso, aliás, têm permitido o estudo dos relâmpagos e melhorado as técnicas de proteção.



Figura 2.20: Descargas nuvem-solo [1]

### 2.4.5 Descargas Elétricas em Linhas de Transmissão

O efeito das descargas em linhas de transmissão pode ser direto ou indireto.

Os efeitos indiretos acontecem quando o raio incide próximo à linha de transmissão. Neste caso, a tensão induzida só produzirá efeitos mais sérios em linhas de transmissão de tensão abaixo de 69 kV, que é o caso típico de Linhas de Subtransmissão e de Distribuição. Linhas com tensão mais alta, o efeito da indução pode ser desconsiderado.

A descarga direta é aquela que o raio incide diretamente na linha de transmissão, podendo ocorrer de dois modos:

- No vão da linha de transmissão;
- Na torre.

A proteção, neste caso, é efetuada colocando o cabo-guarda (cabo pára-raios ou cabo de cobertura) acima das fases da linha de transmissão. Este cabo-guarda forma uma proteção que produz uma zona protegida na qual a linha de transmissão está contida.

Da totalidade dos raios que incidem em linhas de transmissão, isto é, mais propriamente no cabo de cobertura, 60% caem diretamente na torre de transmissão, os restantes nos vãos.

Quando um raio cai na linha de transmissão entre duas torres, a sobretensão associada ao raio se divide em duas partes, cada qual se dirigindo em direção opostas. A Figura 2.21 mostra uma descarga atmosférica em um linha de transmissão.



Figura 2.21: Descarga atmosférica em linha de transmissão

### 2.4.6 Raios no Brasil

Estudos realizados por Biasi Gin e Guedes (2000) [7] mostraram que cerca de 39.000 raios foram observados no território brasileiro durante o período de 1961 a 1970. Estes dados de raios são obtidos das estações meteorológicas e que fazem observações horárias de cerca dezoito parâmetros meteorológicos dentre estes os relâmpagos e trovoadas. No período de estudo apenas 23 estações apresentavam dados contínuos.

A Figura 2.22 mostra o nome, a sigla e a localização de cada estação meteorológica e o número total de raios observados em cada estação. As regiões que apresentaram maior ocorrência de relâmpagos foram Manaus, Brasília, São Luís e Belém. Estas regiões apresentaram uma média de ocorrência de mais de 300 raios por ano.

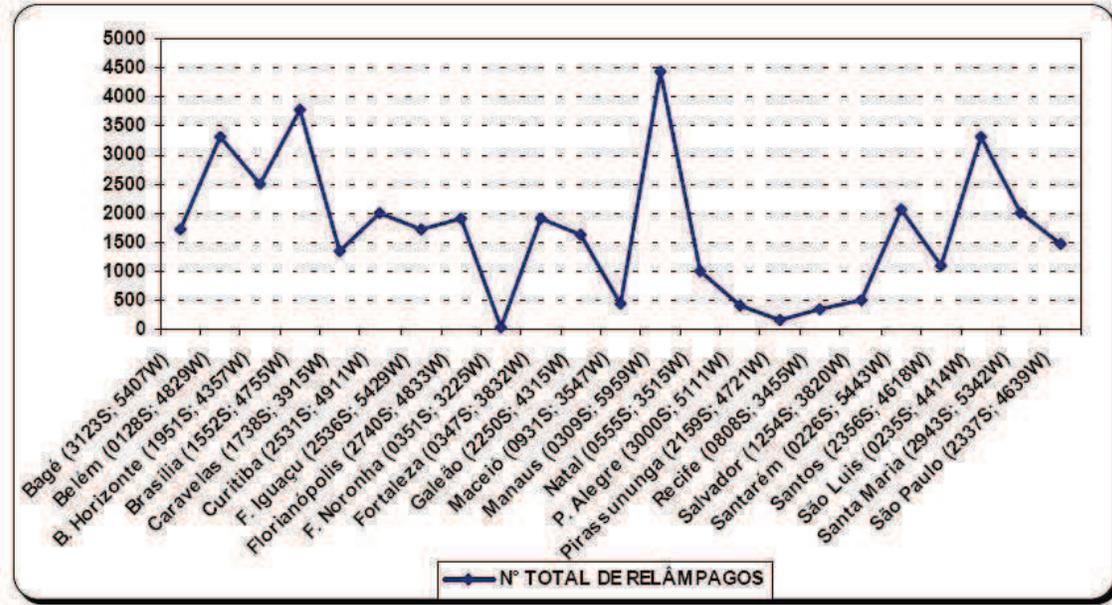


Figura 2.22: Número relâmpagos nas estações meteorológicas [7]

O período de maior atividade de raios sobre todo o território brasileiro ocorre entre os meses de janeiro e março, com mais de 400 relâmpagos por ano, em função de um forte aumento da atividade convectiva sobre o continente. Neste período a instabilidade atmosférica é intensificada devido à presença de bandas de nebulosidade convectivas que se originam tanto nos interiores continentais quanto em algumas regiões costeiras, principalmente na costa norte-nordeste brasileira. Além disto, os sistemas frontais que atingem as regiões sul e sudeste do país tem sua atividade convectiva intensificada em função da presença de maior quantidade de umidade e calor na atmosfera (Guedes e Machado, 1997). As instabilidades geradas por fenômenos da mesoescala e da escala sinótica que são freqüentes nesta área e época do ano, associadas a perturbações locais que intensificam a atividade convectiva, favorecendo o aumento do número de ocorrência de relâmpagos. O horário de maior ocorrência de relâmpagos é entre 19:00 e 21:00h local, apresentando uma média de mais de 30 raios por hora para cada mês. Este horário é compatível com os horários de maior atividade convectiva que também foram observados [7].

## Capítulo 3

# Medição de Descargas Atmosféricas Artificiais (Cachoeira Paulista)

As informações e conceitos contidos neste capítulo baseiam-se no relatório do projeto: Desenvolvimento de Técnicas para a Medição de Descargas Atmosféricas Artificiais.

### 3.1 Introdução

Como relatado em [2], uma descarga atmosférica é induzida devido à aproximação rápida de um condutor, estendido na direção vertical por um foguete, à uma nuvem carregada eletricamente. À medida que o citado condutor sobe, provoca uma intensificação do forte campo elétrico gerado pela presença da nuvem carregada, o que pode levar à quebra da rigidez dielétrica do ar e à ocorrência de uma descarga inicial a partir da extremidade do condutor. Essa descarga inicial leva ao desenvolvimento do chamado líder escalonado ou descarga de retorno, conforme visto no Ítem 2.4.2, que desencadeia todo o processo conhecido por raio.

Porém, se o condutor aproxima-se de forma lenta, as descargas corona que se formam ao redor do mesmo, devido a esse estar imerso num campo elétrico intenso, geram cargas espaciais positivas que irão blindá-lo, reduzindo a intensidade do campo elétrico e evitando, dessa forma, a indução do relâmpago [8].

Os foguetes destinados à indução de relâmpagos têm velocidade superior àquela alcançada pela corrente iônica positiva produzida pelas descargas corona (cerca de 100 ms<sup>-1</sup>). Assim, o foguete deixa para trás a carga espacial positiva e, portanto, a blindagem eletrostática não se forma e o relâmpago é induzido [9].

## 3.2 Histórico

A idéia de trazer um experimento de raios induzidos, ou trigados, para o Brasil já era antiga. Há muito tempo já se falava que o Brasil era um dos países com maior índice de descargas atmosféricas, estas concentradas no período do verão. Essa idéia amadureceu em uma reunião no congresso ICLP de Birmingham, onde a proposta de trazer este experimento para o Brasil foi colocada junto aos participantes H. .Mercure da Hydro-Quebec- Canadá, A. Lefort da Indelec-França e André Eybert-Berard do CEA – Grenoble. Ficou decidido que testes preliminares seriam interessantes. Estes dariam informações dos dias críticos e do valor do campo elétrico durante as tempestades. Foi instalado então um field mill (medidor de campo elétrico) modelo E2001 com o software “Windo” ligado a um PC que registrou os eventos durante o verão de Dezembro de 98 a Fevereiro de 99. Os resultados preliminares não poderiam ser melhores, pois durante o período que funcionou o equipamento, os registros foram suficientes para se ter uma idéia da região de Cachoeira Paulista. Tudo indicava que era um ótimo lugar para construir um site para descargas trigadas. No ano seguinte, dáva-se início a montagem do local e os primeiros resultados dos raios trigados no Brasil apareceriam.

O projeto tinha como objetivo realizar um estudo em detalhes de descargas do tipo nuvem-solo induzidas (trigadas ou mesmo artificiais) com a técnica de lançamento de foguetes. A técnicas de indução de descargas a partir de lançamento de foguetes em direção à nuvem, tem sido utilizada desde do final da década de 60, tendo sua origem na França. Atualmente, esta técnica tem sido muito utilizada na França, nos Estados Unidos, China e Japão. Até então não havia centros na região tropical do planeta. O método clássico consiste no uso de um fio condutor ligado ao foguete (fio conectado), ou ainda, o método de altitude, onde fios condutores e isolantes são usados alternadamente. O segundo método é muito usado para induzir a descarga até uma certa altitude e depois ela segue o melhor caminho (menor resistência) até o solo, ou local pretendido (linhas de transmissão, pára-raios em teste, etc.). Este último método chamamos de raio não conectado.

## 3.3 Sistema de Captação de Descargas Atmosféricas Trigadas Artificiais

Tendo o campo elétrico como base, pode-se explicar como ocorre o lançamento dos foguetes. No decorrer da tempestade, o campo elétrico varia muito como pode ser observado na figura a seguir:

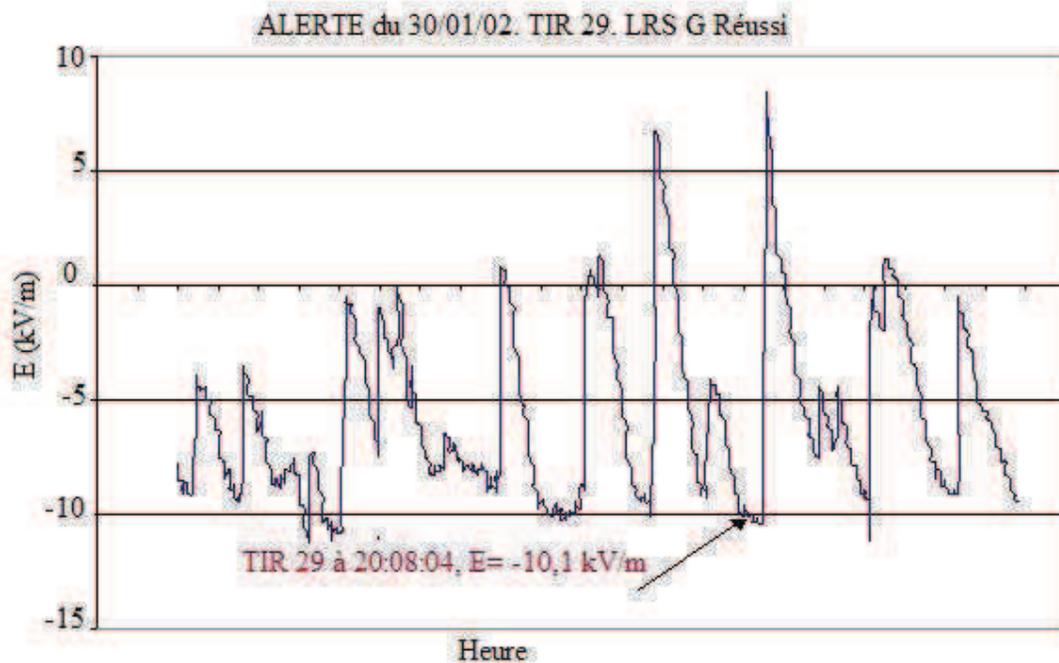


Figura 3.1: Campo elétrico da tempestade, que resultou no tiro 29 [10]

Os picos na escala positiva são devido aos raios negativos, ou seja, as descargas nuvem-solo. Já a escala negativa é referente às descargas solo-nuvem. Sabe-se que a quantidade de descargas nuvem-solo é maior que o contrário e pode-se observar isto no gráfico. O campo aumenta em módulo e quando atinge um valor limite, “descarrega” (diminui em módulo) até que novamente seja carregado e outra descarga ocorra.

Deste modo, o papel da pessoa responsável pelo lançamento do foguete é fundamental, já que a mesma deve ter uma certa experiência e, porque não dizer, um “sentimento” sobre o momento exato do lançamento do foguete, que culminaria em sucesso do tiro. Se o botão de lançamento não for apertado no momento exato, pode ser que ocorra uma descarga antes e o valor de campo caia (em módulo), não permitindo neste caso que o dielétrico fosse rompido com tensão baixa. Como dito no capítulo anterior, há um valor de tensão em que ocorre o rompimento do dielétrico e posterior ocorrência do fenômeno. Com uma velocidade definida e altura prevista, o foguete vai até perto da nuvem e à medida que vai subindo, uma bobina com fio que está presa ao foguete é desenrolada. Por fim, a descarga deve “descer” por este fio. Antes de chegar à plataforma de lançamento, onde estão localizados alguns equipamentos de medidas, a descarga “escolhe” entre diversos pára-raios algum e descarrega para terra pelo mesmo. Deve ser ressaltado que todo o sistema de captação de sinais da plataforma para o

*shelter* é feito por um sistema pneumático de acionamento, alimentado com baterias e com transmissão dos dados por fibra óptica.

### 3.4 Sistema de Medição

Utilizou-se no local do estudo (Cachoeira Paulista) dois equipamentos do tipo Medidor de Campo Elétrico (descrito detalhadamente no próximo capítulo). Esses dois equipamentos foram utilizados para diferentes funções, tais como, medição de campo elétrico rápido e com variação lenta. Este último, é usado quando se quer ter uma duplicidade de medição e para se ter uma maior confiabilidade durante uma tempestade. Este equipamento será chamado aqui de E2001 em alusão ao seu fabricante (Electronic 2001). Quanto ao equipamento para medição do campo elétrico rápido, aqui denominado FMANDRE, é utilizado quando a tempestade já está instalada, ou seja, as informações devem ser precisas e comparadas com o histórico dos eventos passados. Um exemplo deste equipamento é mostrado na Figura 3.2.



Figura 3.2: Medidor de campo elétrico usado em Cachoeira Paulista [10]

O equipamento FMANDRE está conectado a um conversor que transforma o sinal elétrico, proveniente da leitura do campo elétrico, em sinal óptico. O último é enviado via fibra até um receptor óptico-elétrico, que está conectado diretamente a um PC. Este, possui a função de armazenar os dados fornecidos pelo FMANDRE e também utilizá-lo para fazer o gráfico

com o auxílio do software Excel©.

Para que se possa entender melhor o momento que deve acontecer o tiro, devemos recorrer a uma rápida explanação sobre o fenômeno atmosférico que ocorre no momento da tempestade. A “formação” de cargas elétricas ocorre devido a fenômenos internos da nuvem da classe denominada *Cumulus-nimbus*. Deste modo, continuamente a nuvem carrega-se e quando o valor de campo da mesma ultrapassa um valor limite, rompe-se o dielétrico (no caso o ar) e ocorre a descarga atmosférica.

Como numa tempestade as variações do campo elétrico são intensas tanto positivas quanto negativas, podemos observar que quando existe uma descarga atmosférica para a terra, o campo passa rapidamente de um alto valor negativo para um valor mais positivo. Isto é importante para termos idéia da variação do campo antes do disparo do tiro, o qual exige uma situação em que o campo elétrico no solo esteja suficientemente alto para que se tenha sucesso. A experiência do autor do relatório deste projeto [10], indica que para um valor de campo elétrico acima de 9 kV/m (em módulo), a taxa de êxito na obtenção de descargas trigadas deveria ser satisfatória. Entretanto, este valor deve ser interpretado e servir de base para o acionamento do lançamento do foguete, pois podem ocorrer descargas entre nuvens ou descargas para a terra em um outro lugar. Nesta situação, o valor 9 kV/m ou superior pode não significar o sucesso.

O alerta do campo elétrico é dado quando o valor ultrapassa 4 kV/m. Isto significa que a possibilidade da ocorrência da tempestade está próxima e, portanto, deve-se acionar todos os equipamentos, os quais estão normalmente em espera, pois na maioria eles são alimentados por baterias recarregáveis.

Além destes medidores, outro está localizado na plataforma do lançador de foguetes e mede a derivada do campo elétrico no plano dos pára-raios. Isto significa que é utilizado para medição de campo elétrico rápido. Outros aparelhos utilizados são os chamados captors de campo. Estes são antenas capacitivas, que são responsáveis pela medição de campos elétricos em diferentes pontos do site.

A antena utilizada em Cachoeira Paulista durante a campanha, foi posteriormente reproduzida, pois na próxima campanha utilizaram-se várias delas. A Figura 3.3 mostra a foto da antena em questão.



Figura 3.3: Antena capacitiva utilizada em Cachoeira Paulista [10]

### 3.5 Equipamento de Filmagem (Câmera Rápida)

O fenômeno de descarga atmosférica por si só é de grande beleza visual. Muitos se deparam observando a forma, a direção, enfim, o raio que ilumina o céu. Nesta tese, no Capítulo 2 foi explicado como ocorre a descarga, descrita por cada etapa. O sistema de filmagem permite que se faça uma inspeção visual do que está ocorrendo a cada descarga trigada. Por exemplo, pode-se confirmar em que pára-raios a descarga incidiu. Existem pessoas ligadas a meteorologia que estudam as descargas atmosféricas e as tempestades por meio dos filmes e fotos do fenômeno. Abaixo, vamos descrever o sistema de filmagem presente na experiência.

No *site*, está implantado um sistema de filmagem das descargas atmosféricas. Várias câmeras são empregadas para esta finalidade, em diferentes pontos (de modo que assistamos de diferentes ângulos e de diferentes distâncias). Uma destas câmeras é chamada de rápida, ou seja, filma uma quantidade muito grande de quadros em um tempo curto. Esta câmera possibilita a visualização do exato momento de emissão do *streamer* e, é muito importante para que possamos observar o fenômeno na sua plenitude, além de contarmos o número de *strokes*, denominados descarga em um mesmo raio.

A câmera é acionada manualmente e, portanto, deve ser observado o exato momento do acionamento. Esta câmera é diretamente conectada a um computador, onde ficam armazenados os dados referentes a cada filmagem. As outras câmeras necessitam de uma inspeção periódica nos filmes já que obviamente os mesmos duram somente algum tempo.

Pode-se ver o momento em que um *stroke* está ocorrendo sobre o pára-raios Franklin, conforme mostra a Figura 3.4. O último atuou antes dos outros pára-raios, que também podem ser observados ao redor da plataforma de lançamento dos foguetes.



Figura 3.4: Descarga através do lançamento de um foguete [10]

### 3.6 Medidas Obtidas

O tiro número 33 constituiu um grande resultado para a pesquisa, pois foi possível com este obter dados nos diversos experimentos que estavam sendo realizados no local.

A Figura 3.5 representa o gráfico do valor do campo elétrico antes, durante e pouco depois da ocorrência deste evento.

Alerte de 11/02/02. TIR # 33. LRS a 60/800. REUSSI

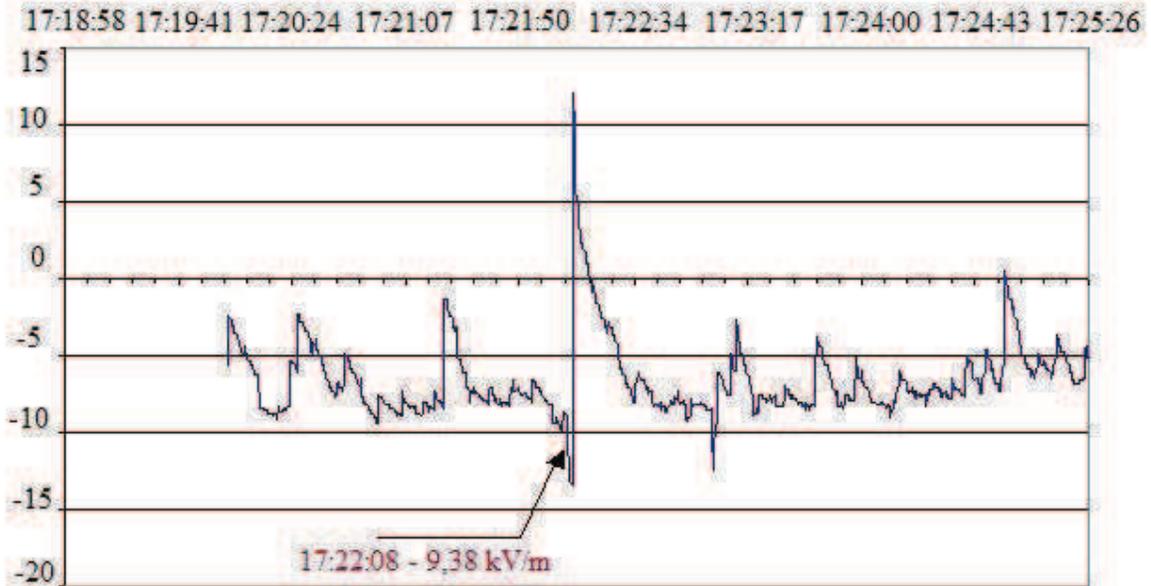


Figura 3.5: Gráfico do campo elétrico indicando o momento do tiro 33 [10]

Pelo gráfico do campo, verifica-se que o momento ideal para a execução do disparo ocorre quando o campo atinge um valor bastante negativo (com razoável estabilidade). Ve-se também, que após o disparo o campo elétrico assume um valor positivo bastante alto, o que indica que a nuvem descarregou suas cargas acumuladas para a terra.

Desta forma, nota-se o quanto é importante analisar adequadamente o gráfico do campo e como uma interpretação errada ou precipitada da estabilidade deste em valor negativo pode resultar na perda de um disparo. Isto representa um desperdício grande de recursos já que os foguetes utilizados são caros, ou seja, não basta o campo chegar em um valor negativo alto, é necessário, além disso, que o campo apresente alguma estabilidade neste valor.

Após ter sido feito o disparo do foguete, que leva um fio condutor preso a ele, a descarga atmosférica desce por este condutor até certo ponto onde passa a existir um isolante. A partir deste ponto, a descarga pode “escolher” aonde ela vai cair, ou seja, por qual pára-raios ela irá descer. Desta forma, torna-se possível estudar qual o melhor tipo de pára-raios e quais são os seus respectivos raios de ação.

A Figura 3.6 mostra a plataforma de ensaio no momento em que o foguete do tiro 33 foi disparado.



Figura 3.6: Foto do foguete sendo disparado [10]

Pode-se observar abaixo alguns quadros retirados do filme feito por uma camera Sony digital 8 DCR-TRV330.



Figura 3.7: Fotos de descargas de um mesmo tiro trigado [10]



# Capítulo 4

## Medidor de Campo Elétrico

Sempre há um campo elétrico vertical na atmosfera. Com tempo bom esse campo é baixo, aproximadamente 200 V/m. Com clima tempestuoso, o campo é muito mais alto porque cargas elétricas estão presentes nas nuvens de tempestade. Quando um temporal se forma logo acima do sensor, o campo elétrico, tipicamente de polaridade reversa, aumenta continuamente. Assim que o campo elétrico alcance valor aproximado de 4000 V/mm, a probabilidade de ocorrência de um relâmpago é significativa [2].

O Medidor de Campo Elétrico (EFM - do inglês *Electric Field Mill*) é um sistema de medição de alta tensão ou mais precisamente de intensidade de campo elétrico. É usado às vezes a bordo do avião por agências de meteorologia medindo o potencial do campo elétrico em nuvens, a bordo de satélites para medir campos elétricos no espaço e também utilizado por indústrias para proteção de equipamentos sensíveis e funcionários em campo.

### 4.1 Princípio de Funcionamento

Se uma placa condutora for conectada em um resistor de carga de valor elevado que está conectado à terra, e em seguida, exposta à um campo elétrico, será induzida uma carga na placa, conforme apresentado na Figura 4.1 [11].

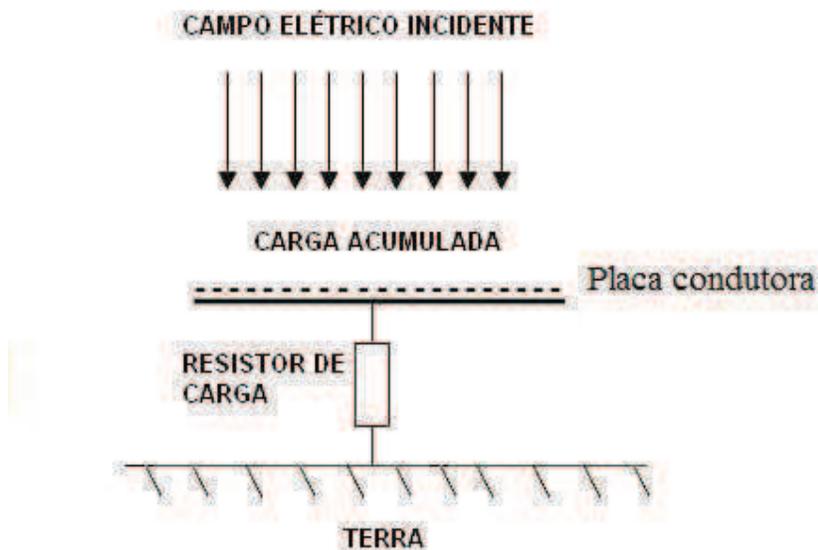


Figura 4.1: Princípio de detecção de campo elétrico

Se uma outra placa idêntica ligada à terra for introduzida entre o campo incidente e a placa original, o campo elétrico incidente estará interceptado então, pela nova placa e as cargas são conseqüentemente desviadas à terra, conforme apresentado na Figura 4.2.

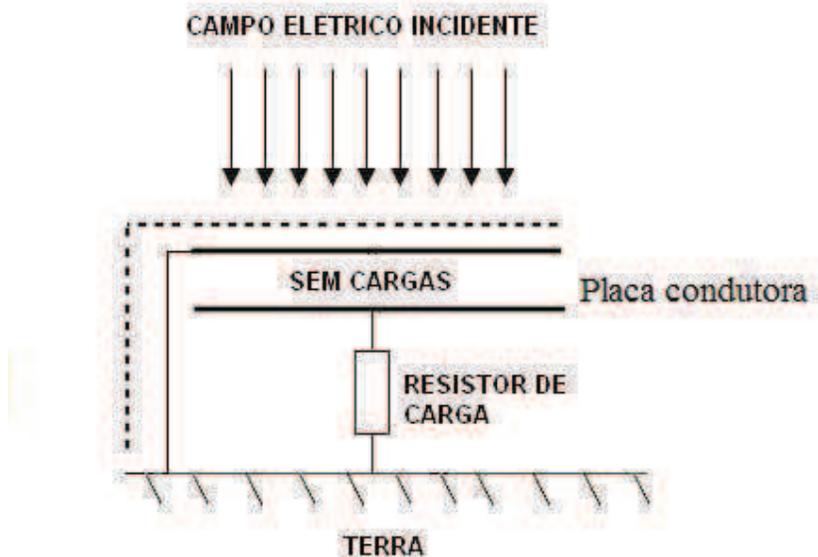


Figura 4.2: Princípio de detecção de campo elétrico com duas placas

A primeira placa, também denominada placa de medição, agora estará fora de todas as cargas acumuladas através do resistor de carga tornando-se desprovida de toda a carga. Assim, se alternadamente inserir e remover uma placa aterrada entre a placa de medição e o campo pode-se verificar uma carga alternada através do resistor de carga (RL). Esta carga resultará em uma tensão alternada através deste resistor, que pode então ser amplificada e medida.

Se a placa ligada à terra for um rotor controlado por um motor, sua função será então alternadamente proteger e expor a placa de medição ao campo incidente em uma proporção determinada pela velocidade do motor. Esta maneira simples de medir o campo incidente não indica a polaridade deste campo. Entretanto, a adição de um retificador síncrono sincronizada à posição do disco girante permitirá que a polaridade seja determinada [11].

Desta forma, o campo E incidente e, conseqüentemente, a carga superficial na placa de medição, são ambos modulados pelo rotor. A corrente que flui em RL é resultado da carga alternada na placa de medição, que produz uma tensão alternada (V) através do resistor RL. Esta tensão pode então ser amplificada com uma eletrônica sofisticada. Na prática, o resistor RL é substituído por um amplificador de transcondutância.

A Figura 4.3 apresenta um modelo de EFM contruído por Campbell [12].

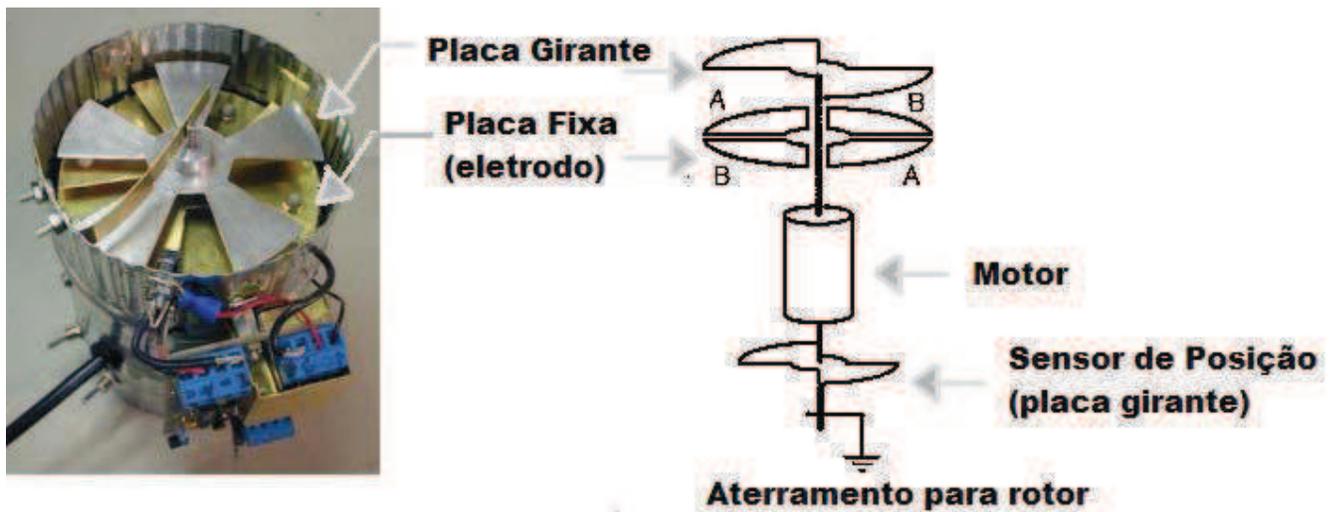


Figura 4.3: Field Mill [12]

Podem-se demonstrar os conceitos descritos no princípio de funcionamento do EFM através de algumas equações simples. Para um melhor entendimento, assume-se que o rotor e a placa de medição tem a mesma forma e dimensão, conforme mostra a Figura 4.4.

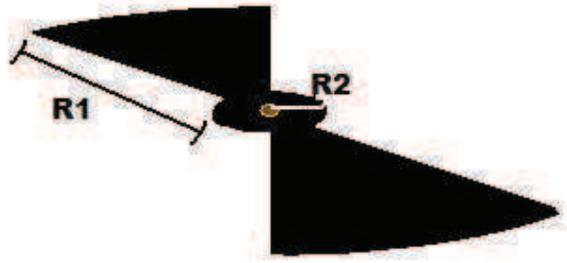


Figura 4.4: Área dos setores do rotor

Um campo elétrico estático de intensidade  $E$  (volts/m) incidente sobre uma superfície plana com uma área  $A$  ( $m^2$ ) dará origem a uma carga superficial  $Q$  (Coulombs).

A área da superfície plana é dada por:

$$A = \frac{\pi}{4}(R_2^2 - R_1^2) \quad (4.1)$$

Considerando que o campo elétrico está  $90^\circ$  da superfície plana e utilizando as Equações de Maxwell:

$$-Q = E \varepsilon_0 A \quad (4.2)$$

Se o campo elétrico não está  $90^\circ$  da superfície plana a equação 4.2 torna-se então:

$$Q = E \varepsilon_0 A \cos(\theta) \quad (4.3)$$

Onde:

$Q$  = a carga superficial (C);

$E$  = campo elétrico incidente (V/m);

$\varepsilon_0$  = permissividade do espaço livre ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m);

$A$  = área da superfície plana ( $m^2$ );

$\theta$  = ângulo entre a superfície plana de medição e o campo incidente  $E$ .

Devido a ação rotativa da placa ligada à terra, o campo elétrico  $E$  é modulado na forma senoidal:

$$Q = E \text{sen}(\omega t) \varepsilon_0 A \quad (4.4)$$

Onde:

$$\omega = 2\pi f$$

f = frequência rotacional da aleta da placa girante, multiplicado por n, sendo n o número de aletas desta placa.

A corrente induzida no estator através da carga é dada como:

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (4.5)$$

$$i = A E \varepsilon_0 \omega \cos(\omega t) \quad (4.6)$$

Multiplicando Equação 4.6 por  $R_L$ , encontra-se a tensão V aplicada em  $R_L$ :

$$V = R_L A E \varepsilon_0 \omega \cos(\omega t) \quad (4.7)$$

Na prática,  $R_L$ , A e  $\varepsilon_0$  são constantes.

A partir da Equação 4.7 pode-se verificar que a tensão através do resistor de carga é proporcional ao campo elétrico E.

O medidor de campo elétrico é então composto por dois discos: estator e o rotor, sendo este o disco girante situado logo acima do estator. Para se encontrar cargas elétricas detectáveis induzidas nos discos, usa-se o rotor para "cortar" o campo elétrico. Como o rotor gira sobre o estator ele expõe o disco fixo ao campo elétrico quando não se encontra sobre ele e isola-o do campo elétrico quando está sobre ele, "cortando" o campo elétrico normal que é estático ou que varia muito lentamente. O medidor de campo elétrico cria um campo elétrico "variável" que irá induzir uma carga elétrica no estator. A magnitude e polaridade da carga serão dependentes da magnitude e polaridade do campo elétrico. Embora a carga induzida contenha a informação da magnitude do campo de interesse, a informação deve ser convertida para uma forma mais usual.

Na Figura 4.5 encontra-se um esquema simplificado de um EFM [11].

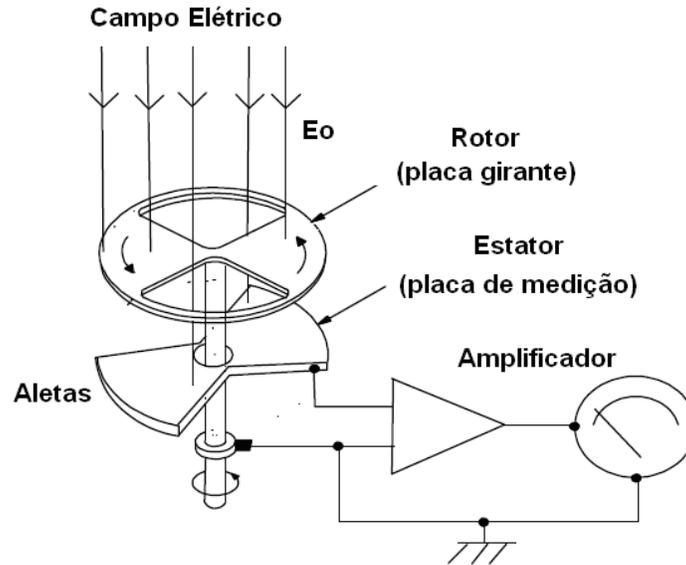


Figura 4.5: Esquema simplificado de um EFM

Para obter o valor do campo elétrico é mais comum realizar a medida na Terra ou próxima dela. O potencial de gradiente na superfície da terra é bastante variável, mas em média possui valor de +200 volts por metro durante o tempo estável e na ausência de nuvens. O campo se torna mais alto em clima tempestuoso porque cargas elétricas estão presentes nas nuvens de tempestade. Portanto, quando um temporal se forma, o campo elétrico, tipicamente de polaridade reversa, aumenta continuamente. Assim que o campo elétrico alcance valor aproximado de 4000 V/mm, a probabilidade de ocorrência de um raio é significativa. As mudanças rápidas deste campo ocorrem durante descargas deste raio e as inversões do campo são comuns, produzindo muitos resultados interessantes. As medidas de campo abaixo das nuvens carregadas revelam características como taxas de carregamento, a polaridade elétrica e as taxas da descarga, dados que podem ser registrados com um sistema de câmeras de vídeo auxiliado de qualquer software. O tempo de recuperação do processo de regeneração elétrica nas nuvens é também uma característica muito interessante que pode ser estudado com a ajuda de um gravador.

## 4.2 Processamento do Sinal

A Figura 4.6 mostra o diagrama de bloco do circuito pelo qual o sinal obtido pelo sensor é processado.

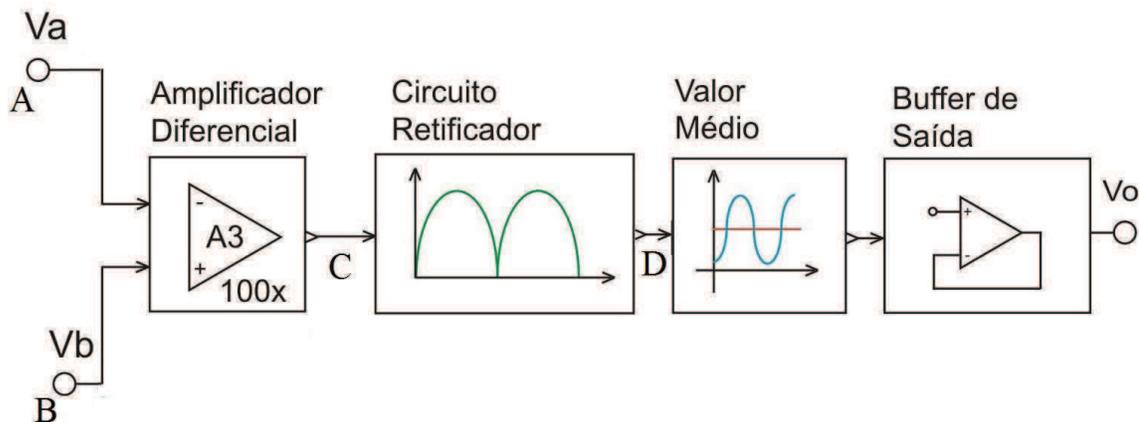


Figura 4.6: Diagrama de blocos do circuito eletrônico

A parte A e a parte B são sinais que virão separadamente dos conjuntos de aletas da placa de medição que ora estão expostos, ora cobertos. A parte A é exposta quando a parte B está coberta, e vice versa. Os sinais de fase da parte A são defasados em  $180^\circ$  da parte B. Cada parte é amplificada separadamente por um amplificador de carga, responsável por induzir cargas que são convertidas em tensão.

O amplificador diferencial amplifica a diferença entre o sinal da parte A e da parte B.

Para se obter um sinal constante na saída  $V_o$ , um circuito retificador de onda completa retifica o sinal para posteriormente obter-se a média deste no bloco seguinte, que é um filtro com frequência de corte bem inferior a da onda retificada. O estágio de retificação é essencial porque realizando a média de uma senóide obteria-se um valor nulo.

O Buffer completa a demodulação e produz uma tensão que é proporcional à amplitude do campo elétrico local.

A forma de onda da corrente induzida no estator irá comportar-se de forma semelhante a uma senóide. A frequência do sinal é igual ao número de vezes por segundo que o campo elétrico é "cortado". O rotor corta o campo elétrico "Y" vezes por segundo (dependendo da velocidade do motor), portanto, o sinal da corrente induzida tem uma frequência de "Y" Hz.

O Medidor de Campo Elétrico converte o sinal de corrente em sinal de tensão, mede o sinal em ponto específico e transporta essa medida de voltagem para o terminal de saída. Se essa conversão for realizada no instante em que o rotor provê a máxima exposição do disco ao campo elétrico, uma série de medidas elétricas será obtida cuja magnitude e polaridade são proporcionais à intensidade do campo elétrico. Se aplicar o sinal de saída à entrada de um conversor analógico-digital, este sinal será processado e apresentado na tela de um

computador como a intensidade de campo elétrico local de instalação do Medidor de Campo Elétrico e, posteriormente, arquivado para novos processamentos ou consulta no futuro.

A Figura 4.7 mostra as formas de onda obtidas em cada bloco do circuito eletrônico.

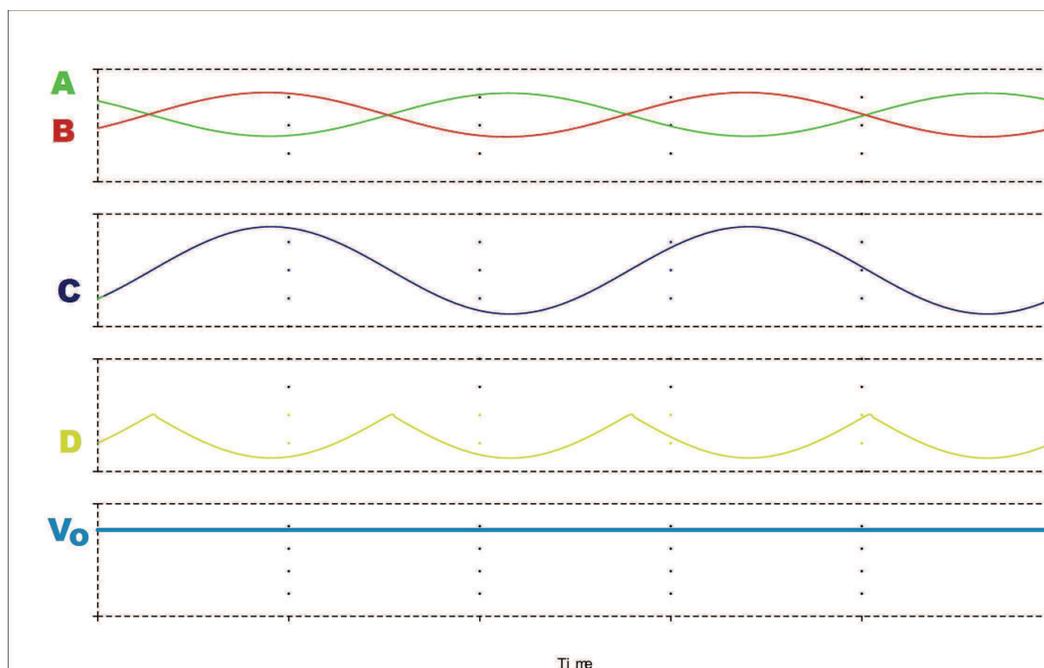


Figura 4.7: Formas de Onda do circuito eletrônico

### 4.3 Aplicação do EFM

Como mencionado no Ítem 1.1, o uso do EFM é bastante comum nas indústrias para proteger circuitos sensíveis contra descargas atmosféricas, que podem ocasionar severos danos aos equipamentos, ao sistema e à um funcionário que eventualmente estiver em campo. Outras aplicações, como alarme ao pessoal que trabalha em campo, alertando para o risco de uma descarga atmosférica; bem como o estudo do comportamento das nuvens antes das tempestades, também podem ser mencionados.

A Figura 4.8 apresenta o funcionamento do sistema de proteção com a utilização do medidor de campo elétrico.

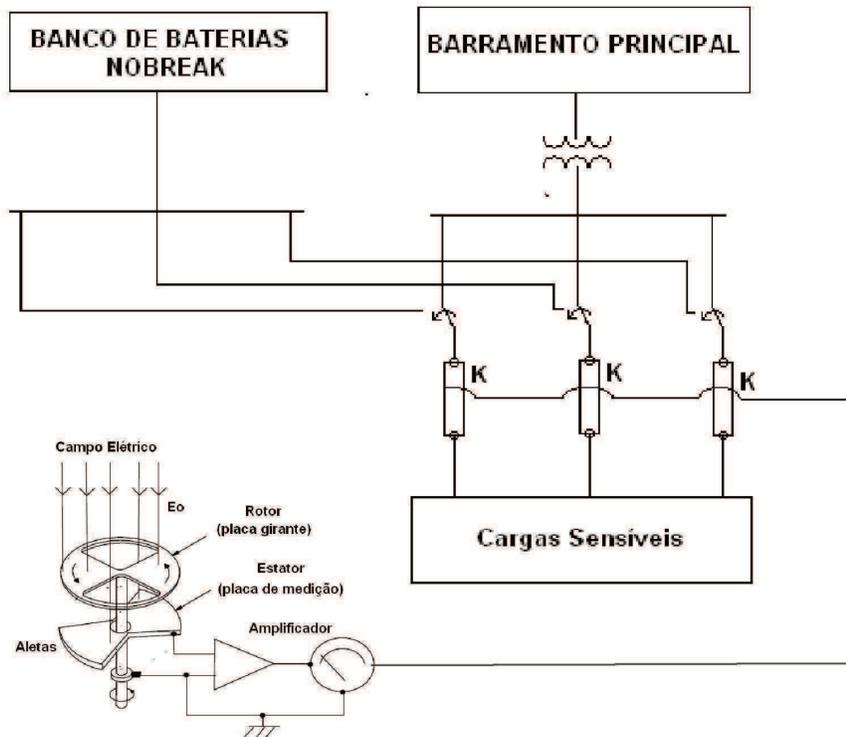


Figura 4.8: Aplicação EFM na Industria

Em funcionamento normal, o barramento principal fornece a alimentação das cargas sensíveis. Quando o medidor detecta um campo elétrico acima de  $4 \text{ KV/mm}$ , o que significa uma condição altamente favorável a uma descarga atmosférica, a saída do sensor envia um sinal que fecha o contato dos contadores, e a alimentação das cargas será através de um banco de baterias. Quando o medidor detectar um campo abaixo de  $3,5 \text{ KV/mm}$ , o sinal enviado pelo sensor fará com que abra os contatos do contator, voltando assim a alimentação das cargas através do barramento principal. Nota-se que em tempo bom ou em tempo ruim as cargas estarão sempre alimentadas de maneira segura e eficiente, extinguindo assim a possibilidade de quaisquer danos às cargas.

#### 4.4 Outros Métodos de Medição do Campo Elétrico

Atualmente, algumas referências apresentam diversos instrumentos utilizados para medição do campo elétrico com diferentes princípios de funcionamento.

Dentre vários pesquisadores sobre equipamentos de detecção de campo elétrico, destaca-se Wahlin [13] e Evans [14].

Segundo Wahlin [13], o campo elétrico pode ser medido através de uma antena conectada a um eletrômetro de medição. Se o eletrômetro for conectado a uma curta antena vertical (Figura 4.9 (a)), as leituras de tensão serão difíceis de calibrar pois a antena se estenderá através de muitos níveis de potencial elétrico. Para solucionar o problema, acrescenta-se uma fonte produtora de íons radioativos tipo alfa na extremidade da antena vertical (Figura 4.9 (b)), aumentando-se assim a condutividade elétrica do ar próximo a extremidade da antena, e como consequência, tem-se uma melhor precisão da medição do potencial elétrico em função da altitude. Um longo fio suspenso sobre o solo em níveis predeterminados, apresentará leituras altamente precisas do potencial atmosférico como função da altitude, conforme apresentado na Figura 4.9 (c).

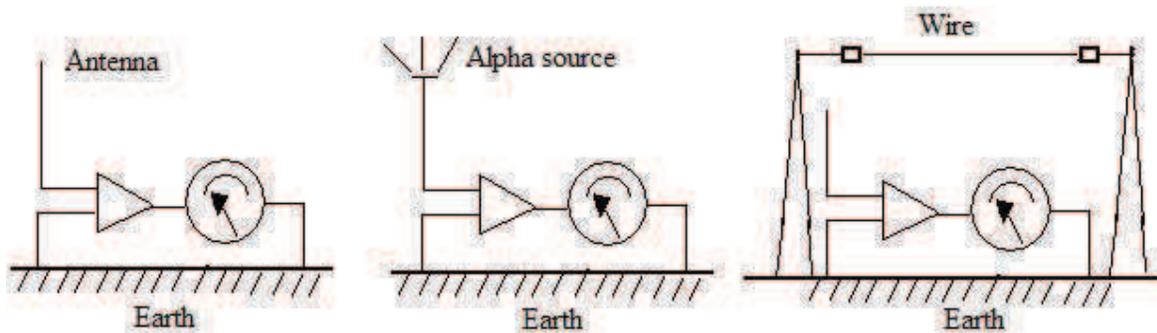


Figura 4.9: Antenas para medição do campo elétrico [13]

Já Evans [14], utilizou antenas rotativas lançadas de pára-quedas no interior das nuvens, conforme apresentado na Figura 4.10. A utilização deste tipo de equipamento o fez destacar dos demais pesquisadores que utilizavam apenas equipamentos fixos em terra. O medidor de campo elétrico desenvolvido por Evans é constituído por dois eletrodos fixos (um superior e um inferior), um cilindro externo também fixo, com janela, e um cilindro interno rotativo, concêntrico com o cilindro externo, também com janela, permitindo que os eletrodos sejam periodicamente expostos ao campo elétrico atmosférico vertical. No período de exposição dos eletrodos os elétrons fluirão na direção contrária às linhas de fluxo do campo elétrico, enquanto que no período em que os eletrodos forem blindados pelo cilindro rotativo, o fluxo de elétrons ocorrerá em sentido contrário ao anterior, gerando na entrada do circuito eletrônico uma tensão elétrica alternada senoidal.

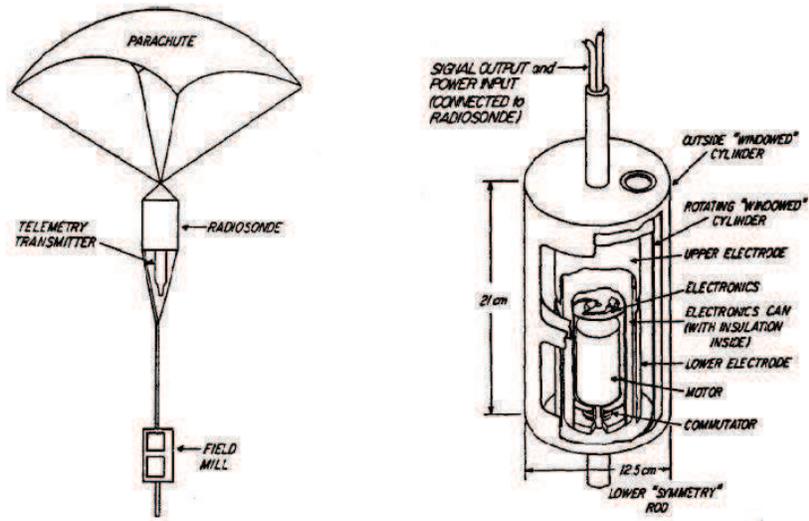


Figura 4.10: Antenas rotativas lançadas de pára-raios no interior das nuvens para medição do campo elétrico [14]



# Capítulo 5

## Construção e Implementação do Sensor de Campo Elétrico (Field Mill, EFM)

### 5.1 Introdução

Neste Capítulo faz-se uma explanação sobre o protótipo construído para medição do campo elétrico. O princípio de funcionamento será evidenciado para que se possa um correto e criterioso conceito de medição do campo elétrico local através deste sensor.

O protótipo foi dividido em duas partes: a parte mecânica, responsável por realizar o acúmulo de cargas alternadas que produzem uma tensão também alternada, referente ao campo elétrico local; e a parte eletrônica, composta por um circuito eletrônico sofisticado que tem a função de tratar o sinal de saída da parte mecânica, tornando-o mais usual para uma correta relação com o campo elétrico incidente.

A descrição da parte mecânica relata as dimensões das placas (girante e de medição), o material utilizado na confecção e o posicionamento destas sobre o eixo do mini motor utilizado. Já na descrição da parte eletrônica os estágios que compõem este circuito são evidenciados, onde uma análise minuciosa de cada estágio será realizada, abrangendo a verificação dos componentes utilizados e o sinal de entrada e saída referente a cada estágio.

A aquisição de dados referente a saída da placa eletrônica será descrita neste capítulo através de um software de monitoramento, responsável por evidenciar em sua tela, um sinal referente ao campo elétrico local.

Neste trabalho, o sensor implementado, foi baseado no princípio e funcionamento do item 4.1.

## 5.2 Sensor de Campo Elétrico (Parte Mecânica)

O sensor de medição de campo elétrico é composto por duas placas: a placa girante (rotor) e a placa fixa, denominada placa de medição (estator). O rotor, de diâmetro igual a 11cm, é composto por quatro aletas (pás) com função específica de expor a placa de medição (situada logo abaixo) de acordo com a sua posição. As placas deste sensor foram feitas em aço-inox e confeccionadas com cortes precisos à laser. A Figura 5.1 mostra as aletas que compõem o rotor e o conjunto de aletas que formam a placa de medição.

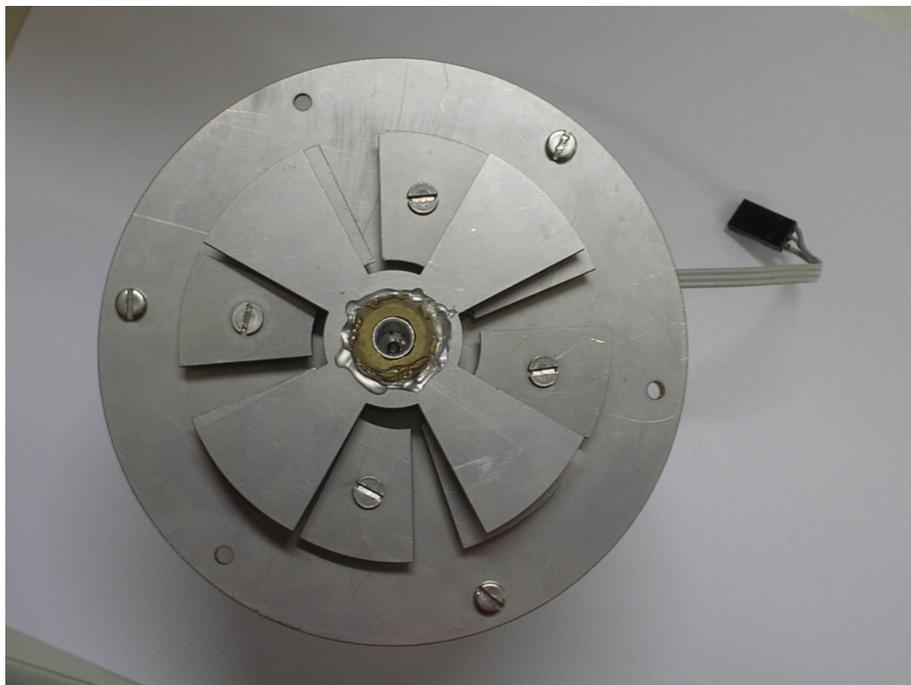


Figura 5.1: Rotor e estator do protótipo EFM

A placa girante e a placa de medição estão montadas sobre o eixo de um mini-motor com velocidade de 12000 rpm, conforme apresentado na Figura 5.2. As distâncias entre as placas nesta figura estão maximizadas para um melhor entendimento da estrutura que compõe o sensor. Apenas o rotor está em contato com o eixo do motor, estando o estator isolado do motor e conseqüentemente da terra. O sinal referente ao campo elétrico local, sem amplificação através de um circuito eletrônico, pode ser medido neste componente de aquisição de dados apresentado na Figura 5.2.

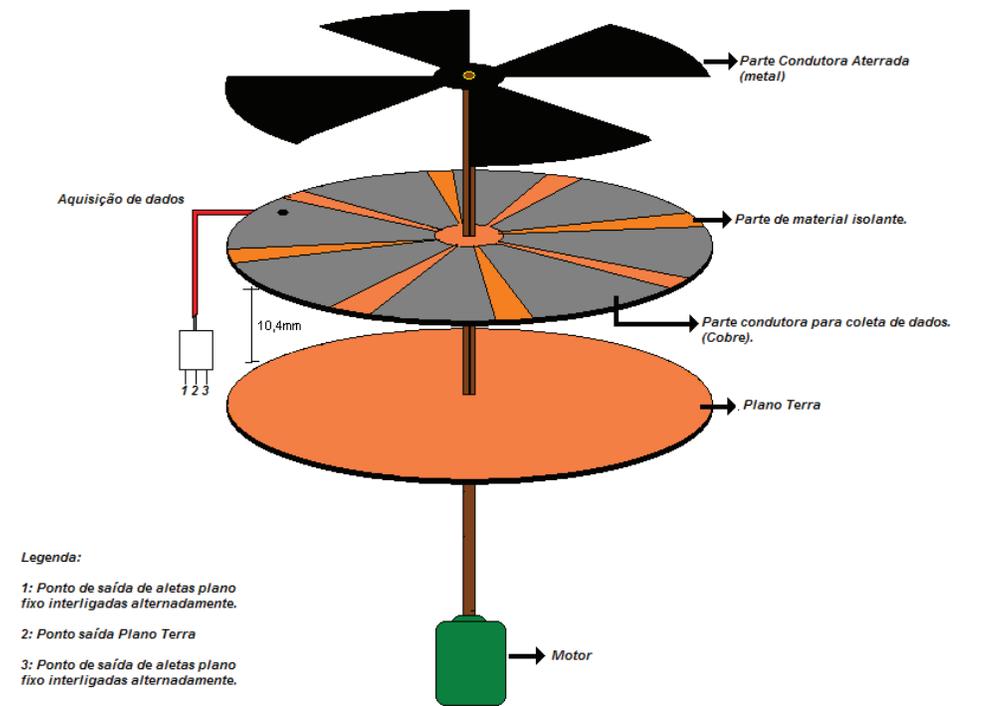


Figura 5.2: Esquema de montagem do EFM

No protótipo construído, o rotor (placa girante) está situado a 1 cm acima do estator (placa de medição), conforme pode ser visto na Figura 5.3.

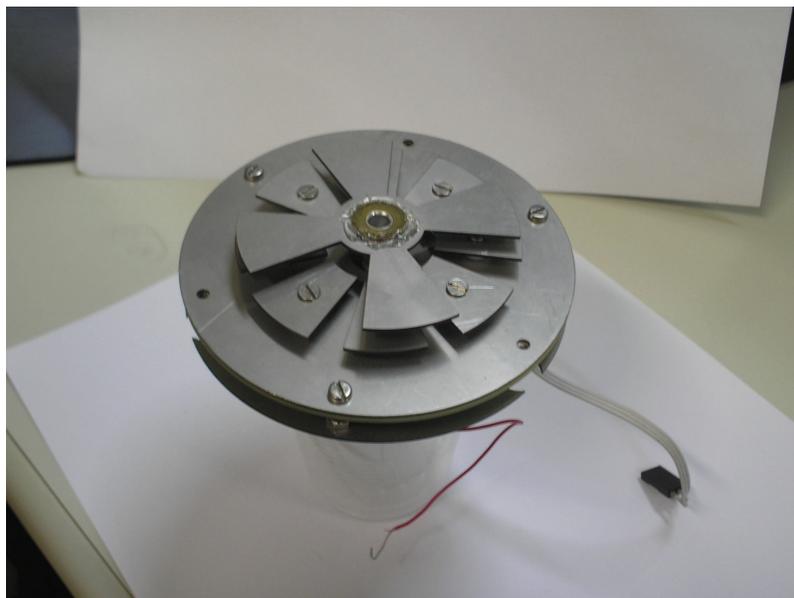


Figura 5.3: EFM - vista lateral

A placa de medição é composta por 8 aletas que estão conectadas através de uma placa de circuito impresso de politetrafluoretino, apresentada na Figura 5.4. Assim, quatro aletas interconectadas pela linha vermelha compõe a Parte A e outras quatro aletas interconectadas pela linha azul compõe a Parte B.

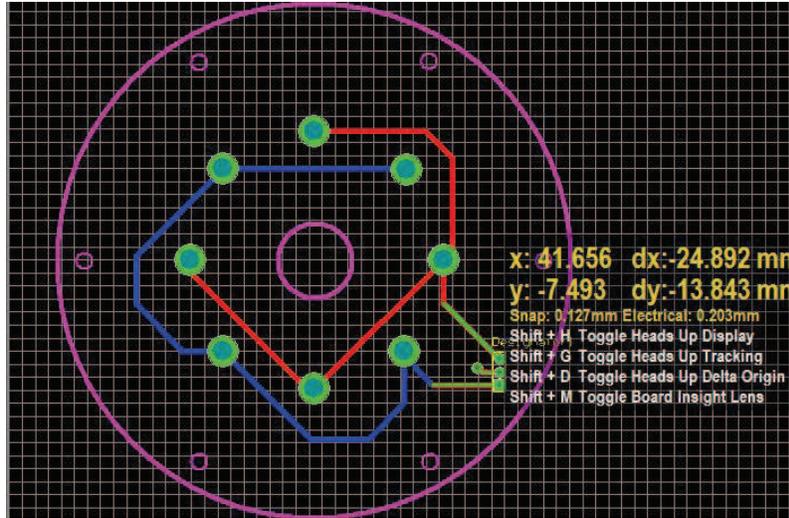


Figura 5.4: Interconecção aletas placa de medição

Quando o rotor sobrepõe a Parte A do estator, o conjunto de aletas que compõe esta parte está então isolado do campo elétrico local. A medida que o rotor gira, a Parte B vai ficando exposta ao campo na mesma proporção que a Parte A vai sendo encoberta pela placa girante. Com o movimento do rotor sobre o estator, o campo elétrico estático de tempo bom é "cortado", induzindo uma carga no estator de magnitude e polaridade referente ao campo elétrico local.

Essa carga induz uma corrente no estator, tendo a forma de onda que se assemelha-se a uma senóide. A frequência deste sinal tem relação direta com o número de vezes por segundo que o campo elétrico é "cortado". O motor (Figura 5.5) responsável pelo giro do rotor tem velocidade de 12000 rpm, portanto a frequência do sinal da corrente induzida é 200 Hz.



Figura 5.5: EFM - vista inferior evidenciando motor

O sinal de saída do sensor é então composto por dois sinais senoidais oriundos da placa de medição: um sinal pertencente a Parte A e outro sinal defasado em  $180^\circ$ , pertencente a Parte B. Esses sinais são amplificados através de um circuito eletrônico e posteriormente convertido para a forma digital. Através de um software, os dados referentes ao campo elétrico onde o sensor está instalado podem ser vistos por um usuário através da tela de um computador.

### 5.3 Circuito Eletrônico

O circuito eletrônico projetado para processar o sinal obtido pelo sensor é baseado no item 4.2, e tem seu diagrama de blocos conforme apresentado na Figura 5.6. Alguns amplificadores operacionais com funções específicas compõem este circuito, portanto alguns conceitos sobre estes componentes devem ser analisados para que se possa obter uma máxima eficiência do sinal na saída, no caso, um valor referente ao campo elétrico vertical atmosférico.

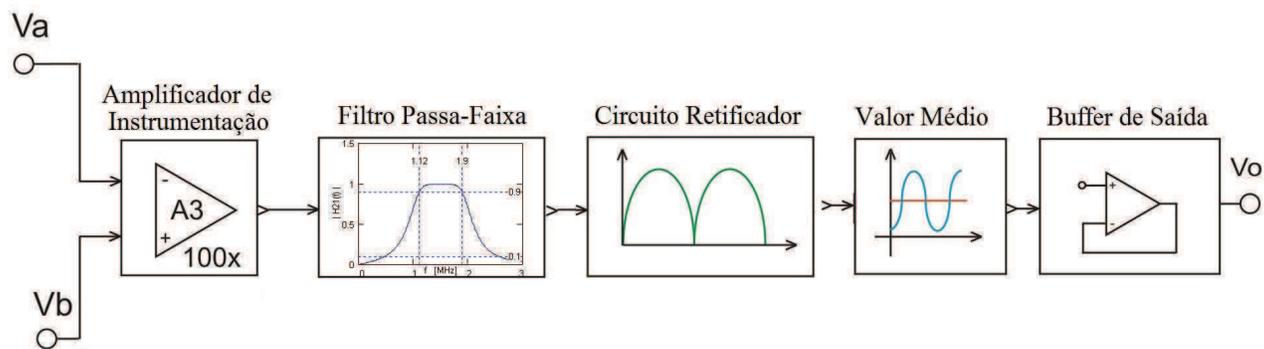


Figura 5.6: Diagrama de bloco do protótipo EFM

A Figura 5.7 apresenta o circuito eletrônico projetado para receber o sinal do protótipo EFM. Cada estágio que compõe este circuito será explicado a seguir.

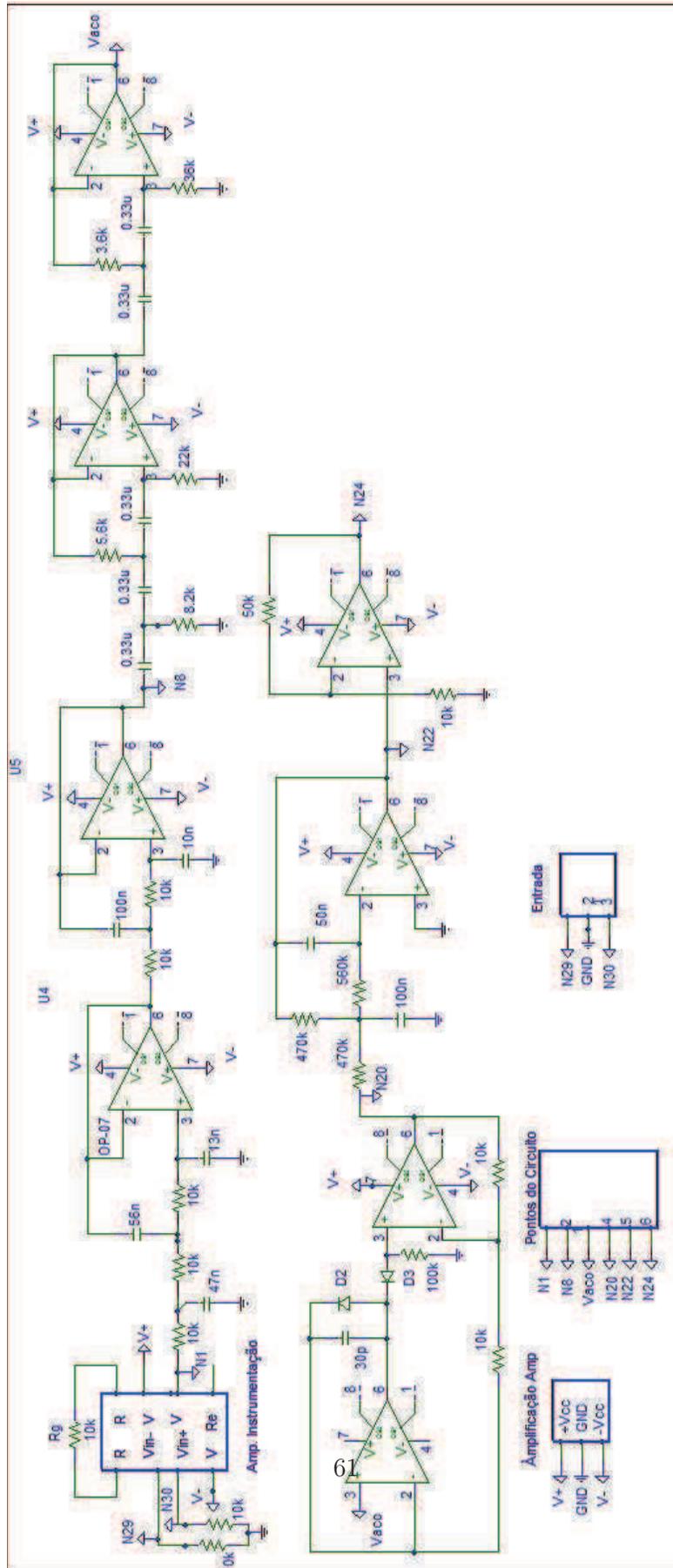


Figura 5.7: Circuito Eletrônico do Protótipo EFM

- *Amplificador de Instrumentação*

O amplificador de instrumentação é o primeiro estágio do circuito sendo responsável pelo processamento do sinal de saída do EFM. O bloco que compõe este estágio é apresentado na Figura 5.8.

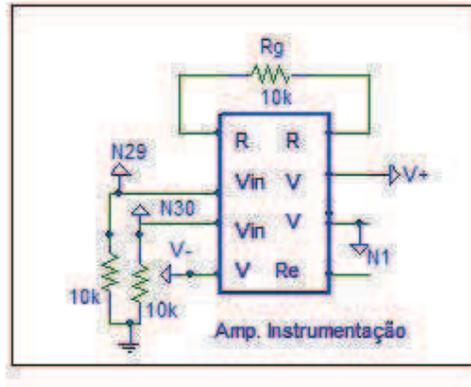


Figura 5.8: Primeiro estágio: amplificador de instrumentação

O amplificador de instrumentação INA 121 é composto internamente por dois estágios, denominados estágio de entrada e estágio de saída. O estágio de entrada é formado por dois amplificadores não inversores, ao passo que o estágio de saída contém um amplificador subtrator.

No estágio de entrada, os sinais oriundos da Parte A e da Parte B serão amplificados separadamente pelos dois amplificadores iniciais. No próximo estágio, a diferença destes sinais será obtida pelo amplificador subtrator, obtendo-se então um único sinal na saída deste amplificador de instrumentação.

Na Figura 5.9, pode-se verificar esses estágios citados que compõem o circuito interno deste componente.

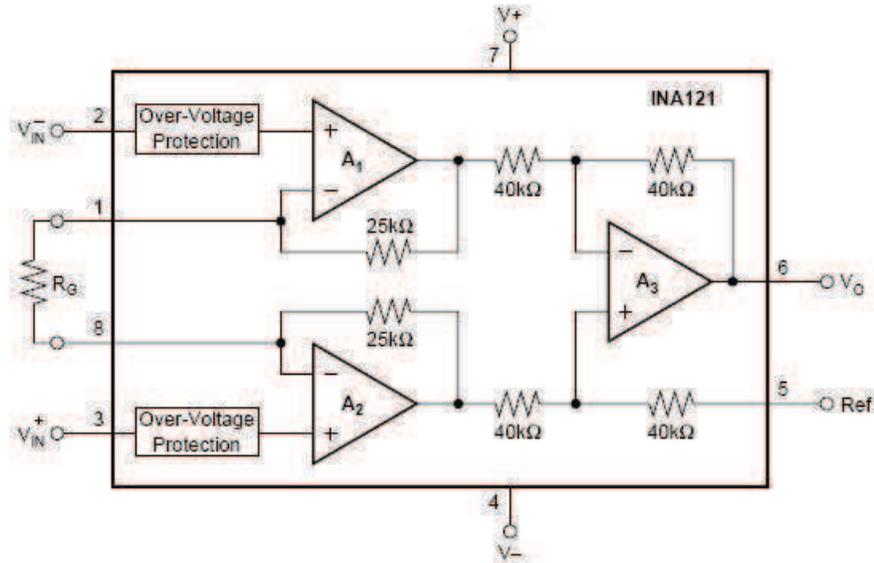


Figura 5.9: Circuito interno do amplificador INA 121 [15]

Segundo o fabricante Burr-Brown [15], os resistores de 10 kΩ conectados entre o terra e as entradas do INA 121, no circuito da Figura 5.8, têm as seguintes funções:

1. Permitir que as correntes contínuas de polarização possam circular entre a terra e as entradas do amplificador de instrumentação. Sem um caminho de retorno para as correntes de polarização, as entradas do amplificador de instrumentação flutuariam para um potencial que levaria os amplificadores operacionais da sua entrada para a saturação, fazendo com que o circuito não funcionasse.
2. Fazer com que a impedância de entrada do circuito eletrônico seja menor do que a reatância da capacitância parasita ( $X_s$ ), tornando a tensão de entrada do circuito independente do valor desta reatância.

Na literatura em geral, representa-se o amplificador de instrumentação conforme mostra a Figura 5.10(a). A Figura 5.10(b) mostra a configuração dos pinos deste componente, e a Figura 5.10(c) apresenta o componente comercializado em dois tipos distintos de encapsulamento: DIP ou SOIC. O INA com encapsulamento DIP, usado no protótipo EFM, é fixado na placa eletrônica através de furo metalizado; já o INA com encapsulamento SOIC é fixado superficialmente na placa.

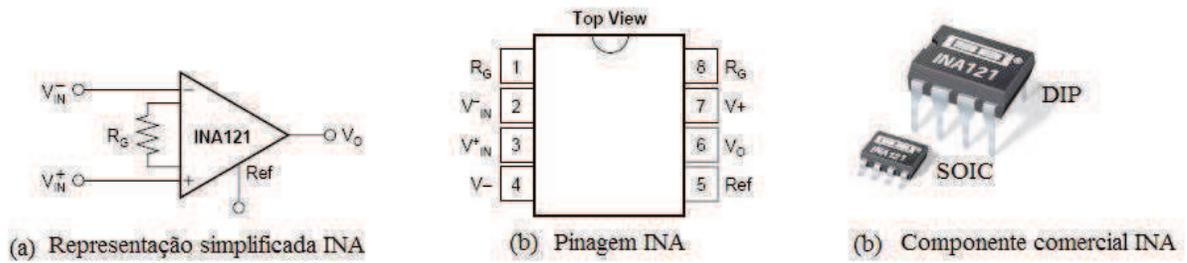


Figura 5.10: Representações do amplificador de instrumentação: INA 121 [15]

O INA 121 é um amplificador de instrumentação de baixa potência que oferece excelente precisão. Seu tamanho é bastante reduzido, tornando-o ideal pra diversos tipos de aplicações em geral. Possui baixa corrente de polarização ( $\pm 4 \text{ pA}$ ) e conseqüentemente uma alta impedância de entrada. O ganho pode ser ajustado de 1 V até 10000 V com um único resistor externo,  $R_G$ . A proteção interna, situada no estágio de entrada, (mostrado na Figura 5.9) pode variar de  $\pm 40 \text{ V}$  sem causar danos.

Outros pontos importantes deste amplificador de instrumentação são: a baixa tensão de offset ( $\pm 200 \text{ } \mu\text{V}$ ), a baixa variação com a temperatura ( $\pm 2 \text{ } \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ), o baixo valor de tensão necessária para alimentação ( $\pm 2.25 \text{ V}$ ,  $\pm 4.5 \text{ V}$ ), podendo ser alimentado com bateria de 5V e a alta rejeição de modo comum (106 dB para  $G = 100$ ), como mostra o gráfico da Figura 5.11. Esse componente é especificado para operar em uma escala industrial de temperatura que varia de  $-40^\circ\text{C}$  a  $+85^\circ\text{C}$ .

A relação entre o valor da tensão de saída e o valor da tensão de entrada, denominado ganho, é ilustrada pela equação:

$$A_v = \frac{V_0}{V_{in}} = 1 + \frac{50k}{R_G} \quad (5.1)$$

O termo  $50 \text{ k}\Omega$  da Equação 5.1 é originado dos resistores ligados aos amplificadores do estágio de entrada, conforme pode ser visto na Figura 5.9.

O resistor  $R_G$ , colocado na entrada do amplificador e presente na Equação 5.1 permite a realização da calibração do sensor de campo elétrico.

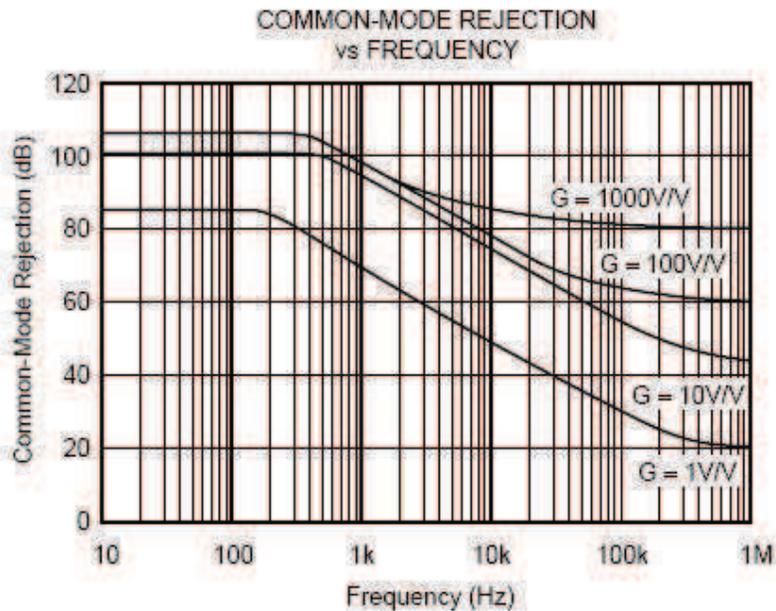


Figura 5.11: Gráfico de rejeição de modo comum do INA 121 [15]

- *Filtro*

O segundo estágio do circuito eletrônico é composto por um filtro ativo passa-faixa de quinta ordem com características de Butterworth. Os filtros ativos são mais utilizados do que os filtros passivos porque neles não se utilizam indutores, tornando-se então mais simples para projetar por serem baseados apenas em amplificadores operacionais. Neste estágio o sinal de saída do amplificador de instrumentação é filtrado, eliminando assim possíveis ruídos que se somam ao sinal de saída do sensor.

A associação dos filtros passa-baixas e passa-altas determina a formação de um filtro passa-faixa. A Figura 5.12 e a Figura 5.13 apresentam filtros ativos de Butterworth passa-baixas e passa-altas, respectivamente. Esses circuitos são normalizados e serviram de referência para elaboração do filtro contido na placa eletrônica do EFM.

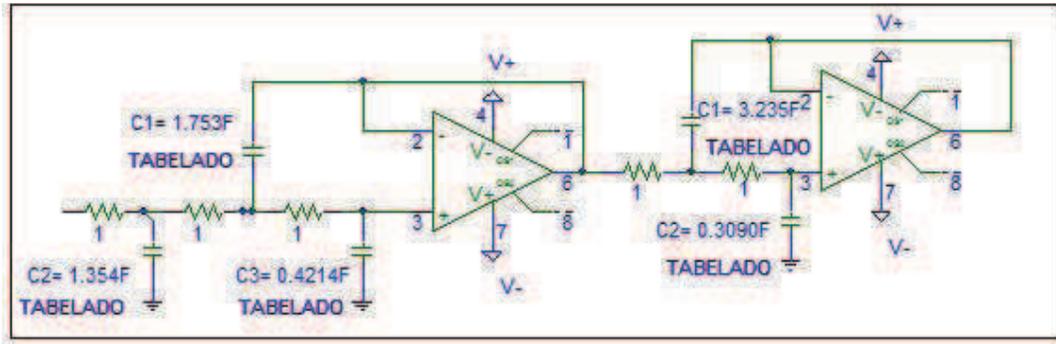


Figura 5.12: Filtro ativo passa-baixas normalizado [16]

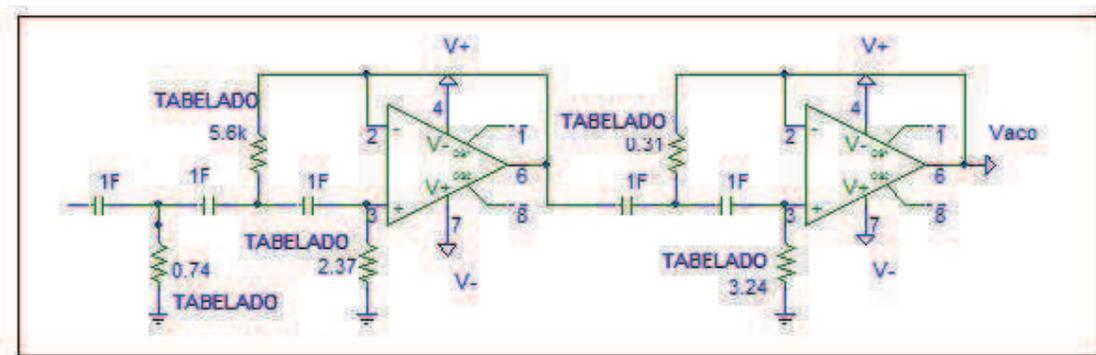


Figura 5.13: Filtro ativo passa-altas normalizado [16]

Para projetar o filtro real deve-se calcular os valores dos capacitores e dos resistores contidos no circuito normalizado, conforme a Equação 5.3 e a Equação 5.2.

$$C = \frac{C_{(Tabelado)}}{Z \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{3dB}} \quad (5.2)$$

$$R = Z \cdot R_{(Tabelado)} \quad (5.3)$$

Onde:

$C_{(tabelado)}$  = Valores encontrados na Tabela 5.1.

$R_{tabelado} = 1$ ;

$Z = 10 \text{ k}\Omega$ ;

$f_{3dB} = 500 \text{ Hz}$ , valor de projeto do filtro.

O valor de  $C_{(Tabelado)}$  são encontrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valores dos componentes para filtro ativo passa-baixas de Butterworth [16]

Ordem (n)	Número de seções	Seções	C1	C2	C3
2	1	2 pólos	1,414	0,7071	
3	1	3 pólos	3,546	1,392	0,2024
4	2	2 pólos	1,082	0,9241	
5	2	3 pólos	1,753	1,354	0,4214
		2 pólos	3,235	0,309	
6	3	2 pólos	1,414	0,7071	
		3 pólos	1,531	1,336	0,4885

Os valores reais calculados para os capacitores do filtro ativo passa-baixas para seções de 3 polos e 2 polos, são respectivamente:

$$C_{1 \rightarrow 3 \text{ polos}} = 56 \text{ nF}$$

$$C_{2 \rightarrow 3 \text{ polos}} = 47 \text{ nF}$$

$$C_{3 \rightarrow 3 \text{ polos}} = 13 \text{ nF}$$

$$C_{1 \rightarrow 2 \text{ polos}} = 100 \text{ nF}$$

$$C_{2 \rightarrow 2 \text{ polos}} = 10 \text{ nF}$$

O filtro passa-baixas, obtido através do circuito da Figura 5.12 e composto pelos componentes calculados acima, pode ser verificado conforme mostra a Figura 5.14.

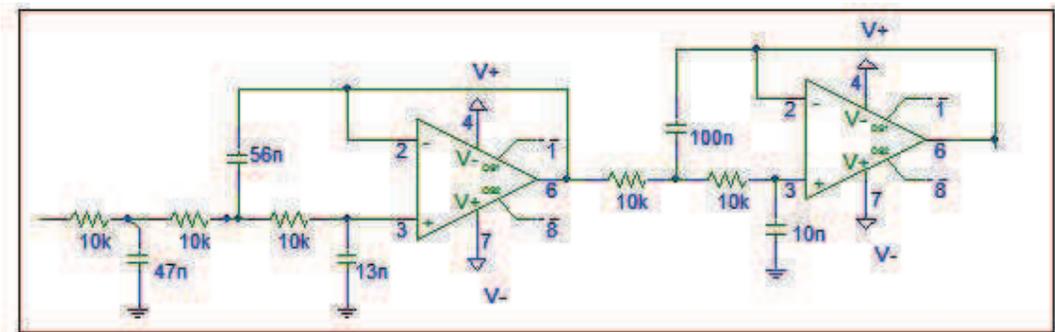


Figura 5.14: Filtro real passa-baixas

Para o projeto do filtro passa-altas utiliza-se novamente a Equação 5.2 e Equação 5.3, onde apenas alguns componentes possuem valores distintos, como:

$$C_{(tabelado)} = 1 \text{ (visto no circuito normalizado);}$$

$$f_{3dB} = 50 \text{ Hz, valor de projeto do filtro.}$$

$$R_{tabelado} = \text{respectivos valores apresentados no circuito normalizado da Figura 5.13.}$$

Os capacitores utilizados neste filtro possuem então um valor igual a  $0.33 \mu F$ .  
 O filtro passa-baixas, obtido através do circuito da Figura 5.13, é apresentado na Figura 5.15.

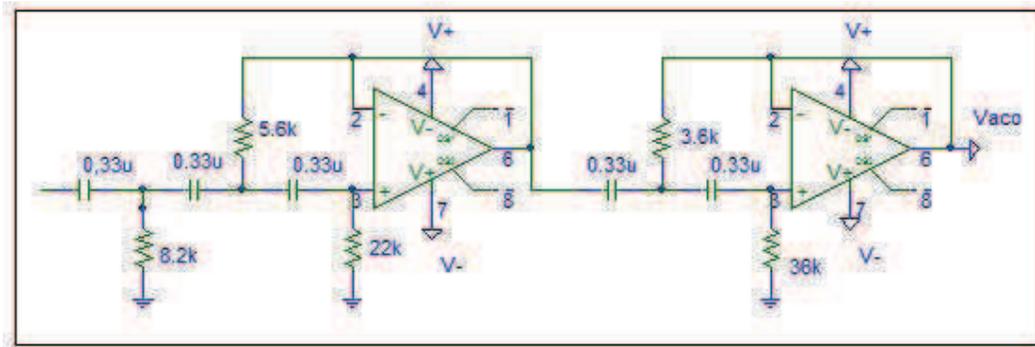


Figura 5.15: Filtro real passa-altas

O filtro passa-faixa contido no segundo estágio do circuito eletrônico é formado então, pela associação do circuito passa-baixas da Figura 5.14 e pelo circuito passa-altas da Figura 5.15. Este filtro, apresentado na Figura 5.16, permite a passagem de sinais que estão entre as frequências de 50 até 500 Hz, eliminando assim distintos ruídos que compõe o sinal de saída do sensor EFM.

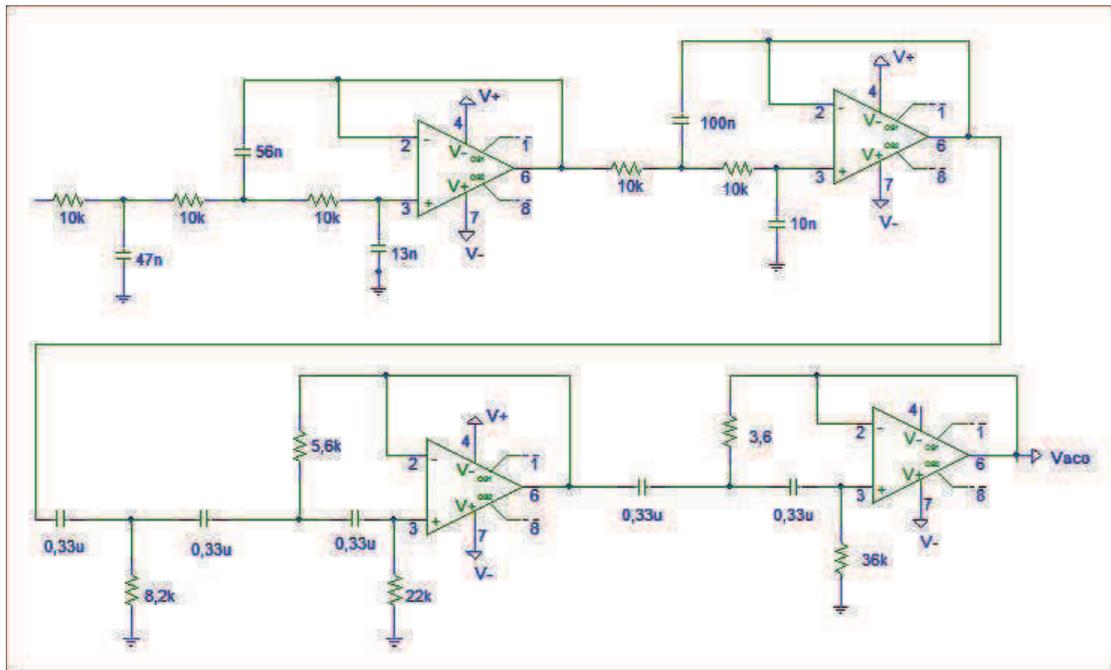


Figura 5.16: Segundo estágio: filtro passa-faixa

- *Retificador*

O terceiro estágio do circuito eletrônico é formado por um retificador de precisão de onda completa, apresentado na Figura 5.17. O funcionamento deste retificador é simples e será apresentado a seguir.

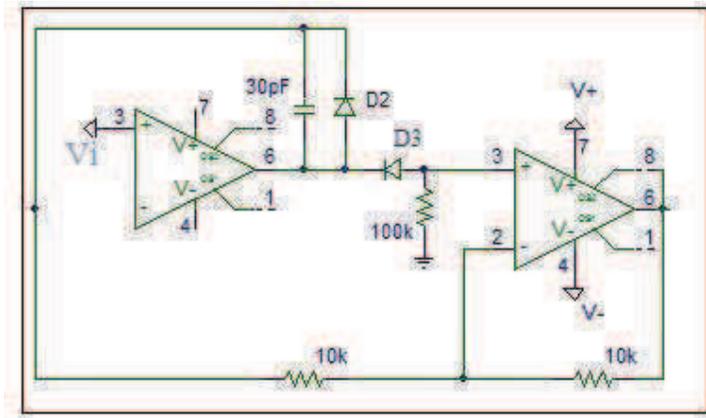


Figura 5.17: Terceiro estágio: Retificador de precisão de onda completa

Se o sinal de entrada ( $V_i$ ) deste bloco retificador for positivo, o diodo  $D_3$  da Figura 5.17 estará "cortado" (ou não conduzirá), como consequência este sinal será aplicado na entrada inversora do segundo amplificador operacional e terá como saída um valor igual a  $-V_i$ , conforme pode ser visto na Figura 5.18.

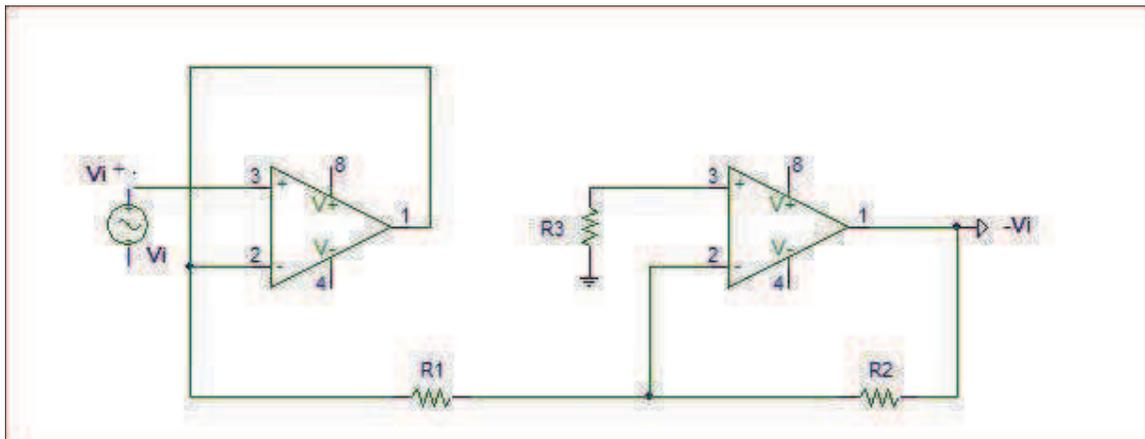


Figura 5.18: Circuito para sinal de entrada positivo

Se o sinal de entrada ( $V_i$ ) deste bloco retificador for negativo, o Diodo  $D_2$  da Figura 5.17 estará cortado, portanto o sinal de saída do primeiro amplificador estará aplicado na entrada

positiva do segundo amplificador, e o sinal de saída será portanto  $-V_i$ . Como o segundo amplificador tem uma realimentação negativa, neste caso, estará funcionando como um buffer. A Figura 5.19 esboça o circuito que completa essa explicação.

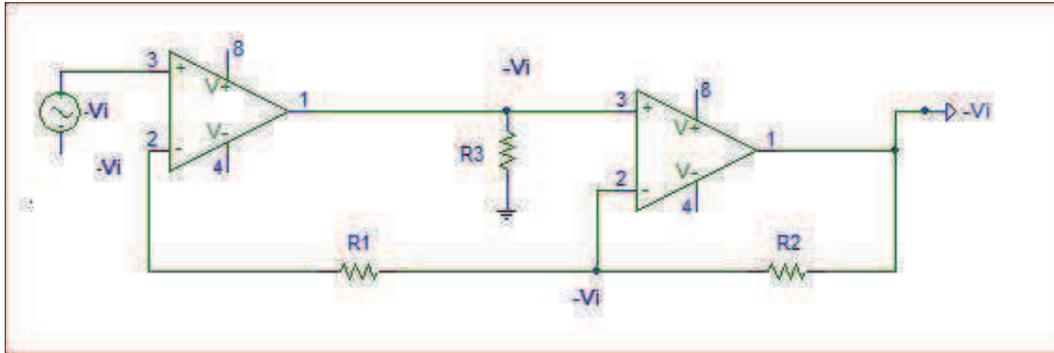


Figura 5.19: Circuito para sinal de entrada negativo

Os resistores  $R_1$  e  $R_2$  das Figuras 5.18 e 5.19 podem assumir quaisquer valores, considerando apenas que tenham valores iguais entre si, para que o ganho seja unitário. O resistor  $R_3$  é responsável pela polarização do segundo amplificador, pois com este resistor obtém-se uma corrente (polarização) quando o diodo  $D_3$  está conduzindo.

O capacitor de valor igual a 30 pF, da Figura 5.17, tem a função específica de filtrar altas frequências do sinal de entrada deste estágio.

O estágio de retificação do sinal é de suma importância para a obtenção de um sinal de saída CC proporcional ao campo elétrico local, porque realizando a média de um sinal senoidal, referente ao sinal de saída do filtro passa-faixa, obter-se-ia um valor nulo.

- Média e Buffer

No quarto estágio, denominado média, realiza-se a média do sinal retificado, obtendo-se um valor CC referente ao sinal de saída do sensor acrescido de um ganho do amplificador de instrumentação, pertencente ao primeiro estágio do circuito eletrônico.

A Figura 5.20 apresenta os componentes eletrônicos e suas interconexões que compoem este quarto estágio.

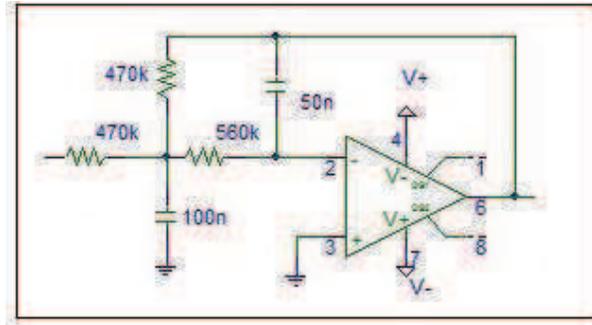


Figura 5.20: Quarto estágio: média do sinal retificado

O quinto estágio é constituído por um buffer de saída, apresentado na Figura 5.21. Sua função é dar um último ganho no sinal antes de apresentá-lo como uma tensão proporcional à amplitude do campo elétrico local.

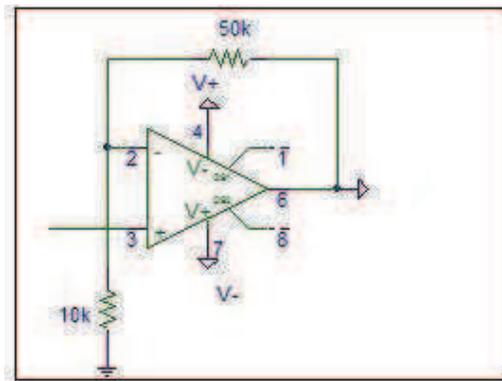


Figura 5.21: Quinto estágio: buffer de saída

O ganho adicionado ao sinal, neste estágio, é calculado pela seguinte expressão:

$$G = \frac{50k}{10k} = 5 \quad (5.4)$$

Nota-se que o circuito eletrônico, composto pelos cinco estágios, possui duas opções para variação do ganho, que são: no primeiro estágio, denominado amplificador de instrumentação e no quinto estágio, denominado buffer de saída.

### 5.3.1 Formas de Onda do Sinal nos Estágios

- Simulação

O circuito eletrônico do EFM, simulado através do software Pspice, gerou as formas de onda que podem ser conferidas através da Figura 5.22.

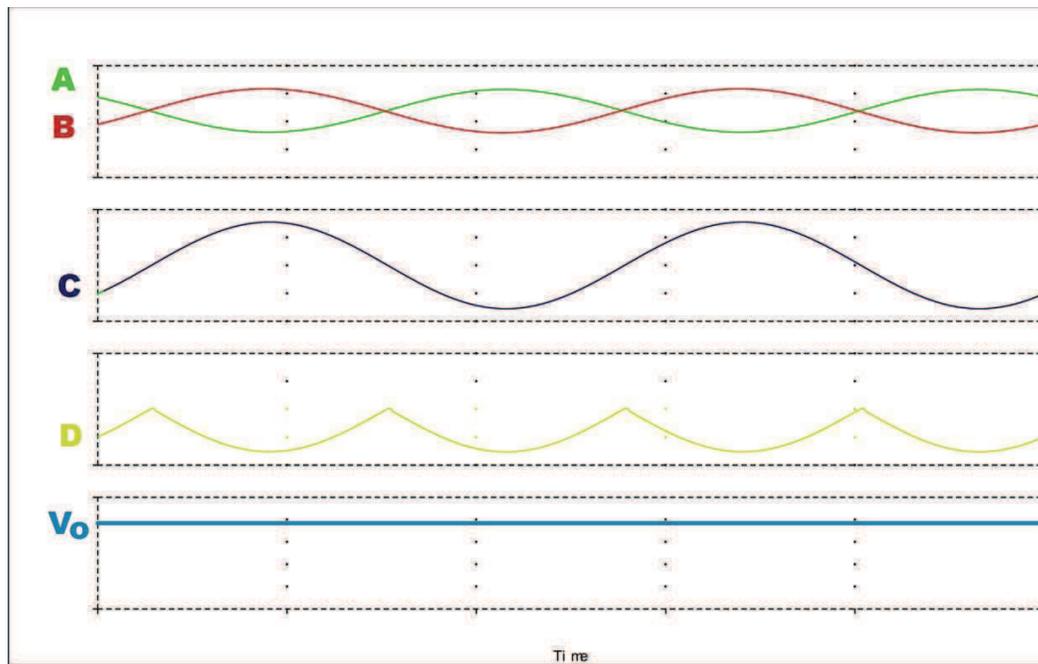


Figura 5.22: Formas de onda do circuito, através da simulação

Os sinais A e B, respectivamente de cor verde e vermelho, representam os sinais adquiridos do conjunto de aletas que compõe a Parte A e do conjunto de aletas que compõe a Parte B, pertencentes à placa de medição.

O sinal C representa a subtração dos sinais A e B, realizada pelo amplificador de instrumentação, como visto no Ítem 5.3. Já o sinal D representa a retificação do sinal de saída do amplificador de instrumentação. E para finalizar, o sinal  $V_0$  representa a média do sinal de saída do retificador.

Nota-se, nesta simulação, a ausência das formas de onda do filtro passa-faixa e do buffer de saída. A não apresentação desses sinais é simples de justificar: para o caso do filtro, na simulação não encontram-se os ruídos externos que o ambiente produz, ao passo que o buffer apenas adiciona um ganho no sinal; portanto esses estágios foram elaborados atendendo

as necessidades após as simulações. As formas de onda da Figura 5.22 (simulação) são semelhantes às da Figura 4.7 originárias do circuito eletrônico.

- Implementação

O circuito eletrônico do EFM, construído em uma placa de circuito impresso, gerou em cada estágio, as formas de onda que podem ser vistas nas Figuras: 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27. Neste primeiro teste da placa eletrônica, foi utilizado uma fonte geradora de sinais da ordem de mV, simulando o sinal de saída da placa de medição do EFM. Conforme dito anteriormente no Ítem 4.2, o sinal de saída da placa de medição do EFM é composto por dois sinais senoidais defasados em  $180^\circ$ , entretanto, neste primeiro teste, devido à limitação do gerador de sinal para gerar duas formas de onda simétricas com esta defasagem, adotou-se como sinal de saída do sensor, e conseqüentemente sinal aplicado pelo gerador, apenas uma forma de onda representando um conjunto de aletas da placa de medição. No próximo teste será testado o sensor EFM, composto por sua parte mecânica e placa eletrônica, onde os sinais da Parte A e da Parte B serão reais adquiridos do campo elétrico incidente. O sinal de saída do sensor é semelhante ao de uma senóide acrescida de ruídos, como mostra a Figura 5.23.

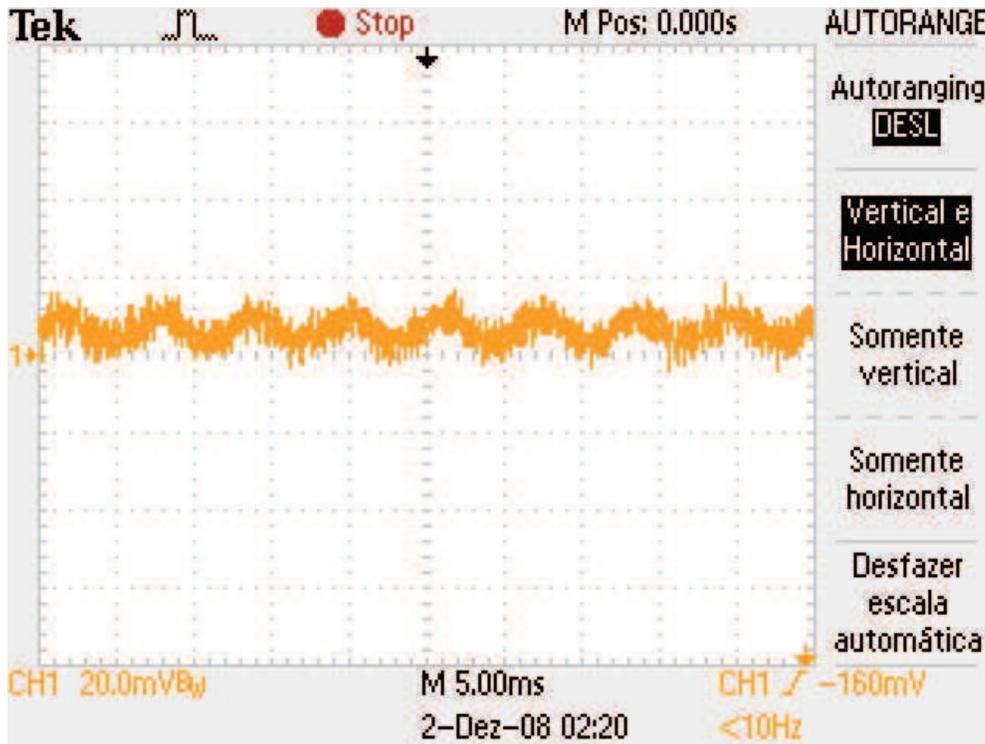


Figura 5.23: Sinal de saída do sensor

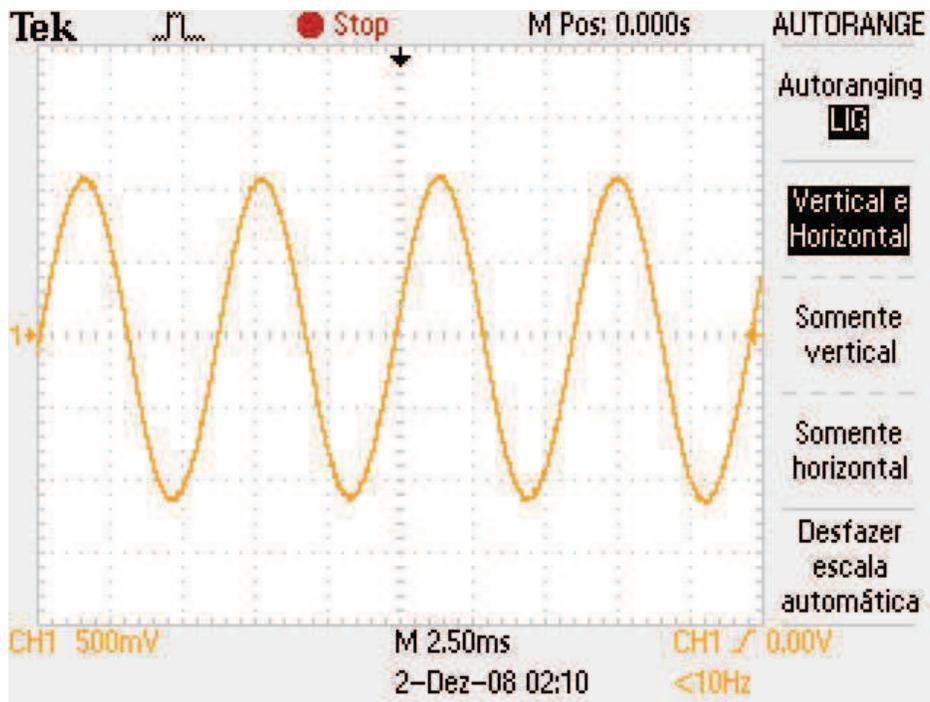


Figura 5.24: Sinal de saída do amplificador de instrumentação

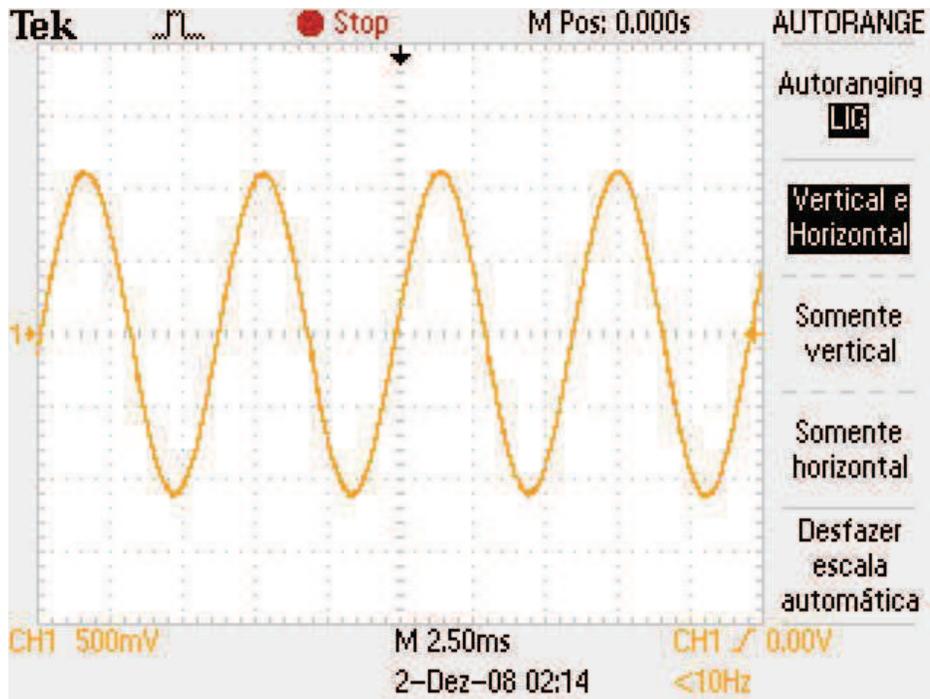


Figura 5.25: Sinal de saída do filtro passa-faixa

Nota-se que o sinal de saída do amplificador de instrumentação INA 121 e o sinal de saída do filtro passa-faixa são semelhantes. Isso comprova que o próprio INA 121 possui bom tratamento do sinal, eliminando os ruídos que por ventura estiverem contidos no sinal de saída do sensor. Contudo isso não minimiza a importância do filtro contido neste circuito eletrônico, pois este pode atuar de maneira eficiente quando o sensor estiver em campo, adquirindo assim, outros ruídos externos.

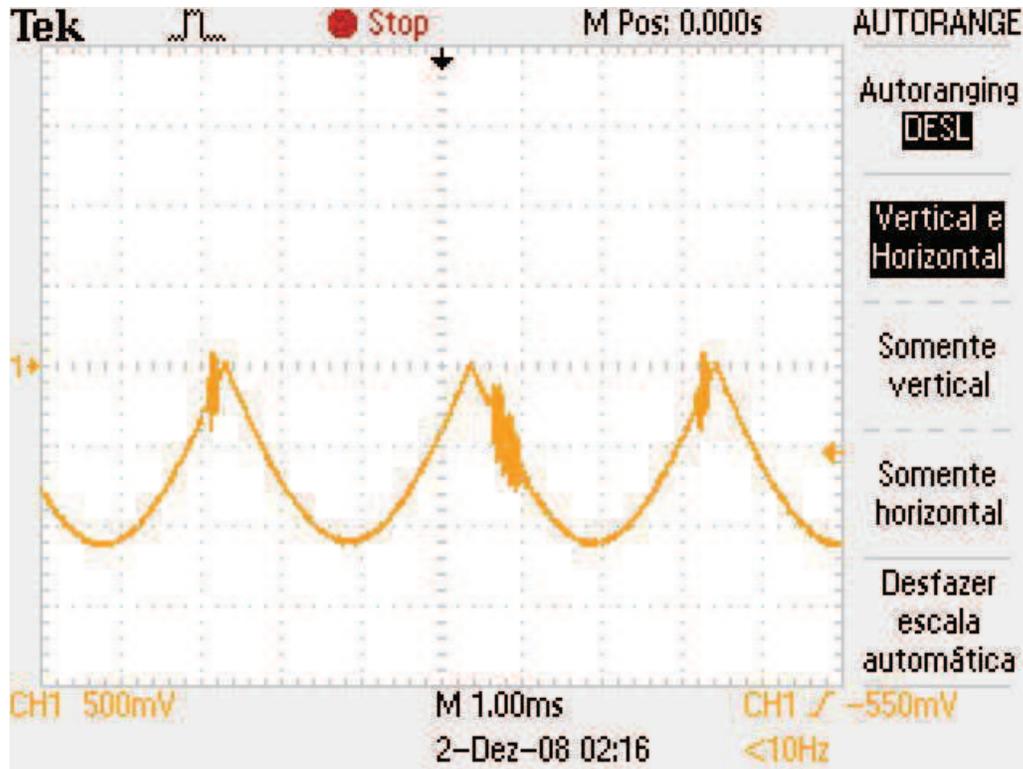


Figura 5.26: Sinal de saída do retificador

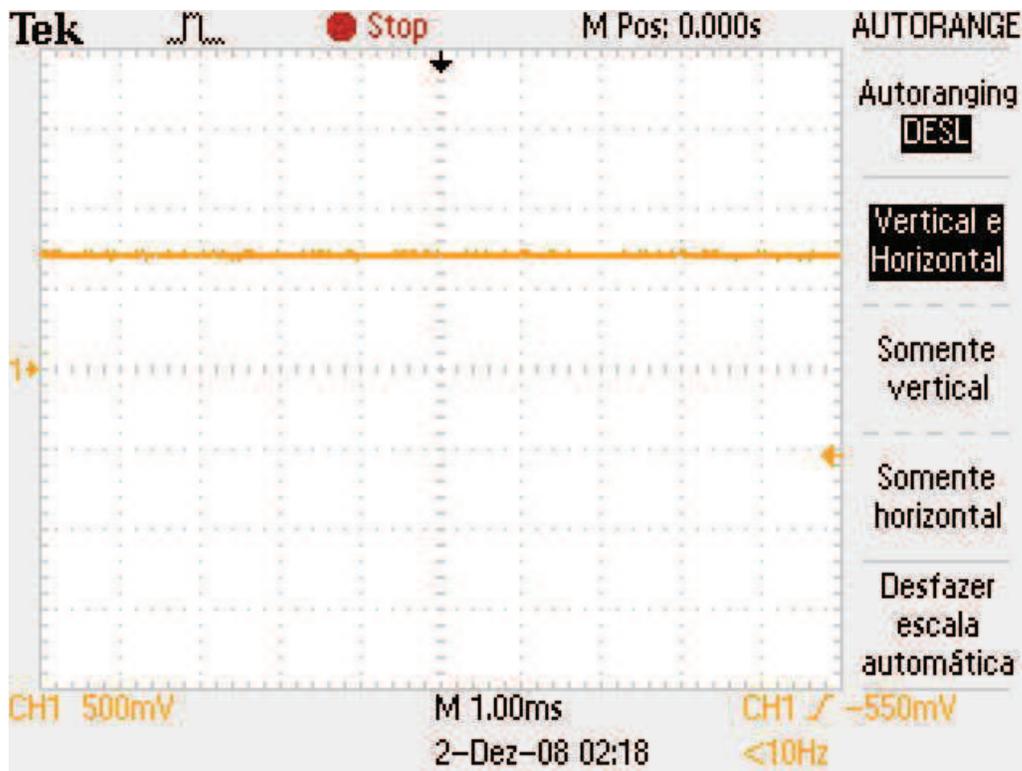


Figura 5.27: Sinal de saída do estágio que compõe a média

## 5.4 Apresentação dos Dados ao Usuário

O sinal de saída da placa eletrônica é uma tensão proporcional à amplitude do campo elétrico local, contudo, deve-se converter esse sinal à uma forma mais usual para visualização do usuário.

Aplicando o sinal de saída da placa eletrônica à entrada de um conversor analógico-digital, este sinal será processado e poderá ser apresentado na tela de um computador, criando uma interface com o usuário. O sinal apresentado nesta tela é referente à intensidade de campo elétrico do local de instalação do sensor.

Para converter o sinal de saída do sensor de analógico para digital, usou-se um dispositivo de aquisição de dados da National Instruments, denominado DAQ 6008. O DAQ 6008 recebe o sinal adquirido pelo sensor em campo, realiza o tratamento deste sinal através de seu sistema interno de processamento de dados e posteriormente envia este sinal, agora digital, à interface criada para o monitoramento, através do programa originalmente voltado para aquisição de dados, LabVIEW, também da National Instruments. O DAQ 6008 possui as seguintes entradas: 8 entradas analógicas e 8 entradas digitais; e uma saída USB para comunicação de

dados com o computador. Este dispositivo pode ser visto na Figura 5.28.



Figura 5.28: Dispositivo de aquisição de dados

O programa LabVIEW possui duas visualizações, denominadas painel frontal ou interface, e diagrama de blocos. O painel corresponde à interface onde o usuário visualiza os dados de leitura do sensor, já o diagrama de blocos é o código onde se programa o painel frontal, programação esta feita através de blocos.

Para apresentar a leitura de uma tensão analógica através de um sensor, em uma interface, deve-se proceder da seguinte forma:

1. Abrir o programa LabVIEW, obtendo-se assim um novo diagrama de bloco e um painel frontal em branco.
2. A aquisição de dados se faz através do diagrama de bloco, onde através de um clique com o botão direito dá-se início a uma nova janela composta por ícones contendo algumas funções. Com um clique no ícone *Input*, uma nova janela se abre, onde pode ser verificado o DAQ Assistant, neste caso, o dispositivo DAQ 6008, utilizado no protótipo. Deve-se arrastar este ícone que representa este DAQ instalando-o no diagrama de bloco. A Figura 5.29 apresenta o procedimento deste item.

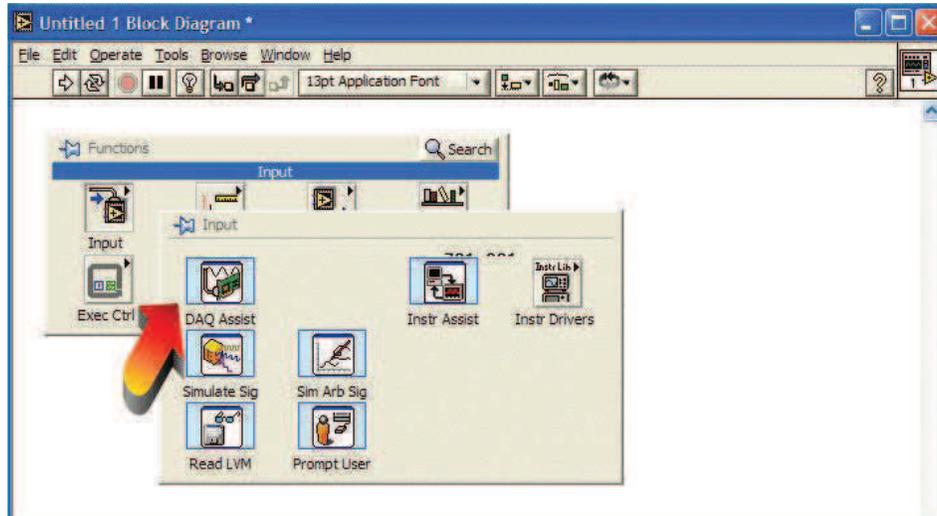


Figura 5.29: Dispositivo de aquisição de dados no diagrama de bloco

3. Após inserir o DAQ no diagrama de bloco, uma janela referente ao DAQ Assistant estará disponível para algumas configurações como: escolher o tipo de entrada, no caso do protótipo EFM uma entrada analógica (analog input); e posteriormente o tipo desta entrada, como pode ser visto nas Figuras 5.30 e 5.31, respectivamente.

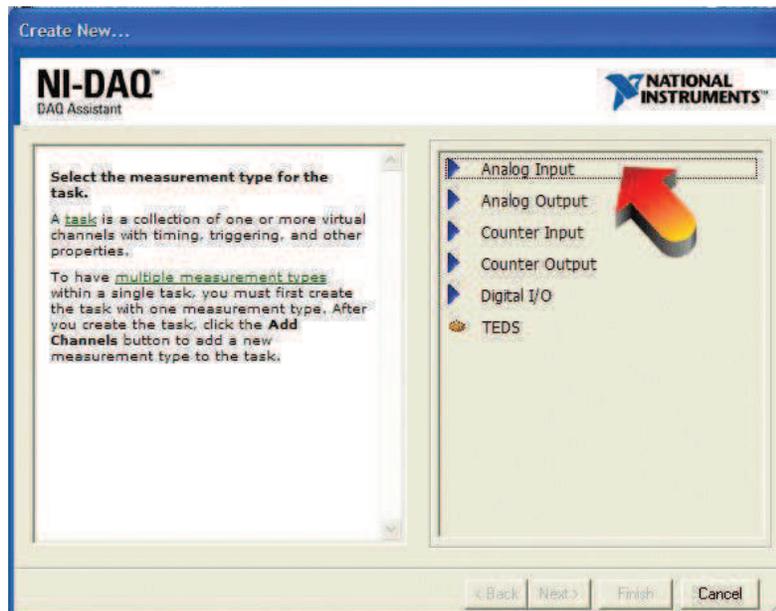


Figura 5.30: Configuração da entrada

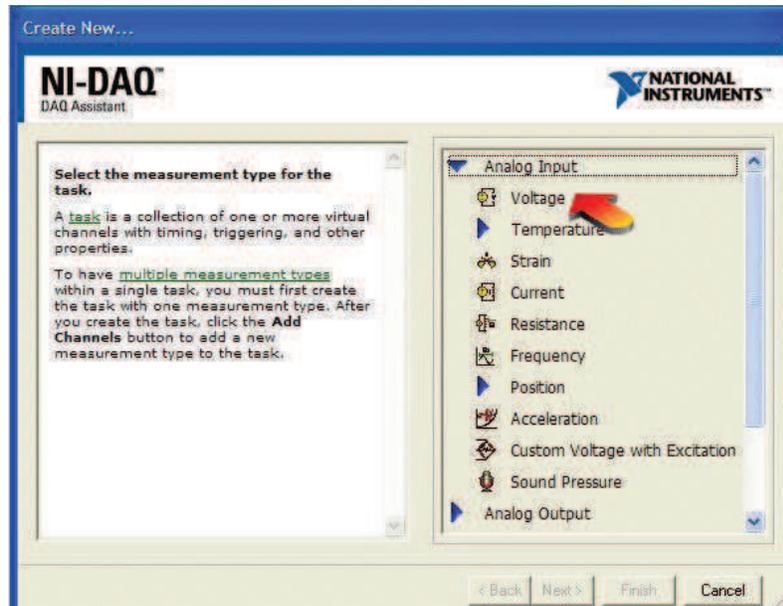


Figura 5.31: Configuração do tipo de entrada

4. Nesta etapa deve-se escolher qual entrada física do dispositivo DAQ 6008 irá receber o sinal oriundo da placa eletrônica, conforme Figura 5.32.

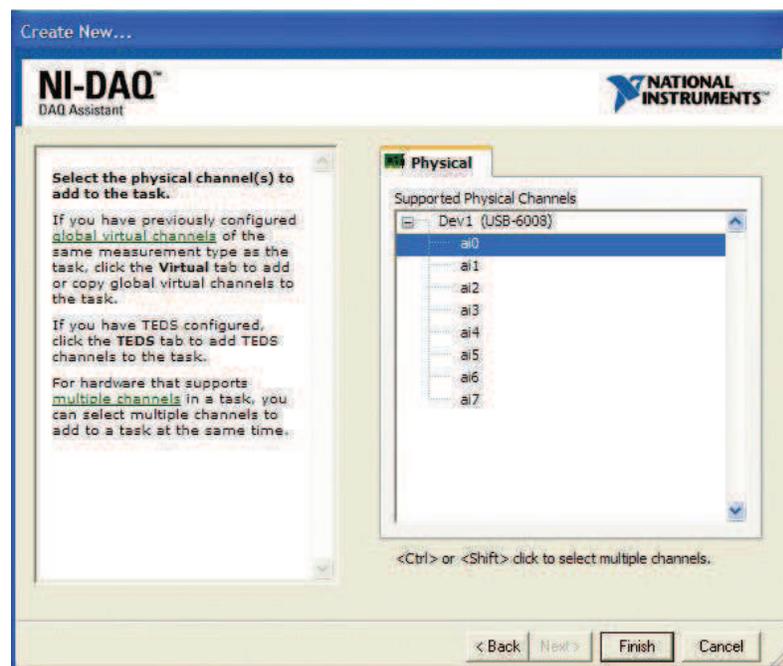


Figura 5.32: Escolha da entrada física do DAQ para receber o sinal da placa eletrônica

5. No painel frontal deve-se inserir um gráfico, sendo este responsável pela leitura dos dados do dispositivo de aquisição, como mostra a Figura 5.33. Após esse procedimento, pode-se notar que no diagrama de bloco um ícone referente ao gráfico está presente, bastando apenas conectar a saída do DAQ à entrada do ícone referente ao gráfico (Figura 5.34).

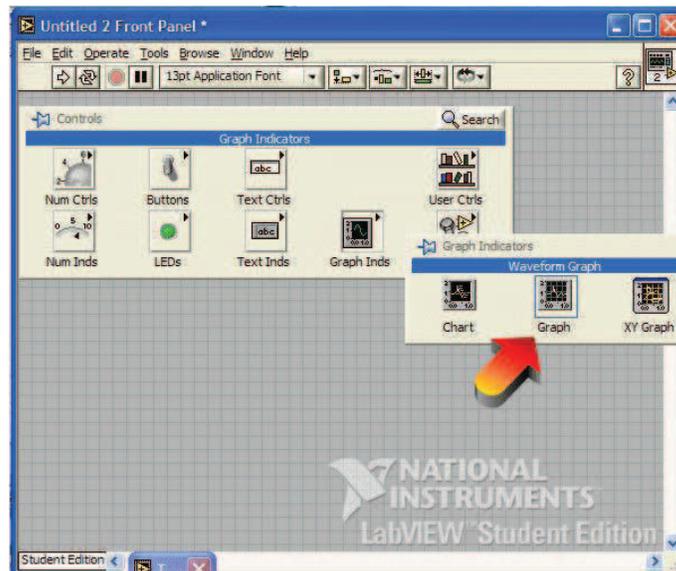


Figura 5.33: Criação do gráfico para leitura do sinal

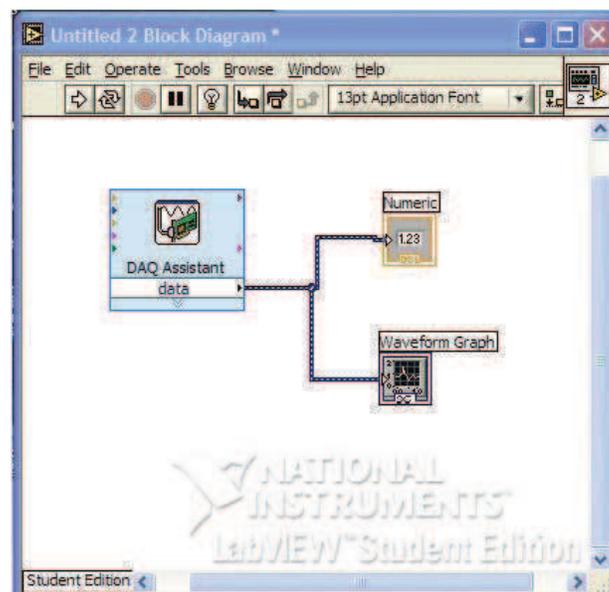


Figura 5.34: Diagrama de blocos com a elaboração do gráfico

6. A interface com o usuário para apresentação do sinal, criada pelos procedimentos acima, será como mostra a Figura 5.35.

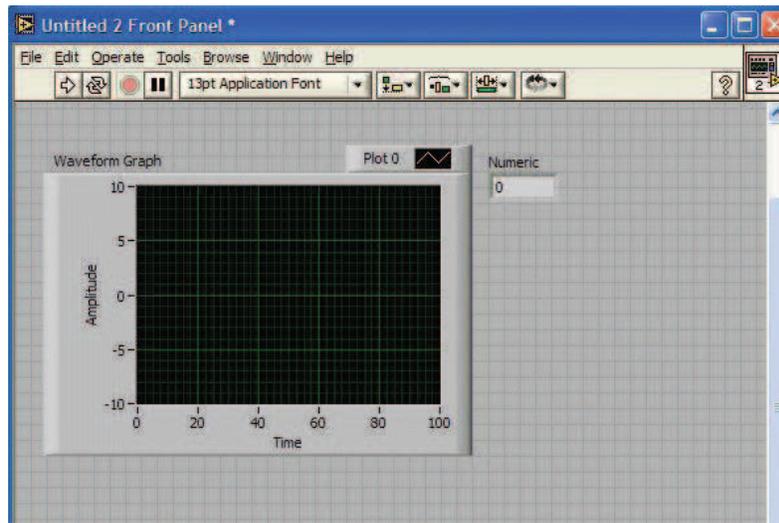


Figura 5.35: Interface com o usuário

A Figura 5.36 apresenta a interface criada para apresentação do sinal de saída da placa eletrônica do protótipo EFM, sinal este referente a amplitude do campo elétrico local onde o protótipo está instalado.

Nesta tela criada para o uso do protótipo EFM, alguns recursos específicos do LabVIEW foram utilizados como:

1. Botão que permite ao usuário a variação da amplitude do eixo referente a tensão (V) do gráfico;
2. Ícone que permite a variação da taxa de amostragem e do número de amostra;
3. Gravação do sinal apresentado na tela, para que o usuário possa posteriormente ler os dados referentes a um determinado período;
4. Escolha do lugar de armazenamento destes dados, através do ícone *path*;
5. Botão para iniciar a leitura de alguma gravação realizada e botão para sair deste programa.

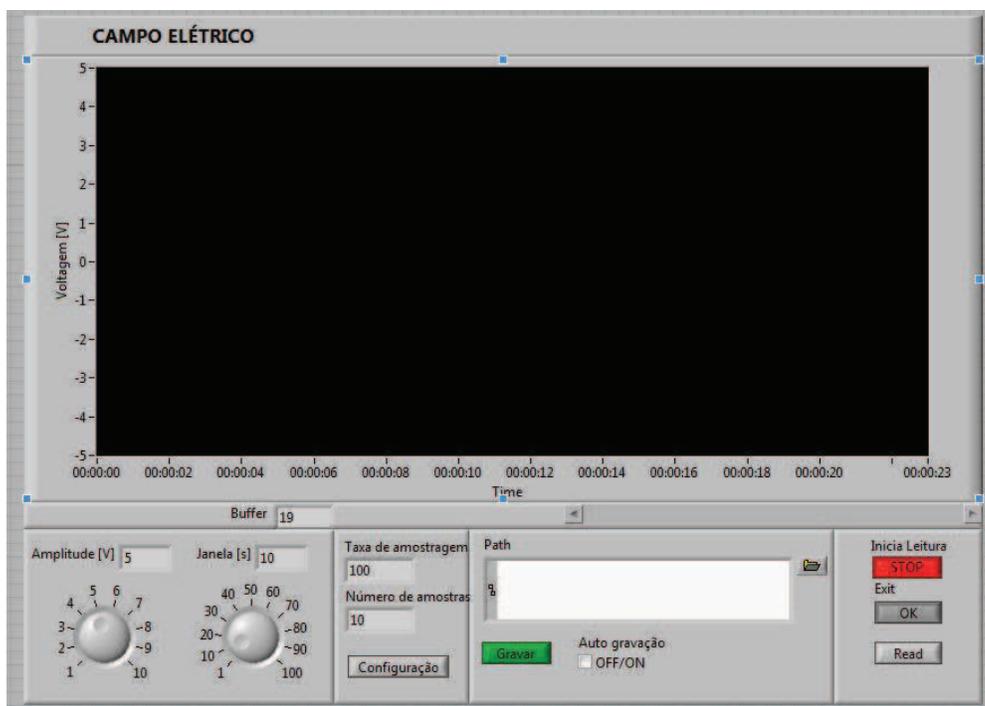


Figura 5.36: Interface criada para apresentação dos dados do EFM ao usuário

# Capítulo 6

## Testes e Resultados

### 6.1 Linearidade do Sensor

O primeiro teste realizado com o sensor, composto pela parte mecânica e a parte eletrônica, foi com o intuito de verificar se a resposta do EFM era linear quando submetido a distintos valores de campo elétrico.

No Laboratório de Alta Tensão (LAT) da FEEC, sediado na Unicamp, criou-se uma nuvem artificial localizada acima do sensor, como pode ser verificado através da Figura 6.1. Esta nuvem artificial é um plano de tensão onde pode-se simular uma nuvem real.

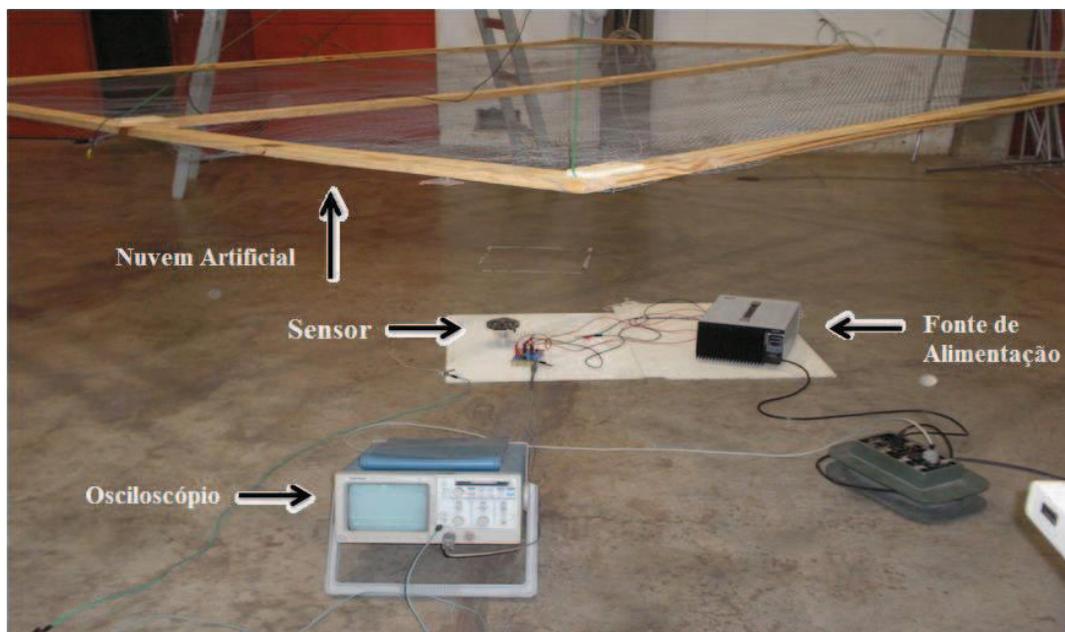


Figura 6.1: Montagem referente ao primeiro teste do sensor EFM

A fonte presente nesta montagem (Figura 6.1) é responsável pela alimentação dos amplificadores operacionais dispostos na placa do circuito eletrônico. Também é de finalidade desta fonte fazer a alimentação do motor deste sensor. Através do osciloscópio verifica-se a tensão de saída da placa eletrônica, sendo esta a resposta do sensor ao ser submetido a determinados valores de campo elétrico.

A nuvem foi energizada assumindo distintos valores de tensão, como mostra o circuito da Figura 6.2.

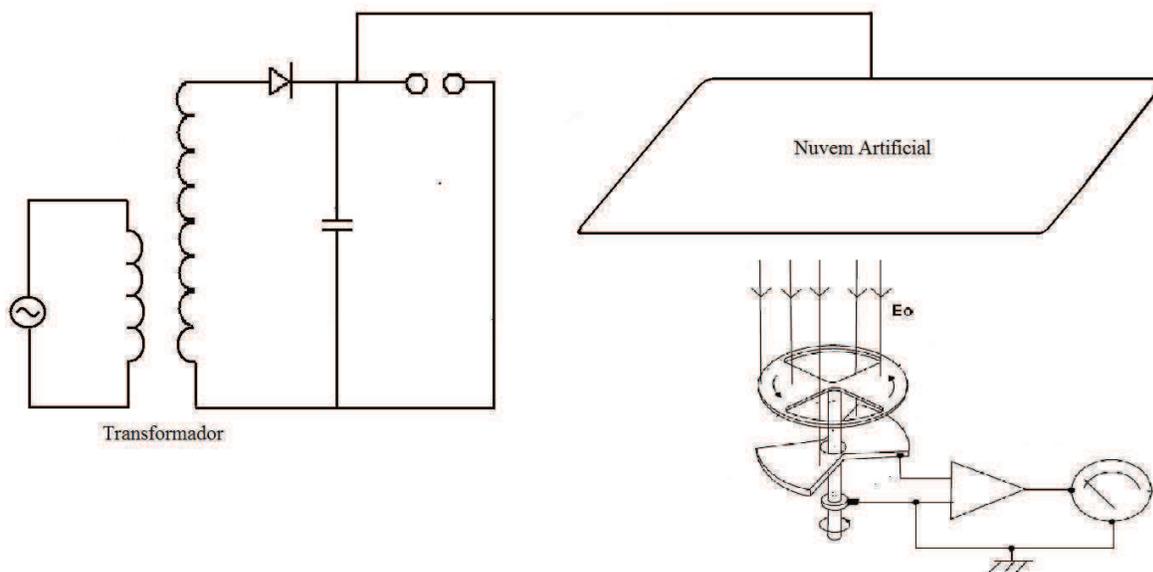


Figura 6.2: Circuito para energizar a nuvem

Através de um transformador a tensão aplicada pela fonte é elevada, podendo chegar a valores iguais ou até superiores a 100 kV. O diodo é responsável por realizar a retificação deste sinal de tensão, e posteriormente, o sinal já retificado é aplicado à nuvem artificial, deixando-a carregada com determinado valor de tensão. A chave utilizada para fazer o circuito descarregar, também no circuito da Figura 6.2, mostrado em paralelo com o capacitor, chama-se gap. Sua finalidade para os testes realizados com o sensor é simular uma descarga atmosférica, pois quando fecha-se essa chave descarrega-se o capacitor para a terra.

O objetivo deste teste foi verificar a resposta do EFM quando aplicados determinados valores de campo elétrico sobre este, e também sua sensibilidade quando alterada a distância da nuvem artificial sobre o mesmo.

- Distância de 3 m da nuvem ao sensor

Inicialmente colocou-se a nuvem artificial há uma distância de 3 m do sensor. Distintos valores de tensão foram aplicadas sobre esta nuvem, variando em uma escala de 6 kV até 41 kV. A nuvem poderia ser carregada com valores mais elevados de tensão, contudo isso saturaria os componentes da placa do circuito eletrônico, devido a curta distância entre a nuvem e o sensor.

A Tabela 6.1 mostra os valores de tensão aplicados na nuvem (em kV) e a respectiva resposta do sensor, lida através do osciloscópio, para as os correspondentes valores de carregamento desta.

Tabela 6.1: Resposta do EFM para uma distância de 3 m da nuvem

Tensão na Nuvem (KV)	Tensão Apresentada no Osciloscópio (V)
6	0,217
11	0,43
15,6	0,64
20,2	0,82
25,5	1,07
30,2	1,27
36,6	1,53
40,2	1,73

- Distância de 2 m da nuvem ao sensor

Após obter resultados do sensor com a nuvem a 3 m sobre este, alterou-se esta distância nuvem-sensor para um valor equivalente a 2 m. A alteração desta distância impossibilita a variação da escala de tensão aplicada na nuvem para valores acima de 16 kV. Essa limitação ocorre por dois motivos: principalmente porque com a nuvem mais próxima, o campo elétrico incidente sobre o sensor seria maior e ocorreria a saturação dos componentes da placa eletrônica; e por questão de segurança, pois a equipe que estava realizando este teste estava próxima à nuvem fazendo a aquisição dos dados através do osciloscópio.

A Tabela 6.2 mostra os valores de tensão aplicados na nuvem (em KV) e a resposta do sensor para os correspondentes valores de carregamento da nuvem.

Tabela 6.2: Resposta do EFM para uma distancia de 2 m da nuvem

Tensão na Nuvem (KV)	Tensão Apresentada no Osciloscópio (V)
5,5	0,63
11	1,25
15,5	1,7

- Distância de 1 m da nuvem ao sensor

As últimas medidas obtidas através deste teste, foi com a nuvem artificial à uma distância de 1 m do sensor. A mesma limitação mencionada no ítem anterior também faz-se presente, exatamente pelas mesmas justificativas.

A Tabela 6.3 mostra os valores de tensão aplicados na nuvem (em KV) e a resposta do sensor para os correspondentes valores de carregamento desta.

Tabela 6.3: Resposta do EFM para um distância de 1m da nuvem

Tensão na Nuvem (KV)	Tensão Apresentada no Osciloscópio (V)
3,1	1,1
6,7	2,34
11	3,78

De posse de todas as medidas obtidas a partir deste teste, o gráfico com todos os pontos referentes à tensão aplicada na nuvem e a respectiva resposta do sensor é apresentado na Figura 6.3. Pode-se verificar a linearidade do sensor através das curvas obtidas para diferentes distâncias nuvem-sensor. Essas curvas foram importantes para traçar o perfil de resposta do protótipo EFM, podendo fazer uma estimativa do comportamento deste quando submetido a diversos valores de campo elétrico.

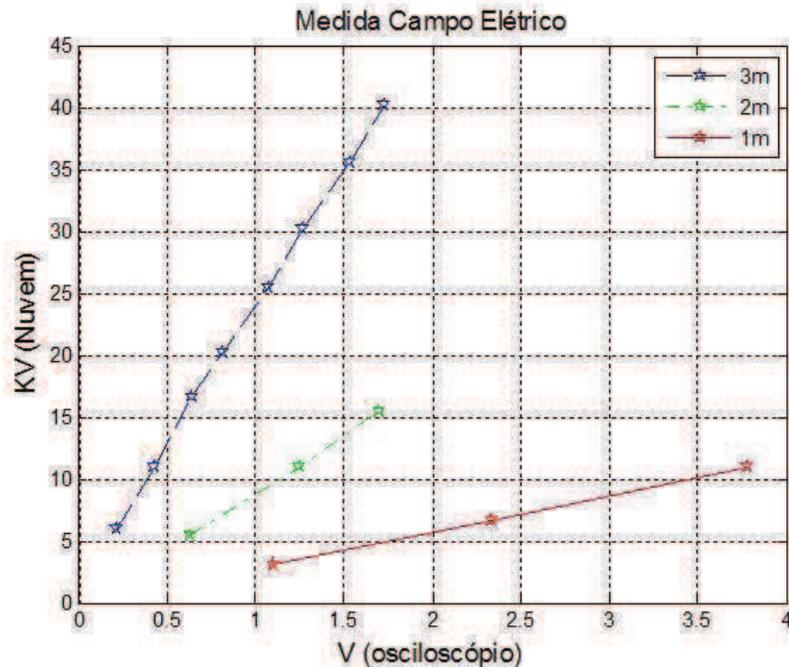


Figura 6.3: Gráficos referentes ao primeiro teste do EFM

## 6.2 Teste Completo: Sensor e Aquisição de Dados

Neste segundo teste realizado com o sensor algumas melhorias foram propostas. O sistema de aquisição de dados e apresentação destes ao usuário, através do software LabVIEW, pôde também ser testado. Uma das melhorias propostas para este teste foi a blindagem do sensor, pois conforme visto na Figura 6.1 do Ítem anterior, o sensor não dispunha de qualquer blindagem no primeiro teste realizado. A preocupação na blindagem deste evidenciou-se por dois motivos: anular efeitos externos nos componentes eletrônicos, como ruídos, bem como qualquer outro tipo de interferência do meio. O sensor instalado em campo deve também estar blindado para que eventual chuva não danifique os componentes eletrônicos e o motor, onde estão fixados, em seu eixo, o rotor e a placa de medição.

A Figura 6.4 evidencia a vista inferior do sensor blindado por uma caixa de alumínio. Apenas o rotor e a placa de medição estão expostos ao campo elétrico local, ficando livre deste, a placa que contém o circuito eletrônico e o motor. A base de sustentação do sensor tem também a finalidade de abrigar os fios responsáveis pela alimentação do motor e dos amplificadores operacionais, bem como o fio que leva o sinal de saída da placa eletrônica para o dispositivo de aquisição de dados, denominado DAQ 6008.



Figura 6.4: Vista inferior do sensor blindado

O rotor neste teste está posicionado em direção à uma placa refletora, estando esta situada acima de três isoladores localizados sobre o chão, conforme mostra a Figura 6.5. O campo elétrico incide sobre a placa e, por reflexão, este mesmo campo incide também sobre o rotor e estator (ou placa de medição) do sensor, podendo então obter medidas equivalentes ao campo elétrico local.

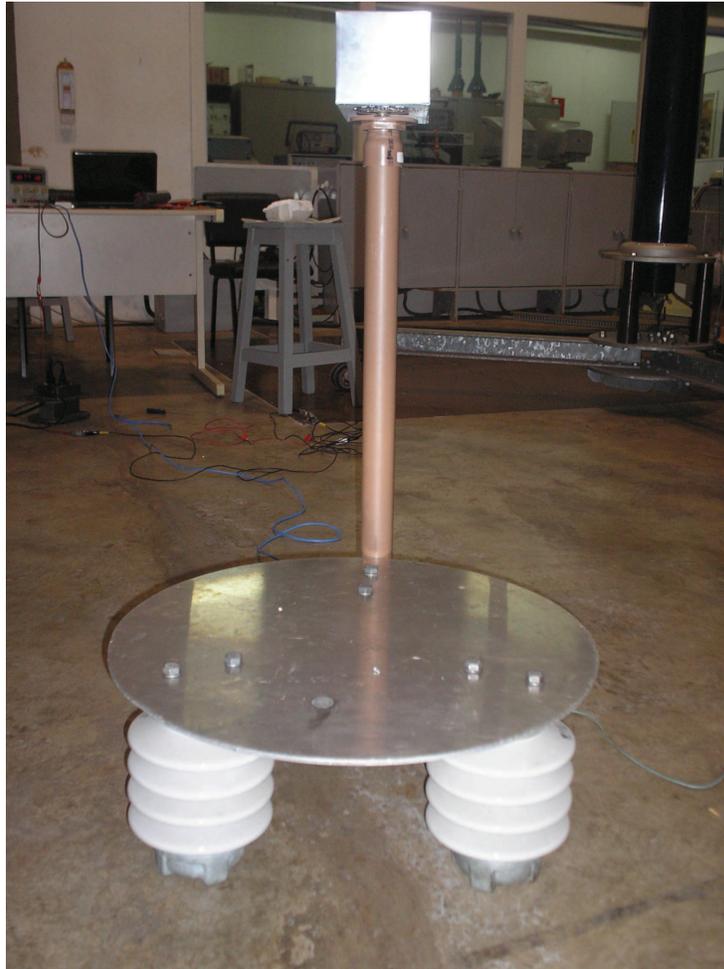


Figura 6.5: Posicionamento do sensor para medição do campo elétrico

Da mesma forma como no teste apresentado no Ítem 6.1, criou-se uma nuvem artificial situada acima do sensor, evidenciada na Figura 6.6. A nuvem foi energizada adotando distintos valores de tensão, ressaltando que o circuito para energização desta foi o mesmo apresentado Figura 6.2.



Figura 6.6: Montagem referente ao segundo teste do sensor EFM

### 6.2.1 Distância de 1,60 m da nuvem ao sensor

Os valores de tensão aplicados para efetuar o carregamento da nuvem artificial estão em uma escala que varia de 4,5 kV até 23 kV, conforme pode ser visto na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Valores de tensão (em kV) aplicados na nuvem para a distância nuvem-sensor igual a 1,6 m

Tensão Aplicada para Carregamento da Nuvem (distância nuvem-sensor = 1,6m)				
4,8	10,1	15,4	20	22,5

Para determinar o valor do campo elétrico incidente sobre sensor, deve-se usar a fórmula da Equação 6.1.

$$E (kV/m) = \frac{V_{(aplicada\ na\ nuvem)}}{distancia_{(nuvem-sensor)}} \quad (6.1)$$

Portanto, para os valores de tensão aplicados na nuvem, conforme visto na Tabela 6.4, tem-se os seguintes valores de campo elétrico incidente sobre o sensor, apresentados na tabela 6.5.

Tabela 6.5: Valor de tensão na nuvem e respectivo valor de campo elétrico incidente sobre o sensor para distância nuvem-sensor igual a 1,6 m

<b>Valor da Tensão Aplicada na Nuvem (kV)</b>	<b>Campo Elétrico Incidente sobre o Sensor (kV/m)</b>
<b>4,8</b>	<b>3</b>
<b>10,1</b>	<b>6,3</b>
<b>15,4</b>	<b>9,6</b>
<b>20,0</b>	<b>12,5</b>
<b>22,5</b>	<b>14,0</b>

Para os mesmos valores de campo elétrico incidente, presentes na Tabela 6.5, obteve-se como resposta do sensor os respectivos sinais constantes, apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Campo elétrico incidente e respectiva resposta do sensor para distância nuvem-sensor igual a 1,6 m

<b>Campo Elétrico Incidente (kV/m)</b>	<b>Sinal de Resposta Visto na Tela do Software</b>
<b>3,0</b>	<b>1,1</b>
<b>6,3</b>	<b>2,3</b>
<b>9,6</b>	<b>3,5</b>
<b>12,5</b>	<b>4,58</b>

Para que se possa ter o valor exato deste campo incidente sobre o sensor, considerando a distância nuvem-sensor igual a 1,60 m, o usuário do software deve multiplicar o valor do sinal visto através da tela por um fator multiplicativo igual a  $2,73 \cdot 10^3$ . Utilizou-se a Equação 6.2 e os dados presentes na Tabela 6.6 para calcular este fator mencionado.

$$Fator\ multiplicativo = \frac{E}{V_{(Sinal\ resposta\ do\ sensor)}} \quad (6.2)$$

Sendo E = Campo elétrico incidente sobre o sensor

A Figura 6.7 mostra o início do teste para uma variação do campo incidente de 0 kV/m a 3 kV/m. Até o instante de tempo  $t = 00 : 01 : 07$  observa-se um valor nulo como resposta do

sensor, ou seja, a nuvem artificial não estava carregada. A partir deste instante  $t$ , a nuvem foi sendo carregada e consequentemente a resposta do sensor ao campo elétrico incidente variou, assumindo então, a partir do tempo  $t = 00 : 01 : 08$ , um valor constante igual a 1,1 V quando fixado sobre este um campo elétrico de 3 kV/m.

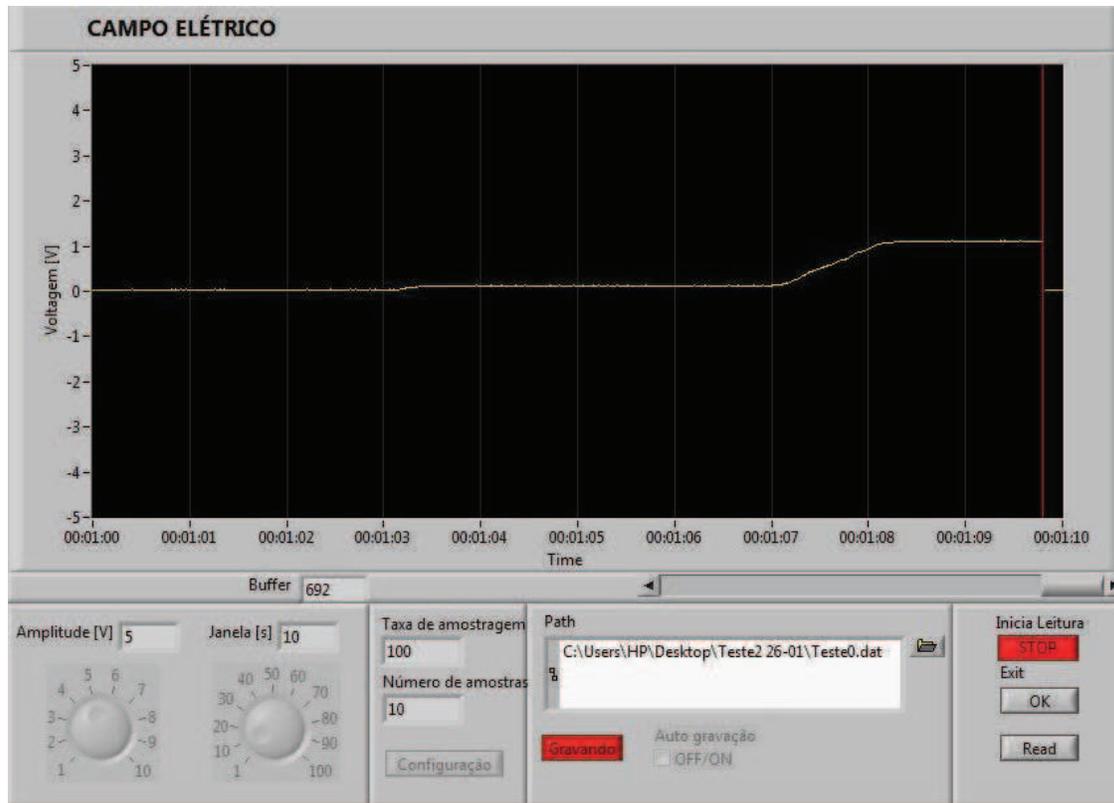


Figura 6.7: Resposta do sensor ao campo elétrico incidente variando na escala de 0kV/m a 3kV/m

Na sequência, apresentam-se outras figuras relativas a este teste, evidenciando determinados valores de campo elétrico incidente sobre o sensor e seu respectivo sinal de resposta. Ressalta-se que para esta distância, deve-se usar um fator multiplicativo, ao sinal apresentado na tela, de valor igual a  $2,73 \cdot 10^3$ , conforme dito anteriormente.

A Figura 6.9 apresenta o sinal obtido pelo sensor quando o campo elétrico incidente varia de 6,3 kV/m a 9,6 kV/m. Nota-se que pouco depois do instante  $t = 00 : 04 : 02$  este sinal varia, aumentando de 2,3 V para 3,5 V, fato que é explicado pela variação do campo descrito.

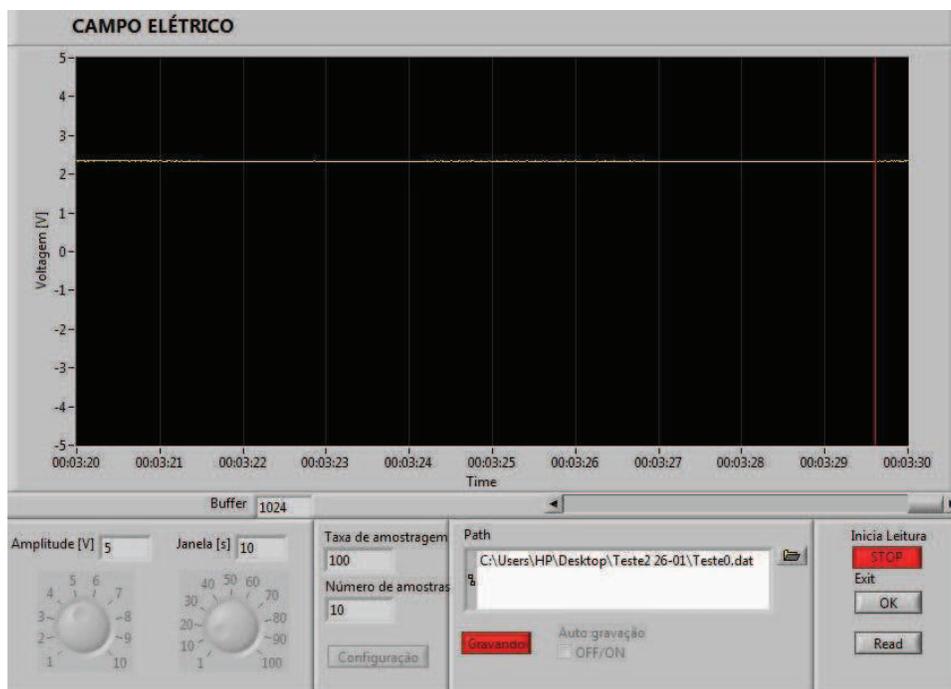


Figura 6.8: Sinal de resposta do sensor para campo elétrico incidente igual 6,3 kV/m

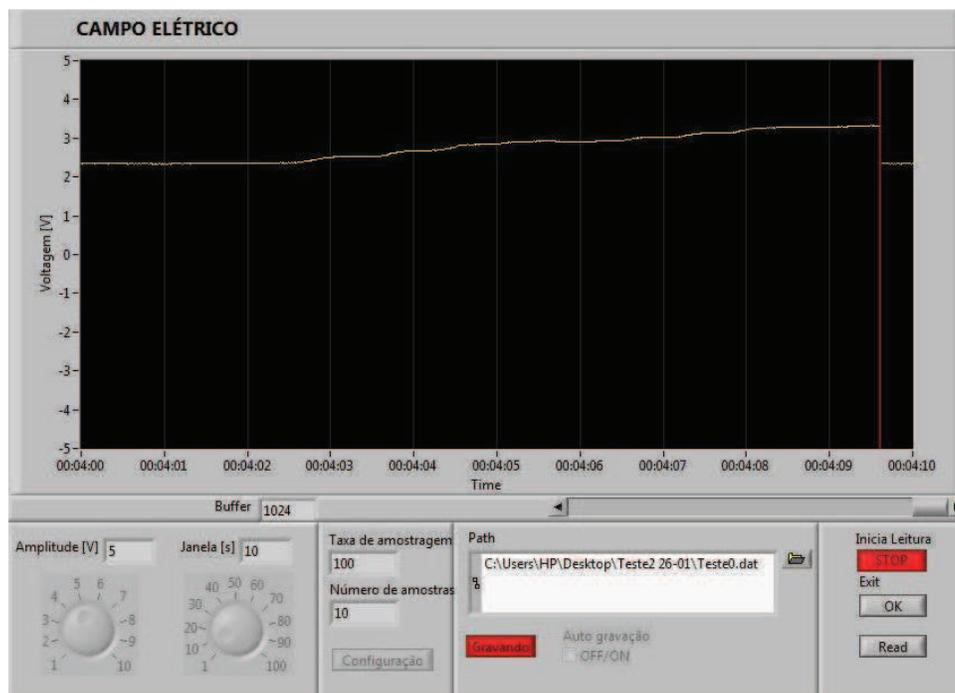


Figura 6.9: Sinal de resposta do sensor para uma variação do campo elétrico incidente de 6,3 kV/m a 9,6 kV/m

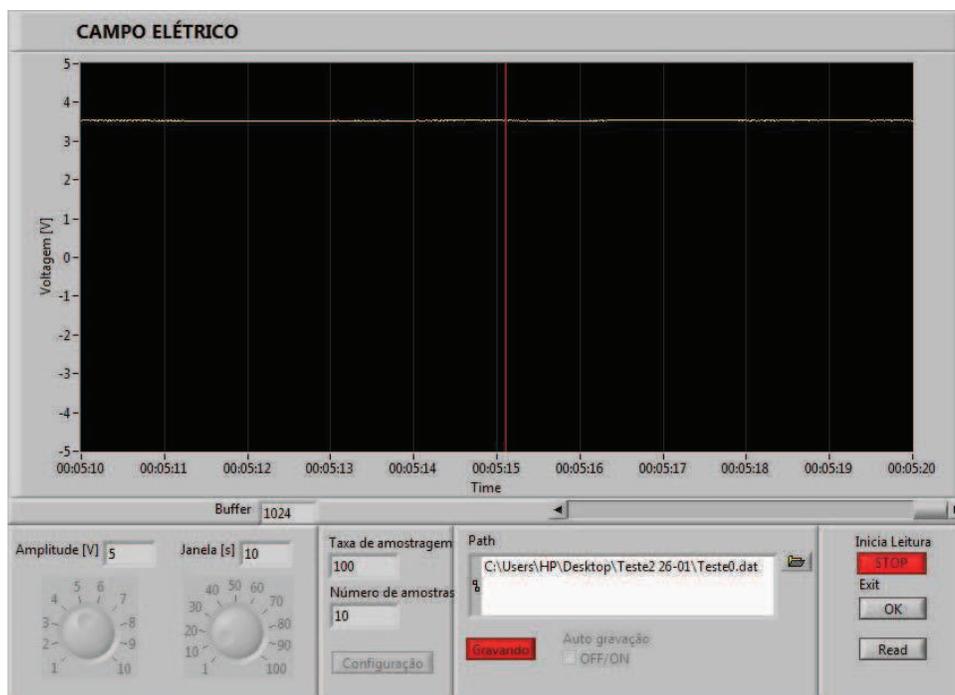


Figura 6.10: Sinal de resposta do sensor para campo elétrico incidente igual a 9,6 kV/m

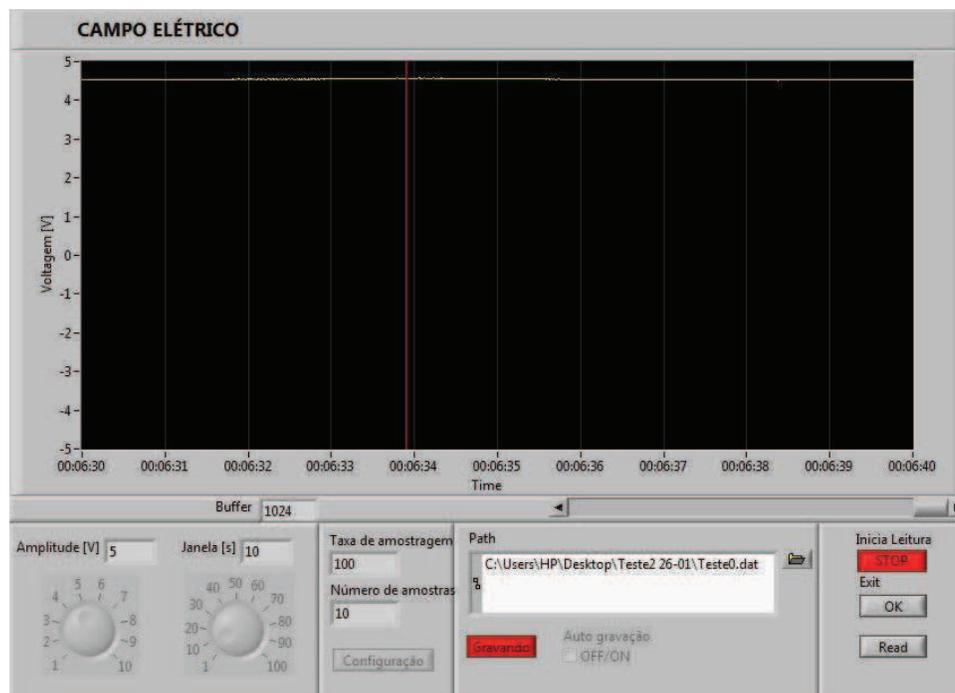


Figura 6.11: Sinal de resposta do sensor para campo elétrico incidente igual a 12,5 kV/m

A Figura 6.12 ilustra exatamente o instante em que simula-se uma descarga atmosférica. Para realizar esta descarga, utilizou-se o circuito visto na Figura 6.2 e a explicação deste procedimento foi descrito no Ítem 6.1. Nota-se que o sinal de resposta do sensor equivale a 3,5 V no exato instante de tempo  $t = 00 : 01 : 00$ , denominado aqui de tempo inicial ou  $t_0$ . O sinal cresce continuamente até o instante de tempo  $t_1 = 00 : 01 : 02$ , quando seu valor atinge 4,58 V. Esse aumento ocorre devido a variação do campo incidente, passando de 9,6 kV/m para 12,5 kV/m. Após  $t_1$  observa-se a transição deste sinal, decorrente da simulação de uma descarga na nuvem artificial, quando submetido o sensor a um campo incidente de 14 kV/m.

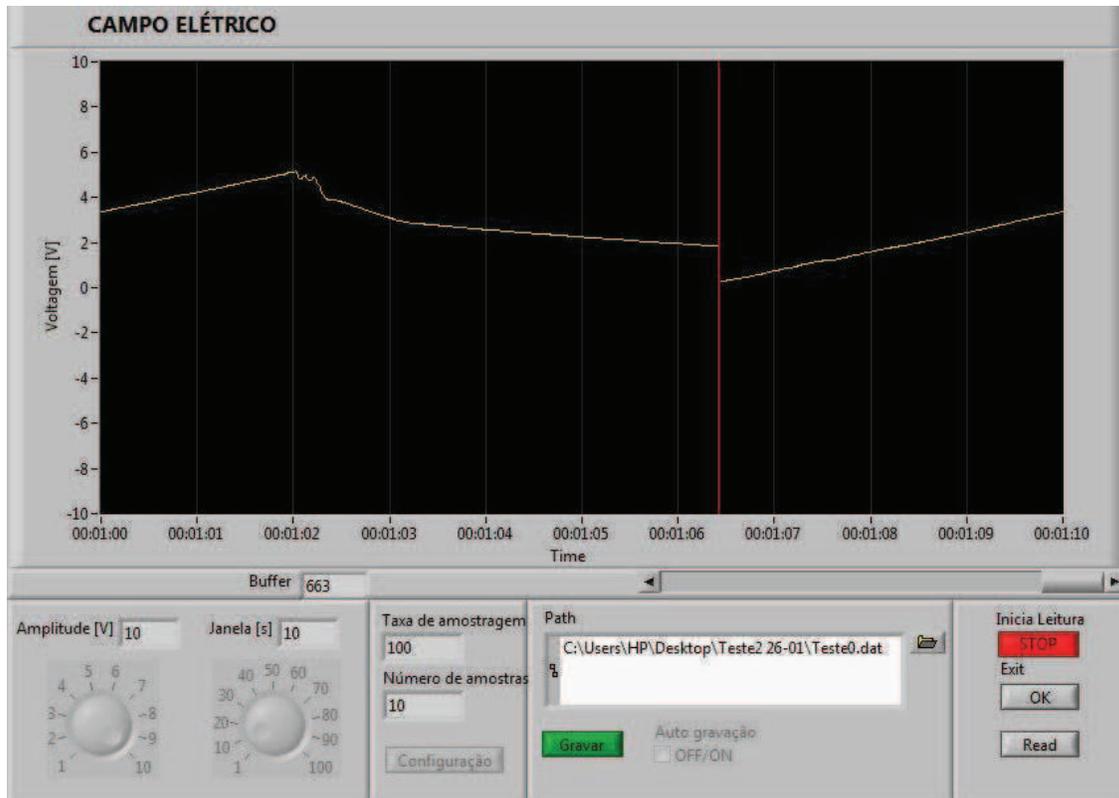


Figura 6.12: Sinal de resposta do sensor para simulação de uma descarga atmosférica

### 6.2.2 Distância de 2,20 m da nuvem ao sensor

Para este teste, os valores de tensão aplicados para efetuar o carregamento da nuvem artificial estão em uma escala que varia de 4,5 kV até 28 kV, conforme pode ser visto na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Valores de tensão aplicados na nuvem para a distância nuvem-sensor igual a 2,2 m

<b>Tensão Aplicada para Carregamento da Nuvem ( distância nuvem-sensor = 2,2m) (KV)</b>						
<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>22,5</b>	<b>27,9</b>	

Os valores de tensão aplicados na nuvem, presentes na Tabela 6.7, acarretam nos seguintes valores de campo elétrico incidente sobre o sensor, como pode ser visto na Tabela 6.8.

Tabela 6.8: Valor da tensão na nuvem e respectivo valor de campo elétrico incidente sobre o sensor, distância nuvem-sensor igual a 2,2 m

<b>Tensão Aplicada na Nuvem (KV)</b>	<b>Campo Elétrico Incidente sobre o Sensor (KV/m)</b>
<b>5</b>	<b>2,3</b>
<b>10</b>	<b>4,5</b>
<b>15</b>	<b>6,8</b>
<b>20</b>	<b>9,0</b>
<b>22,5</b>	<b>10,2</b>
<b>27,9</b>	<b>12,7</b>

Para os mesmos valores de campo elétrico incidente da Tabela 6.8, obteve-se como resposta do sensor os respectivos sinais constantes, evidenciados na Tabela 6.9.

Tabela 6.9: Campo Elétrico incidente e respectiva resposta do sensor para distância nuvem sensor igual a 2,2 m

<b>Campo Elétrico Incidente (kV/m)</b>	<b>Sinal de Resposta Visto na Tela do Software</b>
<b>2,3</b>	<b>0,8</b>
<b>4,5</b>	<b>1,6</b>
<b>6,8</b>	<b>2,4</b>
<b>9,0</b>	<b>3,19</b>
<b>10,2</b>	<b>3,70</b>

Como mencionado no Ítem 6.2.1, deve-se multiplicar o valor do sinal, apresentado através da tela do software, por um fator multiplicativo, para que se possa ter o valor exato deste campo incidente. Utilizando a Equação 6.2, encontra-se que o fator multiplicativo para essa distância nuvem-sensor equivale a  $2,8 \cdot 10^3$ .

A Figura 6.13 contempla o sinal de resposta do sensor medido durante um período do teste realizado. Até o instante de tempo  $t = 00 : 00 : 58$  observa-se um sinal nulo, o que indica que a nuvem artificial não havia sido carregada. A partir deste tempo o sinal variou,

caracterizando o carregamento da nuvem. Pouco antes do tempo  $t = 00 : 01 : 04$  observa-se a transição deste sinal, decorrente de uma descarga na nuvem artificial.

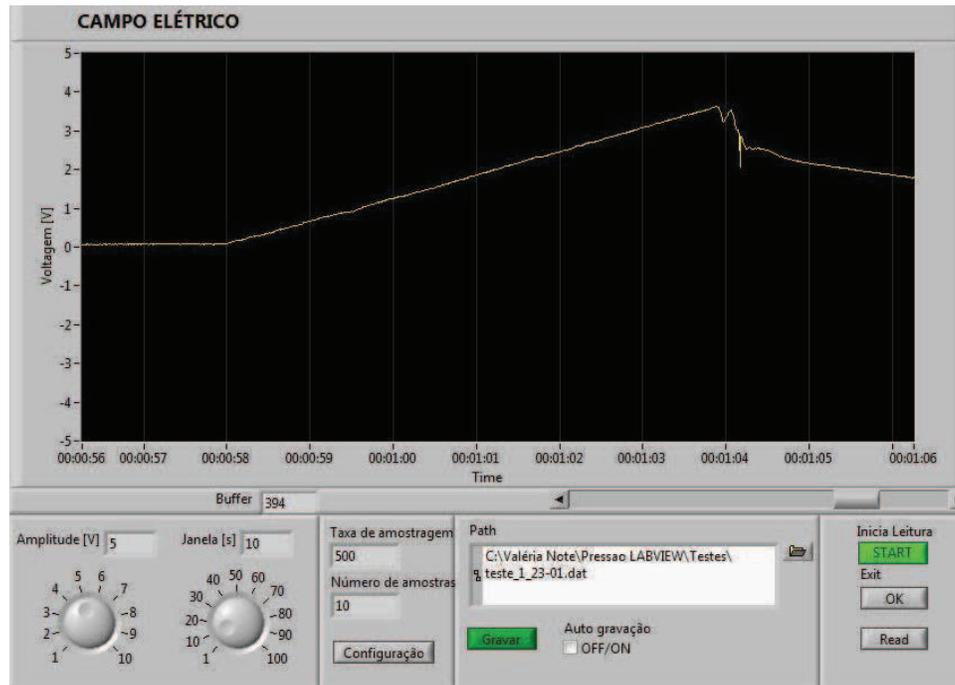


Figura 6.13: Resposta do sensor a uma variação do campo elétrico de 0 kV/m a 20 kV/m

Na sequência apresentam-se as figuras relativas às simulações de descargas atmosféricas feitas para este teste.

Através da Figura 6.14 nota-se o sinal constante, com valor de 3,2 V para um campo incidente igual a 9 kV/m até próximo do instante  $t = 00 : 01 : 36$ . Uma variação do sinal pode ser observada até que este assumia novamente um valor constante de 4,5 V, indicando que o sensor está sob um campo de 27,9 kV/m. A descontinuidade deste sinal ocorre devido a simulação de uma descarga atmosférica na nuvem artificial. Para evidenciar exatamente uma descarga, o sinal deve cair instantaneamente para 0 V. Nesta figura, adotou-se uma taxa de amostragem igual a 100 para que se pudesse evidenciar lentamente o sinal de resposta à uma descarga.

A Figura 6.15 contempla exatamente a resposta do sensor para uma descarga atmosférica. Quando o sinal vai a zero indica que ocorreu uma descarga atmosférica.

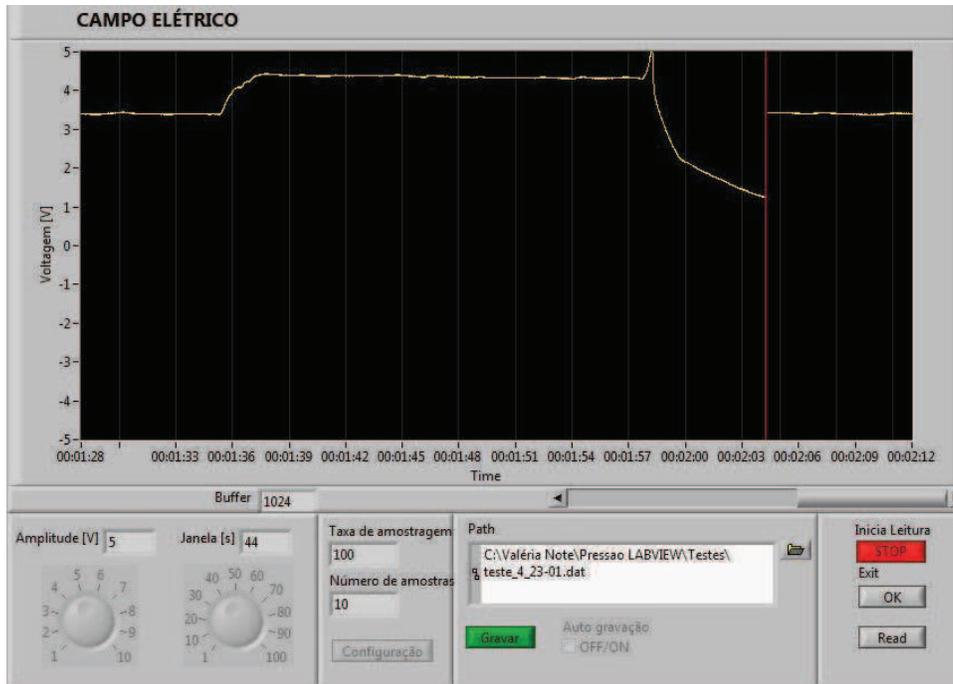


Figura 6.14: Simulação de descarga atmosférica com campo incidente de 12,7 kV/m

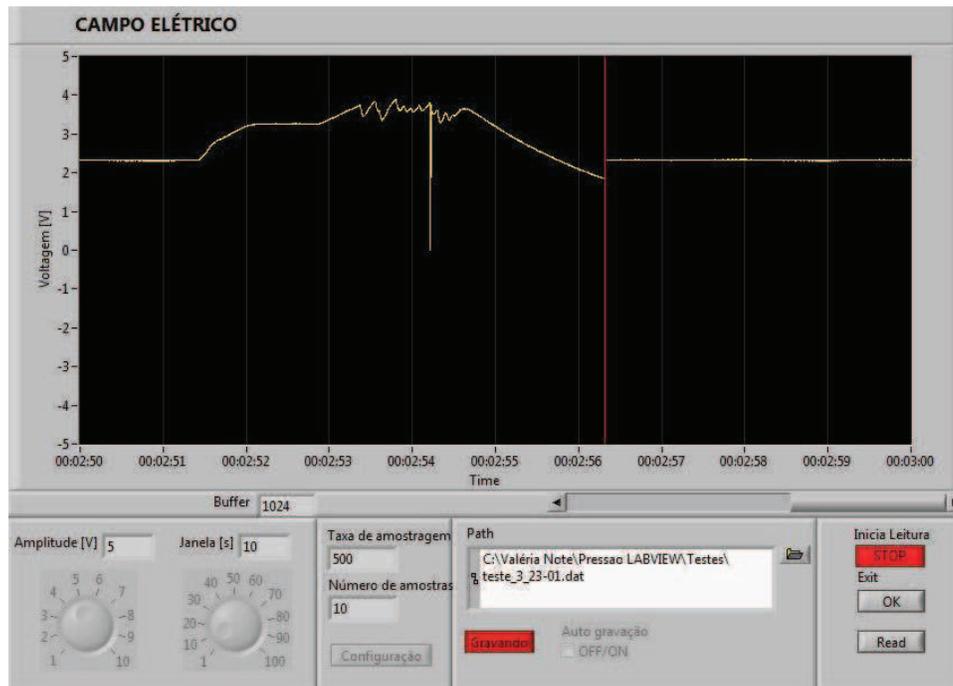


Figura 6.15: Simulação de descarga atmosférica com campo incidente de 10,2 kV/m

## 6.3 Calibração para Instalação do Sensor em Campo

Antes da instalação do sensor em campo deve-se realizar uma única calibração, baseada nos testes realizados neste capítulo. Importante ressaltar que o sensor deve ser instalado em um ambiente aberto, de preferência em topo de edifício ou lugares livres de obstruções.

A calibração deve ser realizada em dias de "tempo bom", ou seja em dias sem nuvens. Assim, o sinal de resposta do sensor visualizado na tela, corresponde a um valor em torno de 200V/m, sendo este o campo elétrico em dias de "tempo bom". Utilizando a Equação 6.2, denomina-se o fator multiplicativo. Multiplicando o valor do sinal visualizado na tela por este fator, determina-se o valor real do campo elétrico local.

## Capítulo 7

# Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Após a realização de um estudo sobre a origem de cargas nas nuvens, formação de descargas atmosféricas e o princípio de funcionamento de medidores de campo elétrico, iniciou-se a construção de um sensor, com tecnologia nacional, capaz de medir o campo elétrico local e assim, identificar descargas atmosféricas.

O sensor desenvolvido neste trabalho foi baseado no artigo escrito por Campbell, no qual foram apresentados somente o diagrama de blocos e o seu princípio básico de funcionamento. O projeto do circuito eletrônico, a construção eletromecânica deste medidor e os posteriores testes no protótipo foram realizados ao longo da realização deste trabalho de mestrado.

O primeiro teste realizado neste sensor visava verificar sua resposta quando submetido a distintos valores de campo elétrico. A realização deste teste foi de suma importância para traçar uma estimativa do seu comportamento quando submetido a duas variáveis que são: a variação do campo elétrico incidente e a variação da distância da nuvem artificial sobre este. Através das medidas obtidas pôde-se certificar sua linearidade, bem como sua sensibilidade quando alterada a distância da nuvem sobre o mesmo.

O segundo teste realizado visava constatar, primeiramente, a capacidade de comunicação entre o sensor e o software de monitoramento. Algumas melhorias também foram adotadas para a observação de alteração no sinal de resposta, destacando a blindagem do protótipo. De posse dos resultados obtidos, pôde-se atestar a eficácia do software desenvolvido, pois este apresenta em sua tela, exatamente o perfil do campo elétrico incidente. Pôde-se também atestar a necessidade do fator multiplicativo para uma relação correta do campo elétrico local com o sinal de saída apresentado pelo sensor. Assim como no primeiro teste, a resposta apresentada pelo sensor foi linear quando aplicada uma variação no campo e na distância nuvem-sensor.

Ainda no segundo teste, pôde-se constatar que o protótipo é eficiente na detecção de descargas atmosféricas, evidenciando, através da tela do software, uma resposta condizente com o perfil atmosférico local. De posse de todos os resultados obtidos neste teste, pode-se constatar também que a blindagem proposta na melhoria para este teste, não surtiu alteração no sinal de resposta deste, o que implica que a blindagem faz-se necessária apenas para a instalação do sensor em campo, onde esta seria eficiente na anulação dos efeitos externos nos componentes eletrônicos, como ruídos, bem como qualquer outro tipo de interferência do meio.

De posse de todos os resultados obtidos, conclui-se que os objetivos propostos no início foram alcançados com sucesso e o trabalho considerado satisfatório.

## **TRABALHOS FUTUROS**

Para trabalhos subsequentes, tem-se as seguintes sugestões:

1. Realizar a montagem do sensor em rede com outros deste para proteção de determinadas localidades. A finalidade é monitorar grandes espaços, instalando cada equipamento em diferentes pontos, centralizando assim, as informações enviadas por cada sensor em um software. Com essas medidas é possível traçar o perfil atmosférico local.
2. Criar um sistema de comunicação que viabilize, através da rede internet (via e-mail ou sms), a aquisição dos dados de saída sensor, ressaltando alertas de campo elétrico alto.
3. Elaborar uma proteção para o circuito eletrônico, para que em uma eventual descarga sobre o sensor, não ocorram danos nos componentes da placa.

# Referências Bibliográficas

- [1] Física Potierj. Sobre os raios e outros. *Disponível em: [www.fisica-potierj.pro.br](http://www.fisica-potierj.pro.br) Acessado em 18 de novembro de 2008*, 2004.
- [2] Marco Antônio da Silva Ferro. Monitoramento da atividade atmosférico do centro de lançamento de alcântara. Master's thesis, INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais., 2005.
- [3] Rosângela Gin. Cloud-to-ground lightning flash density of southeastern of brazil : 2001. *VII International Symposium On Lightning Protection*, page 7, 2003.
- [4] Rosângela Gin. descargas atmosféricas nuvem-solo no sudeste do brasil em 2001: Estudos de casos. *XII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2004.
- [5] John Wiley & Sons. *Harris Benson*. 1991.
- [6] Joseph R. Dwyer. *Um Raio no Céu Azul*. Scientific American Brasil, 2005.
- [7] B. Guedes Rosângela Gin. Climatologia de relâmpagos no brasil: Análise preliminar. *Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 2000.
- [8] V. Rakov. Lightning return stroke modeling: recent developments. *International Conference on Ground and Earthing*, pages 85–96, 2002.
- [9] N.N. Solórzano. *Primeiras Medidas de Relâmpagos Induzidos no Brasil*. PhD thesis, Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.
- [10] José Pissolato Filho. *Técnicas para a Medição de Parâmetros de Descargas Atmosféricas Aritificiais*. 1998-1999.
- [11] P.W. Winn. Eletric field meter - e 100 principle of operation. In *Disponível em: <http://www.ee.nmt.edu/langmuir/E100.html>*, Acesso em: 25 Fev 2008.
- [12] Jim Campbell. Eletric field mill fabrication. *Disponível em: [www.precision.com/jc/fieldmill.html](http://www.precision.com/jc/fieldmill.html)* Acessado em 25 de novembro de 2008.

- [13] Lars Wahlin. Atmospheric electrostatics disponível em: <http://www.colutron.com/>. Acesso: 02 de Agosto de 2008.
- [14] W.H. Evans. Electric fields and conductivity in thunderclouds. *Journal of Geophysical Research*, 74:p.939–948, 1969.
- [15] BURR-BROWN. Datasheet ina 121. disponível em:<<http://www.burr-brown.com/>>. Acesso em: 02 Jun. 2008.
- [16] Alexandre Balbinot; Valner João Brusamarello. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*.