

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

**CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE  
UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO VIA SATÉLITE  
DO ESTADO DE POLUIÇÃO DE CADEIAS DE  
ISOLADORES DE ALTA TENSÃO**

por

**Ricardo Ataíde de Lima**

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

**ORIENTADOR: EDUARDO FONTANA  
CO-ORIENTADOR: SÉRGIO CAMPELLO OLIVEIRA**

Recife, Fevereiro de 2010.

© Ricardo Ataíde de Lima, 2010

**L732c**

**Lima, Ricardo Ataíde de.**

Contribuição para o desenvolvimento de um sistema de monitoração via satélite do estado de poluição de cadeias de isoladores de alta tensão / Ricardo Ataíde de Lima. - Recife: O Autor, 2010.

xi, 81 folhas., il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2010.

Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2.Descargas Parciais. 3.Isoladores de Alta Tensão. 4.Sensores Óticos. 5. Telemetria. I. Título.

**621.3 CDD (22. Ed.)**

**UFPE  
BCTG/2010-107**



Universidade Federal de Pernambuco

*Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*

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

**RICARDO ATAÍDE DE LIMA**

TÍTULO

**“CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE  
MONITORAÇÃO VIA SATÉLITE DO ESTADO DE POLUIÇÃO DE CADEIAS  
DE ISOLADORES DE ALTA TENSÃO”**

A comissão examinadora composta pelos professores: EDUARDO FONTANA, DES/UFPE, ANTONIO JERONIMO BELFORT DE OLIVEIRA, DES/UFPE, SERGIO CAMPELLO OLIVEIRA, DSC/UPE e JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, DEESP/UFPE sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **RICARDO ATAÍDE DE LIMA APROVADO.**

Recife, 26 de fevereiro de 2010.

**RAFAEL DUEIRE LINS**  
Coordenador do PPGEE

**EDUARDO FONTANA**  
Orientador e Membro Titular Interno

**SERGIO CAMPELLO OLIVEIRA**  
Co-Orientador e Membro Titular Externo

**ANTONIO JERONIMO BELFORT DE OLIVEIRA**  
Membro Titular Interno

**JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA**  
Membro Titular Externo

*“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota.” (Theodore Roosevelt)*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar paz, serenidade e equilíbrio mental desde o início até as vésperas da conclusão deste trabalho.

Em especial, agradeço a meus pais Zaldo Ataíde de Lima e Maria Gorett de Santana Lima, pelos ensinamentos de vida e pela insistência em oferecer uma educação de qualidade a seus filhos, mesmo diante das dificuldades. Agradeço também ao meu irmão Marcelo Ataíde de Lima pelo apoio incondicional.

Ao professor e orientador Eduardo Fontana por acreditar em meu trabalho (mesmo quando eu não acreditava) e pela sua orientação impecável durante esses últimos três anos, desde a iniciação científica até ao final deste trabalho. Agradeço também ao amigo, professor e co - orientador Sérgio Campello Oliveira pelas sugestões preciosas para o desenvolvimento deste trabalho.

À CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco) em nome de Fernando José do Monte de Melo Cavalcanti pelo apoio financeiro e pela parceria firmada com a UFPE.

Aos meus colegas do Laboratório de Sensores, Thiago Lessa Prata, Renato Bandeira Lima, Caio Renan, Vladimir Homobono Soares, Marcílio André Félix Feitosa e, em especial ao Doutorando Gustavo Oliveira Cavalcanti, pelo convívio e compartilhamento de conhecimentos indispensáveis para a conclusão deste trabalho.

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

---

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

# **CONTRIBUIÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO VIA SATÉLITE DO ESTADO DE POLUIÇÃO DE CADEIAS DE ISOLADORES DE ALTA TENSÃO**

**RICARDO ATAÍDE DE LIMA**

Fevereiro/2010

Orientador: Eduardo Fontana

Co-orientador: Sérgio Campello Oliveira

Área de Concentração: Fotônica

Palavras-chaves: Descargas Parciais, Poluição, Isoladores de Alta Tensão, Sensores Ópticos, Comunicação Via-Satélite, Telemetria

Número de Páginas: 81

**RESUMO:** O presente trabalho relata algumas contribuições para o desenvolvimento de um sistema completo de monitoração em tempo real do estado de poluição de cadeias de isoladores de linhas de transmissão de alta tensão. Essa condição é inferida indiretamente pelo sistema com base na contagem de descargas parciais ocorrendo na superfície dos isoladores, bem como no nível de umidade e temperatura ambiente. O sistema é composto por um sensor óptico conectado a uma fibra óptica, um módulo de processamento microcontrolado, um sistema de alimentação fotovoltaico e um sistema de comunicação via satélite. É verificado se a corrente de fuga excedeu um dos quatro limiares estabelecidos que são de 5, 10, 20 e 40 mA e a taxa com que isso ocorre, além dos valores de temperatura e umidade relativa. As informações obtidas são processadas e armazenadas pelo microcontrolador PIC 16F877A e transmitidas pelo sistema de comunicação via satélite. É realizado o *download* das informações transmitidas para um banco de dados relacional e essas informações disponibilizadas em uma página *web*, e representadas graficamente ou em formato tabular. Seis sistemas foram instalados em torres de alta tensão da CHESF para a realização de estudos de correlação entre os parâmetros registrados e o grau de poluição, este obtido a partir de inspeções nos pontos de monitoramento por parte dos técnicos de manutenção da empresa. As contribuições específicas do presente trabalho incluem estudos dos efeitos degradantes da poluição no desempenho de isoladores de alta tensão, o projeto e implementação do módulo de processamento e do protocolo de comunicação por satélite do sistema, bem como a análise do desempenho do sistema e dos parâmetros medidos nos seis sistemas instalados em pontos da rede de transmissão da CHESF

---

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

**CONTRIBUTIONS TO THE DEVELOPMENT OF A  
SATELLITE MONITORING SYSTEM FOR THE DEGREE OF  
POLLUTION ON HIGH-VOLTAGE INSULATOR STRINGS**

**RICARDO ATAÍDE DE LIMA**

February/2010

Supervisor: Eduardo Fontana

Co-Supervisor: Sérgio Campello Oliveira

Concentration Area: Photonics.

Keywords: Lightning, Partial Discharges, Pollution, High-Voltage Insulators, Optical Sensors, Satellite Communication, Telemetry

Number of Pages: 81

**ABSTRACT:** This work describes a number of contributions for the development of a complete real time monitoring system for the degree of pollution in high-voltage insulator strings. The condition can be inferred by counting the time rate of partial discharges and humidity level nearby the insulators. This system is composed of an optical sensor with a fiber link, a processing microcontroller module, a satellite link and a solar panel with battery. The rate at which the leakage current exceeds one of four thresholds, namely, 5, 10, 20 and 40 mA, is recorded in addition to temperature and relative humidity. The information obtained is processed and stored by a PIC 16F877A microcontroller and subsequently transmitted via satellite. The information provided is stored in a database and is accessible through a website, and displayed as graphs and tables. Six systems were installed on high voltage towers of the CHESF system across 4 states in the Northeast of Brazil for correlation studies of the recorded data against the degree of pollution, the latter obtained by direct observation by part of the company's maintenance personnel on the monitoring points. The specific contributions of the present work include studies of the degrading effects of pollutants on the performance of high-voltage insulators, the project and implementation of the processing module and the satellite communication protocol of the system and analysis of the system performance and of the measured parameters on the six systems installed on CHESF's transmission network.

# ÍNDICE

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Efeitos Decorrentes da Poluição em Cadeias de Isoladores .....</b>	<b>4</b>
2.1. Descargas Parciais.....	4
2.2. Poluentes em Cadeias de Isoladores.....	5
2.3. Processo de Formação de Corrente de Fuga em Cadeias de Isoladores de Alta Tensão Poluídos .....	7
2.4. Degradação em Cadeias de Isoladores Devido à Corrente de Fuga.....	9
<b>3. Instrumentação e Comportamento da Corrente de Fuga em Cadeias de Isoladores de Alta Tensão .....</b>	<b>11</b>
3.1. Instrumentação .....	11
3.2. Comportamento da Corrente de Fuga em Cadeias de Isoladores .....	15
<b>4. Melhorias no Sistema de Monitoração Óptica de Descargas Parciais em Cadeias de Isoladores.....</b>	<b>20</b>
4.1. Sistema de Comunicação Via Satélite.....	20
4.2. Sensor Óptico.....	22
4.3. Concepção Eletrônica do Sistema de Monitoramento de Corrente de Fuga .....	24
4.4. <i>Software</i> do Módulo de Processamento .....	31
<b>5. Experimentos em Laboratório e em Rede Local.....</b>	<b>37</b>
5.1. Experimentos em Laboratório.....	37
Latência do Sistema de Transmissão de Dados .....	37
Taxa de Perda de Pacotes.....	38
Teste de Controle do Programa do Módulo de Processamento.....	40
Sistema de Alimentação Solar .....	43
5.2. Experimentos em Rede Local .....	45
Latência Média Acumulada e Taxa de Perda de Pacotes .....	46
<b>6. Experimentos de Campo em Pontos Críticos.....</b>	<b>58</b>
6.1. Torre de 500 kV próxima à Subestação Angelim II, PE .....	60
6.2. Torre de 230 kV no canavial em São Miguel dos Campos, AL .....	62
6.4. Torre de 500 kV próxima à Subestação Fortaleza II, CE.....	69
6.5. Torre de Caracará, CE .....	69
6.6. Torre de 230 kV em Mossoró, RN.....	73
<b>7. Conclusões e Trabalhos Futuros.....</b>	<b>76</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>78</b>



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - <i>Processo de formação de corrente de em isoladores poluídos: (a) região de banda seca; (b) região de banda úmida; (c) corrente de fuga e descargas superficiais localizadas; (d) descargas superficiais contornando as regiões secas.</i> .....	8
<b>Figura 2</b> - <i>Alguns transdutores utilizados para o monitoramento de corrente de fuga (a) resistência de derivação (b) bobina de Rogowski e sensor de efeito Hall (c) LED pigtail.</i> ....	12
<b>Figura 3</b> - <i>(a) Forma de onda do pulso de corrente de fuga e correspondente tensão (b) detalhes da forma de onda e tensão correspondente (extraído de [25]).</i> .....	16
<b>Figura 4</b> - <i>Forma de onda da corrente de fuga e tensão aplicada em uma cadeia de isoladores (extraído de [21]).</i> .....	17
<b>Figura 5</b> - <i>Forma de onda da corrente de fuga registrada em torre de 500 kV (extraído de [2]).</i> .....	19
<b>Figura 6</b> - <i>Diagrama de comunicação entre módulo de processamento e estação de controle.</i> .....	21
<b>Figura 7</b> - <i>(a) Fotografia do sensor óptico e (b) circuito de proteção do sensor óptico (extraído de [4]).</i> .....	23
<b>Figura 8</b> - <i>Diagrama de blocos do módulo de processamento.</i> .....	24
<b>Figura 9</b> - <i>Desenho do fotodetector e esquema elétrico de ligação.</i> .....	25
<b>Figura 10</b> - <i>Fotografias das vistas superior e laterais do módulo de processamento montado em carcaça de alumínio.</i> .....	27
<b>Figura 11</b> - <i>Diagrama esquemático o sistema para monitoramento de corrente de fuga com transmissão via satélite (extraído de [4]).</i> .....	29
<b>Figura 12</b> - <i>(a) Painel solar com a cantoneira para fixação na torre de transmissão. Face frontal (b) e posterior (c) do gabinete que contém a bateria, o controlador de carga, o módulo de processamento e o terminal de comunicação via satélite.</i> .....	30
<b>Figura 13</b> - <i>Fluxograma do programa principal do microcontrolador.</i> .....	34
<b>Figura 14</b> - <i>Tela gráfica inicial do ADECI. (a) Solicitação de login e senha. (b) Lista de sensores que podem ser visualizados. (c) Visualização de atividade de um determinado sensor.</i> .....	36
<b>Figura 15</b> - <i>Gráfico de latência média em função da hora do dia.</i> .....	39
<b>Figura 16</b> - <i>Número de pacotes transmitidos e número de pacotes perdidos durante o mês de teste.</i> .....	39

---

<b>Figura 17</b> - Gráfico da taxa de pulsos de corrente em função do tempo do teste de laboratório, com as regiões I, II e III indicadas. ....	41
<b>Figura 18</b> - Gráfico da temperatura e da umidade relativa em função da hora do dia para o teste piloto. ....	42
<b>Figura 19</b> - Variação de carga na bateria em função do tempo. ....	44
<b>Figura 20</b> - (a) Fotografia do gabinete e painel solar instalados na pontina de uma torre de transmissão da CHESF. (b) Fotografia da fixação do gabinete na torre. ....	47
<b>Figura 21</b> - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 02. ....	48
<b>Figura 22</b> - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 03. ....	50
<b>Figura 23</b> - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 04. ....	51
<b>Figura 24</b> - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 05. ....	52
<b>Figura 25</b> - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 06. ....	54
<b>Figura 26</b> - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 07. ....	54
<b>Figura 27</b> - (a) Fotografia do sensor óptico montado na placa de circuito impresso e acondicionado na caixa de alumínio. (b) Fotografia do sensor na caixa de alumínio vedada juntamente com o cabo óptico e conexões elétricas. ....	59
<b>Figura 28</b> - Configuração do sistema sensor após instalações. ....	59
<b>Figura 29</b> - (a) Fotografia da torre escolhida para instalação do sistema 02 e (b) sensor do sistema 02 sendo instalado pelos eletricitistas. ....	61
<b>Figura 30</b> - Parâmetros registrados em Angelim, PE no período de um mês. O círculo no gráfico indica ocorrência de chuva. ....	63
<b>Figura 31</b> - (a) Fotografia da torre escolhida para instalação do sistema 03 e (b) gabinete do sistema 03 sendo instalado pelos eletricitistas. ....	64
<b>Figura 32</b> - Parâmetros registrados em São Miguel dos Campos, AL, no período de um mês. A região destacada indica ocorrência de chuva. ....	66
<b>Figura 33</b> - Fotografia obtida durante a instalação do sistema 04. ....	67
<b>Figura 34</b> - Parâmetros registrados na Torre da Lagoa em Pitaguary, CE, no período de um mês. O círculo no gráfico indica provável ocorrência de chuva. ....	68
<b>Figura 35</b> - Parâmetros registrados na torre próxima à subestação Fortaleza II, CE, no período de um mês. O círculo no gráfico indica provável ocorrência de chuva. ....	70

---

**Figura 36** - (a) Fotografia da torre escolhida para instalação do sistema 06 e (b) gabinete, painel solar e sensor do sistema 06 sendo instalados pelos eletricitas. .... 71

**Figura 37** - Parâmetros registrados na torre de 500 kV em Caracará, CE, no período de um mês. As regiões destacadas I e II indicam provável ocorrência de chuva. .... 72

**Figura 38** - (a) Fotografia da torre escolhida para instalação do sistema 07 e (b) gabinete e painel solar do sistema 07 sendo instalados pelos eletricitas. .... 73

**Figura 39** - Parâmetros registrados na torre de 230 kV nas proximidades da Subestação Mossoró II, RN, no período de um mês. As regiões destacadas I e II indicam períodos de maior atividade. .... 75

---

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - <i>Principais tipos de contaminantes e suas respectivas fontes (extraído da ref.[14]).</i> .....	6
<b>Tabela 2</b> - <i>Parâmetros de desempenho na transmissão de pacotes para os experimentos em rede local.</i> .....	55
<b>Tabela 3</b> - <i>Identificação dos sistemas sensores.</i> .....	60

## 1. Introdução

Isoladores de alta tensão representam uma parte importante no sistema de transmissão de energia. Uma cadeia de isoladores além de isolar é também responsável por suportar os esforços mecânicos de sustentação dos cabos. Qualquer falha em uma cadeia de isoladores acarreta em grandes prejuízos, considerando que a rentabilidade das empresas geradoras e transmissoras de energia está associada à qualidade da prestação do serviço e uma interrupção inesperada no fornecimento aumenta os custos de produção de energia.

Poluentes trazidos pelos ventos e que são depositados na superfície do isolador são diluídos formando regiões condutivas. Descargas parciais surgem devido à formação de uma camada superficial com condutividade não-homogênea, que varia como função da umidade ambiente. Esses fenômenos podem se estender por toda a cadeia de isoladores, produzindo uma descarga de contornamento, conhecida na literatura pela denominação inglesa *flashover*. A interrupção do fornecimento de energia devido ao acúmulo de poluentes representa cerca de um terço das principais causas de queda da linha de transmissão de empresas de energia como a CHESF [1].

O Grupo de Fotônica do Dep. de Eletrônica e Sistemas da UFPE em parceria com a CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) vem desenvolvendo trabalhos nos últimos anos para determinar o estado de poluição de cadeias de isoladores de alta tensão, para permitir a tomada de ações preventivas em tempo hábil. O trabalho apresentado aqui representa o aperfeiçoamento de um sistema autônomo capaz de monitorar descargas parciais em isoladores de alta tensão e juntamente com a informação da umidade e temperatura local, inferir o estado de poluição do isolador.

Um dos trabalhos preliminares desenvolvidos no Grupo [1] faz uma análise dos principais problemas envolvidos na monitoração de poluição em cadeias de isoladores de alta tensão e descreve a concepção inicial de um sensor óptico para monitoração de poluição pela medição direta da componente condutiva da corrente de fuga escoando na superfície de isoladores poluídos. Trabalhos subsequentes [2]-[6] desenvolvidos por pesquisadores do Grupo, relataram a evolução do sistema originalmente concebido, desde seu projeto inicial até a implementação em campo de uma primeira versão de um sistema sensor utilizando um

princípio óptico de transdução, capaz de detectar, contar e classificar descargas parciais em cadeias de isoladores de alta tensão. Esse sistema era configurado para instalação em torres de alta tensão, com alimentação por energia solar. Um módulo de processamento armazenava as atividades de descargas parciais e umidade e periodicamente o módulo era retirado para leitura em um computador da empresa. Estudos publicados na literatura relatam desde a análise de atividades registradas por esses sistemas sensores em torres de linhas de transmissão do sistema CHESF [6] até experimentos de observação direta da corrente de fuga em tempo real em isoladores de alta tensão durante o processo de lavagem [7].

As contribuições específicas do presente trabalho incluem:

- Projeto e implementação de uma nova versão do módulo de processamento com protocolo de comunicação via satélite.
- Análise de desempenho do sistema.
- Realização de experimentos de monitoração de atividades registradas em seis sistemas sensores instalados em torres de linhas de transmissão do sistema CHESF espalhadas por quatro estados do Nordeste do Brasil
- Análise preliminar dos resultados.

Uma parte do trabalho relatado nesta dissertação foi apresentada na conferência internacional IEEE MTT-S/SBMO International Microwave and Optoelectronics Conference em 2009 [8].

Esta dissertação está organizada em sete capítulos, incluindo esta introdução. O Capítulo 2 descreve em linhas gerais os princípios que governam a formação de descargas parciais e os problemas decorrentes do acúmulo de poluentes em isoladores de alta tensão. No Capítulo 3 são revisadas algumas das técnicas de instrumentação empregadas na literatura e resultados de medição de corrente de fuga obtidos em cadeias de isoladores em laboratório e em campo. O Capítulo 4 apresenta as modificações realizadas na versão anterior do sistema sensor desenvolvido no Grupo de Fotônica para permitir a monitoração remota de sistemas sensores via satélite. Os Capítulos 5 e 6 descrevem a análise de desempenho do novo sistema, além da análise dos resultados preliminares de experimentos de monitoração de atividades registradas em seis sistemas sensores recentemente instalados em torres do sistema de

transmissão da CHESF. O Capítulo 7 apresenta as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

## **2. Efeitos Decorrentes da Poluição em Cadeias de Isoladores**

Neste capítulo é feita uma revisão dos princípios que governam a formação de descargas parciais e é discutido de que forma esse fenômeno se intensifica a partir do acúmulo de poluentes em cadeias de isoladores de linhas de transmissão de alta tensão.

### **2.1. Descargas Parciais**

Uma descarga parcial é definida como sendo uma descarga elétrica que ocorre em um meio isolante envolvido entre dois eletrodos [9]. A intensificação de descargas parciais na vizinhança de meios isolantes é um dos principais fatores que contribuem para a redução da suportabilidade dielétrica do isolamento de equipamentos elétricos de potência, sendo objeto de estudo de vários pesquisadores para compreender o mecanismo de propagação das descargas, seus tipos e principais danos causados. Dentre as principais características de descargas parciais podem-se citar [10]:

- São eventos com duração da ordem de nanossegundos, sendo portanto muito mais rápidos em comparação com o período de tensão aplicado (16,7 milissegundos).
- São eventos intermitentes.

A descarga parcial é classificada em três tipos: superficial, interna ou corona [9] – [13]. Descargas parciais superficiais ocorrem quando o caminho condutor se encontra na superfície do dielétrico. Descargas parciais internas surgem em cavidades no dielétrico de isolamento e quando as descargas ocorrem ao redor de pontas energizadas são chamadas de coronas. As descargas superficiais ocorrem predominantemente na vizinhança de dielétricos sólidos e por isso é o foco da análise desta dissertação.

Na descarga superficial a interação entre um campo elétrico perpendicular à superfície e cargas livres obtidas pela ionização ao ar em volta do dielétrico resultam na alteração da superfície do dielétrico criando caminhos condutores. Esses caminhos podem levar à ruptura completa da isolamento.



## 2.2. Poluentes em Cadeias de Isoladores

O acúmulo de poluentes na superfície de isoladores de alta tensão é um dos principais motivos da diminuição do isolamento entre fase e terra em uma torre de linha de transmissão. A alta concentração desses poluentes juntamente com a umidade elevada resulta em caminhos condutivos na superfície do isolador contribuindo para o surgimento de descargas parciais. Na prática existem vários tipos de poluentes que tendem a se depositar em isoladores de alta tensão. Esses contaminantes são geralmente classificados como solúveis e não solúveis. Isoladores localizados em regiões costeiras são tipicamente afetados por poluentes solúveis. Isoladores localizados nas proximidades de regiões industriais tendem a ser afetados por poluentes não solúveis. Os poluentes são transportados pelo vento e se depositam aleatoriamente, devido a fatores ambientais, tais como: chuvas, direção e velocidade do vento, ocorrência de tempestades, localização geográfica, altitude etc.

Hernanz *et al* [14] realizaram um estudo sobre os principais tipos e fontes de contaminantes que podem afetar a isolação em uma cadeia de isoladores. A Tabela 1 lista essa classificação. Os poluentes são predominantemente de origem industrial ou marítima. Os poluentes industriais, principalmente aqueles de indústrias que consomem combustíveis fósseis, como o carvão e o diesel, e aqueles de indústrias que fabricam fertilizantes, cimento e indústrias de refinaria de petróleo são responsáveis pela emissão dos contaminantes mais comuns encontrados nas saias dos isoladores.

Ainda de acordo com Hernanz *et al* [14], em regiões úmidas, pode ocorrer o surgimento de elementos biológicos no isolador, que podem ser definidos como “poluição biológica”. Os contaminantes mais comuns são bactérias, algas, cogumelos e líquen que podem degradar o isolador ou criar caminhos condutivos. Líquen e algas produzem ácidos orgânicos, danificando a superfície do isolador. Mesmo com a morte do elemento biológico, uma camada de resíduos é deixada no isolador, que, quando umedecida, pode se tornar condutiva.

**Tabela 1** - Principais tipos de contaminantes e suas respectivas fontes (extraído da ref.[14]).

<b>Contaminantes</b>	<b>Fontes de poluição</b>
Sal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regiões costeiras</li> <li>• Industriais</li> </ul>
Cimento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fábrica de cimento</li> <li>• Locais de construção, obras</li> <li>• Pedreiras</li> </ul>
Terra	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Locais de plantio</li> <li>• Estrada de terra para acesso aos locais de plantio</li> </ul>
Fertilizantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fábricas de fertilizantes</li> <li>• Uso frequente em locais de plantio</li> </ul>
Metálicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manipulação de processos de mineração</li> <li>• Processo de tratamento mineral</li> </ul>
Carvão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processo de fabricação do carvão</li> <li>• Combustão do carvão</li> </ul>
Fezes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Locais próximos a migrações de aves</li> </ul>
Químicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grandes variedades de produtos químicos de resíduos industriais, refinarias entre outros</li> </ul>
Fumaça	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emissão dos automóveis e caminhões, queima de processos industriais e queima em práticas agrícolas</li> </ul>

O principal método usado para determinar a concentração de poluentes em cadeias de isoladores é a medição da densidade de depósito em equivalente de sal ou ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*) [4], [15]. Esse método consiste em remover a cadeia de isoladores, lavar com um volume de água destilada conhecido, medir a condutividade elétrica e determinar qual a concentração de NaCl seria necessária para se observar a mesma condutividade da solução. Dividindo a quantidade equivalente em sal pela área que foi lavada, obtém-se o ESDD equivalente à concentração em miligrama de NaCl por centímetro quadrado. De forma complementar pode-se determinar a densidade de depósito de substâncias não solúveis, NSDD (*Non Soluble Deposit Density*) para caracterizar a concentração de poluentes.

Em relação à composição químicas dos poluentes, Silva *et al* [16] descrevem análises espectroscópicas realizadas em cadeias de isoladores localizadas em uma torre a 50 km do

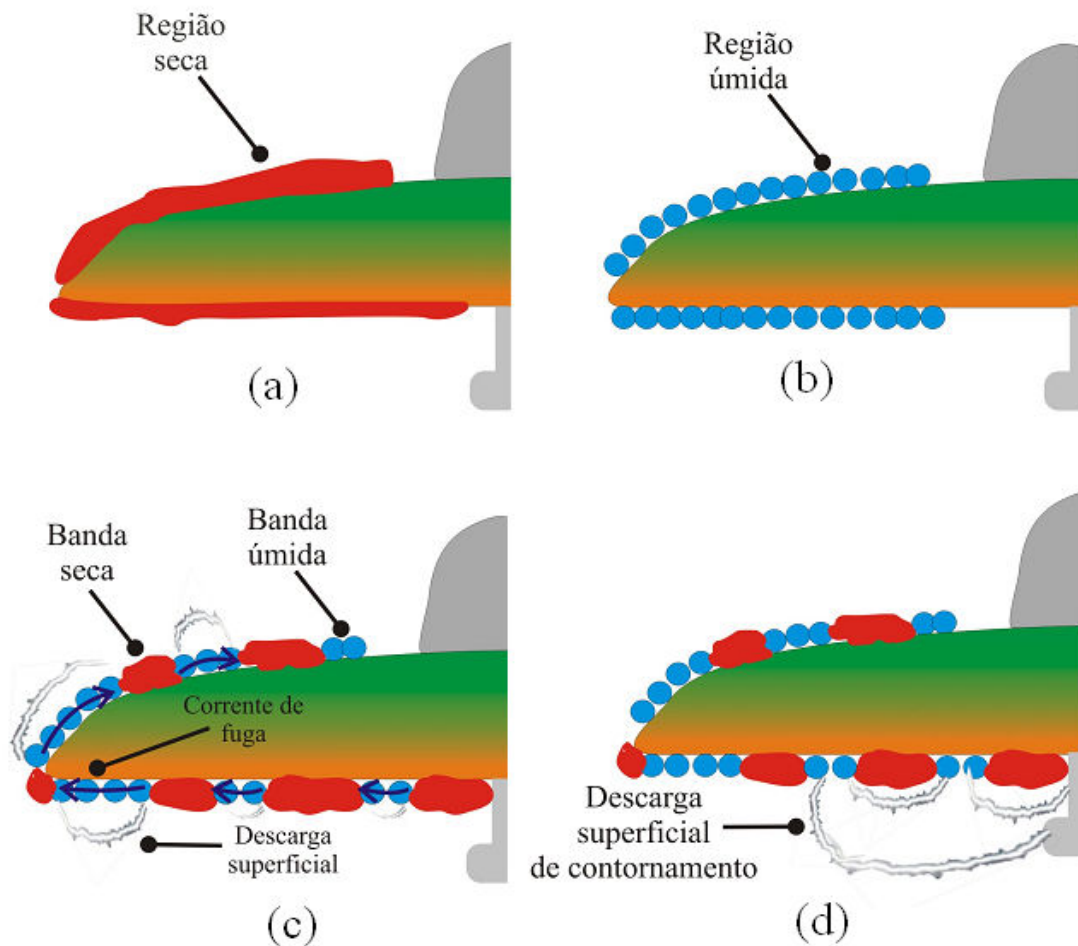
mar. Os principais elementos químicos encontrados foram Ca, Ti, Fe, Zn, Pb, Si, S, Al, O, Mn, Cu e C. Fierro-Chavez *et al* [15] relatam que dos poluentes responsáveis pela redução da isolamento da cadeia de isoladores no México, cerca de 79% dos poluentes são do tipo não solúveis e 21% são solúveis. Dos poluentes solúveis, encontram-se concentrações de sais do tipo cloretos, nitratos, bicarbonatos, sódio, potássio e magnésio. Os poluentes não solúveis consistem de cerca de 39 % de gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), 22,6% de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), 10,3% de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e baixas concentrações de ferro e alumínio.

### **2.3. Processo de Formação de Corrente de Fuga em Cadeias de Isoladores de Alta Tensão Poluídos**

A Figura 1 mostra as etapas para a formação de corrente de fuga em uma cadeia de isoladores cerâmicos de alta tensão expostos a um ambiente de alta umidade e concentração de poluentes. Quando uma determinada concentração de contaminante é depositada na superfície do isolador e esta se mantém seca, não ocorre alteração significativa na suportabilidade dielétrica do isolador, pois a substância se encontra eletricamente neutra, como pode ser observado na Figura 3(a). No instante em que a superfície da saia do isolador é umidificada de forma parcial ou total, devido à elevação da umidade, chuva fina ou neblina, a região seca é umidificada tornando-se uma solução condutiva, denominada região úmida, como pode ser observado na Figura 3(b) [1]–[17].

A região úmida sob a ação da tensão aplicada sobre a cadeia de isoladores gera a circulação de corrente de fuga pelo interior da região úmida. Ocorre um aquecimento na região de circulação de corrente por efeito Joule, promovendo a secagem de parte da região úmida. O processo de secagem ocorre de forma não homogênea, formando regiões de bandas secas cortadas por bandas úmidas. Com isso, na região localizada próxima ao pino do isolador é iniciado o processo de formação das descargas superficiais [13]–[17]. Nesse estágio, as descargas superficiais estão limitadas à região úmida, ocorrendo um acúmulo de carga elétrica nas regiões de contorno da banda seca, promovendo a interrupção da corrente de fuga oriunda da banda úmida, como pode ser observado na Figura 3(c).

As regiões de banda seca ficam assim submetidas a intensos campos elétricos, pois a tensão de trabalho no isolador é da ordem de kV e o comprimento da banda seca é a ordem de alguns centímetros [15]-[17], acarretando em uma ruptura dielétrica do ar na região ao redor da banda seca. Desta forma, as descargas superficiais, que estavam restritas à região úmida e também por causa do acúmulo de carga nas regiões de contorno da banda seca, se manifestam contornando as regiões de banda seca, através do caminho iniciado no pino até as regiões de banda úmida ou entre bandas úmidas, estando eletricamente em paralelo com a banda seca e eletricamente em série com a banda úmida da camada de poluição mais próxima [18], como podem ser observadas na Figura 3(d). Esse processo pode se prolongar por toda extensão da cadeia de isoladores, podendo produzir um *flashover*.



**Figura 1** - Processo de formação de corrente de fuga em isoladores poluídos: (a) região de banda seca; (b) região de banda úmida; (c) corrente de fuga e descargas superficiais localizadas; (d) descargas superficiais contornando as regiões secas.

## 2.4. Degradação em Cadeias de Isoladores Devido à Corrente de Fuga

O processo de descargas superficiais em isoladores acarreta no envelhecimento prematuro do isolador e danos permanentes em sua estrutura. Esses danos são decorrentes da circulação de corrente de fuga no isolador e dos efeitos correlatos a esse fenômeno como, por exemplo, aquecimento por efeito Joule, formação de caminhos condutores e processos químicos [17].

As descargas superficiais produzem luz, ruído audível e ozônio, e dão origem a outros efeitos como, por exemplo [10]:

- Elevação da temperatura do material dielétrico.
- Geração de ondas acústicas e radiação ultravioleta [17].
- Produção de íons derivados do oxigênio e do nitrogênio. O ozônio combina-se com o nitrogênio formando o dióxido de nitrogênio que hidratado produz o ácido nítrico. O ozônio oxida os elementos metálicos existentes nas terminações do isolador. Por exemplo, o ozônio oxida o zinco que gradativamente se desprende da superfície expondo o ferro de sustentação da cadeia de isoladores. O ferro, dessa forma, é atacado pelo ácido nítrico produzindo ferrugem.
- **Trilhamento**(“*Tracking*”) [12], definido como um processo desordenado que consiste na formação de caminhos condutores permanentes sobre a superfície do material dielétrico. Esses caminhos são produzidos a partir da carbonização, oriunda dos contaminantes ou do próprio material isolante. O trilhamento é observado frequentemente em isoladores poliméricos.
- **Erosão** [12]: degradação irreversível provocada por perda de material na superfície do isolador. Descargas parciais superficiais provocam bombardeamento de elétrons na superfície do isolador. Esse bombardeamento poderá quebrar cadeias moleculares do material que poderão se volatilizar formando depressões na sua superfície. A erosão é observada frequentemente em isoladores poliméricos.

- **Arborescência elétrica** [11] [12]: A arborescência elétrica é um fenômeno de pré-ruptura que ocorre no interior do material dielétrico formando caminhos condutores internos a partir de degradações químicas erosão e trilhamento. Quando o caminho formado atinge todo o dielétrico ocorre uma falha irreversível.

Este capítulo apresentou as principais causas para a formação de descargas parciais em cadeias de isoladores. No próximo capítulo será realizada uma revisão bibliográfica das principais técnicas utilizadas para detectar descargas parciais e dos atributos da corrente de fuga que permitem caracterizar esses eventos em isoladores de alta tensão.

### **3. Instrumentação e Comportamento da Corrente de Fuga em Cadeias de Isoladores de Alta Tensão**

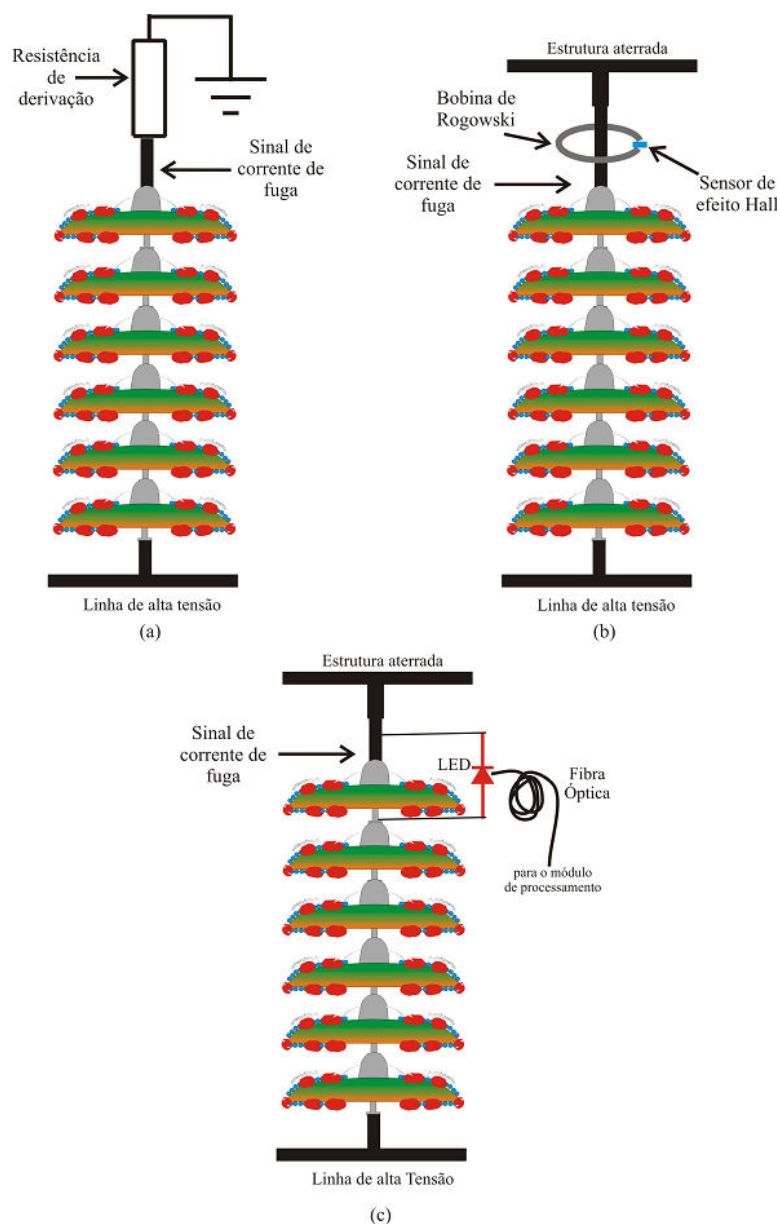
Neste capítulo é feito um levantamento das técnicas comumente empregadas na literatura para medição da corrente de fuga em isoladores de alta tensão, levando em conta a presença de descargas superficiais. Experimentos permitem, dentro das limitações de resposta dos sistemas de medição, e com base em variáveis ambientais, determinar atributos da forma de onda correlacionados com o grau de poluição de uma cadeia de isoladores de alta tensão.

#### **3.1. Instrumentação**

A fim de determinar a influência dos diversos parâmetros que contribuem para a formação da corrente de fuga, alguns sistemas de monitoramento foram desenvolvidos. Esses sistemas basicamente são formados por um sensor de corrente, sensores para analisar as condições ambientais circunvizinhas ao isolador, um bloco para análise do sinal obtido e um bloco para realizar aquisição ou transmissão do sinal analisado. Foram desenvolvidos sistemas para estudos de cadeia de isoladores em laboratório, em que a tensão aplicada na cadeia e a atmosfera de sua vizinhança são controladas. Foram também desenvolvidos sistemas para monitoramento diretamente instalados em torres de linhas de transmissão.

Bobinas de Rogowski [19], resistências de derivação [15], [20], [22] sensores de efeito Hall [23], [24], e sensores ópticos [1]–[8] são algumas das técnicas de transdução propostas na literatura para medição da corrente de fuga. Em geral esses sensores são conectados aos terminais da cadeia mais próxima da estrutura aterrada, ou no caso da bobina de Rogowski, em torno da campânula do isolador mais próximo ao terra da torre de alta tensão. A técnica que emprega resistência de derivação, ilustrada na Figura 2(a) é uma técnica de laboratório e consiste em medir a tensão em um resistor conectado entre o terminal do isolador próximo ao terra e este terminal [15], [20], [22]. Já a medição com sensor de efeito Hall, ilustrada na Figura 2(b) é realizada em conjunção com uma bobina de Rogowski aberta. Esta é posicionada em torno da estrutura de sustentação da cadeia e o sensor de efeito Hall é posicionado na abertura da bobina, [19], [23], [24]. A corrente de fuga induz um campo

magnético na bobina que é detectado pelo sensor de efeito Hall. A técnica de transdução utilizada no presente trabalho utiliza um LED *pigtail* conectado em paralelo com o isolador mais próximo ao terra, conforme proposto por Fontana *et al* [2] e ilustrada na Figura 2(c). O sinal luminoso produzido pelo LED é transmitido por um enlace de fibra óptica até uma unidade de processamento, e contém um semiciclo da corrente de fuga que flui pela cadeia de isoladores. Essa técnica permite obter isolamento elétrico entre a estrutura de alta tensão e o módulo de detecção e processamento de sinais.



**Figura 2** - Alguns transdutores utilizados para o monitoramento de corrente de fuga (a) resistência de derivação (b) bobina de Rogowski e sensor de efeito Hall (c) LED pigtail.



A utilização de resistências e bobinas para monitoramento de corrente de fuga requer medidas de prevenção. A conexão entre o sensor e o módulo de medição e processamento é feita com fios metálicos, o que pode ocasionar danos ao equipamento e risco de morte para o operador. Uso de sensores ópticos, por outro lado apresenta as vantagens de isolamento elétrico entre sensor e módulo de medição e processamento, rápido tempo de resposta, imunidade a interferências eletromagnéticas e operação totalmente passiva do sensor, minimizando assim os riscos para o operador e para o instrumento de medida [4]. A seguir é feita uma breve descrição de alguns sistemas implementados para medição em campo.

Richards *et al* [22] realizaram monitoramento da máxima corrente de fuga em um período de 24 horas em torres de alta tensão localizadas na Flórida, utilizando como sensor de corrente de fuga um divisor de tensão resistivo. O sinal é capturado com uma taxa de amostragem de 10 kHz. A faixa de magnitude de corrente de fuga medida varia de 10 mA até 0,5 A. Sensores de umidade relativa, temperatura ambiente, velocidade e direção do vento, radiação térmica e nível de contaminação foram utilizados para correlacionar com a amplitude da corrente de fuga. A aquisição das informações era realizada por um equipamento munido de conversores A/D, estágio de pré-processamento e armazenamento de dados. A transmissão dos dados era realizada por um sistema de comunicação via modem do tipo *dial up* e via telefonia celular. O sistema completo é suprido por alimentação fotovoltaica.

Habib *et al* [23] relatam a construção de um sistema constituído de um transformador de núcleo de ar, como sensor de corrente. Um comparador analógico de alto desempenho é utilizado para analisar o limiar e a largura dos pulsos de corrente de fuga. Na saída do comparador, pulsos com valores de tensão TTL são produzidos caso a magnitude de corrente exceda um determinado valor. Os pulsos quadrados da saída do comparador são contados por um circuito dedicado e comparados com um *clock* digital. No momento em que o número de pulsos quadrados contados excede um determinado valor, um alarme sonoro é ativado. Os autores descrevem apenas testes de laboratório para verificar a eficiência do sistema.

Thalassinakis *et al* [24] utilizam um sensor de efeito Hall de alta precisão conectado a um sistema de amplificação. O experimento foi realizado em uma subestação localizada na ilha de Creta, Grécia, em torres de 150 kV, 50 Hz, com isoladores poliméricos, de vidro e porcelana, localizados a 300 m do mar. A saída do sensor é conectada a um sistema principal de aquisição de dados. Esse sistema é formado por um conversor A/D e sistema

microcontrolado de aquisição de dados especialmente projetados para gravar a atividade de corrente de fuga em nove isoladores diferentes. Todo sinal adquirido é armazenado pelo sistema e pode ser transmitido via RS-232 ou conexão via modem do tipo *dial up*. Um *software* para o processamento das informações em um computador foi desenvolvido. A taxa de amostragem do conversor A/D é de 20 kHz. O equipamento também possui três entradas para tensão para monitorar as três fases do sistema trifásico. Sensores de umidade, temperatura, velocidade do vento e chuva foram inseridos no equipamento para realizar correlação com a corrente de fuga.

Vlastós *et al* [25] realizam o monitoramento do pico máximo de corrente de fuga ao longo de 22 dias de experimentos em uma subestação localizada no norte da Suécia, em torres de 220 kV compostas por isoladores de vidro. A monitoração da corrente de fuga era realizada a partir de um isolador de vidro adicionado na cadeia de isoladores. O sistema sensor era formado por um circuito constituído de um resistor e um indutor acondicionado em uma caixa metálica e conectados a um cabo coaxial de capacitância conhecida. A saída do cabo coaxial é conectada a um voltímetro CA e sensores de velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e precipitação pluviométrica foram utilizados para analisar as condições ambientais. Todos os sensores são conectados a uma estação de trabalho constituída de 100 canais além de conversores A/D e sistema de armazenamento de dados. Cada canal possui uma taxa de amostragem de 30 Hz. As informações armazenadas eram acessadas por um operador da subestação, sendo transportadas e analisadas no Laboratório de Alta Tensão de Chalmers.

Fontana *et al* [2] propuseram um sistema para monitoração de pulsos de corrente de fuga de curta duração, provenientes das descargas parciais ocorrendo na superfície da cadeia de isoladores. A técnica consiste em classificar a quantidade de pulsos de amplitude superior a três níveis de amplitude (5 mA, 10mA e 20 mA). O sistema é formado por um sensor óptico constituído de um LED *pigtail*, conectado a um módulo de processamento via enlace de fibra óptica. O sistema de monitoração foi instalado em torres localizadas no Nordeste do Brasil com tensão de trabalho de 230 e 500 kV em isoladores de vidro e porcelana. As informações, juntamente com registros de umidade local, eram armazenadas na memória não volátil do microcontrolador existente no módulo de processamento e periodicamente analisadas. Para realizar a aquisição das informações contidas no microcontrolador, um inspetor de linha da CHESF realiza a substituição do módulo de processamento que se desejava acessar as

informações por outro e na subestação realiza a transferência de dados via porta paralela para um computador para posterior análise.

### **3.2. Comportamento da Corrente de Fuga em Cadeias de Isoladores**

A análise do comportamento da corrente de fuga é importante para avaliar o estado de isolamento da cadeia de isoladores. A verificação da corrente pode ser feita em cadeias de isoladores de linha de transmissão, para se obter a correlação com as variáveis ambientais, ou em situações mais controladas em laboratório. Diversos trabalhos já foram realizados em laboratório em que a cadeia de isoladores é acondicionada em ambiente com umidade e salinidade controladas. Uma “névoa salina”, formada a partir do borrifamento de uma solução constituída de água e NaCl na câmara onde o isolador em análise é inserido, é utilizada para simular as condições ambientais de poluição, uma vez que o parâmetro geralmente utilizado para determinar a condutividade na superfície do isolador é o ESDD (*Equivalent Salt Deposit Density*).

Thalassinakis *et al.* [24] analisaram o padrão de comportamento da corrente de fuga em cadeias de isoladores localizadas no Sistema de Distribuição de Potência de Creta, no litoral da Grécia. A tensão de trabalho é de 150 kV e a frequência, de 50 Hz. O padrão da corrente de fuga está correlacionado com a umidade, temperatura, ESDD, velocidade do vento e hora local da realização do monitoramento. O resultado obtido é mostrado na Figura 3. As medições foram realizadas a uma temperatura de 23 °C, nível de poluição de 0,1 mg/cm<sup>2</sup>, com umidade relativa de 80% e velocidade do vento de 0,1 m/s. Conforme ilustrado na Figura 3(a) e (b), a corrente de fuga está praticamente em fase com a tensão da cadeia. Esse comportamento é esperado, pois a corrente de fuga, em um isolador limpo e circunvizinho em um ambiente de alta umidade possui características predominantemente capacitivas. Em um ambiente poluído e de alta umidade, a corrente de fuga apresenta características predominantemente resistivas. Percebe-se também na Figura 3(a) e (b) uma distorção de cruzamento próximo do zero. A amplitude é da ordem de 40 mA. O mesmo padrão de comportamento para a corrente de fuga foi observado em [15], utilizando tanto um resistor de derivação como uma bobina toroidal.

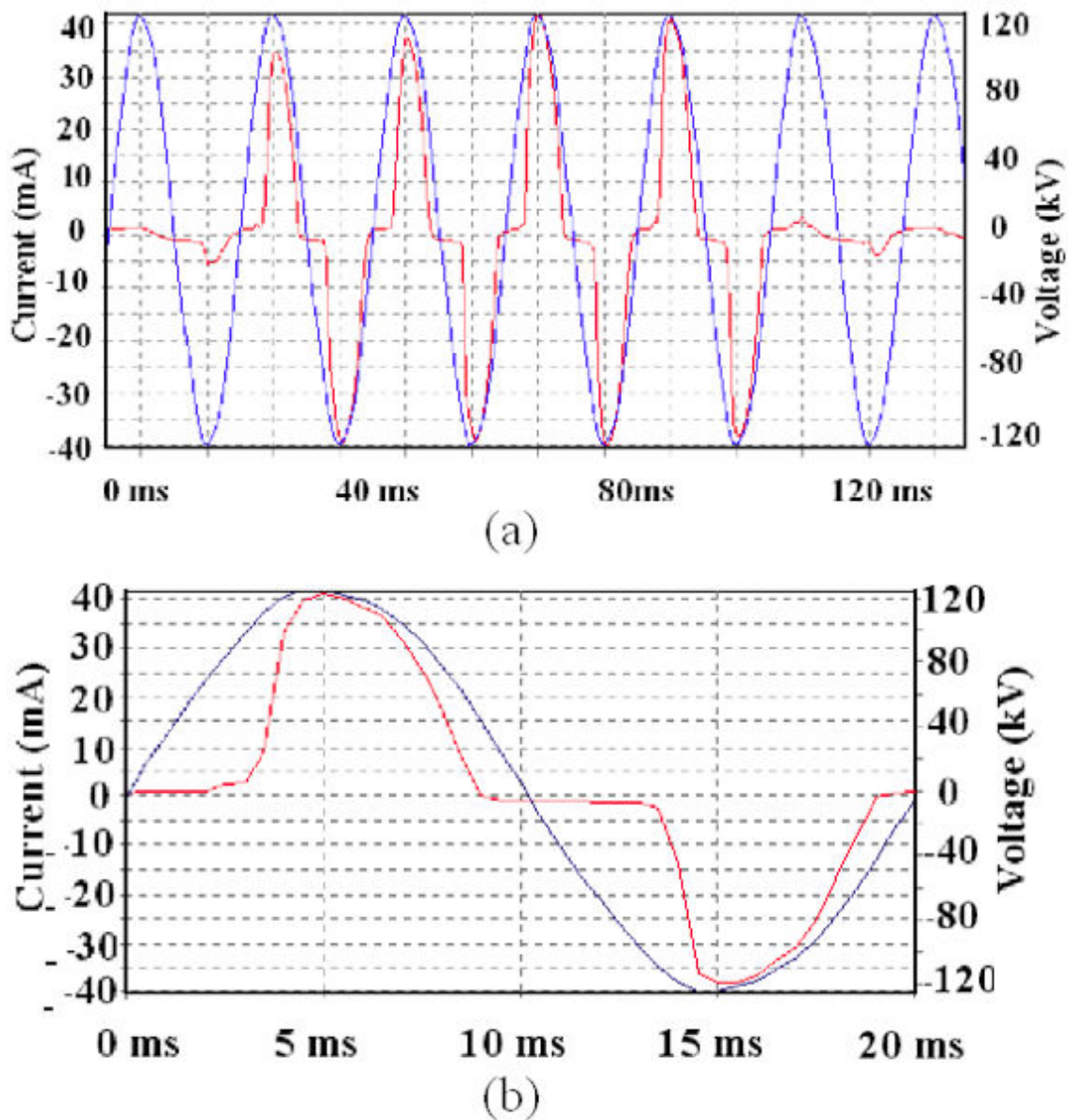
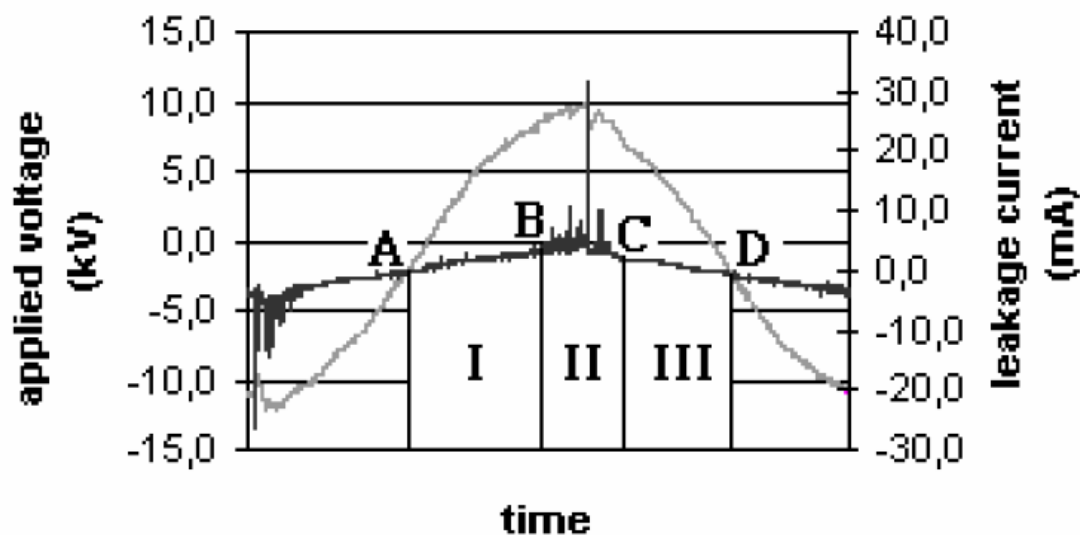


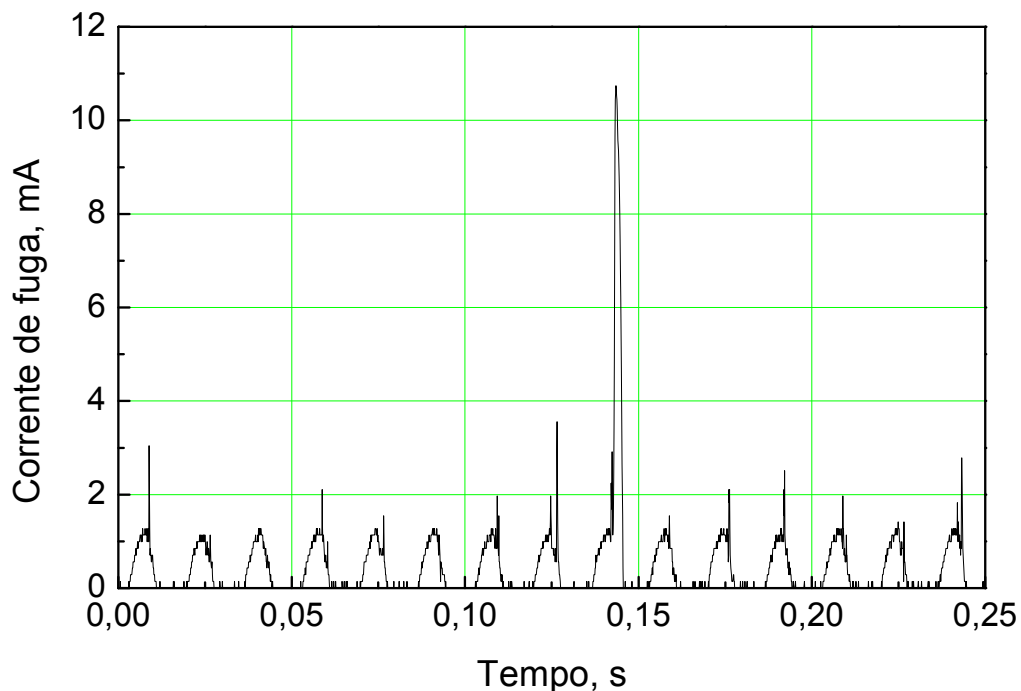
Figura 3 - (a) Forma de onda do pulso de corrente de fuga e correspondente tensão (b) detalhes da forma de onda e tensão correspondente (extraído de [24]).

Tsarabaris *et. al.* [20] realizaram experimentos para análise de corrente de fuga em cadeias de isoladores de porcelana em atmosfera salina, submetidos a uma tensão de 20 kV e frequência de operação de 50 Hz. Foi observado que a corrente de fuga aumentava linearmente com a tensão aplicada até que, próximo do máximo da diferença de potencial, a corrente de fuga exibia uma sucessão de pulsos intermitentes, rápidos e de amplitude variável, conforme ilustrado na Figura 4. A ocorrência destes foi identificada como sendo devido às descargas superficiais no isolador. As descargas superficiais reveladas como pulsos de corrente na forma de onda da corrente de fuga. O tempo de resposta do sensor utilizado permitia verificar a duração do evento em torno de algumas dezenas de microssegundos. Como a duração de uma descarga parcial é da ordem de nanossegundos [10], conclui-se que o sensor registra uma sucessão de pulsos de corrente de fuga gerada quase que simultaneamente. Os autores classificaram o comportamento da corrente de fuga em três regiões, conforme ilustrado na Figura 4. A região I corresponde à dependência linear da corrente com a tensão aplicada na cadeia. Na região II ocorre o surgimento de pulsos intermitentes de corrente de fuga e na região III, com a diminuição da tensão sobre a cadeia, a corrente de fuga volta a apresentar um comportamento linear.



**Figura 4** - Forma de onda da corrente de fuga e tensão aplicada em uma cadeia de isoladores (extraído de [20]).

Fontana *et. al.* [2] desenvolveram um sistema óptico de monitoração e realizaram uma série exaustiva de experimentos em laboratório e em campo para determinar as características da forma de onda da corrente de fuga diretamente correlacionadas com a possibilidade de ocorrência de *flashover* em cadeias de isoladores. Os autores identificaram a partir de experimentos em laboratório que a amplitude da componente senoidal não fornecia informação significativa da iminência de *flashover*. Por outro lado, esses autores observaram que a amplitude e taxa de ocorrência de pulsos de descargas superficiais era diretamente correlacionada à iminência de *flashover*. Experimentos em campo comprovaram que a componente senoidal, mesmo em cadeias altamente poluídas, e com alta ocorrência de descargas superficiais se mantinha estável com amplitude próxima a um valor típico de 1 mA. Isso pode ser comprovado na Figura 5, que representa a forma de onda da corrente de fuga registrada em uma cadeia de isoladores de uma torre de 500 kV localizada na Serra de Maranguape, no estado do Ceará. A umidade relativa no instante do monitoramento era 80,4 %. Apenas semiciclos positivos são detectados pelo sistema sensor. Como pode ser aí observado, há saturação da componente senoidal da corrente de fuga em aproximadamente 1 mA e existência de pulsos intensos, a grande maioria de curta duração, devido à ocorrência de descargas superficiais ao longo dos isoladores. Os pulsos mais intensos, e de mais longa duração correspondem a várias descargas parciais geradas quase que simultaneamente em vários isoladores.



**Figura 5** - Forma de onda da corrente de fuga registrada em torre de 500 kV (extraído de [2]).

Neste capítulo foi feita a descrição das principais técnicas de instrumentação para monitoração de corrente de fuga em isoladores de alta tensão e também foi apresentado o comportamento da corrente de fuga tipicamente relatado na literatura. Como observado em trabalhos anteriormente no Grupo [2]-[8], o parâmetro eficaz de avaliação do estado de poluição de isoladores é a monitoração da taxa de ocorrência de pulsos de descargas parciais identificados na forma de onda da corrente de fuga, em conjunção com a monitoração da umidade ambiente. No próximo capítulo, serão descritos os resultados obtidos neste trabalho que contribuirão para o aperfeiçoamento do sistema originalmente proposto por Fontana *et al* [2] de forma a permitir monitoração de dados via satélite.

## 4. Melhorias no Sistema de Monitoração Óptica de Descargas Parciais em Cadeias de Isoladores

Neste capítulo serão descritos os componentes do sistema de monitoração óptica de descargas parciais em isoladores de alta tensão desenvolvido no Grupo de Fotônica [2]-[7], e as melhorias que foram introduzidas no módulo de processamento do sistema bem como as adaptações realizadas para permitir a transmissão de dados via satélite [8]. Na versão anterior do módulo de processamento, os dados eram armazenados em memória *flash*, sendo acessados periodicamente no local de instalação do sistema. Esse tipo de operação era dispendioso, pois tornava necessária a mobilização de uma equipe especializada para coleta dos dados.

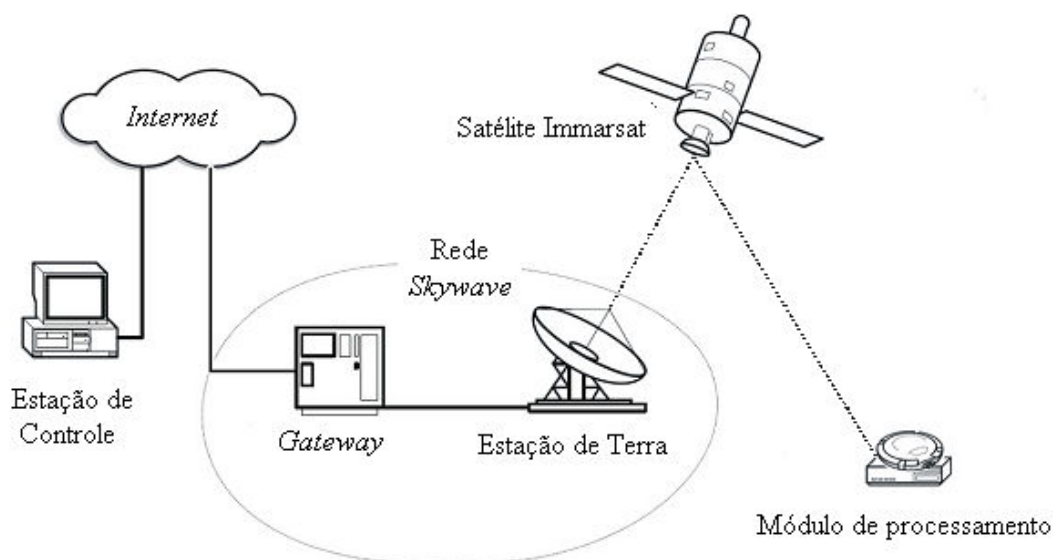
O sistema de detecção óptica utiliza um LED *pigtail* acoplado a uma fibra óptica [2]-[7]. Na nova configuração, a fibra é conectada a um módulo de processamento que foi re-projetado em relação à configuração anterior para permitir o armazenamento de novos parâmetros, incluindo a temperatura e umidade ambientes, além de operar com comunicação via satélite [8]. O sistema é eletricamente alimentado por uma bateria e um painel solar fotovoltaico. As principais características do sinal da corrente de fuga são armazenadas internamente por um microcontrolador PIC 16F877A e transmitidas via satélite. Os dados enviados são armazenados em um banco de dados e acessados via internet [8]. Todos esses refinamentos serão enfocados neste trabalho.

### 4.1. Sistema de Comunicação Via Satélite

A utilização de sistemas de telefonia analógica [24], [25], telefonia celular [22], ou até mesmo a mobilização de equipe especializada [2]-[7] são formas comumente utilizadas para realizar a aquisição das informações de corrente de fuga. Alguns problemas podem ser apontados como, por exemplo, a necessidade de uma rede de telefonia fixa ou de celular no local onde está instalado o sistema de monitoração, além da necessidade de uma equipe especializada para realizar a aquisição dos dados, o que eleva os custos do sistema de monitoramento.



Sistemas de comunicação via satélite são usados tipicamente em regiões remotas onde não existe acesso a outras formas mais baratas de comunicação [26]. A constelação de satélites utilizada para acessos às informações do terminal é privada, sendo necessário realizar a contratação de serviços de acesso e transmissão de informação. Nesse tipo de contrato é estipulada a quantidade de informação enviada e sua periodicidade de transmissão. Conforme ilustrado na Figura 6, o sistema é basicamente constituído de um satélite em órbita geoestacionária, de uma rede privada para acesso às informações do satélite e de uma estação de controle. O terminal remoto usado neste trabalho é o DRM-200L fabricado pela empresa *Skywave*. Esse terminal é constituído de um modem integrado com uma antena planar. O alto grau de integração minimiza a complexidade da instalação dele na torre de transmissão. A constelação de satélites usada é da empresa *Inmarsat*. Os dados gerados pelo módulo de processamento são enviados para o terminal DMR-200L através de uma porta de comunicação serial RS-232. Do terminal, os dados são enviados para a constelação de satélites privada de onde são retransmitidos para a estação de terra onde ficam disponíveis para serem acessados via internet. A estação de controle representa o acesso do usuário às informações armazenadas nos servidores da *Skywave*. Percebe-se que no diagrama da Figura 6, o usuário do serviço é responsável pela transmissão dos dados (módulo de processamento) e do acesso a essas informações via internet (estação de controle).



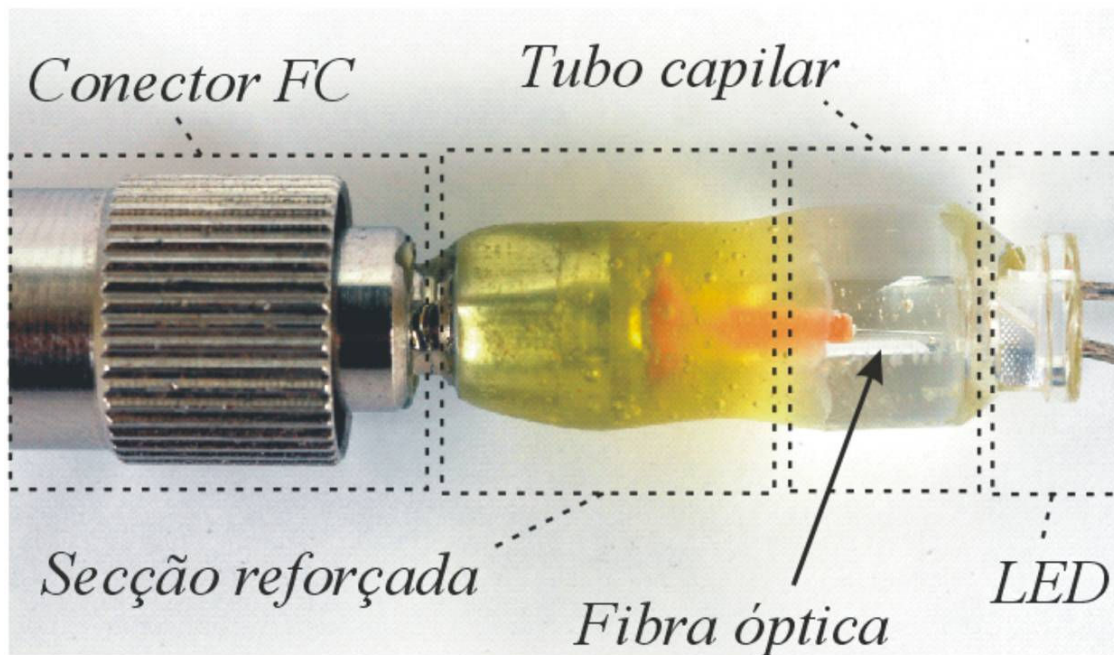
**Figura 6** - Diagrama de comunicação entre módulo de processamento e estação de controle.

O protocolo de comunicação do terminal remoto consiste na transmissão via RS-232 de um vetor, em que cada posição é ocupada por um número com representação em formato hexadecimal. Esses números indicam as configurações internas do vetor, como por exemplo, início e fim de transmissão, a mensagem propriamente dita e principalmente um código corretor de erro, denominado *checksum* que é a soma complementar da mensagem transmitida e dos números da configuração do vetor. O tamanho máximo da mensagem que pode ser transmitida por vez é de 8 bytes.

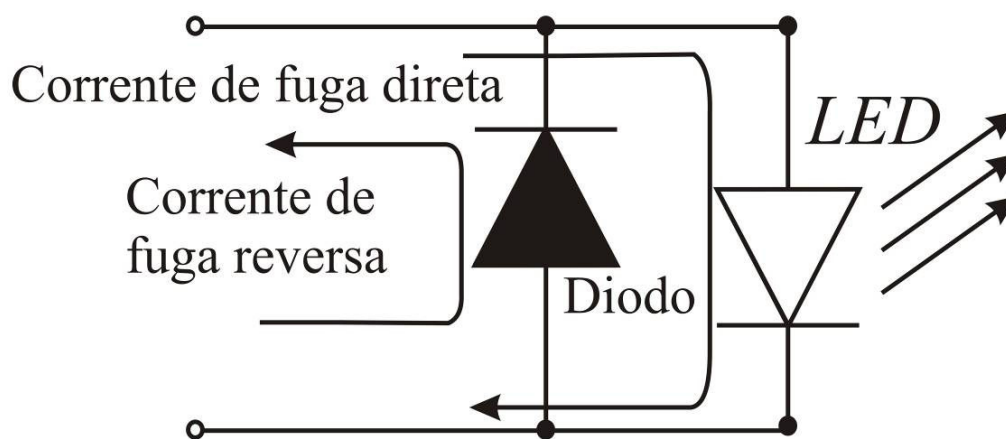
## 4.2. Sensor Óptico

O sensor óptico utilizado no sistema foi desenvolvido no Grupo de Fotônica [2]. É constituído por um LED *pigtail* fabricado a partir de um LED infravermelho que resiste a correntes máximas de 300 mA e 1 A nos regimes contínuo e pulsado, respectivamente e emite luz com comprimento de onda em torno de 840 nm. Os terminais elétricos do sensor são ligados em paralelo com os terminais do isolador mais próximo à estrutura metálica aterrada da torre. Como a resistência oferecida pelo LED à passagem de corrente é muito menor do que a resistência oferecida pelo isolador, praticamente toda a corrente de fuga flui pelo sensor.

Para um melhor acoplamento da luz emitida pelo LED na fibra, a lente de plástico do LED é polida até que a mínima distância à superfície emissora seja atingida. A superfície emissora do LED é alinhada com uma fibra multimodo de silício e uma cola curável em luz ultravioleta é utilizada para colar o LED à fibra multimodo. O outro terminal da fibra é acoplado com um conector FC-PC. Uma fotografia do sensor é mostrada na Figura 7(a). Para a proteção do sensor é colocado um diodo de chaveamento para evitar a circulação de corrente de fuga reversa no sensor, como pode ser observado na Figura 7(b). As informações mais detalhadas sobre o processo de fabricação podem ser encontradas nas Refs [2] e [5].



(a)



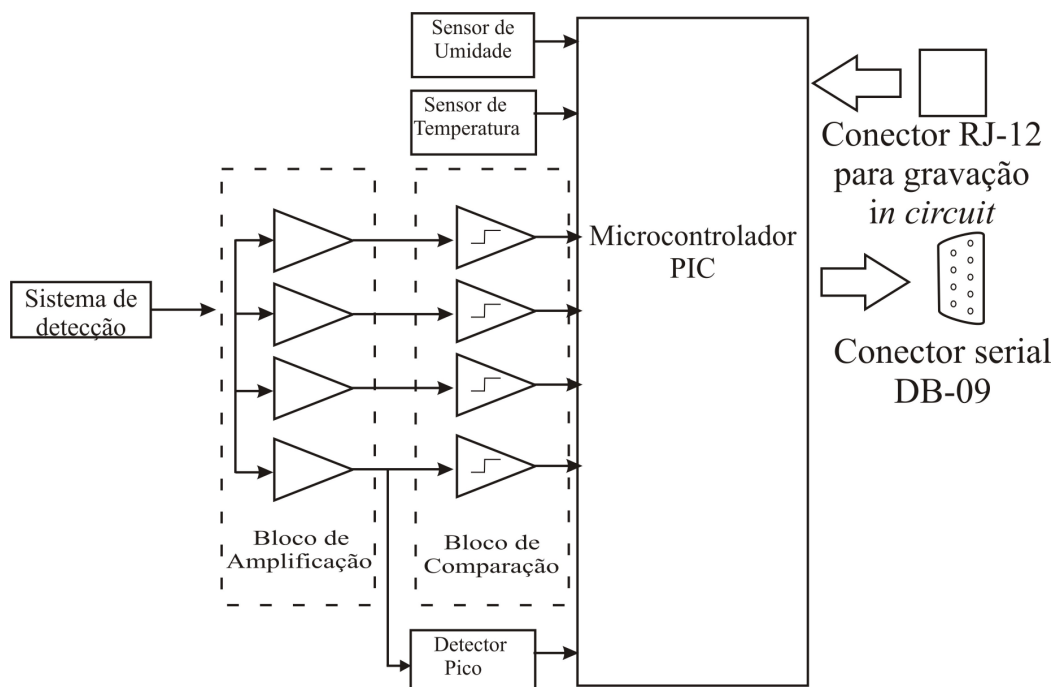
(b)

**Figura 7** – (a) Fotografia do sensor óptico e (b) circuito de proteção do sensor óptico (extraído de [4]).

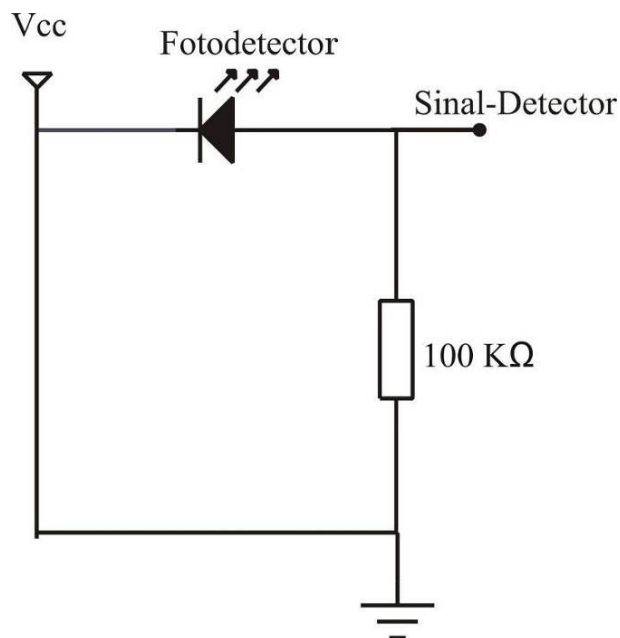
### 4.3. Concepção Eletrônica do Sistema de Monitoramento de Corrente de Fuga

Nessa nova versão do módulo de processamento (MP), outro nível limiar de corrente de fuga de 40 mA foi inserido, além de um sensor de temperatura e um circuito detector de pico máximo de corrente. As transmissões das informações são realizadas por um sistema de comunicação via satélite. O módulo inclui dois conectores BNC fêmea para monitoração de corrente de fuga em tempo real para dois níveis de corrente. Também está incluído no módulo um conector serial DB-9 responsável pela interface microcontrolador/modem via satélite e um conector RJ-12, responsável pela programação serial *in-circuit*, permitindo uma rápida atualização do *software*. O diagrama de blocos do circuito é mostrado na Figura 8.

O sistema de detecção mostrado na Figura 8 é constituído de um fotodetector de silício do tipo PIN ligado em série com um resistor de 100 k $\Omega$ . Foi escolhido um fotodetector com área ativa de 13 mm<sup>2</sup> garantindo a absorção de toda a distribuição espacial da luz guiada pela fibra. O tempo de resposta do sistema de detecção é de 20  $\mu$ s. A Figura 9 ilustra o sistema de detecção.



**Figura 8** - Diagrama de blocos do módulo de processamento.



**Figura 9** - Desenho do fotodetector e esquema elétrico de ligação.

O sistema de amplificação mostrado na Figura 8 é formado por quatro amplificadores operacionais de rápida resposta, na configuração não inversora. Cada amplificador possui um potenciômetro para ajuste de ganho independente. Desta forma é possível analisar quatro faixas de corrente de forma independente oriundas do fotodetector. Cada amplificador está conectado à entrada de um comparador com histerese.

Esses três estágios do MP são responsáveis pela análise da magnitude da corrente de fuga. Com base em experimentos de laboratório, análise da literatura e em experiências de campo, os valores de pico  $I_p$  dos pulsos de corrente de fuga relacionados com descargas superficiais são classificados em quatro faixas de valores, assim definidas:

- Faixa  $N_1$ :  $I_p > 5$  mA
- Faixa  $N_2$ :  $I_p > 10$  mA
- Faixa  $N_3$ :  $I_p > 20$  mA
- Faixa  $N_4$ :  $I_p > 40$  mA

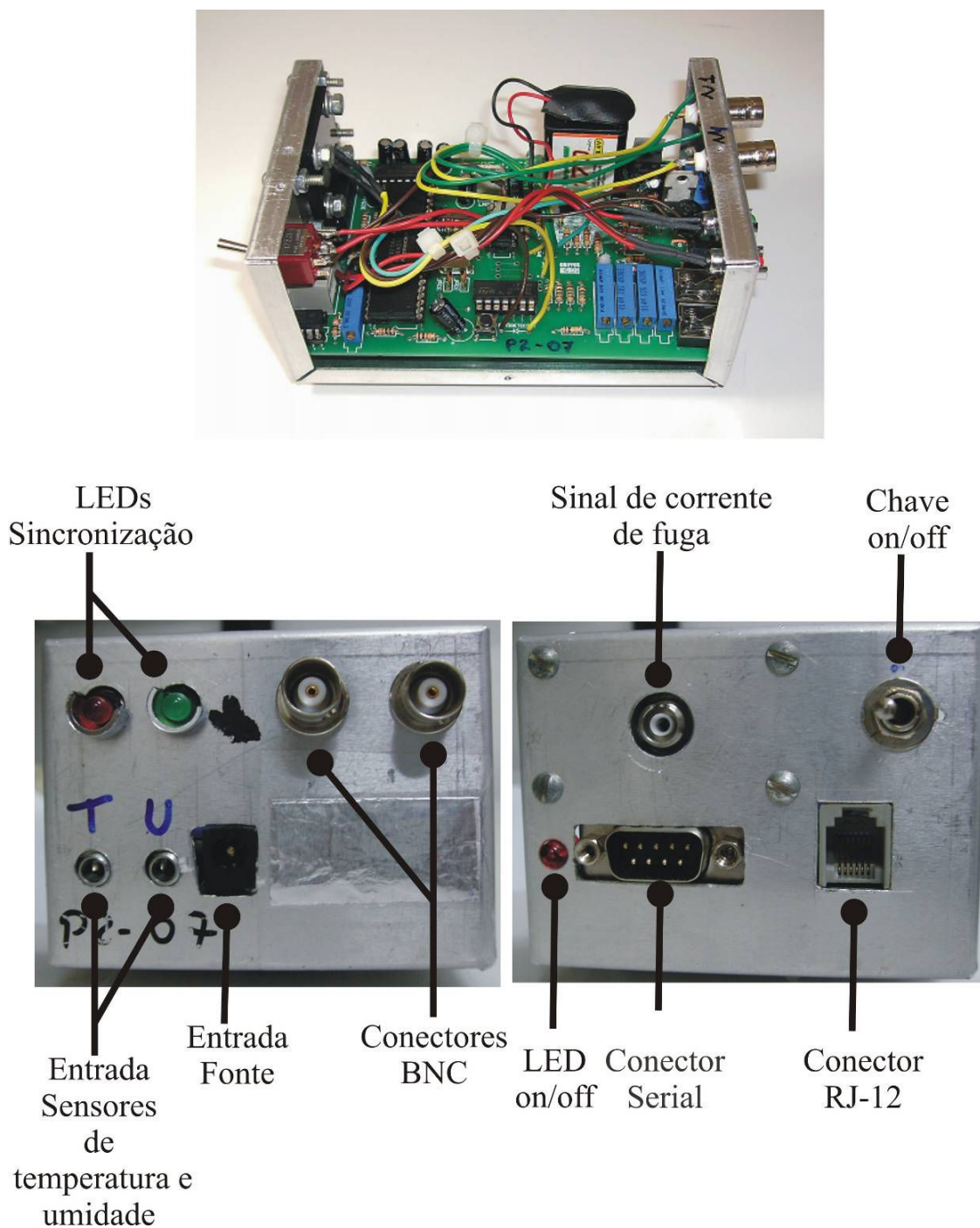
O número de picos registrados por unidade de tempo em cada faixa depende do grau de poluição em uma dada cadeia de isoladores e da umidade relativa do ar. Estudos de detalhados estão em andamento no Grupo de Fotônica para correlacionar esses parâmetros com a umidade e o grau de poluição de uma dada cadeia de isoladores.

As saídas dos comparadores são conectadas com um microcontrolador PIC 16F877A fabricado pela *Microchip*® e as transições do sinal de saída dos comparadores geram interrupções no programa de controle do microcontrolador. Além dos comparadores, um sensor de umidade, um sensor de temperatura, um circuito para detecção de pico máximo de corrente são conectados ao conversor A/D do microcontrolador. O sensor de temperatura não incluído em versões anteriores do MP [4]–[7] é utilizado para uma caracterização mais adequada do ambiente vizinho ao isolador.

Foi projetado o desenho para a confecção do circuito impresso do MP. A placa devidamente construída foi colocada em uma caixa de alumínio customizada para a fixação de chaves, as saídas do conector serial, RJ-12, BNC e dos sensores de temperatura e umidade além dos LEDs de sinalização de circuito energizado e indicadores de sincronismo do MP com o modem. Na Figura 10 é mostrado o módulo de processamento inserido na caixa de alumínio, bem como os demais componentes.

O MP e o sistema de comunicação via satélite são alimentados por um sistema fotovoltaico, constituído de um painel solar, um controlador de carga e uma bateria. O painel solar é responsável pela conversão de energia solar em energia elétrica, uma bateria selada para o armazenamento do excedente de energia gerada pelo painel solar para suprir eletricamente o MP e o modem via satélite no período noturno e um controlador de carga que possui a finalidade de proteger a bateria para evitar a sua operação com subcarga e sobrecarga.

O dimensionamento do sistema fotovoltaico depende da potência ou corrente consumida pela carga. Testes de laboratório foram realizados e foi observado que o MP consome uma potência de 0,225 W de forma contínua e que o modem via satélite consome em torno de 1 W quando não realiza transmissão e em torno de 9,6 W quando realiza transmissões, cuja duração é de 2 segundos. O sistema fotovoltaico foi superestimado para evitar interrupções no suprimento de energia solar, permitindo ao sistema superar dias com pouca luminosidade.



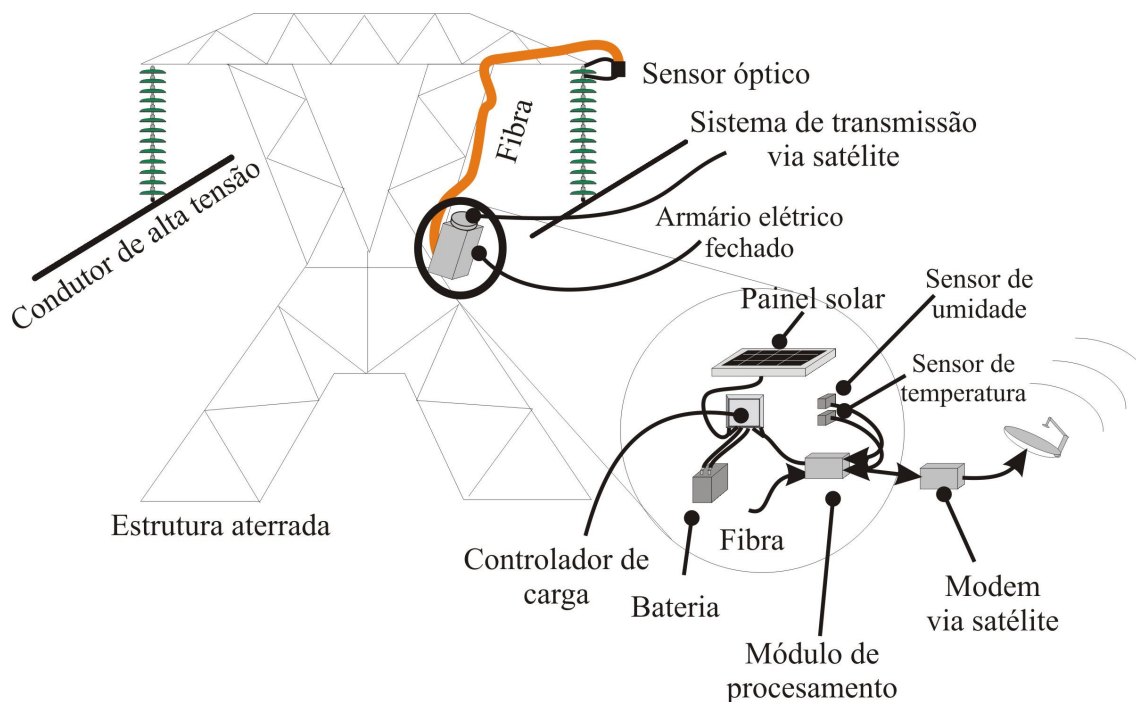
**Figura 10** - Fotografias das vistas superior e laterais do módulo de processamento montado em carcaça de alumínio.

A Figura 11 ilustra o esquema de conexão do sistema completo de monitoramento de corrente de fuga em cadeia de isoladores de alta tensão com transmissão via satélite. Como pode ser observado na Figura 11, o sistema de monitoramento ficará exposto ao ambiente, sendo necessário protegê-lo contra oxidação e intempéries climáticas. As torres de alta tensão são um ambiente com fortes campos eletromagnéticos e por isso o sistema deve ser imune a

interferências dessa natureza. Dados esses requisitos, foi utilizado um gabinete metálico galvanizado, típico de instalações elétricas, devidamente adaptado, conforme mostrado na Figura 12. Foram feitas modificações em sua estrutura para o devido acondicionamento do módulo de processamento, dos sensores, do modem, do sistema de alimentação fotovoltaico, além de permitir a sua fixação na torres. Devido à existência de vários perfis de construção nas torres de transmissão foi necessário inserir no gabinete quatro alças de aço galvanizadas, mostradas na Figura 12(c), para permitir a utilização de cantoneiras facilitando a fixação do gabinete na estrutura da torre.

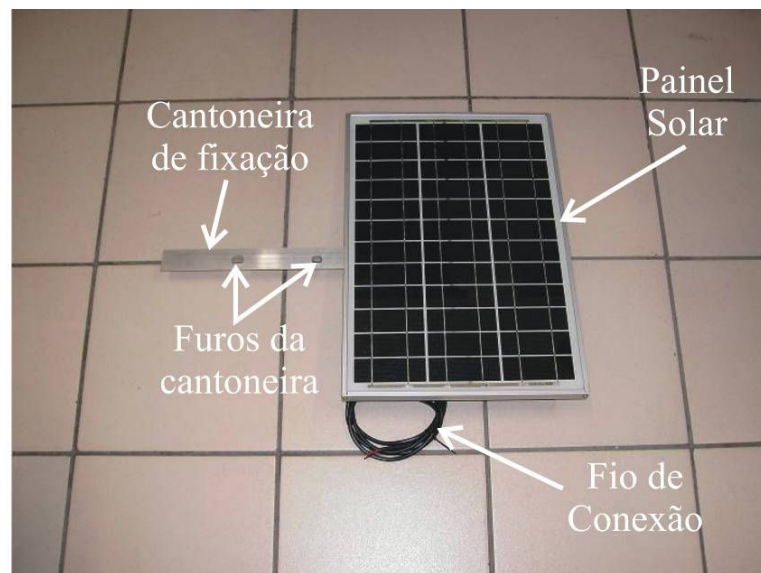
O modem deve ser colocado em locais sem qualquer tipo de obstáculo na linha de visada da direção do satélite para evitar mau-funcionamento. Duas formas de fixação do modem foram cogitadas: a primeira seria construir um cabo blindado que iria do gabinete até o local de fixação do modem na torre; a segunda seria fixar o modem diretamente no gabinete. A primeira possibilidade foi descartada, pois os intensos campos elétricos existentes na torre poderiam produzir interferência na comunicação serial, comprometendo a transmissão de pacotes. Além disso, o comprimento desse cabo teria que ser limitado a poucos metros, segundo especificações do fabricante. A segunda opção foi adotada devido à blindagem eletromagnética oferecida pelo gabinete. Devido a essa escolha, o gabinete deve ser colocado na posição mais alta possível da torre e não devem existir anteparos metálicos para não interferir na transmissão de dados. Conforme mostrado na Figura 12(b), o modem possui um disco plástico utilizado para fazer sua fixação em superfícies rígidas. Esse disco foi fixado no gabinete por uma cola plástica especial e o modem é preso por parafusos galvanizados envolvidos com anéis de borracha para propósitos de vedação. O acabamento foi feito com silicone especial que suporta altas temperaturas, reforçando a vedação.



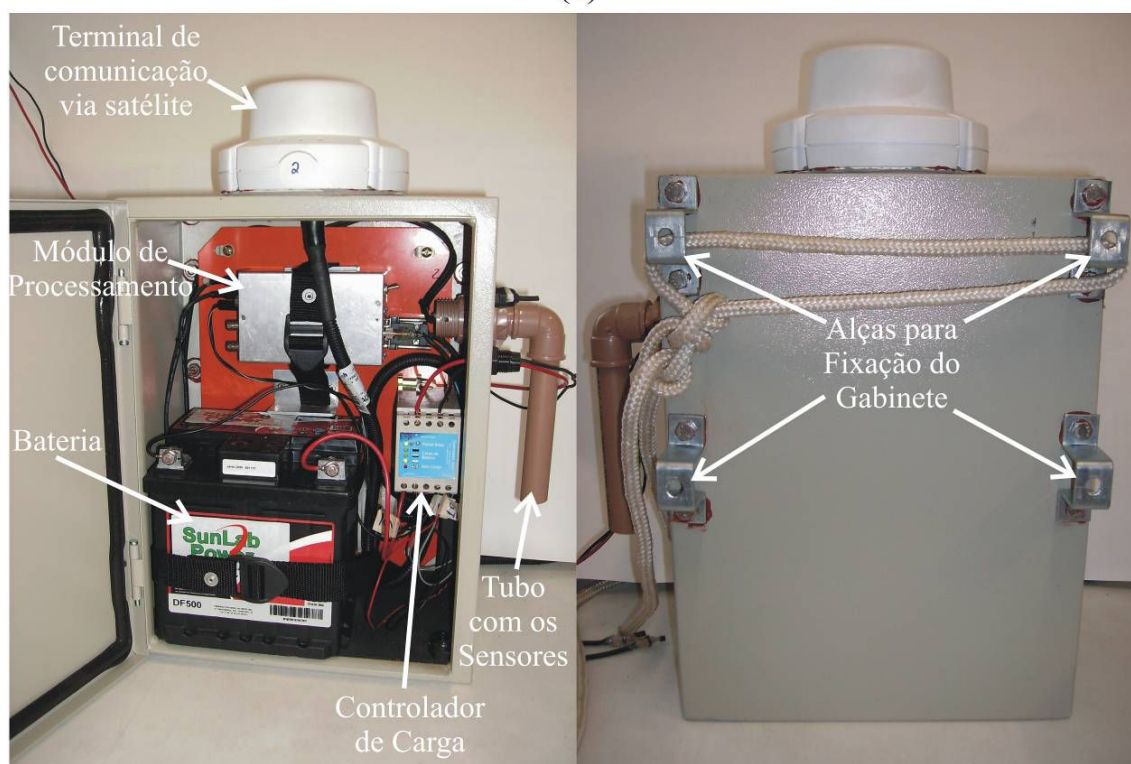


**Figura 11** - Diagrama esquemático o sistema para monitoramento de corrente de fuga com transmissão via satélite (extraído de [4]).

O painel solar, mostrado na Figura 12(a), deve se posicionado voltado para o hemisfério norte, para otimizar o tempo de insolação, aumentando a quantidade de energia fornecida ao sistema e deve ter uma pequena inclinação para evitar acúmulo de sujeiras. Os cabos de alimentação do painel são lançados do painel até o controlador de carga, dentro do gabinete (Figura 12). Para a fixação do painel, foi inserida uma cantoneira com furos para fixar o painel com os parafusos da estrutura da torre. Os sensores de temperatura e de umidade não podem ter contato direto com a chuva, acarretando leitura imprecisa de seus respectivos valores. Para solucionar esse problema, esses sensores são acondicionados em um tudo de PVC em formato de “L”, localizado no lado de fora do gabinete. A bateria, o módulo de processamento e o controlador de cargas colocados dentro do gabinete e preso por presilhas para fixação. Experimentos preliminares de vedação mostraram a necessidade de proteção nos gabinete, pois o interior dos mesmos ficou molhado. Diante disso, foram confeccionadas capas de couro customizadas para o gabinete, com a finalidade de evitar a presença de água em seu interior.



(a)



(b)

(c)

**Figura 12** - (a) Painel solar com a cantoneira para fixação na torre de transmissão. Face frontal (b) e posterior (c) do gabinete que contém a bateria, o controlador de carga, o módulo de processamento e o terminal de comunicação via satélite.

#### 4.4. *Software do Módulo de Processamento*

Foi desenvolvido um programa para controlar o microcontrolador com os seguintes atributos:

- Identificar a ocorrência de pulsos de corrente de fuga para cada faixa de valores de pico pré-estabelecida ( $N_1$  a  $N_4$ ) e registrar o número de ocorrências em cada faixa por hora.
- Realizar aquisição dos valores de umidade, temperatura e pico máximo de corrente e obter a média dos valores de temperatura e umidade a cada 15 minutos.
- Solicitar ao modem o UTC (*Universal Time Clock*) para sincronizar com o relógio interno do microcontrolador.
- Armazenar localmente as informações em memória não volátil.
- Organizar as informações a serem transmitidas em formato adequado para a transmissão pelo modem via satélite. Dois pacotes de informação são organizados, um deles contém as informações de contagem das faixas  $N_2$  a  $N_4$  e o outro pacote possui as informações de contagem na faixa  $N_1$  e também as informações de temperatura, umidade e máximo pico de corrente.
- Transmitir esses pacotes a cada meia hora.

O fluxograma do programa desenvolvido está mostrado na Figura 13. O primeiro passo do programa é aguardar quatro minutos, antes de executar qualquer ação. Esse atraso é necessário, pois é o tempo requerido pelo modem para poder operar de forma correta ao ser energizado. Em seguida, o programa solicita ao modem o tempo do Relógio Universal (UTC, *Universal Time Clock*). O UTC é a base de tempo utilizada em todos os sistemas de comunicação. São realizadas até cinco tentativas para obter o UTC, caso todas falhem, um LED de sinalização vermelho é acionado indicando que não ocorreu sincronização e o programa começa a operar com a base de tempo estabelecida pelo cristal acoplado no microcontrolador. Caso a solicitação seja bem-sucedida, um LED de sinalização verde é acionado indicando que o sincronismo foi realizado com sucesso.

É necessário realizar sincronização com o UTC devido às imperfeições do oscilador de cristal de 20 MHz conectado ao microcontrolador. Essas imperfeições acarretam um desvio de frequência. Em trabalhos anteriores [2]–[7] foi verificado que, em um período de dois meses, o cristal apresenta um atraso de quatro horas. A cada 15 minutos uma nova sincronização é realizada, para evitar possíveis atrasos de tempo devido a limitações do microcontrolador.

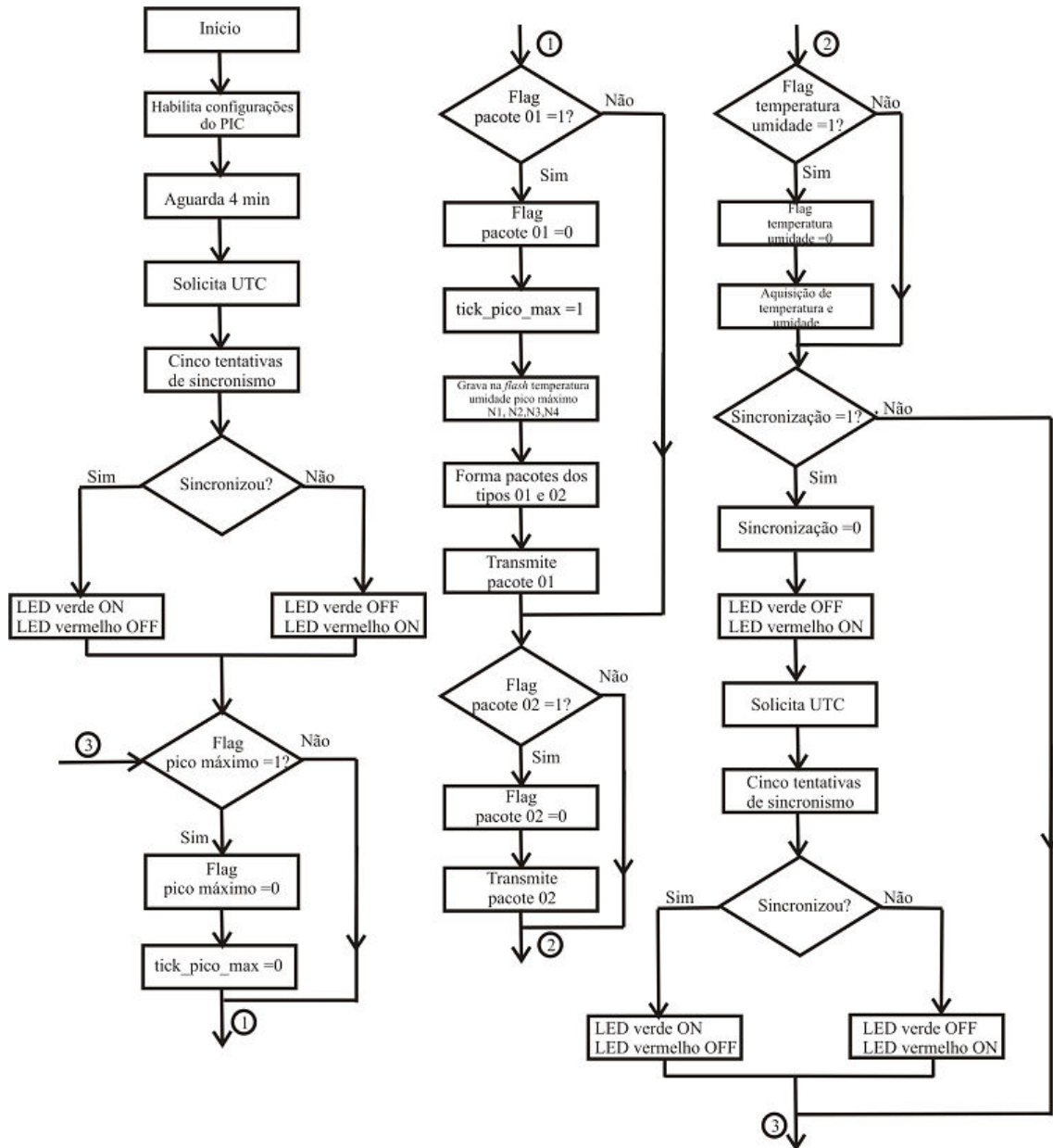
No *software* desenvolvido em versões anteriores do módulo de processamento (MP), era registrado o número de pulsos de corrente com valores de pico em uma dada faixa por hora. Para verificar a existência de atividade, o programa analisava a ocorrência de mudança de estado nas entradas do microcontrolador conectadas ao comparador. Na nova versão do MP, a verificação da ocorrência de pulsos de corrente de fuga é feita com o emprego de rotinas de interrupção. A utilização desses tipos de rotinas é uma estratégia eficaz para analisar efeitos aleatórios evitando que o microcontrolador cheque periodicamente se um dado evento ocorreu, melhorando o desempenho do programa.

Quando um pulso de corrente de fuga é registrado na entrada do microcontrolador, o fluxo do programa é interrompido para que as devidas providências sejam tomadas no menor tempo possível após a passagem do evento, que no caso deste trabalho, é o incremento de um contador. Além disso, o PIC 16F877A possui contadores de eventos externos e que só geram interrupções quando o contador atinge a sua capacidade limite (programada ou física), diminuindo o número de interrupções necessárias para a contagem dos eventos. Assim, ocorrências nas faixas  $N_1$  e  $N_2$  são analisadas por esse tipo de contador de forma independente, já que as ocorrências nessas faixas são altas e aquelas nas faixas  $N_3$  e  $N_4$  são analisadas por rotinas de interrupção que geram uma interrupção a cada ocorrência do evento. Após uma hora, a quantidade registrada de pulsos de corrente de fuga é verificada nos contadores de cada tipo de tratamento de interrupção.

A tensão de saída dos sensores de temperatura e umidade e aquela associada ao máximo pico de corrente são digitalizadas pelo conversor A/D do microcontrolador. A cada 15 minutos, as tensões dos sensores e do detector de pico máximo são obtidas pelo conversor. Obtém-se assim o maior valor de pico de corrente dentre os máximos registrados e a média horária de temperatura e umidade.

Quando todas as informações são obtidas pelo microcontrolador, elas são armazenadas em sua memória não volátil. Todavia, como se trata de uma memória de capacidade reduzida, é necessário aperfeiçoar o processo de gravação. A memória *flash* é constituída de registradores de 14 bits, com isso, foi utilizado o processo de deslocamento de bits, utilizado para desprezar os bits menos significativos dos valores de temperatura, umidade e pico máximo de corrente. O descarte desses bits menos significativos não representa em erro de leitura desses valores, uma vez que foi verificado que são necessários apenas 8 bits, 10 bits e 8 bits para representar os valores de temperatura, umidade e máximo pico de corrente, respectivamente. Os bits excedentes de cada registrador são utilizados para armazenar os bits mais significativos das contagens em  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  e  $N_4$ , fazendo com que essas grandezas possuam uma resolução de 18 bits, o que representa um valor máximo de contagem de 262.143 ocorrências de pulsos de corrente em uma hora, possibilitando registrar um pulso de corrente a cada 16,7 ms durante uma hora.

Posteriormente, essas informações são organizadas em vetores de 8 bytes, de acordo com os padrões adotados pelo modem via satélite e transmitidas a cada meia hora. Percebe-se que todas as informações referentes à corrente de fuga possuem capacidade de 16 bytes, daí a necessidade de realizar uma transmissão a cada meia hora. Já que são transmitidas periodicamente as mesmas informações, foi designado o nome de pacotes para se referir às mensagens transmitidas. Existem dois tipos de pacotes, ambos com um bit de identificação. O primeiro é o pacote do tipo 01, que irá transmitir as informações da contagem de  $N_1$ , temperatura, umidade relativa e pico máximo de corrente e o pacote tipo 02 que irá transmitir as informações de  $N_2$ ,  $N_3$  e  $N_4$ .



**Figura 13** - Fluxograma do programa principal do microcontrolador.

Como pode ser observado na Figura 13, o programa principal do microcontrolador basicamente realiza testes lógicos de determinadas variáveis para que determinadas rotinas sejam executadas. Essas rotinas foram desenvolvidas fora do programa principal em funções auxiliares. Após a etapa de sincronização é verificado sequencialmente o estado lógico das seguintes variáveis:

- *Flag pico máximo*, indicando que as rotinas responsáveis pela aquisição do valor do máximo pico de corrente devem ser executadas.
- *Flag pacote 01*, indicando que as rotinas responsáveis pelo processo de gravação das informações referentes à  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ ,  $N_4$ , temperatura, umidade e máximo pico de corrente devem ser executadas. Posteriormente as rotinas responsáveis pela organização dessas informações para a formação dos pacotes tipo 01 e 02 devem ser executadas. Por fim, ocorre a transmissão do pacote tipo 01.
- *Flag pacote 02*, indicando a transmissão do pacote tipo 02 deve ser executada.
- *Flag temperatura e umidade*, indicando que as rotinas responsáveis pela aquisição dos valores de temperatura e umidade devem ser executadas.
- *Sincronização*, indicando que uma nova solicitação do UTC deve ser realizada.

Um aplicativo com banco de dados e interface gráfica foi desenvolvido no Grupo de Fotônica do Dep. de Eletrônica e Sistemas da UFPE, para armazenar as informações e permitir a sua representação gráfica ou a listagem dos parâmetros medidos. O aplicativo para Avaliação de Desempenho Elétrico de Cadeias de Isoladores (ADECI) será referenciado por sua sigla nos parágrafos seguintes.

O ADECI realiza uma conexão segura de internet com os servidores da *Skywave* realizando o *download* das informações transmitidas pelo MP para o satélite e que são armazenadas nos servidores. As informações são armazenadas em um banco de dados e o programa é capaz de realizar o *download* das informações transmitidas de vários modems via satélite simultaneamente.

A Figura 14 mostra a interface gráfica do ADECI. As informações do banco de dados são acessadas via internet. Para tal, é necessário que o usuário possua permissão através de um nome de usuário e senha. É possível selecionar o ponto de monitoração para visualização dos registros. É também possível escolher o intervalo de tempo de análise, indicando o período de tempo inicial e final, conforme ilustrado na Figura 14. As ocorrências nas faixas  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  e  $N_4$ , o máximo pico de corrente juntamente com a temperatura e umidade podem ser representadas de forma gráfica ou tabular.

Diversos experimentos de laboratório e de campo foram realizados para verificar a eficácia do sistema de monitoramento. Os resultados dessa investigação estão descritos nos próximos capítulos.

### ADECI

Login:   
 Senha:

(a)

OPÇÕES DE CADASTRO

- CADASTRAR USUÁRIO
- REMOVER USUÁRIO
- ATUALIZAR USUÁRIO
- ALTERAR SENHA
- CONSULTAR USUÁRIO

MONITORAMENTO DE PICOS

- INSERIR SENSOR
- VISUALIZAR SENSORES

CONFIGURAÇÃO DOS SENSORES

- CONFIGURAR SENSORES
- ATUALIZAR CONFIGURAÇÃO
- VISUALIZAR CONFIGURAÇÃO

### Escolha o sensor a ser monitorado:

Nome da It	Código de It	Número da torre	Nível de alerta	Ultima sugestão de lavagem
terminal 1 de testes em lab at	qwe-ewq-wq	144/10	<span style="color: green;">●</span>	Inexistente
terminal 2 de testes em campo	qwe-ewq-wq	144/10	<span style="color: green;">●</span>	Inexistente
terminal 3 de testes em campo	qwe-ewq-wq	144/10	<span style="color: green;">●</span>	Inexistente
terminal 4 de testes em campo	qwe-ewq-wq	144/10	<span style="color: green;">●</span>	Inexistente
terminal 5 de testes em campo	qwe-ewq-wq	144/10	<span style="color: green;">●</span>	Inexistente
terminal 6 de testes em campo	qwe-ewq-wq	144/10	<span style="color: green;">●</span>	Inexistente
terminal 7 de testes em campo	qwe-ewq-wq	144/10	<span style="color: green;">●</span>	Inexistente

(b)

OPÇÕES DE CADASTRO

- CADASTRAR USUÁRIO
- REMOVER USUÁRIO
- ATUALIZAR USUÁRIO
- ALTERAR SENHA
- CONSULTAR USUÁRIO

MONITORAMENTO DE PICOS

- INSERIR SENSOR
- VISUALIZAR SENSORES

CONFIGURAÇÃO DOS SENSORES

- CONFIGURAR SENSORES
- ATUALIZAR CONFIGURAÇÃO
- VISUALIZAR CONFIGURAÇÃO

[Visualizar Atividades](#) | [Visualizar Comentários](#) | [Visualizar Datas de Intervenção](#)  
[Alterar dados do Sensor](#) | [Inserir Comentário](#) | [Inserir Data de Intervenção](#) | [Detalhes](#)

Período:   a

Níveis a serem visualizados:

- N1 > 5 mA
- N2 > 10 mA
- N3 > 20 mA
- N4 > 40 mA
- PICO MÁXIMO

Modo de visualização:

Gráfico  
 Tabela

Escala de tempo:

(c)

**Figura 14** - Tela gráfica inicial do ADECI. (a) Solicitação de login e senha. (b) Lista de sensores que podem ser visualizados. (c) Visualização de atividade de um determinado sensor.



## **5. Experimentos em Laboratório e em Rede Local**

Neste Capítulo são descritos os principais resultados obtidos em experimentos de laboratório para determinar o desempenho do sistema de transmissão via satélite. São também descritos os experimentos e resultados obtidos em uma rede local de sistemas instalados em torres de alta tensão visando testar a vulnerabilidade dos sistemas em ambientes externos.

### **5.1. Experimentos em Laboratório**

Visando reproduzir ao máximo as condições que seriam encontradas em campo, mas, ainda assim, manter o experimento em ambiente controlado, um sistema foi instalado no laboratório de sensores ópticos do Grupo de Fotônica, Dep. de Eletrônica e Sistemas da UFPE. O laboratório fica localizado no quarto andar do prédio de Engenharia do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE. O painel solar foi instalado sobre a cobertura do prédio, o modem foi colocado no lado de fora da janela do laboratório. Para simular pulsos de corrente semelhantes àqueles observados em experimentos de campo, foi construído um oscilador biestável a partir do circuito integrado 555 [8]. Esse circuito serviu assim como fonte de corrente entre os terminais do sensor óptico. Esses experimentos tiveram também a finalidade de verificar se as medidas da latência média, contagem de pulsos, umidade relativa, temperatura e de máximo pico de corrente estavam coerentes, além de averiguar a carga da bateria e estado de conservação do painel solar e modem.

#### **Latência do Sistema de Transmissão de Dados**

Latência é a diferença de tempo entre o início de um evento e o momento em que seus efeitos se tornam perceptível. Para o sistema sob investigação representa a diferença entre o instante de tempo de chegada no servidor e aquele de envio pelo sistema sensor, do pacote de dados transmitido pelo sistema.

É importante analisar o comportamento temporal da latência, pois a constelação de satélites atende a uma grande quantidade de modems cuja demanda pode variar ao longo do dia. Durante o período de testes o sistema realizava uma transmissão a cada 30 minutos

totalizando 1440 transmissões em um mês. Porém, para realização de manutenções corretivas, o sistema foi desligado algumas vezes durante o mês de testes totalizando 1296 transmissões com sucesso. Desse total de transmissões, 09 pacotes foram perdidos, 0,7% do total e a latência de 1287 pacotes foi medida.

A latência média foi de 3,07 minutos, com a maior e menor latência registrada tendo sido de 17 e 1 minuto, respectivamente. A Figura 15 apresenta em detalhe a latência média da transmissão via satélite em cada hora do dia. Para determinação da latência em uma dada hora do dia, como ilustrado na Figura 15, foi realizada a média mensal da latência na hora correspondente.

Observa-se na Figura 15 que no intervalo entre as 8:30 e as 14:30 horas, a latência é maior do que três minutos e meio. Um provável tráfego intenso no satélite de comunicação no horário mencionado deve ter provocado a latência acima da média. Como foi mencionado anteriormente, ocorre a transmissão de um pacote de dados a cada meia hora. Assim, uma latência média que varie em torno de dois minutos e meio a quatro minutos não compromete a eficácia do sistema de comunicação via satélite, pois essa faixa de valores é bem inferior ao tempo estipulado para transmissão de pacotes.

### **Taxa de Perda de Pacotes**

Como descrito na seção anterior, por conta de manutenções corretivas o número de pacotes transmitidos foi de 1296 em um mês com nove perdas, ou seja, 0,7%. Caso o sistema de telemetria apresente uma alta taxa de perda de pacotes no decorrer do tempo a descontinuidade de informações poderá comprometer a análise e interpretação do estado de isolamento das cadeias de isoladores monitoradas. Caso haja uma concentração de perda de pacotes consecutivos, um período isolado com umidade alta que poderia revelar uma alta poluição seria omitido não revelando a necessidade de manutenção. Por isso, para esse experimento em laboratório foi analisado o número de pacotes transmitidos e o número de pacotes perdidos em cada dia do experimento. O resultado pode ser visualizado na Figura 16.

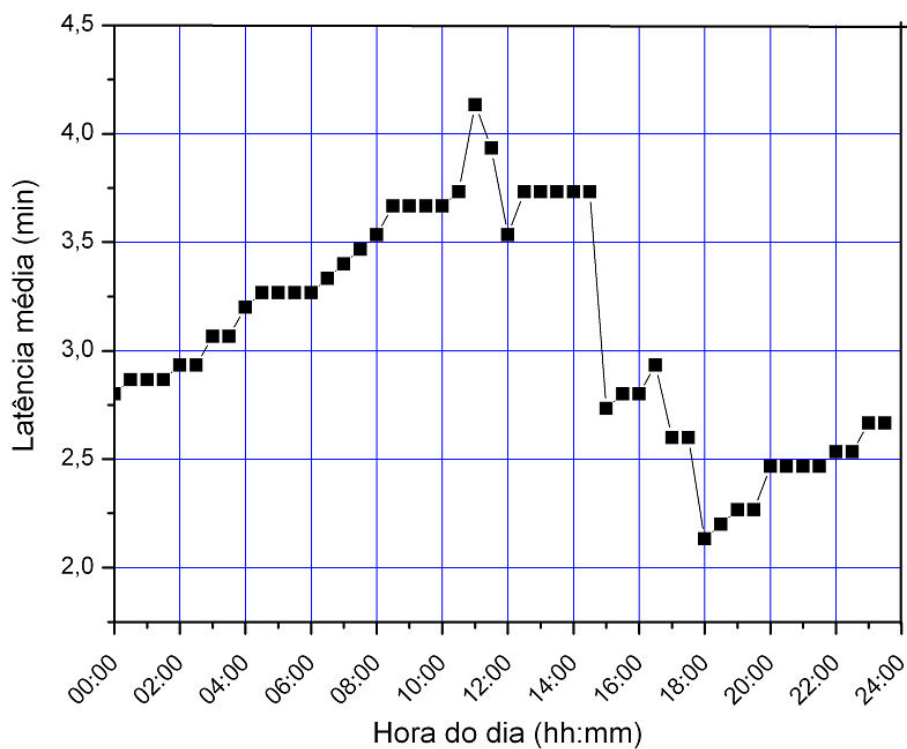


Figura 15 - Gráfico de latência média em função da hora do dia.

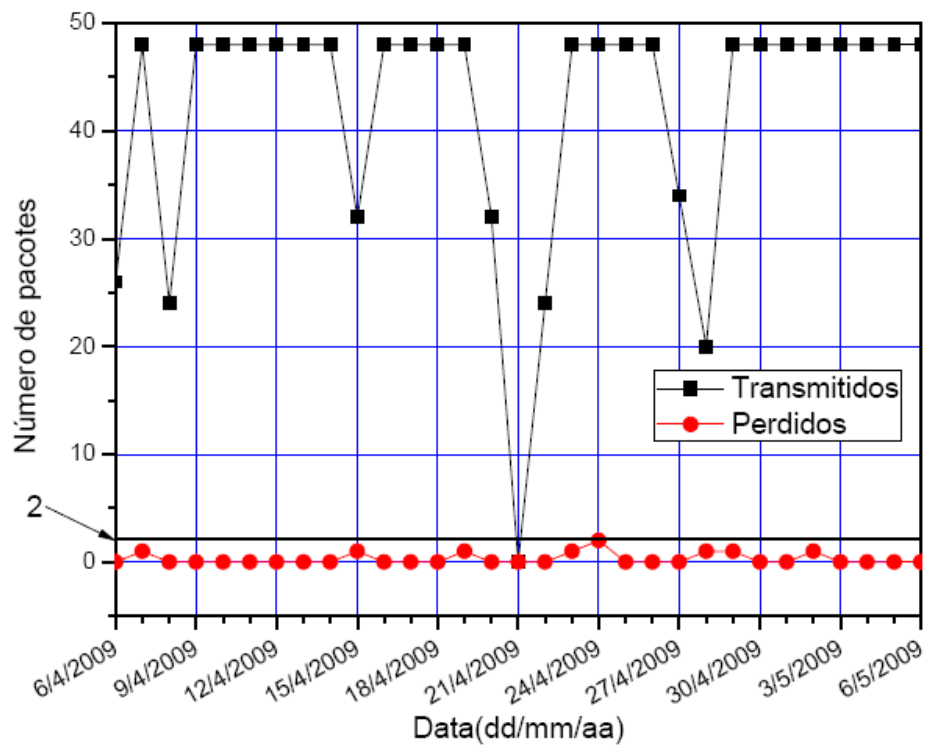


Figura 16 - Número de pacotes transmitidos e número de pacotes perdidos durante o mês de teste.

O maior número de pacotes perdidos em um único dia foi dois e ocorreu em 24/04/2009 como ilustrado na Figura 16. A taxa de perdas ilustrada na Figura 16 não compromete a eficácia do sistema de telemetria já que uma taxa de perda máxima de dois pacotes em 48 transmitidos por dia não acarreta em falha na análise gráfica das informações referentes à corrente de fuga, uma vez que, como as perdas são pontos isolados, a tendência das informações grafadas pode ser verificada.

### **Teste de Controle do Programa do Módulo de Processamento**

No mês de testes o *software* residente no microcontrolador para aquisição, armazenamento e tratamento dos dados referentes às características da corrente de fuga também foi testado. Uma fonte de corrente de pulsos quadrados e amplitude alta o suficiente para ultrapassar os quatro níveis de comparação foi usada para alimentar o sensor óptico. As contagens de pulsos de corrente por hora foi observada para a calibração do sistema de contagem.

Como se observa na região I delimitada na Figura 17, as faixas de classificação apresentavam números de pulsos de corrente diferentes devido aos erros de contagem descritos anteriormente. A partir do 7º dia de experimento, a contagem dos pulsos se tornou a mesma em todas as faixas, como pode ser observado na região II da Figura 17. Ainda nessa região, entre o 10º e o 11º dia de experimento, um erro na configuração da fonte de corrente fez com que ocorressem pulsos apenas na faixa  $N_4$  e a partir do 15º dia de experimento, a fonte de corrente foi desligada para verificar se não haveria contagem de pulsos em todas as faixas. No final do experimento a fonte foi novamente ligada para gerar pulsos com amplitude na faixa  $N_2$ , com a finalidade de verificar ocorrências de pulsos de corrente apenas nas duas faixas inferiores. Isso pode ser observado na região III da Figura 17.

O sensor de temperatura utilizado é o LM35 da *National Semiconductor*®. Esse sensor possui uma relação linear entre a tensão de saída e a temperatura monitorada. Foi utilizado um multímetro equipado com um termopar para verificar concordâncias entre o valor de temperatura registrada no multímetro e a tensão de saída do LM35.

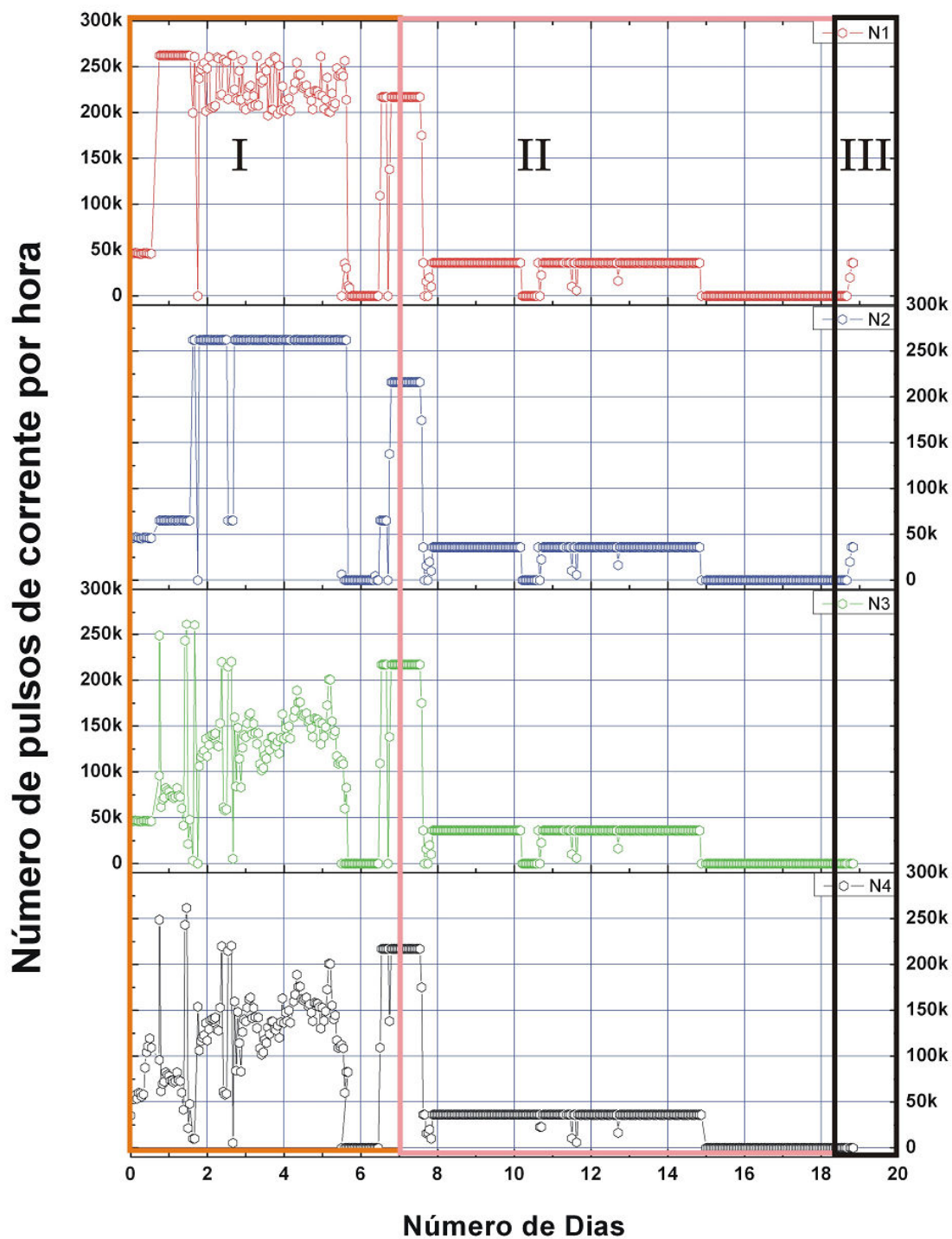
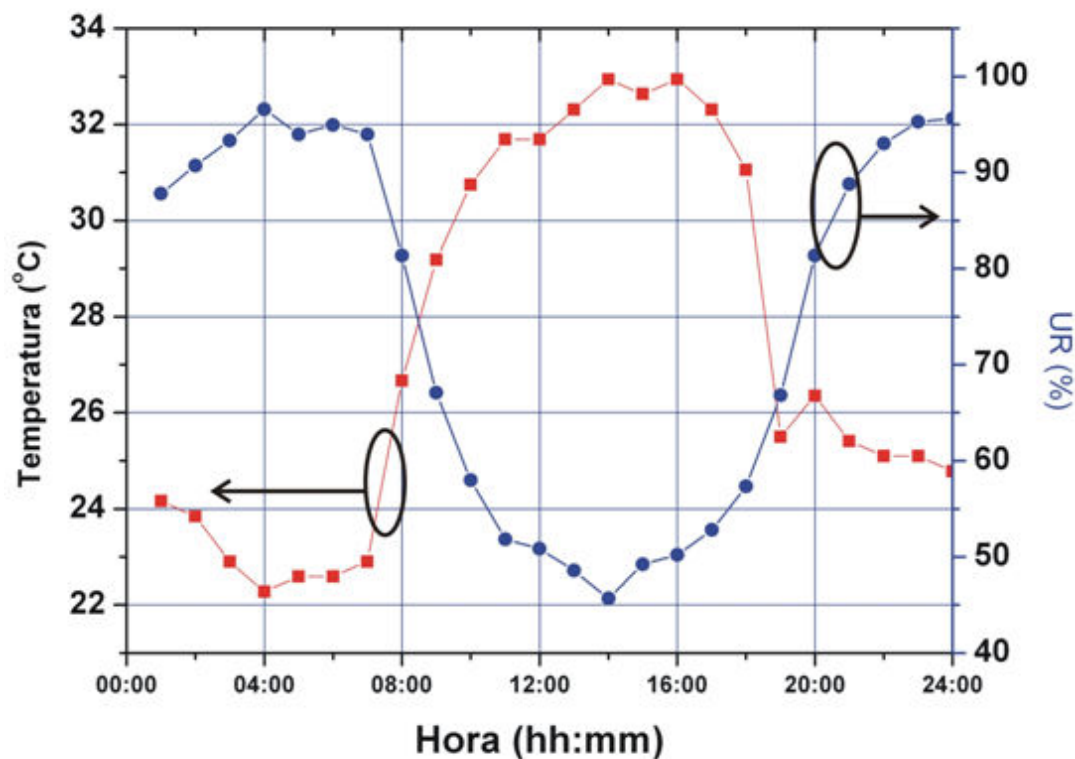


Figura 17 - Gráfico da taxa de pulsos de corrente em função do tempo do teste de laboratório, com as regiões I, II e III indicadas.

O sensor de umidade utilizado é o HIH3610 da *Honeywell*®. Esse sensor possui calibração de fábrica indicando os valores limites de tensão de saída do sensor correspondentes aos valores de zero e 100% de umidade, sendo que o intervalo de variação de

umidade é linear em relação ao respectivo valor de tensão. Esses valores limites de tensão variam de um sensor para outro, mas são ligeiramente próximos entre si. Por isso foi realizada uma média entre os valores de tensão limite dos sensores utilizados e posteriormente foi desenvolvida uma equação de conversão entre a tensão de saída e o valor de umidade. Como o laboratório não possui um medidor de umidade, não foi possível realizar medidas comparativas.

O gráfico da Figura 18 indica o comportamento da temperatura e umidade para um determinado dia do experimento. Apenas um dia de experimento foi representado graficamente para analisar melhor o comportamento da temperatura e umidade no decorrer do dia. Como pode ser aí observado, a temperatura no decorrer do dia varia entre 24 e 32 °C e a umidade relativa, entre de 40 e 80 %. Para atestar que os valores de temperatura e umidade estavam corretos, periodicamente era medida a tensão nas entradas do microcontrolador conectadas aos sensores de temperatura e umidade. De posse dessas tensões a conversão podia ser feita manualmente e comparada aos valores registrados automaticamente



**Figura 18** - Gráfico da temperatura e da umidade relativa em função da hora do dia para o teste piloto.

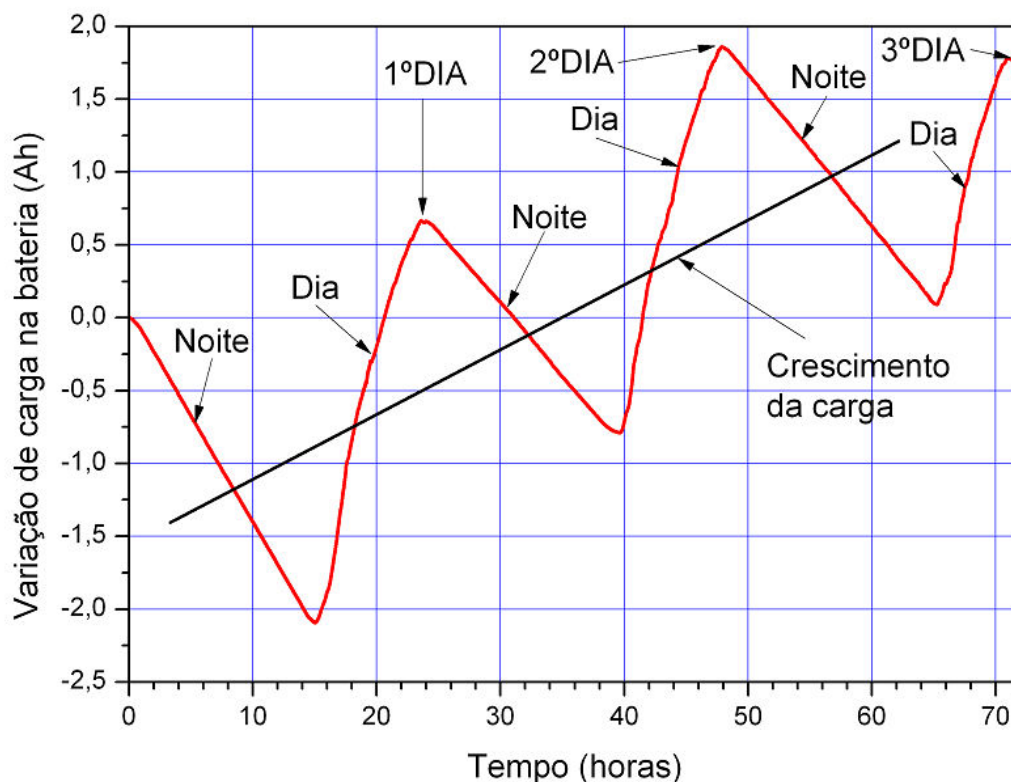
## Sistema de Alimentação Solar

Durante o período de testes foi realizada a monitoração da corrente de entrada da bateria que compõe o sistema de alimentação solar. Para o sistema se manter autônomo é necessário que o painel seja capaz de fornecer maior quantidade de carga elétrica que o restante do sistema consome. Monitorando a corrente de entrada da bateria observou-se, conforme detalhado a seguir, que ao longo do período de trinta dias a quantidade de corrente de entrada superou a de saída, demonstrando a auto-suficiência elétrica do sistema. O painel foi instalado no telhado do prédio de Engenharia do CTG-UFPE, exposto à iluminação e intempéries naturais para simular as condições de operação do equipamento.

A Figura 19 apresenta a variação de carga de entrada da bateria durante o período de três dias consecutivos. É apresentado o resultado de apenas três dias de monitoração para uma melhor visualização dos períodos diurnos e noturnos como ilustrado na Figura 19. Observou-se durante os trinta dias de medições que o comportamento apresentado pela corrente de entrada era oscilatório, conforme ilustrado na Figura 19 e que mesmo em dias chuvosos a quantidade de corrente fornecida pelo painel era superior à consumida pelo sistema.

No período noturno a variação de carga na bateria mostrada na Figura 19 apresenta valor decrescente, representando que nesse momento a bateria supre energia para o sistema e durante o dia a variação de carga apresenta valor crescente indicando seu carregamento. No decorrer dos três dias a quantidade de carga adquirida pela bateria aumenta.

Para determinar se o sistema possui autonomia elétrica a variação de carga de entrada na bateria deve ser positiva ao final de cada dia. A reta na Figura 19 ilustra a integral da curva. Observa-se que ao final de cada dia (1º, 2º e 3º) a variação de carga integral da corrente de entrada da bateria é sempre positiva demonstrando que o sistema possui autonomia elétrica.



**Figura 19** - *Variação de carga na bateria em função do tempo.*

A inclinação positiva da reta mostrada na Figura 19 só foi observada porque a bateria não estava totalmente carregada no início da medição. Caso a bateria estivesse carregada o controlador de carga cortaria o fornecimento de corrente da bateria, mesmo durante o período diurno e assim a reta seria aproximadamente paralela ao eixo horizontal.

Os resultados do teste de trinta dias no sistema de alimentação solar mostraram que o painel solar é capaz de gerar a corrente necessária ao sistema e até mesmo de carregar a bateria caso ocorra um período prolongado de pouca iluminação solar.



## 5.2. Experimentos em Rede Local

Os experimentos em rede local consistiram em verificar a dinâmica de funcionamento da recepção de dados de vários sistemas atuando simultaneamente, assim como a eficiência do modem de comunicação próximo às torres de transmissão e verificar dificuldades da instalação e fixação dos equipamentos que compõem o sistema (gabinete e painel solar) nas torres. Outro foco de verificação foi o grau de vedação dos gabinetes.

Ainda nessa etapa, os módulos sensores não foram instalados nas cadeias de isoladores. O sinal de corrente de fuga foi emulado por um circuito oscilador, de forma idêntica aos experimentos de laboratório. Essa decisão foi tomada uma vez que podia ocorrer de o sistema ser instalado em uma torre com baixa ou nula atividade de corrente de fuga o que impediria determinar se a falta de ocorrências registradas pelo sistema seria devido ou não a algum defeito do sensor.

A instalação dos sistemas sensores foi realizada pela equipe de eletricitas do Setor de Manutenção de Linhas da CHESF. As informações dos gabinetes instalados bem como das respectivas torres de transmissão usadas são listadas abaixo:

- Sistema 03 instalado em uma torre de 230 kV localizada no estacionamento da CHESF, no Bongi.
- Sistema 04 instalado em uma torre de 230 kV localiza no Setor de Manutenção de Linhas da CHESF, no Bongi.
- Sistema 05 instalado em uma torre de 500 kV localizada na subestação Recife II em Jaboatão dos Guararapes.
- Sistemas 06 e 07 instalados em uma torre de 500 kV localizada na subestação Recife II em Jaboatão dos Guararapes. O sistema 06 estava instalado na Pontina B e o sistema 07 estava instalado na Pontina A, ambos com o painel solar orientado para o hemisfério norte. Essas pontinas estão localizadas em extremidades opostas da torre.

O sistema 02 antes do período dos experimentos apresentou problemas com o conector serial do modem. Posteriormente o sistema foi consertado e substituído pelo sistema 03.

Para fixação do sistema à torre, as seguintes etapas eram realizadas:

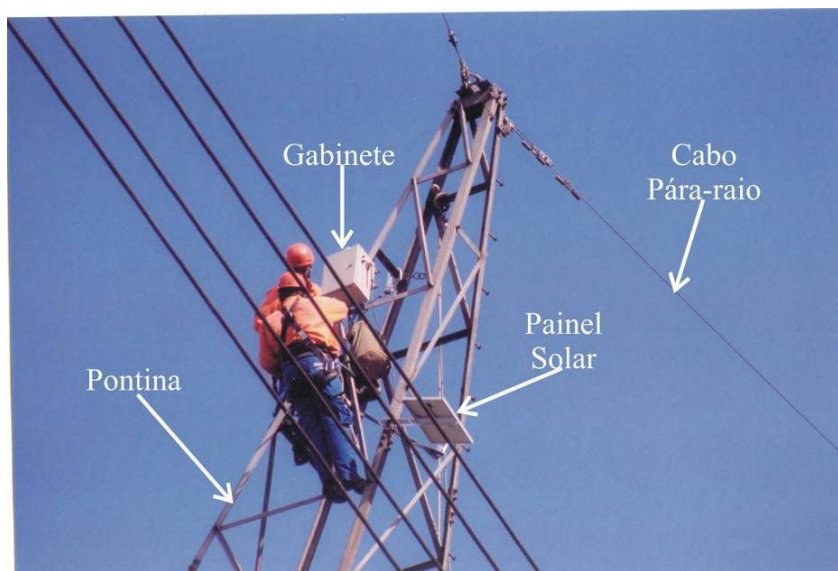
- Içamento do gabinete e painel solar.
- Fixação dos equipamentos na torre
- Conexão do painel solar ao circuito interno do gabinete.

Cada sistema foi instalado sempre no ponto mais alto da torre, para evitar obstáculos na linha de visada do modem. Dessa forma cada equipamento foi fixado na pontina de passagem do cabo pára-raios como ilustrado na Figura 20(a). A base do gabinete fica apoiada em uma treliça e duas cantoneiras fixam o equipamento em uma treliça diagonal da torre utilizando as alças do gabinete como ilustrado na Figura 20(b). O painel solar deve ter a sua face voltada para o lado norte da torre, permitindo maior período de incidência de luz na superfície do painel. Além disso, o painel deve ter uma pequena inclinação para evitar acúmulo de poluentes e possibilitar a lavagem de sua superfície durante os períodos de chuvas, como ilustrado na Figura 20(b).

### **Latência Média Acumulada e Taxa de Perda de Pacotes**

A análise da latência dos sistemas instalados foi feita com base na média acumulada dos dois tipos de pacotes transmitidos para verificar no decorrer do experimento se os valores de latência desses pacotes tenderiam a convergir para um determinado valor. Além disso, foi determinada a quantidade de pacotes recebidos pelo ADECI, a latência média, máxima, mínima e desvio padrão para os pacotes tipo 01 e 02. Por fim, foi realizada a comparação do desempenho de cada sistema com base nos gráficos obtidos e dados da tabela.

O sistema 02 foi substituído pelo sistema 03, pois ele apresentava uma latência média acumulada e taxa de perda de pacotes elevado. O sistema 02 foi analisado durante 16 dias de experimento. A latência média acumulada no período do experimento é mostrada na Figura 21.



(a)



(b)

**Figura 20** (a) Fotografia do gabinete e painel solar instalados na pontina de uma torre de transmissão da CHESF. (b) Fotografia da fixação do gabinete na torre.

Observa-se no gráfico da Figura 21 que a latência média acumulada ficou em torno de 48 e 41 segundos para os pacotes 01 e 02, respectivamente. No decorrer do experimento a latência média acumulada para o pacote 01 e 02 convergiu para valores próximos de 43 e 47 segundos, respectivamente até que no 7º dia de experimento ocorreu um incremento de 3,6 segundos na latência média para ambos os pacotes. A hipótese para explicar esse fato é que o

relógio interno do microcontrolador conta os segundos em múltiplos de 3. Logo, um mínimo atraso no relógio, provocado, por exemplo, pelo tratamento de uma interrupção, pode atrasar o envio do pacote em 3 segundos. Porém, por ser atualizado externamente, esse atraso no relógio não é acumulativo. A partir do 10º dia de experimento até o último dia, a latência média acumulada aumentava e no último dia de experimento, a latência média acumulada foi de 50 e 60,7 segundos para os pacotes 01 e 02, respectivamente. Esse fato provavelmente foi devido ao tempo reduzido do experimento em comparação com os demais sistemas. De qualquer forma o sistema 02 mostrou desempenho satisfatório, pois durante todo o período do experimento a latência média ficou em torno de um minuto.

O sistema 03 foi analisado durante um período de 22 dias. O gráfico da média acumulada da latência dos dois tipos de pacotes em função do período do experimento é mostrado na Figura 22. A quantidade de pacotes transmitidos foi de 954 em vez de 1056 devido ao período de manutenção do ADECI.

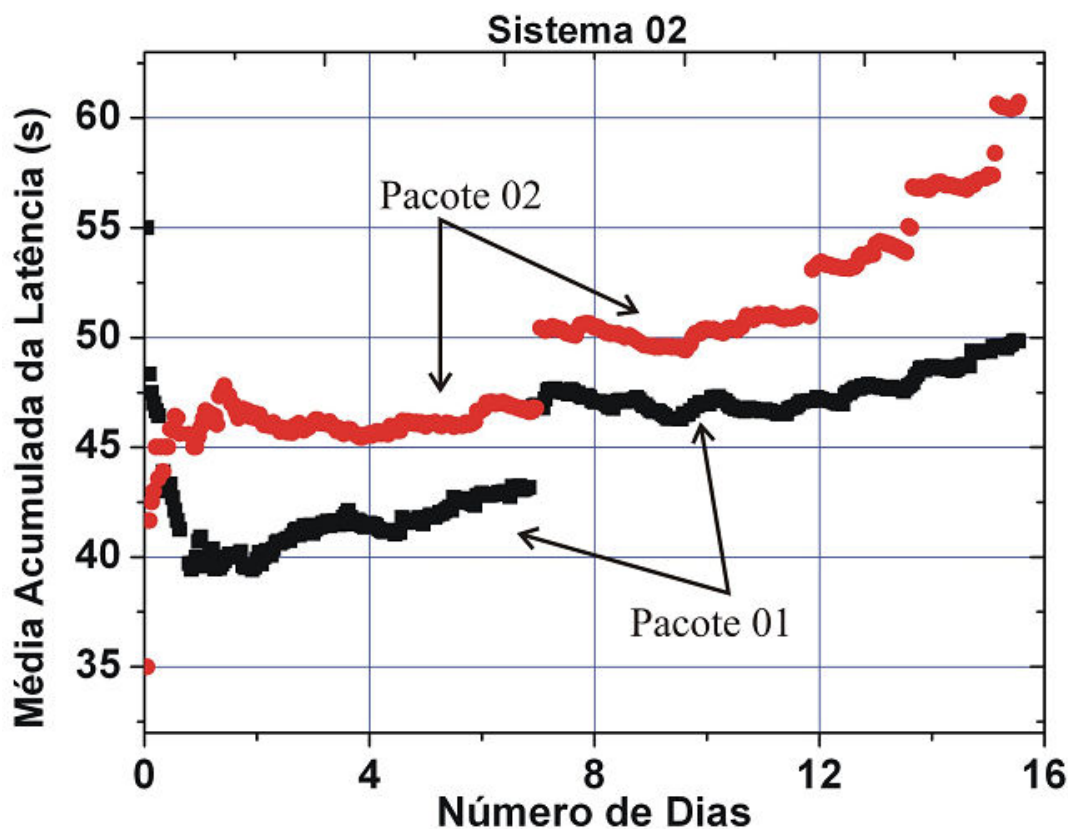


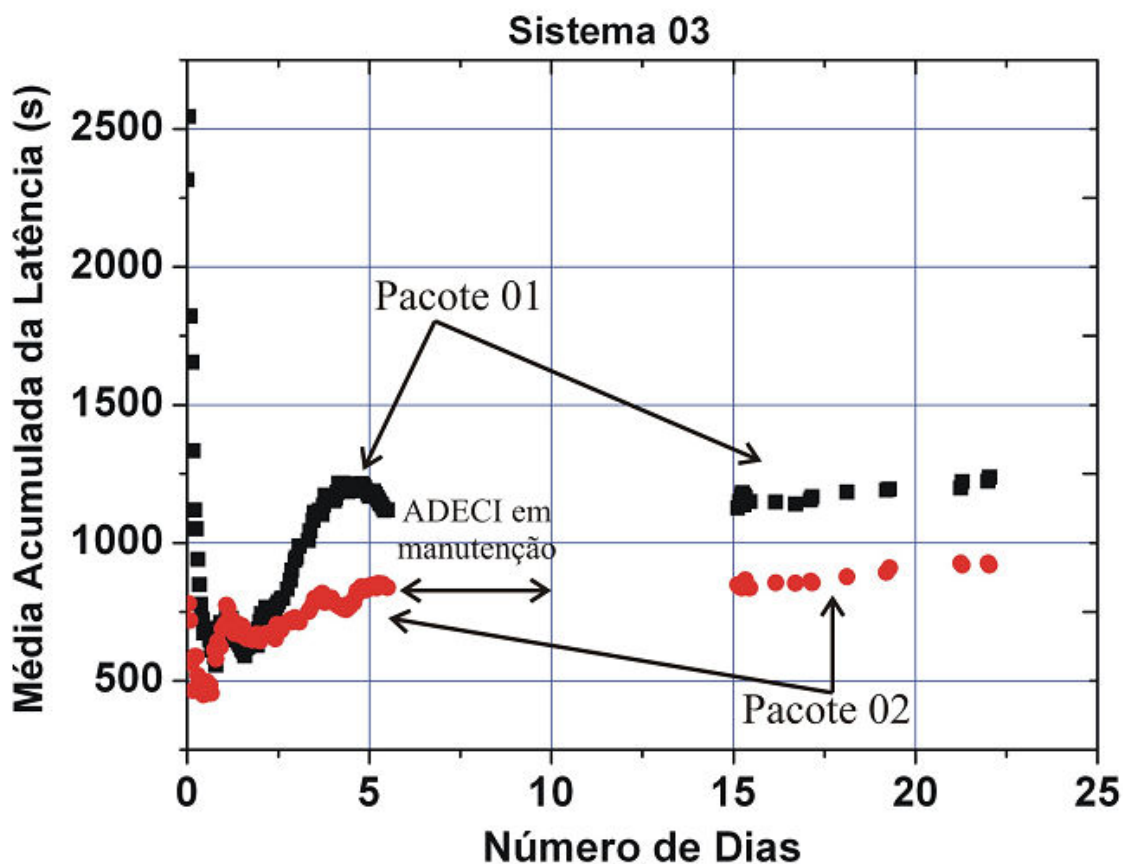
Figura 21 - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 02.

No gráfico da Figura 22, percebe-se que no início do experimento a latência média acumulada foi aproximadamente 11 e 10 minutos para os pacotes do tipo 01 e 02, respectivamente. No decorrer do experimento, a latência média acumulada do pacote 01 aumentou até atingir o valor máximo que é 20,3 minutos no final do 4º dia de experimento. A partir daí foi observada uma diminuição da latência média e no 6º dia de experimento ela ficou em 18,6 minutos. Para o pacote 02 a latência média acumulada aumentou até que no 6º dia de experimento ela ficou em 14 minutos.

Após o 10º dia de experimento, que correspondeu ao fim do período de manutenção do ADECI, não foi observada transmissão de pacotes até o 15º dia de experimento. Posteriormente, pode-se notar no gráfico da Figura 22 a descontinuidade da latência média acumulada para ambos os pacotes, por causa do alto percentual de perda de pacotes. Até o final do experimento a latência média acumulada convergiu para valores em torno de 20,5 minutos e 15,2 minutos para os pacotes tipo 01 e 02, respectivamente.

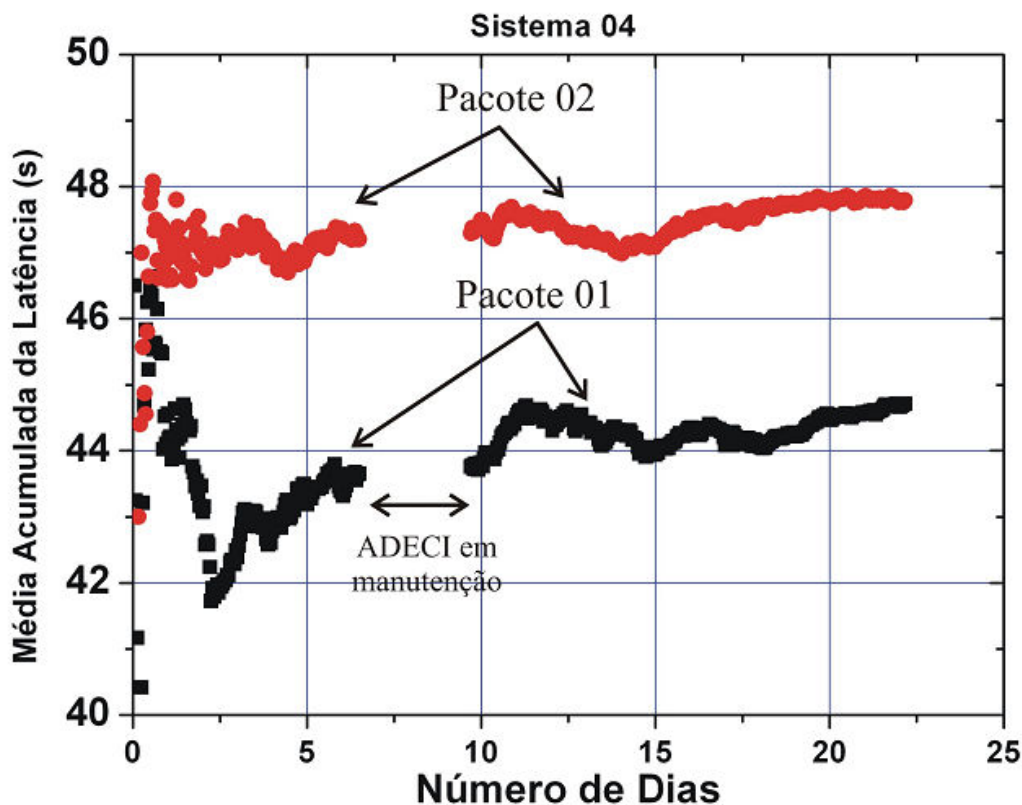
Após o término do experimento, foi verificado que a causa da alta latência para ambos os pacotes, além do período de ausência de transmissão por parte do terminal via satélite e o alto percentual de perda de pacote, foi decorrente de danos no módulo de processamento ocasionados pela presença de água de chuva no interior do gabinete. O desempenho do sistema 03 foi considerado ruim uma vez que a latência média acumulada estava próxima do intervalo de tempo de meia hora entre transmissões de pacotes.

O sistema 04 foi analisado durante o período de 22 dias. O gráfico da média acumulada da latência dos dois tipos de pacotes em função do período do experimento é mostrado na Figura 21. Observa-se que a descontinuidade da latência indica o período em que o ADECI não estava em funcionamento. Como esse período foi de aproximadamente 3 dias, cerca de 954 pacotes foram analisados em vez do valor esperado de aproximadamente 1056 pacotes.



**Figura 22** - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 03.

No gráfico da Figura 23, percebe-se no início do experimento uma latência média acumulada de 46,5 e 48 segundos para os pacotes tipo 01 e 02, respectivamente. No decorrer do experimento a latência média acumulada para o pacote tipo 01 decai até atingir o mínimo de 41 segundos e posteriormente aumenta até que no 6º dia de experimento possui valor próximo de 43 segundos. Para o pacote 02, a latência média acumulada varia em torno de 47 segundos até o 6º dia de experimento. Do 10º dia de experimento até o final do experimento, percebe-se que a latência média acumulada converge para valores próximos de 45 e 48 segundos para os pacotes do tipo 01 e 02, respectivamente. O sistema 04 apresentou desempenho satisfatório, pois a latência média acumulada para ambos os pacotes foi inferior a um minuto.



**Figura 23** - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 04.

O sistema 05 foi analisado durante o período de 29 dias. O gráfico da média acumulada da latência dos dois tipos de pacotes em função do período do experimento é mostrado na Figura 24. No período de análise, o ADECI sofreu manutenção durante 3 dias de experimentos indicados no gráfico da Figura 24, resultando na análise de 1248 transmissões em vez de 1392 transmissões.

No gráfico da Figura 24, observa-se que no início do experimento a latência média acumulada era de 42,4 e 54 segundos para os pacotes 01 e 02 respectivamente. No decorrer do experimento, a latência média acumulada do pacote 01 converge para valores próximos de 52 segundos até o 6º dia de experimento. Em relação ao pacote 02, ocorre um aumento da latência média até o 2º dia de experimento e depois a latência média decai até atingir o valor de 90,2 segundo no 6º dia de experimento. Após o 10º dia de experimento, que corresponde ao fim do período de manutenção do ADECI, não é observado transmissão de pacotes até o 15º dia de experimento. Além disso, pode-se verificar que a descontinuidade do gráfico das latências na Figura 24 é causada devido à ausência de transmissão no período noturno. Apesar disso, no período diurno a latência média acumulada no final do experimento convergiu para

valores próximos de 88 e 103 segundos para os pacotes tipo 01 e 02, respectivamente. Após o término do experimento, foi verificado que a causa da ausência de transmissão no período noturno para ambos os pacotes, além do período de ausência total de transmissão por parte do terminal via satélite foi devido a danos no módulo de processamento ocasionados pela presença de água de chuva no interior do gabinete. Apesar dos valores de latência serem inferiores a dois minutos para ambos os pacotes, a ausência de transmissão no período noturno acarreta em um desempenho ruim, semelhante ao encontrado no sistema 03.

O sistema 06 foi analisado durante 41 dias e o sistema 07 durante 45 dias de experimento. As Figuras 25 e 26 ilustram as médias acumuladas da latência dos dois tipos de pacotes no período do experimento para os sistemas 06 e 07, respectivamente. Durante o período do experimento, o ADECI estava passando por novas manutenções e houve perda de registros correspondentes a aproximadamente 9 dias de experimento. Uma intervenção foi realizada para substituir a posição dos sistemas 06 e 07 devido a problemas apresentados no sistema 07. Nas Figuras 25 e 26 estão indicados os períodos de intervenção (região 1) e após a intervenção (região 2).

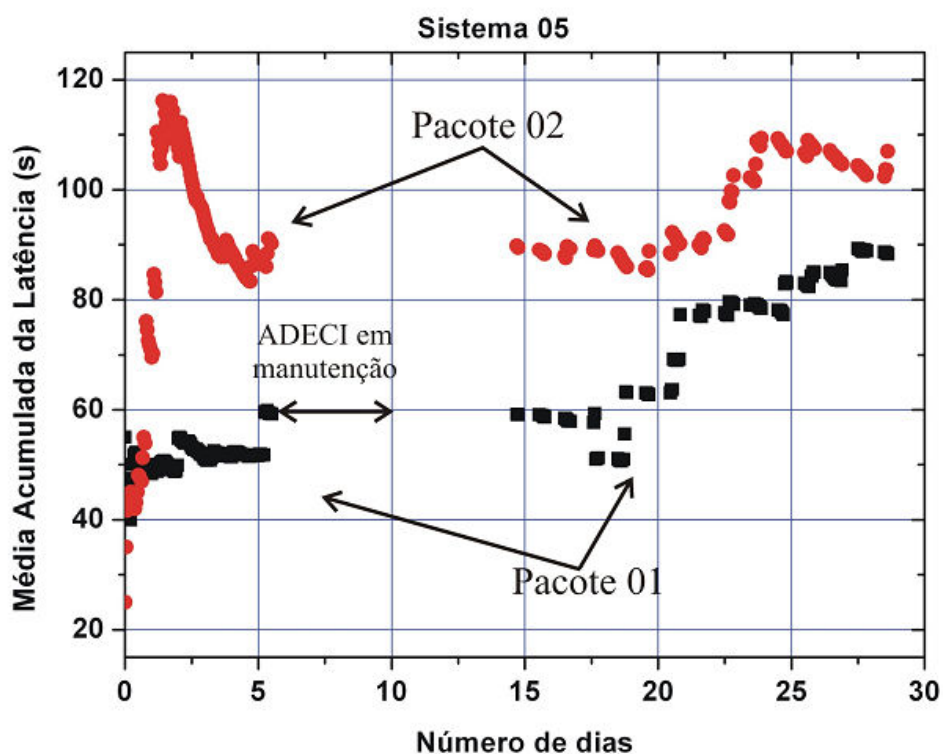


Figura 24 - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 05.



Na Figura 25, excetuando-se o período de intervenção e a descontinuidade cuja razão já foi discutida anteriormente, percebe-se que o comportamento da latência média permaneceu estável, com valores inferiores a um minuto, para ambos os pacotes, de forma similar aos sistemas 02 e 04. No gráfico da Figura 26, observa-se que no início do experimento a latência média acumulada no sistema 07 foi de aproximadamente 21 minutos e de 20 minutos para os pacotes 01 e 02 respectivamente. No decorrer do experimento, a latência média acumulada entre o 5º e o 6º dia de experimento foi cerca de 3 minutos e 24 minutos, indicados pela região 1 na Figura 26. Após o período de intervenção, indicado pela região 2 da Figura 26, a latência média acumulada do pacote 2 decaiu até que, no final do experimento, possui valor próximo de 8 minutos. O mau desempenho do sistema 07 até o 20º dia de experimento foi provavelmente devido a mau posicionamento do modem.

A Tabela 2 resume os resultados obtidos para todos os sistemas instalados durante o experimento em rede local. Os sistemas 02, 04 e 06 apresentaram percentual de perda de pacotes inferior a 2%. A latência média para esses três sistemas foi inferior a um minuto, ou seja, todos apresentaram excelente desempenho para a aplicação. O sistema 02 apresentou um desvio padrão na mesma ordem de grandeza da latência média, devido ao tempo reduzido de experimento comparado com os demais sistemas. Observando o gráfico da Figura 21, percebe-se que não há convergência dos valores da latência média acumulada para ambos os pacotes, o que justifica o elevado valor do desvio padrão da latência.

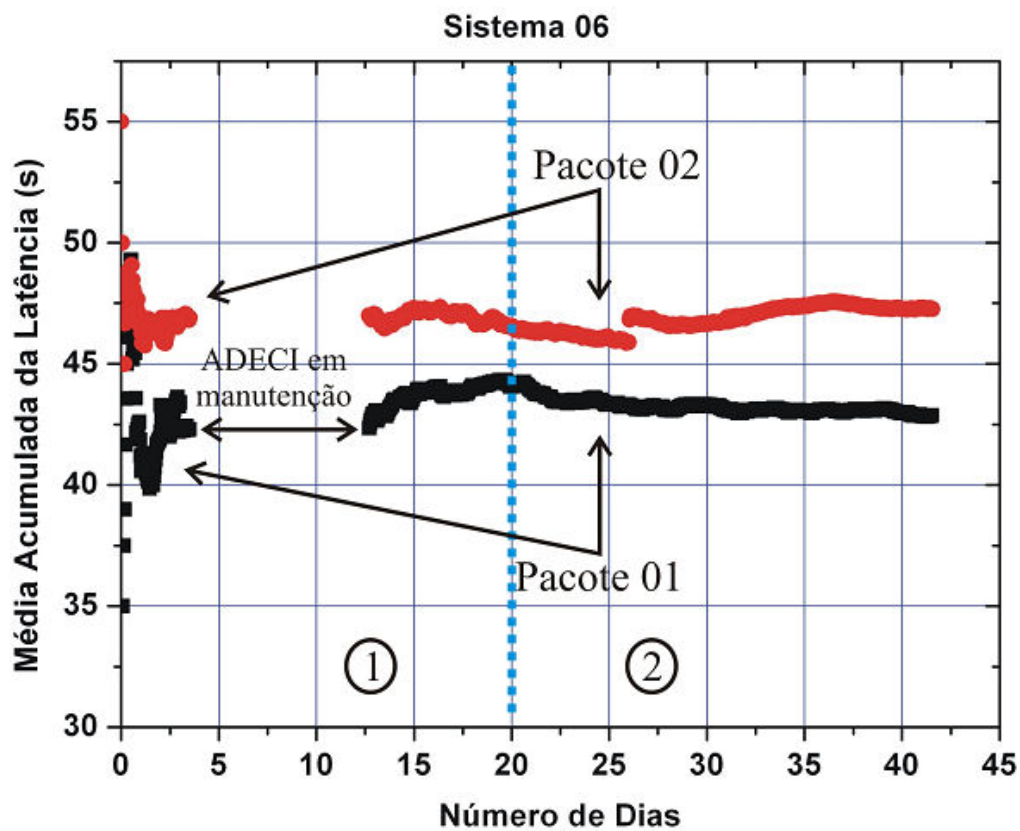


Figura 25 - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 06.

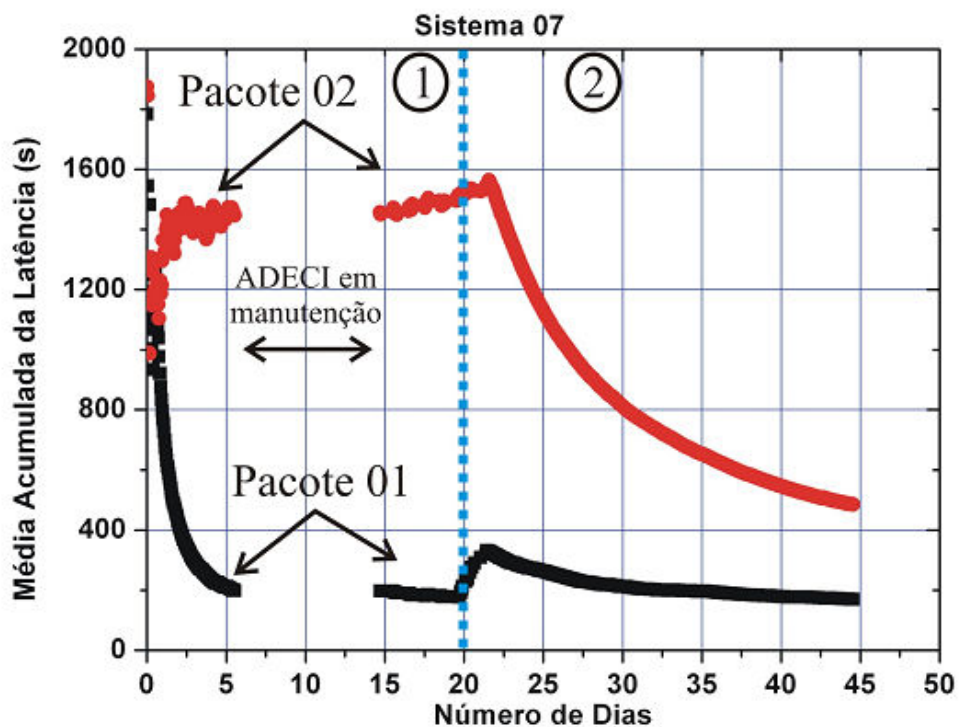


Figura 26 - Gráfico da média acumulada da latência para o sistema 07.

**Tabela 2-Parâmetros de desempenho na transmissão de pacotes para os experimentos em rede local.**

Sistema	Pacotes recebidos		Perdas (%)		Latência média (s)		Latência máxima (s)		Latência mínima (s)		Desvio padrão	
	Pac 1	Pac 2	Pac 1	Pac 2	Pac 1	Pac 2	Pac 1	Pac 2	Pac 1	Pac 2	Pac 1	Pac 2
2	374	374	1,33	1,33	49,8	62,2	61,5	85,5	15	35	38,85	81,2
3	121	130	74,6	72,7	906	1264,6	3465	4095	25	35	906,2	1155,3
4	473	471	0,84	1,25	44,7	44,7	62	62	7	35	12	8,5
5	240	266	65,5	61,7	103,3	115,3	2445	2625	15	5	242,6	227,2
6	Antes da intervenção											
	261	262	1,13	0,75	44,2	46,9	62	62	7	25	12,4	8,7
	Depois da intervenção											
	560	561	0,7	0,53	42,2	47,4	75	445	15	15	11,9	18,8
7	Antes da intervenção											
	175	172	33,7	34,8	212,4	1525,5	3465	3595	5	45	531,5	1087,4
	Depois da intervenção											
	557	558	1,25	1,1	114	156,3	3685	3665	35	35	144	304,5

Os sistemas 04 e 06 apresentaram desvio padrão da latência pequeno, indicando pequena dispersão dos valores médios da latência, como pode ser observado na Tabela 2. Esse fato é perceptível também no gráfico das Figuras 21 e 26, pois se observa a convergência da latência média acumulada de ambos os pacotes nos dois sistemas no decorrer do experimento.

No sistema 03 foi observada uma elevada latência média, em torno de 15 minutos para o pacote 01 e de 21 minutos para o pacote 02. Além disso, o percentual de perdas de pacotes é superior a 70 % para ambos os pacotes, como pode ser observado na Tabela 2. As descontinuidades da latência média acumulada do gráfico da Figura 22 atestaram o alto percentual de perda de pacotes e a ausência de dados entre o 10º e o 15º dias de experimento. Por isso, foi realizada uma intervenção para remover o gabinete 03 da torre onde estava instalado e foi verificada a presença de água no interior do gabinete, devido a uma falha da vedação na fixação do modem. O modem, bateria e controlador de carga não foram danificados, porém o módulo de processamento e alguns conectores foram danificados em virtude da oxidação.

O sistema 05 após o 5º dia de experimento não estava realizando transmissões no período noturno, por isso o alto percentual de perdas de pacotes de 65,7 e 61,7% para os pacotes 01 e 02, respectivamente. Entretanto, a latência média do sistema é próxima de 2 minutos para ambos os pacotes, mas o elevado desvio padrão indica a instabilidade do sistema. Devido a esses problemas, também foi realizada uma intervenção para verificar o

problema e também foi constatada a presença de água da chuva no interior do gabinete. Os danos causados foram semelhantes aos encontrados no sistema 03.

Os sistemas 06 e 07 foram colocados na mesma torre, mas em pontinas diferentes. O sistema 06 mostrou desempenho adequado, o que pode ser verificado na Tabela 2. O sistema 07 apresentou percentual de perda de pacotes superior a 30% para ambos os pacotes e latência média para o pacote tipo 02 em torno de 25 minutos, um comportamento atípico. No 20º dia de experimento foi realizada uma intervenção, porém não foram verificados problemas com relação à vedação nem a presença de água da chuva no interior do gabinete ou qualquer falha na conexão elétrica no sistema 07. Todavia, o modem via satélite não estava orientado adequadamente. Assim, foi feita uma troca de posições dos sistemas 06 e 07 para verificar se haveria mudança no comportamento da latência e perda de pacotes. Foi constatado que o sistema 06 permaneceu com o bom desempenho e o sistema 07 teve sua latência média reduzida para 1,9 e 2,5 minutos e percentual de perda de pacotes em torno de 1,25 e 1,1% para os pacotes 01 e 02 respectivamente, como pode ser visto na Tabela 2.

Conclui-se que os sistemas 02, 04, 06 e 07 apresentaram desempenho satisfatório com latência média bastante inferior ao tempo de transmissão dos pacotes, baixo percentual de perda de pacotes e baixo desvio padrão. Os sistemas 03 e 05 apresentaram problemas de alto percentual de perda de pacotes e latência média elevada devido a danos no módulo de processamento causados pela infiltração de água nos gabinetes. Essa falha na vedação ocorreu por causa de um desprendimento da cola usada para fixar a base do modem no gabinete.

Os principais problemas encontrados da fase de experimento em rede local foram os problemas de vedação nos gabinetes dos sistemas 03 e 05 e os pontos de oxidação encontrados na superfície de todos os gabinetes. Com relação ao problema da oxidação, os gabinetes foram desmontados e posteriormente submetidos a um processo de galvanização a quente, mesmo processo usado para proteção contra oxidação das estruturas das torres de linhas de transmissão da CHESF. Em relação à vedação do modem no gabinete, foi realizado um reforço com silicone típico de aplicações em altas temperaturas por cima da cola de vedação. Além disso, capas de lona adaptadas foram utilizadas para revestir os gabinetes, protegendo o sistema contra a água da chuva.

Os sete sistemas foram remontados e um teste de uma semana foi realizado no teto do Prédio de Engenharia da UFPE para verificar o funcionamento da transmissão de dados. Dois gabinetes foram cobertos pela capa de lona para verificar se haveria diferenças entre um sistema coberto e o outro não, com relação à latência média e perda de pacotes. Em todos os gabinetes foi observada uma latência média em torno de 50 segundos e uma taxa de perda de pacotes inferior a 2 %. Outro teste foi colocar os gabinetes sob um chuveiro escorrendo água à máxima vazão para verificar a qualidade da vedação e não foi detectada a presença de água no interior do gabinete.

Com relação às faixas registradas para os pulsos de corrente de fuga, bem como os valores de temperatura, umidade e máximo pico de corrente, foram verificados que todas as faixas foram ativadas com taxas de ocorrência iguais para todas as faixas, como esperado. A temperatura e umidade mostraram comportamento e valores similares ao apresentado no gráfico da Figura 18 no experimento em laboratório e o máximo pico de corrente registrado correspondeu ao mesmo valor de corrente fornecido pelo circuito oscilador.

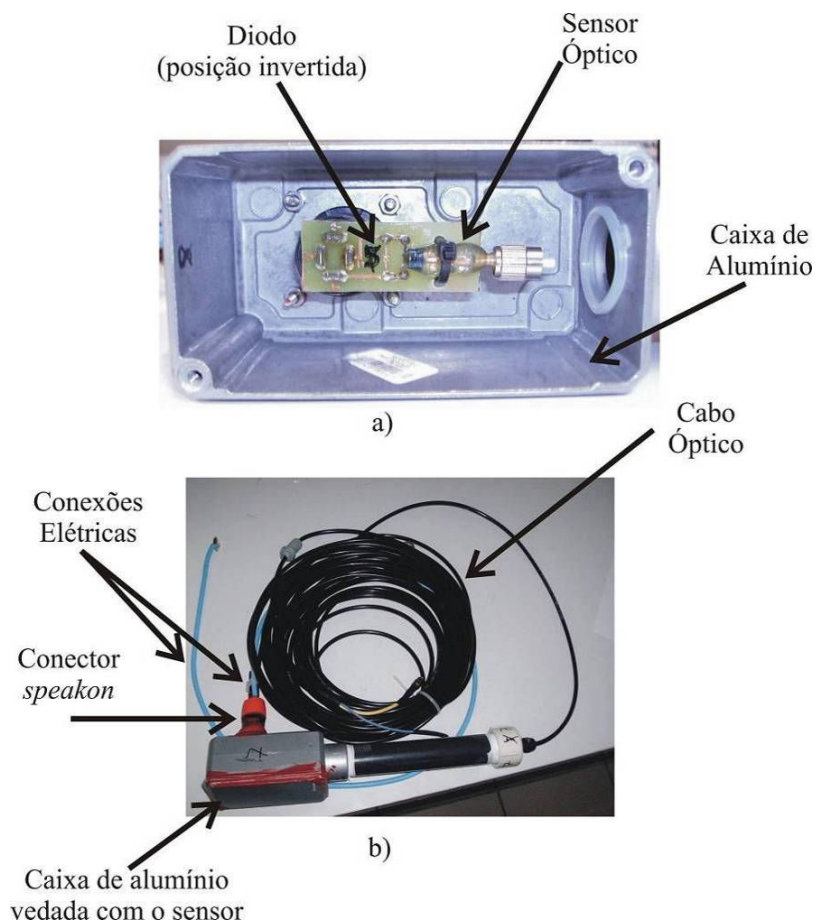
## 6. Experimentos de Campo em Pontos Críticos

Após a correção das falhas detectadas nas duas fases, foi feita a instalação dos gabinetes em pontos críticos de acúmulo de poluição nos isoladores no sistema de transmissão CHESF, ou seja, em torres que necessitam de manutenções constantes para evitar a ocorrência de *flashovers*.

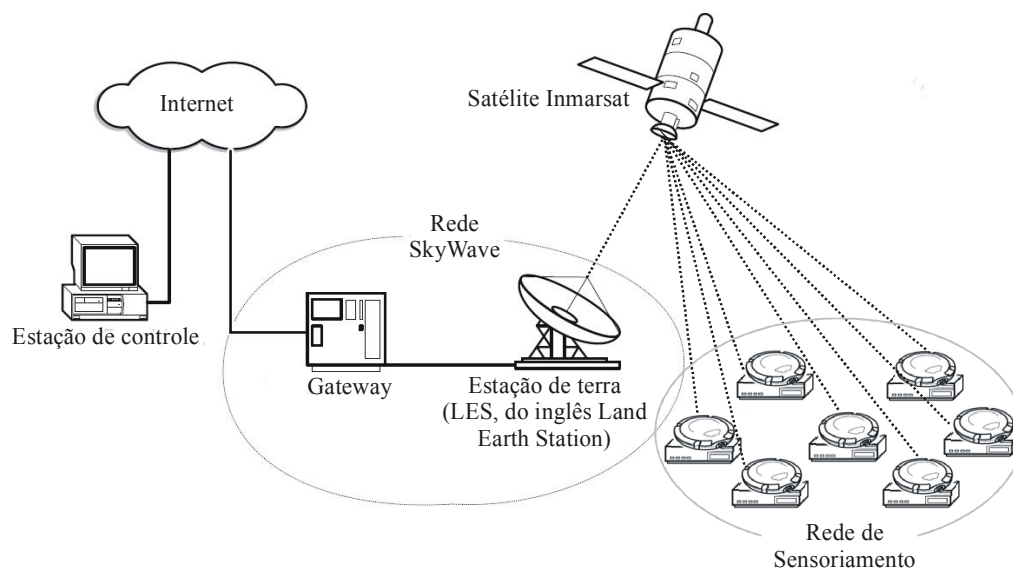
Nesses experimentos, o sensor óptico é instalado para monitorar a corrente de fuga nas cadeias de isoladores. O sensor óptico, o diodo de proteção e um conector do tipo *speakon* foram soldados em uma placa de circuito impresso e o conjunto foi acondicionado em uma caixa de alumínio comumente usada para instalações elétricas em ambiente externo, como pode ser visto na Figura 27(a). Cabos elétricos resistentes a ambientes externos são utilizados para realizar a ligação elétrica do sensor com o isolador. Cabos ópticos foram confeccionados para conectar o sensor óptico até o módulo de processamento através do guiamento da luz do sensor pelo cabo óptico. A Figura 27(b) mostra o sistema completo formado pelo sensor óptico dentro da caixa de alumínio vedada, juntamente com os cabos elétricos e o cabo óptico. Para cada sistema foi fabricado um módulo idêntico ao da Figura 27(b).

O processo de fixação do painel solar e gabinete foi o mesmo utilizado nos experimentos em torre local. Para a ligação elétrica do sensor no isolador, foram utilizadas abraçadeiras metálicas para fixar o terminal positivo na campânula do segundo isolador da cadeia de isoladores mais próximo da estrutura aterrada e para fixar a caixa metálica do sensor na estrutura aterrada da torre juntamente com o terminal de referência do sensor. Foi aplicada uma camada de estanho nos terminais dos cabos elétricos de tal forma a facilitar a fixação do terminal elétrico com a abraçadeira além de proteger contra oxidação.

Sete sistemas foram produzidos, seis dos quais foram instalados em pontos críticos e um permaneceu no laboratório para possíveis estudos de melhorias. A Figura 28 apresenta a configuração do sistema sensor de telemetria após instalação em campo. A Tabela 3 indica a localização dos sistemas.



**Figura 27 -** (a) Fotografia do sensor óptico montado na placa de circuito impresso e acondicionado na caixa de alumínio. (b) Fotografia do sensor na caixa de alumínio vedada juntamente com o cabo óptico e conexões elétricas.



**Figura 28 -** Configuração do sistema sensor após instalações.

**Tabela 3 - Identificação dos sistemas sensores.**

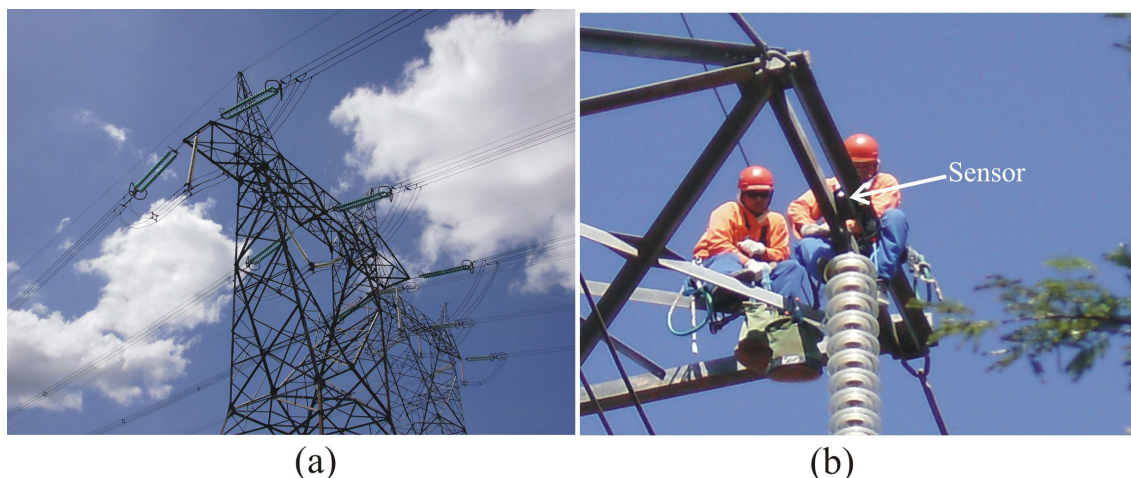
<b>Sistema</b>	<b>Localização</b>
<b>1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laboratório UFPE, Recife, PE</li> </ul>
<b>2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torre 500 kV próxima a SE Angelim, PE</li> <li>• Linha de transmissão Angelim–Recife II</li> </ul>
<b>3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torre 230 kV no canalial à margem da BR 101, Barra de São Miguel, AL.</li> <li>• Linha de transmissão Rio Largo-Penedo 230 kV</li> </ul>
<b>4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torre 500 kV da Lagoa, Pitaguary, CE</li> <li>• Linha de transmissão Sobral 3–Fortaleza 2</li> </ul>
<b>5</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torre 500 kV próxima a SE Fortaleza, CE</li> <li>• Linha de transmissão Quixadá–Fortaleza</li> </ul>
<b>6</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torre 500 kV de Caracará, CE</li> <li>• Linha de transmissão Sobral 3–Fortaleza 2 SBT-FTD.</li> </ul>
<b>7</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torre 230 kV em Mossoró, RN</li> <li>• Linha de transmissão Russas-Mossoró</li> </ul>

### **6.1. Torre de 500 kV próxima à Subestação Angelim II, PE**

O sistema 02 foi instalado em torre localizada próxima à subestação de Angelim II, Pernambuco. A torre possui tensão de trabalho de 500 kV. O sensor foi instalado em uma cadeia de isoladores de vidro do tipo suspensão. A instalação teve duração aproximada de duas horas. A Figura 29(a) apresenta uma fotografia da torre de transmissão escolhida para instalação do sistema 02 e a Figura 29(b) mostra em detalhes o sensor sendo instalado pelos eletricitistas.

A Figura 30 mostra a atividade registrada num período de 30 dias contínuos. A partir do início do experimento, é observada atividade na faixa 01 com mais de 75k pulsos/hora (75 kp/h). No decorrer do tempo, atividade nas demais faixas passa a ser observada. O período em que ocorre a atividade é durante a madrugada, devido à elevada umidade e baixa temperatura. Ainda em relação à Figura 30, pode-se verificar que o valor da umidade relativa em determinados instantes satura em 100%, por causa de problemas relacionados à calibração do sensor de umidade. De qualquer forma, esse fato não compromete a análise da correlação do ambiente com a frequência de pulsos de corrente.





**Figura 29** - (a) Fotografia da torre escolhida para instalação do sistema 02 e (b) sensor do sistema 02 sendo instalado pelos eletricitistas.

Entre o 22º e 24º dia de experimento foi observada a maior atividade de corrente de fuga. Todas as faixas foram acionadas e a partir do 24º dia até o final do experimento não foi mais observada atividade de corrente de fuga. Destaca-se também no mesmo período o comportamento irregular da temperatura e umidade relativa destacado na Figura 30. A umidade relativa (UR) se mantém próxima de 100 % e a temperatura próxima de 22 °C, no 23º dia, a UR decai para próximo de 95% e rapidamente retorna para próximo de 100 %. A temperatura sobe para 25 °C e rapidamente retorna para valores próximos de 22 °C. Observando a tendência de comportamento dos dias anteriores, eram esperados redução do valor da umidade relativa e aumento do valor de temperatura no período diurno, mas tal comportamento não foi observado nesse dia específico. Acredita-se que essa modificação no comportamento da temperatura e umidade nesse período tenha sido provocada pela ocorrência de chuva nesse período.

Foi consultada a base de dados do INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais [27], para verificar a incidência de chuvas durante o período do experimento. O INPE não possui registro de chuvas em Angelim. A cidade mais próxima monitorada pelo INPE é Garanhuns, 30 km distante, onde foi registrada uma precipitação de 13 mm no 22º dia de experimento. Assim, levando em conta a proximidade entre cidades, os valores de precipitação registrados pelo INPE e a súbita modificação de comportamento da umidade e temperatura no sistema 02, pode-se inferir que tenha de fato ocorrido chuva nesse dia. Observe-se nesse dia, dos gráficos da Figura 30, o súbito aumento na taxa de ocorrência de pulsos de corrente nas quatro faixas durante esse período e que passado esse evento, não são

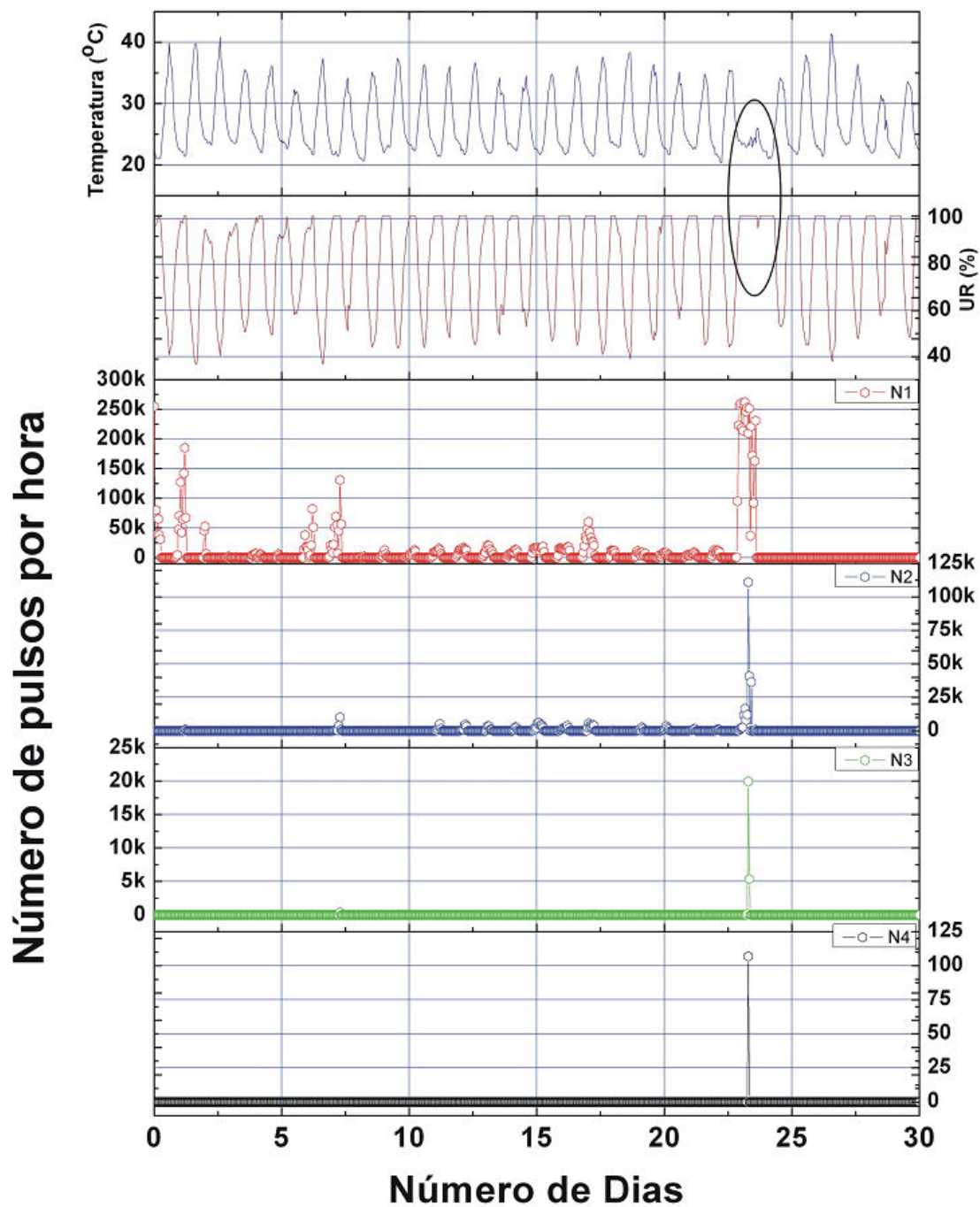
mais observados pulsos de corrente, muito provavelmente devido à limpeza dos isoladores pela chuva. Destaca-se que a manifestação do fenômeno está associada à alta umidade ou chuva fina. Após a ocorrência de uma alta precipitação inibe-se a formação de descargas parciais devido à lavagem natural dos poluentes depositados nas saias dos isoladores.

O circuito detector de valores máximos apenas acusou máximo pico de corrente na ocorrência de atividade na faixa 04, pouco acima de 40 mA. A latência média registrada nesse período foi de 43,2 e 44,3 segundos para os pacotes tipo 01 e 02, respectivamente. Não houve perda de pacotes no período do experimento.

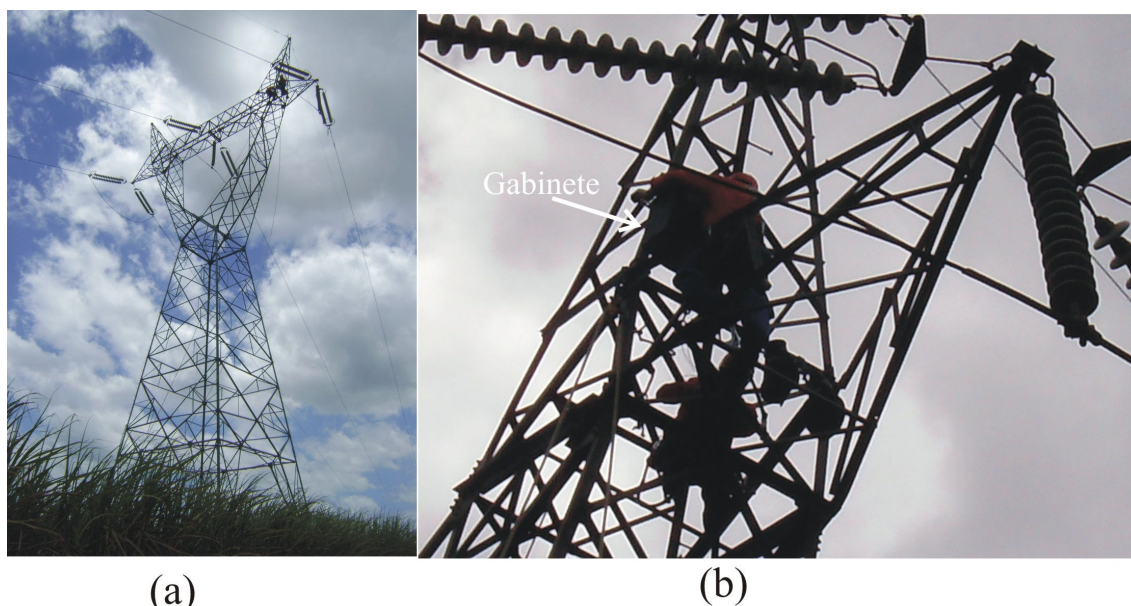
## **6.2. Torre de 230 kV no canavial em São Miguel dos Campos, AL**

O sistema 03 foi instalado em um canavial no município de São Miguel dos Campos, Alagoas. A tensão de trabalho na torre é de 230 kV. O sensor foi instalado em uma cadeia de isoladores de porcelana do tipo ancoragem. A instalação teve duração aproximada de duas horas. A Figura 31(a) apresenta uma fotografia da torre de transmissão escolhida para instalação do sistema 03 e a Figura 31(b) mostra em detalhes o gabinete sendo instalado pelos eletricitistas.

A Figura 32 mostra a atividade registrada no período de 30 dias contínuos. Pode-se concluir a partir da Figura 32 que a cadeia de isoladores monitorada estava submetida a uma concentração de poluentes mais severas do que observada na cadeia de isoladores monitorada em Angelim. No início do experimento ocorreram atividades na faixa 01 com mais de 200 kp/h e na faixa 02 com mais de 7kp/h, com valores de temperatura e umidade semelhantes aos registrados em Angelim para o mesmo período de experimento. No 5º dia de experimento, em Angelim é observada apenas atividade na faixa 01 em torno de 25kp/h, como pode ser visualizado na Figura 30. No mesmo período em São Miguel dos Campos percebe-se na Figura 32 atividade na faixa 01, 02 e 03 com 25k, 7,5k e 6,5kp/h respectivamente.



**Figura 30** - Parâmetros registrados em Angelim, PE no período de um mês. O círculo no gráfico indica ocorrência de chuva.



**Figura 31** - (a) Fotografia da torre escolhida para instalação do sistema 03 e (b) gabinete do sistema 03 sendo instalado pelos eletricitistas.

A torre em análise está localizada em uma região de plantio de cana de açúcar, onde durante o período de colheita, que é de setembro a março, ocorre à queima da cana. Além disso, a estrada de acesso à torre, que também serve de caminho para os caminhões com a cana colhida é de barro. O tráfego de veículos no local favorece a deposição de poluentes no isolador.

No 22º dia de experimento ocorreu alta atividade de pulsos de corrente e logo após não é observada atividade, evento que aconteceu de forma similar em Angelim, devido à presença de chuva. Na região destacada da Figura 32 pode-se observar que a temperatura e umidade estavam indo para o ciclo diurno, com aumento da temperatura e diminuição da umidade, quando é observada a inversão de comportamento dessas variáveis indicando a possibilidade de ocorrência de chuva. Não existem pluviômetros do INPE no local onde foi instalado o sensor, porém em Maceió, localizada a 34 km, foi observada uma precipitação de 4 mm entre o 22º e 23º dia do experimento. A partir do 28º dia de experimento, é possível visualizar na Figura 32 a ocorrência de pulsos de corrente indicando um provável início de deposição de poluição.

O circuito detector de pico mediu pulsos de corrente de até 70 mA. A latência média registrada nesse período foi em torno de 45 segundos para ambos os pacotes. O percentual de perda de pacotes foi inferior a 2% para ambos os pacotes.

### **6.3. Torre de 500 kV em Pitaguary, CE**

O sistema 04 foi instalado no município de Pitaguary no Ceará, próximo a uma lagoa. A tensão de trabalho na torre é de 500 kV. O sensor foi instalado em uma cadeia de isoladores de vidro do tipo suspensão. A instalação teve duração aproximada de duas horas. A Figura 33 mostra em detalhes o gabinete do sistema e os eletricitistas realizando a instalação. Ainda na Figura 33, observa-se que dois isoladores em cada cordão estavam quebrados e em posições diferentes nas cadeias.

A Figura 34 mostra a atividade registrada no período de 25 dias contínuos. Não é observada atividades na faixa 01, durante todo o período do experimento. Todavia verificou-se a existências de atividades nas faixas 02 e 03, cerca de 1,5kp/h na faixa 2 no 5º dia de experimento e 81 pulsos na faixa 3 no 7º dia de experimento, o que pode ser observado na Figura 34. Com isso, pode-se afirmar que a ausência de pulsos na faixa 01 é proveniente de um defeito no módulo de processamento até o momento de causa desconhecida. Não houve registro de pulsos de corrente na faixa 04.

No 17º dia de experimento é observada na região destacada da Figura 34 inversão de comportamento nos ciclos de temperatura e umidade e registro de 2k pulsos na faixa 02 e 24 pulsos na faixa 03. No 17º e 18º dias de experimento a UR e temperatura possuem valores próximos de 100% e 27 °C respectivamente para todo esse período e também foram registrados aproximadamente 2k pulsos na faixa 2. Posteriormente não são observados registros de pulsos de corrente até o final do experimento. Pode-se concluir que nos períodos citados acima houve grande probabilidade de chuva, já que os isoladores estão limpos. Não há dados pluviométricos disponíveis no INPE para essa região durante o período do experimento.

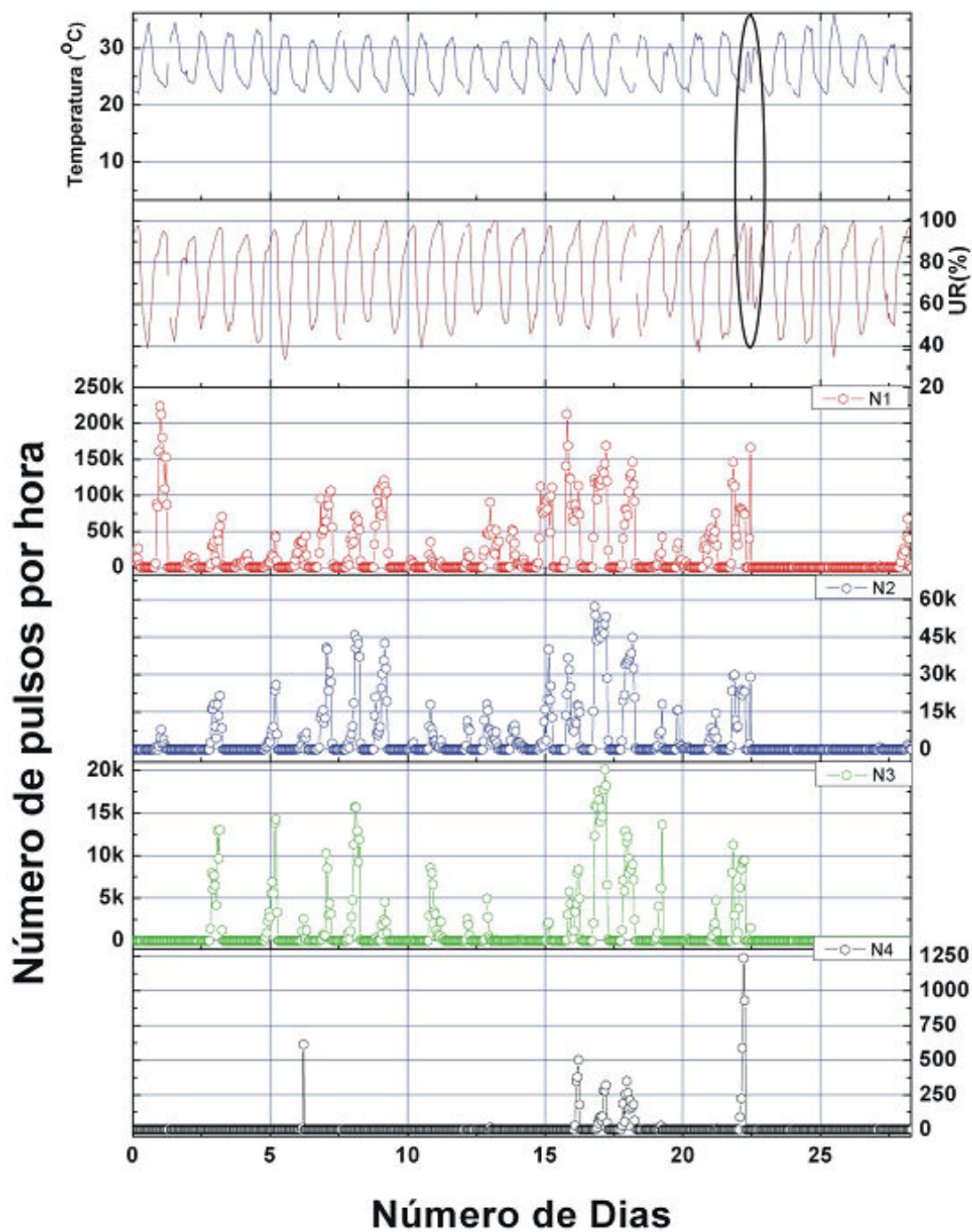
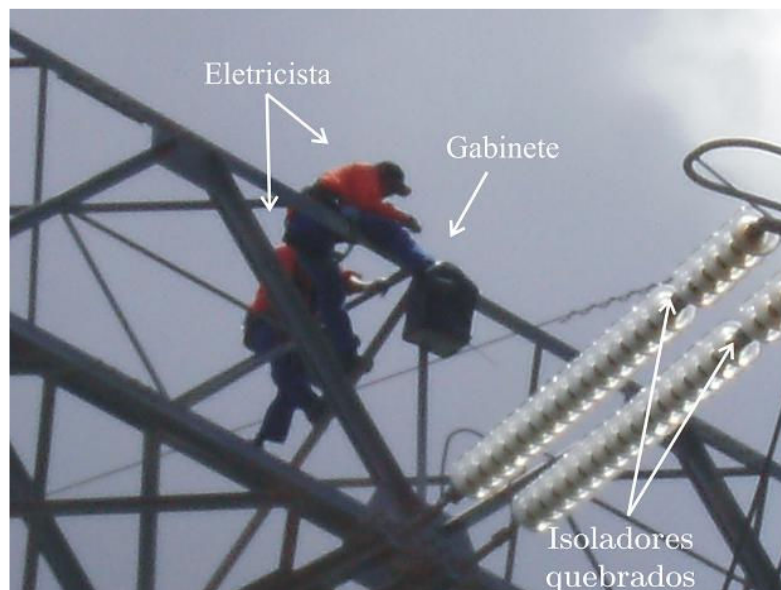


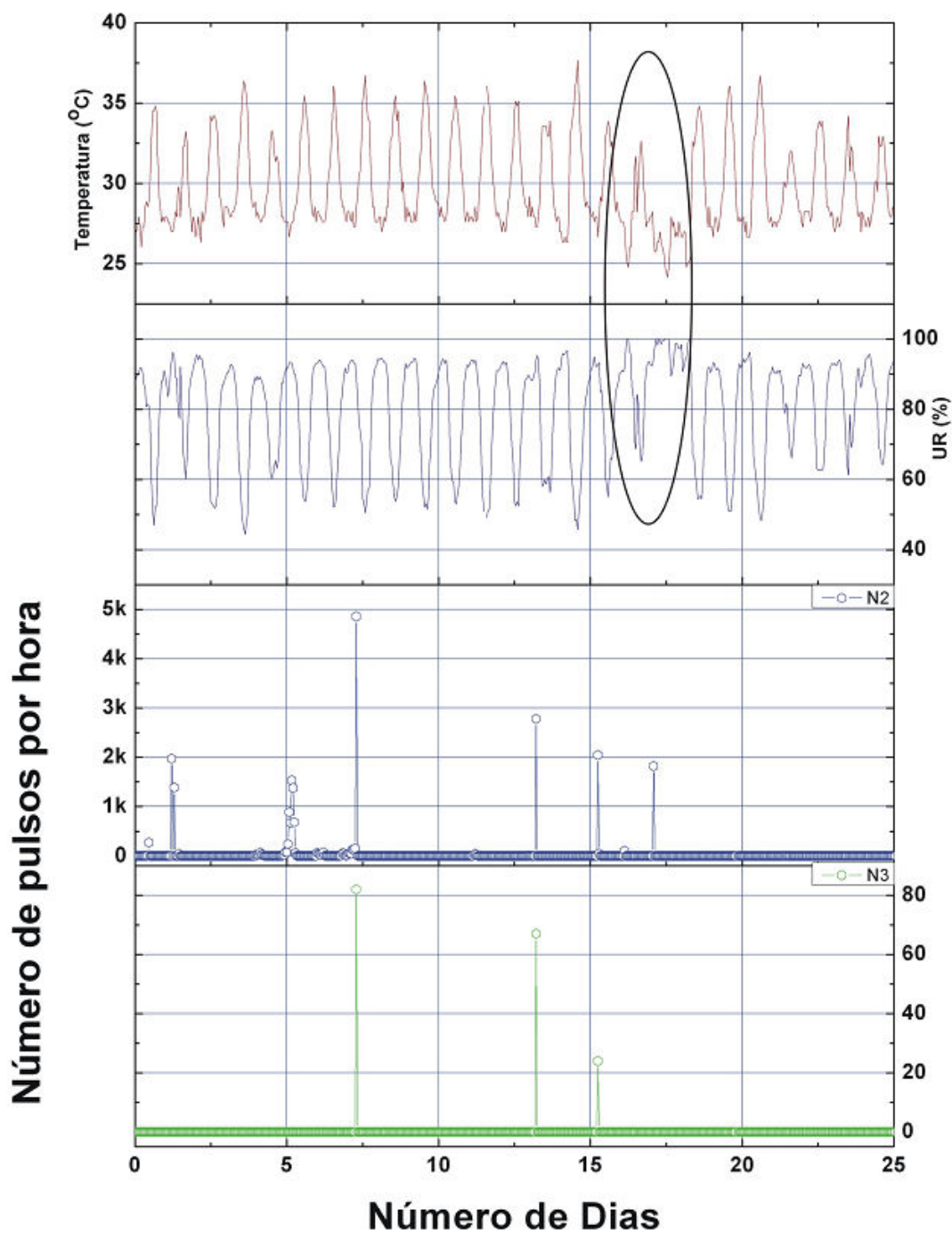
Figura 32 - Parâmetros registrados em São Miguel dos Campos, AL, no período de um mês. A região destacada indica ocorrência de chuva.



**Figura 33** – Fotografia obtida durante a instalação do sistema 04.

Antes da instalação dos sistemas 04 a 07, foi realizada uma modificação no circuito detector de pico máximo de corrente, reduzindo em 100 vezes o valor de uma capacitância no circuito com a finalidade de melhorar o tempo de resposta do circuito. Todavia, devido à dificuldade de simular o sinal da corrente de fuga em laboratório não foi possível testar de maneira confiável o desempenho da mudança. Com a mudança realizada, o circuito detector de pico não registrou as informações de forma confiável. O detector de pico dos sistemas 02 e 03 tinham tempo de resposta lento, pois apenas era observado registro correto de corrente de pico quando havia grande atividade de pulsos de corrente de nível 03 e 04, como, por exemplo, em São Miguel dos Campos. Se o sistema instalado lá registrou corrente de pico de 70 mA, significa que naquela hora houveram pelo menos centenas de picos de corrente com valores próximos de 70 mA. A conclusão é que podem ter ocorrido pulsos também acima de 70 mA. Devido à natureza aleatória dos pulsos de corrente de fuga, é difícil simular o seu sinal em laboratório. A análise do tempo de resposta do circuito foi realizada com uma fonte de corrente pulsada e que com esse equipamento não foi possível observar qual seria o comportamento exato do circuito detector de pico.

A latência média registrada nesse período foi em torno de 60 e 70 segundos para os pacotes tipo 01 e 02, respectivamente. O percentual de perda de pacotes foi de 0,37 e 0,47% para os pacotes tipo 01 e 02, respectivamente.



**Figura 34** - Parâmetros registrados na Torre da Lagoa em Pitaguary, CE, no período de um mês. O círculo no gráfico indica provável ocorrência de chuva.



## **6.4. Torre de 500 kV próxima à Subestação Fortaleza II, CE**

O sistema 05 foi instalado em Fortaleza próximo à subestação Fortaleza II. A tensão de trabalho da torre é de 500 kV. O sensor foi instalado em uma cadeia de isoladores de vidro do tipo suspensão.

No início do experimento, é possível observar na Figura 35 cerca de 20k pulsos/hora na faixa 01 e cerca de 1k pulsos/hora na faixa 02, com a temperatura e UR em torno de 24 °C e 100% respectivamente. No 6º dia de experimento, é registrada a maior atividade desse sistema com mais de 100kp/h na faixa 01, mais de 16kp/h na faixa 02 e cerca de 30 pulsos por hora (30p/h) na faixa 03 com a temperatura e UR em torno de 100% e 24 °C respectivamente. Do 17º até o 18º dia de experimento, é visualizado a mudança de comportamento da temperatura e UR, de forma similar às verificadas nos sistemas 03 e 04, e posteriormente a UR se mantém próxima de 100% e a temperatura em torno de 27 °C, indicando a ocorrência de chuva. Do 18º dia até o final do experimento praticamente não é registrada atividade, uma vez que o isolador está limpo devido às chuvas.

De forma similar ao sistema instalado em Pitaguary, não foi possível acessar o banco de dados do INPE para visualizar atividades pluviométricas nessa região. A latência média durante o período do experimento foi de 45,7 e 47,2 segundos para os pacotes tipo 01 e 02, respectivamente e o percentual de perdas de pacotes foi de 0,7 % para ambos os pacotes.

## **6.5. Torre de Caracará, CE**

O sistema 06 foi instalado em uma torre localizada no município de Caracará, Ceará. A tensão de trabalho da torre é de 500 kV. O sensor foi instalado em uma cadeia de isoladores de vidro do tipo suspensão. A instalação teve duração aproximada de duas horas. A Figura 36 (a) apresenta uma fotografia da torre de transmissão escolhida para instalação do sistema 06 e a Figura 36 (b) mostra em detalhes o gabinete do sistema, o painel solar, o sensor e os eletricitistas realizando a instalação.

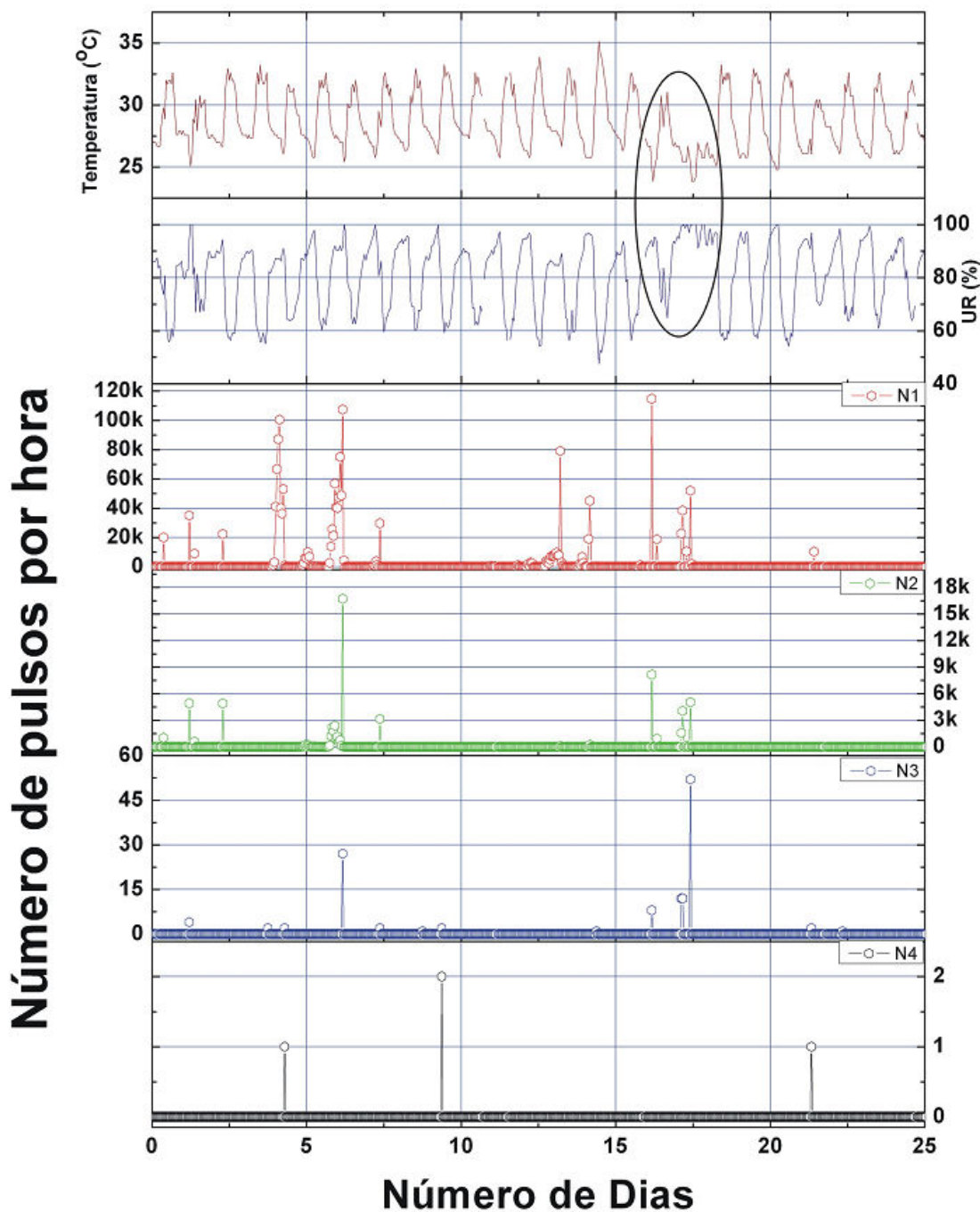


Figura 35 - Parâmetros registrados na torre próxima à subestação Fortaleza II, CE, no período de um mês. O círculo no gráfico indica provável ocorrência de chuva.



**Figura 36** - a) Fotografia da torre escolhida para instalação do sistema 06 e (b) gabinete, painel solar e sensor do sistema 06 sendo instalados pelos eletricitistas.

Não foi detectada atividade de corrente de fuga significativa até o 17º dia de experimento, quando foram registrados cerca de 27kp/h na faixa 01 e cerca de 2700 p/h na faixa 02, conforme pode ser visualizado na Figura 37. Ainda nessa Figura percebe-se que a umidade no início do experimento era de no máximo 80% e a temperatura mínima era em torno de 26 °C, ou seja, o ambiente não estava adequado para a manifestação de descargas parciais. No decorrer do experimento, a temperatura diminuiu e a umidade relativa aumentou gradativamente até que na madrugada do 17º dia de experimento até o dia seguinte, em destaque como I na Figura 37, a UR se mantém em torno de 95% e a temperatura em torno de 26 °C, o que pode indicar chuva ou neblina, uma vez que apenas um dia antes a UR atingiu quase 100 % e não houve atividade. No final do experimento, a umidade novamente estava próxima de 100 % e a temperatura estava em torno de 22 °C, o que pode ser observada na região destacada como II da Figura 37. Nesse momento é registrada atividade na faixa 01.

De forma similar ao sistema instalado em Pitaguary e ao sistema instalado próximo a subestação Fortaleza II, não foi possível acessar o banco de dados do INPE para visualizar atividades pluviométricas nessa região. A latência média durante o período do experimento foi de 43,7 e 45,9 segundos para os pacotes tipo 01 e 02, respectivamente e o percentual de perdas de pacotes foi de 0,7% para ambos os pacotes.

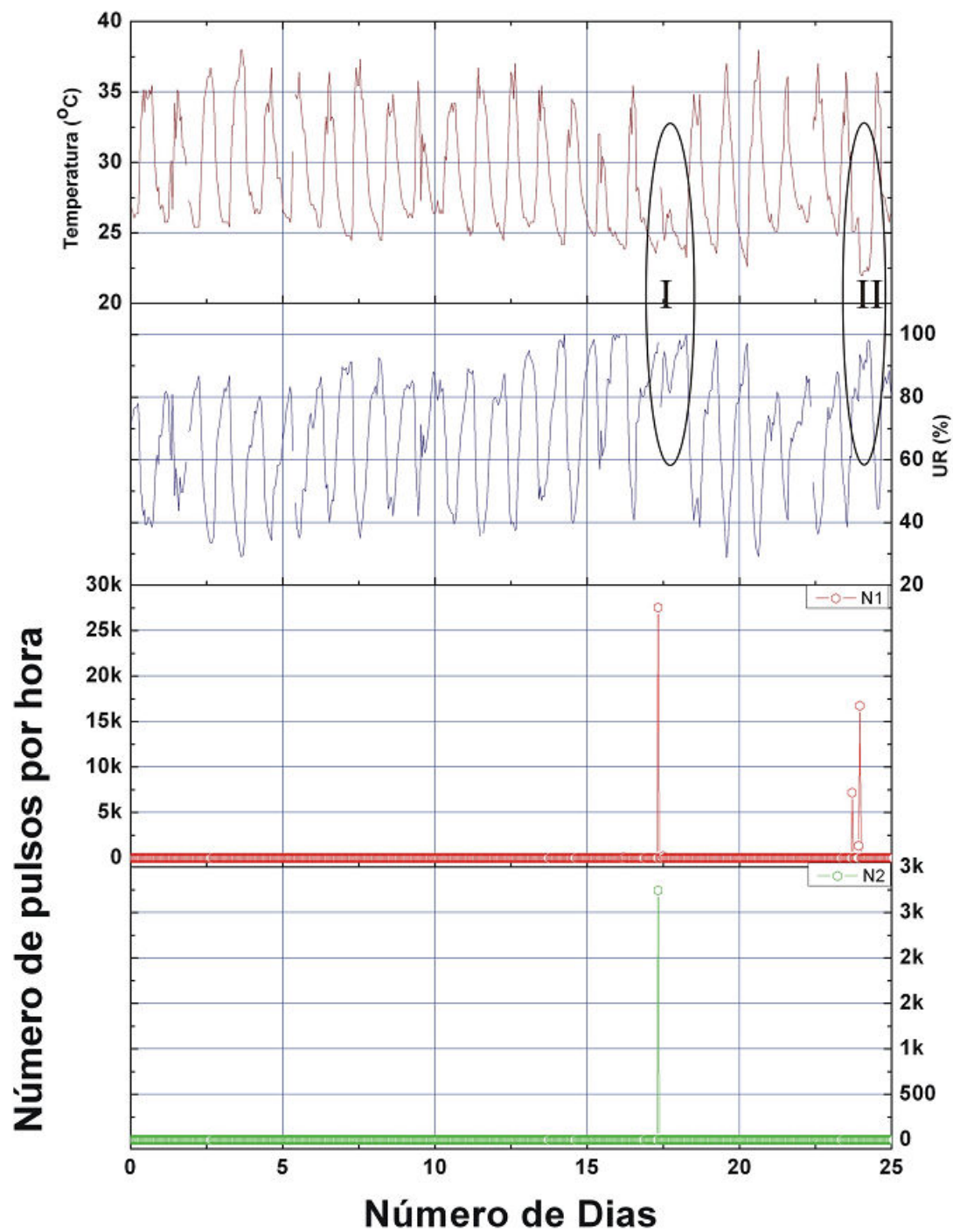
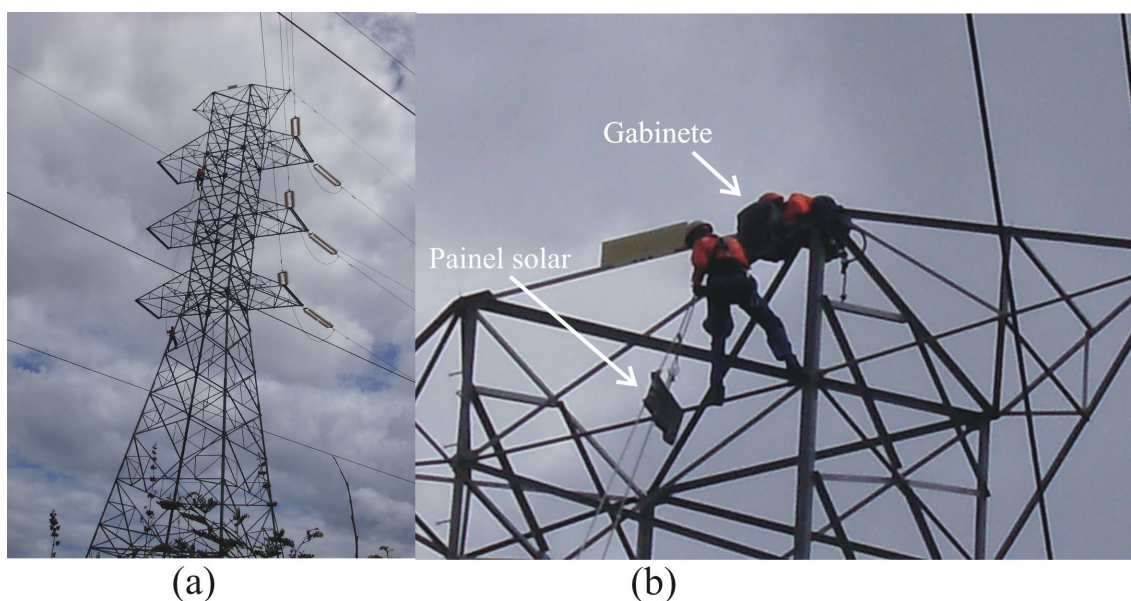


Figura 37 - Parâmetros registrados na torre de 500 kV em Caracará, CE, no período de um mês. As regiões destacadas I e II indicam provável ocorrência de chuva.

## 6.6. Torre de 230 kV em Mossoró, RN

O sistema 07 foi instalado em Mossoró no Rio Grande do Norte, em uma torre localizada próxima a uma estrada de barro. A tensão de trabalho da torre é de 230 kV. O sensor foi instalado em uma cadeia de isoladores de vidro do tipo ancoragem. A instalação teve duração aproximada de duas horas. A Figura 38 (a) apresenta uma fotografia da torre de transmissão escolhida para instalação do sistema 07 e a Figura 38 (b) mostra em detalhes o gabinete do sistema, o painel solar e os eletricitistas realizando a instalação.



**Figura 38** - (a) Fotografia da torre escolhida para instalação do sistema 07 e (b) gabinete e painel solar do sistema 07 sendo instalados pelos eletricitistas.

A Figura 39 mostra a atividade registrada no período de 25 dias contínuos. Durante quase todo o período do experimento, a umidade relativa variou entre 60 e 80% e a temperatura variou entre 27,5 a 36 °C, de acordo com a Figura 39. Em comparação aos demais sistemas instalados, o sistema instalado em Mossoró estava submetido a condições climáticas de mais baixa UR e mais alta temperatura. A partir do 5º dia de experimento, observa-se na região destacada I da Figura 39 o início de registro de atividade, com cerca de 7,5kp/h na faixa 01 e cerca de 1,3kp/h na faixa 02, com cerca de 80 % de UR e 27 °C de temperatura. No decorrer do experimento, são observados diversos registros de pulsos nas faixas 01, 02 e 03. Entre o 13º e 17º dia de experimento, pode-se visualizar na região destacada como II na Figura 39, instantes em que a UR está próxima de 100% e a temperatura

em torno de 25 °C. No 15º dia de experimento é registrada a maior atividade de corrente de fuga, com cerca de 180k, 31k, 6k e 2kp/h para as faixas 01, 02, 03 e 04 respectivamente. É provável a ocorrência de chuva no período indicado na região destacada II já que após o 17º dia de experimento não é observada atividade até o final do experimento. As causas do comportamento singular da umidade provavelmente estão relacionadas a problemas com o sensor de umidade ou problemas de conexões.

Também nessa localidade não foi possível acessar o banco de dados do INPE para visualizar atividades pluviométricas nessa região. A latência média durante o período do experimento foi de 44,4 e 46,3 segundos para os pacotes tipo 01 e 02, respectivamente e o percentual de perdas de pacotes foi de 0,24 % e 0,36 % para os pacotes tipo 01 e 02, respectivamente.

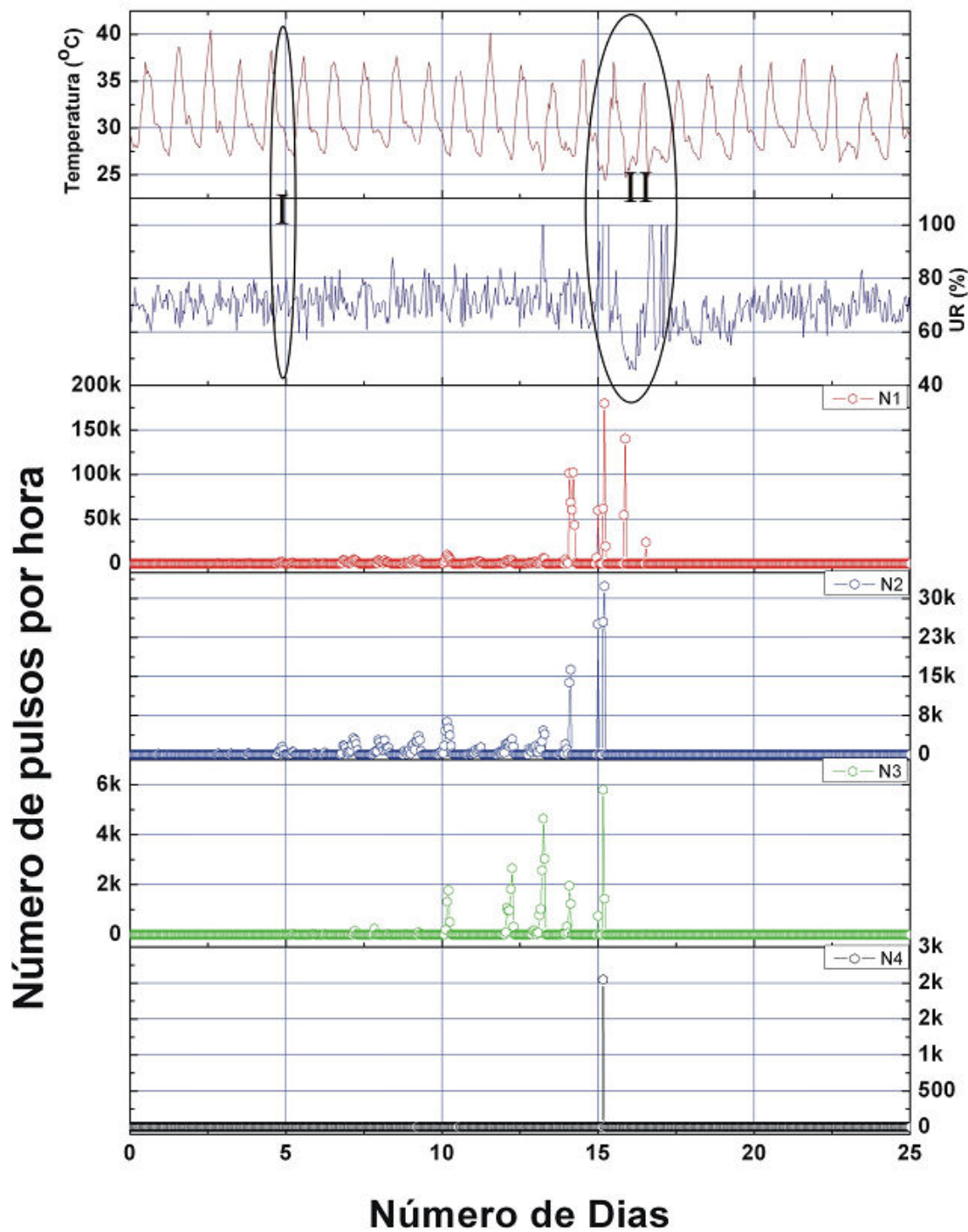


Figura 39 - Parâmetros registrados na torre de 230 kV nas proximidades da Subestação Mossoró II, RN, no período de um mês. As regiões destacadas I e II indicam períodos de maior atividade.

## 7. Conclusões e Trabalhos Futuros

Os principais objetivos deste trabalho, que eram o aprimoramento de um sistema completo para monitoração de corrente de fuga em cadeias de isoladores e a inclusão de um sistema de comunicação via satélite foram alcançados.

A transmissão das informações dos vários parâmetros registrados pelo equipamento sensor através de um sistema de comunicação via satélite mostrou-se eficiente, já que foi verificado para todos os sistemas instalados em pontos críticos, latência de transmissão bem inferior ao tempo necessário para realizar a transmissão de dados, além de percentual de perdas de pacotes inferior a 2%. Também foi confirmada a integridade das informações transmitidas.

O atributo utilizado para analisar o grau de poluição em cadeia de isoladores de alta tensão foi baseado em trabalhos anteriores [2]-[7]. No presente trabalho, o grau de poluição foi analisado a partir da contagem de pulsos de corrente de fuga em quatro faixas de valores pré - estabelecidas, juntamente com a umidade relativa e temperatura local. Os resultados experimentais preliminares em campo parecem indicar que as faixas de classificação adotadas no sistema sensor são adequadas para indicar a severidade do grau de poluição das cadeias de isoladores estudadas.

O novo módulo de processamento (MP) implementado neste trabalho apresenta melhorias e adições importantes em relação à versão anterior [4]. Essas melhorias incluem a utilização de circuitos de alimentação independentes para suprir o bloco analógico e digital do MP, inserção de mais um nível de monitoramento de corrente de fuga e a monitoração de temperatura, complementando a correlação do ambiente circunvizinho ao isolador em análise. Além disso, o novo MP tem uma porta de comunicação que permite realizar a gravação direta do código no microcontrolador, sem necessidade de remoção do processador, permitindo assim uma rápida atualização de versão de código em qualquer local, incluindo o próprio local de instalação do sistema sensor. O novo código desenvolvido para o microcontrolador permite obter uma maior capacidade de contagem, aumentando assim o nível de saturação em relação à versão anterior.



Foram instalados seis sistemas em seis torres de perfis e condições ambientais distintas nos estados de Pernambuco, Alagoas, Rio Grande do Norte e Ceará. Os sistemas se mostraram eficientes para a avaliação do estado de poluição dos isoladores monitorados. A inserção de um quarto nível de limiar de corrente de fuga de 40 mA possibilitou registrar com maior precisão o comportamento das descargas parciais nas cadeias de isoladores em análise, já que foi observada atividade acima desse limiar para quase todos os sistemas instalados. Os resultados experimentais permitiram claramente verificar a ocorrência de chuva, notados pela inversão dos ciclos de temperatura e umidade típicos, com a intensificação simultânea das taxas de ocorrências de descargas parciais durante os respectivos períodos de reversão dos ciclos de umidade e temperatura. A confirmação de que esses eventos eram de fato indicativos de chuvas pôde ser obtida em vista da redução repentina nos níveis de descargas parciais após ocorrências dos eventos, algo que só poderia ocorrer com a lavagem natural pela chuva dos isoladores sob observação. Em alguns casos foi possível confirmar que os efeitos observados eram de fato devido à ocorrência de chuvas, com base em dados de precipitação pluviométrica do INPE.

Os próximos trabalhos a serem realizados incluem: monitoração da corrente de fuga, umidade relativa e temperatura a longo prazo, a correlação dessas informações referentes à corrente de fuga com dados de inspeção da CHESF e a utilização de técnicas de computação inteligente para análise das informações. Essa investigação de mais longo prazo permitirá obter uma base de dados para estudos mais elaborados do fenômeno. Com isso, poder-se-á observar, por exemplo, padrões de comportamento da corrente de fuga em relação a frequências e amplitudes dos pulsos, relações desses parâmetros com estações do ano, períodos de colheitas, fluxo de veículo em rodovias e estradas e demais eventos que promovam a formação e deslocamento de poluentes para a superfície do isolador. Serão também realizadas comparações dos resultados obtidos com os relatórios de inspeção da CHESF para buscar correlações dos dados de pulsos de corrente de fuga com o estado de poluição dos isoladores, periodicidade de lavagens nas cadeias de isoladores e possíveis ocorrências de *flashover*. De posse de um banco de dados detalhado, pode-se em princípio utilizar uma variedade de técnicas, incluindo, computação inteligente, reconhecimento de padrões ou teoria da decisão, para que padrões ou parâmetros possam ser identificados de forma analítica para definição de níveis de alerta que possa ser utilizado no sistema de supervisão da empresa.

## Referências Bibliográficas

[1] F.J.M.M. Cavalcanti, “Controle de Análise de Desempenho de Isoladores de Linha de Transmissão em Ambientes com Poluição Visando Ações Preventivas” Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, Brasil, 2004.

[2] Eduardo Fontana, Sérgio C. Oliveira, F. J. M. M. Cavalcanti, R. B. Lima, J. F. Martins-Filho and E. Meneses-Pacheco, “Novel Sensor System for Leakage Current Detection on Insulator Strings of Overhead Transmission Lines,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 4, pp. 2064-2070 (2006).

[3] Eduardo Fontana and Sérgio C. Oliveira, “Optical System for Flashover Prediction in High Voltage Transmission Lines,” Proceedings of the 2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference. Salvador, Research Publishing Services, Vol. 1, pp. 224-228 (2007).

[4] Sérgio C. Oliveira, “Sistema de Detecção Óptica de Descargas Parciais em Cadeias de Isoladores de Linhas de Transmissão de Alta Tensão” Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE, Brasil, 2008.

[5] Sérgio C. Oliveira and Eduardo Fontana, “Optical Detection of Partial Discharges on Insulator Strings of High-Voltage Transmission Lines,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 7, pp. 2328-2334 (2009).

[6] Sérgio C. Oliveira, Eduardo Fontana and F. J. M. M. Cavalcanti, “Leakage Current Activity on Glass-Type Insulators of Overhead Transmission Lines in the Northeast Region of Brazil,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 2, pp. 822-827 (2009).

[7] Sérgio C. Oliveira, Eduardo Fontana and F. J. M. M. Cavalcanti, “Real Time Monitoring of the Leakage Current of 230 kV Glass-Type Insulators During Washing. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 4, pp. 2257-2260 (2009).

- [8] R. A. Lima, Eduardo Fontana, J. F. Martins-Filho, T. L. Prata, G. O. Cavalcanti, R. B. LIMA, Sérgio C. Oliveira and F. J. M. M. Cavalcanti, “Satellite Telemetry System for Pollution Detection on Insulator Strings of High-Voltage Transmission Lines,” Proceedings of the 2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, Vol. 1, pp. 1-4, (2009).
- [9] M. G. Danikas, “The Definition Used of Partial Discharge Phenomena”, IEEE Transactions on Electrical Insulators, Vol. 28, No. 6, pp 1075-1081 (1993).
- [10] W. H. M. Cuenca, “Caracterização dos sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a partir de Modelos Experimentais”. Tese de doutorado, Depto. Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- [11] Guilherme C. Silva, “DESCARGAS PARCIAIS ESTIMULADAS POR RAIOS-X CONTÍNUO E PULSADO EM MATERIAIS DIELÉTRICOS: SIMILARIDADES E DIFERENÇAS.”, Tese de doutorado, Depto de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- [12] Maria Zanir, “Contribuição ao Estudo dos Efeitos da Tensão Disruptiva de Impulso Atmosférico em Materiais Isolantes” Dissertação de Mestrado, Depto. Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, Campinas, 1984.
- [13] José Maurício de B. Bezerra, “Caracterização de Atributos de Sinais para Utilização de Técnicas de Reconhecimento de Padrões na Avaliação do Isolamento de Instalações e de Equipamentos Elétricos.”, Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, João Pessoa – PB, Brasil, 2004.
- [14] A. J. R. Hernanz, J. J. C. Martín, J. M. Gogeaescoechea, I. Z. Belver, “Insulator pollution in transmission lines”, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPQ, Mallorca, Espanha.

- [15] J. L. Fierro-Chavez, I. Ramires-Varquez, G. Montoya-Tena , “ On-line Leakage current monitoring of 400 kV insulator string pollutes areas” IEEE Proceeding of the Generation Transmission and Distribution Conference, Vol. 143, No.6, pp. 560-564, November, 1996.
- [16] R. O. Silva, O. T. Bastos, G. J. Xavier e E. G. Costa, “Isoladores tipo disco de vidro temperado – Análise do desempenho e vida útil no sistema CHESF”, Procedimentos internos CHESF.
- [17] H. R. Zeller, “Breakdown and pre-breakdown phenomena in solid dielectrics”, IEEE Transactions on. Electrical Insulator, Vol. EI-22, 1987, pp.115-122.
- [18] F. A. M. Rizk, D. H. Nguyen, “AC SOURCE-INSULATOR INTERACTION IN HV POLLUTION TESTS”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 4, April 1984.
- [19] G. J. Delben, “Avaliação da resposta da Bobina de Rogowski para aplicação em sensor de descarga elétrica em isoladores”. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade do Paraná, Curitiba-PR, Brasil, 2008.
- [20] P. T. Tsarabaris, C. G. Karagiannopoulos, A. D. Polikrati, M. P. Paisios and N. J. Theodorou, “An investigation regarding leakage current on high voltage non-ceramic insulators”, 3d Int. Conf. Power and Energy Systems (EuroPES), Marbella, Spain, Vol. 1, pp. 717-720, September 2003.
- [21] P. T. Panagiotis, Constantinos G. Karagiannopoulos, P. D. Bourkas and N. J. Theodorou, “An Experimental Investigation of Leakage Current on High Voltage Contaminated Insulator” Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering Vol.2, No. 1, WINTER – SPRING 2003.
- [22] C. N. Richards and J. D. Renowden, “DEVELOPMENT OF REMOTER INSULATOR CONTAMINATION MONITORING SYSTEM”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.12, No. 1, pp 389-397, January 1997.

- [23] S. E. D. Habib and M. Khalifa, "A new monitor for pollution on power line insulator Part 1: Design, construction and preliminary test", IEEE Proceeding, Vol. 133, No.2, pp 105-108, March 1986.
- [24] E. Thalassinakis and C.G. Karagiannopoulos: "Measurements and interpretations concerning leakage currents on polluted high voltage insulators", Meas. Sci. Technol, Vol.14, pp. 421-426, 2003.
- [25] A. E. Vlastós and T. Orbeck, "OUTDOOR LEAKAGE CURRENT MONITORING OF SILICONE COMPOSITE INSULATOR IN COASTAL SERVICE CONDITIONS", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11, No. 2, pp 1066-1070, April 1996.
- [26] Maral G., Bousquet M., "Satellite communications System: Systems, Techniques and Technology" 4 ed. John Wiley & Sons, LTD, 2007.
- [27] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. Disponível em <[www.inpe.gov.br](http://www.inpe.gov.br)>, acessado em 12 de janeiro de 2010.