



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.11.21.41-TDI

**SISTEMA DE ALERTA DE OCORRÊNCIA DE RAIOS
UTILIZANDO REDE DE SENSORES DE CAMPO
ELÉTRICO ATMOSFÉRICO**

Flávio de Carvalho Magina

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Junior, e Kleber Pinheiro Naccarato, aprovada em 25 de fevereiro de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L6ACE5>>

INPE
São José dos Campos
2016

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.11.21.41-TDI

**SISTEMA DE ALERTA DE OCORRÊNCIA DE RAIOS
UTILIZANDO REDE DE SENSORES DE CAMPO
ELÉTRICO ATMOSFÉRICO**

Flávio de Carvalho Magina

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Junior, e Kleber Pinheiro Naccarato, aprovada em 25 de fevereiro de 2016.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3L6ACE5>>

INPE
São José dos Campos
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Magina, Flávio de Carvalho.

M272s Sistema de alerta de ocorrência de raios utilizando rede de sensores de campo elétrico atmosférico / Flávio de Carvalho Magina. – São José dos Campos : INPE, 2016.
xxiv + 130 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/02.11.21.41-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

Orientadores : Drs. Osmar Pinto Junior, e Kleber Pinheiro Naccarato.

1. Relâmpagos. 2. Raios. 3. Descargas atmosféricas. 4. Sistema de alerta de raios. 5. Sensores de campo elétrico atmosférico.
I.Título.

CDU 551.594.22:550.371



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Flávio de Carvalho Magina**

Título: " SISTEMA DE ALERTA DE OCORRÊNCIA DE RAIOS UTILIZANDO REDE DE SENSORES DE CAMPO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO "

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Doutor(a)** em **Ciência do Sistema Terrestre**

Dr. Plínio Carlos Alvalá



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Osmar Pinto Junior



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Kleber Pinheiro Naccarato



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Antonio Carlos Varela Saraiva



Convidado(a) / UNESP/ICT / São José dos Campos - SP

Dr. Marco Antonio da Silva Ferro



Convidado(a) / LIAE/DCTA / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 25 de fevereiro de 2016

“O conhecimento serve para encantar as pessoas, não para humilhá-las”.

Mario Sergio Cortella

Uma homenagem a minha querida mãezinha, que sempre me confortou nos momentos difíceis e se orgulhou dos meus sucessos. Saudades eternas.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a DEUS por ter me concedido a oportunidade, saúde e coragem para levar em frente este trabalho.

Aos meus Orientadores Dr. Osmar Pinto Junior e Dr. Kleber Pinheiro Naccarato, meus sinceros agradecimentos pela orientação na realização deste trabalho e também pelo apoio e incentivo na minha vida profissional me acolhendo no Grupo de Eletricidade Atmosférica do INPE, o ELAT.

Aos professores e funcionários que integram a Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre do INPE, agradeço pelo conhecimento que me passaram e pelo apoio acadêmico e administrativo prestado.

Ao Prof. Dr. Cláudio Freitas Neves, da UFRJ-COOPE, meu amigo pessoal e também orientador virtual desta tese, meus sinceros agradecimentos pelas valiosas sugestões e contribuições para a elaboração deste trabalho.

Ao colega de INPE e também amigo, Dr. Eymar Sampaio Lopes, do INPE-DPI, meus sinceros agradecimentos pela valiosa ajuda na implementação do banco de dados geográficos de raios e de campo elétrico atmosférico e no desenvolvimento de ferramentas para uso com as geotecnologias utilizadas neste trabalho.

Ao Dr. Marco Antônio da Silva Ferro, do DCTA.IAE, agradeço pela cooperação na integração e manutenção das redes de sensores de campo elétrico do DCTA.IAE e do INPE.ELAT e pelo fornecimento de informações e literatura sobre métodos de avaliação de alarmes dos sensores de campo elétrico atmosférico, sem as quais seria impossível a realização deste trabalho.

Ao aluno de doutorado da Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do INPE, M.Sc. Hugo Bendini, agradeço pela ajuda na criação do código fonte do programa em MATLAB para geração das matrizes de pontos de campo elétrico atmosférico utilizadas neste trabalho.

Aos colegas do laboratório eletrônico do Grupo de Eletricidade Atmosférica do INPE.ELAT, Eng. Luis Alonso e Eng. Arthur Melo, agradeço pelo apoio na integração e instalação em campo da rede de sensores de campo elétrico atmosférico. Também agradeço o apoio do Eng. Jorge Yamasaki, do DCTA.IAE, que apoiou nas instalações de campo e manutenções dos sensores de campo elétrico. Agradecimentos ao Diovane Rodolfo Campos pelo fornecimento dos dados de localização de relâmpagos e ao Diogo Borsoi e Cristiano Simomura pelo apoio na TI do ELAT.

A todos colegas da minha turma do curso de doutorado em CST, meus agradecimentos pelo companheirismo e amizade que demonstraram durante o tempo em que estivemos juntos cursando as disciplinas e também após este período.

Aos meus colegas e amigos que me incentivaram e apoiaram durante o período de doutorado, os meus sinceros agradecimentos para: Dr. Luiz Tadeu da Silva (INPE-CPTEC), Dr. Nelson Jesus Ferreira (INPE-CPTEC), Dr. Guilherme Martins dos Santos (INPE-CCST), Leandro Santiago dos Santos e Michele Cristina dos Santos Nogueira (Defesa Civil Cruzeiro-SP).

Por fim, agradeço imensamente a minha querida família: meus pais Nelson Magina e Marlene de Carvalho Magina (in memoriam) que sempre estiveram a meu lado em todos os momentos de minha vida; a minha sogra Luzia Maria da Silva pelas orações em benefício da minha família; a minha esposa Robervalda Beatriz Ananias Magina pela sua paciência e ajuda importantíssima sem a qual certamente não seria possível a realização deste trabalho; a meus filhos que amo muito: Renata Ananias Magina e Fábio Ananias Magina pelos períodos em que estive ausente de suas vidas enquanto ocupado com este trabalho.

RESUMO

Há evidências de que o clima global está mudando e aumentos de eventos extremos, como tempestades severas, estão previstos para o futuro. As descargas elétricas atmosféricas, mais precisamente as descargas nuvem-solo ou raios, são uma característica das tempestades que causam perdas de vidas e danos aos empreendimentos e que, tendem a aumentar com o aumento das tempestades. No Brasil, morrem mais de uma centena de pessoas por ano atingidas por raios e prejuízos econômicos anuais de cerca de um bilhão de Reais são contabilizados pelo setor elétrico em danos em equipamentos e instalações atingidos por raios. Como consequência destes fatos, uma crescente demanda por sistemas de monitoramento e alerta da ocorrência de raios tem sido verificada. A tecnologia de monitoramento de raios conta hoje com os sistemas de localização de descargas atmosféricas que podem localizar com precisão a ocorrência de raios e assim reportar a aproximação de uma tempestade de uma área onde se deseja proteger as pessoas e o patrimônio. Entretanto, estes sistemas são complexos, caros e de difícil manutenção. Além disso, só conseguem reportar a ocorrência do raio depois que o mesmo ocorreu. Uma outra forma de se detectar a aproximação de uma tempestade com potencial para o desenvolvimento de raios é medindo o campo eletrostático local utilizando sensores projetados para tal fim. Os dispositivos conhecidos como Field Mill ou sensor EFM podem detectar variações no campo elétrico atmosférico quando da aproximação de uma tempestade com atividade elétrica a uma distância de até vinte quilômetros. Os sistemas de alerta baseados nas medições de sensores EFM são os únicos com capacidade para emitir alertas antes da ocorrência do primeiro raio dentro da área de proteção. Os sensores EFM são dispositivos mais simples e de menor custo se comparados com os sistemas de localização de descargas atmosféricas. Porém, as suas medições são fortemente influenciadas pelas características do local onde se encontram instalados (altura do centro de carga das nuvens de tempestade na região, topografia, obstruções, etc.), o que pode resultar em baixos índices de alarmes efetivos ou altos índices de alarmes falsos ou não reportados. Vários sistemas de alerta foram construídos, em vários locais do mundo, com base em medições pontuais de sensores EFM, na maioria dos casos de um único sensor instalado no local para o qual se deseja proteção. Esta configuração é afetada pelas limitações inerentes da medição pontual. Uma rede com onze sensores EFM foi integrada na região de São José dos Campos, Sudeste do Brasil, com o propósito de fornecer medições de campo elétrico atmosférico em tempo real para o desenvolvimento de um sistema experimental de alerta de raios. Com as medições coletadas por esta rede, no verão de 2013-2014 (no hemisfério sul), foi desenvolvida e avaliada uma solução inovadora, para estruturação de um sistema de alerta de raios, utilizando medições interpoladas espacialmente adquiridas da rede de sensores EFM e formatadas como matrizes de pontos de grade regularmente espaçados. O processo de interpolação tende a suavizar as medições de campo elétrico atmosférico, reduzindo assim os efeitos indesejados das medições pontuais, resultando em uma maior efetividade dos alertas que se

baseiam neste tipo de informação. Os resultados da avaliação da efetividade dos alertas, com base nas medições espacialmente interpoladas, mostraram uma excelente resposta na aplicação do método, com altos valores para os índices estatísticos de alarmes efetivos e baixos índices de alarmes falsos e não reportados, quando comparado com as avaliações encontradas na literatura para sistemas baseados em medições pontuais. Estes resultados fomentam a continuidade desta investigação, abrindo perspectivas para trabalhos futuros utilizando o método proposto e avaliado nesta tese.

Palavras-chave: Relâmpagos. Raios. Descargas Atmosféricas. Sistemas de Alerta de Raios. Sensores de Campo Elétrico Atmosférico.

LIGHTNING WARNING SYSTEM USING ATMOSPHERIC ELECTRIC FIELD SENSORS NETWORK

ABSTRACT

There is evidence that the global climate is changing and extreme events increases, as severe storms are expected in the future. Atmospheric electrical discharges, specifically the cloud-to-ground discharge or lightning, are a feature of storms that cause loss of life and damage to property and tend to increase with the increase of storms. In Brazil, over a hundred people a year are killed by lightning and annual economic losses of about one billion Reais are recorded by the electricity power sector in damage to equipment and facilities struck by lightning. Because of these facts, one grown demand for lightning monitoring and warning systems have been verified. The lightning monitoring technology currently has the lightning location systems that can locate the occurrence of lightning and thus report a storm approach of an area where people and property must be protected. However, these systems are complex, expensive and difficult to maintain. In addition, they can only report the lightning occurrence after it occurred. Another way to detect a storm approach with potential for developing lightning is measuring the local electrostatic field using sensors properly designed for this purpose. Devices known as Field Mill or EFM sensor can detect variations in the atmospheric electrostatic field when there is a storm approach with electrical activity at a distance of up to twenty kilometres. Lightning warning systems based on EFM sensors measurements are the only one able to issue warnings before the first lightning discharge occurrence within the protected area. The EFM sensors are simple devices and have lower cost compared with the lightning location systems. However, their measurements are strongly influenced by the characteristics of the site where they are installed (the charge centre height of storm clouds in the region, topography, obstructions, etc.), which may result in low rates of effective alarms or high rates of false alarm or not reported lightning. Several warning systems have been built in various parts of the world based on local measurements of EFM sensors, in most cases a single sensor installed at the site to be protected. This configuration is affected by the inherent limitations of local measurements. A network with eleven EFM sensors were integrated in the region of São José dos Campos, south-eastern Brazil, with the purpose of providing atmospheric electrostatic field measurements in real time in order to support the development of an experimental lightning warning system. With measurements collected by this network in the summer of 2013-2014 (in the South Hemisphere), an innovative solution was developed and evaluated for a lightning warning system developing, using spatially interpolated measurements, acquired from the EFM sensors network, formatted as arrays of grid points regularly spaced. The interpolation process tends to smooth out the measurements of atmospheric electrostatic field, thereby reducing the unwanted effects of discontinuous measurements, resulting in greater effectiveness of the alerts that are based on this type of information. Results of the evaluation of the effectiveness of alerts based on spatially interpolated measurements showed an

excellent response in the method, with high rates for the statistical indices of effective alarms and low rates of false and not reported alarms if compared with assessments found in the literature for systems based on local pointed measurements. These results encourage the continuation of this research, opening up prospects for future work, using the proposed and evaluated method presented in this thesis.

Keywords: Lightning. Lightning Flash. Atmospheric Electric Discharges. Lightning Warning Systems. Atmospheric electric field sensors.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Variação do potencial elétrico atmosférico com a altitude.	12
Figura 2.2 - Curva Carnegie.....	12
Figura 2.3 – Atividade global de relâmpagos.	13
Figura 2.4 - Circuito elétrico global simplificado.	15
Figura 2.5 - Camadas da Atmosfera e Condutividade Elétrica	16
Figura 2.6 - Modelo de Estrutura Elétrica de Nuvem de Tempestade.....	22
Figura 2.7 - Campo elétrico e densidade de correntes de Maxwell associadas a uma nuvem de tempestade.....	23
Figura 2.8– Medição de campo elétrico atmosférico durante uma tempestade.	25
Figura 2.9 – Tipos de relâmpagos.....	27
Figura 3.1 - Espectro da componente elétrica de radiação observado a 20 Km de distância da base do canal de um típico raio negativo.	33
Figura 3.2- Espectro da componente elétrica de radiação observado a 20 Km de distância da base do canal de um típico raio negativo.	34
Figura 3.3– Propagação da radiação emitida por um relâmpago nas diversas faixas de radiofrequência.	34
Figura 3.4 - Método do tempo de chegada (TOA) para localização do ponto de contato de uma descarga de retorno com o solo.....	36
Figura 3.5- Funcionamento do sensor EFM.....	41
Figura 3.6 - Esquema de detecção do campo elétrico atmosférico em um EFM.	42
Figura 3.7 - Instalação ideal do sensor EFM nivelado com o solo.....	44
Figura 3.8 – Instalação elevada do sensor EFM.	45
Figura 3.9 - Determinação do fator de correção de <i>site</i>	46
Figura 3.10 – Gráfico de dispersão para determinação do fator de correção de <i>site</i> . ..	46
Figura 3.11 – Seleção de local para instalação do sensor EFM.	48
Figura 3.12 – Nuvem de tempestade se aproximando.	49
Figura 3.13 – Nuvem de tempestade diretamente acima.	50
Figura 3.14 – Nuvem de tempestade se afastando e Oscilação de Fim de Tempestade.	50
Figura 4.1 – Rede BrasilDAT de sensores de localização de relâmpagos (fev. 2016).....	52

Figura 4.2 – Sensor “WeatherBug Total Lightning” (círculo amarelo) e sensores meteorológicos.....	53
Figura 4.3 - Sensor Vaisala EFM550.....	56
Figura 4.4 - Diagrama de blocos da integração do sensor Vaisala EFM550.....	57
Figura 4.5 - Vista dos componentes internos da caixa hermética utilizada para integração do sensor EFM550 Vaisala.....	59
Figura 4.6 – Tripé metálico com o sensor EFM550 Vaisala, caixa hermética e painel solar instalados em campo.	59
Figura 4.7 – Sensor Campbell CS110 com <i>datalogger</i> CR1000 acoplado.	60
Figura 4.8 – Kit modem celular 3G (em detalhe) desenvolvido para os sensores EFM Campbell Scientific CS110.	62
Figura 4.9 – Formato codificado de saída do Módulo de Processamento de Dados do sensor EFM 550 Vaisala.	63
Figura 4.10 – Exemplo de tela gráfica para visualização do campo elétrico atmosférico medido por um sensor EFM.	65
Figura 4.11 – Tela do sistema de supervisão da rede de sensores EFM.	66
Figura 4.12 – Localizações e áreas de cobertura dos sensores EFM do DCTA.IAE (círculos amarelos) e dos sensores EFM do INPE.ELAT (círculos vermelhos).	67
Figura 4.13 - Medições do campo elétrico atmosférico e distâncias para as descargas atmosféricas de um sensor da rede integrada de sensores EFM.	69
Figura 5.1 – Método das duas áreas.....	78
Figura 5.2 – Áreas AOC (0-5 km) e WA (5-10 e 10-15 km) da rede EFM.....	79
Figura 5.3 - Método de interpolação de Barnes.....	84
Figura 5.4 - Isolinhas obtidas da interpolação do campo elétrico atmosférico.	86
Figura 5.5 – Grade e imagem da matriz de pontos dos valores do campo elétrico atmosférico interpolado de 31/03/2014 à 16:41 GMT.....	88
Figura 5.6 – Ilustração do processo de extração de séries temporais de dados das matrizes de pontos.	89
Figura 6.1 - Número total de eventos de alarme e de medições.....	92
Figura 6.2 - Eventos EA, FA e FTW para cada sensor EFM com DT 30 minutos.....	93
Figura 6.3 - Eventos EA, FA e FTW para cada sensor EFM com DT 45 minutos.....	94
Figura 6.4 – Total de eventos com DT 30 minutos e DT 45 minutos.	95
Figura 6.5 – Localização dos 27 pontos de interesse (quadrados vermelhos).....	100
Figura 6.6 – Percentuais de eventos e parâmetros estatísticos para DT com 30 e 45 minutos para medições interpoladas.....	101
Figura 6.7 – Variação de FA, EA e FTW com o nível crítico de campo com DT 30 minutos para medições interpoladas.	102

Figura 6.8 - Variação de FA, EA e FTW com o nível crítico de campo com DT 45 minutos para medições interpoladas.	102
Figura 6.9 - POD e FAR para DT com 30 e 45 minutos para medições interpoladas. ...	104
Figura 6.10 – Tempo de antecipação (Lead Time – LT) para medições interpoladas. .	104
Figura A.1 - Trecho da planilha de eventos EA, FA e FTW e cálculo do LT médio.....	119
Figura B.1 – Número total de EA com DT 30 min.....	121
Figura B.2 - Número total de FA com DT 30 min.....	122
Figura B.3 – Número total de FTW com DT 30 min.....	123
Figura B.4 – Número total de EA com DT 45 min.....	124
Figura B.5 - Número total de FA com DT 45 min.....	125
Figura B.6 – Número total de FTW com DT 45 min.....	126
Figura C.1 - POD com DT 30 minutos.	127
Figura C.2 – FAR com DT 30 minutos.	128
Figura C.3 - POD com DT 45 minutos.	129
Figura C.4 – FAR com DT 45 minutos.	130

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Características dos três tipos principais de sistemas para localização de descargas atmosféricas (LLS).....	38
Tabela 4.1 - Exatidão de Localização e Eficiência de Detecção estimadas para rede de sensores “WeatherBug Total Lightning” da BrasilDAT.....	53
Tabela 4.2 – Rede integrada de sensores EFM.....	68
Tabela 5.1 – Resumo da análise para determinação da reta de ajuste para os sensores EFM550.....	74
Tabela 5.2 - Estrutura da tabela raio	75
Tabela 5.3 - Estrutura da tabela efm	76
Tabela 5.4 - Estrutura da tabela loc_efm	76
Tabela 5.5 - Tabela de contingência	80
Tabela 6.1 - Medições válidas e coeficiente de rendimento da série de dados.	92
Tabela 6.2 - Resumo comparativo com estudos encontrados na literatura.....	98
Tabela 6.3 – Comparação entre medições pontuais e medições interpoladas.	105

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Premissa	6
1.2. Objetivo geral	6
1.3. Objetivos específicos	7
1.4. Organização da tese	7
1.5. Justificativa e contribuição da tese	8
2. DESCRIÇÃO DO FENÔMENO FÍSICO: CONCEITOS BÁSICOS	11
2.1. Eletricidade atmosférica: circuito elétrico global.....	11
2.2. Estrutura elétrica da atmosfera	15
2.2.1. Camada limite planetária - CLP	17
2.2.1.1. Produção de íons na CLP	17
2.2.1.2. Condutividade na CLP	17
2.2.1.3. Campo elétrico na CLP	18
2.2.2. Atmosfera inferior	18
2.2.2.1. Produção de íons na atmosfera inferior	18
2.2.2.2. Condutividade na atmosfera inferior.....	18
2.2.2.3. Campo elétrico na atmosfera inferior	19
2.2.3. Atmosfera média	19
2.2.3.1. Produção de íons na atmosfera média.....	19
2.2.3.2. Condutividade na atmosfera média.....	19
2.2.3.3. Campo elétrico na atmosfera média.....	20
2.3. Processos de eletrização das nuvens de tempestade	20
2.4. Estrutura elétrica das nuvens de tempestade	21

2.5.	Campo elétrico atmosférico em nuvens de tempestade.....	22
2.6.	Descargas elétricas atmosféricas.....	25
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: TECNOLOGIAS DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	29
3.1.	Clarão e trovão.....	30
3.2.	Detectores acústicos.....	30
3.3.	Detectores óticos.....	30
3.4.	Emissões eletromagnéticas de relâmpagos.....	31
3.5.	Redes de localização de relâmpagos - LLS.....	32
3.5.1.	Espectro eletromagnético dos relâmpagos.....	32
3.5.2.	Métodos de localização de relâmpagos.....	35
3.5.2.1.	Método de localização TOA ou tempo de chegada.....	35
3.5.3.	Classificação das redes de localização pela linha de base.....	36
3.5.4.	Exatidão e eficiência de detecção.....	37
3.6.	Medição do campo elétrico atmosférico.....	38
3.6.1.	Princípio de funcionamento do sensor EFM.....	41
3.6.2.	Calibração de fábrica do sensor EFM.....	43
3.6.3.	Fator de correção de <i>site</i> do sensor EFM.....	44
3.6.4.	Critérios para seleção do local de instalação do sensor EFM.....	47
3.6.5.	Interpretação das medições de um sensor EFM.....	49
3.6.5.1.	Nuvem de tempestade se aproximando.....	49
3.6.5.2.	Nuvem de tempestade diretamente acima.....	49
3.6.5.3.	Nuvem de tempestade se afastando.....	50
4.	INSTRUMENTAÇÃO.....	51
4.1.	Rede de localização de relâmpagos BrasilDAT.....	51

4.2.	Rede de sensores EFM.....	54
4.2.1.	Integração do sensor EFM550 Vaisala	55
4.2.2.	Integração do Sensor CS110 Campbell Scientific.....	60
4.2.3.	Desenvolvimento de Software.....	62
4.2.4.	Localização geográfica dos sensores EFM.....	66
4.2.5.	Medições realizadas pela rede de sensores EFM.....	69
5.	DADOS E METODOLOGIA	71
5.1.	Área e período de estudo.....	71
5.2.	Base de dados	71
5.3.	Preparação dos dados de campo elétrico atmosférico.....	73
5.4.	Ajuste das séries de dados dos sensores EFM Vaisala.....	73
5.5.	Estruturação do banco de dados geográfico.....	75
5.6.	Método das duas áreas para avaliação de sistemas de alerta.....	78
5.7.	Critérios de alerta.....	81
5.8.	Planilhas de eventos de alarme	82
5.9.	Interpolação das medições de campo elétrico atmosférico.....	82
5.10.	Extração de séries temporais das matrizes de pontos.....	88
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
6.1.	Avaliação de alertas de medições pontuais dos EFM.....	91
6.2.	Avaliação de alertas de medições interpoladas dos EFM.....	98
6.3.	Comparação entre medições pontuais e medições interpoladas	105
7.	CONCLUSÕES	107
7.1.	Perspectivas para trabalhos futuros.....	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
	APÊNDICE A – PLANILHA DE EVENTOS EA, FA E FTW.....	119

APÊNDICE B – GRÁFICOS DE EVENTOS EA, FA E FTW	121
APÊNDICE C – GRÁFICOS DE POD E FAR	127

1. INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos podem ser muito destrutivos, tendo como resultado a precipitação de granizo, os tornados, as tempestades com descargas elétricas atmosféricas, os furacões e as chuvas intensas que podem ocorrer em períodos curtos de tempo, muitas vezes, também resultando em inundações repentinas. Nos últimos 50 anos houve um aumento significativo nos danos causados por eventos climáticos extremos, aumentando a cada década os custos econômicos decorrentes destes danos (BOURNAY; UNEP/GRID-ARENDAL, 2012). A causa deste grande aumento é discutível. Por um lado, há evidências de que o clima global está mudando e aumentos de eventos climáticos extremos estão previstos para o futuro (MCKEOWN; GARDNER, 2009). Por outro lado, com a crescente população do mundo, mais pessoas estão vivendo em perigo. Ambos os aspectos tendem a aumentar drasticamente e daí a importância de monitorar e compreender esses eventos.

Embora o melhor monitoramento e detecção destes eventos climáticos extremos não reduzam o número ou a gravidade desses eventos, o alerta precoce pode reduzir significativamente a perda de vidas e evitar prejuízos econômicos causados pelos danos decorrentes destes eventos. Enquanto muitos países desenvolvidos têm redes de radares para rastrear tempestades e precipitação, a maioria do mundo não é coberta por tais sistemas de observação, como por exemplo, grande parte do território brasileiro. Os satélites podem fornecer estimativas globais de chuva, no entanto, os satélites geoestacionários apresentam resolução espacial pobre, enquanto os satélites com órbita polar apresentam cobertura temporal insuficiente para rastrear tempestades. Desde que as tempestades intensas podem se desenvolver em menos de uma hora e durar apenas algumas dezenas de minutos, há necessidade de se desenvolver sensores e sistemas para monitorar de forma contínua tais tempestades.

As descargas elétricas atmosféricas, também conhecidas por relâmpagos ou raios, sendo os raios definidos como relâmpagos que atingem o solo, é uma

característica de tempestades intensas que podem ser monitoradas continuamente e de grandes distâncias com a tecnologia atual dos sistemas de localização de descargas atmosféricas (LLS) que disponibilizam informações em tempo real. Essa tecnologia, de custo relativamente baixo se comparado aos custos de radares e satélites, tem sido largamente utilizada em vários países, para a implementação de sistemas de alerta e prevenção contra os danos causados por raios em empreendimentos e locais, como por exemplo, no setor de geração e distribuição de energia elétrica, na aviação, na indústria do petróleo e gás e nas cidades em geral.

Do ponto de vista meteorológico, o uso de sistemas de localização de descargas atmosféricas para rastrear as regiões de atividades das tempestades fornece informações valiosas sobre a instabilidade de massas de ar e a localização e movimentação das frentes. Também na previsão de tempo de curto e curtíssimo prazo (*nowcasting*) o movimento e a severidade de uma tempestade (ligada à atividade de tempestades elétricas) podem levar à transmissão de um alerta geral para o público sobre o perigo que se aproxima. Esta informação é de grande importância, por exemplo, para a aviação, já que as tempestades podem causar movimentos instáveis de massas de ar, como as ventanias descendentes (*downbursts*) e micro explosões (*microbursts*), que podem levar à perda da sustentação dos aviões durante as operações de pousos e decolagens. Nos aeroportos, as descargas atmosféricas representam um perigo claro e imediato para o pessoal de terra envolvido em operações ao ar livre, tais como o abastecimento de aviões, manuseio de bagagens, serviço de alimentação e operações de reboque para condução das aeronaves para os seus respectivos portões de embarque (POELMAN, 2010).

Outros setores também utilizam as informações de localização de descargas atmosféricas, como o setor de geração e distribuição de energia elétrica e o setor do petróleo e gás, os quais são altamente vulneráveis às descargas atmosféricas. No Brasil, por exemplo, cerca dos 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição de energia elétrica são provocados por raios.

São estimados prejuízos anuais de R\$ 1 bilhão com danos causados por raios no Brasil (INPE.ELAT, 2015).

Do ponto de vista de acidentes com pessoas, uma extrapolação bastante genérica de seis mortes por milhão de pessoas se aplicada a quatro bilhões de pessoas (população mundial) resulta em uma estimativa de 24.000 mortes e 240.000 feridos por raios por ano no mundo (HOLLE, 2012). Uma outra estimativa de Cardoso et al. (2011a) sugere que este número possa ser menor. Nos Estados Unidos, nos últimos 30 anos, as mortes por raios ocupam o segundo lugar no ranking de mortes por desastres naturais, equiparando-se ao número de mortes devido a tornados e inferior apenas ao número de mortes causados pelas inundações, que ocupa o primeiro lugar neste ranking (NOAA, 2014). Também nos Estados Unidos ocorreram 322 mortes por raios entre os anos de 2005 e 2014, com 14% destas ou 47 mortes na Flórida (HOLLE, 2015). No Brasil, ocorrem em média 132 mortes por ano devido a raios, a quinta posição nesta fatalidade entre os países do mundo com estatísticas confiáveis, sendo que entre os anos de 2000 e 2009 morreram 1.321 pessoas atingidas por raios e as atividades agropecuárias são a causa principal destas fatalidades (CARDOSO, 2011b).

O impacto da ocorrência de raios em locais e instalações operacionais, tais como linhas de transmissão, subestações e usinas de energia elétrica, sistemas de telecomunicações, aeroportos, instalações industriais, refinarias de petróleo e gás, parques públicos urbanos e rurais, campings, parques de diversões, praças de esportes em geral, praias e locais de entretenimento em campo aberto como arenas de grandes shows e exposições, locais de atividades agropecuárias, áreas operacionais de transportes rodoviário, ferroviário, marítimo (portos) e fluvial (hidrovias), é amplamente reconhecido como sendo questão de segurança e operacionalidade.

Todas estas implicações fazem com que os sistemas de alerta de raios sejam de grande interesse para diversos setores da sociedade, sendo que cada

aplicação requer graus variáveis de exatidão dos níveis de alerta de ocorrência de raios que dependem da vulnerabilidade da área de interesse. Além disso, estudos sugerem um aumento na incidência de raios devido ao crescimento urbano (NACCARATO; PINTO JUNIOR, 2003) e ao aquecimento global (ROMPS *et al.*, 2014; PINTO JUNIOR; PINTO, 2008).

O estudo de Lengyel (2005) mostra que cerca da metade dos acidentes fatais por raios resultam de uma das primeiras descargas atmosféricas em uma tempestade e um número significativo de acidentes fatais resultam do retorno às atividades ao ar livre antes que as descargas atmosféricas tenham cessado. No intervalo destes eventos, quando o perigo de ocorrência de raios é óbvio, ocorrem poucos acidentes fatais. Conclui-se que o início e o fim das atividades de descargas atmosféricas são períodos importantes e críticos para a segurança das pessoas e do patrimônio.

Os sistemas de localização de relâmpagos, também conhecidos pela sigla LLS (do inglês, *Lightning Location System*), podem localizar relâmpagos com eficiência de detecção maior que 80% e exatidão de localização menor do que 500 m, devido a uma rede de sensores precisos que detectam a radiação eletromagnética dos relâmpagos (NACCARATO, 2005). Entretanto, as redes LLS são sistemas complexos de medição, que apresentam custos elevados de instalação e manutenção e, além disso, não possuem capacidade imediata para prever a ocorrência da primeira descarga atmosférica ou raio, porque seus sensores são ativados somente após a ocorrência da descarga.

Uma outra maneira de se detectar a aproximação de uma tempestade com potencial para desenvolver raios é a medição do campo elétrico atmosférico no local onde é necessária a proteção ou, pelo menos, a diminuição do impacto da ocorrência de raios. Os sensores de campo elétrico atmosférico, conhecidos pela sigla EFM (do inglês, *Electric Field Mill*), que são dispositivos mais simples e de custo bem menor do que os complexos sensores de uma rede LLS, realizam estas medições diretamente acima e no entorno do local onde está instalado,

chegando a um alcance de até 20 km. Os sistemas de alerta de raios baseados em sensores EFM são os únicos com potencial para proporcionar aviso prévio da primeira ocorrência de raio de uma tempestade em desenvolvimento. Esta capacidade, faz com que esses sistemas sejam particularmente interessantes para aplicações onde o tempo de resposta é crítico, tais como parques, os campos de futebol e as arenas de shows ao ar livre onde se gastaria muito tempo para a retirada das pessoas.

Diversos sistemas de alerta de raios foram desenvolvidos apoiados em medições realizadas por sensores de campo elétrico atmosférico (MURPHY *et al.*, 2008; ARANGUREN *et al.*, 2005; MONTANYÀ *et al.*, 2004; BERGAS; HERMOSO, 2004; SIDIK *et al.*, 2014). Também diversos estudos foram realizados para avaliação da efetividade de sistemas de alerta baseados em medições de sensores de campo elétrico atmosférico (NACCARATO *et al.*, 2008a; ARANGUREN *et al.*, 2011; FERRO *et al.*, 2012; LÓPEZ *et al.*, 2012). Ressalta-se que estes sistemas de alerta e os correspondentes estudos de avaliações de efetividade de alerta foram todos suportados por medições pontuais realizadas por sensores de campo elétrico atmosférico, sendo fortemente influenciadas pelas características do local onde se encontram instalados (altura do centro de carga das nuvens de tempestade na região, posição relativa da nuvem de tempestade e topografia, por exemplo), o que pode resultar em medições errôneas e inaceitáveis para o acionamento de alertas, resultando em baixos índices de alarmes efetivos ou altos índices de alarmes falsos ou não reportados, conforme os estudos de avaliação de efetividade citados acima demonstraram.

Tendo em vista as deficiências inerentes aos sistemas de alerta de ocorrência de raios baseados em sensores EFM, a questão científica do presente estudo, pauta-se no seguinte questionamento: é possível melhorar a efetividade dos alarmes de ocorrências de raios emitidos por estes sistemas? Qual técnica deve ser utilizada?

1.1. Premissa

Buscando a melhoria da efetividade dos alertas de ocorrência de raios emitidos por sistemas baseados em sensores EFM, esta tese é direcionada para apresentação de uma proposta metodológica, baseada em uma técnica de interpolação espacial que promove a distribuição espacial das medições do campo elétrico atmosférico realizadas pontualmente por sensores de campo elétrico atmosférico, tendo como produto uma matriz de valores de medição de campo elétrico atmosférico distribuídos regularmente pela área de cobertura dos sensores. O resultado da aplicação desta técnica de interpolação sobre as medições pontuais dos sensores é a representação do comportamento espacial do campo elétrico na região, eliminando as discrepâncias inerentes da medição pontual dos sensores. Dessa forma, o campo elétrico atmosférico poderá ser avaliado em toda região, independentemente de onde se encontram instalados os sensores EFM. Isto permite a ativação de alarmes em qualquer local, dentro área de cobertura dos sensores, que necessite ser notificado previamente da possível ocorrência de raios, não necessitando que algum sensor esteja instalado no local em questão. Além disto, a matriz de valores de campo elétrico atmosférico interpolado é formatada para leitura em qualquer sistema de informações geográficas (SIG), permitindo a superposição e realização de análises complexas realização, com dados de diversas outras fontes de informações georreferenciadas, como por exemplo, dados de localização de descargas atmosféricas (LLS), de estações meteorológicas de superfície (PCD ou AWS), imagens de satélites e de radar, mapas de previsão meteorológica numérica, etc.

1.2. Objetivo geral

Desenvolvimento e avaliação da efetividade de um sistema de alerta de ocorrência de raios baseado nas medições interpoladas espacialmente de uma rede de sensores de campo elétrico atmosférico.

1.3. Objetivos específicos

- a) Integração e estruturação (*hardware e software*) de uma rede de sensores de campo elétrico atmosférico para geração e transmissão de dados em tempo real. Este trabalho de engenharia é parte dos esforços realizados pelo autor para subsidiar os estudos desta tese.
- b) Avaliação da efetividade dos alarmes disparados por níveis pontuais de campo elétrico medidos individualmente em cada sensor da rede, considerando o centro da área a ser protegida os locais onde estão instalados os sensores.
- c) Avaliação da efetividade dos alarmes disparados por níveis interpolados de campo elétrico atmosférico medidos coletivamente pelos sensores da rede, considerando como centro da área a ser protegida qualquer local dentro da cobertura dos sensores, excetuando-se os locais onde estão instalados os sensores.
- d) Análise comparativa da efetividade entre os alertas obtidos dos níveis individuais dos sensores e dos níveis interpolados da rede de sensores.

1.4. Organização da tese

Esta tese está organizada da seguinte forma:

O capítulo 2 introduz os conceitos básicos de eletricidade atmosférica e descargas atmosféricas, descrevendo o fenômeno físico envolvido neste trabalho.

O capítulo 3 faz uma revisão bibliográfica das tecnologias de detecção e localização de descargas atmosféricas, com ênfase nos sistemas de localização (LLS) que utilizam emissões eletromagnéticas dos relâmpagos e nos sensores de campo elétrico atmosférico (EFM).

O capítulo 4 apresenta a rede de localização de relâmpagos BrasilDAT cujos dados foram utilizados para validar o sistema de alerta de raios e descreve os detalhes da integração e implantação da rede de sensores de campo elétrico atmosférico como parte do desenvolvimento deste trabalho na geração dos dados de campo elétrico atmosférico utilizados neste trabalho.

O capítulo 5 descreve metodologia para determinação e avaliação dos níveis de alerta obtidos individualmente das medições de cada sensor EFM e dos níveis de alerta obtidos da interpolação espacial das medições de campo elétrico atmosférico de todos os sensores EFM que compõem a rede.

O capítulo 6 discute os resultados obtidos da avaliação da efetividade do sistema de alerta, considerando os alertas obtidos dos níveis individuais dos sensores EFM e dos níveis interpolados obtidos das medições de campo elétrico atmosféricos da rede de sensores EFM.

O capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho e, com base nos resultados das avaliações de desempenho do sistema de alerta de raios, propõe futuras investigações e desenvolvimentos.

1.5. Justificativa e contribuição da tese

No Brasil existe uma demanda crescente por sistemas de monitoramento e alerta de ocorrência de raios que, face ao aumento de ocorrências que resultam em perdas de vidas e perdas econômicas, justifica plenamente o desenvolvimento desta tese.

A geração de matrizes de pontos de campo elétrico atmosférico interpolado espacialmente e a sua aplicação na avaliação de um sistema de alerta de raios, são a contribuição mais importante desta tese para ampliação do conhecimento e aplicação no desenvolvimento de sistemas de alerta de raios baseados em redes de sensores de campo elétrico atmosférico.

Esta tese é multidisciplinar, pois utilizou conhecimentos e ferramentas das áreas de Eletricidade Atmosférica, Meteorologia, Geoprocessamento e Engenharias Elétrica e Eletrônica e de Instrumentação Ambiental, inserindo-se na linha de pesquisa de “Tecnologias para Mitigação e Adaptação” do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre (INPE.PGCST, 2011), que tem como objetivo propor de novas estratégias para mitigação e adaptação às mudanças climáticas globais com base nas aplicações de engenharia e tecnologia com foco na pesquisa de sistemas de prevenção e alerta de desastres naturais, como os relâmpagos que, de certa forma são indicadores de tempestades severas e, que podem por sua vez serem utilizados para alertar do perigo iminente que se aproxima de uma área de interesse onde existam pessoas e instalações operacionais vulneráveis à ocorrência de raios, beneficiando assim a sociedade e os seus diversos setores produtivos.

2. DESCRIÇÃO DO FENÔMENO FÍSICO: CONCEITOS BÁSICOS

2.1. Eletricidade atmosférica: circuito elétrico global

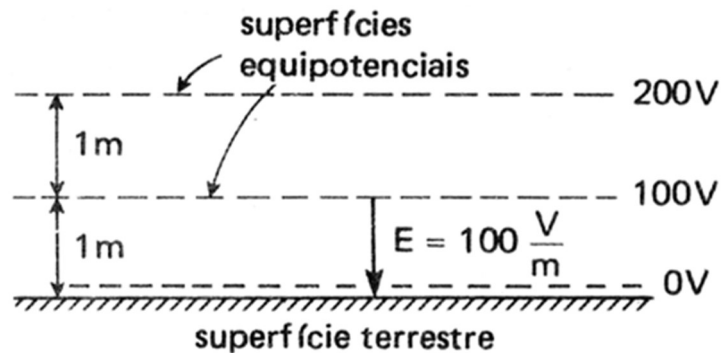
A eletricidade presente na atmosfera tem como causas principais a ionização do ar e a presença do campo elétrico devido à atividade elétrica global do planeta bem como de fatores locais devido aos fenômenos que ocorrem na camada limite planetária da atmosfera. Devido a existência de radiações de materiais radioativos no solo, radiações ultravioleta e raios cósmicos, a atmosfera apresenta íons positivos e negativos. O campo elétrico terrestre movimenta estes íons.

Em condições de tempo bom (céu livre de nuvens, ou quando muito na presença de nuvens dos tipos *Cirrus* ou *Altostratus*) existe um campo elétrico vertical de 100 V/m, apontando para baixo, da carga positiva, distribuída na atmosfera próximo à superfície da Terra, para a carga negativa, distribuída na superfície da Terra. O vetor campo elétrico voltado para a superfície terrestre significa que nesta se distribuem as cargas elétricas negativas. De acordo com a convenção de sinais da física, o campo voltado para baixo é negativo porque se encontra na direção oposta do vetor da coordenada radial do sistema esférico cuja origem é o centro da Terra. Uma corrente positiva é induzida por um campo direcionado para cima, o qual é definido como positivo.

O valor do campo elétrico pode ser afetado por diversos fatores, dentre eles a poluição, a nebulosidade e a turbulência atmosférica, de forma que as quantidades relacionadas à eletricidade atmosférica são parâmetros sensíveis às condições meteorológicas locais e às variações climáticas.

Em um dia comum o potencial elétrico aumenta 100V/m a medida que se afasta da superfície (Figura 2.1). O que indica que há um campo elétrico de 100V/m no ar que aumenta com a altitude. A 50 km de altitude o campo já é muito pequeno, ocorrendo as maiores variações no potencial em baixas altitudes. A diferença total de potencial da superfície ao topo da atmosfera pode chegar a 400 kV.

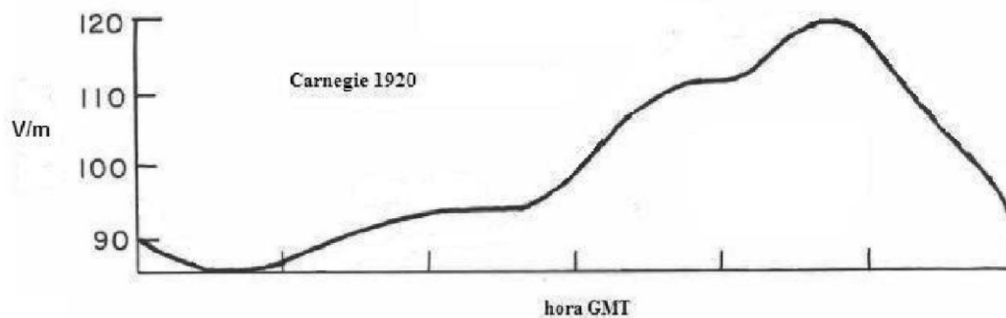
Figura 2.1 - Variação do potencial elétrico atmosférico com a altitude.



Fonte: FISICANET (2016).

Em 1920 cientistas à bordo do navio Carnegie, da instituição Carnegie de pesquisas dos Estados Unidos, durante uma viagem de pesquisa pelos mares da Terra, realizaram edições de campo elétrico de tempo bom produzindo uma curva (Figura 2.2) do valor do campo elétrico ao longo dia em função da hora GMT, conhecida como "Curva Carnegie".

Figura 2.2 - Curva Carnegie



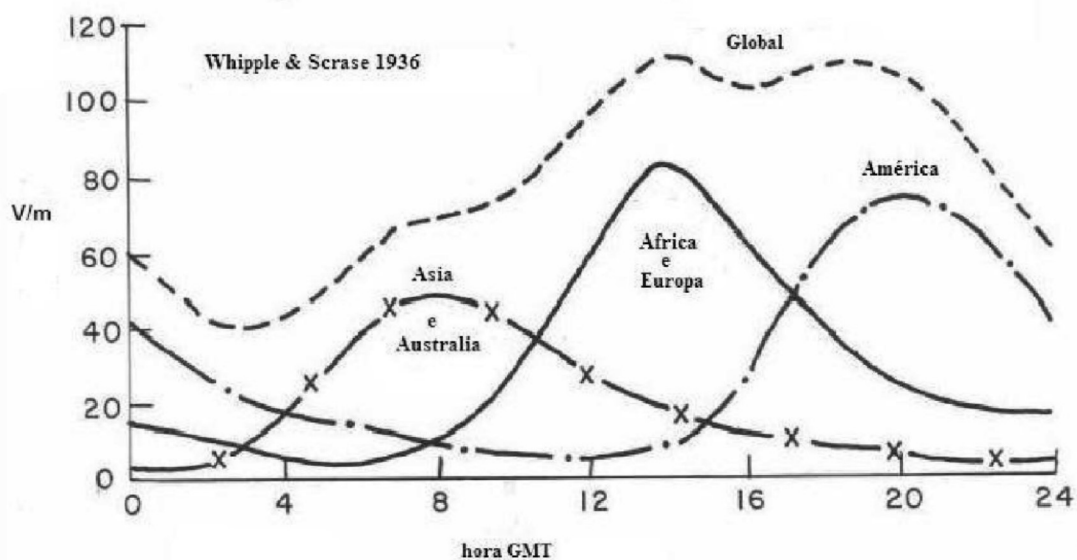
Fonte: Adaptado de Whipple e Scrase (1936).

Estas medições apontaram para um pico às 19h GMT, horário de Londres. Este pico acabou sendo verificado em outros locais do planeta, entretanto, todos os picos medidos aconteceram quando o relógio de Londres apontava para às 19h GMT, ou seja, o campo elétrico da Terra atinge um valor máximo em um tempo

absoluto no planeta, e não depende do tempo verificado no local onde está sendo realizada a medição. Também foi verificado um horário de valor mínimo para o campo elétrico às 4h GMT. O instante de máxima e de mínima do campo elétrico coincide com o instante de máxima e de mínima ocorrência de tempestades com relâmpagos nos continentes. O fato do valor médio da intensidade do campo elétrico ser máximo ou mínimo em todos os locais da Terra no mesmo instante é devido a elevada condutividade da ionosfera que distribui rapidamente qualquer excesso de carga que recebe.

Whipple e Scrase (1936) em sua pesquisa apresentaram um gráfico (Figura 2.3) de atividades de relâmpagos em todos continentes: Ásia e Austrália, África e Europa e Américas, mostrando que todas estas atividades se moldam perfeitamente com a Curva Carnegie, concluindo que as variações diurnas de campo elétrico são resultado da atividade global de relâmpagos.

Figura 2.3 – Atividade global de relâmpagos.



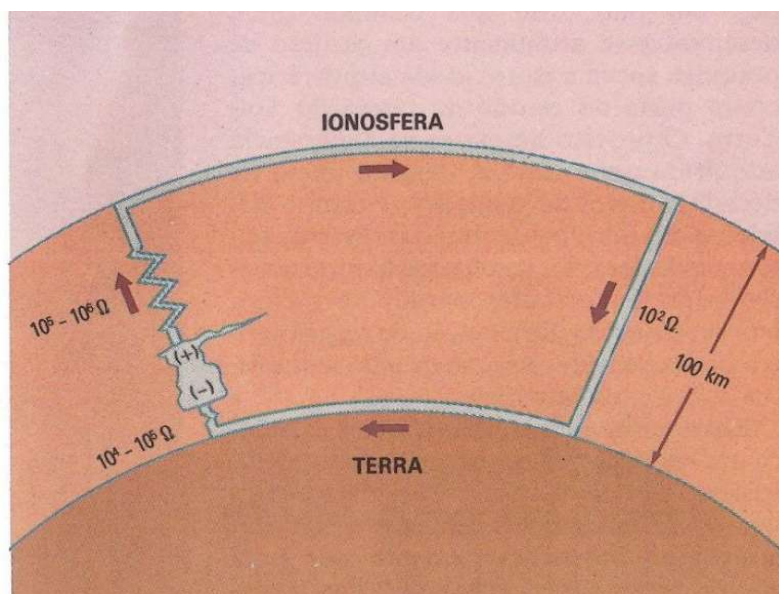
Fonte: Adaptado de Whipple e Scrase (1936).

A atividade global de relâmpagos e a curva Carnegie mostram correlação geral. No entanto, várias discrepâncias são observadas, a mais notável é que a curva Carnegie não mostra uma máxima para a forte atividade de relâmpagos que ocorre na África e Europa.

Em 1920, C. T. R. Wilson propôs o primeiro modelo do circuito elétrico atmosférico, onde considerou a Terra como sendo um capacitor esférico, um circuito elétrico com separação de cargas entre a ionosfera (região da atmosfera a aproximadamente 50 km de altitude) e a superfície da Terra, consideradas as placas do capacitor. O dielétrico deste capacitor é o ar cuja condutividade é muito baixa quando comparada com a condutividade do solo, que por sua vez é da mesma ordem de grandeza da ionosfera. Esta hipótese é conhecida como a teoria do capacitor esférico. Neste capacitor esférico os íons positivos e negativos são os portadores de carga e estão separados, originando uma diferença de potencial da ordem de 200 kV. Uma vez que o ar não é um isolante perfeito, existe uma corrente de fuga vertical de cargas livres entre a ionosfera, a aproximadamente 50 km de altitude, e a superfície terrestre (eletricamente negativa) em toda superfície da Terra. Esta corrente de fuga pode ser calculada multiplicando a densidade de corrente em tempo bom pela área da superfície da Terra, resultando em uma corrente total do capacitor de cerca de 1000 A, capaz de descarregar o capacitor em aproximadamente 10 minutos. Esta constatação ficou conhecida como problema fundamental da eletricidade atmosférica (RAKOV; UMAN, 2003). Para resolver este problema, mantendo o capacitor esférico carregado, a atividade de relâmpagos em todo o planeta foi suposta atuar como um gerador de corrente separando cargas e causando o transporte de cargas positivas da Terra para a ionosfera na mesma razão de 1000 A. Estima-se que existem cerca de 1000 tempestades com relâmpagos ocorrendo sobre cerca de 10% da superfície da Terra, cada uma gerando uma corrente média de 1 A. No fim os dois efeitos se compensam e o capacitor se mantém carregado. Como ilustrado na Figura 2.4, no circuito, a corrente circula do topo das nuvens, região carregada positivamente, para a ionosfera. Segue pelos

caminhos de alta condutividade desta camada e complementa o circuito retornando ao solo pela região de tempo bom (região sem tempestades). O percurso da corrente se completa na região abaixo da nuvem, onde sua base é carregada negativamente, por meio de relâmpagos. Dessa maneira, assume-se que os relâmpagos mantenham a carga negativa sobre a superfície da Terra participando do equilíbrio do circuito elétrico global.

Figura 2.4 - Circuito elétrico global simplificado.



Fonte: ACADEMIA.EDU (2016).

2.2. Estrutura elétrica da atmosfera

A corrente de fuga que circula através da atmosfera é consequência da existência de íons, positivos e negativos, e/ou de elétrons livres que se deslocam sob a ação do campo elétrico atmosférico. Os agentes que produzem estes íons, o tipo de portador de carga que é responsável pela condutividade (elétrons ou íons) e a variação do campo elétrico vertical, dependem da região da atmosfera que se está analisando. Portanto, para compreensão destes fenômenos é necessário um entendimento das regiões da atmosfera terrestre que para fins de estudo foram divididas em camadas (Figura 2.5) que podem ser classificadas:

a) Quanto à temperatura:

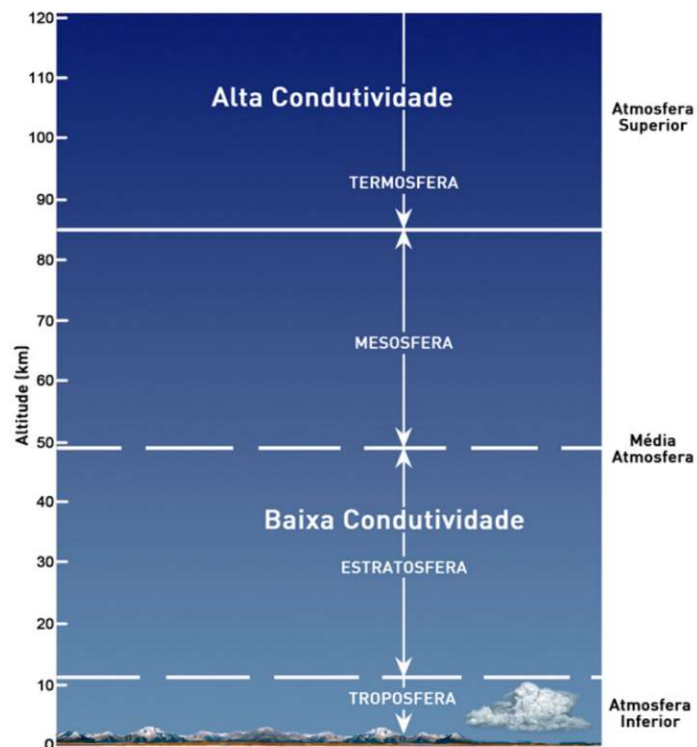
- Troposfera
- Estratosfera
- Mesosfera
- Termosfera

b) Quanto à quantidade de íons e condutividade:

- Camada limite planetária - CLP
- Atmosfera inferior (troposfera)
- Atmosfera média (estratosfera e mesosfera)
- Atmosfera superior

A seguir são detalhadas as camadas CLP, inferior e média as quais são de interesse para o estudo da eletricidade atmosférica e da formação dos raios.

Figura 2.5 - Camadas da Atmosfera e Condutividade Elétrica



Fonte: INPE.ELAT (2015).

2.2.1. Camada limite planetária - CLP

A camada limite planetária ou CLP é a região acima da superfície da Terra, que possui uma espessura de dezenas de metros até 3 km acima do solo, dependendo da rugosidade do terreno. A presença da superfície da Terra influencia a concentração de íons, aerossóis e partículas radioativas através da distribuição de ventos, temperatura e vapor d'água. O escoamento dentro desta camada próxima a superfície resulta em turbulência. Devido à proximidade da CLP em relação à superfície da Terra, a maioria das medidas elétricas na atmosfera é feita nesta camada.

2.2.1.1. Produção de íons na CLP

Os íons existentes na CLP sobre os continentes são criados por radiação emitida diretamente da Terra e por radiação emitida por substâncias radioativas no solo, como Urânio e Tório. Sobre os oceanos a ionização tem como principal fonte os raios cósmicos.

2.2.1.2. Condutividade na CLP

A condutividade da atmosfera pode ser definida como sendo a facilidade com que ela conduz a corrente elétrica. A densidade de íons na CLP depende da intensidade do campo elétrico atmosférico. Desta forma, a condutividade da CLP também depende da intensidade do campo elétrico atmosférico, ou seja, a condutividade nesta região da atmosfera é não ôhmica (HOPPEL *et al.*, 1986). Devido à baixa concentração de íons nesta camada a condutividade é considerada baixa. Além da redução da condutividade em função da redução da altitude, o outro efeito que pode produzir carga espacial próximo ao solo é o efeito eletrodo. Pela ação deste efeito, as cargas negativas, presentes na superfície terrestre, repelem os íons negativos da atmosfera próxima ao solo, que se deslocam verticalmente para cima. Estes íons negativos não são repostos na mesma proporção pelas fontes radioativas do solo o que resulta próximo ao solo uma carga positiva.

2.2.1.3. Campo elétrico na CLP

Na região da atmosfera de menor condutividade, próxima ao solo, há maior concentração de cargas elétricas positivas do que a uma altitude de 10 km, onde a condutividade é muito grande. A maior concentração de cargas elétricas próximo ao solo, devido ao efeito eletrodo, faz com que o campo elétrico seja mais intenso neste ponto. Na ausência de movimentos turbulentos, o campo elétrico tende a se estabilizar a 3 metros de altitude. Por este motivo, um instrumento utilizado para a medição do campo elétrico atmosférico deve ser instalado no mínimo a esta altitude.

2.2.2. Atmosfera inferior

A atmosfera inferior compreende a troposfera (0 a 10 km) e a região da estratosfera abaixo de 30 km de altitude.

2.2.2.1. Produção de íons na atmosfera inferior

Nas regiões continentais acima da camada limite planetária e acima dos oceanos, a produção de íons ocorre pela ionização das moléculas do ar (composto principalmente por nitrogênio e oxigênio) por raios cósmicos. Sobre os continentes próximo à superfície a ocorre a ionização produzida pelos materiais radioativos que emanam do solo. Esta ionização por materiais radioativos do solo decresce com a altitude e a 1 km prevalece a ionização produzida pelos raios cósmicos.

2.2.2.2. Condutividade na atmosfera inferior

Devido à redução da densidade do ar que tem como consequência um aumento na mobilidade dos íons, a condutividade aumenta com a altitude nesta camada da atmosfera. Devido à baixa concentração de íons nesta camada a condutividade é considerada baixa para as altitudes mais baixas.

2.2.2.3. Campo elétrico na atmosfera inferior

Acima da CLP o efeito eletrodo sobre a condutividade pode ser desprezado, de modo que o valor do campo elétrico atmosférico é função somente da condutividade e da densidade da corrente de condução, de acordo com a lei de Ohm. Considerando o aumento da condutividade com a altitude e a lei de Ohm, para manter a densidade de corrente de condução constante, o campo elétrico atmosférico de tempo bom deve diminuir, na mesma proporção, com a altitude, o que não ocorre com na CLP devido ao efeito eletrodo e a turbulência.

2.2.3. Atmosfera média

É a porção da atmosfera entre 30 e 90 km de altitude. Abrange a estratosfera superior (30 a 50 km) e a mesosfera.

2.2.3.1. Produção de íons na atmosfera média

Na estratosfera superior (30 a 50 km) a principal fonte de ionização são os raios cósmicos galácticos que ionizam as moléculas de oxigênio e nitrogênio. Na estratosfera (acima de 65 km) a molécula de NO (óxido de nitrogênio) é a maior fonte diurna de ionização. Acima de 75 km, no limite superior da atmosfera média quantidade significativa de ionização é produzida por raios X e por raio ultravioleta emitidos pelo sol.

2.2.3.2. Condutividade na atmosfera média

Os pequenos íons e os elétrons livres contribuem para a condutividade. A contribuição dos elétrons livres é desprezível até 50 km de altitude, onde a condutividade é determinada pelos pequenos íons (positivos e negativos). Entre 50 e 60 km os elétrons livres e os pequenos íons contribuem significativamente para a condutividade e acima de 60 km de altitude a condutividade é determinada pelos elétrons livres.

2.2.3.3. Campo elétrico na atmosfera média

A relação entre a densidade de corrente de condução, a condutividade e o campo elétrico segue a lei de Ohm. Deve ser incluída também a contribuição dos elétrons livres na condutividade. De acordo com Reid (1986), o campo elétrico normal da atmosfera média é a soma do campo elétrico produzido pelas tempestades na atmosfera inferior (campo aponta para cima) com o campo elétrico produzido pelo gerador dínamo ionosférico e magnetosférico da atmosfera superior (campo aponta para baixo).

2.3. Processos de eletrização das nuvens de tempestade

Conforme citado anteriormente, a eletrização das nuvens de tempestade é a responsável pela manutenção da carga do capacitor esférico formado pela superfície terrestre e a ionosfera.

As nuvens convectivas, geralmente as do tipo *Cumulonimbus* (CB), que são capazes de produzir relâmpagos, são caracterizadas por fortes correntes de ar ascendente e descendente, turbulência, e em geral estão associadas a rajadas de vento, descargas atmosféricas, intensa precipitação, e em alguns casos de granizo.

Vários estudos têm mostrado que o principal mecanismo de eletrização (ou carregamento) das nuvens de tempestade é o processo de colisão de gelo com gelo, onde as partículas de gelo maiores colidem com as partículas de gelo menores na presença de água super-resfriada. Esse processo ocorre na região de fase mista, de 0°C a -20°C. Entretanto, a microfísica dos processos de separação de cargas nas nuvens ainda não é completamente entendida devido à grande quantidade de variáveis envolvidas no processo. É aceitável atualmente que as colisões não indutivas entre o granizo mole (*graupel*) e pequenos cristais de gelo na presença de água líquida, representem o mais confiável mecanismo para eletrização de uma nuvem de tempestade.

Experimentos relacionados com a simulação de nuvens mostraram que a presença de gelo é fundamental no processo e que a carga adquirida pelos granizos depende da temperatura do ambiente, do conteúdo de água líquida da nuvem, da velocidade de colisão entre os hidrometeoros e dos tamanhos dos cristais de gelo (TAKAHASHI, 1978; SAUNDERS *et al.*, 1991).

Após as partículas carregadas serem formadas, elas são separadas pelo efeito de correntes de ar ascendente e descendente, denominado processo convectivo, e pela ação gravitacional, denominado processo gravitacional.

O processo gravitacional assume que a ação da gravidade, atuando sobre diferentes partículas de gelo com tamanhos variados, tende a fazer com que as partículas maiores permaneçam na parte inferior da nuvem, enquanto que as partículas menores permaneçam na parte superior da nuvem de tempestade.

O processo convectivo assume que as correntes de ar ascendentes e descendentes dentro das nuvens transportem estas partículas e atuem para manter as partículas menores suspensas na parte superior da nuvem (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000).

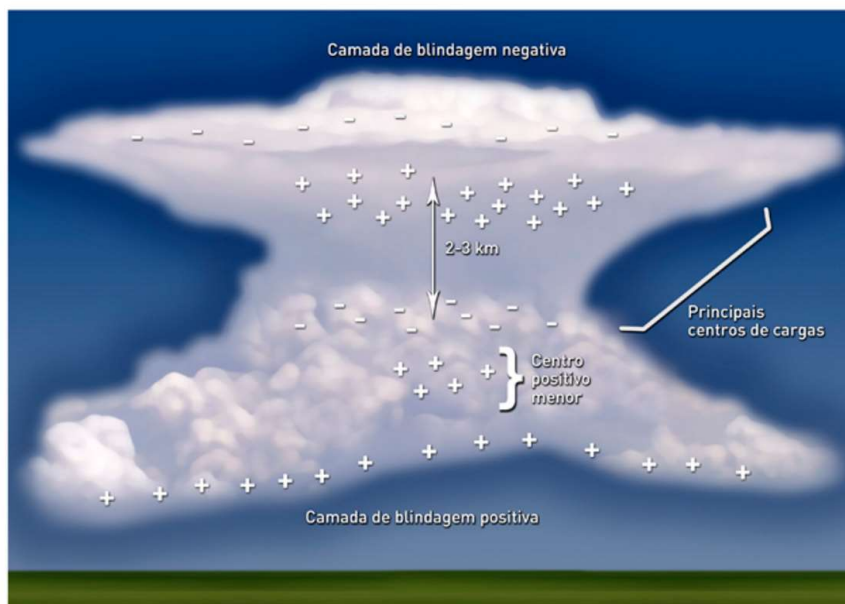
2.4. Estrutura elétrica das nuvens de tempestade

Desde o começo do século XX vários modelos de estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade foram propostos. O primeiro modelo proposto pode ser descrito como um dipolo elétrico, formado por dois centros de cargas: uma região carregada positivamente acima de uma região carregada negativamente.

No final da década de 30, foi proposto o modelo considerando uma estrutura tripolar, formada por três centros de carga: um positivo na parte superior, um negativo na parte intermediária e um positivo, de menor intensidade, na parte inferior da nuvem de tempestade, associado às cargas positivas oriundas do solo por efeito corona.

Na década de 40, foi incorporado ao modelo tripolar as finas camadas de blindagem produzidas pelo aprisionamento de íons da atmosfera, gerados por raios cósmicos, na base e no topo da nuvem, carregadas respectivamente com cargas positiva e negativa, conforme ilustrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 - Modelo de Estrutura Elétrica de Nuvem de Tempestade



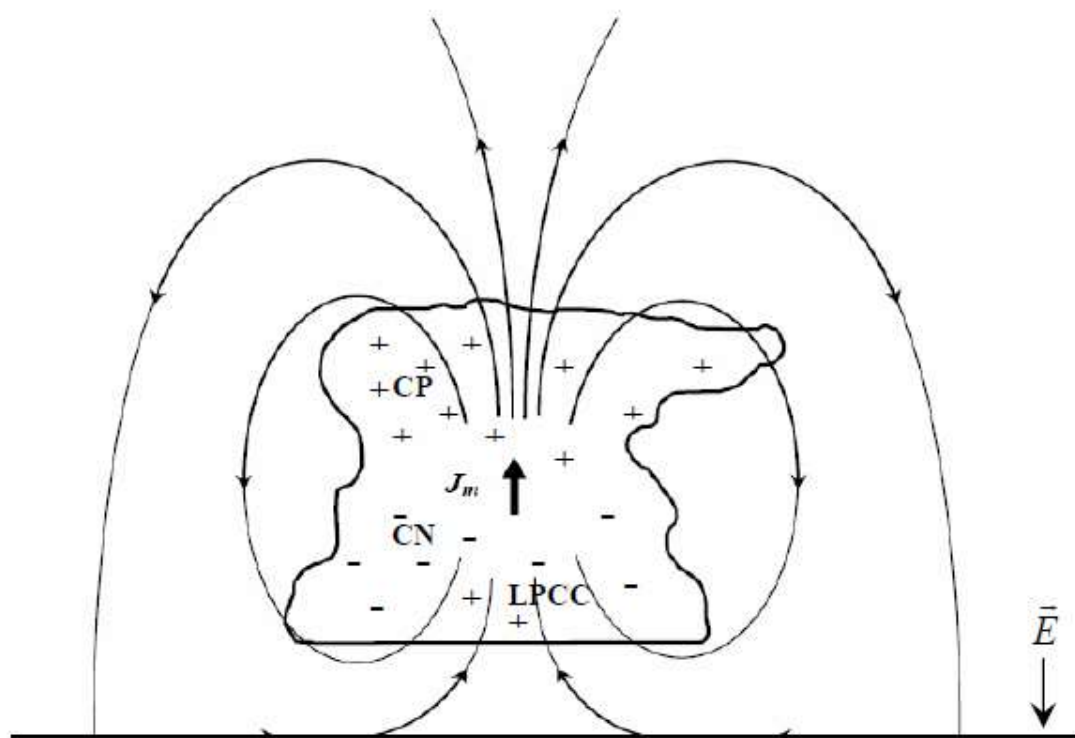
Fonte: INPE.ELAT (2015).

2.5. Campo elétrico atmosférico em nuvens de tempestade

A medição do campo elétrico atmosférico é o método mais apropriado para observação do processo de formação e evolução de uma nuvem de tempestade. Evans (1969) utilizou sensores de campo elétrico (“Electric Field Mills”) acoplado à radiossondas e lançados de paraquedas no interior de nuvens de tempestade para medir o campo elétrico e a condutividade destas nuvens. Através dos dados obtidos por este tipo de instrumento, sabe-se hoje que dentro de uma nuvem de tempestade, o campo elétrico pode alcançar valores intensos quanto 400 kV/m (INPE.ELAT, 2015).

Apesar de atenuado, no nível do solo, o campo elétrico de uma nuvem de tempestade atinge valores em torno de 10 kV/m. O campo elétrico atmosférico em condições de tempo bom tem um valor em torno de 100 V/m, de polaridade negativa, que nas convenções da física atmosférica corresponde à linhas de campo que entram na superfície terrestre. Quando uma nuvem de tempestade se forma, a carga elétrica, concentrada nos três centros principais, CP – Centro de Carga Positiva, CN – Centro de Carga Negativa e LPCC – Centro Positivo Menor, distribuídos no interior da nuvem de tempestade tal como ilustrado na Figura 2.6 e na Figura 2.7, faz com que o campo elétrico atmosférico nas proximidades da nuvem aumente superando os 1.000 V/m e apresente variações de polaridade.

Figura 2.7 - Campo elétrico e densidade de correntes de Maxwell associadas a uma nuvem de tempestade.



Fonte: ARANGUREN *et al.* (2007).

O campo elétrico \vec{E}_T associado a uma nuvem pode ser calculado mediante a sobreposição dos campos produzidos pelos centros de carga:

$$\vec{E}_T = \vec{E}_{CP} + \vec{E}_{CN} + \vec{E}_{LPCC} \quad (2.1)$$

Por sua vez, o campo elétrico associado a cada centro de carga é dado por:

$$\vec{E} = \frac{2QH}{4\pi\epsilon_0(H^2 + D^2)^{3/2}} \quad (2.2)$$

Onde, Q é a carga elétrica, H é a altura do centro de carga, D é a distância entre a base da nuvem e o ponto de observação e ϵ_0 é a permissividade do espaço livre ($8,5 \times 10^{-12}$ F. m⁻¹).

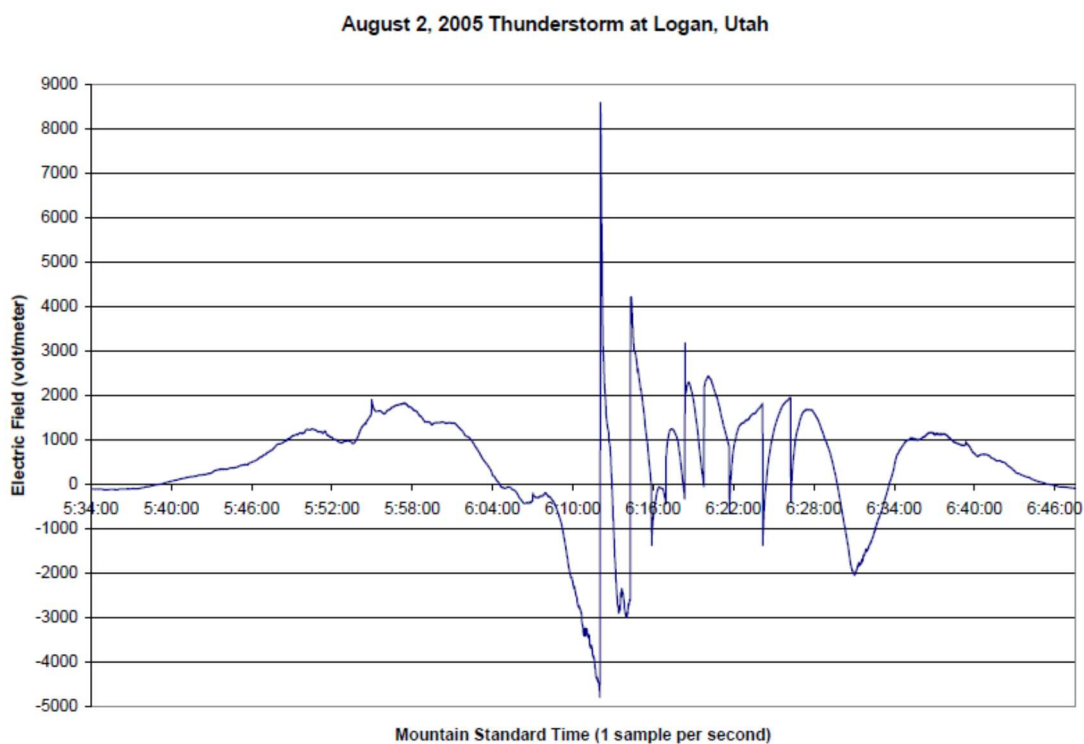
Na presença de nuvens eletrizadas o campo elétrico atmosférico inverte o sentido e aponta para cima (positivo) e, ao nível do solo, apresenta intensidade milhares de Volts como pode ser visto na Figura 2.8, nas medições efetuadas por um sensor de campo elétrico atmosférico durante uma tempestade, onde o campo elétrico foi considerado positivo quando aponta para cima.

O campo apresenta variações rápidas associadas aos relâmpagos, seguidas por uma variação lenta indicando o fim da tempestade, denominada oscilação de fim de tempestade, a qual está associada a mudanças na estrutura elétrica da nuvem na fase de dissipação, provocada pela precipitação e neutralização das camadas de blindagem da nuvem. A presença deste campo gera uma corrente corona fluindo de diversos objetos embaixo da nuvem (INPE.ELAT, 2015).

A nuvem de tempestade se comporta como um gerador de corrente, dentro da qual os fenômenos de convecção, precipitação, efeito corona e descargas elétricas, conduzem ao surgimento de uma densidade de corrente conhecida como *Densidade de Correntes de Maxwell*. Esta densidade de corrente pode ser detectada em uma área com 15 km de raio ao redor da nuvem e seu valor máximo pode superar 16 nA/m² e se apresenta bem debaixo do centro de carga ativo da nuvem. Mediante o monitoramento contínuo da amplitude do campo

elétrico e da *Densidade de Correntes de Maxwell* é possível detectar a nuvem de tempestade e emitir alertas de risco de ocorrência de raios.

Figura 2.8– Medição de campo elétrico atmosférico durante uma tempestade.



Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. (2012).

2.6. Descargas elétricas atmosféricas

O fenômeno do raio é definido na língua portuguesa como uma “descarga elétrica na atmosfera entre uma nuvem e o solo acompanhada de relâmpago e trovão”.

O termo equivalente do raio em inglês é *lightning flash* que designa uma descarga completa e, como o canal da descarga é utilizado várias vezes, cada descarga individual recebe o nome de *stroke current* ou simplesmente *stroke*, sendo utilizado unicamente para descargas para o solo.

O relâmpago, que é a manifestação luminosa do fenômeno, não é normalmente utilizado na língua inglesa. O trovão, manifestação sonora do fenômeno, em inglês é *thunder*. A palavra *lightning* em inglês é um verbo e significa coletivamente toda a atividade elétrica na atmosfera, não tendo equivalente no português.

Segundo Pinto Junior (2005), “relâmpagos são descargas elétricas que ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões localizadas da atmosfera, em geral dentro das nuvens de tempestades, também conhecidas como nuvens *Cumulonimbus*”.

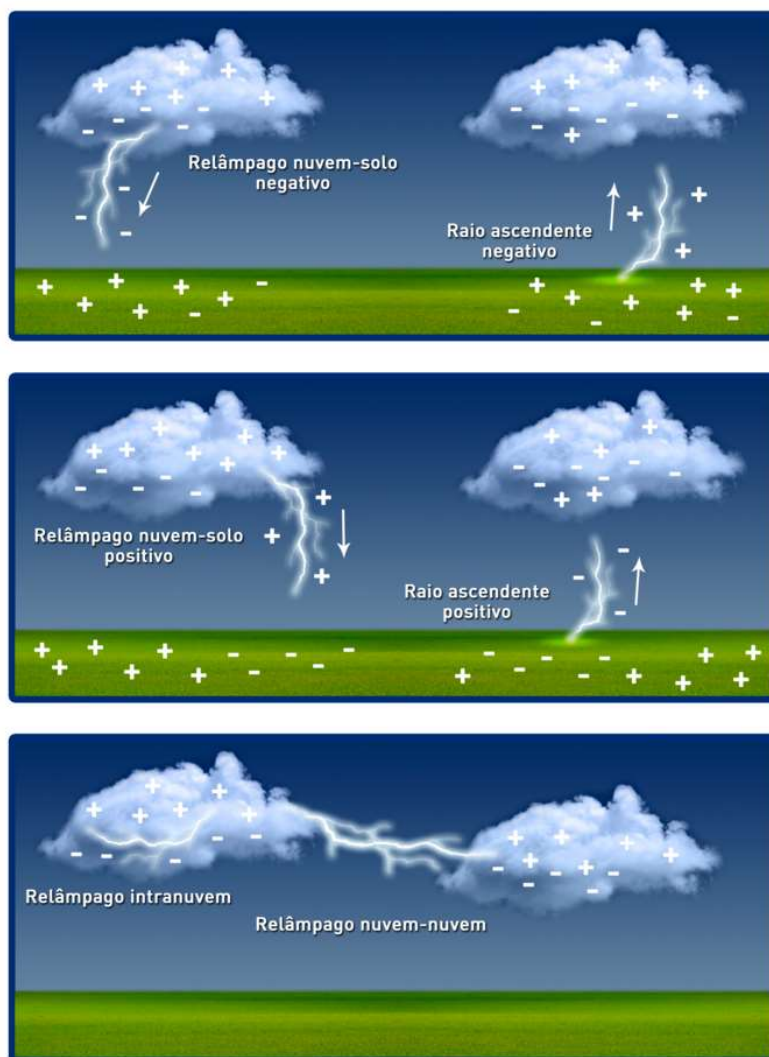
Uma vez eletrizada a nuvem, os relâmpagos se iniciam quando o campo elétrico produzido por essas cargas elétricas atinge aproximadamente 300 kV/m, o que excede a capacidade isolante do ar, também conhecida como rigidez dielétrica, em um local da atmosfera, dentro da nuvem ou próximo ao solo. Após a quebra a rigidez tem início um rápido movimento de elétrons de uma região de cargas negativas para uma região de cargas positivas (PINTO JUNIOR, 2005).

A corrente elétrica produzida por um relâmpago apresenta grandes variações: desde algumas centenas de ampères até centenas de quilo ampères e flui em um canal com um diâmetro de uns poucos centímetros, denominado canal do relâmpago, onde em seu interior a temperatura atinge valores elevados (30.000°C) e a pressão, valores de dezenas de atmosferas ao nível do mar (PINTO JUNIOR, 2005).

Os elétrons movem-se muito rápido dentro do canal do relâmpago e fazem o ar ao seu redor aquecer-se e iluminar-se resultando em um clarão. Devido aos altos valores de temperatura e pressão no interior do canal, o ar ao seu redor expande-se em alta velocidade comprimindo o ar vizinho. Estas compressões propagam-se em todas as direções produzindo, para distâncias maiores que alguns poucos metros, uma onda sonora conhecida como trovão com máxima energia em frequências de 100 Hz (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000).

Os relâmpagos podem ser classificados de acordo com o local onde se originam ou terminam, conforme ilustrado na Figura 2.9:

Figura 2.9 – Tipos de relâmpagos.



Fonte: INPE.ELAT (2015).

- a) Da nuvem para o solo, relâmpagos ou raios nuvem-solo (NS);
- b) Do solo para a nuvem, relâmpagos ou raios solo-nuvem (SN);
- c) Dentro da nuvem, relâmpagos intranuvem (IN);

d) Da nuvem para um ponto qualquer da atmosfera, descargas no ar (DA);

e) Entre nuvens.

Os relâmpagos que atingem o solo, também são denominados raios. Os relâmpagos ou raios nuvem-solo (NS) e solo-nuvem (SN) também são classificados pela polaridade das cargas efetivamente transferidas ao solo (ou neutralizadas na nuvem), dando origem aos raios positivos (transferência de cargas positivas) e negativos (transferência de cargas negativas).

Assim, tem-se os raios nuvem-solo positivos e negativos (NS+ e NS-) e os raios solo-nuvem positivos e negativos (SN+ e SN-).

Cerca de 70% do total de relâmpagos são do tipo intranuvem. Os 30% restantes são relâmpagos do tipo nuvem-solo ou raios, com 90% negativos e 10% positivos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: TECNOLOGIAS DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Dependendo da tecnologia empregada e da concepção do projeto, os sistemas de alerta de descargas atmosféricas podem realizar a detecção ou a previsão de ocorrência de relâmpagos. Embora pareça óbvio a diferença, é necessário fazer a distinção entre sistemas de detecção e sistemas de previsão de relâmpagos. Sistemas de detecção, como o nome indica, simplesmente detectam e reportam um relâmpago após a sua ocorrência. Sistemas de previsão, por outro lado, fornecem avisos da provável ocorrência de um relâmpago. Na maioria das vezes não há muita diferença entre as duas abordagens. Se uma tempestade se move ativamente para uma área de interesse, a tecnologia de detecção de relâmpagos irá reportar continuamente os locais dos relâmpagos nuvem-solo ou raios. Quando a atividade de relâmpagos da tempestade chega a uma determinada distância da área de interesse, o sistema irá gerar um alerta ou aviso, essencialmente uma previsão com base na proximidade dos relâmpagos, que a tempestade representa uma ameaça ou risco iminente de um evento desastroso. Em alguns casos, no entanto, uma tempestade com relâmpagos pode se desenvolver diretamente sobre uma área de interesse e os primeiros relâmpagos nuvem-solo ou raios podem colocar em risco as pessoas e as instalações que estas ocupam. Neste caso, um sistema de previsão é capaz de fornecer um aviso excepcionalmente valioso (HEITKEMPER *et al.*, 2008).

As descargas atmosféricas podem ser detectadas basicamente por sensores acústicos, óticos e eletromagnéticos. Uma descarga de milhares de amperes de corrente em uma fração de segundo gera temperaturas estimadas em 30.000 °C, com um lampejo de luz brilhante e uma onda de choque acústica que chamamos de trovão. Ao mesmo tempo, a rápida aceleração de elétrons no canal do relâmpago libera um amplo espectro de radiação eletromagnética e modifica a intensidade do campo elétrico atmosférico locais. Estes efeitos dos relâmpagos foram utilizados no desenvolvimento das diversas tecnologias de detecção que são empregadas nos sistemas de alerta de relâmpagos baseados

em solo. A seguir é apresentada uma revisão das tecnologias de detecção de descargas atmosféricas, com ênfase em sistemas de localização de relâmpagos (LLS) e sensores de campo elétrico atmosférico (EFM).

3.1. Clarão e trovão

O clarão repentino e o estrondo da queda de relâmpagos próximos são difíceis de serem ignorados, mesmo sem instrumentação especial. Relâmpagos distantes muitas vezes podem ser vistos por um observador atento, especialmente à noite. Para aplicações que envolvam a segurança, no entanto, estas técnicas não são confiáveis e são apropriadas apenas na ausência de tecnologias mais quantitativas. Embora este procedimento "livre de tecnologia" apenas estime a posição de um relâmpago de um modo geral, a diferença de tempo entre a observação de um clarão e a chegada do som do trovão é uma forma útil e prática para estimar a distância, mas não necessariamente a direção do relâmpago. O relâmpago é visto instantaneamente, enquanto que o som viaja a cerca de 1.200 km/h, ou cerca de 1 km a cada 3 segundos. Assim, o intervalo, em segundos, entre o clarão e o estrondo do trovão, se dividido por 3, dá uma estimativa útil da distância do relâmpago, em km.

3.2. Detectores acústicos

O som do trovão geralmente é fácil de ser reconhecido, mas é difícil de ser utilizado em qualquer sentido quantitativo. Redes de detectores acústicos já foram testadas para tentar localizar relâmpagos, mas com sucesso limitado e sistemas de detecção acústica nunca foram utilizados operacionalmente.

3.3. Detectores óticos

O clarão de luz instantânea associado com os relâmpagos pode ser difícil de ser detectado durante o dia e não é frequentemente utilizado para aplicações quantitativas. No entanto, utilizando detectores sensíveis e filtros de largura de banda estreita foram desenvolvidos sistemas de detecção ótica de relâmpagos, que podem ser utilizados durante o dia e que foram incorporados para operação

conjunta com outros detectores baseados em solo, em conjunção com análises de pulsos magnéticos e eletrostáticos para redução de falsos alarmes.

3.4. Emissões eletromagnéticas de relâmpagos

Toda vez que cargas elétricas são aceleradas ou retardadas, como nas descargas atmosféricas, são gerados campos eletromagnéticos que se propagam nos meios naturais. A maioria dos sistemas de detecção de relâmpagos disponíveis atualmente fazem uso das emissões eletromagnéticas, predominantemente de radiofrequência (RF), associadas com a descarga atmosférica.

Os relâmpagos produzem emissões eletromagnéticas de RF em diversas faixas de frequência, desde ELF (Extremely Low Frequency) até VHF (Very High Frequency). Os raios nuvem-solo geram sinais fortes na faixa de LF (Low Frequency), que podem ser detectados a distâncias de centenas de quilômetros, enquanto que os relâmpagos intranuvem geram predominantemente emissões de VHF (Very High Frequency) de alcance limitado pela linha-de-visada entre a fonte de emissão e o receptor/detector.

Os detectores de relâmpagos baseados em emissões eletromagnéticas de RF variam desde dispositivos portáteis relativamente simples, de baixo custo, até dispositivos com sensores sofisticados e grupos de sensores organizados em redes de detecção. Os sistemas mais básicos não identificam a direção do relâmpago, mas oferecem uma estimativa aproximada da distância do relâmpago medindo a amplitude do sinal de RF. Com a adição de antenas espirais ortogonalmente cruzadas ou de outras tecnologias de radiogoniometria é possível determinar a direção do detector para a fonte de sinal de um relâmpago. Utilizados individualmente, os receptores com antenas direcionais são capazes de identificar a direção da queda de raios próximos e com um algoritmo simples de amplitude do sinal de RF também estimam o intervalo.

3.5. Redes de localização de relâmpagos - LLS

Os sistemas ou redes de localização de relâmpagos ou *LLS* do inglês *Lightning Location System* são baseados na detecção da radiação eletromagnética emitida por relâmpagos utilizando as frequências de rádio (RF). As emissões de ondas eletromagnéticas de relâmpagos nas frequências de RF ocorrem na forma de pulsos de curta duração devido a rápida aceleração de elétrons no canal do relâmpago, enquanto as emissões óticas ocorrem a partir de gases excitados ou ionizados pelos elétrons do canal do relâmpago (GOODMAN *et al.*, 1988).

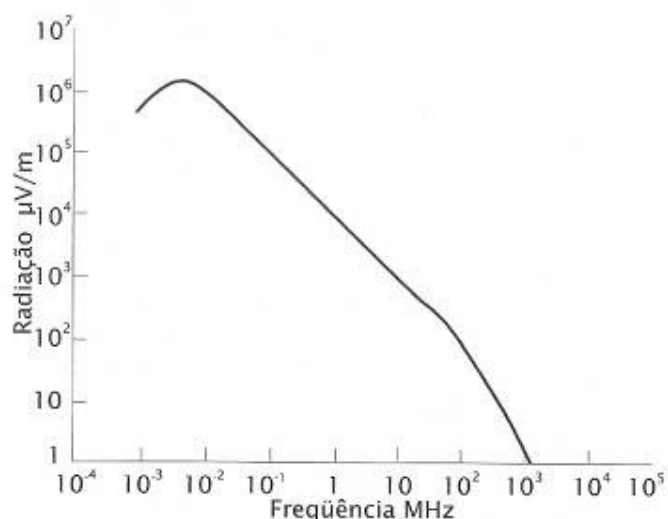
3.5.1. Espectro eletromagnético dos relâmpagos

Todos os processos de relâmpagos estão associados com o movimento de cargas elétricas e, portanto, podem ser estudados através de medições dos campos elétricos e magnéticos associados a esse movimento. Vários processos físicos ocorrem nos relâmpagos nuvem-solo e intranuvem, cada um destes processos tendo um campo elétrico e magnético irradiante associado. Estes processos, que compõem juntos o relâmpago, emitem pulsos eletromagnéticos em uma faixa de frequência que se estende desde abaixo de 1 Hz até próximo de 300 MHz, com máxima intensidade no espectro de frequência em torno de 5 a 10 KHz (Figura 3.1). O tipo de informação que pode ser obtida a partir de observações da radiação eletromagnética dos relâmpagos depende da frequência f , e, portanto, do comprimento de onda λ , da radiação detectada. Para um sinal com $f = 30$ a 300 MHz ($\lambda = 10$ a 1 m), que é a faixa de muito alta frequência ou VHF (Very High Frequency), o comprimento de onda é muito curto em comparação com o comprimento do canal do relâmpago.

Assim, o canal de um relâmpago inteiro pode ser mapeado com sinais de VHF. Por outro lado, os sinais da faixa de muito baixa frequência ou VLF (Very Low Frequency) com $f = 3$ kHz a 30, $\lambda = 10$ a 1 km e, da faixa de baixa frequência ou LF (Low Frequency) com $f = 30$ kHz a 300, $\lambda = 1$ km a 100 m, não são adequados

para mapear o canal de um relâmpago, mas podem ser usados para determinar a localização do relâmpago (POELMAN, 2010).

Figura 3.1 - Espectro da componente elétrica de radiação observado a 20 Km de distância da base do canal de um típico raio negativo.

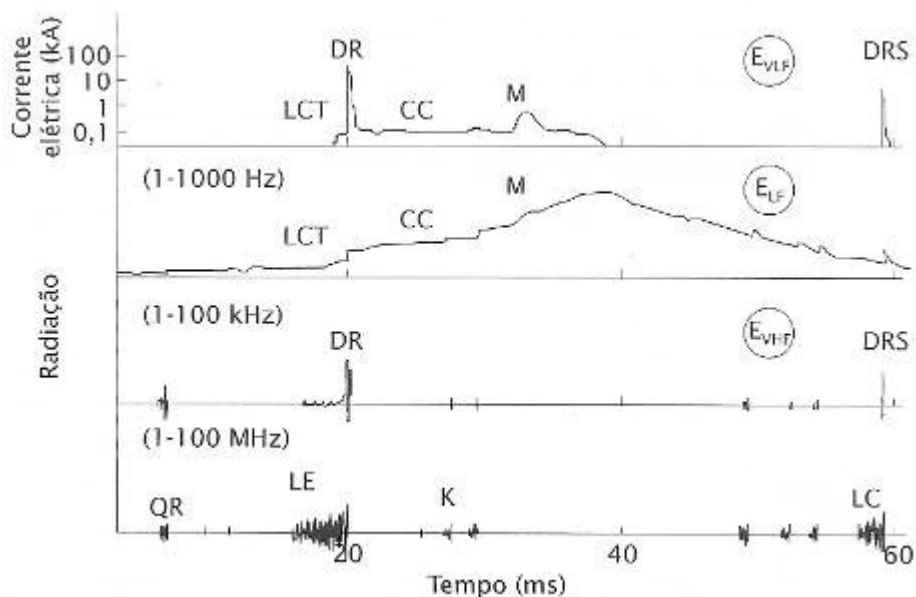


Fonte: PINTO JUNIOR (2005).

A corrente elétrica típica medida na base do canal para as diversas etapas de um raio negativo é mostrada na Figura 3.2 e também a componente elétrica da radiação observada a cerca de 20 Km de distância deste ponto em três faixas de frequência: VLF, LF e VHF (PINTO JUNIOR, 2005). A propagação das ondas de rádio emitidas para fora do canal do relâmpago, depende da sua frequência f (ou comprimento de onda λ). A radiação na faixa de VLF pode viajar grandes distâncias, ou seja, milhares de quilômetros, e assim são utilizadas para observações de alcance regional. Isso ocorre porque a energia eletromagnética se propaga com baixa atenuação e múltiplas reflexões entre o solo e a base da ionosfera, dentro do guia de onda formado pela Terra (condutiva) e o limite inferior da ionosfera, denominado guia de onda Terra-ionosfera. Este modo de propagação também é encontrado na literatura como propagação EIWG (Earth-Ionosphere Waweguide). Já na faixa de LF a radiação se propaga pelo solo. As ondas com frequências mais altas (VHF) são mais atenuadas pelo ar (espaço livre) e alcançam pequenas distâncias e, conseqüentemente, os sistemas de

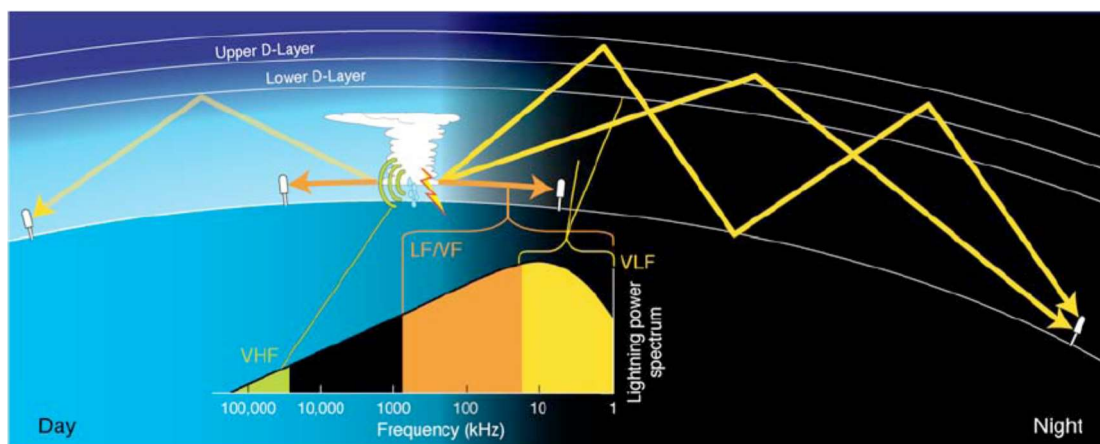
detecção de relâmpagos baseados na radiação na faixa de VHF são mais adequados para estudar eventos de descargas locais. Nos sistemas na faixa de VHF a radiação se propaga pela atmosfera de forma direta (Figura 3.3).

Figura 3.2- Espectro da componente elétrica de radiação observado a 20 Km de distância da base do canal de um típico raio negativo.



Fonte: PINTO JUNIOR (2005).

Figura 3.3– Propagação da radiação emitida por um relâmpago nas diversas faixas de radiofrequência.



Fonte: CUMMINS *et al.* (2008).

O relâmpago nuvem-solo (NS) é observado principalmente nas faixas de VLF e LF, enquanto que os relâmpagos intranuvem (IN) predominam na faixa de VHF (CUMMINS *et al.*, 2008). Assim, um LLS pode ser constituído por diversos sensores (antenas e dispositivos eletrônicos associados) projetados para operar em uma determinadas faixa de frequência (o que determina o tipo de descarga detectada e o alcance do sistema) e dispostos em uma adequada configuração de forma a captarem a radiação eletromagnética produzida pelas descargas e de uma central que recebe os dados dos sensores através de canais de comunicação e os processa, gerando como resultado informações sobre as descargas detectadas por este sistema, como por exemplo, localizar e mapear no céu as descargas com precisão de poucas centenas de metros (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000).

3.5.2. Métodos de localização de relâmpagos

Os LLS podem empregar diferentes métodos de localização de relâmpagos, isoladamente ou combinadas, em diferentes faixas de frequência, sendo:

- Direção Magnética – MDF
- Interferometria – IF
- Tempo de Chegada - TOA

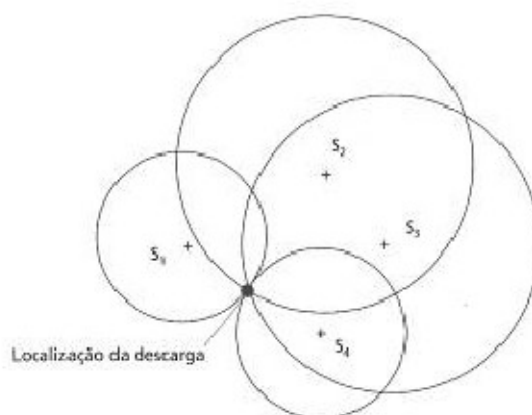
A seguir será detalhado o método de localização TOA utilizado na rede BrasilDAT da qual foram extraídos os dados de localização de relâmpagos utilizados nesta tese.

3.5.2.1. Método de localização TOA ou tempo de chegada

Conhecido pela sigla TOA, do inglês *Time-Of-Arrival*, este método de localização utiliza as pequenas diferenças nos tempos de chegada da onda de rádio em sensores diferentes de uma rede com três ou mais sensores sincronizados para determinar a distância para a descarga (PRICE, 2008). Uma central de

processamento calcula a diferença temporal relativa entre os horários de chegada registrados pelos vários sensores localizados a diferentes distâncias da descarga. Com o uso do sistema GPS (Global Positioning System) obtém-se precisão temporal deste método no registro das descargas. Uma distância é determinada para cada sensor, em cada instante anterior ao registro da radiação, considerando uma velocidade de propagação da radiação. Essas distâncias representam, nas faixas de VLF e LF, os raios de círculos a partir do sensor correspondente à possível localização do ponto de contato da descarga de retorno com o solo naquele instante, sendo conhecido também como método de intersecção circular (Figura 3.4). Com o uso de quatro sensores é possível, a partir da intersecção destes círculos, determinar a localização aproximada do ponto de contato da descarga de retorno com o solo (PINTO JUNIOR, 2005).

Figura 3.4 - Método do tempo de chegada (TOA) para localização do ponto de contato de uma descarga de retorno com o solo.



Fonte: PINTO JUNIOR (2005).

3.5.3. Classificação das redes de localização pela linha de base

O monitoramento global de relâmpagos requer o uso de baixas frequências, VLF, pela capacidade do sinal se propagar a longas distâncias. Em frequências mais altas, LF, observa-se os relâmpagos nuvem-solo, porém as medidas se

restringem a 400 km de distância dos sensores. Medidas em alta frequência, VHF, limitam-se a 100 km e observam-se os relâmpagos nuvem-solo e intranuvem.

Assim, as redes de localização podem ser classificadas em função da *linha de base*, que define a distância entre dois sensores quaisquer que integrem a rede:

- 1) **Redes de localização com linha de base curta (menor que 100 km):**
Exemplos: rede LINET (*Lightning Network*) em VLF/LF (BETZ *et al.*, 2009) e rede LDAR (*Lightning Detection and Ranging*) no Kennedy Space Center (KSC), na Flórida, Estados Unidos (NASA.MSFC AND THE UNIVERSITY OF ALABAMA, 2016).
- 2) **Redes de localização com linha de base média (de 200 a 400 Km):**
Exemplos: rede BrasilDAT (Tecnologia Vaisala e Tecnologia Earth Networks), operando em larga faixa de frequência desde ELF até HF.
- 3) **Redes de localização com linha de base longa (maior que 1.000 km):**
Exemplos: rede STARNET (*Sferics Timing And Ranging NETwork*) (USP.IAG, 2011; MORALES *et al.*, 2002a); rede GLN (*Global Lightning Network*) (WSI CORPORATION, 2015); rede WWLN (*World-Wide Lightning Location Network*) (HOLZWORTH, 2015; DOWDEN *et al.*, 2002; HOLZWORTH *et al.*, 2004); rede ATDnet (*Arrival Time Difference network*) (GAFFARD *et al.*, 2008; BENNETT *et al.*, 2010). Todas estas redes globais operam em VLF.

3.5.4. Exatidão e eficiência de detecção

Os LLS podem fornecer informações de posição com bastante exatidão para os relâmpagos nuvem-solo. Estes LLS são projetados principalmente para detecção de relâmpagos nuvem-solo e fornecem informações sobre cada descarga de retorno de um mesmo relâmpago. Estes mesmos detectores receberam recentemente melhorias que os capacitam a detectar uma

porcentagem significativa de relâmpagos intranuvem próximos. Uma vez que a ocorrência de relâmpagos intranuvem é significativamente maior do que a ocorrência de relâmpagos nuvem-solo e uma vez observado que os relâmpagos intranuvem precedem as primeiras descargas nuvem-solo, os LLS que são otimizados para detecção de ambos os tipos de relâmpagos, ou os “relâmpagos totais”, têm um grande potencial para melhorar as capacidades de detecção de relâmpagos nuvem-solo.

Algumas características de sensores baseados em VHF, VLF e ELF são apresentadas na Tabela 3.1 (PRICE, 2008). Os valores para a Eficiência de Detecção são apenas para fins ilustrativos, e não devem ser aplicados indistintamente a um sistema de interesse específico.

Tabela 3.1 - Características dos três tipos principais de sistemas para localização de descargas atmosféricas (LLS).

Sensor	Frequência (Hz)	Método de localização	Cobertura espacial	Exatidão de localização	Tipo de relâmpago detectado	Eficiência de Detecção (% do total)
VHF	$\sim 10^8$	TOA, IF	Local	Dezenas de metros	Total NS IN	> 90%
VLF	$\sim 10^4$	DF, TOA	Regional	Quilômetros	NS	< 25%
ELF	~ 10	TOA	Global	Dezenas de quilômetros	NS	< 5%

Fonte: Adaptado de Price (2008).

3.6. Medição do campo elétrico atmosférico

Dentro e próximo de uma nuvem de tempestade em desenvolvimento, geralmente nuvens do tipo *Cumulonimbus* ou CB, ocorre um aumento da intensidade do campo elétrico. Se este aumento é detectado, então é possível emitir com antecedência um alerta de ocorrência de raio. As medições de campo

elétrico atmosférico podem detectar a presença de altos níveis e a separação de cargas elétricas nas nuvens de tempestade próximas que sugerem uma forte probabilidade de atividade atual ou futura de ocorrência de raios.

Um método simples para medição do campo elétrico atmosférico consiste em um longo condutor isolado a uma determinada distância do solo e conectado a um eletrômetro e a um registrador de dados (*datalogger*). Apesar do mecanismo de coleta de cargas se dar por indução estes dispositivos são conhecidos pelo nome de “antena lenta” pelo fato de tais antenas não captarem ou irradiarem campos normalmente, necessitando de excitação para funcionarem. Outro método para medição do campo elétrico é a utilização de duas placas condutoras planas em um dispositivo que funciona como uma gaiola de Faraday. Uma das placas é fixa, e a segunda é móvel. Inicialmente a placa condutora fixa está no mesmo potencial que o terra juntamente com a placa condutora móvel. Em um segundo momento a placa condutora móvel se desloca deixando a placa condutora fixa exposta e cargas são induzidas nesta placa. Em seguida a placa condutora móvel se desloca novamente e cobre a placa condutora fixa e as cargas que estavam na placa condutora fixa vão em direção à terra. Um dispositivo muito utilizado para medição do campo elétrico atmosférico é o sensor EFM, do inglês *Electric Field Mill*, ou simplesmente *Field Mill* ou moinho de campo, em alusão ao processo de blindagem da placa condutora fixa por uma paleta ou obturador rotativo (placa condutora móvel). Este dispositivo funciona de maneira semelhante ao sistema de duas placas, com uma placa condutora fixa sendo alternadamente exposta e protegida do campo a ser medido por uma placa móvel na forma de um obturador rotativo acoplado a um motor elétrico. A corrente que flui para a placa condutora fixa é proporcional à intensidade do campo elétrico. O princípio de funcionamento do sensor EFM é detalhado no tópico seguinte.

Diferentemente dos sistemas de detecção de relâmpagos, que respondem a transientes rápidos do campo eletromagnético de RF e/ou sinais óticos gerados por um raio, os sensores EFM, detectam o campo elétrico atmosférico vertical e

as mudanças relativamente lentas nesse campo devido a presença de separação de cargas e a carga existente diretamente acima e nas imediações do sensor. Dependendo da localização da carga, a distância de detecção de um sensor EFM pode variar de alguns km até 20 km (BLOEMINK, 2013). A principal vantagem destes sensores é a proteção que oferecem contra a ocorrência do primeiro raio.

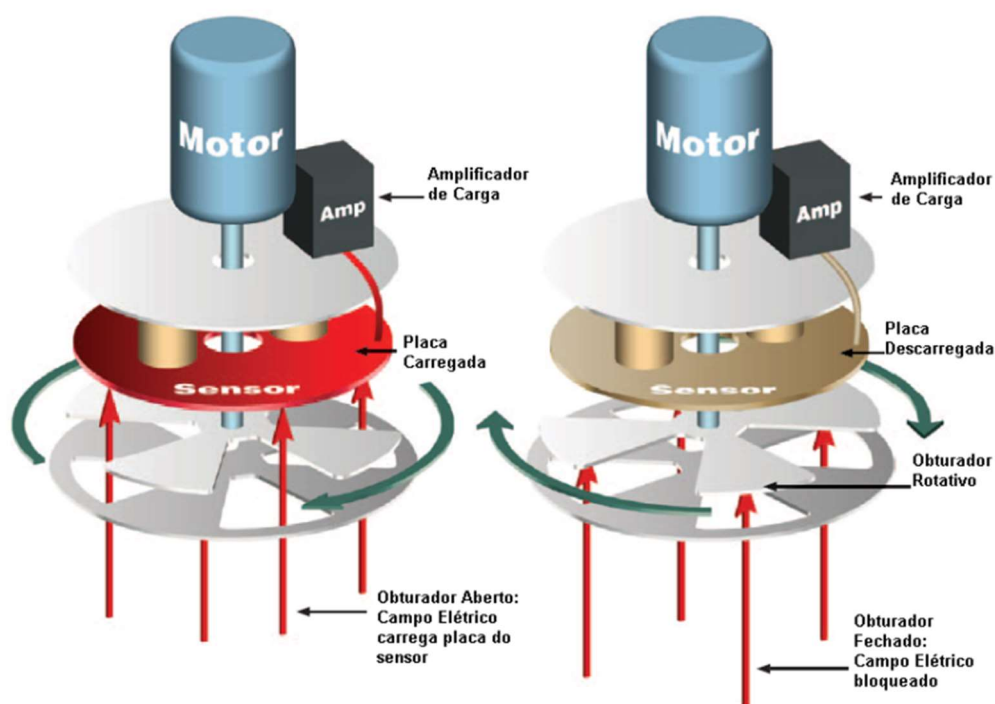
Alguns estudos apresentam sistemas de alerta de raios como uma combinação da informação de detecção de raios e dados de um ou mais sensores EFM (MONTANYÀ *et al.*, 2008; BEASLEY *et al.*, 2008; ARANGUREN *et al.*, 2009). Estes estudos mostram que as medições de sensores EFM são fortemente influenciadas pelas características do local onde se encontram instalados, por exemplo: a altura do centro de carga da nuvem naquela região, a topografia, etc. Então, a efetividade dos métodos de alerta de raios utilizando sensores EFM variam de uma região para outra. Alterações do campo elétrico atmosférico da ordem de uma fração de segundo são devidas ao rearranjo global da distribuição de cargas em uma nuvem produzido por um relâmpago, e as mudanças mais lentas de campo são devidas à eletrização da nuvem e ao rearranjo da carga na atmosfera. Quando uma nuvem começa a exibir separação de cargas nas proximidades ou diretamente acima de um sensor EFM, normalmente há uma inversão da polaridade do campo elétrico e um aumento na magnitude deste campo. A mudança de polaridade e o aumento da magnitude é, obviamente, bastante útil como alerta da ameaça de relâmpago, uma vez que a separação da carga deve preceder o relâmpago. No entanto, nem todos os casos, em que ocorre a inversão de polaridade de campo em um sensor EFM em particular, são indicativos de uma tempestade se desenvolvendo e a magnitude exata alcançada pelo campo depende fortemente da distância entre o sensor EFM e as regiões de cargas da nuvem. Assim, um algoritmo automático com um limiar fixo para a magnitude do campo, pode ou não detectar todas as tempestades. Os sensores EFM também podem ser utilizados no caso em que uma tempestade madura se move em direção à área de proteção, o que representa

a grande maioria dos casos, cerca de 90% de acordo com os estudos de Murphy *et al.* (2008).

3.6.1. Princípio de funcionamento do sensor EFM

O sensor EFM é um dispositivo baseado no princípio da indução eletrostática. É constituído por duas placas condutoras (Figura 3.5). Uma placa é construída como um conjunto de paletas formando um obturador rotativo. A outra é a placa sensor, que é apenas periodicamente exposta ao campo, devido à rotação do obturador rotativo localizado sobre a placa sensor de modo que este periodicamente protege e expõe a placa sensor ao campo elétrico atmosférico.

Figura 3.5- Funcionamento do sensor EFM.



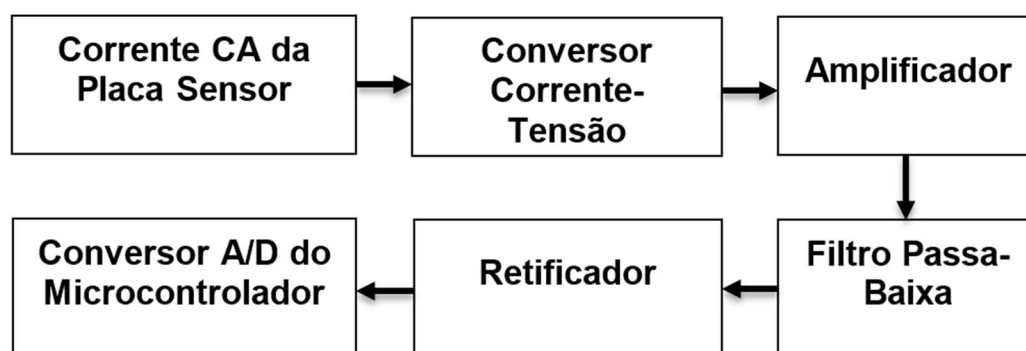
Fonte: Adaptado de Mission Instrumenst (2015).

Para fazer isso corretamente, o rotor deve ser aterrado e acoplado ao eixo de um motor que também deve ser aterrado. A placa sensor é ligada à terra através

de um amplificador, que converte corrente de terra da placa sensor em tensão. Como a placa sensor é exposta ao campo, este induz correntes de terra, uma vez que atrai ou repele a carga da placa sensor. Quando a placa sensor é protegida do campo pelo obturador rotativo, a carga induzida é descarregada. Isto induz uma corrente de terra alternada que é proporcional à intensidade do campo elétrico atmosférico. Estes sinais brutos são geralmente muito fracos e devem ser amplificados antes de serem tratados pela unidade de processamento. A magnitude da tensão de saída do amplificador é utilizada como uma medida da magnitude do campo elétrico entre a nuvem de tempestade e o solo.

A Figura 3.6 mostra o esquema de detecção do campo elétrico atmosférico de um EFM. A corrente de terra alternada induzida na placa sensor é primeiro convertida para um sinal de tensão por um conversor de corrente para tensão. Este sinal de tensão é, em seguida, amplificado e enviado através de um filtro passa-baixa a um retificador para produzir uma tensão CC entre 0 a 5 V e na sequência ser entregue ao conversor analógico-digital de um microcontrolador. Este nível de tensão CC varia de acordo com o campo elétrico que o EFM está exposto.

Figura 3.6 - Esquema de detecção do campo elétrico atmosférico em um EFM.



Fonte: Adaptado de Jayendra *et al.* (2007).

A carga q_s (Coulomb) induzida na placa sensor e a corrente entre esta e o terra são ambas proporcionais à intensidade do campo elétrico E ($V.m^{-1}$) normal à placa sensor e são determinadas pelas seguintes equações (HILL; KANDA, 2014):

$$q_s(t) = \epsilon_0 E a_s(t) \quad (3.1)$$

$$i_s(t) = \epsilon_0 E \frac{d a_s(t)}{d t} \quad (3.2)$$

Onde ϵ_0 é a permissividade do espaço livre ($8,5 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$) e $a_s(t)$ é a área exposta efetiva da placa sensor no tempo t . Desta forma a intensidade do campo elétrico pode ser determinada da carga induzida ou corrente CA (ou da tensão na saída do conversor de corrente-tensão).

Se o sinal induzido é retificado por um detector de fase (relativo ao movimento do obturador rotativo), a saída de sinal CC irá indicar a magnitude e a fase do campo elétrico (SECKER, 1984).

3.6.2. Calibração de fábrica do sensor EFM

Geralmente, os sensores EFM comerciais são calibrados na fábrica, utilizando o “método de placas paralelas”, onde um campo elétrico uniforme é desenvolvido pela aplicação de uma tensão conhecida entre as placas paralelas (CAMPBELL SCIENTIFIC, INC., 2012).

Cada sensor EFM é calibrado em um dispositivo de placas paralelas com a janela de medição de campo elétrico do instrumento voltada para cima. Um ajuste linear dos dados de calibração, resulta em uma equação de calibração expressa como:

$$E = f \cdot V \quad (3.3)$$

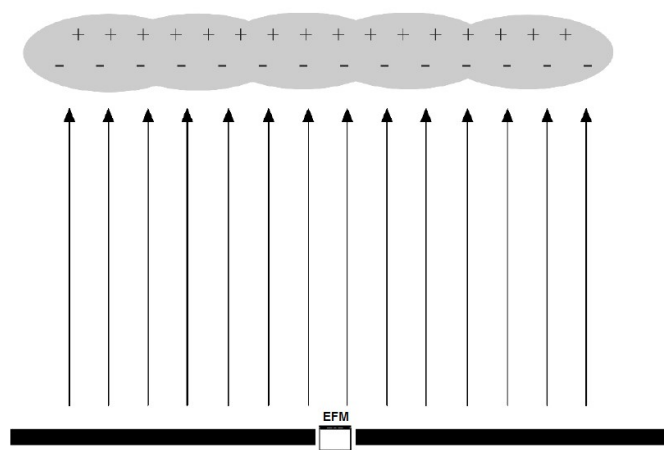
Onde o multiplicador f é função das dimensões da placa condutora do EFM e das características do circuito eletrônico do amplificador de carga.

A Campbell Scientific Inc. (2012), fabricante do sensor modelo CS110 utilizado na rede de sensores deste trabalho estima uma exatidão de 1% para um sensor calibrado pelo método de placas paralelas.

3.6.3. Fator de correção de *síte* do sensor EFM

Idealmente, para uma leitura precisa do campo elétrico atmosférico, o sensor EFM deveria ser instalado nivelado com o solo e com a janela de medição de campo elétrico do instrumento voltada para cima, conforme mostrado na Figura 3.7. Porém, este tipo de instalação não é prático, pois poderia contaminar as placas condutoras e isoladores do EFM com água, detritos, insetos, etc.

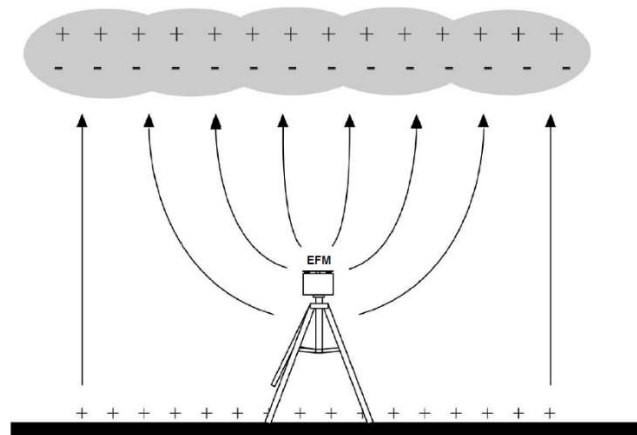
Figura 3.7 - Instalação ideal do sensor EFM nivelado com o solo.



Fonte: Adaptado de Boltek Cooperation (2005).

Conseqüentemente, é adotada uma configuração (Figura 3.8) onde o EFM é instalado com a janela de medição de campo elétrico do instrumento voltada para baixo e a um nível elevado do solo, de 2 à 3 metros, em aplicações operacionais de longa duração.

Figura 3.8 – Instalação elevada do sensor EFM.



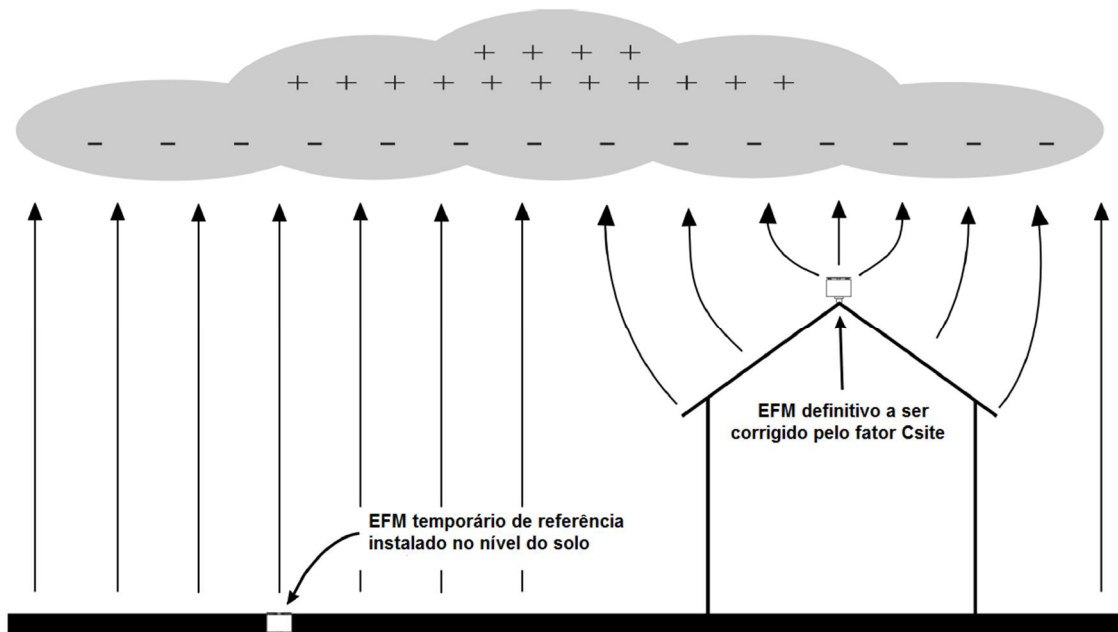
Fonte: Adaptado de Boltek Cooperation (2005).

Invertendo o EFM resulta na diminuição do ganho efetivo, enquanto que aumentando a distância do sensor do solo resulta no aumento do ganho, com relação à geometria ideal com a face do sensor voltada para cima. Nesta configuração, a equação (3.3) não é válida. Um fator de correção de instalação em campo, mais conhecido por *fator de correção de site* (*site correction factor*) é necessário para corrigir o multiplicador f de fábrica, resultando em:

$$E = C_{site} \cdot f \cdot V \quad (3.4)$$

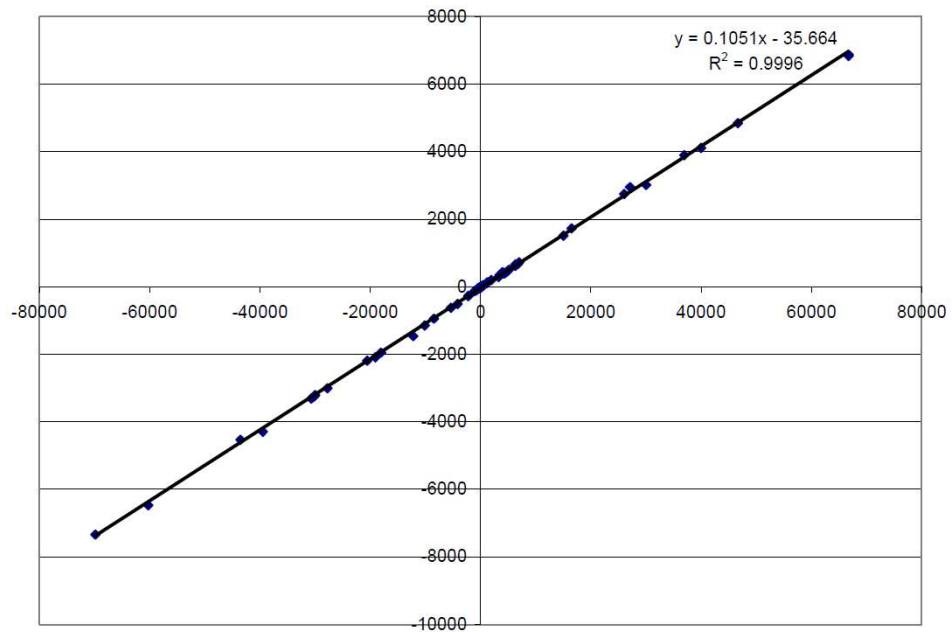
Nesta nova equação, f é único para cada sensor EFM independente do local de instalação do sensor (ou *site*), enquanto que C_{site} é único para cada *site*, independente do EFM usado naquele site. O fator de correção C_{site} é determinado utilizando dois sensores EFM operando simultaneamente, sendo um sensor EFM temporário instalado no nível do solo e com a face sensora voltada para cima e, o outro, o sensor EFM definitivo a ser corrigido pelo fator C_{site} (Figura 3.9). Os dados coletados por ambos EFM são plotados em um gráfico de dispersão, conforme exemplo da Figura 3.10, sendo que a melhor curva de ajuste computada deste gráfico resulta no C_{site} . Neste exemplo, resultou $C_{site} = 1,105$.

Figura 3.9 - Determinação do fator de correção de *site*.



Fonte: Adaptado de Boltek Cooperation (2005).

Figura 3.10 – Gráfico de dispersão para determinação do fator de correção de *site*.



Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC, INC., 2012.

3.6.4. Critérios para seleção do local de instalação do sensor EFM

Muitos fatores podem distorcer ou alterar o campo eléctrico em um determinado local de instalação ou *site* do sensor EFM. Por exemplo, o crescimento da vegetação pode reduzir a altura efetiva de um instrumento instalado em posição elevada acima do solo criando um espaço de carregamento indesejado devido à descarga corona.

Cobrir o solo com cascalho, pedra britada ou blocos de concreto em torno de um determinado *site* são ações recomendadas para prevenir mudanças na altura efetiva do instrumento devido ao crescimento da vegetação (CAMPBELL SCIENTIFIC, INC., 2012).

Animais e pessoas que se encontrem perto de um sensor EFM podem alterar significativamente as medições. Cercar um determinado *site* pode ser uma boa solução para algumas aplicações.

No entanto, a instalação de uma pequena cerca de metal em torno de um *site* de EFM pode resultar em alteração das medições em grandes campos eléctricos por causa da descarga corona que surge de pontos de metal afiado em cima da cerca. Uma cerca feita de plástico ou outro material não condutor é recomendada no caso de ser necessária a proteção da área do EFM.

Aerossóis, poeira e exaustão de automóveis devem ser considerados ao selecionar um *site* para EFM, porque podem afetar o campo eléctrico local.

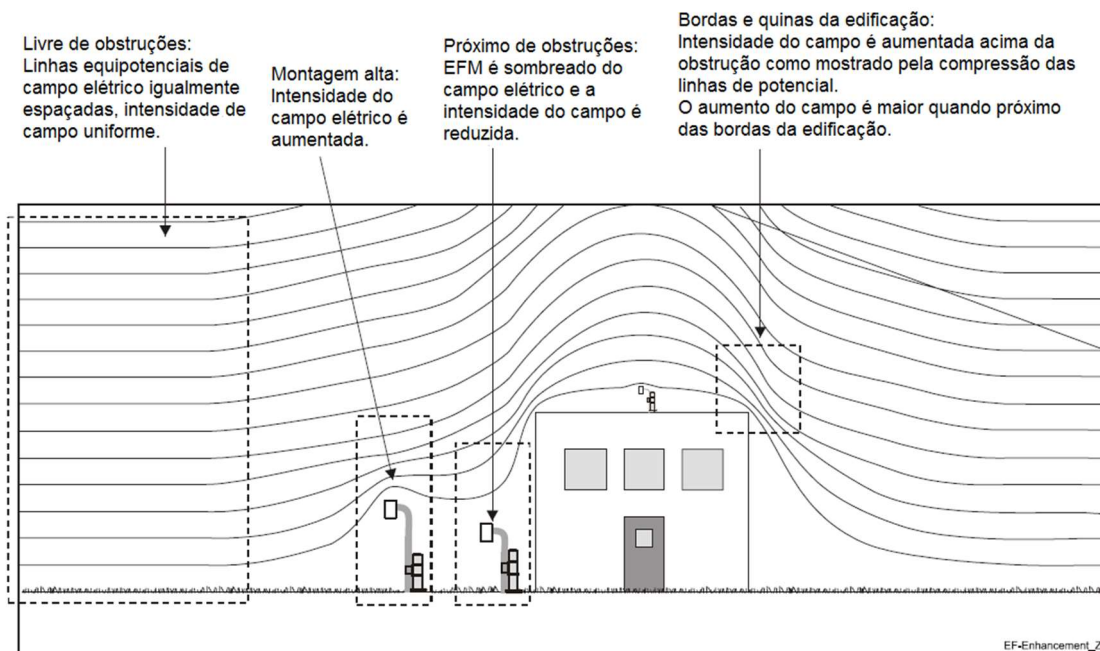
Teoricamente, os efeitos de objetos altos próximos (prédios, árvores, etc.) podem ser contabilizados pelo fator de correção de *site* (C_{site}). No entanto, devido à possíveis correntes corona junto com a distorção geral do campo eléctrico, recomenda-se que o local de instalação do EFM não deve ser próximo de objetos altos.

O fabricante Boltek Corporation (2005), por exemplo, recomenda instalar o sensor EFM a uma distância três vezes maior do que altura efetiva do objeto interferente, dada pela diferença entre a altura real do objeto e a altura de instalação do sensor EFM.

No caso de instalação do EFM sobre o teto de edificações, como mostrado na Figura 3.11, recomenda-se as superfícies planas, como os terraços ou lages de cobertura, pois interferem menos nas medições do que os telhados com pontas e inclinações.

Neste caso, o EFM deve ser instalado o mais próximo possível do centro do teto da edificação, onde ocorre menor distorção do campo elétrico, evitando-se a instalação nas bordas da edificação onde a distorção do campo é mais acentuada.

Figura 3.11 – Seleção de local para instalação do sensor EFM.



Fonte: Adaptado de Vaisala, Oyj. (2006).

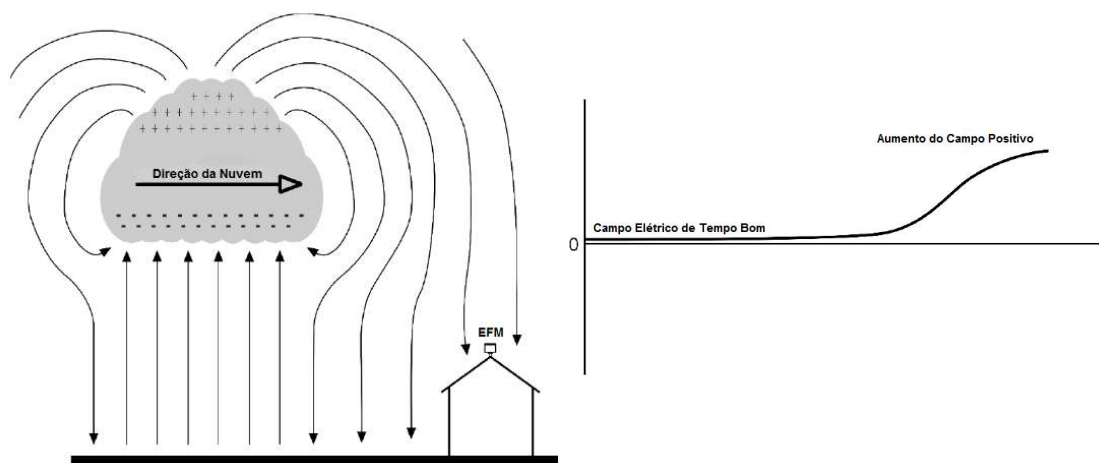
3.6.5. Interpretação das medições de um sensor EFM

Na sequência são apresentadas três momentos do deslocamento de uma nuvem de tempestade e seu efeito sobre o campo elétrico medido pelo sensor EFM.

3.6.5.1. Nuvem de tempestade se aproximando

Frequentemente, a primeira indicação de uma nuvem de tempestade que se aproxima (Figura 3.12) é a leitura de um campo positivo seguido por uma inversão de campo para um campo negativo, como a nuvem se movesse acima do local de medição.

Figura 3.12 – Nuvem de tempestade se aproximando.

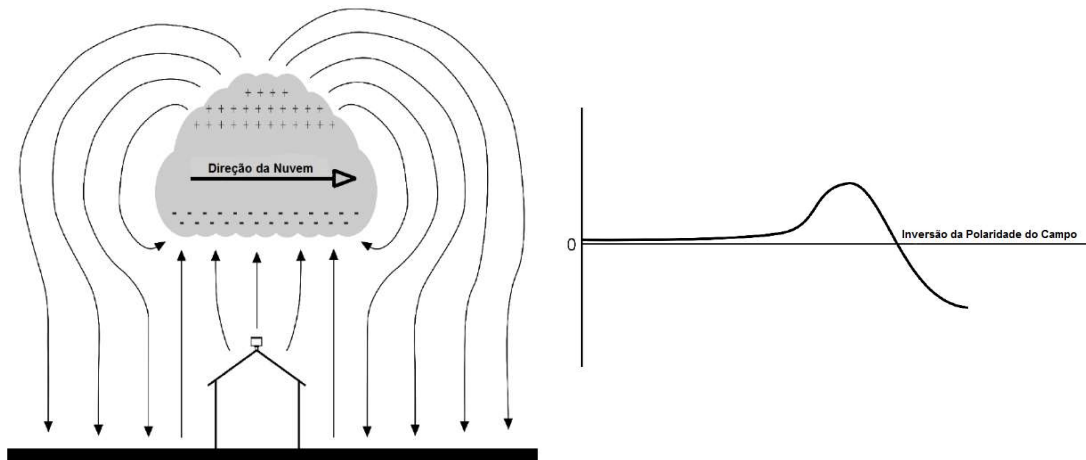


Fonte: Adaptado de Boltek Corporation (2005).

3.6.5.2. Nuvem de tempestade diretamente acima

Com a nuvem de tempestade diretamente acima (Figura 3.13) a polaridade do campo inverte para uma polaridade negativa.

Figura 3.13 – Nuvem de tempestade diretamente acima.

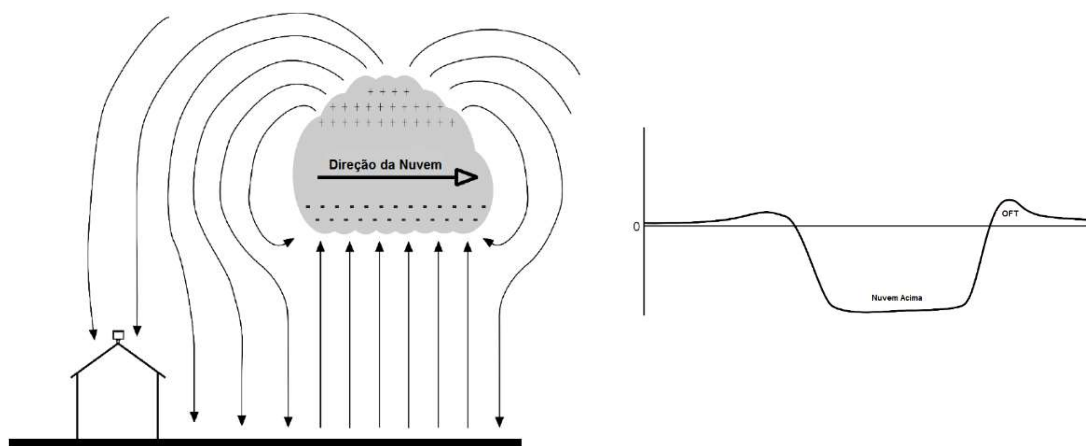


Fonte: Adaptado de Boltek Cooperation (2005).

3.6.5.3. Nuvem de tempestade se afastando

Uma vez que a nuvem de tempestade passou e se afasta (Figura 3.14), o campo elétrico, muitas vezes, reverte de volta à polaridade positiva antes de decair a um valor de campo de tempo bom de 100 V/m. Esta inversão do campo no final da tempestade é referida como Oscilação de Fim de Tempestade (OFT) ou, em inglês, *ESO (End of Storm Oscillation)*.

Figura 3.14 – Nuvem de tempestade se afastando e Oscilação de Fim de Tempestade.



Fonte: Adaptado de Boltek Cooperation (2005).

4. INSTRUMENTAÇÃO

Neste capítulo é detalhada a instrumentação que produziu os dados utilizados neste trabalho: a rede de localização de relâmpagos BrasilDAT e a rede de sensores EFM, integrada para subsidiar este trabalho.

4.1. Rede de localização de relâmpagos BrasilDAT

O primeiro sistema de localização de relâmpagos (LLS) do Brasil começou a operar em 1988, composto por quatro sensores usando tecnologia TOA LPATS, na região Sudeste do país. Oito anos mais tarde, o sistema foi atualizado para incluir sensores IMPACT, que combina as técnicas de localização TOA e MDF. Em 1999, esta rede foi nomeada de Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT). Em 2006, duas outras redes começaram a operar no Norte e no Sul do Brasil, constituídas de 10 e 13 sensores, IMPACT e LPATS, respectivamente. Em 2011 uma nova rede passou a operar no Brasil denominada Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas ou BrasilDAT. Em fevereiro de 2016 a BrasilDAT contabilizava 56 sensores em operação (Figura 4.1). A rede BrasilDAT utiliza a tecnologia Earth Networks, uma empresa americana que monitora, organiza e comercializa informações meteorológicas globais. O sensor, denominado “WeatherBug Total Lightning”, marca comercializada pela Earth Networks registra as formas de onda das descargas atmosféricas em uma ampla faixa de frequências que permite a detecção de ambas as descargas atmosféricas intranuvem e nuvem-solo em escala continental. A detecção de descargas atmosféricas intranuvem de alta eficiência permite a previsão de fenômenos meteorológicos severos, tais como chuvas fortes, granizo, ventos fortes, tornados, ventanias descendentes e raios nuvem-solo prejudiciais. Neste sistema é utilizada a técnica de detecção de tempo de chegada (TOA) associada a técnicas de processamento digital (Digital Signal Processing) da forma de onda da radiação das descargas em uma larga faixa de frequência de detecção ou banda larga (faixas de ELF, VLF, LF, MF e HF – de kHz a dezenas de MHz), o que permite a caracterização completa dos

raios. Outra característica importante deste sistema é o seu baixo custo de implantação e operação.

Figura 4.1 – Rede BrasilDAT de sensores de localização de relâmpagos (fev. 2016).



Fonte: Colaboração do Grupo de Eletricidade Atmosférica do INPE.ELAT.

A Exatidão de Localização e a Eficiência de Detecção (DE) estimadas para a BrasilDAT é função da linha de base (distância entre sensores) conforme mostrado na Tabela 4.1 a seguir. O sensor de relâmpagos pode ser acoplado à sensores meteorológicos compondo uma estação meteorológica automática

(Figura 4.2) e conectado à rede internet para comunicação com a Central de Processamento TOA, através de um módulo de conexão de rede Ethernet.

Tabela 4.1 - Exatidão de Localização e Eficiência de Detecção estimadas para rede de sensores “WeatherBug Total Lightning” da BrasilDAT.

Linha de Base	Área por Sensor	Exatidão Localização Média	Eficiência Detecção Nuvem-Solo	Eficiência Detecção Intranuvem
100 km	10.000 km ²	< 200 m	> 99%	> 90%
200 km	40.000 km ²	< 350 m	> 95%	> 30%
300 km	90.000 km ²	< 500 m	> 90%	> 10%

Fonte: Adaptado de WEATHERBUG PROFESSIONAL (2010).

Figura 4.2 – Sensor “WeatherBug Total Lightning” (círculo amarelo) e sensores meteorológicos.



Fonte: WEATHERBUG PROFESSIONAL (2010).

4.2. Rede de sensores EFM

Como parte deste trabalho, o autor projetou e executou, com o apoio dos grupos de Eletricidade Atmosférica do INPE.ELAT e do DCTA.IAE, a integração e instalação de uma rede de sensores EFM, na região de São José dos Campos, Vale do Paraíba, SP, com a finalidade de coletar dados de campo elétrico atmosférico em tempo real para utilização neste trabalho. A integração, realizada no período de 2013 e 2014, teve como base sete sensores EFM instalados no período de 2008 a 2011 na região de São José dos Campos (FERRO *et al.*, 2012), para fins de pesquisa em eletricidade atmosférica pela Divisão de Ciências Atmosféricas (ACA) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) do Departamento de Tecnologia e Ciência Aeroespacial (DCTA). No último trimestre de 2013 iniciaram-se os trabalhos de integração com a adição de mais quatro sensores EFM na mesma região geográfica complementando a rede de sensores do DCTA.IAE e dotando todos os sensores de comunicação em tempo real. Como resultado da integração, o sistema se tornou a maior rede de sensores EFM do Brasil, com onze sensores EFM, com transmissão de dados em tempo real através de comunicação celular 3G, operando de forma padronizada e contínua. Até o momento em que este trabalho estava sendo escrito, nenhuma rede de sensores EFM com este tamanho e capacidade operacional havia sido implantada antes no Brasil. Outras redes de sensores EFM já foram instaladas em outros países (NASA.NSSTC.GHRC, 2015) e (ARANGUREN *et al.*, 2007). A integração da rede EFM foi uma experiência pioneira no Brasil, o que demandou seleção e testes de compatibilidade de sensores e componentes nacionais e importados, projeto robusto do hardware das estações EFM para operação em ambientes externos e o desenvolvimento de um sistema automático de supervisão e controle (supervisório) dos parâmetros críticos de funcionamento das estações EFM, como por exemplo, a tensão da bateria do equipamento.

A integração da rede de sensores EFM teve como meta a padronização da coleta e transmissão de dados, mesmo operando com sensores EFM de diferentes

fabricantes: Vaisala, Oyj e Campbell Scientific, Inc. Para a integração dos sensores EFM da Vaisala foram desenvolvidas soluções de hardware e software que exigiram um maior esforço e tempo de integração. Para os sensores EFM da Campbell Scientific foram desenvolvidos kits de telecomunicações com modem celular 3G para permitir a transmissão de dados em tempo real. Assim, todos os sensores EFM da rede integrada tornaram-se autônomos em termos de alimentação de energia e telecomunicações podendo ser instalados em localizações remotas onde não existam energia elétrica convencional (de concessionária) ou rede de comunicações por fio (LAN).

4.2.1. Integração do sensor EFM550 Vaisala

Quatro sensores EFM modelo EFM550 fabricados pela empresa finlandesa Vaisala, Oyj. (2006) foram utilizados para compor a rede de sensores EFM do INPE.ELAT. De fato, cinco sensores EFM550 foram integrados e um destes sensores foi utilizado para comparação de medições feitas por este e por um sensor modelo CS110 da Campbell Scientific, sendo ambos os sensores instalados na mesma localidade.

O sensor EFM550 (Figura 4.3) é constituído por um módulo externo (Módulo Sensor) composto de uma paleta rotativa (rotor) impulsionada por um motor e um conjunto fixo de placas (estator) alojados no mesmo invólucro. Quando o rotor gira, alternadamente as paletas rotativas expõem e protegem o estator ao campo elétrico atmosférico. Cargas detectáveis são induzidas nas placas do estator quando as paletas rotativas cortam o campo elétrico atmosférico. Estas cargas são amostradas no instante em que as paletas rotativas fornecem a exposição máxima da placa do estator gerando uma série de pulsos elétricos, cuja magnitude e polaridade são proporcionais à intensidade do campo elétrico atmosférico. A tensão de saída do Módulo Sensor EFM550 é processada pelo Módulo de Coleta e Processamento de Dados que possui uma porta de saída serial padrão RS-232 para a transmissão a um microcomputador PC para exibição ou sinalização de alarme em uma instalação convencional do sensor

EFM550. Na instalação típica do sensor EFM550, de acordo com o manual da Vaisala (2006), o Módulo Sensor é instalado ao ar livre, geralmente em uma superfície plana e livre de obstáculos, um pouco acima do nível do solo ou sobre um telhado ou laje de cobertura de uma edificação, onde é exposto ao campo elétrico atmosférico. Nesta configuração, a tensão de saída do Módulo Sensor é conduzida através de um cabo com quatro pares trançados tipo CAT5e a uma distância de até 400 metros de comprimento, onde se encontra instalado em local abrigado das intempéries o Módulo de Coleta e Processamento de Dados cuja porta de saída serial RS-232 é conectada a entrada serial RS-232 de um microcomputador PC configurado com software proprietário da Vaisala para visualização local das medições do sensor do campo elétrico atmosférico.

Figura 4.3 - Sensor Vaisala EFM550.



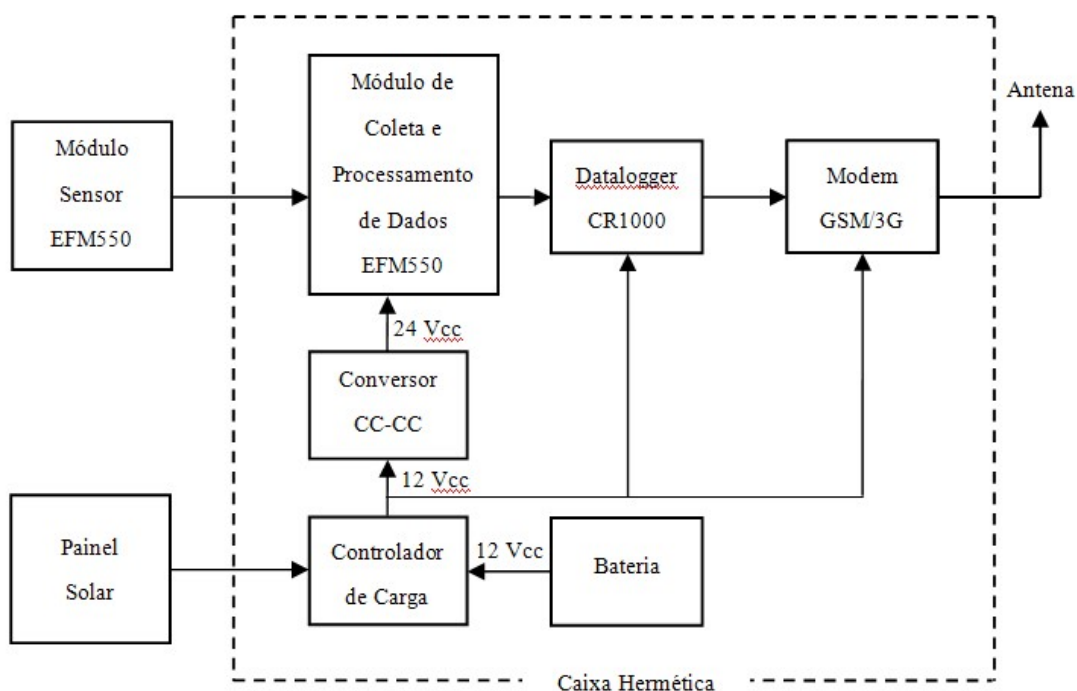
Fonte: VAISALA, OYJ. (2006)

Alternativamente à instalação típica do sensor EFM550, o qual exige um microcomputador PC instalado próximo ao sensor para gravação e visualização dos dados coletados, na integração dos sensores EFM550 foi adicionada capacidade de transmissão remota via modem celular 3G.

Foi também configurado um servidor PC, denominado “Estação Base” com a função de centralizar as operações de coleta, armazenamento e visualização dos dados e também realizar a atualização remota do software da rede de

sensores EFM. A saída serial RS-232 do Módulo de Coleta e Processamento de Dados do sensor EFM550 foi conectada a entrada serial de um módulo registrador de dados ou *datalogger*, fabricado pela Campbell Scientific, modelo CR1000, o qual foi conectado ao modem celular 3G, conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 4.4.

Figura 4.4 - Diagrama de blocos da integração do sensor Vaisala EFM550.



Fonte: Produção do autor.

O *datalogger* modelo CR1000 da Campbell Scientific foi selecionado para a integração com o sensor EFM550 da Vaisala tendo por objetivo a padronização do sistema de coleta de dados, visto que os sensores EFM modelo CS110 da Campbell Scientific utilizam o mesmo modelo de *datalogger* internamente.

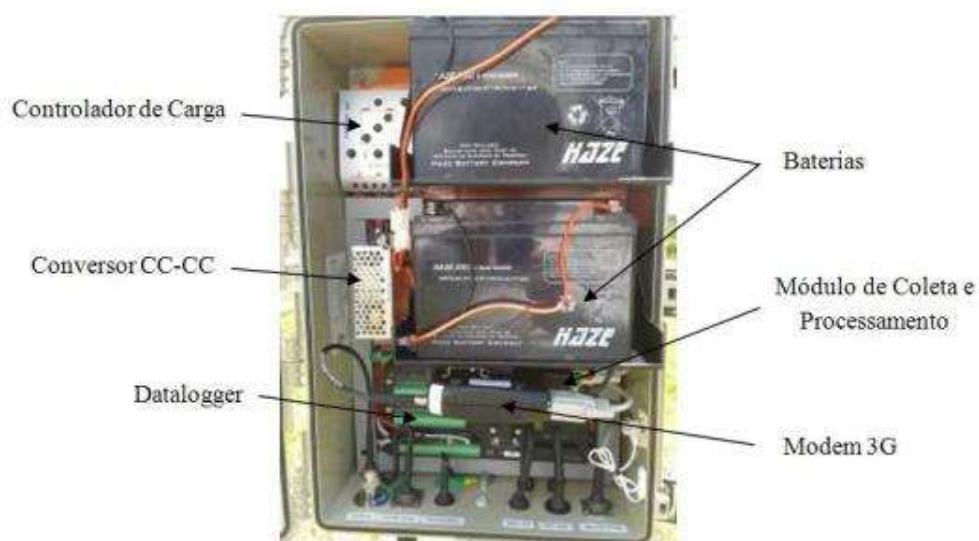
Com esta compatibilidade no hardware, foi possível desenvolver os softwares de coleta e transmissão de dados para ambos os modelos de sensores (Campbell Scientific CS110 e Vaisala EFM550) apenas modificando as rotinas de interface

de entrada de sinal dos sensores. As demais rotinas de geração e transmissão das tabelas de saída de dados são idênticas para os dois tipos de sensores EFM utilizados. O *datalogger* modelo CR1000 Campbell Scientific possui memória interna de dados de 4 Mbytes, sendo capaz de armazenar localmente os dados coletados nos últimos 30 dias. No caso de interrupção ou falha do sistema de transmissão de dados é possível recuperar localmente os dados coletados neste período.

O Módulo de Coleta e Processamento de Dados do EFM550, o *datalogger* CR1000, o dispositivo controlador de carga da bateria, o conversor CC-CC (converte 12V CC para 24 V CC para alimentação do sensor EFM550), duas baterias de 12V e 26 Ah (conectadas em paralelo para fornecerem 12V e 52 Ah) e o modem celular 3G foram acondicionados dentro de uma caixa hermética com grau de proteção IP67 (Figura 4.5), com conectores circulares e ambientalmente selados padrão MIL-5015 instalados na parte inferior da caixa para conexão externa do painel solar, do sensor EFM550 e conexão externa para antena celular através de um protetor coaxial contra surtos com conectores tipo N. Adicionalmente foram instalados na parte inferior caixa hermética dois conectores circulares e ambientalmente selados padrão EN3 para conexão futura de sensores meteorológicos, como por exemplo, pluviômetro de báscula e sensores genéricos com porta digital serial padrão SDI-12. Também foi instalado na parte inferior da caixa hermética um conector padrão EN3 para conexão externa de cabo serial RS-232 para coleta de dados e configuração local do *datalogger*, sem necessidade de abertura da tampa da caixa hermética, evitando-se assim a entrada de umidade no interior da caixa hermética.

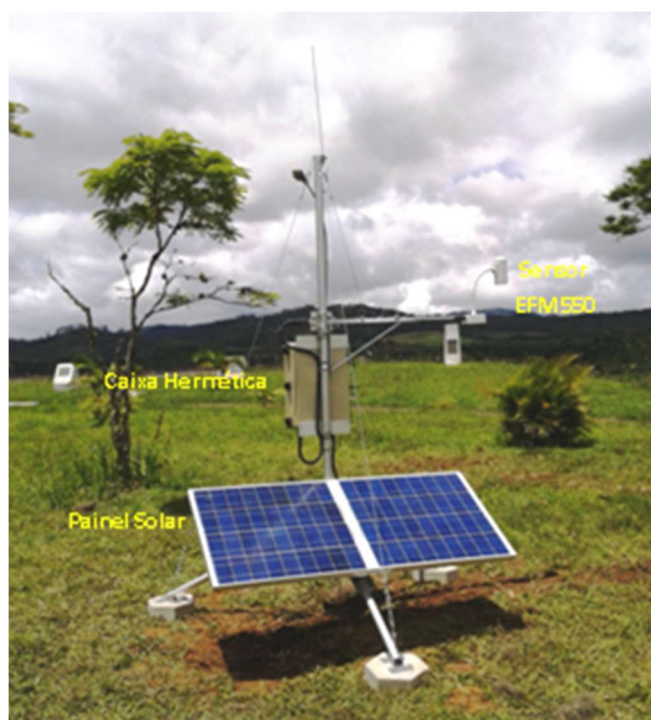
A caixa hermética, o painel solar de 130 W e o sensor EFM550 foram montados em um tripé metálico (Figura 4.6) projetado para a integração. Todo o conjunto foi conectado a uma malha de aterramento construída no local de instalação para proteção contra surtos causados por descargas atmosféricas.

Figura 4.5 - Vista dos componentes internos da caixa hermética utilizada para integração do sensor EFM550 Vaisala.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.6 – Tripé metálico com o sensor EFM550 Vaisala, caixa hermética e painel solar instalados em campo.



Fonte: Produção do autor.

4.2.2. Integração do Sensor CS110 Campbell Scientific

Sete sensores EFM modelo CS110 fabricados pela empresa americana Campbell Scientific, Inc. (2012) foram utilizados para compor a rede de sensores EFM do DCTA.IAE (Figura 4.7).

Figura 4.7 – Sensor Campbell CS110 com *datalogger* CR1000 acoplado.



Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. (2012)

Na versão padrão de fábrica o CS110 é acoplado a um coletor e registrador de dados ou *datalogger* modelo CR1000 também fabricado pela Campbell Scientific, Inc. Ao invés da hélice rotativa empregada nos sensores EFM tradicionais (por exemplo, o EFM550), o sensor CS110 utiliza um obturador alternante eletricamente conectado ao potencial de terra por uma cinta de aço inoxidável flexível. Um motor de passo abre e fecha o obturador alternativo por 45° durante as medições.

Para alimentação elétrica do CS110 foi integrado um subsistema de alimentação com bateria de tensão 12 V e capacidade de carga 26 Ah recarregável por painéis solares de 30 W de potência e módulo controlador de carga.

Dos sete sensores Campbell CS110 apenas quatro dispunham de comunicação, através de conexão com rede local Ethernet (LAN) com saída para a internet, utilizando o módulo NL100 de interface de rede Ethernet, também fabricado pela Campbell Scientific.

Antes da integração, três sensores CS110 não dispunham de qualquer tipo de comunicação, sendo necessária visita mensal de um técnico ao local para coletar os dados armazenados no *datalogger*.

Para cada um dos sete sensores CS110 foi desenvolvido um kit de modem celular 3G para permitir a comunicação em tempo real. Este kit consiste de uma pequena caixa hermética onde se encontra instalado em seu interior um modem celular 3G.

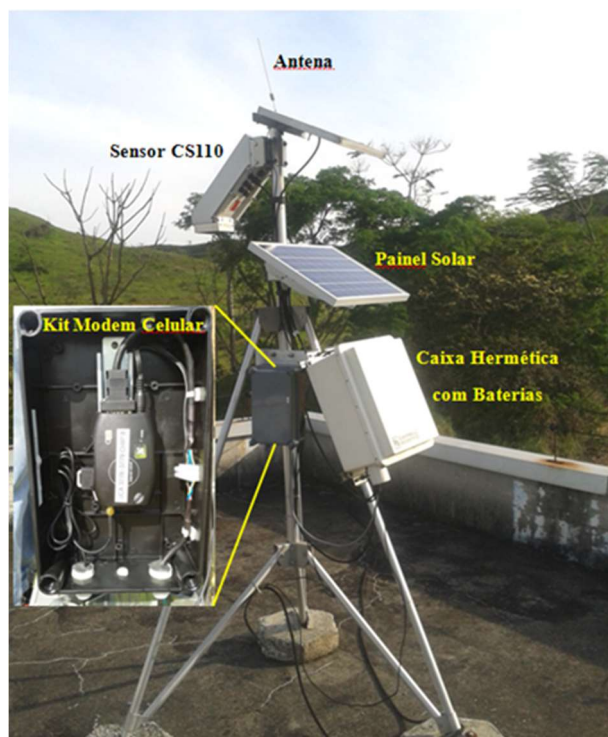
O interior desta caixa também abriga o cabeamento interno e um relé 12 V comandado pelo software do *datalogger* CR1000 que testa periodicamente a conexão de rede 3G do modem. Quando a conexão do modem é interrompida o relé é acionado pelo *datalogger* para desligar e ligar a alimentação de energia do modem com objetivo de reestabelecer a conexão.

A alimentação de energia do modem e a conexão serial RS-232 do modem com o sensor CS110 são fornecidos por um cabo externo pré-existente na montagem original deste sensor. Na integração foram conectadas as linhas de comunicação serial RS-232 (porta COM1 do *datalogger*) e de controle (porta C3 do *datalogger*) de acionamento do relé.

O modem modelo “FOBOS-3G Serial RS-232” fabricado pela empresa brasileira Ativa Soluções Ltda. (2015) foi selecionado para a integração. Este modem possui capacidade de transmissão no modo *fall-back* em: 3G (até 7 Mbps), EDGE (384 Kbps), GPRS (80 Kbps) e GSM (9,6 Kbps).

O kit modem celular 3G foi montado no tripé metálico do sensor CS110 (Figura 4.8). Uma antena celular externa omnidirecional foi instalada no topo da haste vertical do tripé.

Figura 4.8 – Kit modem celular 3G (em detalhe) desenvolvido para os sensores EFM Campbell Scientific CS110.



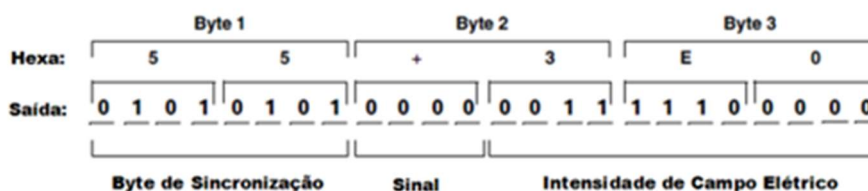
Fonte: Produção do autor.

4.2.3. Desenvolvimento de Software

Para a coleta, armazenamento local e transmissão das medições realizadas pelos sensores EFM550 foi desenvolvido software específico para o *datalogger* CR1000 em linguagem proprietária CRBASIC da Campbell Scientific. Neste software, também denominado software de usuário, uma sub-rotina de programação adquire e decodifica os dados da saída serial RS-232 do Módulo de Coleta e Processamento de Dados do EFM550, formatados em caracteres ASCII, velocidade 1.200 bps, 8 bits de dados, sem paridade e 2 bits de parada (1.200, 8, N, 2). A intensidade do campo elétrico é representada por um número de doze bits e um bit de sinal, com o bit de sinal repetido nos bits 14, 15, e 16. O bit menos significativo corresponde a 2,5 V/m de intensidade do campo elétrico, o que define a resolução de saída do sensor. A saída máxima é de cerca de 10 kV/m. Cada amostra de dados é composta por 3 bytes (24 bits).

O primeiro byte transmitido é o byte de sincronização (55H) ou (01010101). Os quatro bits mais significativos do segundo byte (bits 13, 14, 15 e 16) indicam o sinal do campo elétrico, positivo (0000) ou negativo (1111). Os quatro bits menos significativos do byte 2 (bits 9, 10, 11 e 12) e os 8 bits do byte 3 (bits 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8) representam a intensidade do campo elétrico. A Figura 4.9 apresenta uma amostra de dados codificada. A taxa de amostragem de digitalização dos dados é 500 milissegundos.

Figura 4.9 – Formato codificado de saída do Módulo de Processamento de Dados do sensor EFM 550 Vaisala.



Fonte: Adaptado de VAISALA, OYJ. (2006).

Após a decodificação e conversão dos dados do sensor EFM em unidades de engenharia, o “software de usuário” do *datalogger* aplica um fator de correção obtido para cada local de instalação de sensor EFM de acordo com os procedimentos descritos em VAISALA, OYJ. (2006) e CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. (2011). O “software de usuário” do *datalogger* coleta e armazena em memória local os dados dos sensores de acordo com o formato de dados de saída padronizado para ambas as redes de sensores EFM.

O formato é do tipo CSV (texto ASCII separado por vírgulas) de acordo com padrão TOA5 estabelecido pela Campbell Scientific. São gravados nos *dataloggers* três conjuntos ou tabelas de dados, sendo:

- a) Tabela **slow** - contém as médias de um minuto calculadas de 60 amostras de campo elétrico atmosférico.

- b) Tabela **fast** - contém amostras do campo elétrico atmosférico registradas a cada um segundo que são armazenadas somente quando o campo elétrico atmosférico ultrapassa um limite programado no software do *datalogger*, tipicamente ± 900 V/m.
- c) Tabela **manut** - contém medições para monitoramento do estado de funcionamento do equipamento, tais como: tensão da bateria, temperatura interna, umidade interna e sinalização de abertura da porta da caixa hermética de acondicionamento.

As tabelas de dados gravadas na memória do *datalogger* são transmitidas por protocolo FTP (*File Transfer Protocol*) sob o controle de uma sub-rotina do software de usuário programada para ser executada em intervalos de 5 minutos.

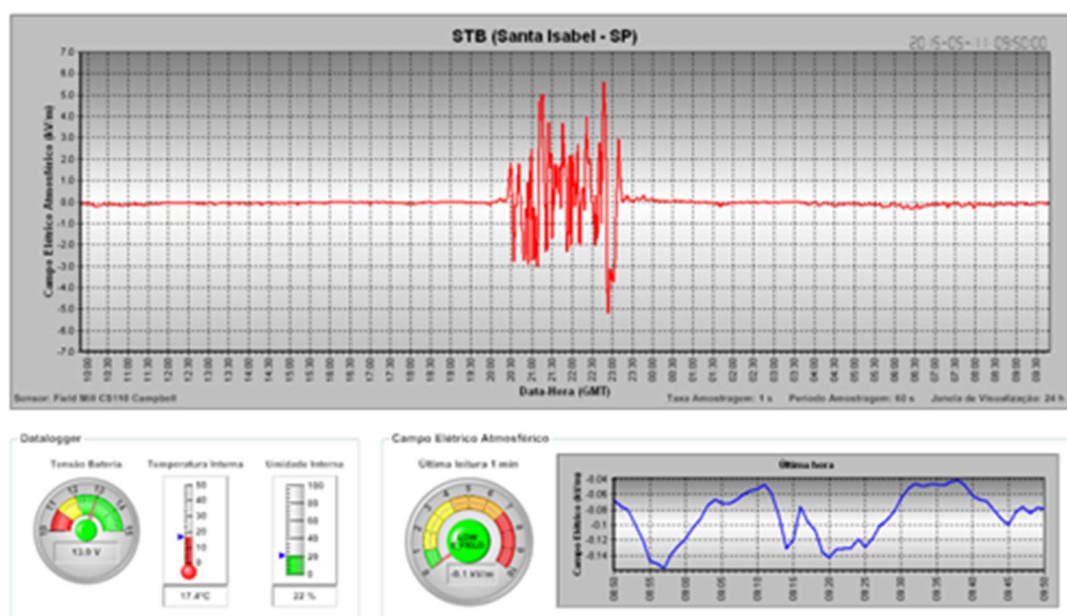
As tabelas de dados podem ser enviadas por FTP diretamente para um ou mais servidores de FTP na Internet, cujos parâmetros de acesso (nome ou número IP, usuário, senha e diretório) são definidos na sub-rotina de FTP no software de usuário do *datalogger*. Os seguintes intervalos de transmissão por FTP são definidos:

- a) Tabela **slow**: a cada 5 minutos;
- b) Tabela **fast**: a cada 5 minutos enquanto a condição de limite ultrapassado persistir;
- c) Tabela **manut**: a cada 3 horas.

Alternativamente, as tabelas de dados podem ser extraídas do *datalogger* em qualquer intervalo de tempo programado em um microcomputador PC, denominado de “Estação Base”, que esteja executando o software “LoggerNet”, um pacote de software da Campbell Scientific que fornece suporte para programação, extração de dados e comunicação entre os *dataloggers* e a “Estação Base”. A comunicação entre o *datalogger* e o modem 3G é suportada pelo *datalogger* através de sua interface serial RS-232 utilizando o protocolo PPP

(*Point-to-Point Protocol*) para encaminhamento dos dados ao modem celular 3G e também através do dispositivo de interface de rede ethernet modelo NL100 da Campbell Scientific, dispositivo pré-existente em quatro sensores CS110. O software “RTMC Pro” (*Real-Time Monitoring and Control Software Professional*) da Campbell Scientific, com capacidade para desenvolver interfaces homem-máquina, foi utilizado como ambiente de desenvolvimento para geração de telas gráficas específicas para monitoramento dos dados recebidos dos sensores EFM. A Figura 4.10 mostra um exemplo de tela gráfica desenvolvida no ambiente de software “RTMC Pro” para monitoramento de um sensor EFM da rede. Nesta tela é mostrado o campo elétrico atmosférico medido nas últimas 24 horas (gráfico maior), o campo elétrico atmosférico medido na última hora (gráfico menor), o campo elétrico atmosférico medido no último minuto (mostrador circular central) e parâmetros internos de operação do *datalogger*: tensão da bateria (mostrador circular esquerdo), temperatura interna da caixa de acondicionamento (mostrador vertical com barra vermelha) e umidade interna da caixa de acondicionamento (mostrador vertical com barra verde).

Figura 4.10 – Exemplo de tela gráfica para visualização do campo elétrico atmosférico medido por um sensor EFM.



Fonte: Produção do autor.

Em todas as medições realizadas pelo *datalogger* podem ser disparados alarmes que enviam automaticamente e-mails de alerta aos operadores do sistema quando algum nível limite ou faixa de operação programada para estas medições for ultrapassado. Uma tela gráfica (Figura 4.11) mostrando uma tabela com o estado da recepção de dados, bem como medições da tensão da bateria, umidade e temperatura interna das estações EFM constitui-se na interface de visualização do Sistema Supervisório da rede de sensores EFM, outro produto desenvolvido no ambiente de programação do software “RTMC Pro”.

Figura 4.11 – Tela do sistema de supervisão da rede de sensores EFM.

Supervisório - Rede Integrada de Sensores EFM									
#	EFM	Última Recepção	Recepção Última Hora	Última Coleta	% Erro	Data/Hora Última Coleta	Tensão Bateria (V)	Umidade Interna (%)	Temp Interna(°C)
1	CPV	●	●	Erro	46.0	2015-03-30 13:22:00	12.3	54	30.1
2	PRB	●	●	Normal	0.0	2015-03-31 18:53:00	13.4	47	37.3
3	SLS	●	●	Normal	0.0	2015-03-31 18:53:00	14.5	NAN	33.4
4	MOG	●	●	Normal	0.0	2015-03-31 18:53:00	13.3	NAN	38.0
5	IAE	●	●	Normal	0.0	2015-03-31 18:53:00	12.8	56	31.1
6	UCA	●	●	Normal	0.0	2015-03-31 18:54:00	13.1	57	29.4
7	HTO	●	●	Normal	0.0	2015-03-31 18:53:00	13.7	42	41.5
8	JCR	●	●	Normal	0.0	2015-03-31 18:53:00	13.0	62	32.3
9	GRM	●	●	Normal	13.0	2015-03-31 18:54:00	12.8	24	32.2
10	IGA	●	●	Normal	0.0	2015-03-31 18:54:00	13.8	13	30.5
11	STB	●	●	Normal	13.6	2015-03-31 18:54:00	12.1	21	33.8

Fonte: Produção do autor.

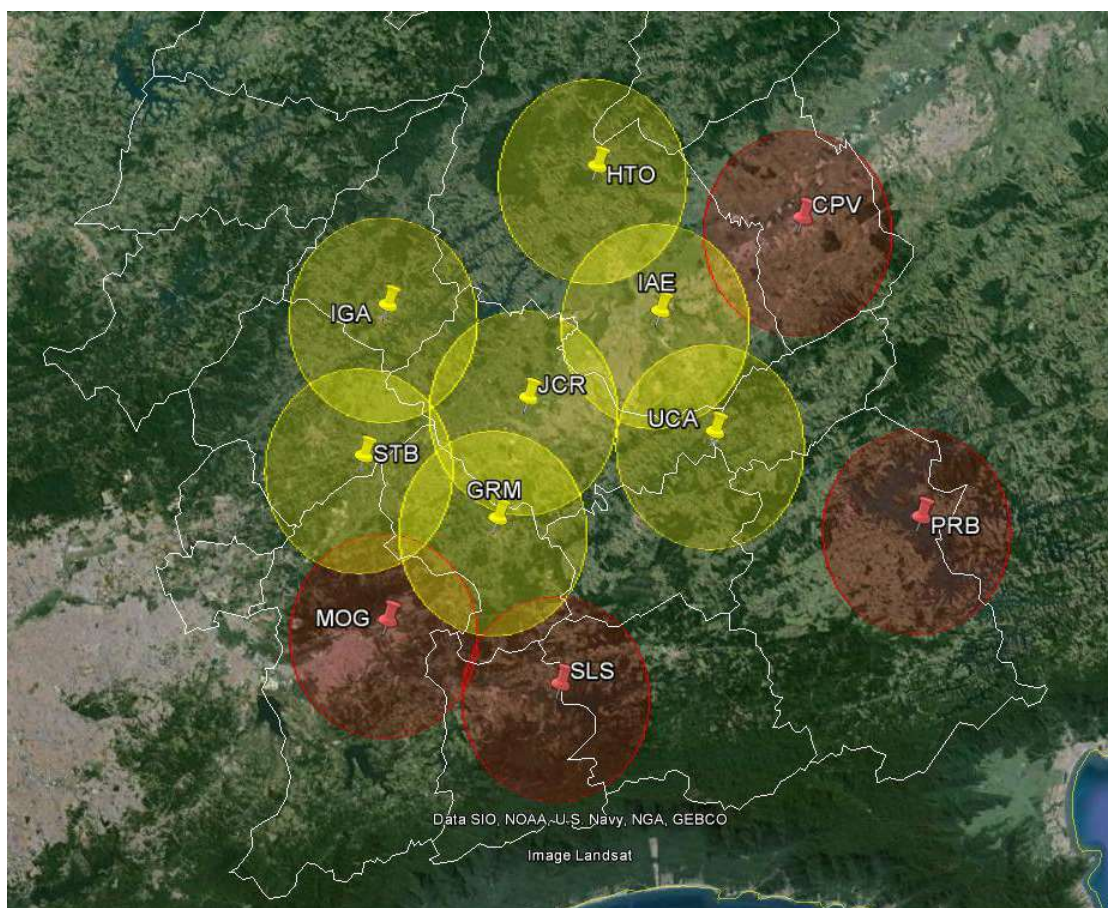
4.2.4. Localização geográfica dos sensores EFM

Os onze sensores da rede integrada de sensores EFM foram instalados na Região Metropolitana do Vale do Paraíba, Estado de São Paulo, Sudeste do Brasil. A Figura 4.12 mostra a localização e as áreas dos círculos de cobertura com raio de 10 km dos sensores EFM.

Os locais de instalação foram definidos conjuntamente pelos Grupos de Eletricidade Atmosférica do DCTA.IAE e INPE.ELAT, considerando os seguintes fatores:

- a) Adequação do local para a medição do campo elétrico atmosférico: área plana, sem vegetação, distante de objetos altos ou que mudem de posição e de cercas metálicas;
- b) Complementação da área de cobertura dos sensores EFM do DCTA.IAE;
- c) Segurança e proteção contra vandalismo;
- d) Telecomunicações: dentro da área de cobertura da operadora celular.

Figura 4.12 – Localizações e áreas de cobertura dos sensores EFM do DCTA.IAE (círculos amarelos) e dos sensores EFM do INPE.ELAT (círculos vermelhos).



Fonte: Produção do autor.

Ressalta-se que o raio de cobertura de um sensor EFM pode chegar até 20 km. Assim, a área de cobertura do sensor PRB que aparece deslocada do restante

da rede EFM para um raio de 10 km, pode ser ampliada e integrada à rede EFM quando se considera um raio de cobertura maior, como por exemplo, 15 km. Além disso, a localização do sensor PRB é plenamente justificada porque o sensor está localizado na área do reservatório de Paraibuna, onde é mais frequente a formação de tempestades convectivas locais. A Tabela 4.2 apresenta as siglas, localidades, coordenadas geográficas, instituições que operam os sensores, tipo de telecomunicações disponível e data do início de operação cada sensor EFM.

Tabela 4.2 – Rede integrada de sensores EFM.

#	Sigla	Local/Estação	Lat.	Lon.	Operador	Telecom	Início
1	UCA	Usina Cel. Abner	-23,32988	-45,80882	DCTA	3G	07/2008
2	IAE	Torre IAE	-23,21251	-45,86674	DCTA	LAN+3G	12/2009
3	STB	Santa Isabel	-23,35309	-46,18110	DCTA	LAN+3G	11/2010
4	GRM	Guararema	-23,41423	-46,03903	DCTA	LAN+3G	11/2010
5	JCR	Jacareí	-23,29702	-46,00673	DCTA	3G	11/2010
6	IGA	Igaratá	-23,20646	-46,15538	DCTA	LAN+3G	05/2011
7	HTO	Horto SJC	-23,07138	-45,93360	DCTA	3G	08/2011
8	MOG	Mogi das Cruzes	-23,51370	-46,15603	INPE	3G	12/2013
9	SLS	Salesópolis	-23,52511	-45,78533	INPE	3G	12/2013
10	PRB	Paraibuna	-23,41264	-45,58980	INPE	3G	12/2013
11	CPV	Caçapava	-23,12164	-45,71636	INPE	3G	12/2013

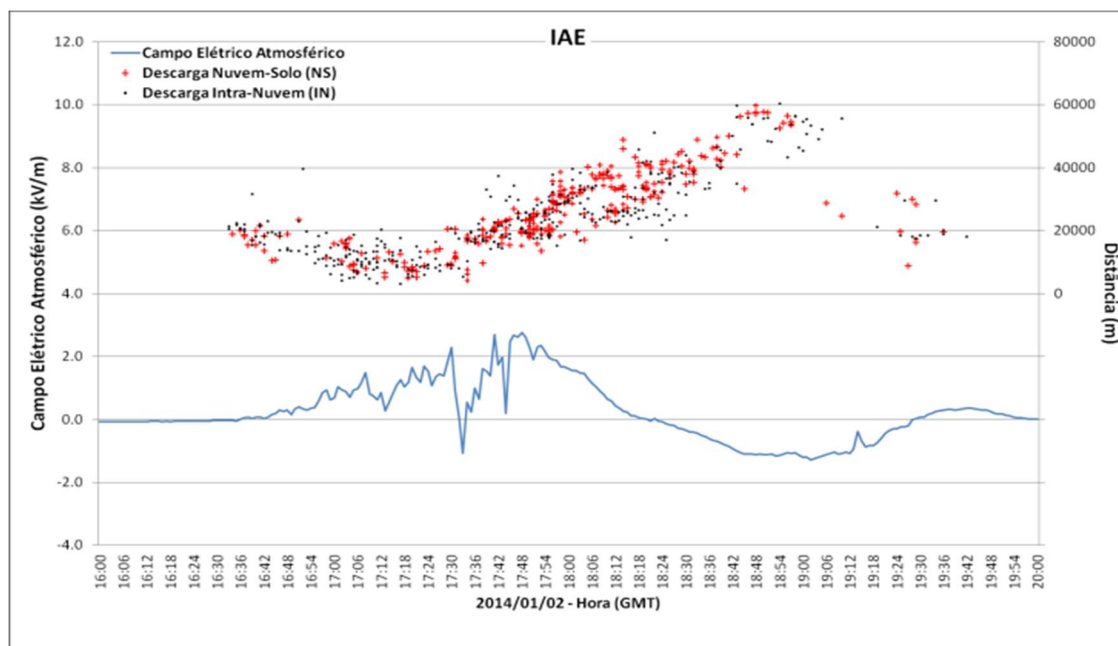
Fonte: Produção do autor.

Além dos onze sensores EFM relacionados acima, foi também instalado um sensor EFM de testes (sensor Vaisala, modelo EFM550) no mesmo sítio do sensor IAE (sensor Campbell, modelo CS110) para comparação de medições realizadas por ambos os sensores. O sensor Vaisala EFM550 de testes operou no período de dezembro/2013 a julho/2014. Com os dados coletados por ambos sensores instalados no mesmo sítio foi ajustada a curva de calibração ou equação de transferência dos sensores Vaisala EFM550.

4.2.5. Medições realizadas pela rede de sensores EFM

A rede integrada de sensores EFM entrou em operação definitiva em janeiro de 2014 e desde então vem realizando as medições de campo elétrico atmosférico de forma regular, as quais são transmitidos continuamente para a “Estação Base” instalada nas dependências no Núcleo de Monitoramento de Tempestades do ELAT, em São José dos Campos, onde são armazenadas em unidade de disco (*storage unit*). A Figura 4.13 mostra as variações do campo elétrico atmosférico no tempo e as distâncias entre as descargas nuvem-solo (NS) e intranuvem (IN) no sensor IAE, durante uma tempestade ocorrida em 2 de janeiro de 2014, das 16:00h às 20:00h GMT (*Greenwich Mean Time*). As variações no campo elétrico atmosférico medido pelos sensores EFM podem ser observadas durante a aproximação e evolução da tempestade. Os pontos ilustram a distância e o horário de cada descarga (NS em vermelho e IN em preto). A linha contínua em azul corresponde ao campo elétrico atmosférico médio em cada minuto medido pelo sensor EFM.

Figura 4.13 - Medições do campo elétrico atmosférico e distâncias para as descargas atmosféricas de um sensor da rede integrada de sensores EFM.



Fonte: Produção do autor.

5. DADOS E METODOLOGIA

5.1. Área e período de estudo

A área de estudo, delimitada espacialmente pelo retângulo de coordenadas geográficas: -46,4° W; -45,329° W; -23,811° S; -22,842° S, foi definida em função da localização da rede de sensores EFM do DCTA.IAE e INPE.ELAT, descrita em detalhes no capítulo 4 deste trabalho. Os onze sensores EFM desta rede se encontram instalados na Região Metropolitana do Vale do Paraíba (RMVP), Estado de São Paulo, Sudeste do Brasil. A região está localizada em uma área industrializada com uma população em torno de um milhão de habitantes. Compreende onze municípios, com uma área total de aproximadamente 12.700 quilômetros quadrados onde diversas atividades econômicas são desenvolvidas, tais como indústria aeroespacial e automotiva, refino de petróleo, agricultura e também turismo rural. A área de estudo também tem boa cobertura pela rede de localização de descargas atmosféricas BrasilDAT (PINTO JUNIOR et al., 2011), permitindo que os dados de localização de descargas atmosféricas desta rede fossem utilizados neste trabalho. Segundo o mapa apresentado na página web do INPE.ELAT (2015), a densidade de descargas atmosféricas na região de São José dos Campos é 11,7 descargas/km²/ano, sendo considerada alta. O período de estudo compreende os meses do verão de 2013-2014, de novembro de 2013 até abril de 2014.

5.2. Base de dados

Foram utilizados dados de localização de relâmpagos nuvem-solo (NS) obtidos pela rede BrasilDAT e fornecidos pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica do INPE.ELAT, no formato CSV com um cabeçalho e demais linhas com os dados numéricos. Os relâmpagos NS foram agrupados por tempestade, considerando o intervalo mínimo de 30 minutos entre o último relâmpago NS de uma tempestade e o primeiro relâmpago NS da tempestade subsequente. De um total de 44.494 relâmpagos NS, foram discriminadas 176 tempestades, sendo 73 (41.5%) tempestades classificadas como “convectivas locais” e 103 (58.5%)

tempestades classificadas como “sistemas se aproximando” da área de estudo provenientes de outras regiões. Para esta classificação foi utilizado o critério da ocorrência ou não de relâmpagos NS anteriores ao primeiro relâmpago NS ocorrido na área de estudo. Também foram analisadas imagens de satélite e de radar para validação do critério. A separação e a classificação das tempestades foram realizadas pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica do DCTA.IAE que utilizou o mesmo conjunto de dados em outra pesquisa, o qual foi fornecido em colaboração para utilização neste trabalho.

Os dados de campo elétrico atmosférico, expressos em Volts por metro (V/m), foram obtidos da rede integrada de sensores EFM do DCTA.IAE e INPE.ELAT. O formato dos dados é do tipo CSV de acordo com padrão TOA5 utilizado nos *dataloggers* da Campbell Scientific. As medições de campo elétrico atmosférico são continuamente digitalizadas pelos *dataloggers* dos sensores EFM a uma taxa de amostragem de 1Hz (uma amostra por segundo). Enquanto o campo elétrico atmosférico não atinge o valor crítico de disparo do alerta, o *datalogger* do EFM armazena, o valor médio do campo para cada intervalo de 1 minuto, na tabela *slow*. Quando o valor crítico é atingido, o *datalogger* do EFM passa a armazenar, além da média de um minuto na tabela *slow*, os valores instantâneos medidos a cada segundo na tabela *fast*, que contém oscilações de alta frequência do campo detectadas pelo sensor EFM devido ao rearranjo de cargas dentro de uma nuvem durante uma tempestade. Para evitar disparos de alarmes falsos, nas simulações dos níveis de alerta, devido as oscilações de alta frequência do campo, foram utilizados neste trabalho os dados da tabela *slow*, que contém as médias de um minuto, assumindo que estas médias são uma técnica satisfatória de filtragem (filtro passa-baixa) destas oscilações de alta frequência.

Os horários estão sincronizados com o horário GMT (*Greenwich Mean Time*) tanto para os dados de localização de descargas atmosféricas da rede BrasilDAT quanto para os dados de campo elétrico atmosférico coletados pela rede de sensores EFM.

5.3. Preparação dos dados de campo elétrico atmosférico

A transmissão via FTP a cada cinco minutos da tabela *slow* gera, na “Estação Base”, um total de 8.640 arquivos *slow* para trinta dias de coleta de cada sensor EFM. Cada um destes arquivos contém cinco médias de um minuto calculadas de sessenta amostras do campo elétrico atmosférico. Para um período de cinco meses foram gerados pelos onze sensores EFM um total de 475.200 arquivos *slow*. Foi realizada a soma de todos os arquivos de um mesmo sensor EFM para geração de um único arquivo mensal, ordenado cronologicamente. Em seguida foi realizada a filtragem dos arquivos mensais para eliminação de eventuais repetições de horários de dados (linhas idênticas) causadas por falhas de recepção na “Estação Base”, devido à eventuais interrupções neste sistema por motivos de falhas na alimentação elétrica ou de comunicação (rede).

5.4. Ajuste das séries de dados dos sensores EFM Vaisala

Para ajuste das séries de dados produzidas pelos sensores Vaisala modelo EFM550 da rede do INPE (sensores CPV, MOG, PRB e SLS) foram comparadas as medições de campo elétrico atmosférico realizadas por um destes sensores (sensor TST) com as medições realizadas por um sensor Campbell modelo CS110 (sensor IAE), ambos sensores instalados no mesmo sítio (Torre do DCTA.IAE). Este procedimento de ajuste foi realizado com a colaboração do Grupo de Eletricidade Atmosférica do DCTA.IAE.

Para melhor representação da faixa dinâmica de operação dos sensores EFM foram comparados os valores medidos por ambos sensores (TST e IAE) em 14 tempestades ocorridas entre dezembro de 2013 e março de 2014. O conjunto de dados foi importado para uma planilha EXCEL onde foram plotados os gráficos de dispersão e determinadas as respectivas retas de ajuste e correlações para cada tempestade analisada.

A Tabela 5.1 contém um resumo das tempestades analisadas, o intervalo de duração de cada tempestade, o intervalo de dados usado na análise, bem como

a equação da reta que melhor se ajustou ao conjunto de medições (Ajuste médio).

Tabela 5.1 – Resumo da análise para determinação da reta de ajuste para os sensores EFM550.

Data	Intervalo adotado		Reta de ajuste			
	Início	Fim	Equação	Correlação	Offset	Ângulo
22/12/2013	17:00	21:00	$y = 0.801x + 77.354$	$R^2 = 0.9535$	77,35	0,801
04/01/2014	13:00	22:00	$y = 0.7431x + 36.071$	$R^2 = 0.8936$	36,07	0,7431
16/01/2014	13:00	19:00	$y = 1.0169x + 89.43$	$R^2 = 0.9056$	89,43	1,0169
17/01/2014	13:00	20:00	$y = 1.2905x + 139.9$	$R^2 = 0.8884$	139,90	1,2905
22/01/2014	16:00	23:00	$y = 1.2905x + 139.9$	$R^2 = 0.8884$	139,90	1,2905
23/01/2014	14:00	21:00	$y = 0.8592x + 44.76$	$R^2 = 0.9589$	44,76	0,8592
14/02/2014	14:00	23:00	$y = 0.7962x + 56.311$	$R^2 = 0.9709$	56,31	0,7962
22/02/2014	17:00	23:00	$y = 0.7962x + 56.311$	$R^2 = 0.9709$	56,31	0,7962
24/02/2014	16:00	23:00	$y = 0.7782x + 65.897$	$R^2 = 0.9257$	65,90	0,7782
28/02/2014	11:00	16:00	$y = 0.7742x + 28.393$	$R^2 = 0.9733$	28,39	0,7742
13/03/2014	17:00	23:59	$y = 0.7694x + 63.363$	$R^2 = 0.9039$	63,36	0,7694
17/03/2014	17:00	23:59	$y = 0.812x + 58.144$	$R^2 = 0.9091$	58,14	0,812
30/03/2014	15:00	22:00	$y = 0.812x + 58.144$	$R^2 = 0.9091$	58,14	0,812
31/03/2014	13:00	22:00	$y = 0.8147x + 14.796$	$R^2 = 0.9385$	14,80	0,8147
	Ajuste médio:		$y = 0.8824x + 66.34$		66,34	0,8824

Fonte: Colaboração do DCTA.IAE.

Na plotagem da curva dispersão foi observado que o sensor EFM550 (TST) apresenta saturação para valores medidos de campo elétrico atmosférico inferiores a -250 V/m e superiores a +2.600 V/m. Assim, na análise para determinação da melhor reta de ajuste para o sensor EFM550 foi considerada apenas o intervalo de dados entre os valores de saturação (-250 V/m e 2.600 V/m), sendo desconsiderados os valores fora desta faixa. Para corrigir o problema da saturação será necessário ajustar em laboratório o ganho dos sensores EFM550 utilizando uma fonte de alta tensão com rastreabilidade metrológica, o que não foi possível durante a integração destes sensores pela não disponibilidade desta fonte.

A equação de ajuste médio resultante ($y = 0.8824x + 66.34$) foi aplicada à toda série de dados coletada pelos sensores Vaisala modelo EFM550 da rede do INPE (sensores CPV, MOG, PRB e SLS). Nestas séries de dados também foram eliminados os valores de campo medidos fora do intervalo de -250 V/m e 2.600 V/m, onde ocorre a saturação do sensor.

5.5. Estruturação do banco de dados geográfico

Com os dados de descargas atmosféricas obtidos da rede BrasilDAT e os dados de medições de campo elétrico atmosférico da rede de sensores EFM foi construído um banco de dados utilizando o gerenciador de banco de dados geográfico POSTGRESQL, com a extensão espacial POSTGIS que permite o uso de objetos GIS (Sistemas de Informação Geográfica) e seu armazenamento em banco de dados (THE POSTGRESQL GLOBAL DEVELOPMENT GROUP, 2016).

Foram criadas três tabelas de dados para armazenamento dos dados de raios (raio), de campo elétrico de cada EFM (efm) e localização destes (loc_efm), cujas estruturas são apresentadas nas tabelas abaixo.

Tabela 5.2 - Estrutura da tabela raio

Nome da tabela	Atributo	Descrição do atributo
raio	raio_id	Número sequencial no banco de dados que identifica cada raio no banco de dados.
	datahora	Data e hora de ocorrência do raio.
	latitude	Latitude do local de ocorrência do raio.
	longitude	Longitude do local de ocorrência do raio.
	flag_intranuvem	Identificação do tipo de raio.
	tempestade	Número sequencial atribuído à tempestade em que ocorreu o raio.
	raio_geom	Geometria associada à localização do raio. Interno ao banco de dados.

Tabela 5.3 - Estrutura da tabela efm

Nome da tabela	Atributo	Descrição do atributo
efm	efm_id	Número sequencial no banco de dados que identifica cada medida de campo elétrico para um mesmo EFM.
	datahora	Data e hora da medição do campo elétrico.
	uca_ef, iae_ef, stb_ef, jcr_ef, grm_ef, iga_ef, hto_ef, sls_ef, prb_ef, mog_ef, cpv_ef	Valores do campo elétrico de cada EFM (série histórica de dados).

Tabela 5.4 - Estrutura da tabela loc_efm

Nome da tabela	Atributo	Descrição do atributo
loc_efm	efm_id	Número sequencial atribuído ao EFM.
	sigla	Sigla do EFM.
	localizacao	Descrição ou nome do local do EFM.
	municipio	Município onde está instalado o EFM.
	uf	Unidade da Federação.
	latitude	Latitude em graus decimais do EFM.
	longitude	Longitude em graus decimais do EFM.
	datum	Datum de referência.
	proprietario	Proprietário do EFM.
	fabricante	Fabricante do EFM.
	status	Estado operacional do EFM (ativo/inativo).
	geom	Geometria associada à localização do EFM. Interno ao banco de dados.

Com o banco de dados estruturado foram criadas as consultas em linguagem SQL para seleção e cruzamento dos dados, sendo:

- a) **Consulta SQL1:** faz consulta nas tabelas *loc_efm* e *raio* e através de funções geográficas separa os raios ocorridos, no período todo, dentro das áreas dos círculos de 5 km e dos anéis de 5 a 10 km e de 10 a 15 km (*buffers*) tendo como centro cada sensor EFM da rede. Nesta consulta foram geradas, para cada EFM, três vistas (*views*), com *buffers* de 0-5; 5-10 e 10-15 km, contendo os raios ocorridos dentro destes *buffers*, no total de 33 vistas para os onze EFM da rede.

- b) **Consulta SQL2:** faz consulta nas vistas de *buffers* criadas pela Consulta SQL 1 e na tabela *efm* para gerar uma tabela de saída com os valores e horários de campo elétrico dos EFM e os raios ocorridos em horários próximos. Foram geradas para cada um dos onze EFM, tabelas para três níveis de campo elétrico ($\pm 0,5$; $\pm 0,9$ e $\pm 1,2$ kV) em cada um dos três *buffers* (0-5; 5-10 e 10-15 km). No total foram geradas 99 tabelas.

Na sequência, todas as tabelas geradas pela Consulta SQL2 foram importadas para planilhas EXCEL para separação das ocorrências de raios e identificação dos eventos de alarme utilizando as ferramentas de filtragem e macros desenvolvidas para automatizar e agilizar esta ação.

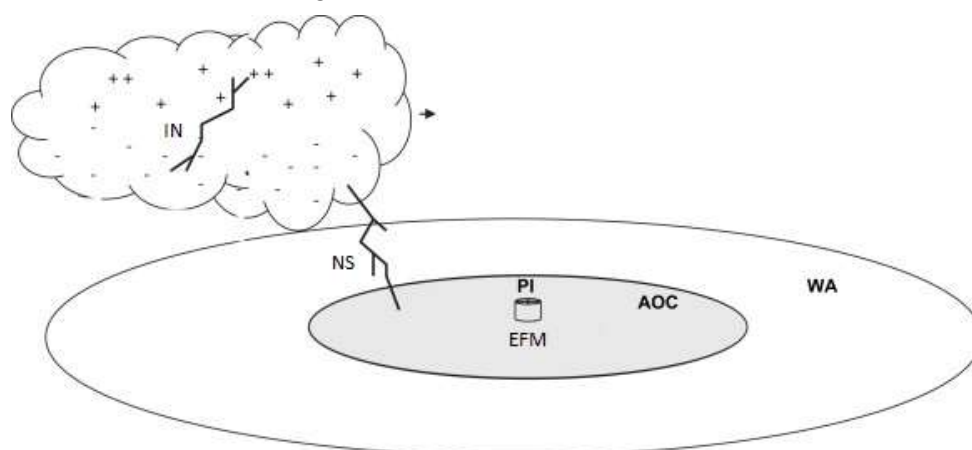
Em seguida as planilhas geradas pelo procedimento acima descrito foram separadas por EFM e por níveis de campo elétrico, contendo os três *buffers* na mesma planilha resultando em três planilhas (3 níveis de campo elétrico) para cada EFM, ou seja, 33 planilhas no total.

Todas estas planilhas foram utilizadas na avaliação da efetividade dos alarmes de cada um dos sensores pontualmente utilizando o método de avaliação descrito a seguir.

5.6. Método das duas áreas para avaliação de sistemas de alerta

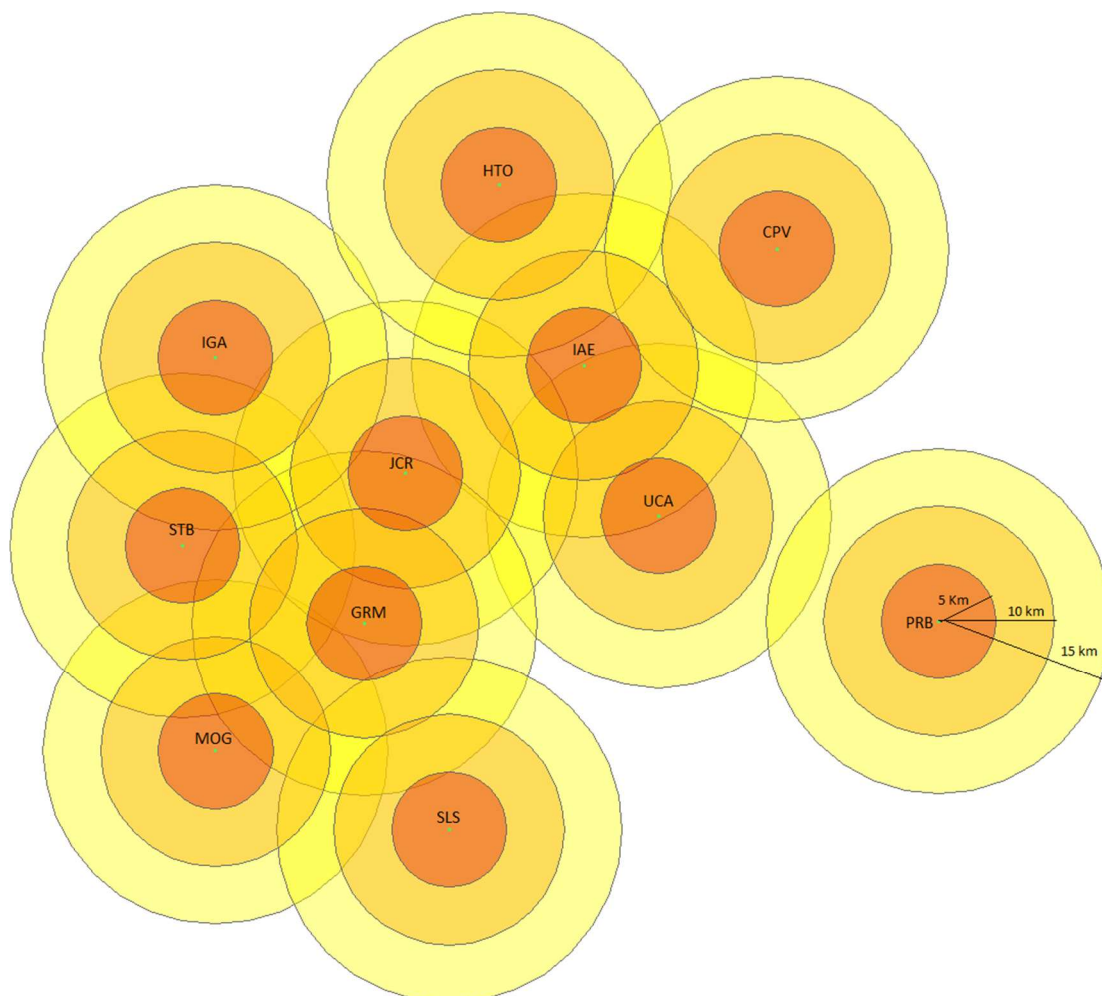
O método conhecido como “método das duas áreas” descrito previamente por Murphy e Cummins (2000), largamente utilizado na análise de sistemas de alerta (MONTANYÀ *et al.*, 2008; MURPHY; HOLLE, 2006), define duas áreas concêntricas em torno de uma determinada localização geográfica chamada de “ponto de interesse” (PI). A primeira área que circunda o PI é chamada “área de interesse” ou AOC (do inglês, *Area Of Concern*). Esta região inclui zonas altamente vulneráveis à queda de raios sem notificação. A segunda área é a “área de alerta” ou WA (do inglês, *Warning Area*) e circunda a AOC. Quando uma atividade atmosférica é reportada sobre a WA, o alerta de tempestade deve ser acionado e ações preventivas devem ser iniciadas. A Figura 5.1 mostra o “método das duas áreas” utilizado neste trabalho. Para comparação com avaliações realizadas anteriormente (FERRO *et al.*, 2012) neste trabalho foram consideradas uma região interna de área circular e raio de 5 km (AOC) e duas áreas (WA) anelares concêntricas, de 5 a 10 km e de 10 a 15 km, que circundam uma a outra e a AOC (Figura 5.2).

Figura 5.1 – Método das duas áreas



Fonte: Adaptado de LÓPEZ *et al.* (2012).

Figura 5.2 – Áreas AOC (0-5 km) e WA (5-10 e 10-15 km) da rede EFM.



Fonte: Produção do autor

Os alertas são avaliados utilizando os seguintes parâmetros:

- **EA (*Effective Alarm*) ou Alarme Efetivo:** alarme disparado corretamente antes da ocorrência de um raio na AOC.
- **FA (*False Alarm*) ou Alarme Falso:** alarme disparado sem ocorrência de raio na AOC.
- **FTW (*Failure To Warn*) ou Falha de Alarme:** alarme não disparado e há ocorrência de raio na AOC.

- **LT (*Lead Time*) ou Tempo de Antecipação:** tempo decorrido entre o disparo do alarme e a ocorrência de raio na AOC.
- **DT (*Dwell Time*) ou Tempo de Permanência:** tempo estabelecido para a extinção do alarme. Este tempo é reiniciado por qualquer raio ocorrido na AOC ou na WA. Em muitas atividades o DT é adotado em função do custo da paralização da atividade. Geralmente é adotado 30 minutos para o DT em refinarias de petróleo e aeroportos.

A verificação e validação dos alarmes de alerta de raios utiliza a mesma técnica empregada para validação dos métodos de previsão para vários fenômenos naturais, como a previsão meteorológica. Este método, descrito por D. S. Wilks (2006) utiliza uma matriz (Tabela 5.5) de contingência, de tamanho 2 x 2.

Tabela 5.5 - Tabela de contingência

		Observado		
		Sim	Não	Total
Previsto	Sim	EA	FA	Previsto Sim
	Não	FTW	CNW*	Previsto Não
	Total	Observado Sim	Observado Não	

*CNW = Corretamente não alertado

Fonte: Adaptado de WILKS (2006).

Para avaliação da efetividade da metodologia de alerta, três variáveis estatísticas, utilizadas por diversos autores (ARANGUREN *et al.*, 2009; LÓPEZ *et al.*, 2012; INAMPUÉS *et al.*, 2009; FERRO *et al.*, 2012), também são utilizadas neste trabalho, sendo:

- **POD (*Probability of Detection*) – Probabilidade de Detecção:** relação entre o número de alertas válidos (EA) e o número total de ocorrências de raios (EA + FTW) na AOC.

$$POD = \frac{EA}{EA+F} \quad (5.1)$$

- **FAR (False Alarm Rate) – Taxa de Alarme Falso:** relação entre o número de FA e número total de eventos de alarme (FA+EA).

$$FAR = \frac{FA}{FA+EA} \quad (5.2)$$

- **BIAS - Tendência:** indica se o método de alerta tem tendência a subestimar o alerta (BIAS < 1) ou sobre-estimar o alerta (BIAS > 1)

$$BIAS = \frac{EA+FA}{EA +FTW} \quad (5.3)$$

5.7. Critérios de alerta

Foram adotados os seguintes critérios de alerta:

- 1) O alerta é ativado quando o nível crítico de campo elétrico é ultrapassado. Ferro *et al.* (2012) em seu estudo utilizou os níveis de $\pm 0,5$; $\pm 0,8$; $\pm 0,9$; $\pm 1,0$; $\pm 1,2$ e $\pm 1,5$ kV para disparo do alerta, concluindo que o nível de $\pm 0,9$ kV apresentou a melhor efetividade do alerta em associação com uma distância de alcance de 10 km em torno do local onde o sensor EFM se encontra instalado (PI). Neste trabalho, tendo como referência os resultados do citado estudo foram adotados, para simplificação, os níveis de $\pm 0,5$; $\pm 0,9$ e $\pm 1,2$ kV para disparo do alerta.
- 2) O alerta é classificado como bem-sucedido (EA) se o primeiro raio é detectado dentro da AOC até 45 minutos após a ativação do alerta (DT).
- 3) O alerta é classificado como falso (FA) quando não ocorrer nenhum raio dentro da AOC após passados 45 minutos da sua ativação (DT).

- 4) Um Tempo de Permanência (DT) de 45 minutos foi adotado para extinção do alarme. Este tempo DT é reiniciado toda vez que um critério de alerta é detectado. Também foi avaliado o tempo DT de 30 minutos.

5.8. Planilhas de eventos de alarme

Aplicando as técnicas de avaliação de efetividade e os critérios de alerta descritos acima, foram geradas as planilhas com as estatísticas dos eventos EA, FA e FTW e cálculo do Tempo de Espera (LT) para a área circular AOC (0-5 km) e as duas áreas WA (5-10 km e 10-15 Km). Para cada sensor EFM foram geradas 3 planilhas de eventos, uma para cada nível de campo crítico para disparo do alarme ($\pm 0,5$; $\pm 0,9$ e $\pm 1,2$ kV). Ver trecho de planilha no Apêndice A (Figura A.1) desta tese.

Os resultados das estatísticas contidos nas três planilhas de eventos, de cada sensor EFM, foram consolidadas em única planilha de análise que resume todo o estudo de efetividade do alerta de um sensor EFM. Nesta planilha de análise são calculadas as variáveis estatísticas de avaliação de alertas, POD e FAR e também são gerados gráficos e tabelas resumo da avaliação. Além da geração das planilhas de análise individualizadas por sensor foi gerada uma planilha de análise para toda a rede de sensores EFM.

5.9. Interpolação das medições de campo elétrico atmosférico

A seguir é apresentado o método utilizado para geração das figuras com a representação das linhas equipotenciais (isolinhas) e das matrizes de pontos de grade de campo elétrico atmosférico interpolados.

Como os sensores EFM estão localizados de forma irregular na região de estudo, foi necessário utilizar uma técnica de interpolação para obtenção de valores em pontos de grade regularmente espaçados.

Foi selecionada a técnica de interpolação proposta por Barnes (1964) que é adequada para aplicação em algoritmos de geração de pontos de grades.

O método de interpolação de Barnes estabelece um peso proporcional à distância entre o ponto de grade, para o qual está sendo calculado o valor interpolado do campo, e cada um dos sensores que estão participando do processo de interpolação de maneira a determinar a contribuição relativa que a medida de cada um deles dará para o cálculo do valor interpolado no ponto de grade considerado.

O valor atribuído a cada ponto de grade é o melhor ajuste dos valores ao seu redor (raio de influência). O raio de influência é definido como sendo a distância a partir da qual a contribuição da medida de um determinado sensor é desprezível no cálculo do valor interpolado.

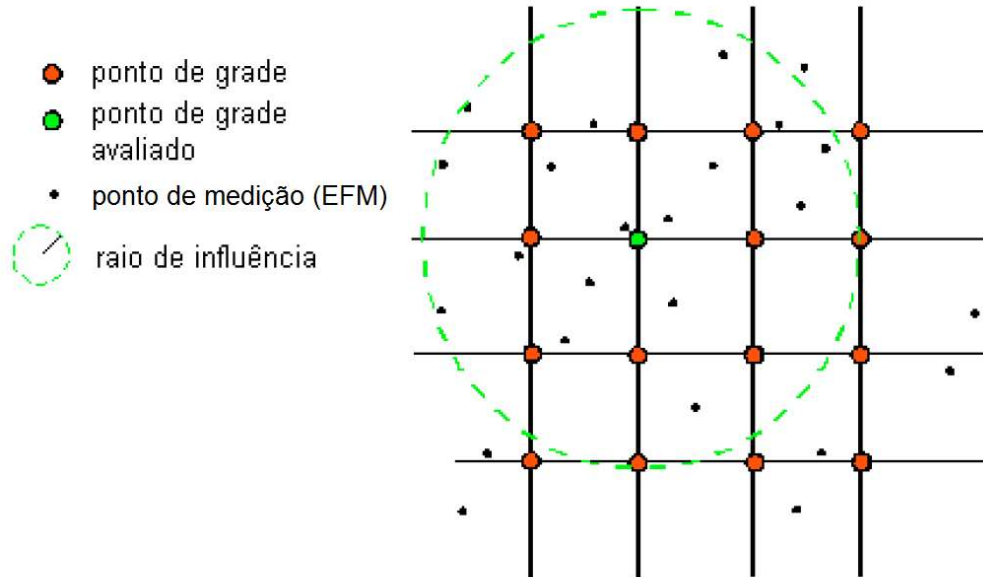
Ao se considerar vários pontos de medição para definir o valor do ponto de grade, ocorre uma suavização dos dados. O valor final, portanto, estará entre os valores máximo e mínimo dos pontos de medição utilizados. No caso, haverá uma suavização dos valores de campo elétrico medidos pelos EFM da rede.

No método de interpolação de Barnes, a primeira interpolação é realizada para produzir um campo inicial de campo elétrico, e em seguida a segunda interpolação melhora a qualidade da informação obtida da interpolação anterior.

A segunda e interpolações subsequentes buscam acrescentar uma correção ao valor calculado na primeira interpolação, de maneira a aproximá-lo o mais possível da medida que seria obtida caso um sensor estivesse instalado naquele ponto.

O valor desta correção é obtido para cada ponto de coleta de dados subtraindo da medida feita pelo sensor o valor calculado para o ponto de instalação deste sensor na interpolação anterior.

Figura 5.3 - Método de interpolação de Barnes



Fonte: Adaptado de ROZANTE *et al.* (2008).

São atribuídos pesos (W_n) assumidos de acordo com a distância entre o ponto de medição (x_n, y_n) e o ponto de grade (i, j) dado por:

$$W_n = \exp\left(-\frac{d_n^2}{R^2}\right) \quad (5.4)$$

Onde d é a distância entre o ponto de medição ao ponto de grade, R é o raio de influência e n o n ésimo ponto de medição dentro do raio de influência. Neste trabalho foi assumido o valor de 40 km para o raio de influência R , porque esta é a distância a partir da qual onde a contribuição de um determinado sensor torna-se desprezível no cálculo do valor interpolado.

Após o cálculo dos pesos, para cada ponto de medição utiliza-se a seguinte equação para obtenção da primeira interpolação do método de Barnes:

$$g_1(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N W_n S(x_n, y_n)}{\sum_{n=1}^N W_n} \quad (5.5)$$

Onde $S(x_n, y_n)$ são os valores nos pontos de medição localizados dentro do raio de influência.

A segunda interpolação consiste em adicionar uma correção ao campo obtido na primeira interação, dada por:

$$g_2(i, j) = g_1(i, j) + \frac{\sum_{n=1}^N W'_n [S(x_n, y_n) - S^1(x_n, y_n)]}{\sum_{n=1}^N W'_n} \quad (5.6)$$

Onde: $S^1(x_n, y_n)$ é o valor obtido no ponto de medição n via interpolação bilinear dos quatro pontos de grade adjacentes encontrados na primeira interação. W' é o valor do peso corrigido em função de um fator de convergência (γ ou γ *gamma*) aplicado para controlar a quantidade de suavização do campo a ser produzido:

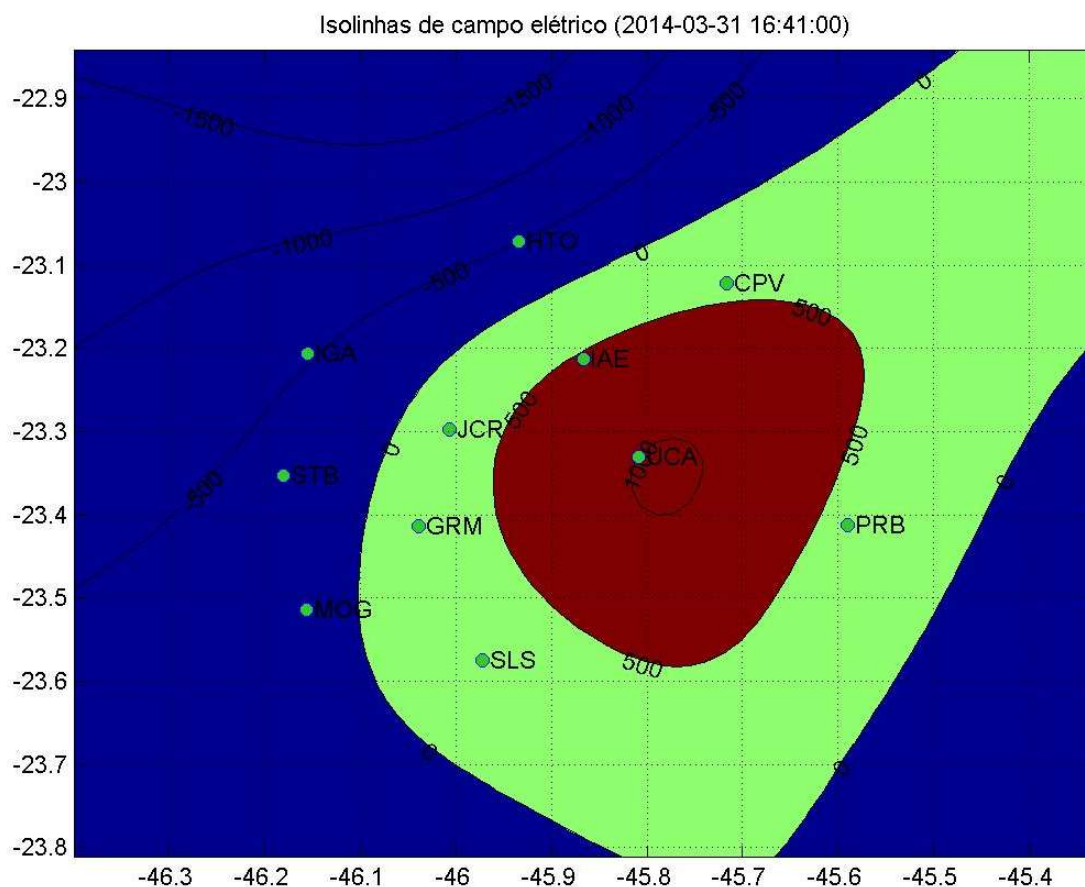
$$W'_n = \exp\left(-\frac{d_n^2}{\gamma R^2}\right) \quad (5.7)$$

Os valores do parâmetro de convergência (γ) variam entre 0 e 1, no entanto os valores geralmente assumidos variam entre 0,2 e 0,5. Neste trabalho foi assumido o valor de 0,3 para o fator de convergência (γ).

Para automatização do método de Barnes, utilizado para interpolação do campo elétrico atmosférico, foi desenvolvido um software em linguagem MATLAB (MATHWORKS, 2015), tendo como entrada os dados medidos, a cada minuto, pelos onze sensores EFM da rede e, como saída, na sua primeira versão, figuras no formato JPG mostrando as linhas equipotenciais de campo elétrico e também a localização dos eventuais relâmpagos nuvem-solo ocorridos na área de estudo dentro do mesmo minuto em que foram realizadas as medições pelos EFM.

A Figura 5.4 apresenta as linhas equipotenciais do campo elétrico atmosférico interpolado a partir dos dados coletados pela rede integrada de sensores EFM. Nesta figura, os sensores EFM são representados por pontos verdes.

Figura 5.4 - Isolinhas obtidas da interpolação do campo elétrico atmosférico.



Fonte: Produção do autor.

As figuras JPG com as isolinhas de campo elétrico atmosférico são interessantes para visualização e apresentação dos fenômenos (campo elétrico e descargas atmosféricas), entretanto, não são adequadas para uma análise objetiva de dados utilizando ferramentas computacionais de geoprocessamento para manipulação da informação georreferenciada.

Para subsidiar esta tese foi desenvolvida uma segunda versão do software de interpolação em MATLAB. Para tanto, foram realizadas alterações e adições no código de programação da primeira versão, tendo como resultado uma segunda versão, com capacidade para geração de matriz de pontos de grade com valores de campo elétrico atmosférico interpolado, em formato compatível com

ferramentas computacionais para geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica SIG (*GIS* em Inglês).

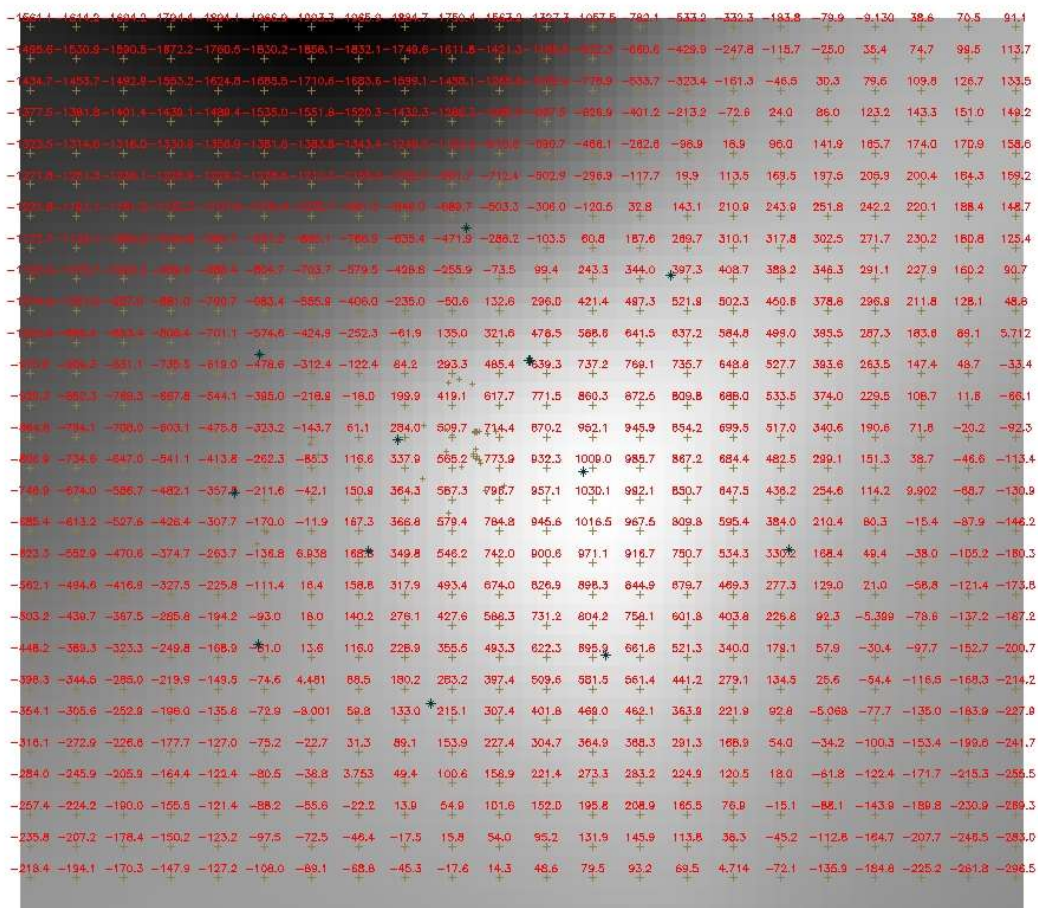
Com o desenvolvimento desta segunda versão do software de interpolação, tornou-se possível a realização de análises complexas em SIG, como por exemplo, integrar os dados de campo elétrico atmosférico com dados de diversas fontes (descargas atmosféricas, radar, satélite, etc.).

As dimensões definidas para a matriz de campo elétrico atmosférico interpolado são 64 colunas x 58 linhas, com resolução de célula (tamanho do *pixel*) de 0.0167° (1,85 km x 1,85 km), para uma área total com 118,4 km x 107,3 km.

Como exemplo, a Figura 5.5 mostra a visualização da grade e imagem em tons de cinza da matriz de pontos de campo elétrico atmosférico interpolado adquirido de medições simultâneas dos onze sensores EFM da rede, em 31/03/2014 às 16:41h GMT, onde as áreas mais claras da imagem são os locais onde o campo elétrico tem maior intensidade indicando a presença de atividade elétrica atmosférica (tempestade) e as áreas escuras da imagem são os locais onde o campo elétrico tem menor intensidade, conforme pode ser verificado através da observação dos valores de campo elétrico atmosférico (números em vermelho), na grade numérica superposta à imagem.

Para este estudo foram geradas matrizes (grades) para cada minuto do período em que ocorreram tempestades dentro da área considerada, tomados 1 hora antes e 1 hora depois da ocorrência da primeira descarga nuvem-solo em cada tempestade.

Figura 5.5 – Grade e imagem da matriz de pontos dos valores do campo elétrico atmosférico interpolado de 31/03/2014 à 16:41 GMT.



Fonte: Produção do autor.

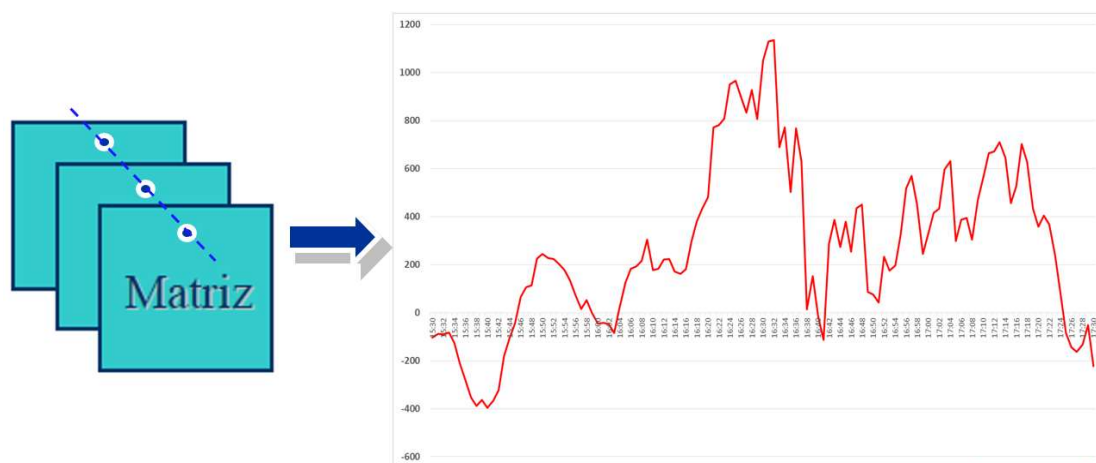
5.10. Extração de séries temporais das matrizes de pontos

Para extração das séries temporais de campo elétrico atmosférico interpolado das matrizes de grades pelo processo descrito anteriormente, em um ponto qualquer dentro da área de estudo, foi necessário desenvolver um procedimento utilizando o software SPRING, um SIG livre desenvolvido pelo INPE (CAMARA *et al.*, 1996).

Basicamente, o procedimento consiste em carregar no SPRING, o plano de informação (PI) contendo as coordenadas geográficas dos pontos de interesse

para extração das séries históricas de dados e os planos de informação contendo as grades de campo elétrico atmosférico interpolado, geradas para cada minuto do intervalo de duração de cada tempestade e, executar uma rotina de software desenvolvida para o SPRING, através da linguagem de programação conhecida como LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico). Esta rotina executa a sobreposição do plano dos pontos de interesse sobre todos os planos de grades do campo elétrico interpolado e, extrai os valores de campo elétrico de cada plano de grade, correspondente à localização dos pontos de interesse, compondo assim uma série temporal de dados de campo elétrico interpolado para cada ponto de interesse (Figura 5.6). Com estas séries temporais de dados de campo elétrico interpolado, em cada ponto de interesse, foram analisadas a efetividade dos alertas, simulando os diversos níveis de campo elétrico para o disparo do alerta.

Figura 5.6 – Ilustração do processo de extração de séries temporais de dados das matrizes de pontos.



Fonte: Produção do autor.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Avaliação de alertas ativados por medições pontuais

Aplicando os procedimentos metodológicos descritos no capítulo 5 desta tese e ampliando os estudos de Naccarato *et al.* (2008a) e de Ferro *et al.* (2012), que apenas analisaram os dados coletados por um único sensor EFM, o presente trabalho, avaliou a efetividade dos alertas para cada um dos onze sensores EFM da rede integrada.

Para cada série temporal de dados produzidos pelos sensores EFM foi contabilizado o número total de medições válidas de campo elétrico atmosférico realizadas pelo sensor no período de estudo. Idealmente, para cada sensor EFM são esperadas 260.640 medições para uma série de dados completa. Um coeficiente de rendimento r foi definido dividindo o número total de medições válidas pelo número de medições esperadas. Quanto mais próximo de 1 for o valor de r mais completa é a série de dados e, quanto mais próximo de 0 for o valor de r mais “lacunas” contém a série de dados. Dessa forma, é possível classificar os sensores EFM pelo coeficiente de rendimento (Tabela 6.1).

Vale observar que, o sensor EFM UCA esteve inoperante no período de 07-11-2013 à 12-02-2014, o que resultou no menor coeficiente de rendimento dentre todos os demais sensores. Também o sensor IAE esteve inoperante no período de 04-02-2014 à 12-02-2014. Já os sensores MOG, CPV, PRB e SLS tiveram seu início de operação em 18-12-2013, sendo que os demais sensores apresentaram dados desde 01-11-2013.

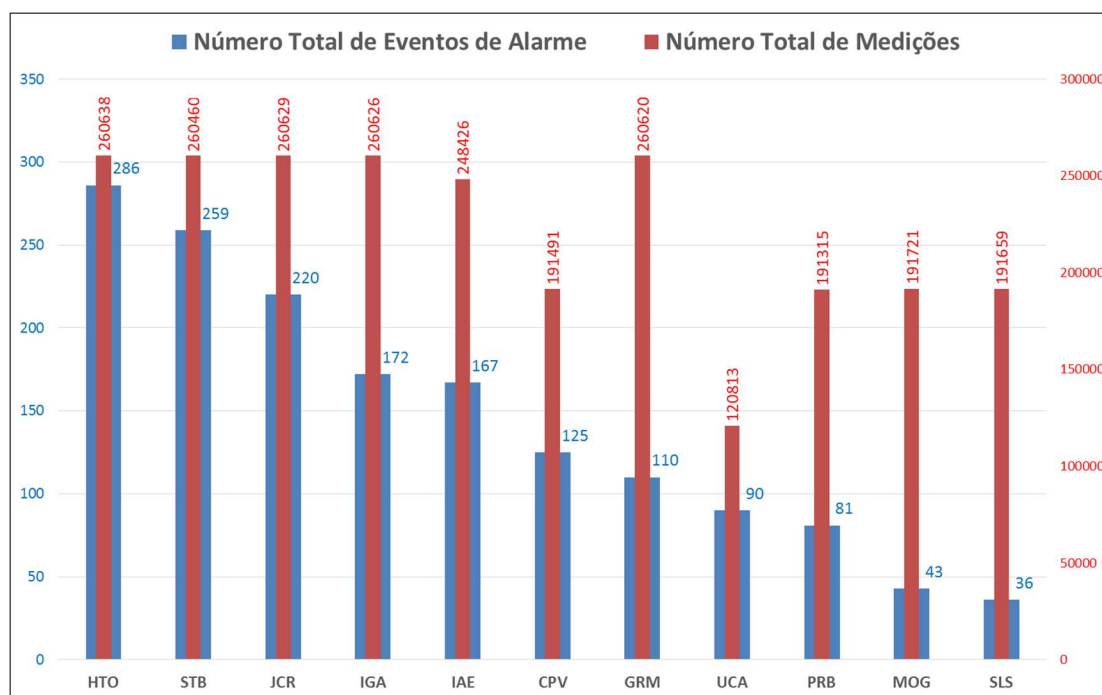
Para cada um dos onze sensores EFM foram contabilizados o número total de eventos para todos os níveis críticos de campo elétrico atmosférico. A Figura 6.1 apresenta, no mesmo gráfico, o número total de eventos de alarme (barras azuis) e o número total de medições válidas (barras vermelhas) realizadas pelos sensores da rede.

Tabela 6.1 - Medições válidas e coeficiente de rendimento da série de dados.

EFM	Número total de medições válidas	Coeficiente de rendimento (r)
HTO	260638	0.999992
JCR	260629	0.999958
IGA	260626	0.999946
GRM	260620	0.999923
STB	260460	0.999309
IAE	248426	0.953138
MOG	191721	0.735578
CPV	191491	0.734695
PRB	191315	0.734020
SLS	191659	0.735340
UCA	120813	0.463524

Fonte: Produção do autor

Figura 6.1 - Número total de eventos de alarme e de medições.



Fonte: Produção do autor

Os números totais de eventos EA, FA e FTW foram analisados em função do nível crítico do campo elétrico para disparo do alerta ($\pm 0,5$; $\pm 0,9$ e $\pm 1,2$ kV) nas áreas AOC (0 a 5 km) e WA (5 a 10 km e 10 a 15 km) e Tempos de Permanência DT de 30 minutos (Figura 6.2) e DT de 45 minutos (Figura 6.3).

Figura 6.2 - Eventos EA, FA e FTW para cada sensor EFM com DT 30 minutos.

EFM	kV/m	Nr Total de EA			Nr Total de FA			Nr Total de FTW			Nr Total Eventos
		0 a 5 km	5 a 10 km	10 a 15 km	0 a 5 km	5 a 10 km	10 a 15 km	0 a 5 km	5 a 10 km	10 a 15 km	
GRM	0,5	3	6	9	0	4	11	1	5	6	110
	0,9	3	7	8	0	3	7	1	3	3	
	1,2	3	6	7	0	2	6	0	3	3	
HTO	0,5	18	22	16	7	9	7	5	13	11	286
	0,9	16	15	16	7	7	13	3	12	9	
	1,2	14	13	14	5	5	11	1	9	8	
IAE	0,5	8	12	17	3	4	9	1	6	2	167
	0,9	7	10	15	3	3	6	1	7	2	
	1,2	3	8	11	3	2	6	5	6	7	
IGA	0,5	9	12	18	1	1	9	4	9	10	172
	0,9	6	8	12	1	0	6	5	9	9	
	1,2	4	5	8	0	0	3	7	7	9	
JCR	0,5	12	17	24	11	10	15	1	4	0	220
	0,9	8	7	12	5	2	7	6	11	8	
	1,2	7	6	8	5	2	6	7	12	7	
STB	0,5	12	17	24	8	7	11	1	7	7	259
	0,9	11	15	19	3	6	10	3	8	11	
	1,2	9	14	14	4	5	8	4	9	12	
UCA	0,5	3	5	6	3	3	6	0	3	5	90
	0,9	3	5	9	3	2	5	0	3	0	
	1,2	3	5	6	1	0	5	0	3	3	
CPV	0,5	4	7	12	3	9	10	0	3	5	125
	0,9	2	5	7	3	7	3	2	3	5	
	1,2	1	4	7	3	7	5	1	3	4	
MOG	0,5	2	5	7	0	4	4	3	4	2	43
	0,9	0	1	1	0	0	1	2	5	2	
	1,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PRB	0,5	3	5	7	2	2	4	2	3	2	81
	0,9	2	3	7	1	1	4	2	4	2	
	1,2	2	2	5	1	1	4	2	4	4	
SLS	0,5	1	3	5	1	1	0	2	5	0	36
	0,9	1	3	1	1	1	0	1	3	1	
	1,2	1	1	1	0	0	0	1	2	0	
		768			400			421			

Fonte: Produção do autor

Para o tempo de permanência DT igual a 30 minutos, de um total de 1.589 eventos analisados, 768 (48,3%) são eventos EA, 400 (25,2%) são eventos FA e, 421 (26,5%) são eventos FTW.

Figura 6.3 - Eventos EA, FA e FTW para cada sensor EFM com DT 45 minutos.

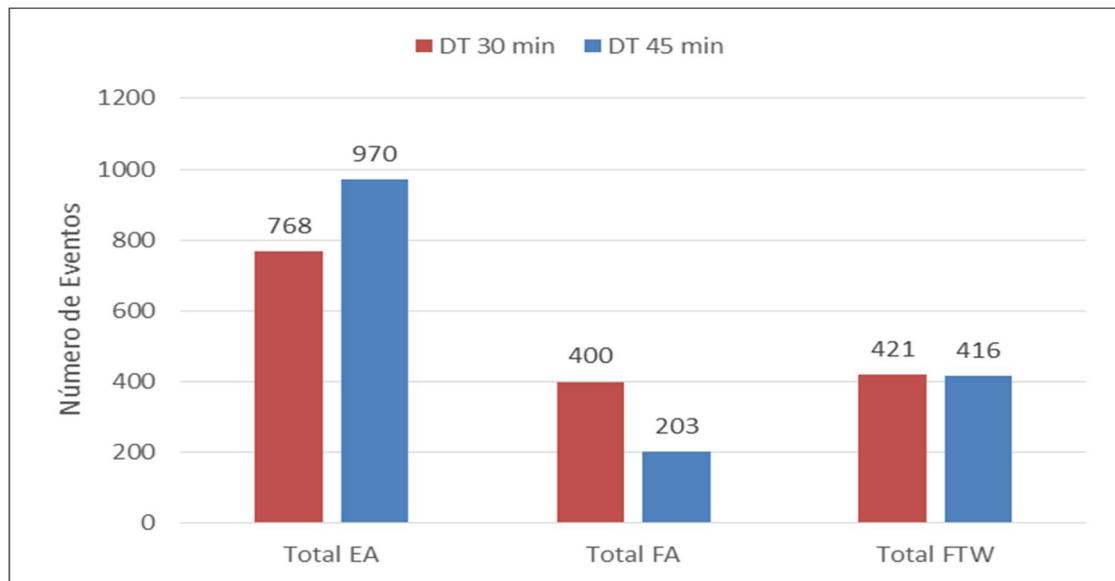
EFM	kV/m	Nr Total de EA			Nr Total de FA			Nr Total de FTW			Nr Total Eventos
		0 a 5 km	5 a 10 km	10 a 15 km	0 a 5 km	5 a 10 km	10 a 15 km	0 a 5 km	5 a 10 km	10 a 15 km	
GRM	0,5	3	7	16	0	3	4	1	5	6	110
	0,9	3	9	14	0	1	1	1	3	3	
	1,2	3	7	10	0	2	3	0	2	3	
HTO	0,5	23	27	20	2	5	3	5	12	11	286
	0,9	21	18	22	2	5	8	3	11	8	
	1,2	14	14	19	5	4	6	1	9	8	
IAE	0,5	10	13	20	1	3	6	1	6	2	167
	0,9	7	11	19	3	2	2	1	7	2	
	1,2	5	9	14	2	1	3	4	6	7	
IGA	0,5	9	12	23	1	1	4	4	9	10	172
	0,9	7	8	17	0	0	1	5	9	9	
	1,2	4	5	11	0	0	0	7	7	9	
JCR	0,5	20	24	29	3	3	10	1	4	0	220
	0,9	11	8	13	2	1	6	6	11	8	
	1,2	10	7	10	2	1	4	7	12	7	
STB	0,5	17	19	30	3	5	5	1	7	7	259
	0,9	12	17	24	2	4	5	3	8	11	
	1,2	10	16	18	3	3	4	4	9	12	
UCA	0,5	4	7	10	2	1	2	0	3	5	90
	0,9	6	7	13	0	0	1	0	3	0	
	1,2	4	5	10	0	0	1	0	3	3	
CPV	0,5	5	10	16	2	6	6	0	3	5	125
	0,9	3	7	7	2	5	3	2	3	5	
	1,2	2	6	7	2	5	5	1	3	4	
MOG	0,5	2	6	11	0	3	0	3	4	2	43
	0,9	0	1	1	0	0	1	2	5	2	
	1,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
PRB	0,5	4	7	11	1	0	0	2	3	2	81
	0,9	3	4	8	0	0	3	2	4	2	
	1,2	3	3	7	0	0	2	2	4	4	
SLS	0,5	2	4	5	0	0	0	2	5	0	36
	0,9	2	4	1	0	0	0	1	3	1	
	1,2	1	1	1	0	0	0	1	2	0	
		970			203			416			

Fonte: Produção do autor

Para o tempo de permanência DT igual a 45 minutos, de um total de 1.589 eventos analisados, 970 (61,0%) são eventos EA, 203 (12,8%) são eventos FA e, 416 (26,2%) são eventos FTW (Figura 6.4).

O EFM HTO contabilizou o maior número total de eventos (286) e o EFM SLS contabilizou o menor número total de eventos (36), devido ao baixo número de tempestades que ocorreram na região do Alto Tietê no verão de 2013-2014 onde se encontra instalado o sensor SLS. Entretanto, é necessário confirmar se o baixo número de eventos contabilizados para SLS também está relacionado com a calibração da sensibilidade do sensor.

Figura 6.4 – Total de eventos com DT 30 minutos e DT 45 minutos.



Fonte: Produção do autor

Por outro lado, o maior número de eventos contabilizados para o sensor EFM HTO é devido à sua localização próxima à região da Serra da Mantiqueira, com maior número de tempestades face ao efeito orográfico (chuva de relevo).

Além do EFM SLS citado acima, MOG, PRB e CPV contabilizaram os menores números para o total de eventos de alarme do conjunto de onze sensores EFM, sendo 43 eventos para MOG, 81 para PRB e 125 eventos para CPV. Novamente, é suposto que estes resultados sejam devidos à calibração da sensibilidade destes sensores, sendo que para MOG e PRB também contribuiu a baixa atividade de tempestades ocorridas na região em que se encontram instalados estes sensores.

O EFM CPV teve melhor desempenho porque está instalado na região do Vale do Paraíba que registrou maior ocorrência de tempestades do que a região do Alto Tietê onde se encontram instalados SLS e MOG, os quais contabilizaram as menores quantidades para o total de eventos de alarme.

Os EFM SLS, MOG, PRB e CPV formam o conjunto de quatro sensores modelo EFM550 da marca Vaisala (2006) que integram a rede do INPE.ELAT e que começaram a operar em 18-12-2014, portanto com uma série de dados menor com relação aos demais sensores da rede que possuem dados deste 01-11-2013, data de início do estudo, conforme observado anteriormente.

O segundo grupo de sensores EFM, com sete sensores modelo CS110 da marca Campbell Scientific (2012), da rede do DCTA.IAE, produziu as seguintes quantidades totais de eventos de alarme: 110 eventos em GRM, 286 em HTO, 167 em IAE, 172 em IGA, 220 em JCR, 259 em STB e 90 em UCA.

No Apêndice B desta tese, são apresentados os gráficos com os números totais de eventos EA, FA e FTW, em função dos níveis críticos de campo elétrico atmosférico para disparo do alerta, nas faixas de 0-5 km, 5-10 km e 10-15 km, para os tempos de permanência DT de 30 minutos (Figuras B.1, B.2 e B.3), e 45 minutos (Figuras B.4, B.5 e B.6), obtidos para cada um dos onze sensores EFM.

Os resultados mostram que o número total de eventos EA decresce, quando o nível crítico de campo elétrico para disparo do alerta aumenta, de maneira geral para todos os sensores.

Por outro lado, o número de eventos EA aumenta quando a região passa de 0-5 km para 5-10 km e, desta para 10-15 km, obviamente pelo aumento da área onde os raios são detectados.

O comportamento do número total de eventos FA mostra um decréscimo quando o nível crítico de campo elétrico para disparo do alerta aumenta. Por outro lado, quando a distância aumenta, o número total de eventos FA tende a aumentar quando a região passa de 0-5 km para 5-10 km, sendo que tende a se estabilizar quando passa de 5-10 km para 10-15 km, mostrando que não há ganho significativo com esta última alteração.

Também FTW tende a aumentar quando se aumenta o nível crítico de campo elétrico para disparo do alerta, estabilizando acima de $\pm 0,9$ kV. FTW também aumenta com o incremento da faixa de distância das regiões anelares.

Os parâmetros estatísticos POD (Probabilidade de Detecção) e FAR (Taxa de Alarme Falso) foram analisados para cada um dos sensores EFM da rede integrada.

POD indica o percentual de eventos (EA), do total de relâmpagos observados (EA + FTW), que foram adequadamente reportados pelo método de alerta.

FAR indica o percentual de FA relacionados com o total de relâmpagos que o método de alerta previu (EA + FA).

No Apêndice C desta tese, são apresentados os gráficos para POD e FAR para os tempos de permanência DT de 30 minutos (Figuras C.1 e C.2) e 45 minutos (Figuras C.3 e C.4), obtidos para cada um dos onze sensores EFM.

Os melhores resultados para POD e FAR são encontrados com o valor de $\pm 0,9$ kV para o nível crítico de campo elétrico para disparo do alerta e a área de faixa 5-10 km e tempo de permanência DT igual a 45 minutos. Por exemplo, o EFM GRM com 75% para o POD e 10% para o FAR para $\pm 0,9$ kV, faixa de 5-10 km e DT igual a 45 minutos.

De uma maneira geral, excluindo os casos discrepantes, como MOG e SLS, os valores de POD e FAR obtidos para os demais EFM da rede são coerentes com estudos anteriores, como aqueles que foram apresentados por Ferro *et al.* (2012) e que foram atualizados na Tabela 6.2 com a adição dos resultados obtidos no presente estudo.

Tabela 6.2 - Resumo comparativo com estudos encontrados na literatura.

Autor	Num. Sensores	Nível (kV/m)	Dist. (km)	LT (min)	DT (min)	POD (%)	FAR (%)
Beasley (2008)	30	1,0	10	9 - 12	10	66,0	x
Murphy <i>et al.</i> (2008)	2	1,0	10	x	15	34,4	74,1
Naccarato <i>et al.</i> (2008a)	1	0,5	10	x	x	82,4	17,6
Aranguren <i>et al.</i> (2009)	1	1,0	10	6,5	30	37,5	87,0
Ferro <i>et al.</i> (2012)	1	1,0	10	13	45	58,0	41,0
		0,9				60,0	41,0
Presente estudo (medições pontuais)	11	0,9	10	11,7 - 25,2 (18,2)	30	17 - 70 (51,8)	0 - 58 (24,8)
					45	17 - 75 (56,3)	0 - 42 (10,8)
X: não analisado (média)							

Fonte: Adaptado de Ferro et al. (2012)

6.2. Avaliação de alertas ativados por medições interpoladas

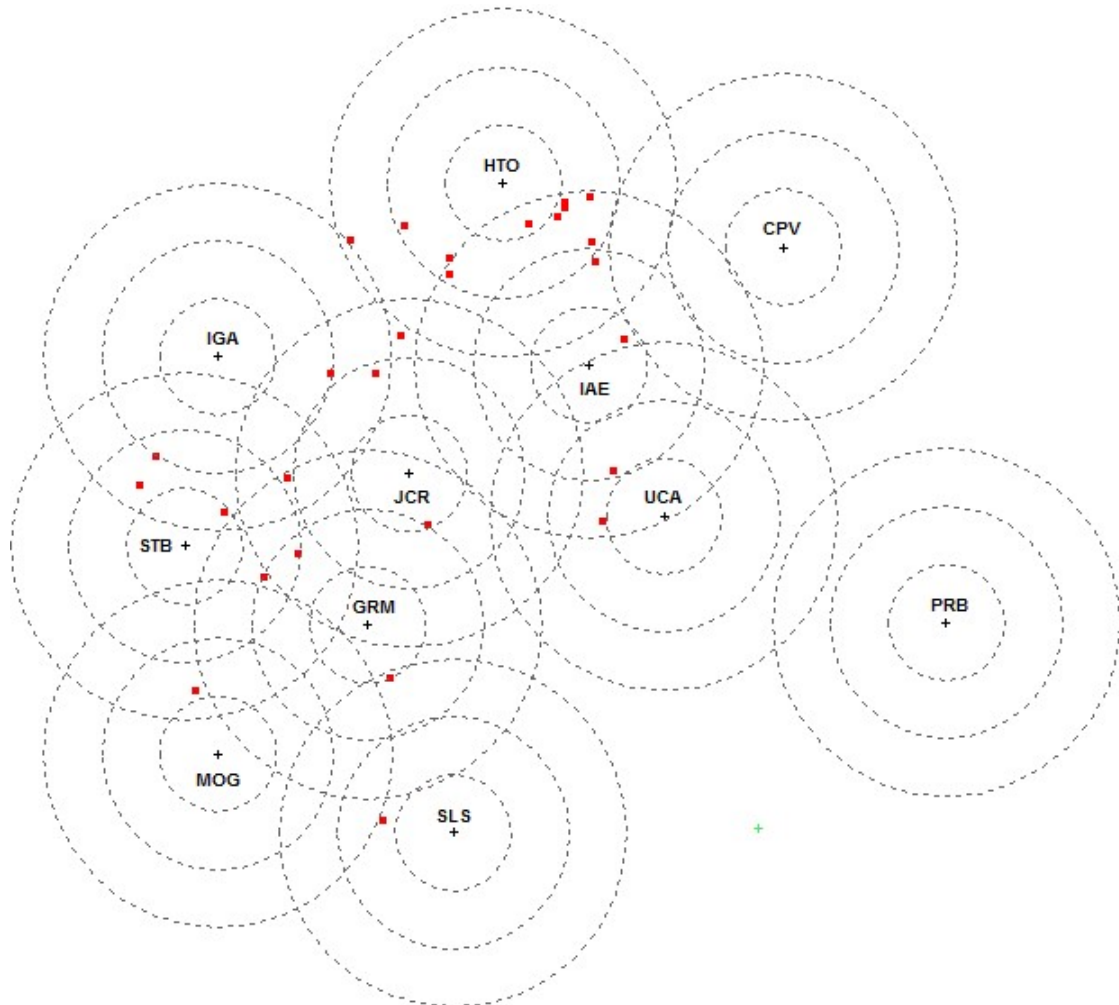
Uma das características do processo de interpolação dos valores de campo elétrico atmosférico é a suavização nos valores distribuídos espacialmente em grades regulares, sendo os picos de máximo e mínimo eliminados pelo processo. Outra característica do processo é que os melhores resultados da interpolação são obtidos para as áreas localizadas entre dois ou mais sensores EFM. Nas

áreas localizadas nas bordas da cobertura dos sensores EFM a interpolação tem baixa eficiência. Como as tempestades ocorreram em locais diferentes ao longo do período considerado, o que é normal, resulta em um número reduzido de descargas e, conseqüentemente um número reduzido de eventos de alerta, quando é fixado em um único local o ponto de interesse (PI). Com estas restrições, neste estudo foram considerados os seguintes critérios para análise dos alertas disparados através de valores obtidos da interpolação do campo elétrico atmosférico:

- a) As análises foram feitas somente para pontos de interesse (PI).
- b) Foram selecionados somente pontos de interesse entre dois ou mais sensores EFM que apresentaram um número suficiente de eventos de alarme quando analisados individualmente.
- c) Os pontos de interesse foram definidos como sendo os locais onde ocorreram as primeiras descargas nuvem-solo das tempestades analisadas. Dessa forma, a análise é feita em locais diferentes, em função da ocorrência de tempestades em determinada região.
- d) Para os pontos de interesse definidos, as séries temporais de dados de campo elétrico foram extraídas das grades interpoladas geradas pelo método descrito no capítulo 5 deste trabalho, considerando o intervalo de tempo de 1 hora antes e 1 hora depois da ocorrência da primeira descarga nuvem-solo que define o ponto de interesse.

De acordo com estes critérios, foram selecionadas 27 tempestades, com ocorrência da primeira descarga nuvem-solo localizada entre dois ou mais sensores EFM, sendo esta localização considerada como ponto de interesse (PI). Dessa forma foram analisados 27 pontos de interesse para os quais foram analisadas a efetividade dos alertas a partir da série temporal de dados de campo elétrico interpolado, extraída das grades interpoladas de pontos regulares conforme procedimento descrito no capítulo 5 desta tese.

Figura 6.5 – Localização dos 27 pontos de interesse (quadrados vermelhos).



Fonte: Produção do autor

Como a interpolação tende a suavizar os valores de campo elétrico, foram simulados os seguintes níveis de campo elétrico para o disparo de alertas: $\pm 0,2$; $\pm 0,3$; $\pm 0,4$; $\pm 0,5$; $\pm 0,6$; $\pm 0,7$; $\pm 0,8$; $\pm 0,9$ e $\pm 1,0$ kV/m. Os percentuais dos eventos EA, FA e FTW sobre o número total de eventos e os parâmetros estatísticos POD, FAR e BIAS foram calculados para os pontos de interesse analisados considerando estes níveis críticos do campo elétrico para disparo do alerta. A Figura 6.6 apresenta os valores obtidos para estes parâmetros para tempos de permanência DT de 30 e 45 minutos.

Figura 6.6 – Percentuais de eventos e parâmetros estatísticos para DT com 30 e 45 minutos para medições interpoladas.

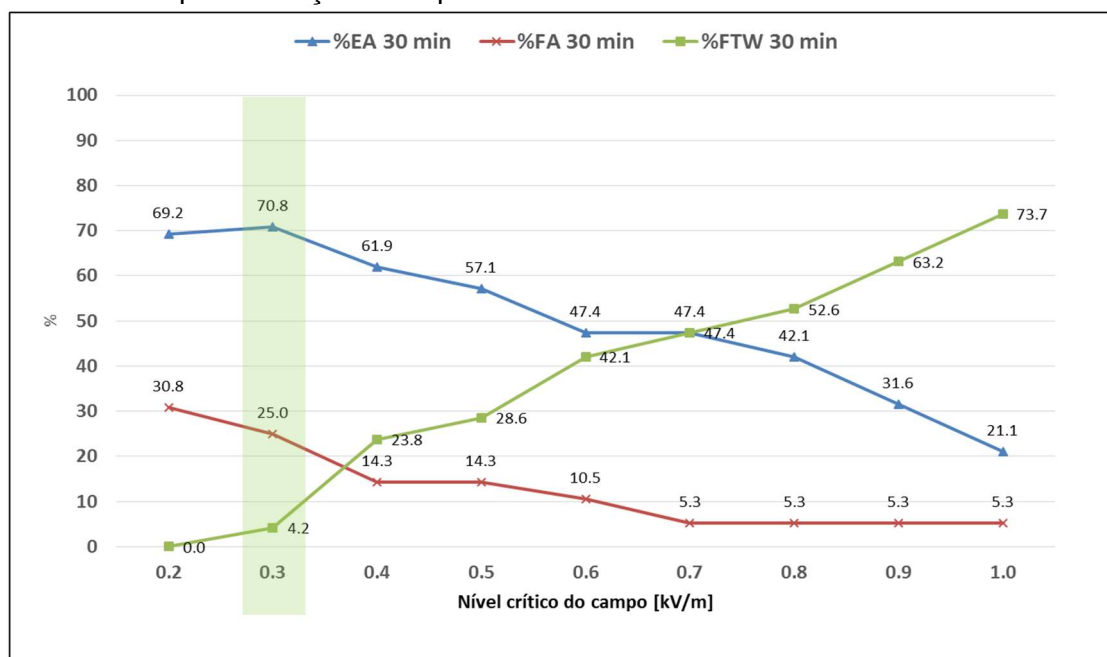
DT de 30 min									
Parâmetro	Nível Crítico de Campo (kV/m)								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
EA (%)	69.2	70.8	61.9	57.1	47.4	47.4	42.1	31.6	21.1
FA (%)	30.8	25.0	14.3	14.3	10.5	5.3	5.3	5.3	5.3
FTW (%)	0.0	4.2	23.8	28.6	42.1	47.4	52.6	63.2	73.7
POD [%]	100%	94%	72%	67%	53%	50%	44%	33%	22%
FAR (%)	31%	26%	19%	20%	18%	10%	11%	14%	20%
BIAS	1.4	1.3	0.9	0.8	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3
DT de 45 min									
Parâmetro	Nível Crítico de Campo								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
EA (%)	88.5	83.3	66.7	66.7	57.9	52.6	47.4	36.8	26.3
FA (%)	11.5	12.5	9.5	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FTW (%)	0.0	4.2	23.8	28.6	42.1	47.4	52.6	63.2	73.7
POD [%]	100%	95%	74%	70%	58%	53%	47%	37%	26%
FAR (%)	12%	13%	13%	7%	0%	0%	0%	0%	0%
BIAS	1.1	1.1	0.8	0.8	0.6	0.5	0.5	0.4	0.3

Fonte: Produção do autor

Os percentuais de eventos EA, FA, FTW sobre o total de eventos analisados para os níveis de campo elétrico e com tempo de permanência DT com 30 minutos e 45 minutos são mostrados respectivamente na Figura 6.7 e Figura 6.8, onde ficam evidentes as variações destes parâmetros com a variação do nível crítico de campo elétrico para disparo do alerta: EA e FA decrescem, enquanto FTW aumenta com o aumento do valor do nível de campo elétrico crítico para disparo de alerta.

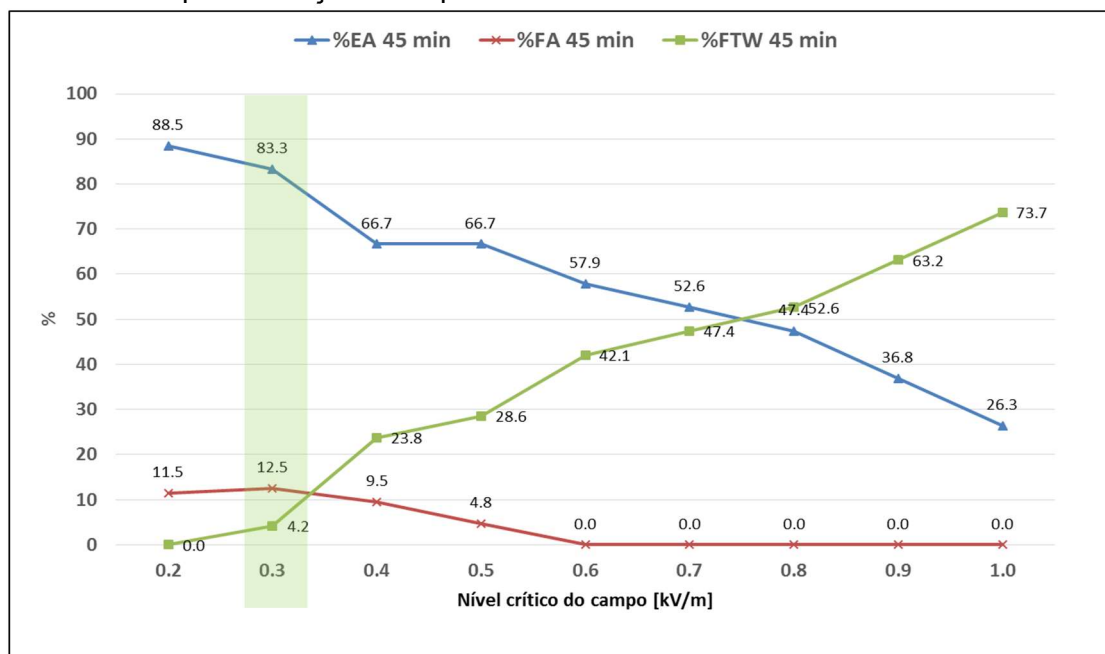
Estes gráficos também mostram claramente o ganho na efetividade do alerta, quando se passa de um DT de 30 minutos para um DT de 45 minutos.

Figura 6.7 – Variação de FA, EA e FTW com o nível crítico de campo com DT 30 minutos para medições interpoladas.



Fonte: Produção do autor.

Figura 6.8 - Variação de FA, EA e FTW com o nível crítico de campo com DT 45 minutos para medições interpoladas.



Fonte: Produção do autor

Por exemplo, o percentual de EA aumenta de 70,8% para 83,3%, enquanto que o percentual de FA decresce de 25% para 12,5%, considerando o nível $\pm 0,3$ kV/m (faixa verde) como nível crítico do campo elétrico atmosférico para disparo do alerta para ambos valores de DT.

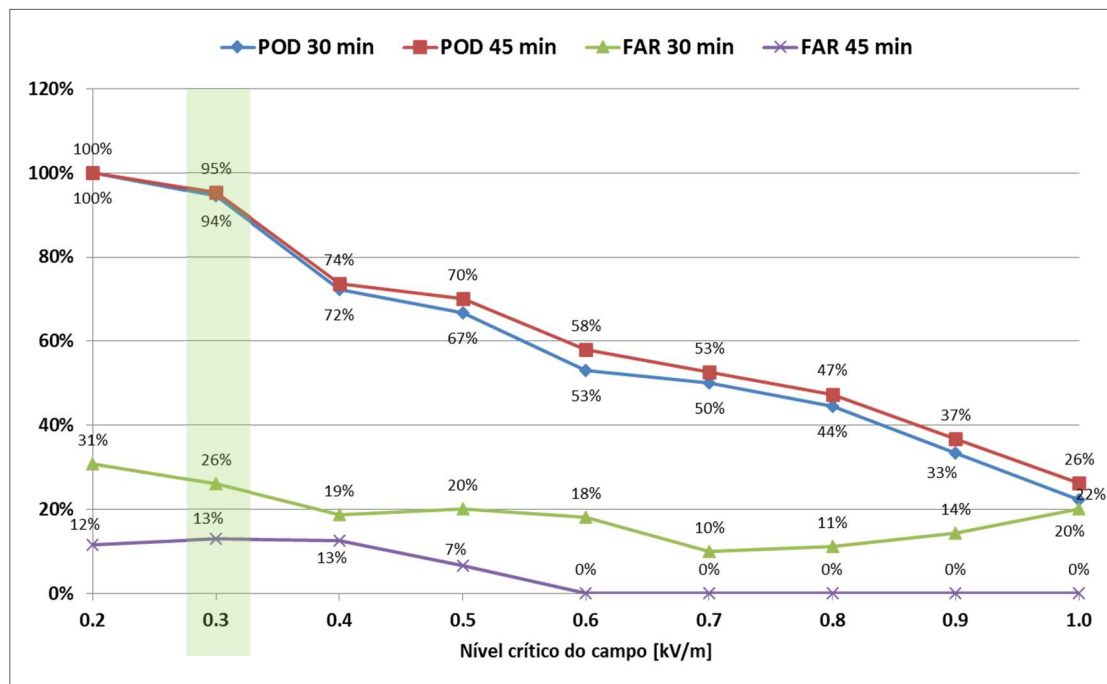
Para FTW não foi observada redução na quantidade desses eventos com a mudança de DT de 30 minutos para 45 minutos. Isto é devido ao grande intervalo de tempo existente entre as tempestades analisadas, não existindo a sobreposição do tempo DT (alarme ativado por 45 minutos) de uma tempestade em fase de extinção para uma outra tempestade se iniciando.

A Figura 6.9 apresenta o POD e o FAR, obtidos nesta análise para os tempos de permanência DT de 30 minutos e 45 minutos. Considerando o valor $\pm 0,3$ kV/m como nível crítico do campo elétrico atmosférico para disparo do alerta e um tempo de permanência DT de 45 minutos, tem-se que os valores obtidos para POD (95%) e para FAR (13%) são melhores do que àqueles obtidos em estudos anteriores e também neste trabalho que consideraram medições pontuais de EFM.

O parâmetro BIAS foi calculado e mostra que o método de alerta tende a subestimar ($\text{BIAS} < 1$) o alerta para níveis críticos de campo elétrico superiores à $\pm 0,3$ kV/m.

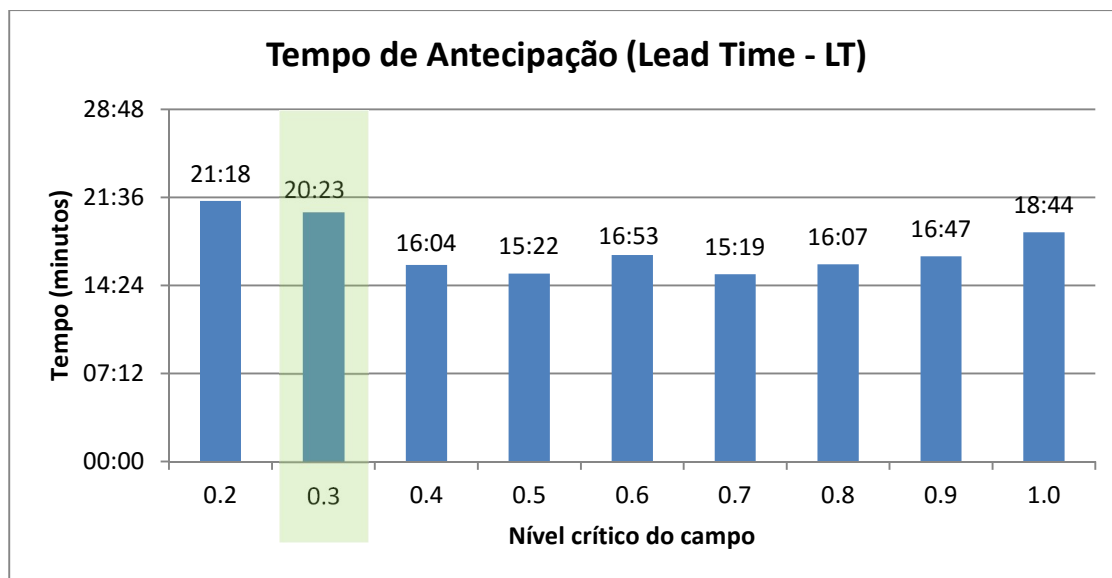
Nas planilhas de eventos desta análise, também foram calculados os tempos de antecipação (LT) para cada valor de nível crítico de campo para disparo de alerta. O valor médio de 20:23 minutos foi encontrado para o nível crítico de campo de $\pm 0,3$ kV/m, conforme mostra a Figura 6.10.

Figura 6.9 - POD e FAR para DT com 30 e 45 minutos para medições interpoladas.



Fonte: Produção do autor

Figura 6.10 – Tempo de antecipação (Lead Time – LT) para medições interpoladas.



Fonte: Produção do autor

6.3. Comparação: medições pontuais versus medições interpoladas

A Tabela 3.1 abaixo apresenta o resumo dos resultados para os parâmetros POD e FAR obtidos de medições pontuais e de medições interpoladas de sensores EFM, onde fica evidenciada a melhor efetividade do alerta quando se utiliza medições obtidas pelo processo de interpolação.

Tabela 6.3 – Comparação entre medições pontuais e medições interpoladas.

Método	Num. Sensores	Nível (kV/m)	Distância (km)	LT (min)	DT (min)	POD (%)	FAR (%)
Medições Pontuais	11	0,9	10	(18,5)	30	17 - 70 (51,8)	0 - 58 (24,8)
					45	17 - 75 (56,3)	0 - 42 (10,8)
Medições Interpoladas	11	0,3	1,85 x 1,85	(20,4)	30	94,0	26,0
					45	95,0	13,0
(média)							

Fonte: Produção do autor

7. CONCLUSÕES

Conforme amplamente discutido na literatura, as medições de campo elétrico atmosférico realizadas por sensores EFM são fortemente influenciadas pelas características do local, como: a altura dos centros de carga da nuvem de tempestade naquela região, a topografia, os ventos, a presença de obstáculos, árvores, etc., portanto, a efetividade dos métodos de alerta de descargas atmosféricas que utilizam medições de sensores EFM podem variar significativamente de uma região para outra e de equipamento para equipamento. Foi por esse motivo que se decidiu pela instalação de uma rede de sensores no Vale do Paraíba com o objetivo de avaliar se os dados de campo elétrico atmosférico interpolados espacialmente poderiam melhorar a qualidade dos alertas de ocorrência de raios emitidos com base em valores pré-definidos de campo elétrico atmosférico medidos pelos sensores EFM. Para dar suporte à esta tese e também a outros estudos, foi integrada uma rede com onze sensores EFM para geração e transmissão de dados de campo elétrico atmosférico em tempo real. Os detalhes dessa integração foram descritos no capítulo 4 deste trabalho. A integração resultou na maior rede operacional de sensores EFM instalada no Brasil, operando de forma padronizada com sensores de fabricantes diferentes. Alguns ajustes de calibração ainda são necessários em alguns sensores desta rede.

Foram discutidos os resultados da simulação de alertas a partir da localização de cada um dos onze sensores da rede integrada e avaliadas a efetividade de alertas em três áreas anelares ao redor de sensor (distâncias de 0-5 km, 5-10 km e 10-15 km) e com os seguintes níveis críticos de campo elétrico atmosférico para disparo do alerta: $\pm 0,5$; $\pm 0,9$ e $\pm 1,2$ kV/m. A análise individual de cada sensor mostrou que o nível mais adequado para utilização para alertas de ocorrência de raio é o nível de $\pm 0,9$ kV/m em associação com a faixa de 5-10 km em torno do ponto onde o sensor se encontra instalado, sendo justificada a escolha desta distância pelo fato que, do ponto de vista de segurança, é preferível ter um grande número de eventos FA e um menor número de eventos

FTW, do que ao contrário. Esta conclusão corrobora com o estudo de Ferro *et al.* (2012) que também recomendou estes valores de campo elétrico e distância do ponto de interesse.

Os valores encontrados neste trabalho para os parâmetros estatísticos POD e FAR, na análise individual da efetividade dos sensores, foram superiores para a maioria destes sensores, aos encontrados por outros autores em estudos anteriores (BEASLEY *et al.*, 2008; MURPHY *et al.*, 2008; NACCARATO *et al.*, 2008a; ARANGUREN *et al.*, 2009; FERRO *et al.*, 2012).

Na mesma análise individualizada, ocorreram grandes diferenças nos percentuais de POD e FAR obtidos para cada um dos onze sensores EFM da rede. Estas variações foram de 17% a 75% para POD e de 0% a 42% para FAR, considerando a faixa de 5-10 km e tempo de permanência DT de 45 minutos, reforçando a dependência da eficiência do alerta com a pontualidade das medições, refletida pelo local de instalação (*site*), calibração do sensor e altura efetiva das nuvens de tempestade no local de instalação do sensor. Algumas falhas nas séries temporais de dados de campo elétrico atmosférico também contribuíram para as diferenças de desempenho nos alertas que foram verificadas neste trabalho.

Foram geradas as grades de pontos regulares de medições de campo elétrico atmosférico interpolado e aplicado a metodologia de análise da efetividade de alertas considerando as séries temporais de dados de campo elétrico atmosférico obtidos das grades interpoladas em um ponto correspondente ao local da primeira descarga nuvem-solo em 27 tempestades analisadas. Os pontos analisados foram selecionados dentro de áreas de influência de pelo menos dois sensores EFM, onde a interpolação mostra-se mais eficiente do que nas bordas da área de atuação dos sensores. Os valores obtidos para POD (95%) e para FAR (13%), para tempo de permanência DT 45 minutos, a partir das medições interpoladas de campo elétrico são melhores do que àqueles

obtidos em estudos anteriores e também neste trabalho que consideraram medições pontuais de EFM.

Um dos motivos para o incremento na efetividade dos alertas pode ser atribuído às medições interpoladas que, tendem a suavizar os picos de mínimo e máximo e minimizar as falhas de medições de sensores pontuais que são fortemente dependentes da localização destes sensores. Outro motivo é que a medição interpolada pode ser extraída em qualquer ponto da área coberta pelos sensores da rede. Dessa forma existirá sempre uma medição interpolada de campo elétrico mais próxima do centro de carga de uma nuvem de tempestade situada em um ponto distante dos sensores EFM da rede e, capaz de deflagrar alertas mais eficientes do que as medições pontuais de sensores distantes da tempestade.

Por fim, pelos resultados obtidos os parâmetros estatísticos POD e FAR, é possível concluir que, a utilização de dados interpolados de uma rede de sensores EFM apresenta significativa melhoria da efetividade dos alertas de ocorrência de raios, quando confrontados com os resultados obtidos com dados pontuais de sensores EFM.

7.1. Perspectivas para trabalhos futuros

Esta tese, com os resultados obtidos da aplicação da técnica de interpolação de valores de campo elétrico para utilização como nível crítico de disparo de alertas de ocorrência de raios, sugere a realização de trabalhos futuros de investigação e desenvolvimento, tais como:

- a) Aplicação do procedimento de interpolação de dados de campo elétrico em séries maiores de dados, para maior consistência da análise de efetividade dos alertas gerados por dados interpolados.
- b) Avaliação da sensibilidade da interpolação, simulando a retirada de sensores EFM da rede e seu efeito sobre a efetividade dos alertas.

- c) Avaliação da efetividade dos alertas nas áreas limítrofes de influência dos sensores (bordas da área de cobertura).
- d) Investigação da efetividade do alerta por dados interpolados de campo elétrico, utilizando como deflagrador do alerta a mudança de polaridade do campo elétrico atmosférico pela aproximação de uma nuvem de tempestade.
- e) Desenvolvimento de um sistema híbrido de alerta de raios, combinando dados de localização de redes LLS e dados interpolados de redes EFM, para detecção do desenvolvimento e aproximação, pela rede LLS, de uma tempestade fora da área dos sensores EFM que, por sua vez, se encarregam da emissão de alertas antecipados de ocorrência de raios, quando a tempestade adentra a área de cobertura da rede EFM.
- f) Avaliação dos parâmetros EA, FA, FTW, POD e FAR utilizando critérios para disparo do alerta que levem em conta a associação dos valores interpolados do campo e das medidas efetivas dos sensores mais próximos do Ponto de Interesse (PI).
- g) Avaliação da distribuição do campo em pontos de grade regularmente espaçados, utilizando outros métodos de interpolação.
- h) Reprodução do estudo em outras áreas do Brasil, tais como as regiões metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro, Resende, Campinas e Manaus (região Norte).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACADEMIA.EDU. **A física dos relâmpagos**. Academia.edu, 2016. Disponível em: <https://www.academia.edu/9354309/Aula_5_-_ELETRICIDADE_ATMOSF%C3%89RICA_A_F%C3%ADsica_dos_Rel%C3%A2mpagos_PDF>. Acesso em: jan. 2016.

ARANGUREN, D. et al. Design, construction and calibration of two e-field machines used to measure tropical thundercloud e-field on the ground and aloft. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 8., 2005. São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: IEE/USP, 2005. p. 184-189.

ARANGUREN, D. et al. Sistema de monitoreo de tormentas eléctricas. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE CALIDAD DE LA ENERGIA ELECTRICA (SICEL 2007) , 4., 2007, Manizales, Colombia. **Anales...** Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2007.

ARANGUREN, D. et al. On the lightning hazard warning using electrostatic field: Analysis of summer thunderstorms in Spain. **Journal of Electrostatics**, n. 67, 2009. 507-512. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388609000618>>. Acesso em: nov. 2015.

ARANGUREN, D. et al. Operational analysis of electric field mills as lightning warning systems in Colombia. **Revista Ingeniería e Investigación**, v. 31, n. suppl.2, p. 51-57, out. 2011. ISSN 0120-5609. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092011000500008&script=sci_arttext>. Acesso em: out. 2015.

ATIVA SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS. **Produtos para conectividade GSM 3G/GPRS/EDGE**, 2015. Disponível em: <<http://www.ativasolucoes.com.br/produtos-conectividade-gsm-3ggprsedge>>. Acesso em: out. 2015.

BARNES, S. L. A technique for maximizing detail in numerical weather maps analysis. **Journal of Applied Meteorology**, 3, n. 4, 1964. 396-400. Disponível em: <<http://aurora.aos.wisc.edu/801/barnes.pdf>>. Acesso em: nov. 2015.

BEASLEY, W. H.; WILLIAMS, D. E.; HYLAND, P. T. Analysis of surface electric-field contours in relation to cloud-to-ground lightning flashes in air-mass thunderstorms at the Kennedy Space Center. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE (ILDC), 20., 2008, Tucson. **Proceedings...** Tucson: Vaisala, 2008. p. 6.

BENNETT, A. et al. The effect of changes in lightning waveform propagation characteristics on the UK met office long range lightning location network (ATDnet).

- In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 21., 2010, Orlando, Florida, USA. **Proceedings...** Orlando: Vaisala, 2010.
- BETZ, H. D. et al. LINET - An international lightning detection network in europe. **Atmos. Res.**, v. 91, n. 2-4, Feb 2009, p. 564-573.
- BLOEMINK, H. **Static electricity measurements for lightning warnings - an exploration.** De Bilt: Royal Netherlands Meteorological Institute, 2013. Internal Report IR-2013-01.
- BOLTEK CORPORATION. **EFM-100 Atmospheric electric field monitor - installation/operators guide.** Buffalo, NY, USA: Boltek Corporation, 2005.
- BOURNAY, E.; UNEP/GRID-ARENDAL. **Global costs of extreme weather events,** 2012. Disponível em: <http://www.grida.no/graphicslib/detail/global-costs-of-extreme-weather-events_d781#>. Acesso em: out. 2015.
- CAMARA, et al. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, May-Jun 1996.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. **CS110 electric field meter-** instruction manual - revision: 11/11. Logan, Utah, USA, 2011.
- CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. **CS110 electric field meter (revision 4/12).** Logan, 2012.
- CARDOSO, I. **Os Números (surpreendentes) de mortes por raios no Brasil,** **Scientific American Brasil**, v. 10, n. 110, p. 42-45, 2011b. Disponível em: <http://www2.uol.com.br/sciam/reportagens/os_numeros__surpreendentes__de_mortes__por_raios_no_brasil.html>. Acesso em: out. 2015.
- CARDOSO, I. et al. A new approach to estimate the annual number of global lightning fatalities. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY (ICAE-2011), 14., 2011, Rio de Janeiro, Brasil. **Proceedings...** São José dos Campos: INPE.ELAT, 2011a.
- CUMMINS, K. L. et al. Modeling and calibration of Vaisala's operational long range lightning detection network. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 20., 2008. Tucson, AZ, USA. **Proceedings...** Tucson: Vaisala, 2008.
- DOWDEN, R. L.; BRUNDELL, J. B.; SOURCE, C. J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 64, n. 7, May 2002. 817-30. Disponível em: <<http://www.lln.net/publications/dowden.toga.article.pdf>>. Acesso em: out. 2015.

EVANS, W. H. Electric fields and conductivity in thunderclouds. **Journal of Geophysical Research**, v. 74, n. 4, p. 939-948, 1969.

FERRO, M. A. S. et al. Lightning risk warnings based on atmospheric electric field measurements in Brazil. **Journal of Aerospace Technology and Management**, 3, n. 3, 2012. 301-310. Disponível em:
<http://radiometrics.com/data/uploads/2015/01/Ferro_JATM_2011.pdf>. Acesso em: out. 2015.

FISICANET. Eletricidade na Atmosfera da Terra. **FísicaNet**, 2016. Disponível em:
<<http://www.fisica.net/eletricidade/eletricidadenaatmosfera.php>>. Acesso em: jan. 2016.

GAFFARD, C. et al. Observing lightning around the globe from the surface. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 20., 2008, Tucson, Arizona, USA. **Proceedings...** Tucson: Vaisala, 2008. Disponível em:
<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Scientific%20papers/Observing_lightning_around_the_globe_from_the_surface.pdf>. Acesso em: out. 2015.

GOODMAN, S. J. et al. Lightning and precipitation history of a microburst-producing storm. **Geophys. Res. Lett.**, 1988. 1185-1188.

HEITKEMPER, L.; PRICE, R. F.; JOHNSON, D. B. **Lightning-warning systems for use by airports**. Washington, DC, USA: ACRP, 2008. ACRP REPORT 8.

HILL, D. A.; KANDA, M. Electric field strength. In: WEBSTER, J. G.; EREN, H. **Measurement, instrumentation and sensors handbook**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. Cap. 38, p. 38.1-38.11.

HOLLE, R. L. **Recent studies of lightning safety and demographics**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 31., 2012, Vienna. **Proceedings...** Vienna, 2012.

HOLLE, R. L. **NWS lightning safety home page**, abr. 2015. Disponível em:
<http://www.lightningsafety.noaa.gov/stats/05-14deaths_by_state_maps.pdf>. Acesso em: out. 2015.

HOLZWORTH, R. H. **WWLL World Wide Lightning Location Network**. 2015. Disponível em: <<http://wwlln.net/>>. Acesso em: out. 2015.

HOLZWORTH, R. H. et al. WWLL global lightning detection system: Regional validation study in Brazil Lay. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 3, 16 Feb 2004. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2003GL018882/epdf>>. Acesso em: nov. 2015.

HOPPEL, W. A.; ANDERSON, R. V.; WILLETT, J. C. Atmospheric electricity in the planetary boundary layer. In: _____ **The earth's electrical environment**. Washington, D.C.: National Academy Press, 1986. Cap. 11, p. 149-165. ISBN 978-0-309-03680-1. Disponível em: <http://www.nap.edu/download.php?record_id=898#>. Acesso em: nov. 2015.

USP.IAG. **STARNET - Sferics Timing And Ranging NETwork**. 2011. Disponível em: <<http://www.zeus.iag.usp.br/index.php>>. Acesso em: out. 2015.

INAMPUÉS, J. et al. Analysis of lightning forecasts in Colombia based on the lightning detection network data. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 10., 2009, Curitiba, Brazil. **Proceedings...** Curitiba: X SIPDA, 2009. p. 431-436.

INPE.PGCST. **Linhas de pesquisa em Ciência do Sistema Terrestre**. 2011. Disponível em: <http://www.inpe.br/pos_graduacao/cursos/cst/linhas_pesquisa.php#c>. Acesso em: out. 2015.

JAYENDRA, et al. **Intelligent lightning warning system**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION AND AUTOMATION FOR SUSTAINABILITY - ICIAFS 2007, 3., 2007, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: VIC: IEEE, 2007. p. 19-24.

LENGYEL, M. M. et al. **Lightning casualties and their proximity to surrounding cloud-to-ground lightning**. In: SYMPOSIUM ON EDUCATION, 14., 2005, San Diego. **Proceedings...** San Diego: American Meteorological Society, 2005. p. 7.

LÓPEZ, J. et al. Thunderstorm warning alarms methodology using electric field mills and lightning location networks in mountainous regions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP). 31., 2012, Vienna. **Proceedings...** Vienna, Austria, 2012. p. 1-6.

MATHWORKS. MATLAB. **Mathworks**, 2015. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>.

MCKEOWN, A.; GARDNER, G. World Watch Institute. **Climate change reference guide**. Washington, DC, 2009. 17p. Disponível em: <<http://www.climatefruitandwine.co.za/download/WorldWatch.Climate.Change.Reference.Guide.pdf>>. Acesso em: out. 2015.

MISSION INSTRUMENTS. **Electric field mill operation**. 2015. Disponível em: <http://www.missioninstruments.com/pdf/fm_op_rev1d_0106.pdf>. Acesso em: out. 2015.

MONTANYÀ, J. et al. Total lightning, electrostatic field and meteorological radar applied to lightning hazard warning. In: INTERNATIONAL LIGHTNING

DETECTION CONFERENCE (ILDC), 20., 2008, Tucson, Arizona, USA. **Proceedings...** Tucson: Vaisala, 2008.

MONTANYÀ, J.; BERGAS, J.; HERMOSO, B. Electric field measurements at ground level as a basis for lightning hazard warning. **Journal of Electrostatics**, 60, n. 2, 2004. 241-246. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388604000233>>. Acesso em: nov. 2015.

MORALES, C.; WEINMAN, J.; ANAGNOSTOU, E. N. **Continuous long-range thunderstorm monitoring by a VLF receiver network part I: location error analysis**. 2002a. Disponível em: <<http://www.zeus.iag.usp.br/pub/publications/mwa02.pdf>>. Acesso em: nov. 2015.

MURPHY, M. J. . H. R. L. . & D. N. W. Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 20., 2008, Tucson, Arizona, USA. **Proceedings...** Tucson, AZ, USA: Vaisala, 2008.

MURPHY, M. J.; CUMMINS, K. L. **Early detection and warnig of cloud-to-ground lightning at point of interest**. 2nd Symp. on Environmental Applications. Long Beach, CA, USA: Amer. Meteorol. Soc. 2000. p. 172-177.

MURPHY, M. J.; HOLLE, R. L. Warnings to cloud-to-ground lightning hazard based on combinations of lightning detection anda radar information. In: INTL. LIGHTNING DECTECTION CONF (ILDC), 19., 2006, Tucson, AZ. **Proceedings...** Tucson: Vaisala, 2006.

MURPHY, M. J.; HOLLE, R. L.; DEMETRIADES, N. W. S. Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 20., 2008, Tucson, AZ, USA. **Proceedings...** Tucson: Vaisala, 2008. Disponível em: <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Scientific%20papers/Cloud-to-ground_lightning_warnings_using_electric_field_mill_and_lightning_observations.pdf>. Acesso em: nov. 2015.

NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. Disponível em: 2005. 362 p. (INPE-14083-TDI/1069). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.28.19.00>>. Acesso em: fev. 2016.

NACCARATO, K. P.; PINTO JUNIOR, O. The evolution of the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network (BrasilDAT). In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 20., 2008, Tucson, Arizona, USA. **Proceedings...** Tucson: Vaisala, 2008b.

- NACCARATO, K. P.; PINTO JUNIOR, O. Improvements in the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network (BrasilDAT). **Atmos. Res.**, 2009. 546-563. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/docs/artigos/Naccarato_2009.pdf>. Acesso em: out. 2015.
- NACCARATO, K. P.; PINTO JUNIOR, O.; FERREIRA JR, H. H. Cloud-to-ground lightning forecast based on lightning location system information and electric field-mill data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING (GROUND'2008); INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS (LPE), 3., 2008, Florianópolis. **Proceedings... GROUND2008 & 3th LPE, 2008a**. ISBN 19832184.
- NACCARATO, K. P.; PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. R. C. A. Evidence of thermal and aerosol effects on the cloud-to-ground lightning density and polarity over large urban areas of Southeastern Brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 13, 2003.
- NASA.MSFC AND THE UNIVERSITY OF ALABAMA. KSC LDAR. **Lightning & atmospheric electricity research at GHRC**. 2016. Disponível em: <http://thunder.msfc.nasa.gov/data/data_ldar.html>. Acesso em: jan. 2016.
- NASA.NSSTC.GHRC. **Kennedy Space Center (KSC) Advanced Ground Based Field Mill (AGBFM) Network**. 2015. Disponível em: <https://ghrc.nsstc.nasa.gov/uso/ds_docs/kscmill/kscmill_dataset.html>. Acesso em: out. 2015.
- NOAA. **NWS Weather fatality, injury and damage statistics**. 2014. Disponível em: <www.weather.gov/os/hazstats.shtml>. Acesso em: out. 2015.
- PINTO JUNIOR, O. **A arte da guerra contra os raios**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 80 p.
- PINTO JUNIOR, O.; NACCARATO, K. P.; PINTO, I. R. C. A. The new Brazilian lightning detection network: First results. In: SIPDA INTERNATIONAL SYMPOSIUM LIGHTNING PROTECTION, 12. Fortaleza, Brazil. **Proceedings...** Fortaleza: IEEE. 2011. p. 152-153.
- PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 185 p. ISBN 85-901719-1-4. (INPE-8542-RPQ/724).
- PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. R. C. A. **Relâmpagos**. 2. ed. ed. São Paulo: Brasiliense, 2008.
- POELMAN, D. R. **On the Science of Lightning: An Overview**. L'Institut Royal Meteorologique de Belgique. Bruxelles, p. 62. 2010.

- INPE.ELAT. **Portal Web do Grupo de Eletricidade Atmosférica**, 2015. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/>>. Acesso em: 12 dez. 2015.
- INPE.PGCST. **Linhas de pesquisa em Ciência do Sistema Terrestre**, 2011. Disponível em: <http://www.inpe.br/pos_graduacao/cursos/cst/linhas_pesquisa.php#c>. Acesso em: out. 2015.
- PRICE, C. Lightning sensors for observing, tracking and nowcasting. **Sensors**, v. 8, n.1, p. 157-170, 2008. doi:10.3390/s8010157.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning, physics and effects**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 1-12 p. Disponível em: <<http://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam033/2002023094.pdf>>. Acesso em: nov. 2015.
- REID, G. C. Electrical structure of the middle atmosphere. In: _____ **Earth's electrical environment**. Washington D. C.: National Academy Press, 1986. Cap. 13, p. 183-194. ISBN 978-0-309-03680-1. Disponível em: <http://www.nap.edu/download.php?record_id=898#>. Acesso em: nov. 2015.
- ROMPS, D. M. et al. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. **Science**, 346, n. 6211, 2014. 851-854.
- ROZANTE, J. et al. **Composição de campos de precipitação em grade regular utilizando redes pluviométricas e estimativa de precipitação por satélite**. INPE-CPTEC. Cachoeira Paulista, SP. 2008. Disponível em: http://avaliacaodemodelos.cptec.inpe.br/pdf/Metodologia_prec.pdf. Acesso em: nov. 2015.
- SAUNDERS, C. P. R.; KEITH, W. D.; MITZEVA, R. P. The effect of liquid water on thunderstorm charging. **J. Geophys. Res.**, 1991. 11007-11017.
- SECKER, P. E. Instrumentation for electrostatic measurements. **Journal of Electrostatics**, v. 16, p. 1-19, 1984.
- SIDIK, M. A. B. et al. Development of wireless electric field mill for atmospheric electric field observation. **TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)**, v. 12, n. 4, p. 1113-1122, 2014.
- TAKAHASHI, T. Riming electrification as charge generation mechanism in thunderstorms. **J. Atmos. Sci.**, n. 35, 1978. 1536-1548.
- THE POSTGRESQL GLOBAL DEVELOPMENT GROUP. **The official site for PostgreSQL, the world's most advanced open source database**, 2016. Disponível em: <<http://www.postgresql.org/>>. Acesso em: jan. 2016.

VAISALA, OYJ. **Vaisala Thunderstorm Electric Field Mill EFM550 user's guide**, out. 2006. Disponível em: <http://www.hobeco.net/sites/default/files/efm550_users_guide.pdf>. Acesso em: out. 2015.

WEATHERBUG PROFESSIONAL. **Weatherbug lightning sensor technical specifications**,. 2010. Disponível em: <https://www.dropbox.com/s/3raw5lo13vvg47a/WLS_Tech_Spec_V7.pdf?dl=0>. Acesso em: fev. 2016.

WHIPPLE, F. J. W.; SCRASE, F. T. Point discharge in the electric field of the earth. **Geophysical Mem.**, London, v. 2, n. 68, 1936.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. 2. ed. London: Academic Press, 2006. ISBN 978-0-12-751966-1. Disponível em: <http://www.atmosfera.unam.mx/jzavala/AnalisisDatos/Statistical_Methods_Wilks.pdf>. Acesso em: dez. 2015.

WSI CORPORATION. **Global LIGHTNING NETWORK - GLN**. 2015. Disponível em: <<http://www.uspln.com/global.html>>. Acesso em: out. 2015.

APÊNDICE A – PLANILHA DE EVENTOS EA, FA E FTW

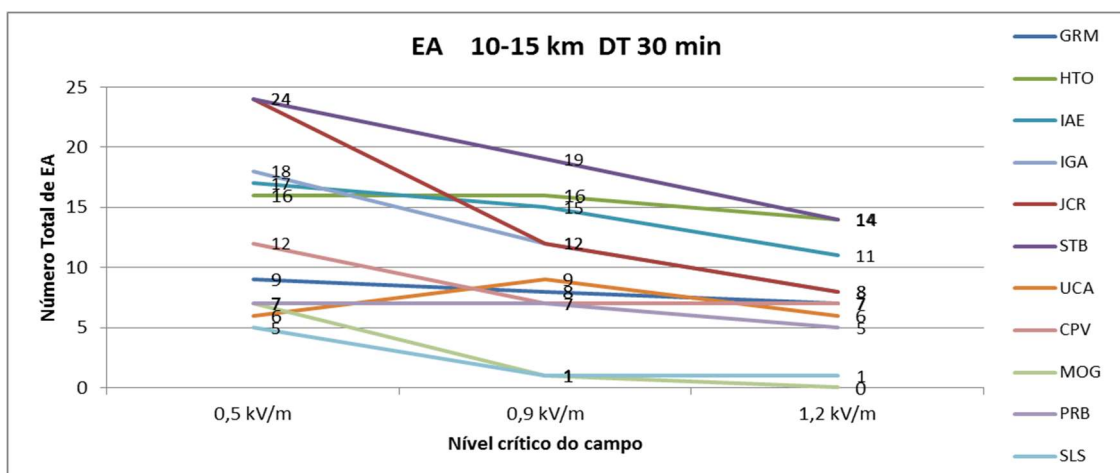
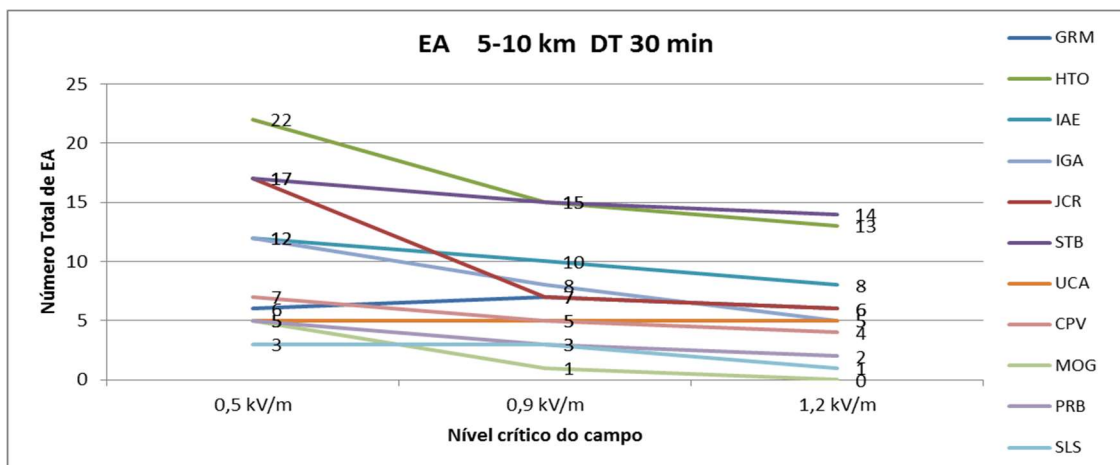
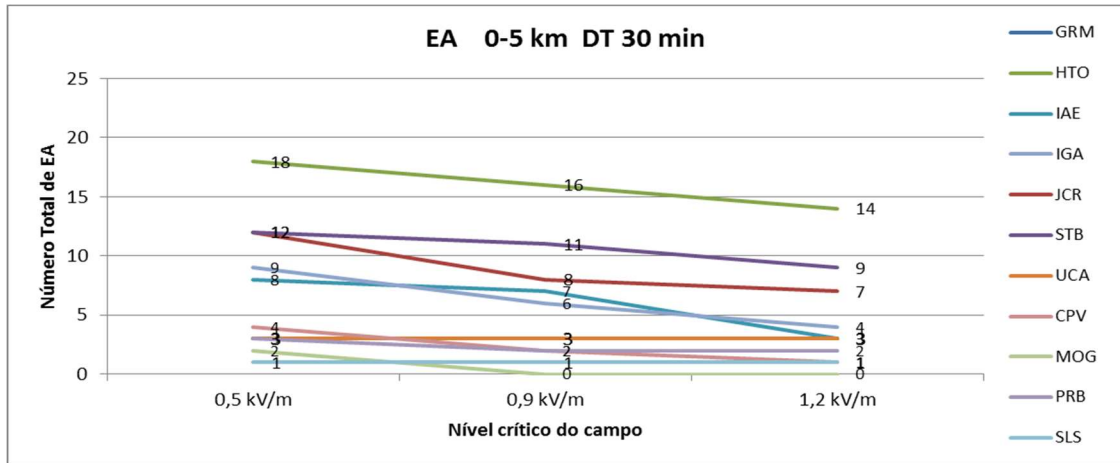
Figura A.1 - Trecho da planilha de eventos EA, FA e FTW e cálculo do LT médio.

A	B	C	D	E	F	G	Área de Interesse - Faixa de 10 a 15km									
							AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO
efm_id	Data	Horario	Diferença entre final de alarme e FTW [min]	Final de alarme (30 min)	30 min<LT<45 min	E ≥ Ecrit 0,5 kV/m	Houve NS em todo o período do alerta	Effective Alarm EA	False Alarm FA	Fail To Warning FTW	raio_id	corrente_pico	tempestade	Horario de ocorrência do CG	Lead Time LT	tipo evento
		00:30:00														
171765	2014-02-28 06:44:00	06:44:00		2014-02-28 07:14:00	00:37:38	-549.693	N		1		1072846	-23	122	2014-02-28 07:21:38	00:37:38	FA
171775	2014-02-28 06:54:00	06:54:00		2014-02-28 07:24:00		-765.907	S	1			1072846	-23	122	2014-02-28 07:21:38	00:27:38	EA
171834	2014-02-28 07:53:00	07:53:00		2014-02-28 08:23:00		-2815.08					1072927	-19	122	2014-02-28 07:53:30	00:00:30	FINAL
172162	2014-02-28 13:21:00	13:21:00		2014-02-28 13:51:00		-570.791	S			1	1073848	31	123	2014-02-28 13:13:50	#####	FTW
179640	2014-03-05 17:59:00	17:59:00		2014-03-05 18:29:00		617.115	N		1		1076138	-8	135	2014-03-05 18:49:23	00:50:23	FA
179665	2014-03-05 18:24:00	18:24:00		2014-03-05 18:54:00		-1165.61	S	1			1076138	-8	135	2014-03-05 18:49:23	00:25:23	EA
179690	2014-03-05 18:49:00	18:49:00		2014-03-05 19:19:00		3079.58					1076138	-8	135	2014-03-05 18:49:23	00:00:23	FINAL
181146	2014-03-06 19:05:00	19:05:00		2014-03-06 19:35:00		583.098	S			1	1076586	-16	136	2014-03-06 19:03:05	#####	FTW
182646	2014-03-07 20:05:00	20:05:00		2014-03-07 20:35:00	00:36:31	-716.393	N		1		1079897	-11	140	2014-03-07 20:41:31	00:36:31	FA
182653	2014-03-07 20:12:00	20:12:00		2014-03-07 20:42:00		-1562.32	S	1			1079897	-11	140	2014-03-07 20:41:31	00:29:31	EA
182679	2014-03-07 20:38:00	20:38:00		2014-03-07 21:08:00		558.319					1079899	-23	140	2014-03-07 20:41:32	00:03:32	FINAL
188258	2014-03-11 17:37:00	17:37:00		2014-03-11 18:07:00		736.073	S			1	1081280	-22	148	2014-03-11 17:34:45	#####	FTW
189763	2014-03-12 18:42:00	18:42:00		2014-03-12 19:12:00	00:38:15	500.341	N		1		1082411	-12	150	2014-03-12 19:20:15	00:38:15	FA
189772	2014-03-12 18:51:00	18:51:00		2014-03-12 19:21:00		1496.47	S	1			1082411	-12	150	2014-03-12 19:20:15	00:29:15	EA
189801	2014-03-12 19:20:00	19:20:00		2014-03-12 19:50:00		1656.96					1082411	-12	150	2014-03-12 19:20:15	00:00:15	FINAL
215697	2014-03-30 18:56:00	18:56:00		2014-03-30 19:26:00		636.671	S			1	1086445	-16	166	2014-03-30 18:41:30	#####	FTW
216999	2014-03-31 16:38:00	16:38:00		2014-03-31 17:08:00		1702.96	S			1	1086568	-16	167	2014-03-31 16:37:10	#####	FTW
217000	2014-03-31 16:39:00	16:39:00		2014-03-31 17:09:00		1856.3					1086586	-16	167	2014-03-31 16:39:47	00:00:47	FINAL
	Média da difer < 15		00:06:24	Média LT > 30	00:37:18									Média LT (EA)	00:20:37	
	Nr casos com dif < 15		1	Nr casos LT > 30	94									Nr total de relampagos		
	Raio de 5 km		0		24	TOTAL ENTRE 0 E 5 km								Aumento em relação a 10 km (%)		
	Raio de 10 km		1		24	Effective Alarm (EA)	(EA)	145						30.6%		
	Raio de 15 km		0		46	False Alarm (FA)		86						59.3%		
						Fail to Warning (FTW)		50						-19.4%		
						Total de Eventos		281								
						% Effective Alarm (EA)	m (EA)	51.6	68.0							
						% False Alarm (FA)	-A)	30.6	14.2							
						% Fail to Warning (FTW)	g (FTW)	17.8	17.8							

Fonte: Produção do autor.

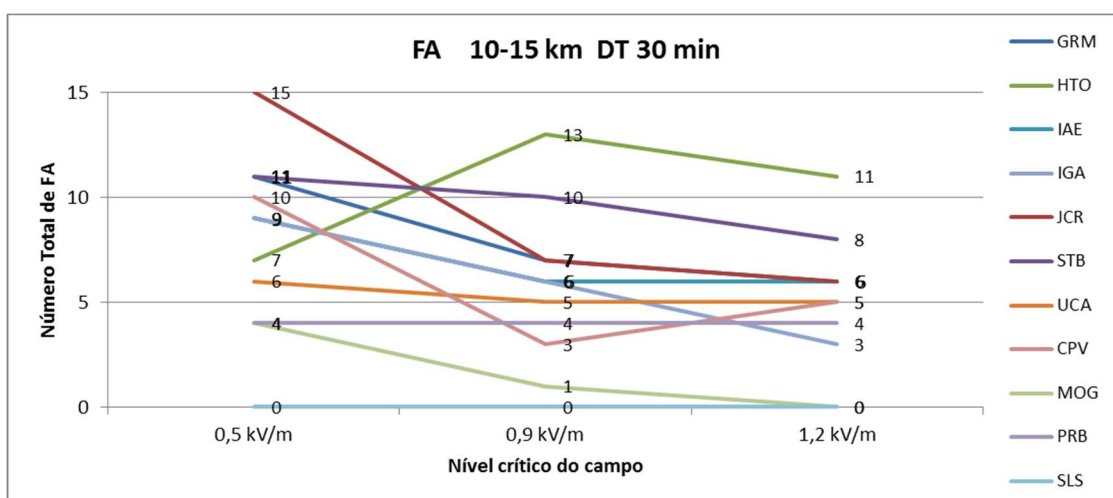
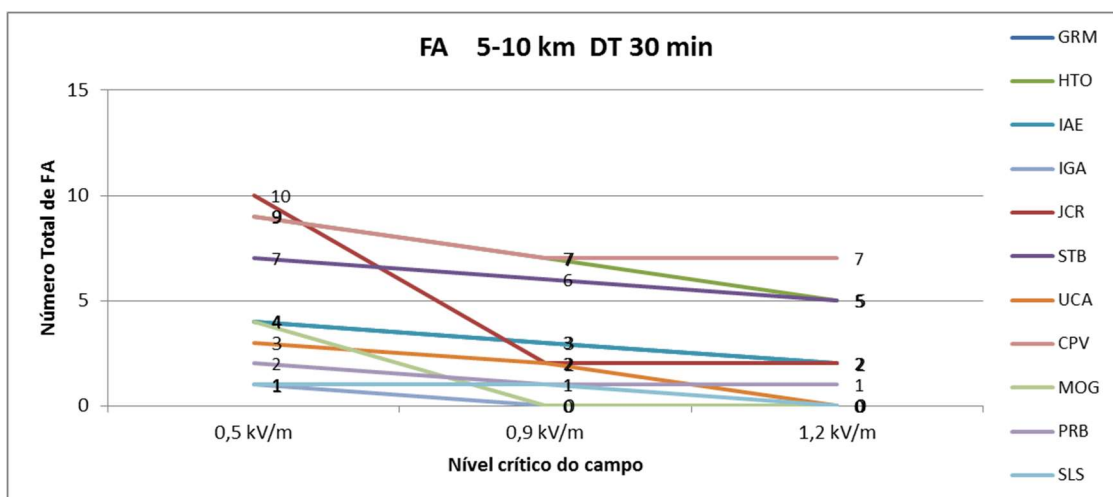
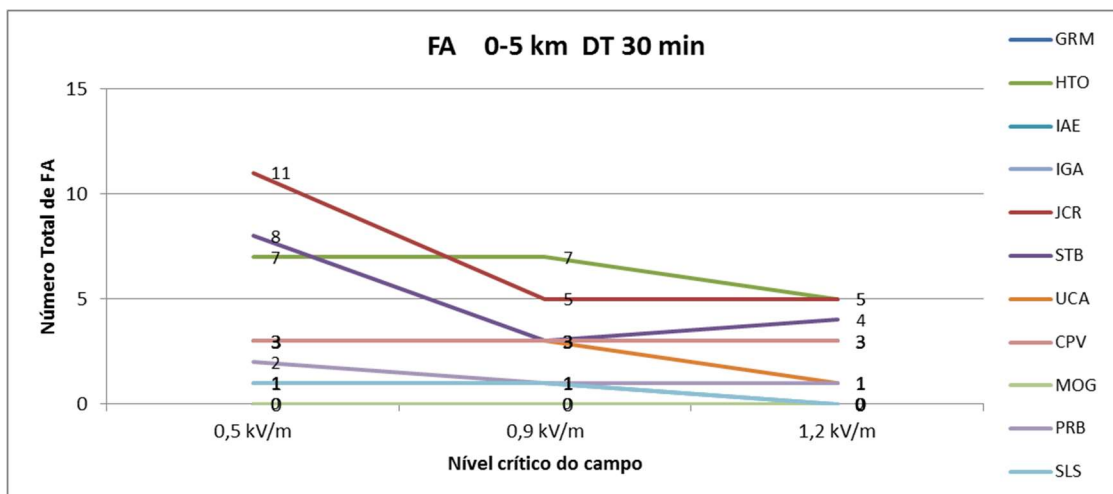
APÊNDICE B – GRÁFICOS DE EVENTOS EA, FA E FTW

Figura B.1 – Número total de EA com DT 30 min.



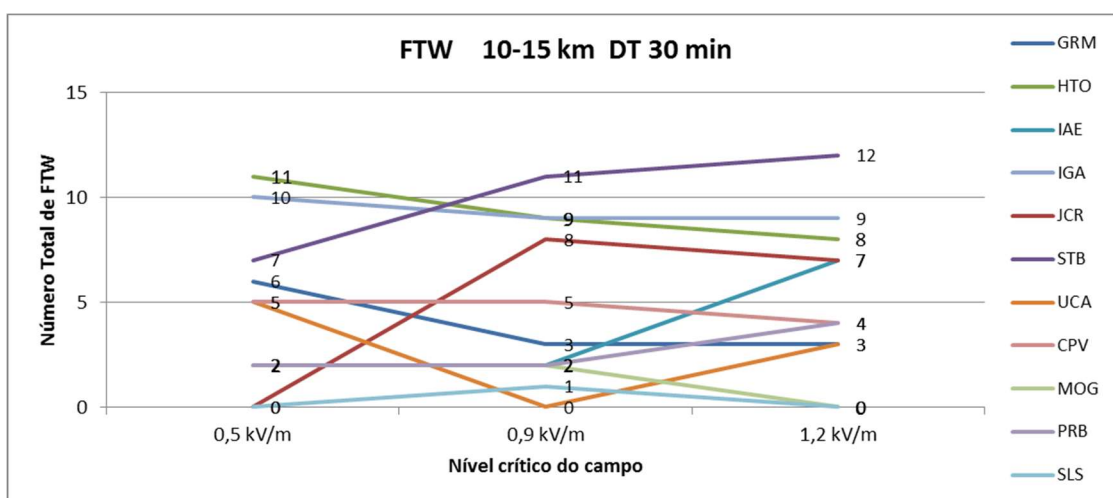
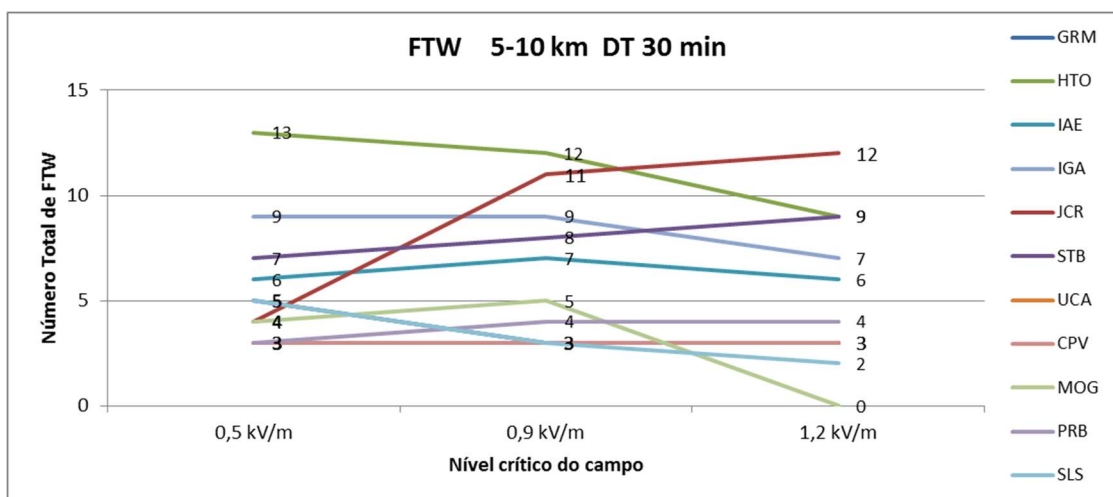
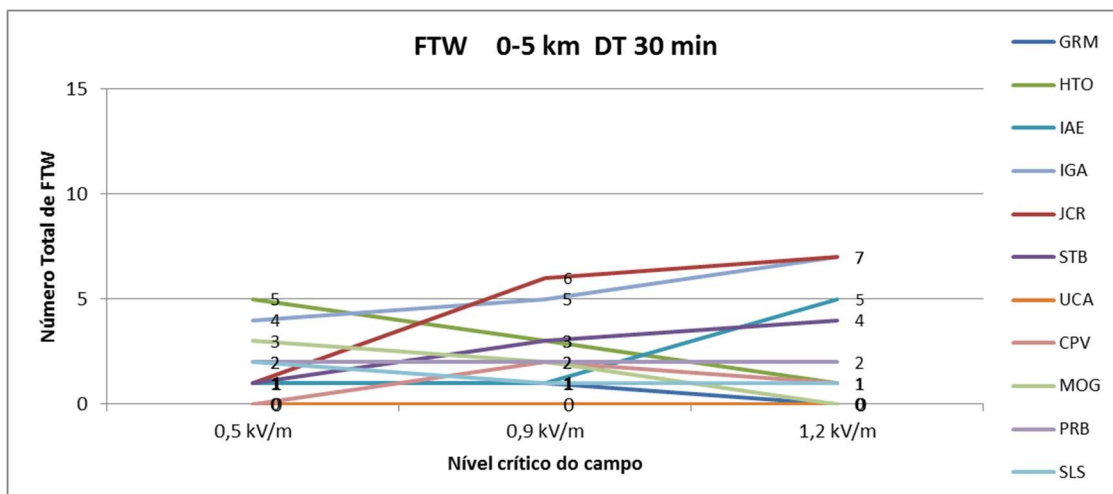
Fonte: Produção do autor

Figura B.2 - Número total de FA com DT 30 min.



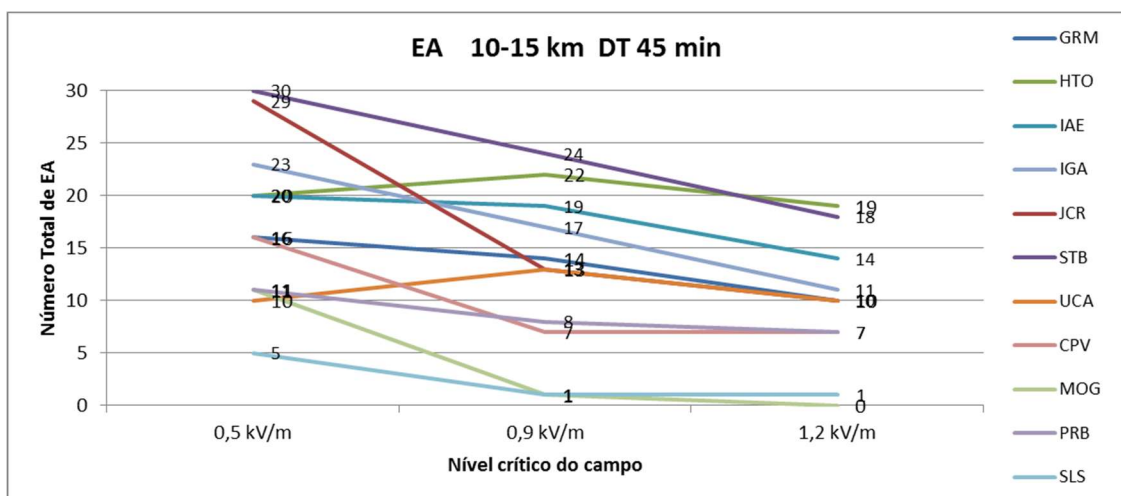
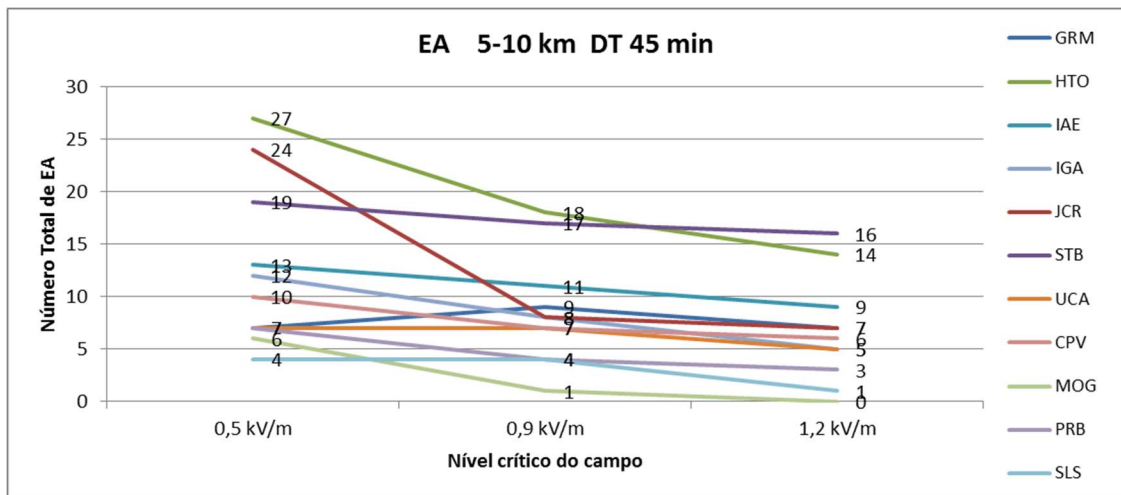
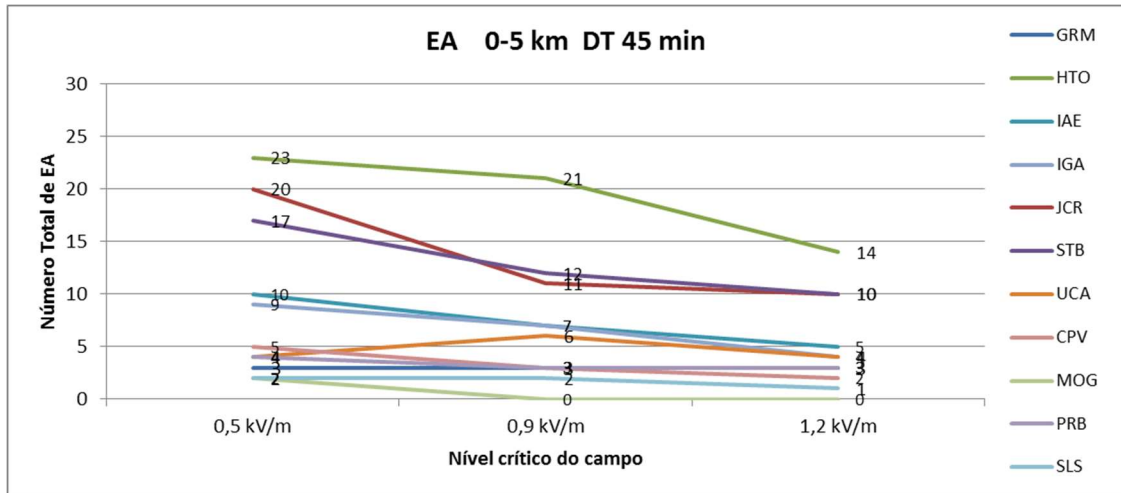
Fonte: Produção do autor

Figura B.3 – Número total de FTW com DT 30 min.



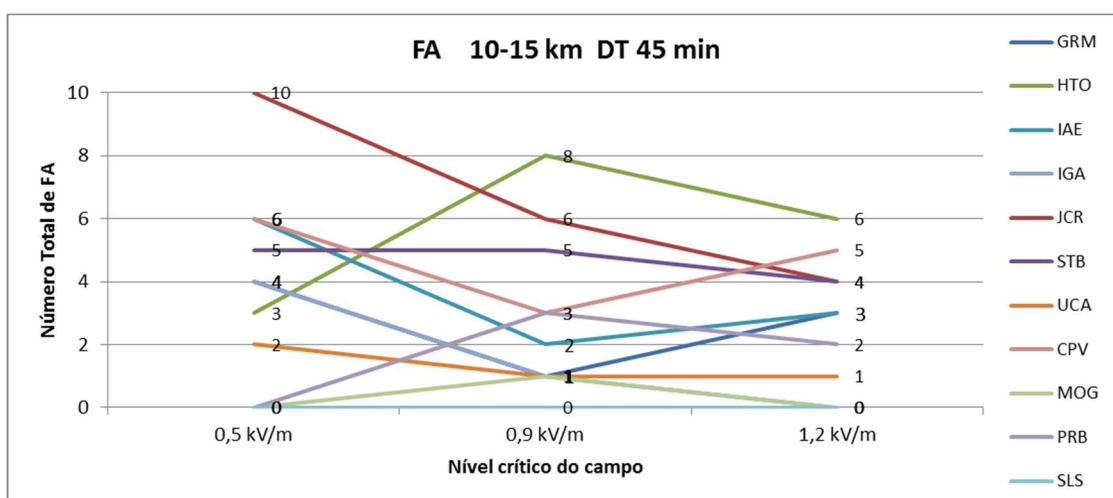
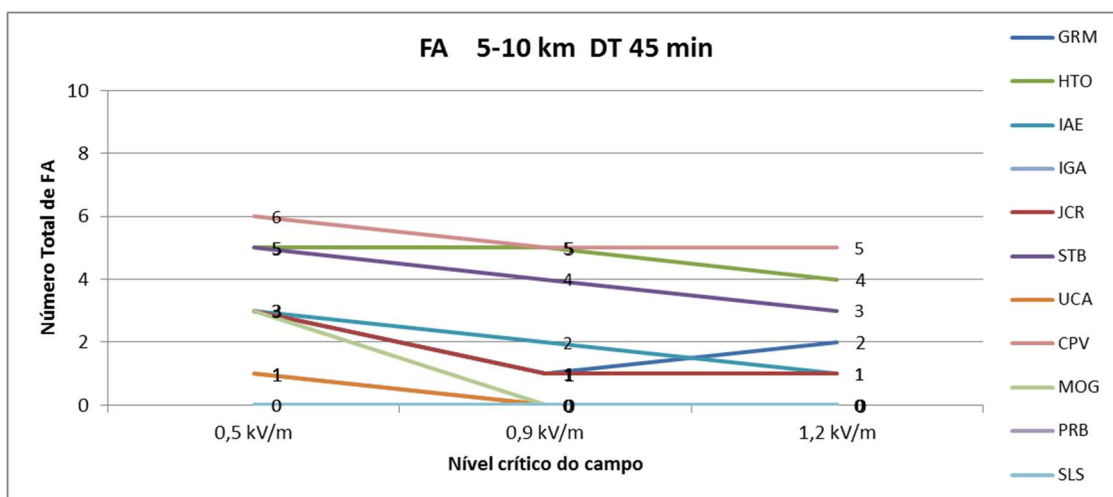
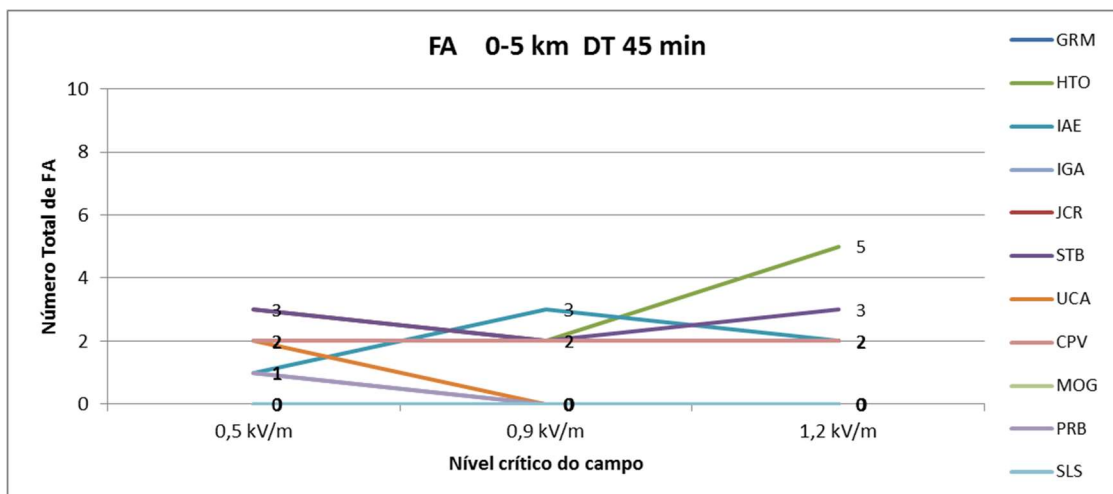
Fonte: Produção do autor

Figura B.4 – Número total de EA com DT 45 min.



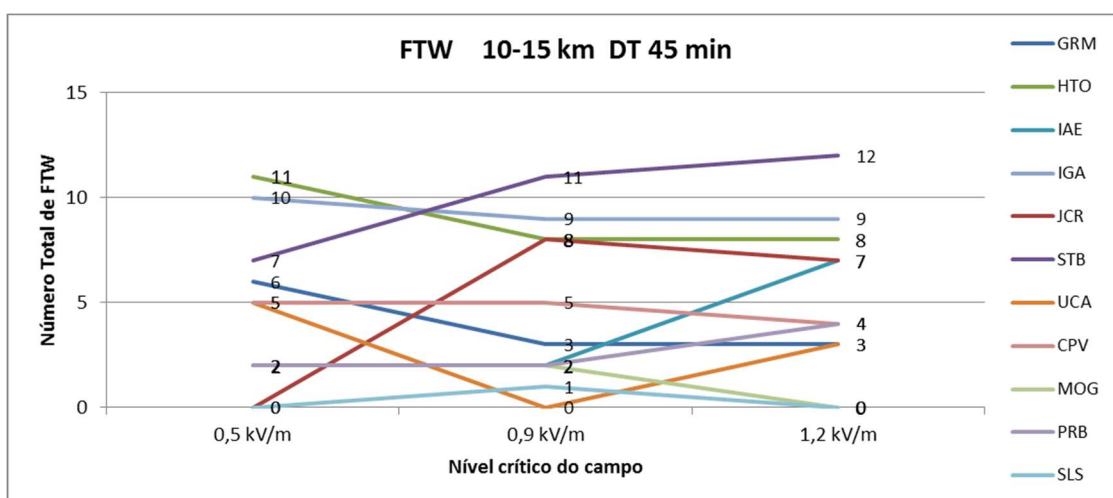
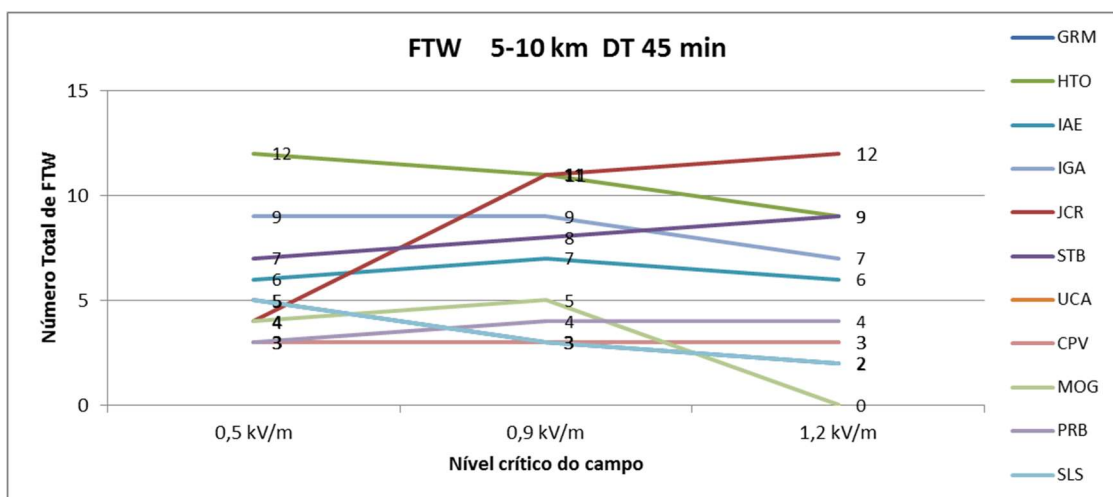
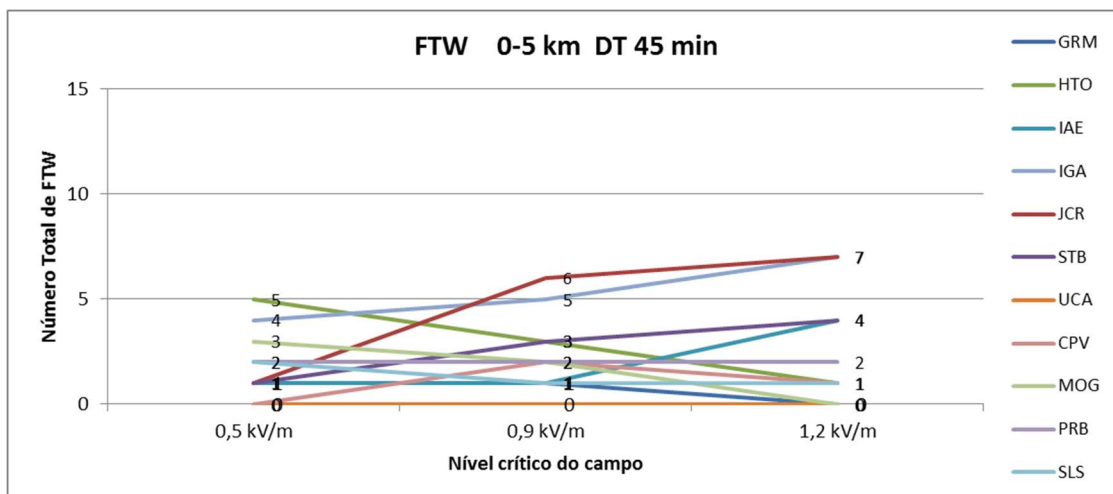
Fonte: Produção do autor

Figura B.5 - Número total de FA com DT 45 min.



Fonte: Produção do autor

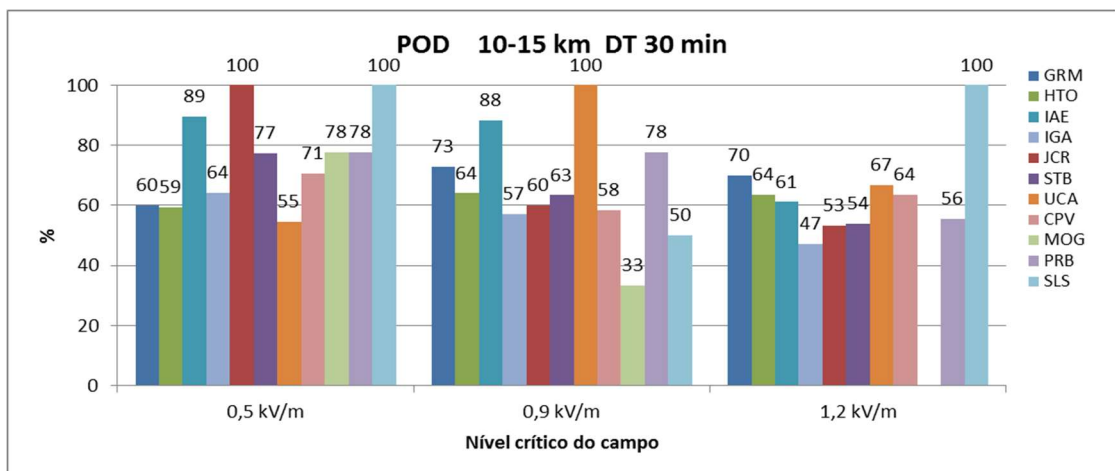
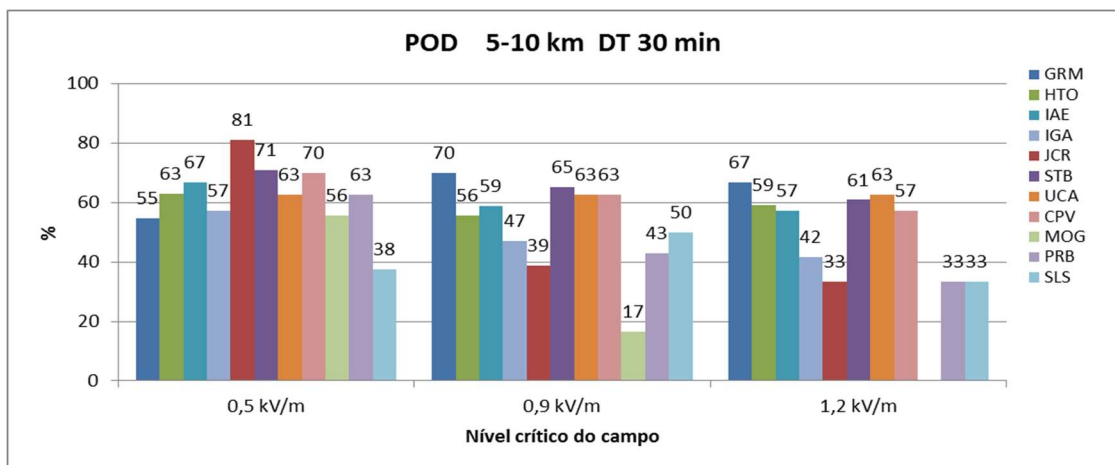
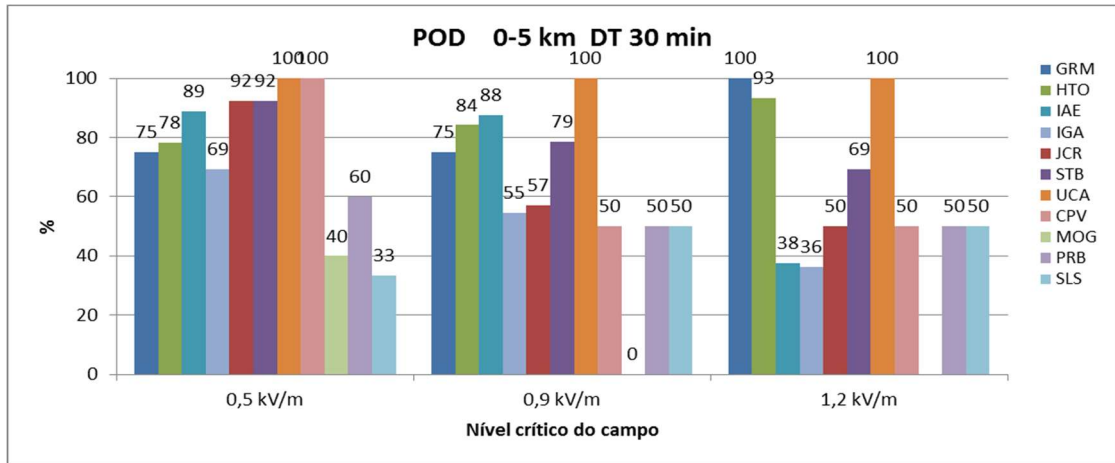
Figura B.6 – Número total de FTW com DT 45 min.



Fonte: Produção do autor

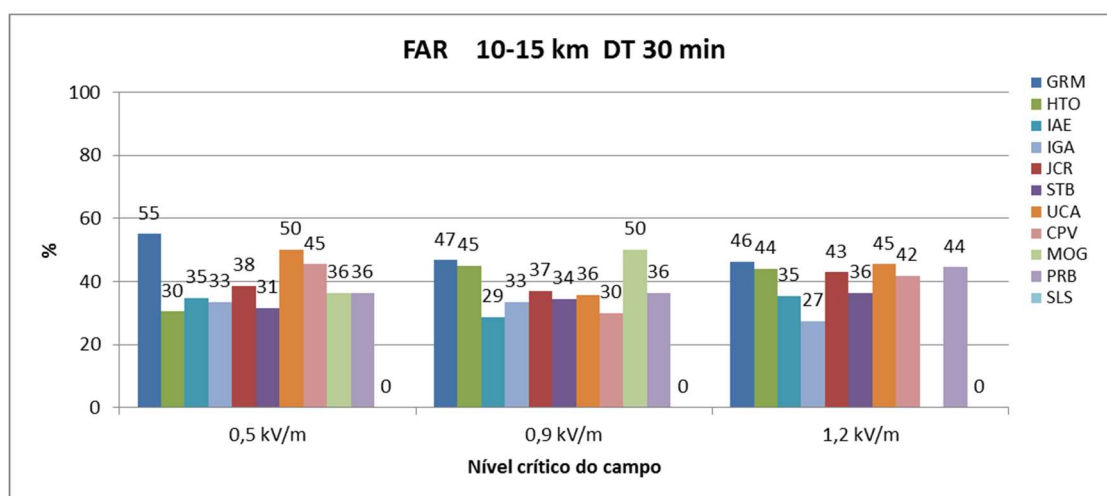
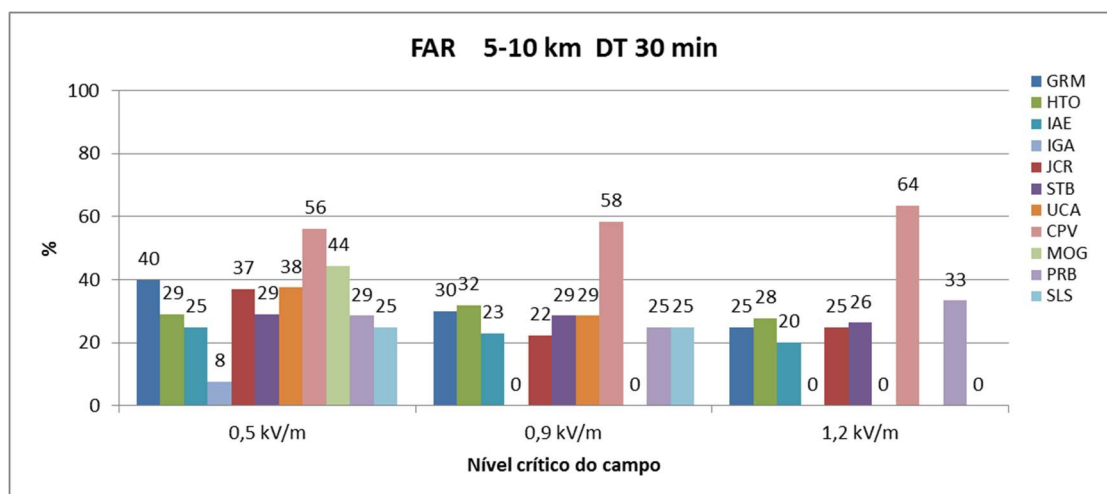
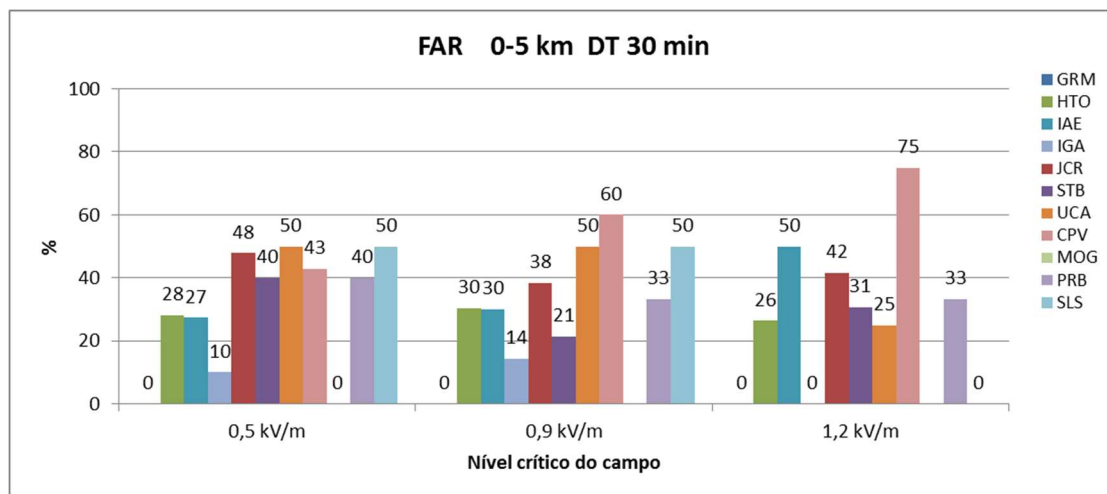
APÊNDICE C – GRÁFICOS DE POD E FAR

Figura C.1 - POD com DT 30 minutos.



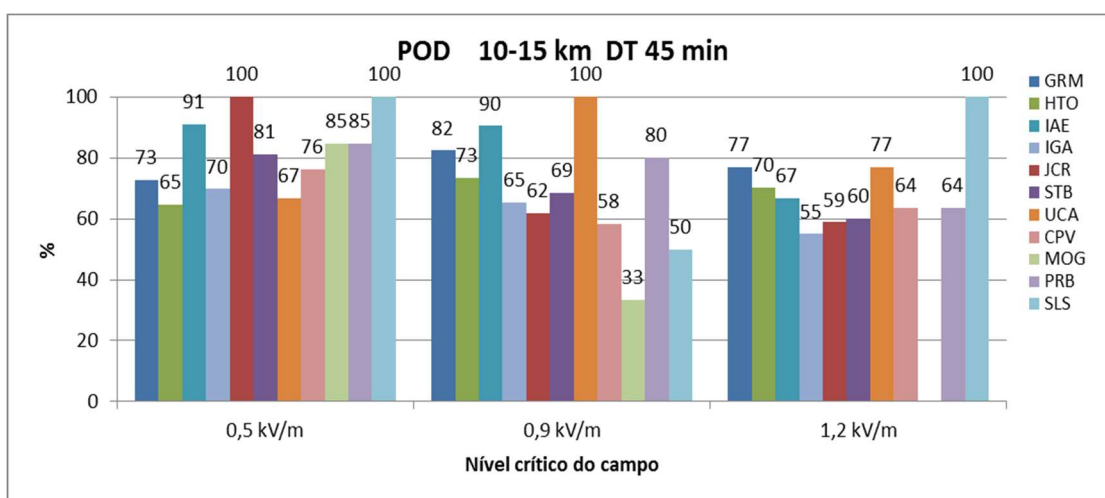
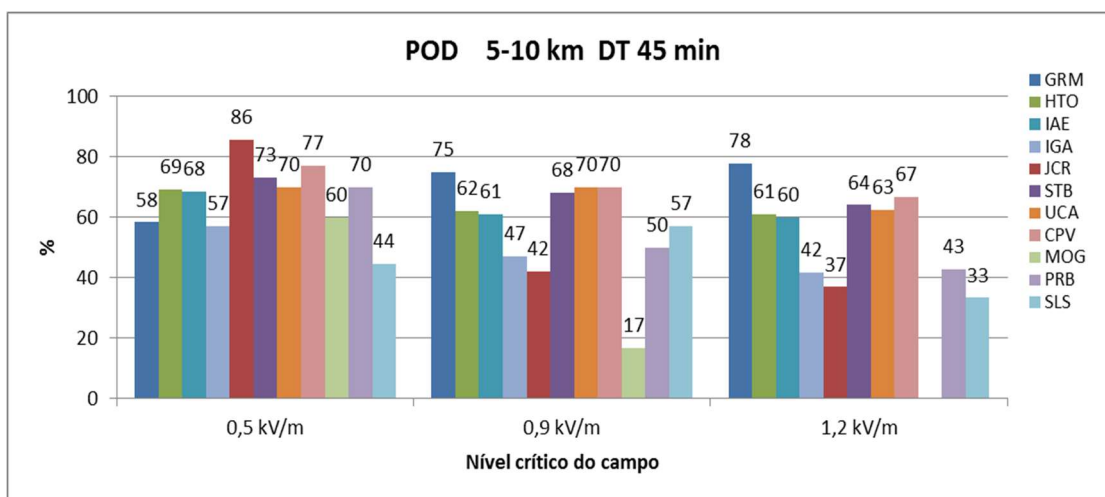
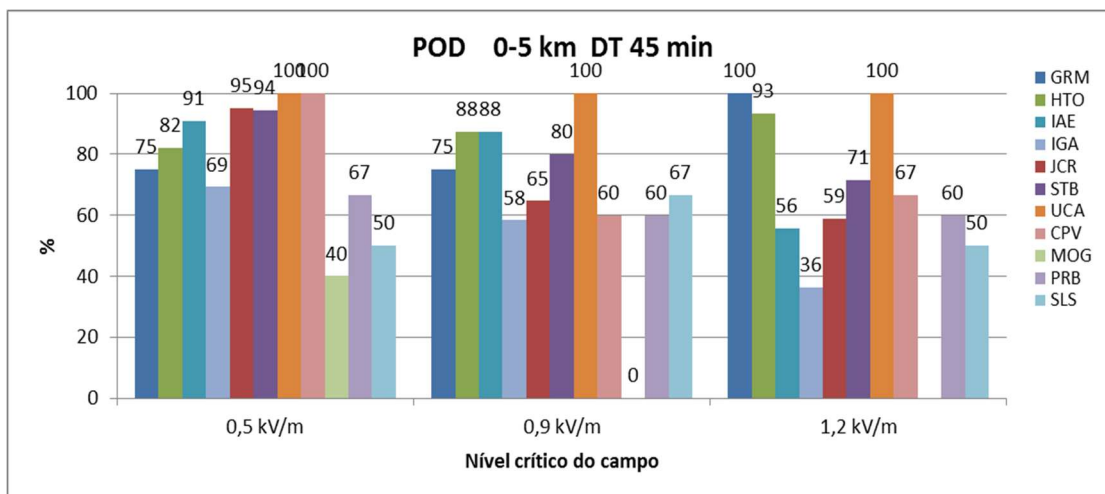
Fonte: Produção do autor

Figura C.2 – FAR com DT 30 minutos.



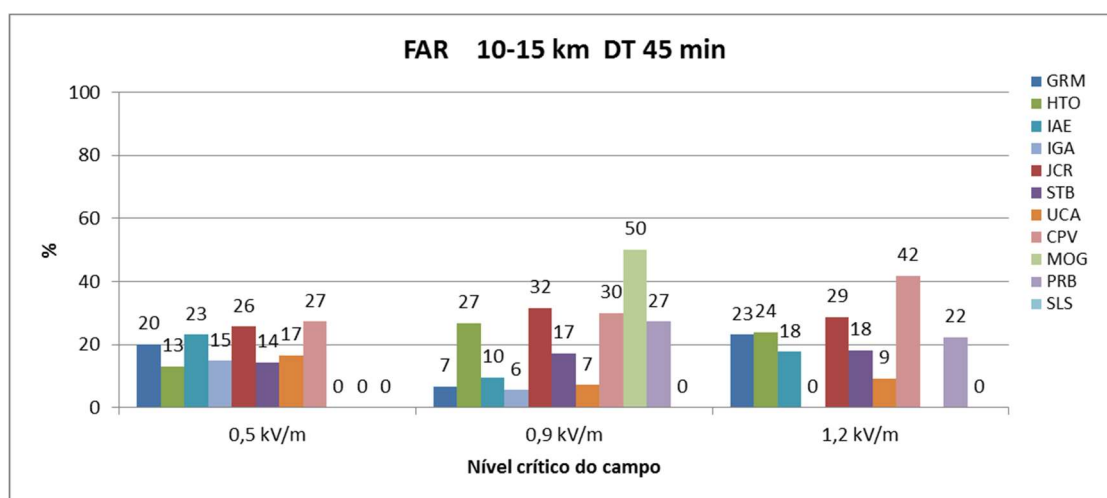
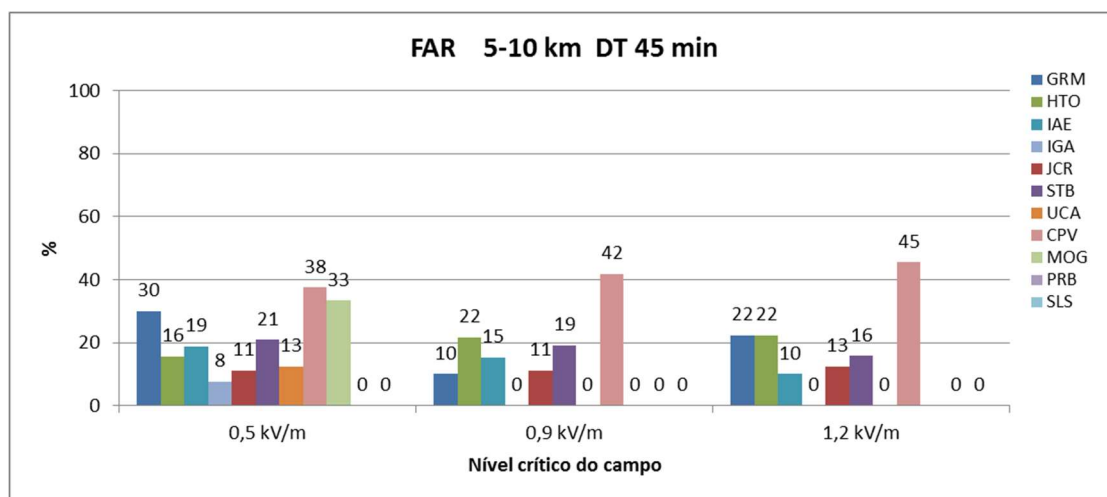
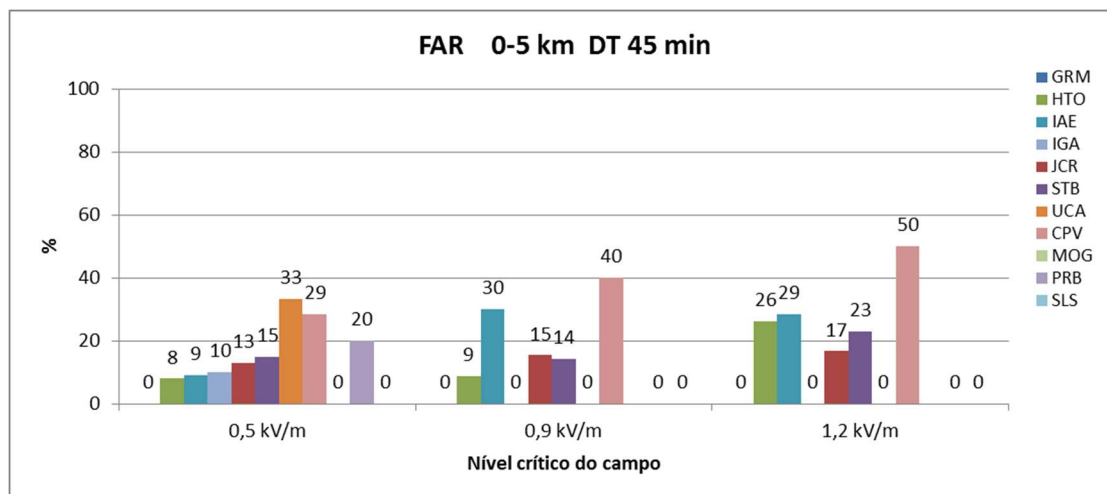
Fonte: Produção do autor

Figura C.3 - POD com DT 45 minutos.



Fonte: Produção do autor

Figura C.4 – FAR com DT 45 minutos.



Fonte: Produção do autor