

DIEGO FELIPE MORENO MOREIRA

**Estudo para correção dos sensores da rede de monitoramento do campo elétrico em
função do campo elétrico de tempo bom.**

Guaratinguetá - SP

2014

Diego Felipe Moreno Moreira

Estudo para correção dos sensores da rede de monitoramento do campo elétrico em função do campo elétrico de tempo bom.

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Milton Eiji Kayama

Guaratinguetá - SP

2014

M838e

Moreira, Diego Felipe Moreno

Estudo para correção dos sensores da rede de monitoramento do campo elétrico em função do campo elétrico de tempo bom. / Diego Felipe Moreno Moreira – Guaratinguetá : [s.n], 2014.

43 f : il.

Bibliografia: f. 42-43

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Milton Eiji Kayama

1. Campos elétricos 2. Eletricidade atmosférica I. Título

CDU 537.12

Diego Felipe Moreno Moreira

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA”

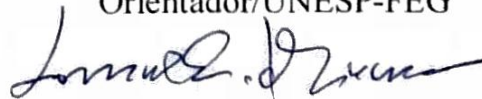
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MILTON EIJI KAYAMA
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. SAMUEL EUZÉDICE DE LUCENA
UNESP-FEG



Prof. FERNANDO RIBEIRO FILADELFO
UNESP-FEG

Agosto de 2014

DADOS CURRICULARES

Diego Felipe Moreno Moreira

NASCIMENTO	02.08.1987 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP
FILIAÇÃO	Evaldir Moreira Magda Estela Moreno Moreira
2001/2004	Curso de Técnico em Eletrônica ETEP – “Escola Técnica Professor Everardo Passos”

DEDICATÓRIA

Dedico todo este trabalho ao meu filho Matheus, mesmo tão pequeno me deu fôlego para chegar até aqui, meu grande amor e companheira Thaísa, pois Deus sabe que nem sequer estaria nesta universidade sem ela. A todos os que sempre me ampararam, em especial ao meu pai Evaldir Moreira e minha mãe Magda Estela Moreno Moreira, que em tempos de muita dificuldade sempre estiveram ao meu lado me incentivando a continuar.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Em segundo lugar agradeço a todas as pessoas que diretamente ou indiretamente, contribuíram para a construção dos meus valores meus pais, os mestres do passado e todos os que compartilharam um pouco do que sabem comigo e com os meus amigos nesta vida acadêmica.

Ao meu irmão Marcelo, sua esposa Andressa, e seus filhos Raul e Marcela,

Ao professor Dr. Milton Eiji Kayama por ter acreditado em mim, mesmo quando outros “professores” não conseguiam enxergar além de um cara com cabelo comprido,

Ao Marco Antônio da Silva Ferro, pesquisador da Divisão de Ciências Atmosféricas do Instituto de Aeronáutica e Espaço,

Aos meus amigos da Moradia Estudantil, em especial ao Moacir Lourenço e Jesus Bravo,

Aos senhores Hedelyn, Buzzatto, Kendy, C.G, Thomas e Zé,

Aos outros irmãos Mr. Vincent Van Nóia, Bel. Guilherme Aranha, Douglas Pequeno.

Também agradeço a Ozzy, Geezer, Iommi e Bill.

EPÍGRAFE

“Sometimes all of our thoughts are misgiven.”

Led Zeppelin.

MOREIRA, D. F. M. - **Estudo para correção dos sensores da rede de monitoramento do campo elétrico em função do campo elétrico de tempo bom.** 2014. 43 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

Uma rede de monitoramento de campo elétrico atmosférico está sendo implementada em uma região do Vale do Paraíba, cobrindo grande parte de sua área. Isto significa que cada sensor apresenta uma determinada altitude relativa ao nível do mar e uma topografia diferente ao seu redor. O presente trabalho relata a análise sobre a real necessidade ou não da aplicação de um fator de correção às medidas dos diversos sensores. Os sensores se encontram em diferentes regiões e suas medições foram comparadas a um sensor de referência localizado em São José dos Campos. Foram coletados e analisados os dados dos sensores durante 4 meses, tomando o cuidado em identificar os dias que possuam uma mesma condição de leitura a todos os sensores na rede. Dois métodos de análise foram aplicados, o primeiro por ajuste de reta por regressão linear, onde os dados coletados dos sensores foram relacionados aos dados do sensor de referência. Em alguns casos, o sensor de referência, apresentou valores até 95 % superiores em relação aos outros. Como os dados para esta análise se mostraram preliminares, foi proposto o segundo método, comparando os dados da distribuição das médias das medidas dos sensores e da referência, ambas em função do tempo. Novamente analisando os dados, na mesma data e horário de interesse, foram obtidos valores de campo elétrico com variações entre 1% e 133% acima dos valores de referência. Ambos os métodos reforçam a equidade ao ambiente de instalação e a não necessidade do uso deste fator de correção.

PALAVRAS-CHAVE: Campo Elétrico Atmosférico, Campo Elétrico de Tempo bom, Eletricidade Atmosférica.

MOREIRA, D. F. M. - **Study for correction of sensor network for monitoring of the electric field due to the electric field of good time**. 2014. 43 p. Graduate Work (Graduate in Electrical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

A monitoring network of atmospheric electric field covering the Vale do Paraíba region was implemented. The sensors were located on different sites with different altitude and geographic topology. The present work reports the study carried on those sensors in order to verify the necessity of using some correction factor to the measured local electric field intensity due to effects of local environment. The measurements were done in continuous 24 hours per day with the data recorded on registers in each device accumulating information during a period of four months. The relation between the electric field values by each sensor was compared to the reference located on Sao Jose dos Campos city using the same period. In a graphical analysis using the local field intensity and the reference, the data were fitted to a straight line obtained by minimum square method. Variation up to 95% was observed between the field values in some sensors. Another method was proposed, comparing the mean values of the electric field in a function of time. The variation in some sensors reached up to 133%. We conclude that the variations are due to local atmospheric conditions and no correction factor is required on the electric field sensors.

KEYWORDS: Atmospheric Electric Field, Electric Field of Good Time, Atmospheric Electricity.

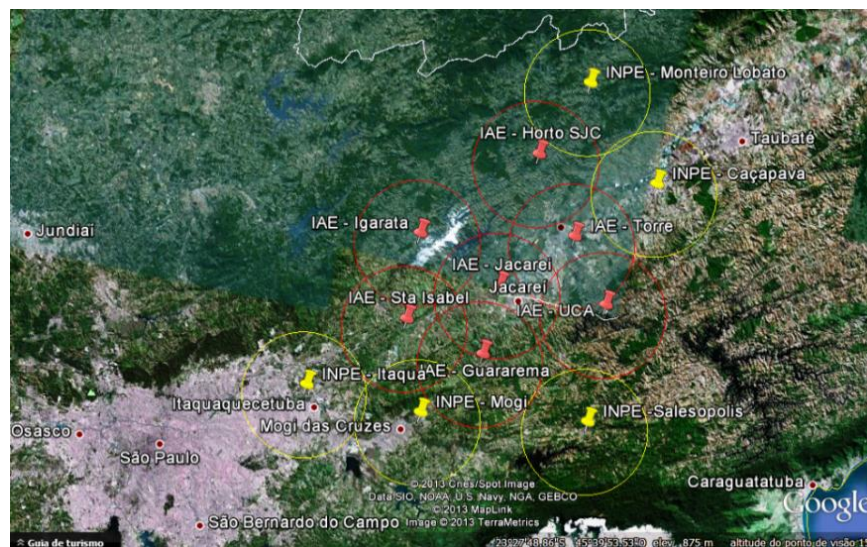
SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	CONSIDERAÇÕES BÁSICAS	17
2.1.	Sensores de Campo elétrico do tipo <i>Field Mill</i> (EFMS)	17
2.2.	Satélite Geoestacionário de Operações Ambientais (GOES)	19
2.3.	Radar meteorológico REDEMET	20
3.	DADOS E METODOLOGIA	21
3.1.	Sensor de referência	21
3.1.1.	Local de instalação “ideal”	21
3.1.2.	Distância em relação aos outros sensores	22
3.2.	Critérios para validar a comparação das medidas dos sensores	23
3.2.1.	Classificação dos dias utilizando imagens de satélite.....	23
3.2.2.	Classificação dos dias utilizando dados de radar meteorológico.....	26
3.3.	Determinação do fator de correção das medidas dos sensores	29
3.3.1.	Ajuste de reta por regressão linear.....	29
3.3.2.	Ajuste do campo em função da distribuição no tempo	34
4.	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

Durante uma tempestade, sensores de campo elétrico atmosférico detectam mudanças de campo relativamente lentas (em intervalos de tempo da ordem de dezenas de minutos) devido aos processos de eletrificação da nuvem, bem como a evolução e eventual dissipação de regiões de carga à medida que a tempestade decai. A partir dessa característica, uma rede de sensores de campo elétrico atmosférico está sendo implantada numa região do Vale do Paraíba, ao redor do município de São José dos Campos, com o objetivo de gerar alertas de risco de relâmpagos. Na Figura 1, podemos observar a área de cobertura da rede de monitoramento do campo elétrico atmosférico, os destaques em vermelho são os sensores atualmente instalados pela Divisão de Ciências Atmosféricas (ACA), uma divisão do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), e em amarelo os sensores a serem instalados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Figura 1- Área de cobertura da Rede de Monitoramento do Campo Elétrico Atmosférico. Vermelho: sensores instalados pela ACA/IAE em operação. Amarelo: sensores a serem instalados pelo INPE.



Fonte: (Google Earth, 2011)

Uma superfície de um campo eletrostático que possui o mesmo potencial em todos os pontos é referida como uma superfície equipotencial, uma linha de tal superfície é conhecida como linha equipotencial. Se em um sistema eletrostático as linhas equipotenciais podem ser desenhadas, as linhas de força podem ser imediatamente construídas, uma vez que elas são perpendiculares às linhas equipotenciais.

O vetor elétrico pode ser obtido a partir do potencial elétrico escalar. Em um sistema de coordenadas cartesianas para um determinado ponto, esta relação é expressa na equação (1):

$$\mathbf{E} = -\text{grad } V = -\nabla V = -\left(\frac{\partial V}{\partial x}\mathbf{u}_x + \frac{\partial V}{\partial y}\mathbf{u}_y + \frac{\partial V}{\partial z}\mathbf{u}_z\right) \quad (1)$$

Onde:

\mathbf{E} : vetor campo elétrico;

\mathbf{u}_x , \mathbf{u}_y e \mathbf{u}_z : vetores unitários dos três eixos de coordenadas cartesianas;

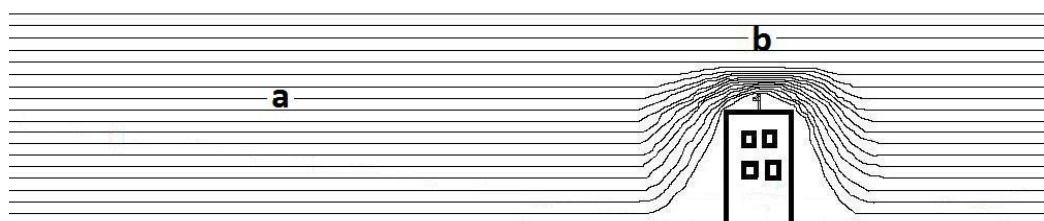
V : potencial elétrico;

∇ : operador “nabla” ou “del”.

Vários estudos (MONTANYÀ et al., 2008; MURPHY et al., 2008; BEASLEY et al., 2008; ARANGUREN et al., 2009; FERRO et al., 2011) apontam que as medidas efetuadas pelo sensor de campo elétrico podem ser afetadas dependendo das características da região, como: a altitude de formação do centro de carga da nuvem, topografia, etc.; tais fatores alteram a distância que o centro de carga encontra-se em relação ao sensor de campo, afetando, conseqüentemente, a intensidade do campo elétrico medida pelo sensor.

Os fabricantes também alertam e orientam os usuários a efetuar a correção da medida realizada por ele. Essa correção é necessária uma vez que o sensor instalado pode ter suas medidas influenciadas pelas condições do local de instalação como, por exemplo, a instalação do equipamento no alto de edifícios ou a presença de estruturas (torres, árvores, etc.) próximas ao local de instalação que provoquem a deformação das linhas equipotenciais de campo elétrico atmosférico, alterando o valor da medida como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - (a) Distribuição uniforme das linhas de campo sobre uma superfície plana. (b) Deformação das linhas de campo devido à presença de uma estrutura alta.



Fonte: (Elaborada pelo autor, 2014)

Para fins de correção, o fabricante sugere comparar a leitura de cada sensor com a leitura de um sensor de referência, instalado em condições ideais de operação (Figura 3).

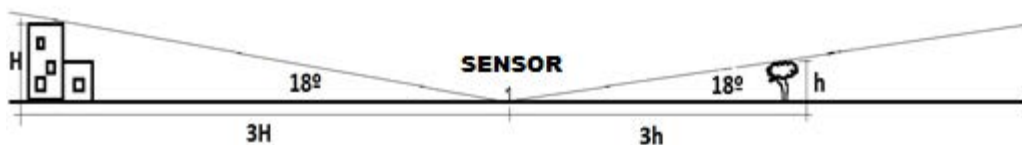
Figura 3 - Sensor instalado na laje de um prédio (esquerda e centro) e sensor de referência instalado no solo (direita).



Fonte: (Repositório Digital da ACA/IAE, 2012)

Por condições ideais, entende-se a instalação do sensor de referência no nível do solo, numa região ampla e plana, sem nenhum objeto que esteja ultrapassando uma rampa de ângulo 18° ao redor do sensor, com origem no ponto de instalação, de maneira que as linhas de campo elétrico atmosférico estejam uniformemente distribuídas (Figura 4).

Figura 4 - Instalação do sensor de referência em condições ideais.

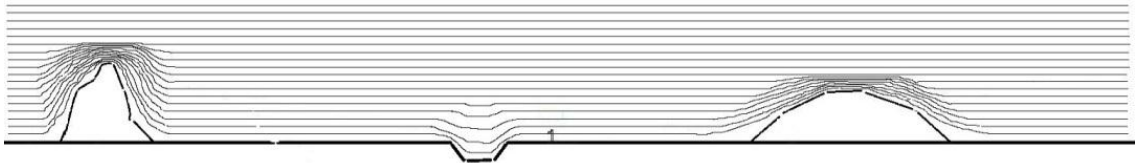


Fonte: (Elaborada pelo autor, 2014)

Essas não são condições triviais de se encontrar numa região de vale, onde a rede de monitoramento está sendo implantada. Como mencionado anteriormente, a rede de monitoramento em implantação cobre uma grande área do Vale do Paraíba, com sensores instalados em cidades na Serra do Mar, na Serra da Mantiqueira e na região plana do vale. Cada uma dessas cidades está situada numa determinada altitude em relação ao nível do mar e

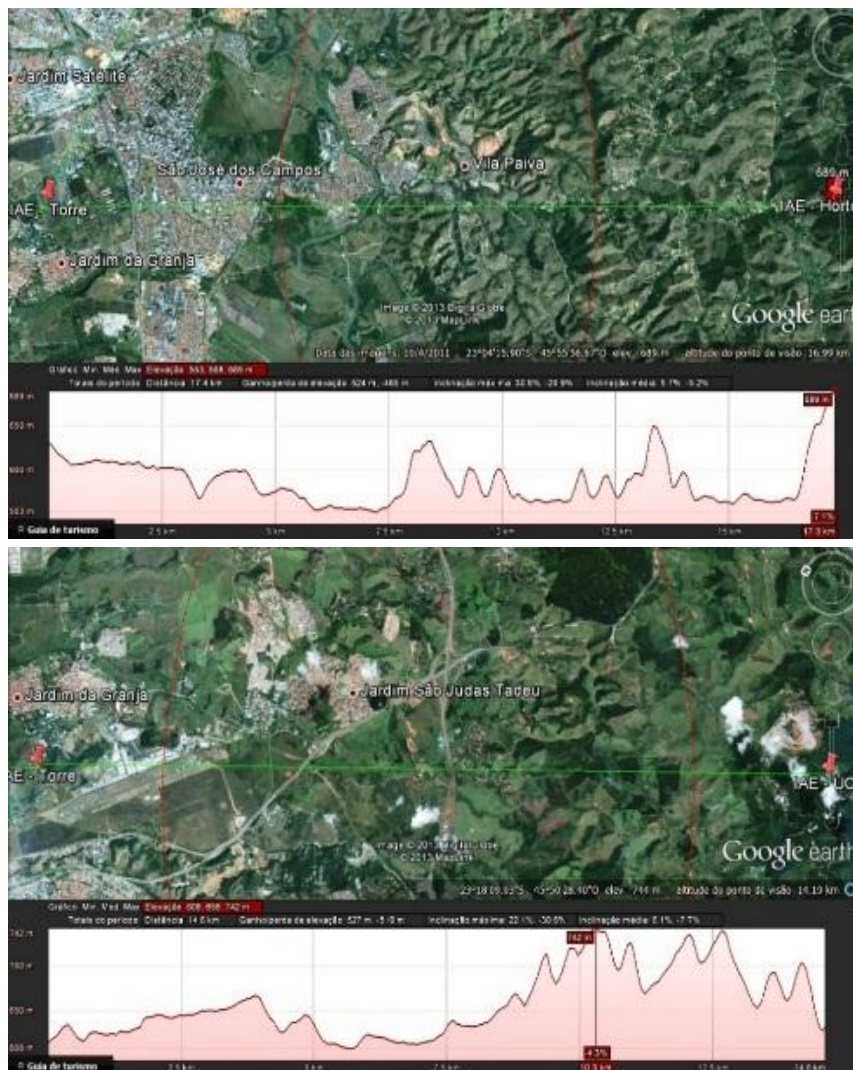
apresenta uma topografia diferente ao seu redor (terreno bastante acidentado, planície, vale), atenuando assim, a configuração das linhas de campo (Figura 5 e 6).

Figura 5 - Deformação das linhas de campo devido à topografia da região de instalação da rede de monitoramento.



Fonte: (Elaborada pelo autor, 2014)

Figura 6- Exemplos do perfil de elevação do terreno entre dois pontos de instalação de sensores da rede. A primeira imagem se refere ao perfil do terreno entre o sensor de referência e o sensor instalado no Horto. A segunda imagem se refere ao perfil entre o sensor de referência e o sensor instalado Usina Coronel Abner (UCA).



Fonte: (Google Earth, 2011)

Os procedimentos para correção da leitura das medidas de campo elétrico em função do local de instalação, sugeridos pelos fabricantes dos sensores, foram realizados, porém, na maior parte desses locais não foi possível atender plenamente as condições ideais para instalação do sensor de referência. Além disso, a correção sugerida pelos fabricantes não compensa as deformações das linhas de campo geradas pela topografia do local de instalação, pois ambos os sensores estão instalados próximos um do outro. A infraestrutura para instalação do sensor de referência em condições ideais ficou pronta no início de 2012, em plena estação chuvosa. Durante o período seco do ano (junho a setembro), conseguiu-se realizar medidas em 18 dias com condição de tempo bom, de maneira que os resultados a serem alcançados tenham significância estatística.

Com base nestas condições sugeridas pelo fabricante, será determinada a real necessidade, da aplicação de um fator de correção às medidas dos diversos sensores que compõe a rede de monitoramento, de maneira a compensar as distorções nas linhas de campo elétrico atmosférico que surgem em função da região de instalação de cada um, tendo como referência um único sensor instalado nas condições ideais indicadas pelos fabricantes: ao nível do solo, em local plano, distante de estruturas altas.

2. CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

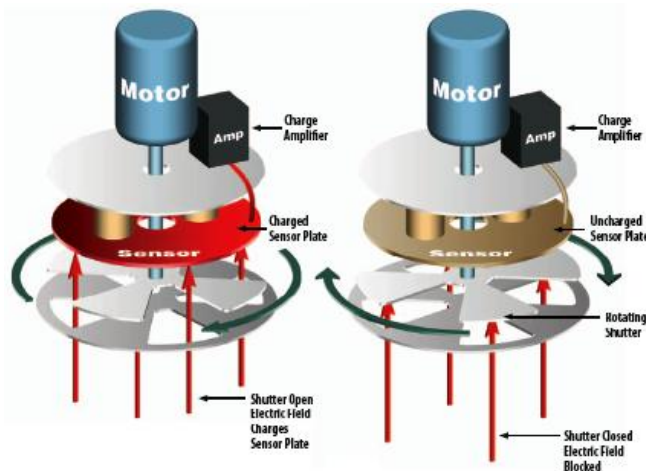
2.1. Sensores de Campo elétrico do tipo *Field Mill* (EFMS)

Sensores de campo elétrico do tipo *Field Mill* (*Electric Field Mill Sensor – EFMS*) são projetados para determinar a intensidade relativa do campo elétrico através da comparação do nível do campo elétrico em um conhecido objeto de referência estável e sem carga. Quando um sensor (inicialmente com sua placa dielétrica descarregada) é exposto a um campo elétrico, ele torna-se carregado. Assim, ao contrário de sistemas de detecção de raios, que respondem a transientes rápidos no campo eletromagnético gerado por um raio, EFMS detectam o campo eletrostático e mudanças relativamente lentas nesse campo. Eles detectam a presença de separação de carga e carga líquida diretamente acima e nas imediações do sensor.

Dependendo de onde a carga é localizada, o alcance de detecção eficaz de um EFMS pode variar até dezenas de quilômetros. O campo muda aproximadamente em uma fração de segundo devido ao rearranjo global da distribuição de carga nuvem de tempestade produzida por um relâmpago, e as mudanças de campo mais lentas são devidas a eletrificação de nuvens e rearranjo de carga espacial na atmosfera. Assim, como as condições estão constantemente em mudança, existe uma necessidade de medir constantemente a intensidade do campo elétrico, que se traduz em ler o estado carregado da placa do sensor alternadamente, descarregá-lo, e lê-lo novamente. Isto é realizado através da exposição repetida da placa do sensor ao campo elétrico externo para carregá-lo em seguida, protegendo a placa para permitir a descarga. O sensor é basicamente formado por três placas planas e paralelas. Duas das placas formam um capacitor plano. A terceira placa é do tipo obturadora e está conectada a um motor, que bloqueia ou permite o fluxo do campo elétrico atuante sobre o sensor.

Este processo de exposição(carga) e da blindagem(descarga) da placa do sensor do campo elétrico é realizado por meio de um disparador rotativo ligado à um rotor/estator motorizado. Conforme o giro do motor, o disparador abre para permitir que o campo elétrico externo carregue a placa do sensor, em seguida fecha para proteger a placa de sensor e permitir sua descarga, ou restauração, em preparação para o próximo estágio de medição (como mostrado na Figura 7). O disparador gira a uma velocidade de 1650 rotações por minuto, e abre-se e fecha-se quatro vezes por rotação, produzindo assim 6.600 amostras por minuto.

Figura 7 – Diagrama de operação de um EFMS



Fonte: (http://www.missioninstruments.com/pages/learning/about_fm2.html, 2011)

Medidores de campo elétrico são tipicamente calibrados de fábrica, utilizando um método de placas paralelas, onde um campo elétrico uniforme é desenvolvido através da aplicação de uma tensão conhecida entre placas condutoras paralelas. Cada EFMS é calibrado na fábrica em uma placa de fixação paralela com a abertura do instrumento montado voltado para cima. Um ajuste linear dos dados de calibração resulta numa equação de calibração expressa como:

$$E = f.V \quad (2)$$

Onde:

E : intensidade do campo elétrico;

V : potencial elétrico;

f : multiplicador em função das dimensões do eletrodo do EFMS e das características do circuito eletrônico do amplificador de carga.

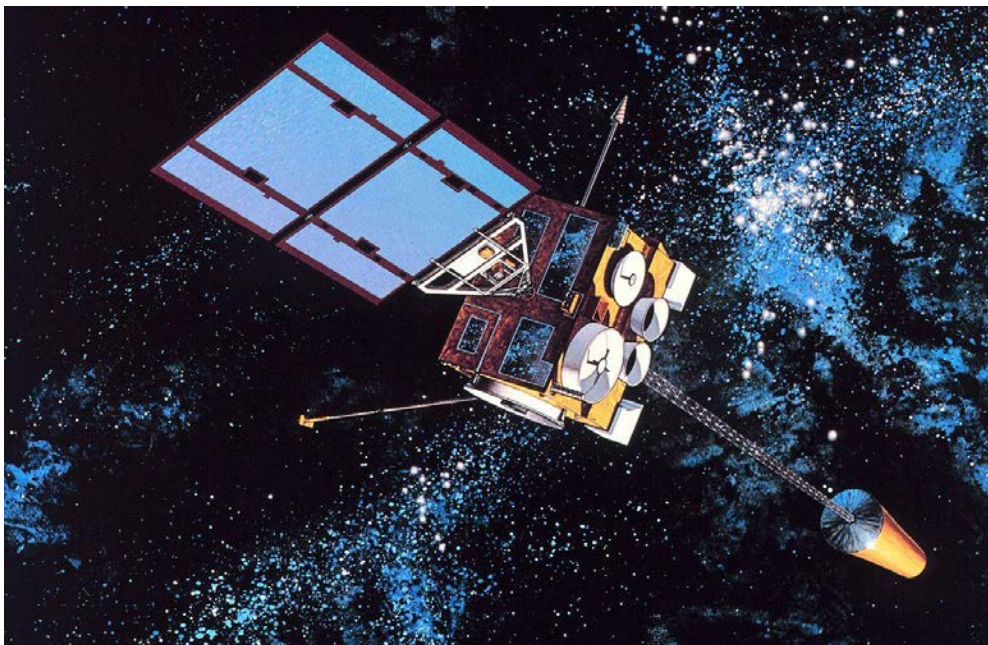
O fabricante do EFMS utilizado neste estudo estimou que a precisão de medição de f para o instrumento calibrado na placa do calibrador de campo elétrico paralelo é de $\pm 1\%$.

No entanto, quando monitorando o campo elétrico da Terra, a equação (2) só é válida se a abertura do instrumento é montada nivelada com a superfície da Terra e voltada para cima. Para medições permanentes ao ar livre, a orientação voltada para cima pode-se tornar problemático, pois, detritos e chuva, podem interferir em sua medição. Desta forma, uma configuração voltada para baixo é recomendada para aplicações a longo prazo.

2.2. Satélite Geoestacionário de Operações Ambientais (GOES)

GOES (sigla em inglês para Geostationary Operational Environmental Satellites) é a nomenclatura de um conjunto de satélites e instalações em terra operados em conjunto pela NOAA (Acrônimo para *National Oceanic & Atmospheric Administration* ou Administração Oceânica e Atmosférica Nacional). Fornecem o tipo de monitoramento contínuo necessário para análise de dados intensivos. Eles circulam a Terra em uma órbita geoestacionária, o que significa que orbitam o plano equatorial da Terra a uma velocidade angular correspondente a rotação da Terra. Isto permite-lhes a pairar continuamente sobre uma posição sobre a superfície. O plano geoestacionário é de cerca de 35.800 km acima da superfície Terra, alto o suficiente para permitir que os satélites tenham uma visão completa da Terra

Figura 8 - Concepção artística do GOES-8.



Fonte: (http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d0/GOES_8_Spac0255.jpg/300px-GOES_8_Spac0255.jpg, 2014)

Devido aos satélites GOES ficarem acima de um ponto fixo na superfície, eles fornecem uma vigília constante para os "gatilhos" atmosféricos para condições meteorológicas severas, como tornados, inundações repentinas, tempestades de granizo e furacões. Quando essas condições se desenvolvem, os satélites GOES são capazes de monitorar o desenvolvimento da tempestade e rastrear seus movimentos. Uma galeria de imagens do satélite também é usada

para estimar chuvas durante as tempestades e furacões, para avisos de enchentes relâmpago (termo utilizado para descrever uma inundação rápida de áreas geomórficas baixas), bem como estimativas de acumulações de nevasca e extensão total da cobertura de neve.

Esses dados ajudam meteorologistas a emitir avisos de tempestade de inverno e alertas de degelo em primaveras. Os sensores do satélite também detectam campos de gelo e mapeiam os movimentos do mar e do lago de gelo.

2.3. Radar meteorológico REDEMET

Radar meteorológico, também chamado de radar meteorológico de vigilância (tradução para *Weather Surveillance Radar - WSR*), é um tipo de radar usado para localizar a precipitação, calcular seu movimento, e estimar o tipo (chuva, neve, granizo, etc.). Radares modernos são principalmente radares de pulso Doppler, capazes de detectar o movimento das gotas de chuva, para além da intensidade da precipitação. Ambos os tipos de dados podem ser analisados para determinar a estrutura de tempestades e seu potencial para causar o mau tempo.

Para evitar alguns dos problemas em PPIs (*Plan Position Indicators*), ou indicadores de posição do plano, o indicador de posição constante plano de altitude CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*) foi desenvolvido por pesquisadores canadenses. É um corte transversal horizontal através de dados do radar. Dessa forma, pode-se comparar a precipitação em pé de igualdade em diferentes distâncias do radar e evitar ecos de terra. Embora os dados sejam retirados a uma certa altura acima do solo, uma relação pode ser inferida entre relatórios de estações terrestres e os dados do radar.

Neste estudo, foram utilizadas as informações do radar meteorológico da REDEMET (Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica) sobre um plano horizontal, a 5.500 m de altitude. Nesta altitude se houverem centros de cargas negativas que estão associados a granizo e outras partículas de gelo, serão facilmente identificados pelo radar meteorológico.

3. DADOS E METODOLOGIA

No Capítulo 1, é evidenciado a necessidade de um estudo para determinar, com base nas medidas dos sensores da rede de monitoramento, a necessidade da aplicação de fatores para a correção da deformação do campo elétrico gerada pela diferença de topografia do local de instalação de cada um deles.

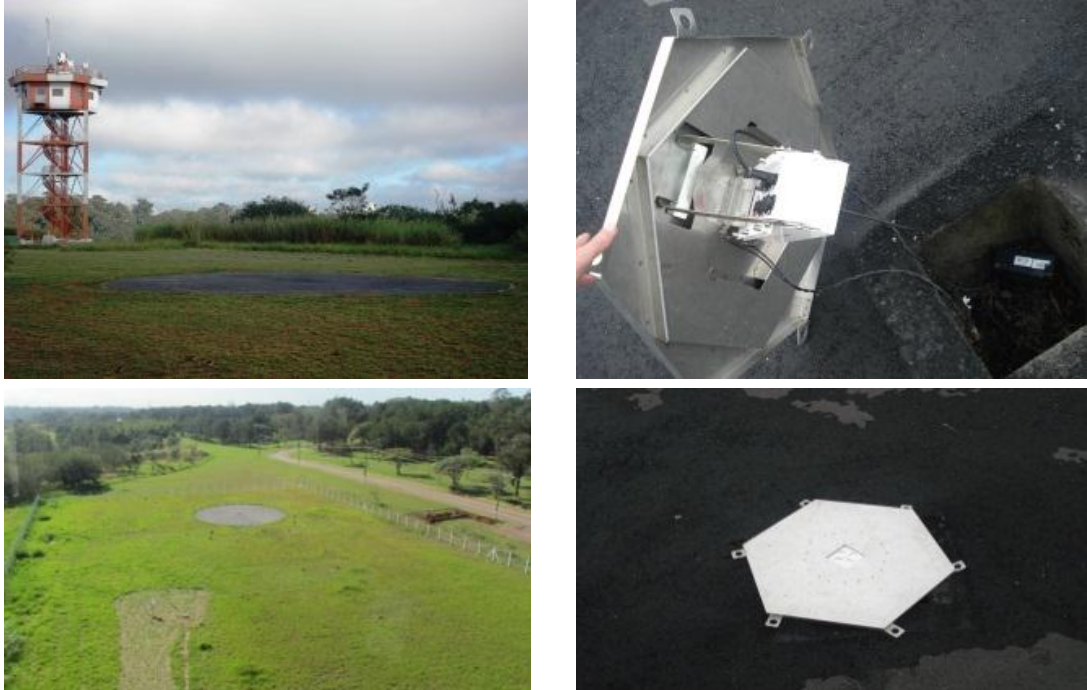
3.1. Sensor de referência

O sensor utilizado como referência para verificação de toda a rede está instalado numa área plana, próximo à torre de observação de fenômenos atmosféricos da divisão de ciências atmosféricas do IAE, distante mais de três vezes a altura desta. Ou seja, não há estruturas com altura superior à da rampa, com ângulo de 18° , com origem no ponto de instalação do sensor, conforme sugere o fabricante do equipamento.

3.1.1. Local de instalação “ideal”

A infraestrutura necessária para a instalação do sensor de referência em condições “ideais” exigiu que, além do atendimento às características mencionadas anteriormente também fossem eliminadas, num raio de 9 metros ao redor do ponto de instalação do sensor de referência, estruturas pontiagudas (grama e outros tipos de vegetação de pequeno porte) que favorecem a ocorrência de descargas corona, geradoras de uma camada de carga espacial próxima ao solo que afeta a medida do sensor de referência. Em função disso, foi necessário remover a camada vegetal ao redor do ponto de instalação do sensor de referência e recobrir o solo com material que, ao mesmo tempo, impeça que a vegetação ressurgja e facilite os trabalhos de instalação e remoção do sensor (Figura 9).

Figura 9 - Sensor de referência instalado na área de ensaio de antenas, ao lado da Torre de Observação de Fenômenos Atmosféricos da ACA/IAE.



Fonte: (Repositório Digital da ACA/IAE,2012)

Essas providências garantem um valor confiável de referência para o campo elétrico atmosférico a partir de um sensor instalado em condições “ideais”, cuja medida não estará sendo influenciada pelas condições de instalação do mesmo.

3.1.2. Distância em relação aos outros sensores

Considerando que existem sensores da rede de monitoramento que distam entre si mais de 40 km, certamente haverá situações em que os valores de campo elétrico no local de instalação do sensor de referência, serão muito diferentes dos de outro sensor da rede de monitoramento, devido à presença, por exemplo, de uma nuvem carregada eletricamente próxima a um desses sensores e distante do outro. Neste caso, as medidas dos sensores não podem ser comparadas e deverão ser descartadas.

3.2. Critérios para validar a comparação das medidas dos sensores

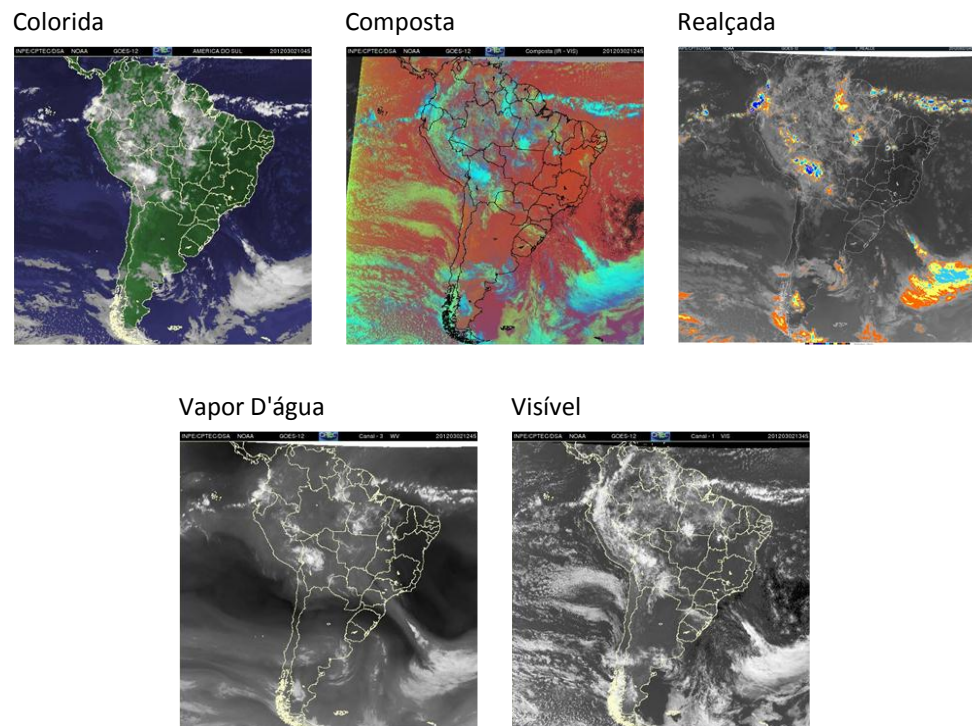
De maneira a contornar o problema da presença de nuvens eletricamente carregadas próximas a um ou mais sensores e distantes do sensor de referência, foram analisadas apenas as medidas realizadas em dias com céu limpo, sem a presença desse tipo de nuvem. Os dias sem a presença de nuvens eletricamente carregadas foram identificados através da análise de imagens de satélite e de radar meteorológico e são designados dias de campo elétrico de “tempo bom”.

Foram utilizados dados do banco de imagens da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DAS) do INPE, especificamente dos satélites bem como os dados disponibilizados pela Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET).

3.2.1. Classificação dos dias utilizando imagens de satélite

Cada data de medida foi analisada de acordo com os critérios a seguir explicados. Inicialmente foram separadas as imagens dos tipos: colorida, composta, realçada, vapor d’água e visível do satélite GOES contendo a região de interesse. Foram selecionadas as imagens referentes ao horário de início e fim de cada período de medida e, também, as imagens referentes à 2 h antes, 2 h depois do início e 2 h antes 2 h depois do término das medidas.

Figura 10 - Imagens Satélite GOES



Fonte: (Banco de dados INPE – Satélite GOES,2012)

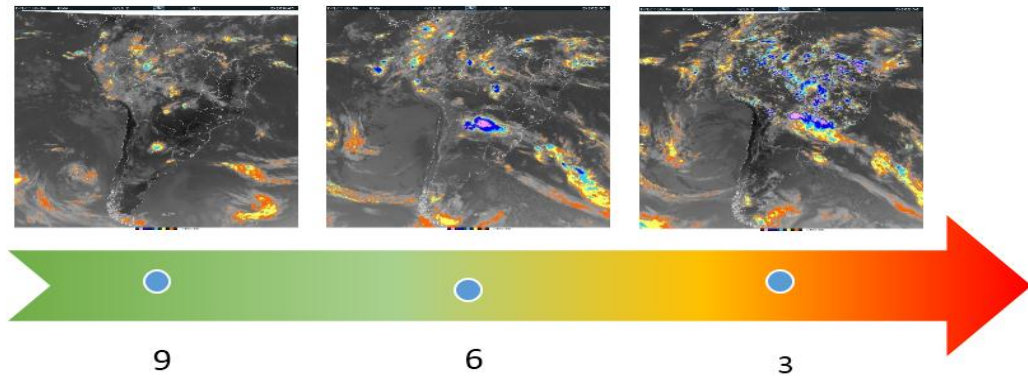
As imagens do satélite mostradas na Figura 10 são arquivos de imagem obtidos por sensoriamento remoto. As imagens do tipo visível representam a quantidade de luz solar que é refletida para o espaço pelas nuvens ou pela superfície da Terra. As nuvens e a neve aparecem em branco e as zonas sem nuvens em preto. As nuvens espessas têm uma maior refletividade e aparecem mais brilhantes que as nuvens finas. Contudo, é difícil distinguir as nuvens baixas das nuvens altas. Para isso, é melhor utilizar as imagens do infravermelho do tipo Realçada. Não se pode utilizar as imagens do visível quando não houver luz solar (de noite).

As imagens do tipo realçada infravermelho representam a radiação infravermelha emitida pelas nuvens ou pela superfície terrestre. São efetivamente medições de temperatura. Numa imagem do infravermelho, objetos mais quentes aparecem mais escuros que objetos mais frios. Áreas sem nuvens são tipicamente escuras, mas também nuvens muito baixas e nevoeiro podem aparecer escuros. A maior parte das outras nuvens é brilhante. Nuvens de altos níveis são mais brilhantes que nuvens de níveis baixos.

As imagens do vapor de água representam a quantidade de vapor de água na média e alta atmosfera. São, pois, úteis para determinar as zonas secas e as zonas úmidas. As zonas escuras correspondem a zonas secas e as claras a zonas úmidas. Cada imagem foi analisada

individualmente e classificada em uma escala de 0 a 10, onde 0 é a pior condição climática e 10 a melhor situação para definição de um determinado dia com sendo de “tempo bom” (Figura11).

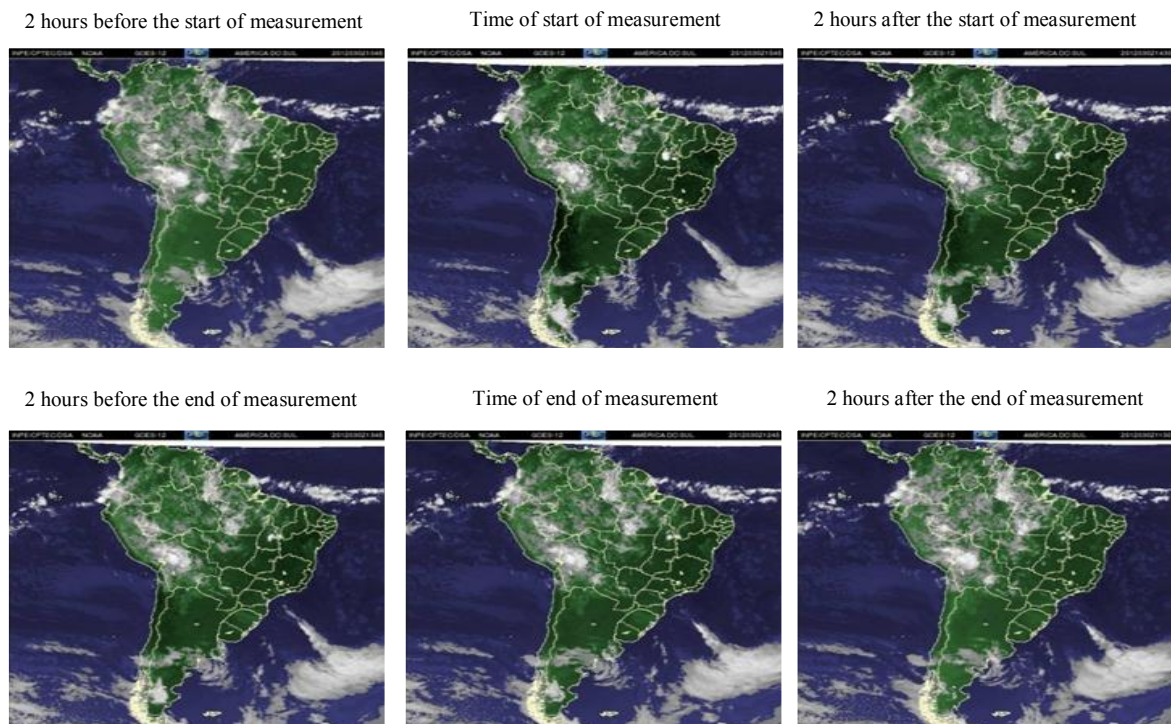
Figura 11 - Exemplo de classificação das imagens do satélite GOES do tipo realçada



Fonte: (Banco de dados INPE – Satélite GOES,2012)

Tomando como exemplo o dia 02 de março de 2012, a imagem do tipo colorida (Figura 12) foi classificada como dia de tempo bom, ou seja, os dados coletados naquele dia poderão ser utilizados na análise.

Figura 12 - Imagens Coloridas do satélite GOES para o dia 02 de março de 2012



Fonte: (Banco de dados INPE – Satélite GOES,2012)

Conforme pôde ser observado, nesta data, em todos os horários analisados, praticamente não havia nuvens sobre a região de interesse, o que levou a maior pontuação da escala de acordo com o critério estabelecido. A mesma análise foi feita para cada tipo de imagem e o resultado para cada data foi resumido na Tabela 1.

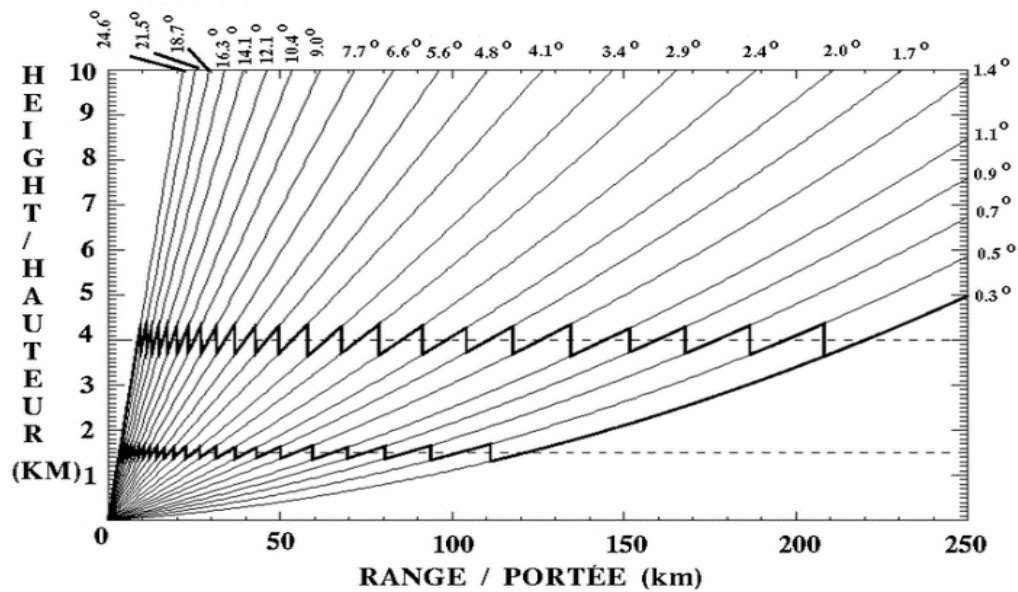
Tabela 1- Resumo da análise das imagens do satélite GOES para o dia 02/03/2012

2 de março de 2012						
	2 h-	Início da medida	2 h+	2 h-	Final da medida	2 h+
Colorida	10	10	10	10	10	8
Composta	10	10	10	10	10	8
Realçada	10	10	10	10	10	10
Vapor D'água	10	10	10	10	10	10
Visível	10	10	10	10	10	8

3.2.2. Classificação dos dias utilizando dados de radar meteorológico

Uma classificação similar à utilizada quando da análise das imagens do satélite GOES, foi feita coletando as informações de um radar meteorológico da REDEMET, obtidas a partir da base de dados disponível online. Em função dos locais de instalação dos sensores da rede, foram utilizadas as informações do radar meteorológico instalado na cidade de São Roque, interior de São Paulo, distante 52 km da capital e aproximadamente 154 km do sensor mais distante da rede (Caçapava). Dentre os dados disponíveis, foram selecionados os referentes ao CAPPI 5500M. Esse CAPPI fornece as informações referentes ao plano horizontal situado a 5.500 m de altitude, os ângulos disponíveis no radar atmosférico estão evidenciados na Figura 13.

Figura 13 - Ângulos disponíveis no radar atmosférico



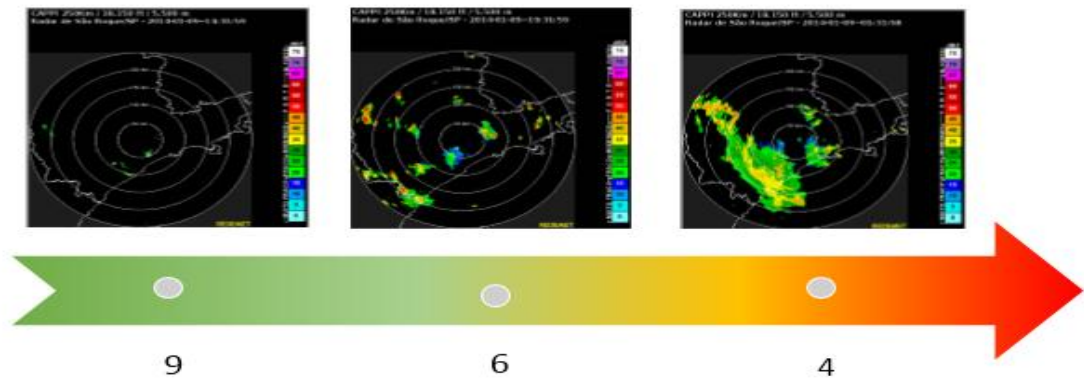
Fonte: (http://en.wikipedia.org/wiki/Constant_altitude_plan_position_indicator,2012)

Para a mesma data utilizada como exemplo no caso das imagens de satélite, foram selecionadas 6 imagens para cada medida (Figura 15), referentes ao horário de início e fim de cada período de medida e, também, as imagens referentes à 2 h antes e 2 h depois do início e 2 h antes e 2 h depois do término das medidas. Cada imagem foi classificada visualmente de acordo com a condição da região de interesse em uma escala numérica de 0 a 10, onde zero é a pior condição e 10 a melhor situação para definição de um determinado dia com sendo de “tempo bom”.

As imagens da Figura 14 mostram um exemplo de classificação das condições de Tempo bom de acordo com a presença de nuvens na região de interesse.

A primeira imagem apresenta poucas e pequenas nuvens na região do radar, desta forma, adotou-se uma classificação 9. Nas seguintes, foram adotadas classificações 6 e 4 respectivamente por apresentarem áreas de cobertura de nuvens progressivamente maiores.

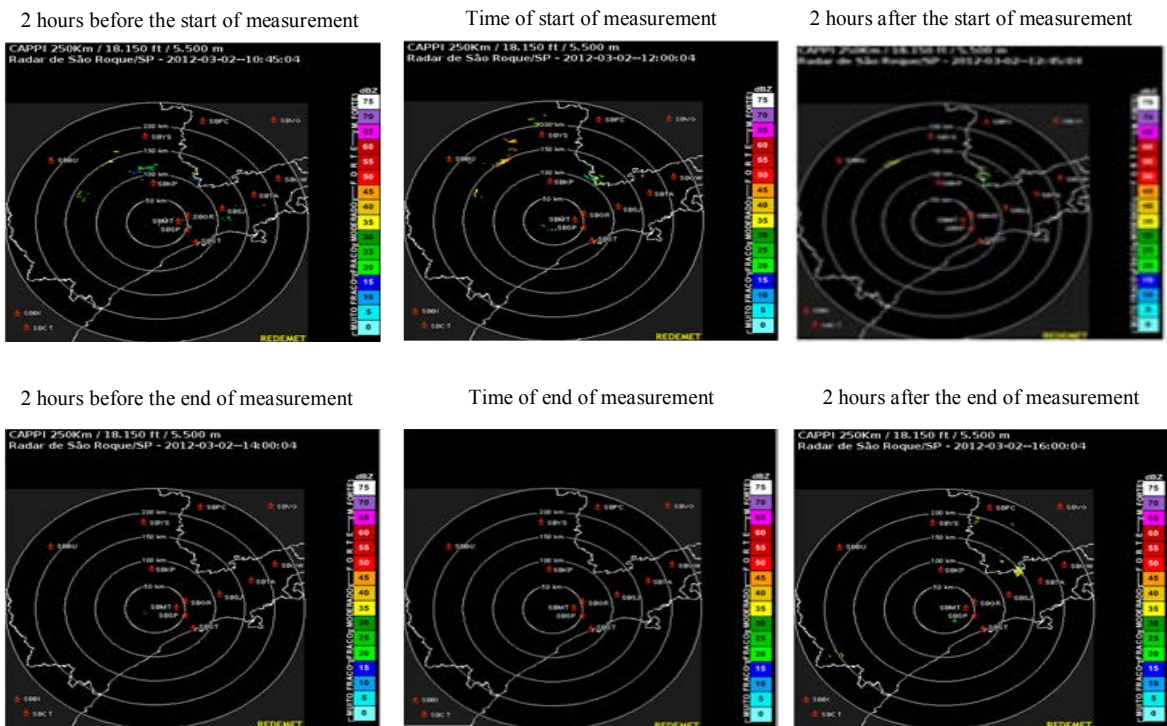
Figura 14 - Exemplo de classificação da condição de Tempo bom de acordo com a presença de nuvens na região.



Fonte: (Banco de dados RADARMET,2012)

Todos os dias de interesse foram classificados seguindo o mesmo critério.

Figura 15 - Imagens de radar da REDEMET (CAPPI 5500M) do dia 02 de março de 2012.



Fonte: (Banco de dados RADARMET,2012)

O resultado da análise feita, para cada data, foi resumido na Tabela.

Tabela 2- Resumo da análise das imagens de radar para o dia 02/03/2012

2 de março de 2012						
	2 h-	Início da medida	2 h+	2 h-	Final da medida	2 h+
São Roque (CAPPI 5500m)	9	10	10	0	10	0

Para algumas datas não foram encontradas algumas imagens na base de dados. Esses casos foram excluídos das análises. Porém, mesmo com essas exclusões, foram validados 18 dias de dados como coletados em situação de tempo bom.

3.3. Determinação do fator de correção das medidas dos sensores

3.3.1. Ajuste de reta por regressão linear

Uma vez identificados os dias de campo elétrico de tempo bom, foram calculadas as médias para cada sensor, dos valores de campo medidos a cada minuto. Os gráficos da distribuição das médias calculadas para cada sensor em função das médias calculadas para o sensor de referência são mostrados na Figura 16.

Determinou-se, então, a equação da reta que melhor se ajusta à distribuição obtida. O coeficiente angular da reta define o fator de correção a ser aplicado para que as leituras dos sensores sejam as mais próximas possíveis. O ponto que intercepta o eixo das ordenadas define o valor (em módulo) acima do campo elétrico atmosférico (“*Offset*”) em relação ao sensor de referência. Porém, conforme pode ser observado nos gráficos a seguir, os coeficientes de correlação das retas de ajuste são muito baixos.

Foram confrontados os valores de cada sensor que compõe a rede com o sensor de referência, resumidos em gráficos de distribuição das médias de cada sensor (eixo das abscissas) em função das medidas do sensor de referência (eixo das ordenadas). É mostrado, também, a reta que melhor se ajusta a essa distribuição, sua equação característica e o coeficiente de correlação. Para todos foram feitos um ajuste linear de reta, a fim de se obter um valor médio do fator de correção.

Esperava-se que o fator de correção apresentasse um padrão uniforme, porém após a análise de dados, pode-se observar que os valores do coeficiente angular variam muito (de 0,06 até 0,55), como apresentados abaixo em Figura 16, Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22.

Foram realizadas as medidas dos sensores e observou-se uma variação muito grande dos valores de campo elétrico de um sítio para o outro, em pontos extremos, foram coletadas medidas com variações de aproximadamente +30 V/m até -65 V/m em Igaratá e +50 V/m até -450 V/m em Jacareí. Esta dispersão inviabilizou a análise por regressão linear.

Figura 16 - Dados sensor de referência vs. sensor Igaratá. Equação da reta: $y=0,30x - 20,85$

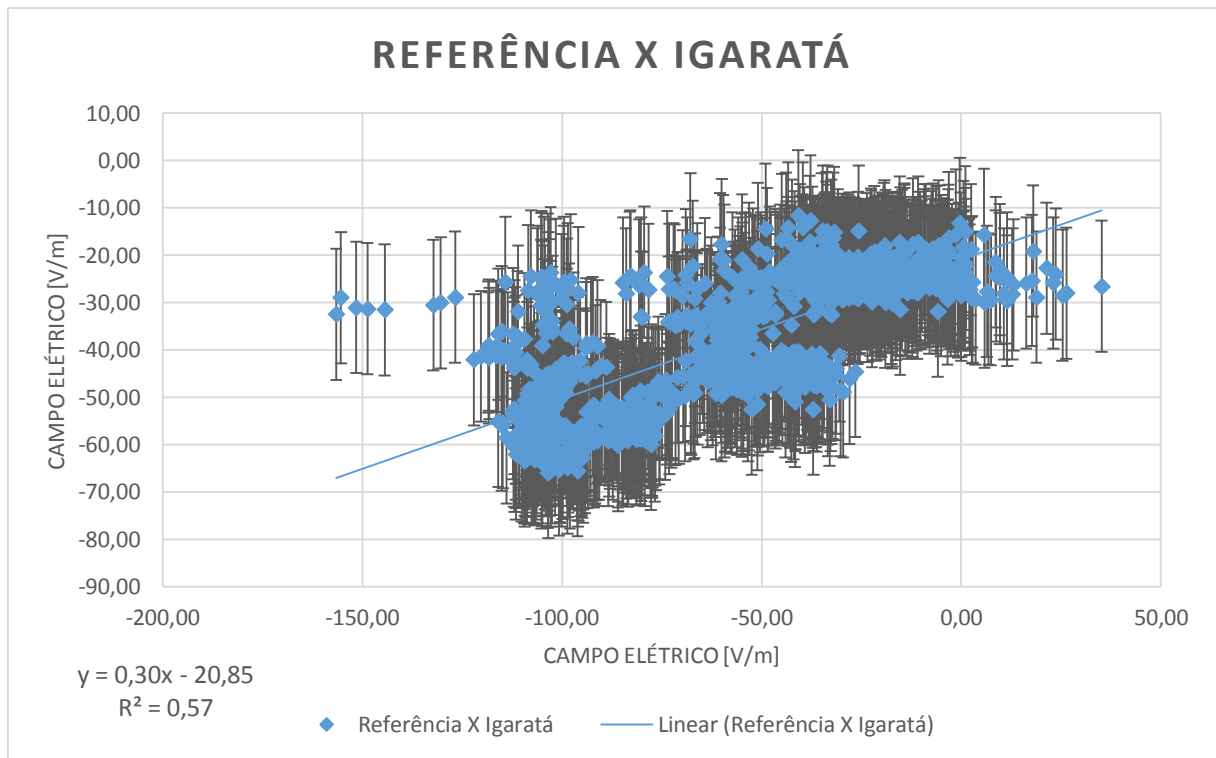


Figura 17 - Dados sensor de referência vs. sensor Jacareí. Equação da reta: $y=0,06x - 195,89$

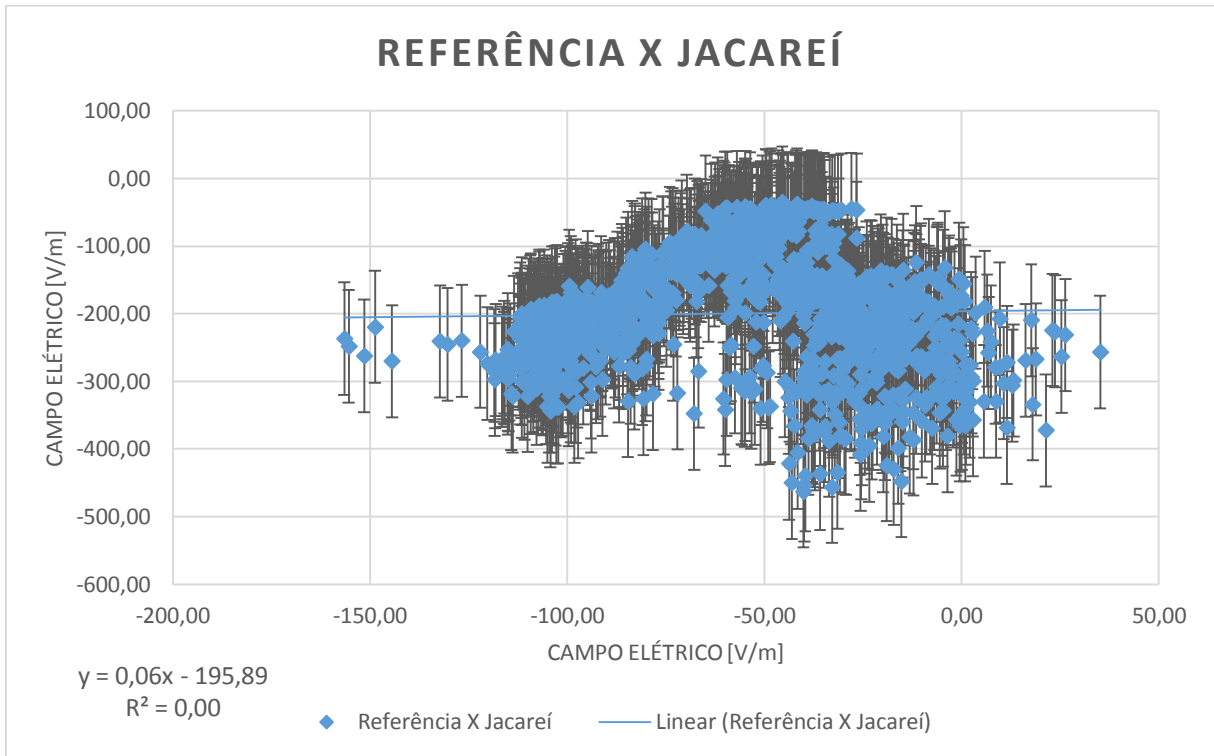


Figura 18 - Dados sensor de referência vs. sensor UCA. Equação da reta: $y=0,12x - 26,45$

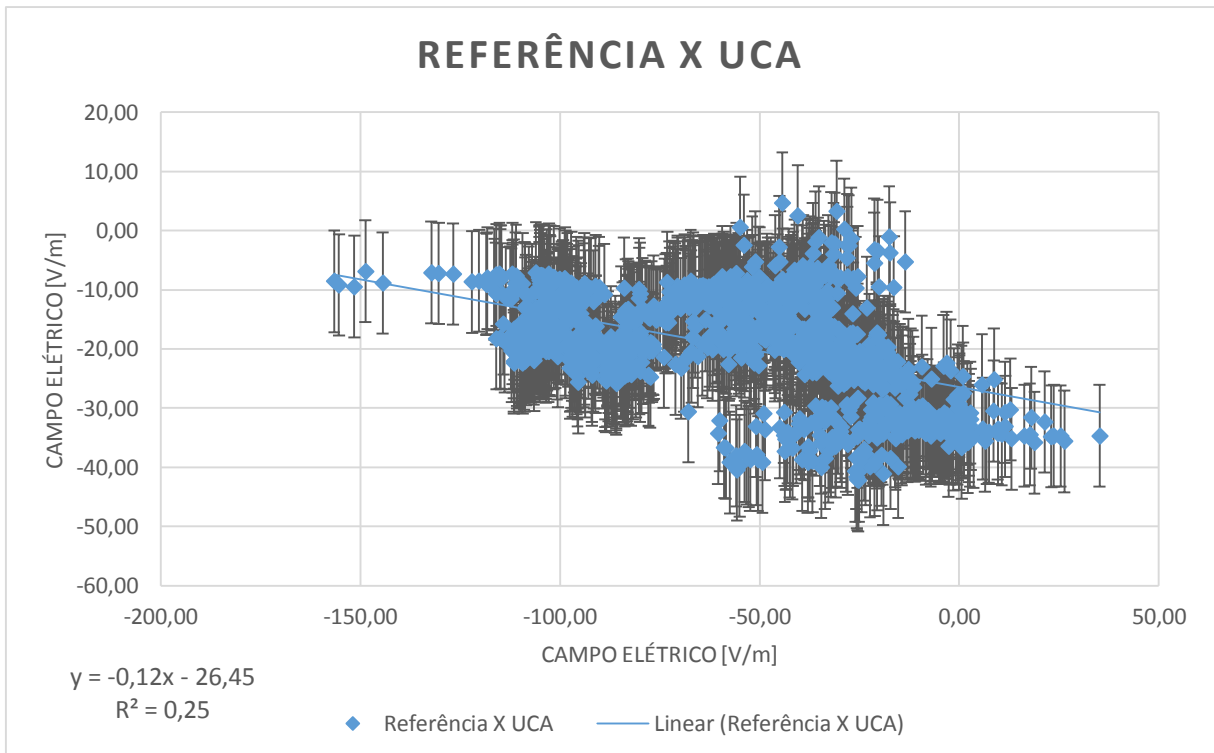


Figura 19 - Dados sensor de referência vs. sensor Santa Isabel. Equação da reta: $y=0,12x - 154,98$

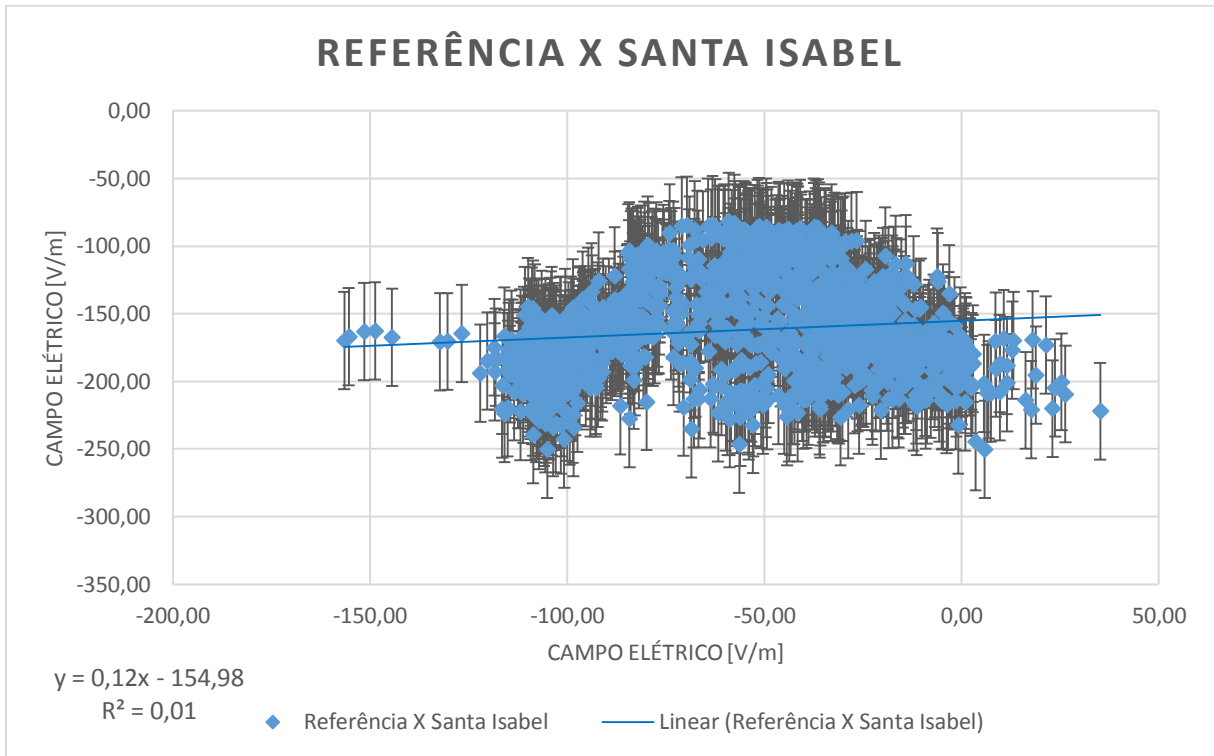


Figura 20 - Dados sensor de referência vs. sensor Torre. Equação da reta: $y=0,29x - 26,54$

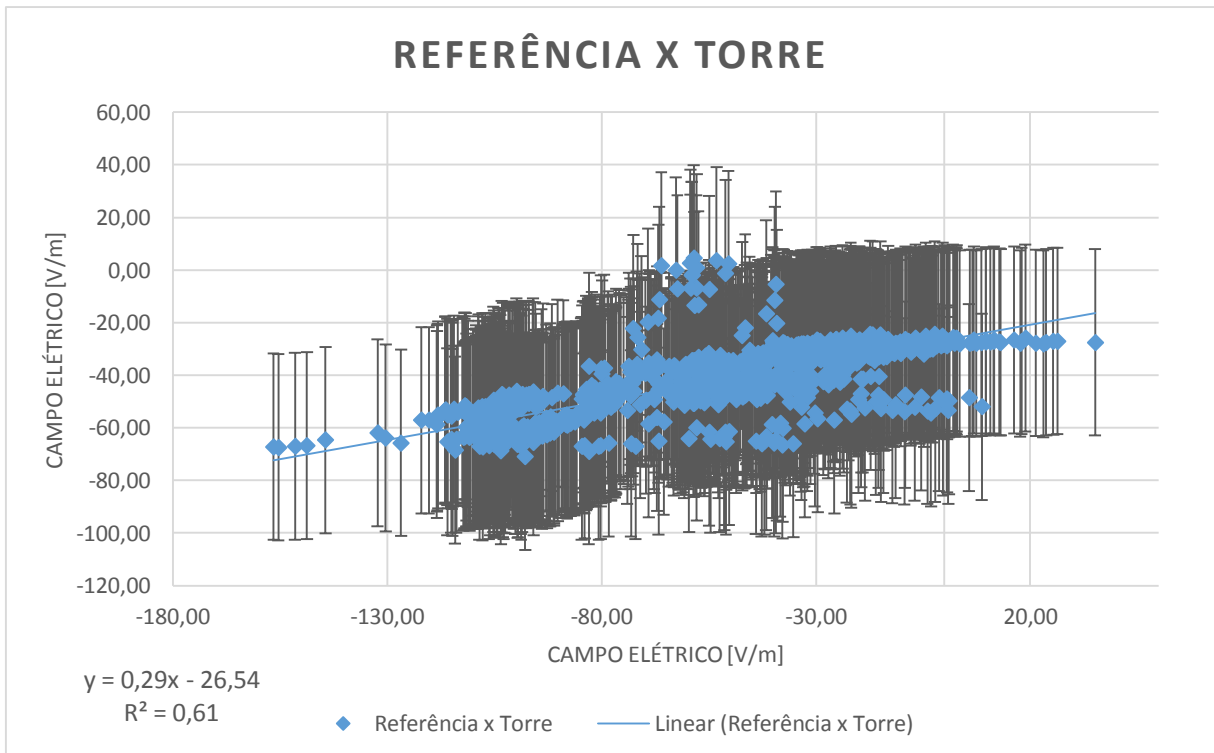
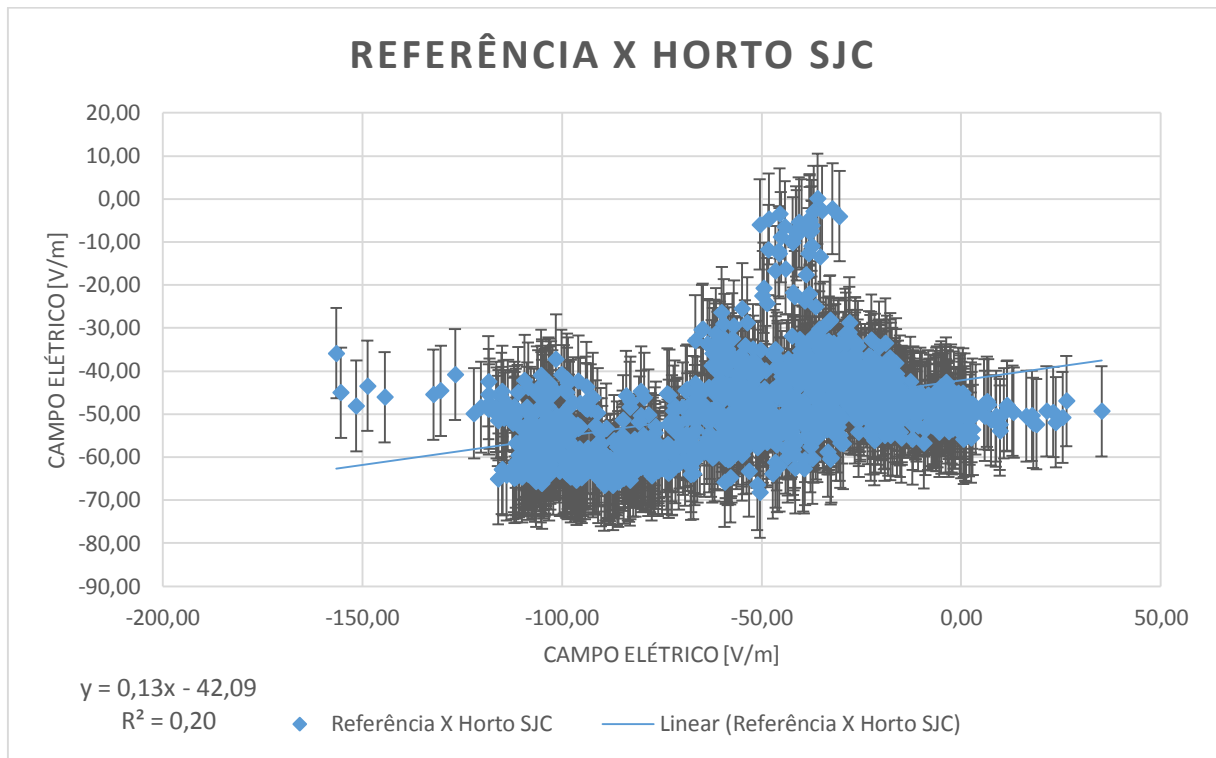
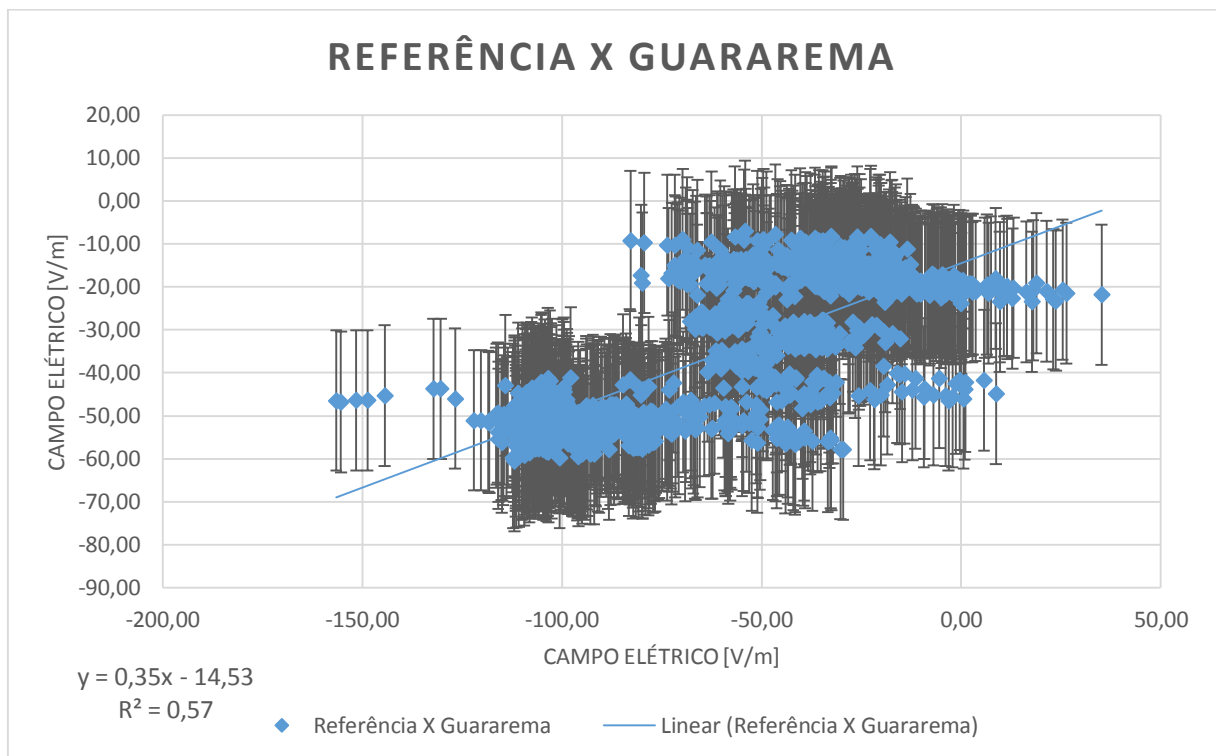


Figura 21 - Dados sensor de referência vs. sensor Horto de São José dos Campos. Equação da reta: $y=0,13x - 42,09$ Figura 22 - Dados sensor de referência vs. sensor Guararema. Equação da reta: $y=0,35x - 14,53$ 

3.3.2. Ajuste do campo em função da distribuição no tempo

Os dados da análise por regressão linear se mostraram inconclusivos, possivelmente indicado pela estreita faixa de variação das medidas de campo, tanto para o sensor de referência como para os demais sensores.

Uma vez que o campo elétrico de tempo bom tem seu valor limitado de acordo com a oscilação diária definida pela curva de Carnegie, entre -300 V/m e $+300$ V/m. Uma faixa estreita provoca uma maior dispersão dos pontos da distribuição, conforme observado nos gráficos das Figura 16 à Figura 22.

Uma outra abordagem para a análise dos dados foi feita comparando-se os gráficos da distribuição das médias das medidas dos sensores e da referência em função do tempo, também buscando uma possível relação. De maneira a não correr o risco do sensor de referência ficar submerso, em caso de chuva, devido ao fato do mesmo ficar instalado em uma caixa de passagem abaixo do nível do solo (ver Figura 9), as medidas foram realizadas dentro do horário expediente do IAE, das 12 h 00 min UTC (09 h 00 min LT) às 20 h 00 min UTC (17 h 00 min LT).

Figura 23 - Gráficos da distribuição das médias das medidas dos sensores e da referência em função do tempo (Guararema versus Referência)

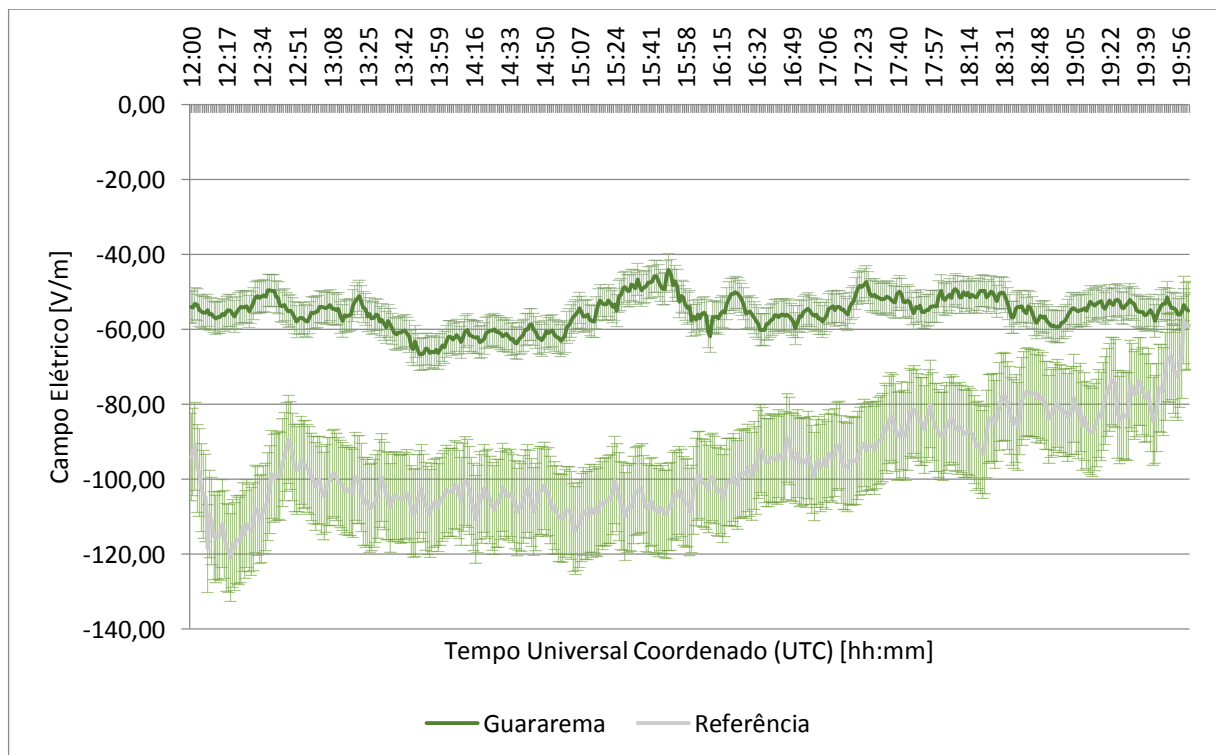


Figura 24 - Gráficos da distribuição das médias das medidas dos sensores e da referência em função do tempo (Jacareí versus Referência)

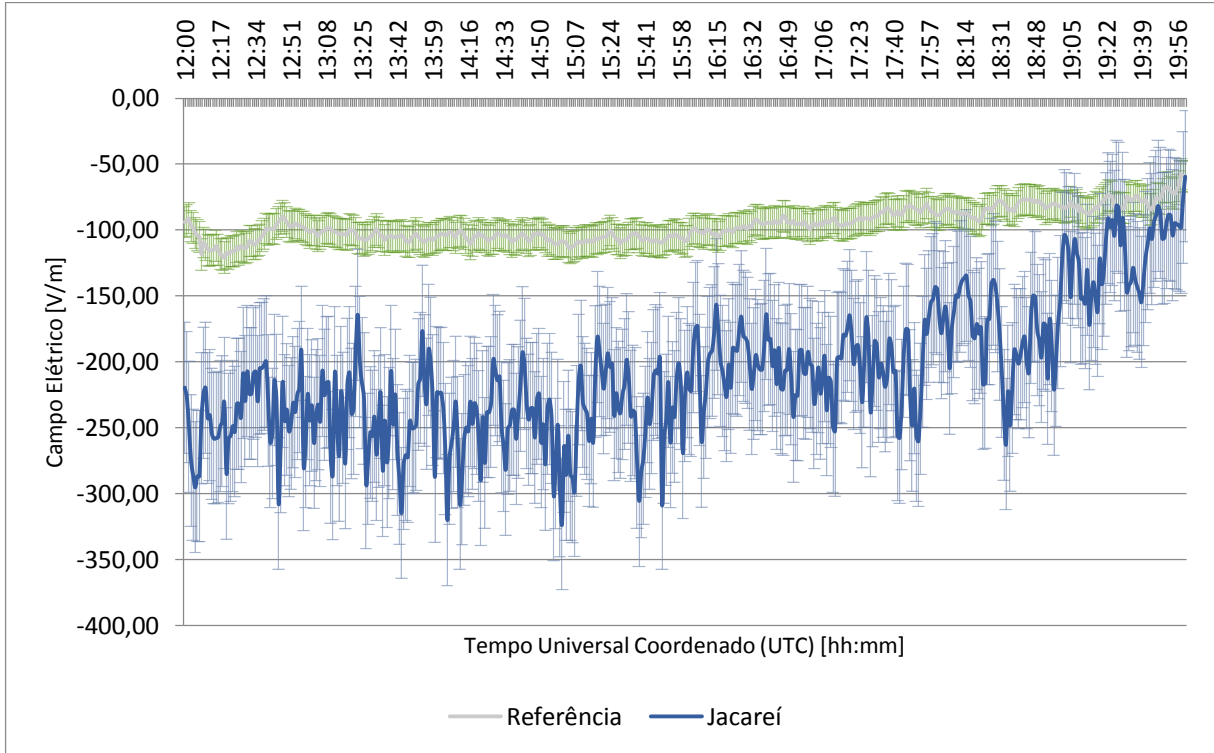


Figura 25 - Gráficos da distribuição das médias das medidas dos sensores e da referência em função do tempo (Horto versus Referência)

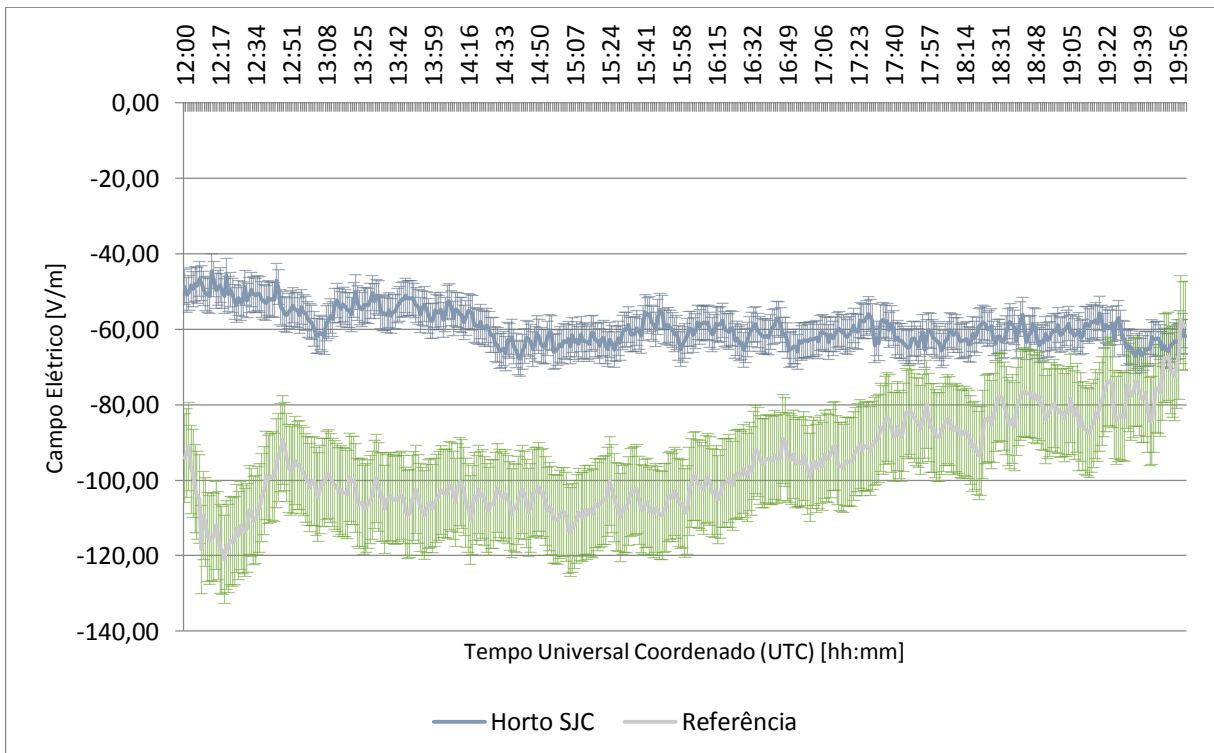


Figura 26 - Gráficos da distribuição das médias das medidas dos sensores e da referência em função do tempo (Torre versus Referência)

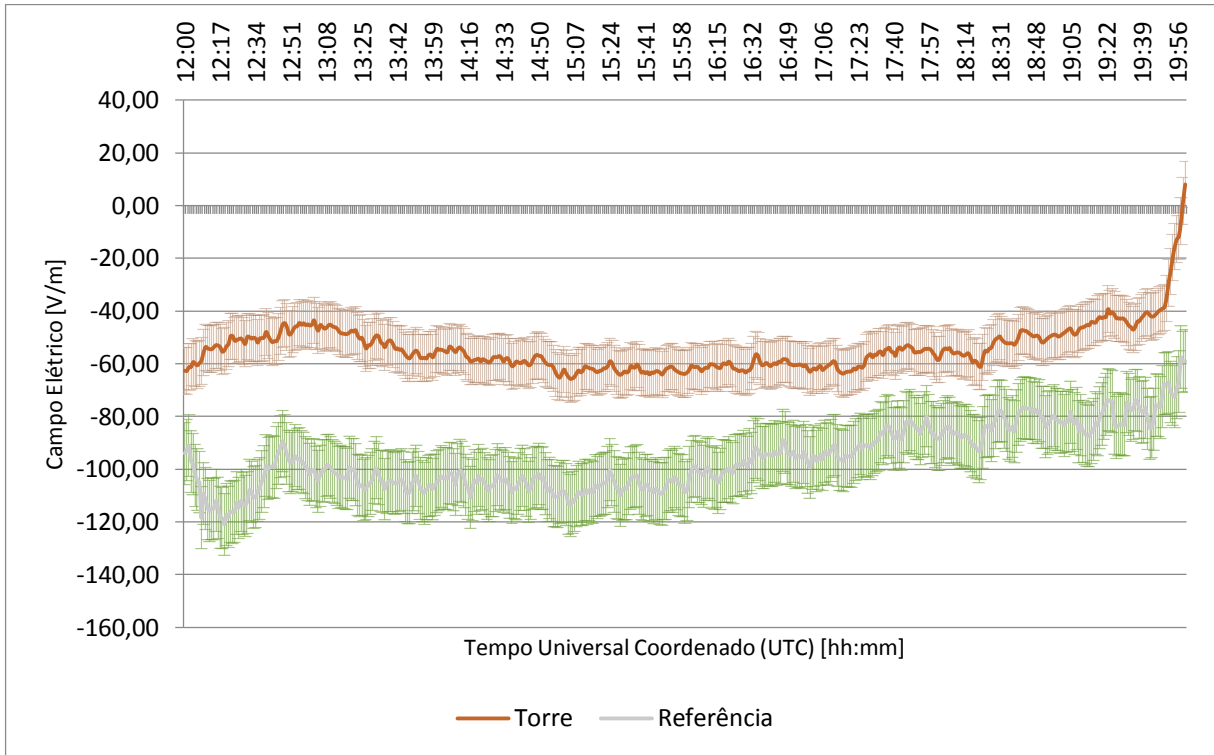


Figura 27 - Gráficos da distribuição das médias das medidas dos sensores e da referência em função do tempo (Igaratá versus Referência)

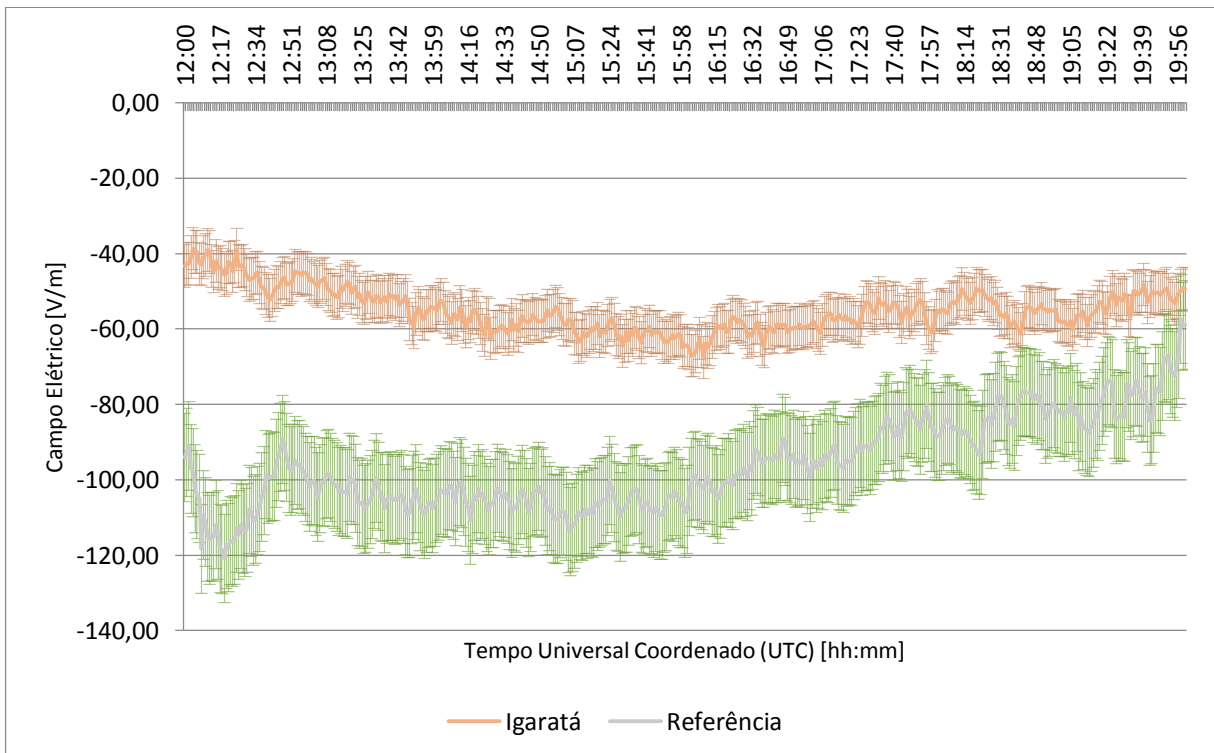


Figura 28 - Gráficos da distribuição das médias das medidas dos sensores e da referência em função do tempo (UCA versus Referência)

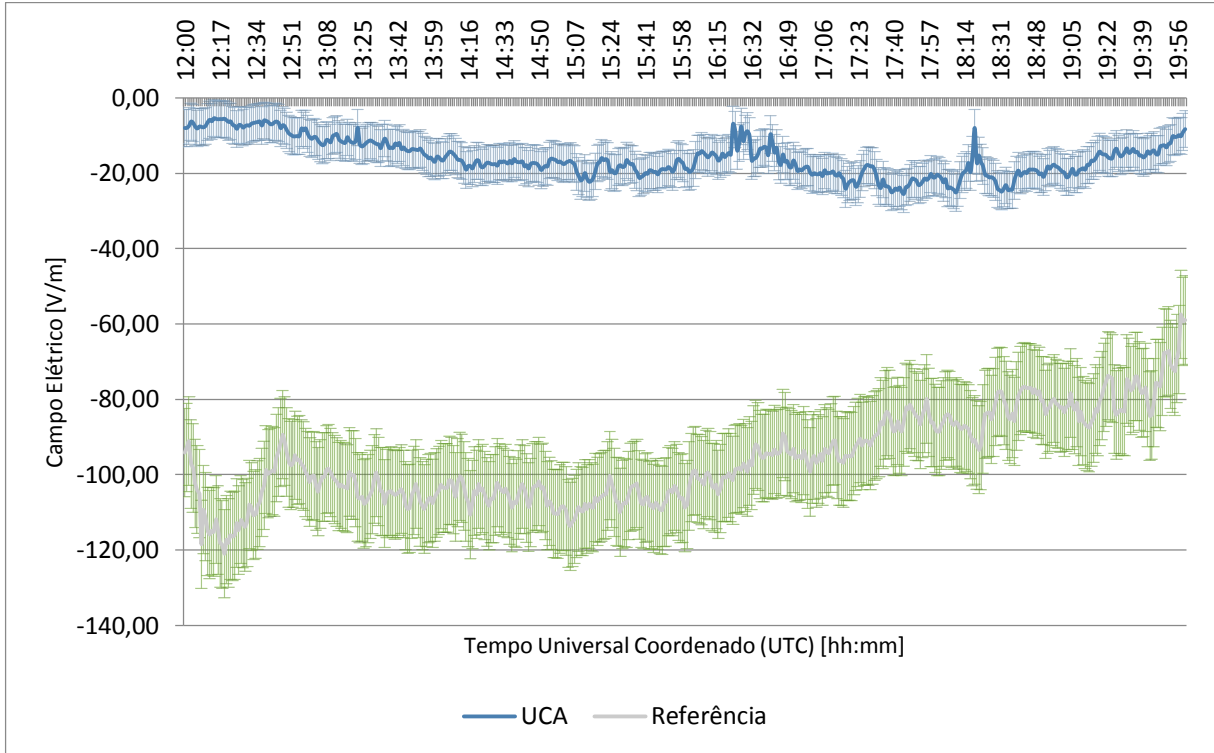


Figura 29 - Gráficos da distribuição das médias das medidas dos sensores e da referência em função do tempo (Sta. Isabel versus Referência)

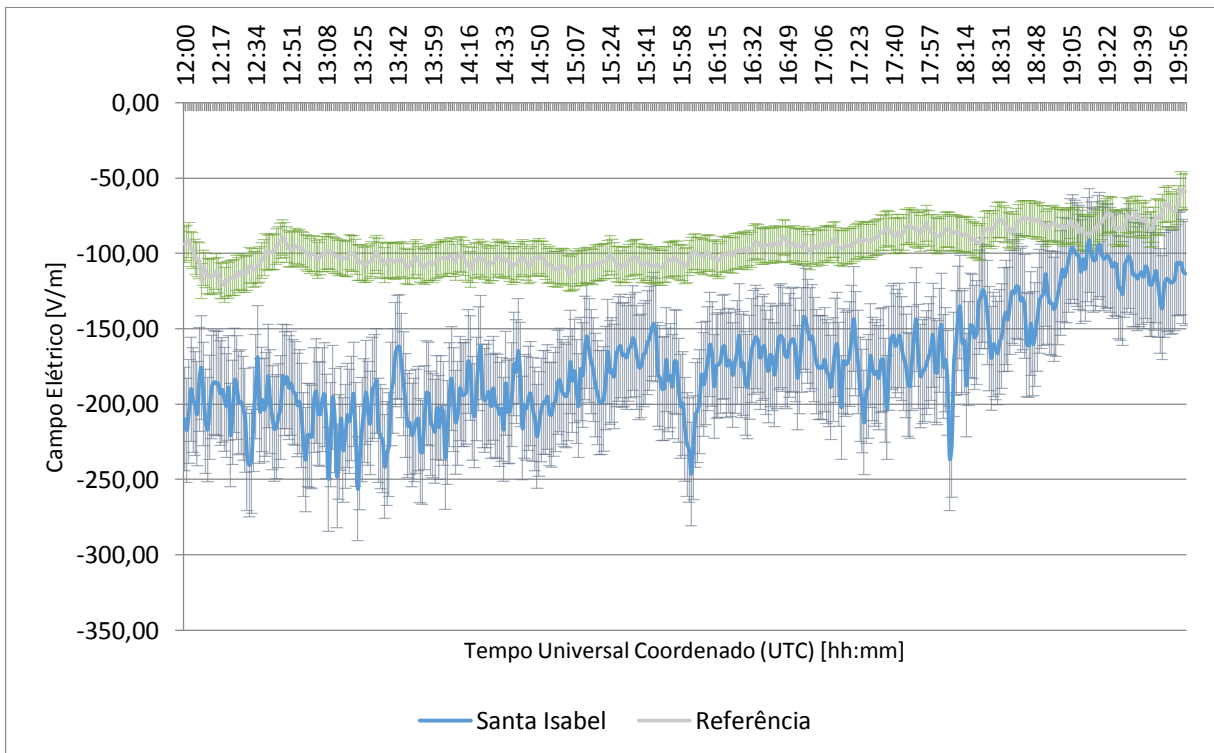
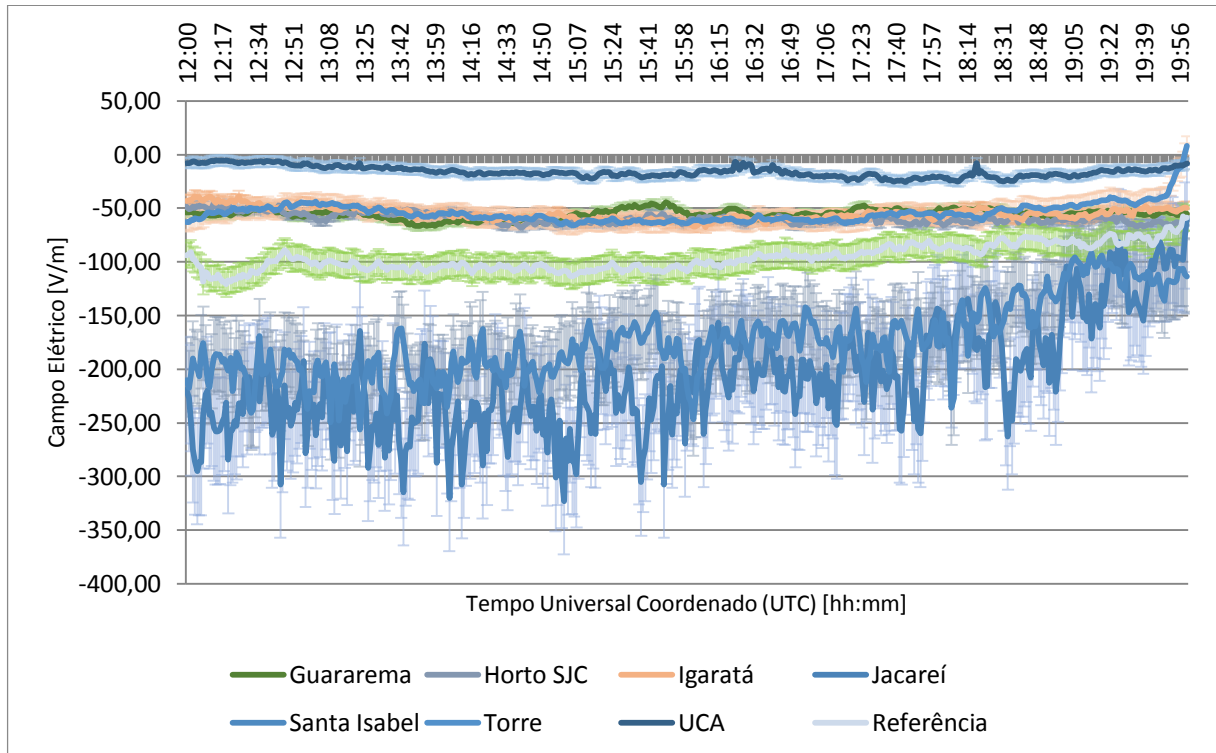


Figura 30 - Gráficos da distribuição das médias das medidas dos sensores e da referência em função do tempo



É possível observar a diferença existente entre as medidas de cada sensor em relação à referência. Porém, não é possível afirmar que essa diferença esteja relacionada com a diferença de altitude do local de instalação de cada sensor, pois os desvios padrões se superpõem, indicando que outros fatores podem estar influenciando as medidas.

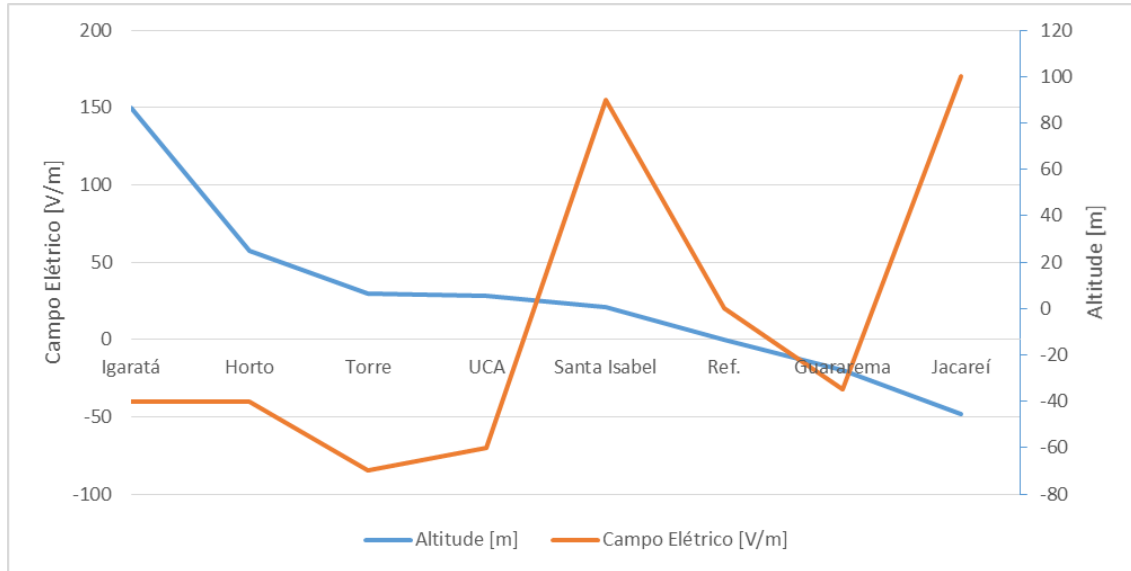
A partir dos gráficos mostrados nas Figuras 23 a 30, a diferença foi estimada, para mais ou para menos, entre o valor do campo elétrico atmosférico de cada sensor em relação à referência (“*offset*”). Esses valores estão mostrados na Tabela 3, a seguir, na linha “Diferença de Campo Elétrico [V/m]”. Na mesma Tabela é mostrada a diferença de altitude entre os locais de instalação de cada sensor em relação ao local de instalação do sensor de referência na linha “Diferença de Altitude [m]”.

Tabela 3- Relação entre a diferença de altitude e a diferença da média da medida de campo

Diferença \ Sensor	Sensor								
	Igaratá	Horto	Torre	UCA	Santa Isabel	Ref.	Guararema	Jacareí	
Altitude [m]	150	57	30	28	21	0	-20	-48	
Campo Elétrico [V/m]	-40	-40	-70	-60	90	0	-35	100	

Os dados da tabela acima estão resumidos e apresentados em forma de gráfico na Figura 31.

Figura 31 - Relação entre a diferença de altitude e a diferença da média da medida de campo



Da Tabela 3 e Figuras 23 à Figura 30 apresentadas o que se observa é que a diferença para mais ou para menos nas medidas dos sensores em relação ao sensor de referência parece não guardar relação com a altitude do local de instalação. Todos os sensores, com exceção dos instalados em Santa Isabel e Jacareí, apresentaram valores médios das medidas de campo abaixo da média do sensor de referência, independentemente da diferença na altitude do local de instalação. Os sensores instalados na Praça de Pedágio em Jacareí e na Sede Administrativa da CCR Nova Dutra em Santa Isabel, porém, apresentaram valores médios acima da média registrada pelo sensor de referência. Também nestes casos não há correlação com a diferença na altitude do local de instalação, uma vez que um deles encontra-se instalado 21 m acima (Santa Isabel) e o outro 48 m abaixo (Jacareí) do nível de instalação do sensor de referência. O que há de comum nesses casos é que ambos os sensores encontram-se instalados às margens da Rodovia Presidente Dutra. Isso sugere a hipótese de que o aumento no número de particulados (aerossóis) lançados na atmosfera, devido à poluição causada pelo alto tráfego de veículos, poderia estar modificando a carga líquida presente, alterando a leitura dos sensores instalados nesses locais.

4. CONCLUSÃO

Seguindo as recomendações dos fabricantes, a infraestrutura necessária foi concluída com êxito permitindo a devida instalação do sensor de referência.

A utilização dos critérios para a validação se mostrou muito eficaz e coerente para a classificação dos dados a serem utilizados, e partir dos resultados obtidos, e das análises feitas, pôde-se concluir que não é possível afirmar que as diferenças observadas entre as médias das medidas dos sensores e as medidas do sensor de referência sejam causadas pelas diferenças nas altitudes dos locais de instalação dos mesmos.

Com o intuito de se obter um valor estatístico para esta conclusão e devido ao espaço amostral extenso, os dados coletados no dia 02/04/2012 serão adotados como exemplo.

Uma vez identificados os dias de campo elétrico de tempo bom, foram calculadas as médias para cada sensor, dos valores de campo medidos a cada minuto. Subsequente determinou-se, a equação da reta que melhor se ajusta à distribuição obtida e confrontaram-se os valores do sensor de referência com os demais sensores da rede.

Era esperado que o fator de correção apresentasse um padrão uniforme, porém, ao se comparar o sensor de referência, por exemplo, ao o sensor mais próximo localizado na cidade de Jacareí, no qual são apresentadas condições de instalação e fatores ambientais praticamente idênticos ao sensor de referência, algumas disparidades foram observadas. À 00 h 00 min desta data, o campo elétrico apresentou um valor de -66 ± 10 V/m, enquanto o sensor de Jacareí apresentou valor de -130 ± 80 V/m, o que nos apresenta uma variação de 95 %, mesmo em comparação aos outros sites as variações são muito discrepantes e aparentam não guardar uma relação lógica com o ambiente de instalação.

Os gráficos relacionados às estas medidas também apresentaram coeficientes de correlação muito baixos, indicando uma grande dispersão dos dados causada, provavelmente, pela estreita faixa de variação das medidas de campo, tanto para o sensor de referência como para os demais sensores. Portanto, as retas ajustadas para cada distribuição não possuem boa representatividade entre os sensores e a referência, inviabilizando a aplicação do coeficiente angular das retas de ajuste encontradas neste estudo para realizar a correção das leituras.

Como os dados se mostraram preliminares, uma outra abordagem para a análise dos dados foi feita, comparando-se os gráficos da distribuição das médias das medidas dos sensores e da referência em função do tempo, também buscando uma possível relação. Os resultados coletados do sensor de referência nos apresentaram valores de campo elétrico de -219 ± 10 V/m

às 12 h 00 min, -226 ± 10 V/m às 16 h 00 min e -59 ± 10 V/m às 20 h 00 min do mesmo dia analisado. Enquanto o sensor mais próximo apresentou valores de 94 ± 50 V/m às 12 h 00 min, -109 ± 50 V/m às 10 h 00 min e -59 ± 50 V/m às 20 h 00 min, trazendo variações de 133%, 107% e 1%, respectivamente aos horários apresentados.

Estes gráficos apontam a existência valores acima dos valores médios do sensor de referência em certos casos e abaixo em outros. Porém, como os valores dos desvios padrão se superpõem, provavelmente outros fatores têm influência maior nessa diferença do que a diferença entre as altitudes dos locais de instalação. Mesmo não podendo apontar uma relação direta entre a diferença na média das medidas e a diferença nas altitudes dos locais de instalação dos sensores, esses valores de “offset” podem ser utilizados para corrigir as medidas dos diversos sítios onde os sensores foram instalados. É possível observar a diferença existente entre as medidas de cada sensor em relação à referência. Porém, não é possível afirmar que esta diferença guarde relação com a altitude do local de instalação, foi observado que os locais nos quais os sensores registraram aumentos inesperados nos valores do campo elétrico atmosférico (Praça de Pedágio em Jacareí e Sede Administrativa da CCR Nova Dutra em Santa Isabel) situam-se às margens da Rodovia Presidente Dutra. Isto sugere a hipótese de que o aumento no número de particulados (aerossóis) lançados na atmosfera, devido à poluição causada pelo alto tráfego de veículos, poderia estar modificando as características dielétricas do meio, afetando a carga líquida presente e conseqüentemente, alterando a leitura dos sensores instalados nesses locais.

REFERÊNCIAS

ARANGUREN, D., MONTANYA, J., SOLA, G., MARCH, V., ROMERO, D., TORRES, H., “On the lightning hazard warning using electrostatic field: Analysis of summer thunderstorms in Spain”. Atmospheric Research. doi:10,1016/j.elstat.2009.01.023, 2009.

AULT, J. P. “Oceanographic investigations on the next cruise of the Carnegie” Bulletin of the National Research Council (61):198-204 1927.

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”. 20th International Lightning Detection Conference (ILDC).Proceedings.Tucson, 2008.

CAMPBELL SCIENTIFIC INC. “CS110 Electric Field Meter”. Revision 1/10, 2010

FERRO, M. A. S.; SABA, M. M. F.; NACCARATO, K. P.; YAMASAKI, J.; PIMENTEL, D. R. M. “Lightning risk warnings based on atmospheric electric field measurements in Brazil”. Journal of Aerospace Technology and Management.(2011) doi: 10.5028/jatm.2011.03032511.

HOLLE, R.L.; MURPHY, M.J.; LOPEZ, R.E. “Distances and times between cloud-to-ground flashes in a storm”. International Conference on Lightning and Static Electricity (ICLSE). Proceedings. Blackpool, 2003.

LENGYEL, M.M., "Lightning casualties and their proximity to surrounding cloud-to-ground lightning". M.S. Thesis. University of Oklahoma, 2004

MONTANYA, J., ARANGUREN, D., PINEDA, N., SOLA, G., ROMERO, D., MARCH, V., “Total lightning, electrostatic field and meteorological radar applied to lightning hazard warning”. 20th International Lightning Detection Conference (ILDC).Proceedings. Tucson, CD-ROM, 2008.

MURPHY, M.J., 1996: The electrification of Florida thunderstorms. PhD thesis, Univ. of Arizona, available from University Microfilms Inc.

MURPHY, M.J., HOLLE, R.L., DEMETRIADES, N.W.S., “Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations”. 20th International Lightning Detection Conference (ILDC).Proceedings.Tucson, 2008.

MURPHY, M.J.; CUMMINS, K.L. “Early detection and warning of cloud-to-ground lightning at a point of interest”. 2nd Symposium on Environmental Applications. Proceedings. American Meteorological Society, Long Beach, 172-177, 2000.

MURPHY, M.J.; DEMETRIADES, N.W.S.; CUMMINS, K.L. “Probabilistic early warning of cloud-to-ground lightning at an airport. 16th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences”. Proceedings. American Meteorological Society, Orlando, p. 126-131, 2002.

MURPHY, M.J.; HOLLE, R.L. “A warning method for the risk of cloud-to-ground lightning based on total lightning and radar information”. International Conference on Lightning and Static Electricity (ICLSE). Proceedings. The Boeing Co., Seattle, 2005.

MURPHY, M.J.; HOLLE, R.L. “Warnings of cloud-to-ground lightning hazard based on combinations of lightning detection and radar information”. 19th International Lightning Detection Conference (ILDC). Proceedings. Tucson, CD-ROM, 2006.

NACCARATO, K.P.; PINTO JR., O. “Improvements in the detection efficiency model for the Brazilian lightning detection network (BrasilDAT)”. Atmospheric Research. In press, doi:10.1016/j.atmosres.2008.06.019, 2008.

NACCARATO, K.P.; PINTO JR., O.; Ferreira Jr., H.H. “Cloud-to-ground lightning forecast based on lightning location system information and electric field-mill data”. International Conference on Grounding and Earthing (GROUND'2008) & 3th International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE). Proceedings. Florianópolis, Brazil, 2008.