

Antonio Marcos Clemente de Moraes

**MEDIÇÃO DIRETA DE TEMPERATURA E INCLINAÇÃO EM  
CABOS AÉREOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós Graduação em Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Mestre em Sistemas de Energia  
Orientador: Prof. Dr. Hans Helmut Zürn  
Coorientador: Prof. Dr. Saulo Güths

Florianópolis  
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Moraes, Antonio Marcos Clemente de  
Medição direta de temperatura e inclinação em cabos  
aéreos de linhas de transmissão. / Antonio Marcos Clemente  
de Moraes ; orientador, Hans Helmut Zürn ; co-orientador,  
Saulo Güths. - Florianópolis, SC, 2013.  
107 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Ampacidade. 3. Linhas de  
transmissão. 4. Monitoramento em tempo real. I. Zürn, Hans  
Helmut. II. Güths, Saulo. III. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica. IV. Título.

Antonio Marcos Clemente de Moraes

## **MEDIÇÃO DIRETA DE TEMPERATURA E INCLINAÇÃO EM CABOS AÉREOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Sistemas de Energia”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 04 de Outubro de 2013.

---

Prof. Patric Kuo Peng, Dr.  
Coordenador do Curso

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Hans Helmut Zürn, Dr. – Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Nelson Jhoe Batistella, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Vicente de Paulo Nicolau, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Valci Vitor Coelho, MEng  
Eletrosul Centrais Elétricas S.A.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, e aos preciosos amigos que Deus tem me permitido caminhar ao longo dos anos.



## AGRADECIMENTOS

Imensa gratidão e sinceros agradecimentos a todos que colaboraram para realização desse trabalho, mais que um trabalho de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, a concretização de um sonho. Sonho pessoal, acadêmico e profissional que compartilho com todos que em algum momento me concederam a honra da companhia, sorrisos nos momentos de alegria e apoio e incentivo nas dificuldades.

Agradeço aos laboratórios, grupos de pesquisa e empresas que prestaram uma importante colaboração à realização deste trabalho: LMPT, LABTERMO, LABSPOT, LALTE, GRUCAD, GEMCO, INEP, ELETROSUL, ETAU e LABMETRO. Agradeço igualmente ao PPGEEL, à CAPES e todos os membros da banca examinadora.

Com muito carinho agradeço minha família, Pai Moraes, Mãe Mara, meus irmãos Alexandre e Altrian e minha querida irmã Adeluci. Indiscutíveis agradecimentos devidos aos mentores de uma história de vida, Davi Gomes Soares, Dante Conselvan, Carlos Roberto Appoloni, Saulo Güths, Hans Helmut Zürn, Lucas Lone, Luis Reinaldo Sciena, Ronaldo Palomares Rufino, Marcelo da Silva Soares, Wilson Sachetin Marçal, Anderson Camargo Moreira, Ciro Berbert Moitinho, Denise de Luca, Silvana Vella, Nelson Jhoe Batistela, Liao Chi Tung, Vilson Duro Garcia, Luiz Adolfo Hegele Junior, Valci Vitor Coelho, Celso Perez Fernandes, Valdinei de Souza Felisberto, Luiz Noboru Marukawa, Fabio Lopes, Roger Garcia, Gilberto da Silva, Edevaldo Brandílio Reinaldo e Ewaldo Luiz Mehl.

Agradeço a todos os amigos que durante as mais diversas etapas da minha vida estiveram ao meu lado, companheiros para bons e maus dias!

Ao Eterno, constante e imutável que provê em seu perpassar atemporal, a graça e amor com os quais não me susteria sobre essa terra.



***"Não te mandei eu? Sê forte e corajoso; não temas, nem te espantes, porque o SENHOR, teu Deus, é contigo por onde quer que andares." Josué 1:9***





## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar um sistema capaz de medir de forma direta a temperatura e a inclinação dos condutores de uma linha de transmissão e enviar esses dados por uma via sem fio. O sistema é capaz de operar sob a influência dos campos eletromagnéticos radiados por uma linha de transmissão de 230 kV e ainda prover alimentação para os circuitos eletrônicos relacionados de forma autônoma, sem dependência de baterias ou luz solar. Para isso foi desenvolvido um equipamento que é climpado ao redor do condutor de interesse de forma a prover apoio mecânico aos sensores e possibilitar que o mesmo possa obter a energia elétrica para seu funcionamento por meio da indução magnética. No escopo do monitoramento das grandezas envolvidas na operação das linhas de transmissão, esse dispositivo fornece informações necessárias a fim de se otimizar a capacidade de transmissão de uma linha, permitindo que a mesma opere em condições de corrente além das nominais especificadas em projeto, quando as condições climáticas ao longo da linha forem favoráveis. O ponto de vista conservador sob o qual são concebidos projetos de linhas de transmissão estipula valores de ampacidade que em determinadas situações poderiam ser maiores sem colocar em risco os condutores e a segurança da operação. O conhecimento da temperatura e inclinação do cabo em tempo real permite que a corrente possa ser aumentada sem sobreaquecimento dos cabos condutores e conseqüente aproximação do solo além do permitido. Embora os resultados obtidos com o sistema desenvolvido sejam satisfatórios, é desejável que este sensor trabalhe associado a outros pares ao longo de uma linha a fim de se obter maior amostragem dos pontos medidos visando confiabilidade em seu uso, considerando que variações microclimáticas ao longo da linha podem acarretar em pontos críticos de risco térmico que devem prioritariamente ser levados em consideração durante a operação da linha. O sistema ainda permite a adição de outros sensores de monitoramento meteorológico.

Palavras-chave: Ampacidade. Linhas de transmissão. Monitoramento em tempo real.



## **ABSTRACT**

This work aims to present a system capable of measuring temperature and inclination of the conductors of a power transmission line directly and send this data by wireless. The system is capable of operating under the influence of electromagnetic fields inherent to a transmission line of 230 kV and provides power to the corresponding electronic circuitry autonomously, without the need of batteries or sunlight. For this we developed a device that is clamped around the conductor of interest in order to provide mechanical support to the sensors and allow it to get electricity for its operation by magnetic induction. In the context of monitoring the measurements involved in the operation of the transmission lines, this device provides necessary information in order to optimize the transmission capacity of a line, allowing it to operate over the nominal current condition specified in its design, when climate conditions along the line are favorable. The conservative point of view under which design of transmission lines are made stipulates ampacity values, which in certain situations could be larger without endangering wires and operation safety. The monitoring of temperature and inclination of the cable in real time allows an increase of the electric current without overheating it and the resulting cable to ground clearance reduction beyond safety limits. Although the results obtained with the developed system are satisfactory, it is desirable to work in conjunction with other sensor pairs along a line in order to obtain more measuring points on it, rendering the data more representative for its use, since microclimatic variations along the line can result in critical points of thermal risk that should be taken into consideration during the operation of the line. The system also allows the addition of other sensors for weather monitoring.

**Keywords:** Ampacity. Transmission Lines. Real-time monitoring.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relações dos cabos ACSR. Adaptado de Thrash (1994). .....	33
Figura 2 – Catenária. ....	37
Figura 3 – Esquema do balanço térmico em um cabo aéreo (adaptado de Muhr, 2008). ....	42
Figura 4 – Esquema básico para medição de temperatura com NTC. ....	45
Figura 5 – Variação ôhmica em função da temperatura para um termistor do tipo NTC. ....	45
Figura 6 – Simulação do comportamento do campo elétrico no entorno de uma esfera carregada. ....	51
Figura 7 – Manifestação de Corona em linhas de transmissão .....	53
Figura 8 - Esferas de alumínio logo após a fundição e caixa de machos. ....	59
Figura 9 - Anteparos de alumínio selados com massa plástica. ....	60
Figura 10 – Deposição de resina com o molde do núcleo posicionado. ....	60
Figura 11 – Confinamento de resina com núcleo montado. ....	61
Figura 12 – Dobradiça de articulação da esfera. ....	62
Figura 13 – Sistema de fechamento da esfera. ....	63
Figura 14 - Esfera de alumínio para montagem da eletrônica. ....	63
Figura 15 – Módulo XBee-PRO® 900/900 DigiMesh. ....	64
Figura 16 - Bandas de frequência de uso livre pelo mundo. ....	65
Figura 17 – Placa de rádio e instrumentação. ....	66
Figura 18 - Exemplo de uma possível topologia Mesh. ....	67
Figura 19 – Tela do monitor de temperatura. ....	68
Figura 20 – TC articulado. ....	70
Figura 21 - Curva BxH do Ferrite IP12E. ....	71
Figura 22 – Núcleo U em Ferrite. ....	71
Figura 23 – Enrolamento montado no núcleo de Ferrite. ....	72
Figura 24 – Circuito da fonte de alimentação. ....	74
Figura 25 – Bucha com sensor de temperatura. ....	76
Figura 26 - Banho térmico utilizado para calibração dos sensores. ....	76
Figura 27 – Sensor de inclinação. ....	78
Figura 28 – Posição do sensor de inclinação. ....	78
Figura 29 – Equipamento montado no cabeçote divisor. ....	79
Figura 30 – Aplicação do nível de precisão no sistema de inclinação com cabeçote fresador. ....	80
Figura 31 – Representação do aparato experimental. ....	82
Figura 32 - Aparato experimental, conforme a representação da Figura 31. ....	83
Figura 33 – Montagem com pontas de arame na proximidade do dispositivo para intensificar efeito corona nas proximidades. ....	83
Figura 34 – Dispositivo montado em terminação do aparato experimental. ....	84
Figura 35 – Aparato experimental dos testes em alta corrente. ....	85
Figura 36 – Alicates amperímetro para testes em alta corrente. ....	85
Figura 37 - Fonte de alimentação operando em 46,2A. ....	87
Figura 38 – Fonte de alimentação operando em 62A. ....	88

Figura 39 - Fonte de alimentação operando em 762A. ....	89
Figura 40 – Comparação entre os valores de temperatura obtidos com o próprio instrumento e um padrão, posicionados sobre o cabo, externamente à esfera. ..	91
Figura 41 – Comparação entre os valores de temperatura obtidos com o próprio instrumento e um padrão, posicionados sobre o cabo, internamente à esfera. ....	92
Figura 42 – Curva de calibração em temperatura. ....	93
Figura 43 – Curva de calibração em inclinação. ....	94
Figura 44 – Flecha em função da variação da temperatura. ....	95
Figura 45 – Flecha em função da inclinação. ....	95
Figura 46 – Resolução da flecha em função da temperatura. ....	96
Figura 47 – Resolução da flecha em função da inclinação. ....	96

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Temperatura de operação das linhas. Adaptada de Camargo (2009). .....	43
Tabela 2 - Comparação entre métodos de medição de temperatura.....	46
Tabela 3 – Relação entre tensão aplicada e descargas parciais.....	90





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SIPOT – Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro;

SIN – Sistema Interligado Nacional;

PAR – Plano de Ampliação e Reforços;

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico;

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas;

UHE – Usina Hidrelétrica de Energia;

LT – Linha de Transmissão;

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica;

MME – Ministério de Minas e Energia;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

TAESA – Transmissora Aliança de Energia Elétrica;

RMLT – Rede de Monitoramento de Linhas de Transmissão;

LEPTEN – Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia;

CPST – Contratos de Prestação de Serviços de Transmissão;

ACSR – Aluminum Conductor Steel-Reinforced;

CI – Circuitos Integrados;

RFID – Radio Frequency Identification;

IR – Infravermelho;

NTC – Negative Temperature Coefficient;

PTC – Positive Temperature Coefficient;

SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition;

TC – Transformador de Corrente;

LALTE – Laboratório de Alta Tensão da Eletrosul;

LMPT – Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas;

LABSPOT – Laboratório de Sistemas de Potência;

LABTERMO – Laboratório de Ciências Térmicas;

GRUCAD – Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos

Eletromagnéticos;

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina;

EMC – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina;

CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Électriques;

RF – Radiofrequência;

SNR – Signal-to-noise Ratio;

CA – Corrente Alternada;

CC – Corrente Contínua;

A/D – Analógico-Digital.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA PROPOSTO .....	25
1.1	OBJETIVOS .....	28
1.1.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>28</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>28</b>
1.2	JUSTIFICATIVA .....	29
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>31</b>
2.1	LINHAS DE TRANSMISSÃO .....	31
2.1.1	Tipos de Linhas de Transmissão .....	32
2.1.2	Tipos de cabos aéreos .....	32
2.1.3	Parâmetros elétricos e efeitos em Linhas de Transmissão... 34	
2.1.4	Parâmetros mecânicos dos cabos aéreos de LT .....	36
2.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE AMPACIDADE EM LTs .....	41
2.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA .....	44
2.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE MEDIÇÃO DE INCLINAÇÃO .....	47
2.5	ASPECTOS DO ELETROMAGNETISMO .....	47
2.6	ASPECTOS RELACIONADOS À ALTA TENSÃO .....	49
2.6.1	Considerações sobre o efeito das pontas.....	50
2.6.2	Considerações sobre o efeito corona .....	52
2.6.3	Considerações sobre interferência e incompatibilidade eletromagnética.....	53
2.7	ANÁLISE DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO.....	55
2.7.1	Incerteza Expandida (U).....	55
2.7.2	Estimativa da incerteza combinada ( $u_c$ ) .....	56
<b>3</b>	<b>ASPECTOS CONSTRUTIVOS .....</b>	<b>57</b>
3.1	COMPOSIÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA .....	57
3.1.1	A esfera de alumínio .....	57
3.1.2	O confinamento de resina .....	59
3.1.3	Sistema de Climragem .....	61
3.2	SISTEMAS DE AQUISIÇÃO E ENVIO DE DADOS .....	64

3.2.1	Eletrônica de aquisição.....	64
3.2.2	Topologia da rede de comunicação e método de transmissão de dados.....	66
3.2.3	Automação da Medição .....	67
3.3	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO TRANSFORMADOR .....	68
3.3.1	Tipos de transformadores de corrente .....	68
3.3.2	Detalhes sobre o núcleo do transformador .....	70
3.3.3	Detalhes sobre as bobinas do transformador .....	72
3.4	PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO.....	73
3.5	MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	75
3.5.1	Montagem do sensor de temperatura .....	75
3.5.2	Calibração em temperatura .....	76
3.6	MEDIÇÃO DE INCLINAÇÃO .....	77
3.6.1	Montagem do sensor de inclinação .....	77
3.6.2	Calibração em inclinação.....	78
<b>4</b>	<b>ENSAIOS REALIZADOS .....</b>	<b>81</b>
4.1	ENSAIOS EM ALTA TENSÃO.....	81
4.2	ENSAIOS EM ALTA CORRENTE.....	84
4.3	ENSAIOS DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO.....	86
<b>5</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>87</b>
5.1	FUNCIONAMENTO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO.....	87
5.2	RESULTADOS DOS ENSAIOS EM ALTA TENSÃO .....	89
5.3	RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA.....	91
5.4	RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO SENSORE DE INCLINAÇÃO.....	93
5.5	COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE MEDIÇÃO .....	94
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>97</b>
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	98
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>99</b>

<b>ANEXOS .....</b>	<b>103</b>
Anexo A – Principais características do condutor de alumínio ACSR modelo Grosbeak 636 MCM.....	103
Anexo B – Características do módulo XBee-PRO® 900/900 DigiMesh. .	104
Anexo C – Núcleo de Ferrite Thornton, modelo NC-100/57/25.....	105
Anexo D – Especificações do sensor de inclinação VTI Technologies, modelo SCA121T-D05.....	107







# 1 INTRODUÇÃO

## CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA PROPOSTO

O crescimento do setor elétrico brasileiro nos últimos anos tem impulsionado o concomitante aumento da capacidade de transmissão de energia elétrica. Com isso, muitas obras de expansão têm sido realizadas no sistema de transmissão visando o aumento da capacidade de transporte e interligação dos sistemas de geração com os grandes centros consumidores.

O sistema elétrico brasileiro é fortemente dependente da energia advinda das hidrelétricas e segundo estudos apresentados pelo Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro - SIPOT, desenvolvido pela Eletrobras. Os grandes potenciais hidrelétricos ainda não explorados no país estão distantes dos grandes centros consumidores (SIPOT, 2013). Fato que tem levado à construção de grandes linhas de transmissão como o “linhão” do Madeira e o da Amazônia.

Associado a outros fatores importantes, como a grande extensão territorial e as variações climáticas e hidrológicas do país, o sistema hidrelétrico tende a produzir excedentes em determinadas regiões e períodos do ano. Dessa forma, a transmissão de grandes quantidades de energia e a interligação dos sistemas é fundamental para o suprimento ininterrupto de eletricidade no país. Como exemplo têm-se as usinas hidrelétricas de Jirau, Santo Antônio e Belo Monte que estão sendo construídas no norte do país.

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o Sistema Interligado Nacional – SIN é formado por empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Apenas 3,4% da capacidade de produção de eletricidade do país encontram-se fora do SIN, em pequenos sistemas isolados, localizados principalmente na Região Amazônica (ONS, 2013).

Segundo o Plano de Ampliação e Reforços (PAR 2012-2014) realizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, o SIN dispõe atualmente de 104.610 km de linhas de transmissão, com previsão de aumentar 25.195 km até o final de 2014, a uma taxa média de crescimento prevista entre 2011 e 2014 de 6,9% anuais, contra os 3,7% registrados anteriormente entre os anos de 1999 e 2010.

A construção de novas linhas de transmissão se deve em grande parte às novas usinas que estão sendo construídas e conectadas ao SIN, como, por exemplo, a Usina Hidrelétrica de Energia Teles Pires, no estado do Mato Grosso, que utilizará as águas do rio Teles Pires para gerar em

sua capacidade máxima 1820 MW. Outra parte se deve a reforços em trechos de linhas já existentes, devido a aumentos de carga ou a ligação das novas usinas que estão em construção no norte do país. Estudos apresentados pela Empresa de Pesquisas Energéticas – EPE, criada pelo Ministério de Minas e Energia - MME, sugerem linhas de transmissão para corrente alternada que chegam a 1500 km em transmissão a 500 kV para atender a UHE Teles Pires (Nota Técnica DEA, 2011).

Deste modo, a transmissão compreende uma função crucial para a realização do transporte da energia elétrica, estando sujeita a questões como falhas de equipamentos, paradas para manutenção, aumentos de carga, adversidades atmosféricas, perdas técnicas, vandalismo, entre outros.

Algumas vezes menosprezada, a energia dissipada pelos condutores ao longo da rota de passagem da eletricidade, chamada de perdas técnicas, são inerentes ao processo de produção e à entrega da energia, e não podem ser completamente eliminadas ou evitadas. Entretanto, deve-se buscar reduzi-las a um nível ótimo de forma que sua contribuição no custo de entrega da energia seja minimizada (Camargo, 2009).

Conduzidos pelo CIGRÉ (Conseil International des Grands Réseaux Électriques), estudos têm demonstrado que os valores adotados nos modelos atualmente utilizados para elaboração de projetos de LTs (Linhas de Transmissão), introduzidos com o trabalho de Morgan (1986), são conservadores. Tal aspecto conservador de projeto sob o qual são concebidas as linhas de transmissão, no que tange os limites de operação em função do risco térmico e risco de falta, podem ser modificados baseando-se em levantamentos climáticos realizados nas regiões de construção das LTs ou ainda de dados adquiridos em tempo real.

Os procedimentos aplicados na concepção dos projetos de linhas de transmissão no Brasil se baseiam na norma NBR 5422 (Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica) de 1985. Recentemente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT iniciou a revisão da norma tendo por base a Resolução Normativa 191 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, com o objetivo de flexibilizar a operação das linhas de transmissão baseado nas recomendações do CIGRÉ.

Muitas linhas em operação no Brasil já têm mais de 40 anos, e esse fato influencia fisicamente alguns parâmetros que podem diminuir sua ampacidade (corrente nominal na qual condutor pode operar dentro dos limites de segurança pré-determinados em projeto). Esses parâmetros podem ser a absorvância e a refletância solar dos cabos aéreos, além da

degradação das características mecânicas dos condutores ao longo dos anos.

Visando o aumento da capacidade das linhas de transmissão, diversas técnicas de recapacitação têm sido apresentadas, sejam por fabricantes bem estabelecidos no mercado ou mesmo pelas empresas do setor elétrico. As técnicas abordam diferentes pontos de vista de operação, gerando polêmica quando permeiam filosofias distintas de manutenção e segurança. O fato é que otimizar a operação das linhas de transmissão já existentes, processo conhecido como *uprating*, poupa a curto e médio prazo a construção de novas linhas, economizando assim somas consideráveis, e permite expandir a capacidade transmitida por linhas concebidas sob aspectos conservadores de projeto. De 2001 a 2007 foram registrados investimentos em P&D na área de recapacitação que somam R\$ 3.640.000,00 (Frontin, 2010).

Trabalhos sugerem que métodos de recapacitação baseados no aumento da ampacidade permitem acréscimos de até 20% da potência nominal da linha (Barthold, 2008). Basicamente os processos de *uprating* sugerem o acréscimo da potência da linha por meio do aumento da corrente e/ou tensão de operação, utilizando diversos procedimentos como: recondutoramento (substituição dos cabos condutores), elevação da suspensão dos cabos, transformação de circuitos duplos em simples, aumento do número de condutores por fase, expansão do feixe de subcondutores existentes, uso de ligas de alumínio termo-resistente ou ainda alteração do limite térmico dos condutores, entre outros (Frontin, 2010).

Ainda sobre o acréscimo da capacidade de transmissão, a grande extensão territorial e as diferenças climáticas nas diversas áreas de abrangência do SIN podem ser exploradas localmente. O projeto RMLT – Rede de Monitoramento em Linhas de Transmissão, desenvolvido pelo Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia – LEPTEN, infere uma concepção de monitoramento climático capaz de estimar a ampacidade dos condutores em tempo real por meio de estações meteorológicas em torres de alta tensão para monitoramento de condições ambientais (Sakagami, 2008).

Nesse contexto econômico-tecnológico, esse trabalho apresenta uma solução para a medição direta da temperatura e inclinação dos cabos aéreos de linhas de transmissão por meio de um instrumento autoalimentado que permite o monitoramento desses parâmetros em tempo real e o envio de dados, sem fio. O equipamento proposto também auxiliaria no cumprimento das normas vigentes para se manter a operacionalidade do sistema de transmissão dentro dos critérios de

segurança, alertando para situações de emergência onde a temperatura do cabo ou a altura da LT ao solo possam oferecer riscos à operação.

A aplicação do sensor proposto neste trabalho visa o aumento da confiabilidade na operação das linhas, além de auxiliar a validação dos modelos matemáticos utilizados na predição da ampacidade local como busca, a exemplo, o projeto apresentado por Sakagami (2008), Rede de Monitoramento de Linhas de Transmissão – RMLT.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um dispositivo para monitorar diretamente a temperatura superficial e a inclinação dos cabos aéreos de linhas de transmissão, de forma confiável e segura, enviando os dados por meio sem fio.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Construir um protótipo capaz de operar nas condições de tensão e corrente de uma linha de transmissão típica de 230kV;
- Realizar a medição da temperatura superficial dos cabos aéreos e inclinação no ponto de instalação;
- Desenvolver um sistema de alimentação por meio da indução magnética da linha de transmissão em que estiver instalado;
- Analisar as características metrológicas do instrumento proposto;
- Validar o funcionamento do instrumento por meio de ensaios realizados em alta tensão e alta corrente;
- Permitir que os dados coletados sejam enviados em segurança e alta disponibilidade a um centro de monitoramento e controle de operação para que sejam apresentados em tempo real por um sistema supervisorio;

- Garantir que o instrumento possa ser instalado e retirado da linha de transmissão sem a necessidade de se interromper o circuito.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O monitoramento em tempo real da temperatura superficial do condutor e a inclinação sofrida pelo cabo (devido ao aquecimento principalmente por efeito Joule) são de grande importância para modelos matemáticos que se baseiam em condições climáticas locais e condições dos condutores na determinação da ampacidade.

A medição da inclinação do condutor em um ponto da linha também permite conhecer a distância do cabo até o solo, levando em conta a topografia da região e possíveis obstáculos nas faixas de passagem, que são descritos em projeto. Esse parâmetro é de grande valia para a operação, já que existem limites que devem ser respeitados.

Equipamentos para essa finalidade já existem comercialmente e são utilizados para tal finalidade, porém é de grande interesse o domínio da tecnologia, bem como diminuir o custo para sua obtenção.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO

Com a finalidade de transportar energia elétrica aos grandes centros de consumo, as linhas de transmissão são de fundamental importância para os sistemas de energia, uma vez que a geração ocorre longe dos centros de carga. São concebidas conjuntamente ao projeto das usinas com a finalidade de transmitir a potência gerada, ou podem ser construídas como reforços de linhas já existentes.

Segundo o plano decenal de expansão de energia 2019 publicado em 2010 pelo MME, novas linhas serão construídas para acessar áreas que antes não recebiam energia elétrica por meio do SIN. Composta por longos cabos, as linhas são sustentadas por estruturas metálicas chamadas torres e seus demais componentes mecânicos.

Projetar uma linha de transmissão é uma tarefa complexa. O fato de a linha percorrer uma longa extensão, sobrepor florestas, rios, lagos e muitas vezes interligar regiões de diferentes características climáticas, leva seu projeto a considerar diversos fatores como: travessias, comprimento do circuito, elevação e tipo das estruturas, relevo, capacidade de transmissão, nível de tensão, perdas técnicas, ruído eletromagnético e sonoro. Até aspectos estéticos de urbanização são pensados quando do projeto de uma linha de transmissão.

Do ponto de vista de operação, as linhas de transmissão recebem prioridade à continuidade de serviço em relação a outros dispositivos do sistema de energia, devido aos grandes prejuízos advindos de qualquer falha em sua operação. Após a reformulação do sistema elétrico brasileiro ocorrida em 1999, por exemplo, um desligamento programado de determinada linha de transmissão gera a necessidade de pagamento de multa no valor de 10 vezes o valor correspondente à receita relativa ao tempo em que a linha fica desligada. Ou ainda, numa situação de falha, os custos chegam a 150 vezes o valor da receita no período referente à interrupção, sendo estes valores definidos nos Contratos de Prestação de Serviços de Transmissão – CPST, assinados entre o ONS e as empresas transmissoras de energia elétrica. Logo, a confiabilidade dos sistemas de transmissão é um fator altamente requisitado.

### **2.1.1 Tipos de Linhas de Transmissão**

As linhas de transmissão de grande potência podem ser diferenciadas basicamente entre dois tipos: aéreas e subterrâneas. As linhas aéreas são as mais comuns encontradas nos sistemas elétricos de transmissão brasileiros. Construídas sobre o solo e portadas por torres metálicas ao longo de sua extensão, são comumente encontradas à beira das estradas e ao redor de usinas de energia elétrica ou parques fabris.

As linhas subterrâneas possuem condutores isolados, abrigados sob o solo, ou dentro de condutos e canaletas de sustentação. Existem ainda situações onde as linhas transpõem porções de mar e com isso dão origem a uma classe que as diferencia das linhas subterrâneas terrestres.

Toda linha de transmissão, sem distinção, sofre as intempéries, desgastes devido à corrosão, eventuais esforços mecânicos e demais fatores físico-químicos que venham a modificar suas propriedades. Devido a isso, as linhas de transmissão e seus demais componentes devem ser frequentemente inspecionados e avaliados quanto à capacidade e à confiabilidade na função transmissão de energia elétrica. Tais componentes recebem reparos regularmente pelos mais diversos motivos, até mesmo vandalismo.

A grande maioria das linhas transporta corrente alternada. Entretanto, circuitos de corrente contínua também são utilizados. Os circuitos de corrente contínua fundamentalmente se caracterizam por sua grande extensão em relação às linhas de corrente alternada, devido ao fato de não serem segmentados por subestações e serem mais rentáveis quando utilizados para transmissão de longa distância ponto a ponto (Camargo, 2009).

### **2.1.2 Tipos de cabos aéreos**

Em uma linha de transmissão, os cabos são os componentes de maior custo, se comparados aos demais elementos que a compõem. A escolha correta do cabo pode privilegiar algumas condições específicas como:

- Minimizar os efeitos das vibrações ocasionadas por ventos;
- Possuir baixa resistência ôhmica, minimizando as perdas por efeito Joule;
- Diminuir a dilatação linear em função da temperatura e possuir alta temperatura de recozimento.



A pesquisa de materiais e técnicas de fabricação tem sido aperfeiçoada ao longo dos anos e as novas linhas projetadas contam com diversos recursos para a redução da relação custo-benefício.

A existência de uma grande diversidade de cabos exige uma seleção rigorosa e fundamental para que atendam aos requisitos de projeto de uma linha obedecendo aos critérios de operação e segurança estabelecidos.

Em linhas de transmissão aéreas, que necessitam transpor grandes vãos, os cabos de alumínio com alma de aço são comumente usados em diversos níveis de tensão. Os cabos ACSR - Aluminum Conductor, Steel-Reinforced, como são chamados, têm a característica de resistir a grandes tensões mecânicas devido a sua alma de aço. O envoltório de alumínio confere ao cabo mais leveza em relação ao material que compõe a alma, além de diminuir a resistência ôhmica permitindo grande capacidade de condução elétrica e baixas perdas técnicas (Thrash,1994).

Os cabos ACSR são os mais resistentes à tração dentre os cabos utilizados e isso lhes permite ser aplicados em locais onde há ocorrência de neve, gelo e ventos de alta velocidade. Sua construção varia de acordo com a aplicação, logo são encontrados em diferentes disposições quanto à espessura dos fios e à quantidade de camadas de fios de alumínio e aço que são utilizadas (Thrash,1994).

A Figura 1 apresenta algumas das relações mais comuns dos cabos ACSR quanto à disposição dos condutores de alumínio e aço.

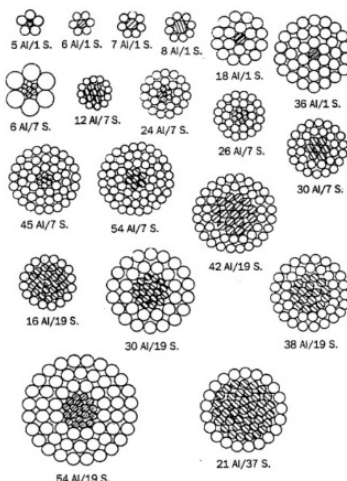


Figura 1- Relações dos cabos ACSR. Adaptado de Thrash (1994).

Nos cabos ACSR, a alma de aço sempre é interna às camadas de condutores de alumínio e sua nomenclatura informa a quantidade de fios de alumínio e aço utilizados. Por exemplo, o cabo 26 Al / 7 S cujas demais especificações técnicas podem ser consultadas no Anexo A, possui 26 condutores de alumínio, em torno de 7 condutores de aço.

Outro tipo utilizado são os cabos AAC (All Aluminum Conductor), construídos apenas com fios de alumínio trançados. São cabos de baixo custo e provêm a maior condutividade se comparados aos demais. Possuem boa resistência à corrosão. Entretanto, são aplicados em situações que não exigem alta resistência à tração, logo, são utilizados entre vãos de pequenas distâncias como os encontrados nos centros urbanos ou lugares onde é necessária alta condutividade em pequenas distâncias (Thrash,1994).

Desenvolvido com uma liga especial de alumínio que confere a ele alta resistência à tração e alta condutividade, outro tipo de cabo, o AAAC (All-Aluminum Alloy Conductor) tem características que algumas vezes superam em algumas aplicações os cabos ACSR e ACC. Com alta resistência à corrosão, é uma ótima escolha para linhas instaladas à beira do mar (Thrash,1994).

A contínua pesquisa dos fabricantes de cabos tem apresentado excelentes resultados, e com isso diferentes cabos surgem no mercado, buscando cada vez mais a melhoria das características “mecânicas x elétricas” com especial atenção à corrosão, como ACAR, AAC/TW, ASCR/TW e outros que exploram questões como a redução da área total do condutor como é o exemplo os cabos terminados em TW (Trapezoidal – Shaped Wire).

Existe ainda uma grande diversidade de outros cabos envolvendo categorias como: cabos blindados a óleo; cabos com apenas capas poliméricas de proteção; capas poliméricas e isolantes elétricos, entre outros (Thrash,1994).

### **2.1.3 Parâmetros elétricos e efeitos em Linhas de Transmissão**

Quando da transmissão em corrente alternada, consideram-se alguns efeitos muito importantes sobre o cabo. Um deles, o chamado efeito pelicular (*skin effect*).

A manifestação do efeito pelicular na transmissão de corrente alternada implica no aumento da resistência do condutor, com o conseqüente aumento das perdas técnicas e elevação da temperatura do cabo. Existem ainda outros efeitos que agem no mesmo sentido, como o efeito de proximidade, efeito de histerese e perdas por correntes parasitas,

também conhecida por correntes de Foucault ou Eddy Currents (Thrash,1994).

O efeito de proximidade se manifesta quando dois condutores estão sendo percorridos por corrente alternada e separadas por uma curta distância entre si. Assim, um efeito de indução mútua afeta a distribuição de corrente na secção transversal do condutor, resultando em adensamentos de corrente em determinadas áreas do mesmo. Similarmente ao efeito pelicular, esse efeito resulta num aumento da resistência efetiva do condutor, levando a consequências idênticas às que ocorrem no efeito pelicular (Thrash,1994).

Por ser desencadeado pelo fenômeno de indução magnética, o efeito de proximidade é diretamente proporcional à corrente nos condutores e inversamente proporcional à distância entre eles. Logo, em linhas aéreas de transmissão de extra-alta tensão, os condutores são instalados de forma que a distância entre eles leva a desconsideração deste efeito na maioria dos casos.

Correntes de Foucault e perdas por histerese em um condutor ou em objetos metálicos próximos também resultam num aumento da resistência efetiva do condutor. Em alguns casos, essas perdas podem ser consideráveis, para condutores que utilizam alma de aço e são percorridos por altas correntes.

Para consideração desses efeitos de forma prática, existem tabelas fornecidas pelos fabricantes de cabo, que em função do tipo de cabo utilizado, geram fatores de multiplicação da resistência CC do condutor que levam à obtenção da nova resistência em CA, devido à ocorrência de tais efeitos.

A resistência CC de um condutor se baseia na condição deste ser percorrido por corrente contínua, onde os efeitos pelicular, histerese e correntes de Foucault são desconsiderados. Para se determinar a resistência CC do condutor, utiliza-se 2ª Lei de Ohm, que descreve a resistência de um condutor em função da resistividade volumétrica do material  $\rho_v$ , comprimento do cabo  $L$  e sua área de secção transversal  $A$ , como mostrado na equação [2.1] (Thrash,1994).

$$R = \rho_v \left( \frac{L}{A} \right) \quad [2.1]$$

A resistividade de um material varia em função da temperatura. Logo, para diferentes temperaturas, considerando-se variações lineares de resistência entre 0°C a 120°C, pode-se aproximar a correção da resistência utilizando valores tabelados do coeficiente de temperatura do

material, que são fornecidos pelos fabricantes de cabos. A equação [2.2] apresenta como pode ser utilizada essa correção

$$R_{T_2} = R_{T_{ref}} [1 + \alpha_{ref} (T_2 - T_{ref})] \quad [2.2]$$

Onde:

$T_2$  – Temperatura onde se deseja conhecer a nova resistência;

$T_{ref}$  – Temperatura de referência;

$R_{T_{ref}}$  – Resistência do condutor na  $T_{ref}$ ;

$R_{T_2}$  – Resistência CC na temperatura  $T_2$ ;

$\alpha_{ref}$  – Coeficiente de temperatura do material na  $T_{ref}$ .

Devido ao fato do cabo ser formado por diversos condutores, criando assim um feixe de condutores, existe um parâmetro que fornece a relação do espaço preenchido por material condutor e espaços vazios na seção transversal considerada para o cálculo da resistência CC. Esse parâmetro de “encordoamento” é fornecido pelo fabricante e deve ser considerado para o cálculo efetivo da resistência do cabo, assim como os demais fatores de aumento de resistência, como efeito pelicular, de proximidade, histerese e correntes de Foucault.

Quando os condutores são formados por dois diferentes materiais, como no caso dos cabos ACSR, a obtenção da resistência do cabo pode ser feita por uma aproximação de cálculo, que se resume basicamente no cálculo separado da resistência elétrica dos dois diferentes materiais, nas dadas condições de operação, e ao final, a realização da associação em paralelo desses condutores.

Demais parâmetros elétricos de uma linha de transmissão como indutância, capacitância e reatância, são de grande interesse no momento de seu projeto e operação. Entretanto, tais parâmetros não serão abordados devido a sua pequena relação com as perdas técnicas e consequente aquecimento do cabo.

#### **2.1.4 Parâmetros mecânicos dos cabos aéreos de LT**

Segundo (Beer e Ferdinand, 2007) um cabo AB que suporta uma carga uniformemente distribuída ao longo do próprio cabo, conforme Figura 2, descreve uma curva plana denominada catenária. Cabos que pendem sob seu próprio peso como, os cabos das linhas de transmissão, são descritos por curvas desta família. Entretanto, para que a teoria

desenvolvida sobre as curvas catenárias seja utilizada, deve-se desconsiderar a rigidez à flexão do cabo em questão.

A análise da flexão dos cabos de uma linha de transmissão pelas curvas catenárias é amplamente utilizada para estudo e projeto de linhas de transmissão.

Um cabo quando apoiado entre dois pontos, desconsiderando-se a ação do vento e a rigidez à flexão irá tomar a forma de uma catenária conforme mostra a Figura 2.

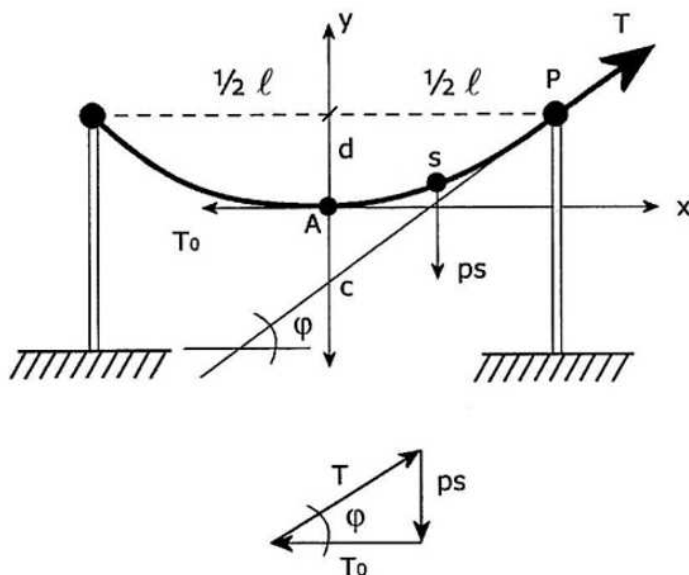


Figura 2 – Catenária.

Fonte: Adaptado de Camargo, 2009.

Onde:

- A – Ponto da flecha máxima do cabo;
- P – Ponto de ancoragem do cabo;
- T – Tensão mecânica do cabo no ponto P;
- $T_0$  – Tensão mecânica no ponto A;
- p – peso por metro linear;
- l – comprimento do vão;
- d – flecha do condutor;
- $\varphi$  – inclinação do cabo no ponto P.

O equilíbrio no trecho A-P pressupõe o triângulo de forças  $T$ ,  $T_0$  e  $ps$ , onde  $ps$  é o peso do condutor entre A e P.

Para um trecho infinitesimal de condutor,  $ds$ , pode-se escrever:

$$tg \varphi = \frac{dy}{dx} = \frac{ps}{T_0} \quad [2.3]$$

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \quad [2.4]$$

$$\frac{ds^2}{dx^2} = 1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \therefore dx^2 = \frac{ds^2}{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} \quad [2.5]$$

$$dx = \frac{ds}{\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}} \quad [2.6]$$

Integrando, virá

$$x = \frac{T_0}{p} \operatorname{arc\,sinh} \frac{ps}{T_0} + K_1; \quad [2.7]$$

sendo  $K_1$  uma constante de integração.

Para  $s = 0 \Rightarrow x = 0$  tem-se  $K_1 = 0$  resultando na equação [2.8].

$$x = \frac{T_0}{p} \operatorname{arc\,sinh} \left(\frac{ps}{T_0}\right); \quad [2.8]$$

ou ainda:

$$\frac{px}{T_0} = \operatorname{arc\,sinh} \left(\frac{ps}{T_0}\right) \therefore \quad [2.9]$$

$$\operatorname{sinh} \frac{px}{T_0} = \frac{ps}{T_0} = \frac{dy}{dx} \quad [2.10]$$

$$dy = \operatorname{sinh} \left(\frac{px}{T_0}\right) dx \quad [2.11]$$

Integrando, virá

$$y = \frac{T_0}{p} \cosh \frac{px}{T_0} + K_2 \quad [2.12]$$

Para  $x = 0 \Rightarrow y = 0 \therefore K_2 = -\frac{T_0}{p}$  e

$$y = \frac{T_0}{p} \cosh \frac{px}{T_0} - \frac{T_0}{p} \quad [2.13]$$

Adotando  $z = \frac{T_0}{p}$ , tem-se:

$$y = z \cosh \frac{x}{z} - z \quad [2.14]$$

Considerando que da medida da inclinação do cabo obtém-se o ângulo  $\varphi$  (ver Figura 2), sendo conhecida a  $tg \varphi$ . Com isso, adotando-se  $z = \frac{T_0}{p}$ , tem-se a partir de [2.3] e [2.9] que:

$$z = \frac{x}{\text{arc senh}(tg \varphi)} \quad [2.15]$$

A partir da equação [2.14] e [2.15], se obtém a relação do ângulo de inclinação  $\varphi$ , com a altura  $y$ , que pelo sistema de coordenadas adotado na Figura 2, resulta na medida da flecha  $d$  do condutor, quando o valor de  $x$  é  $x = \frac{\ell}{2}$ .

$$d = \frac{\ell}{2} \frac{(\cosh(\text{arc senh}(tg \varphi)) - 1)}{\text{arc senh}(tg \varphi)} \quad [2.16]$$

Entretanto, na aplicação em questão, uma condição mecânica impede que o sensor seja instalado exatamente sobre o ponto  $P$  (ponto de ancoragem do cabo), onde a derivada em função da dilatação térmica do cabo é máxima. Logo, se não posicionado no ponto  $P$ , o resultado tomando como base a equação [2.16], terá de sofrer um ajuste para determinação do valor verdadeiro da flecha  $d'$  a partir de [2.16].

Para isso, deve-se considerar a distância do ponto onde o sensor será instalado  $M$  até o ponto  $P$ . Sendo a distância no trecho  $M-P$ , menor

que 2 metros, o cabo se comporta de forma a descrever um segmento de reta nesse trecho. Logo, pode ser definido de forma simples, uma correção para o valor informado pela equação [2.16], que resultará na flecha do vão em questão  $D$ , como sendo:

$$D = d + MP \operatorname{sen}(\varphi) \quad [2.17]$$

Outra análise importante que pode ser realizada sobre a catenária, considera o comportamento da flecha em função da temperatura do cabo. A variação de temperatura no cabo implica diretamente na variação da flecha, devido à dilatação linear sofrida pelo mesmo.

A equação [2.18], segundo Camargo (2009), mostra a variação do comprimento total do cabo em função da flecha e o comprimento do vão.

$$S \approx l + \frac{8}{3l} d^2 \quad [2.18]$$

Onde:

- $S$  – Comprimento do cabo;
- $l$  – Comprimento do vão;
- $d$  – Altura da flecha.

A dilatação linear sofrida pelo cabo em função da temperatura pode ser expressa por [2.19].

$$S_{T_2} = S_{T_{ref}} + \alpha S_{T_{ref}}(T_2 - T_{ref}) \quad [2.19]$$

Onde:

- $T_2$  – Temperatura em que se deseja conhecer o novo comprimento do cabo;
- $T_{ref}$  – Temperatura de referência;
- $S_{T_2}$  – Comprimento do cabo na temperatura  $T_2$ ;
- $S_{T_{ref}}$  – Comprimento do cabo na temperatura de referência;
- $\alpha$  – Coeficiente de dilatação linear.

Com isso, a partir de uma temperatura de referência, sendo conhecido o comprimento do cabo  $S_{T_{ref}}$ , é possível determinar a flecha a partir da variação de temperatura. Reescrevendo a equação [2.18] como:



$$d \approx \sqrt{\frac{3l(S-l)}{8}}, \quad [2.20]$$

e aplicando [2.19] em [2.20], teremos:

$$d \approx \sqrt{\frac{3l(S_{T_{ref}} + \alpha S_{T_{ref}}(T_2 - T_{ref}) - l)}{8}}, \quad [2.21]$$

que descreve o comportamento da flecha em função da variação da temperatura  $T_2 - T_{ref}$ .

## 2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE AMPACIDADE EM LTs

Segundo NEC® (2011), a ampacidade pode ser compreendida como a corrente, em ampères, que um condutor pode transportar continuamente sob as condições de uso, sem exceder a sua temperatura nominal. Em termos gerais, ampacidade entende-se como sendo a corrente que um condutor é capaz de suportar atendendo aos critérios de segurança para qual foi dimensionado.

Dentre diferentes definições para o termo ampacidade, fato é que a temperatura máxima de trabalho é o principal critério a ser respeitado para evitar o recozimento do cabo, também conhecido como *annealing*. Outros fatores de segurança podem ser citados como, por exemplo, a distância mínima ao solo, conhecida como *clearance*, que deve ser rigorosamente observada na aplicação dos condutores em linhas aéreas de transmissão.

A determinação da ampacidade é sobretudo um problema de ordem térmica. O aquecimento do condutor devido ao efeito Joule causa o aumento de sua temperatura. Por sua vez o condutor em seu local de instalação também pode receber calor de outras fontes como, por exemplo, da radiação solar. Da mesma forma, o condutor exposto ao tempo, troca calor com o meio por radiação, convecção natural ou forçada, devido à ação do vento. Interferem ainda na temperatura de equilíbrio do condutor, parâmetros como a temperatura ambiente e a precipitação.

A Figura 3 identifica as fontes de calor que contribuem para a temperatura de equilíbrio de um condutor aéreo exposto ao tempo.

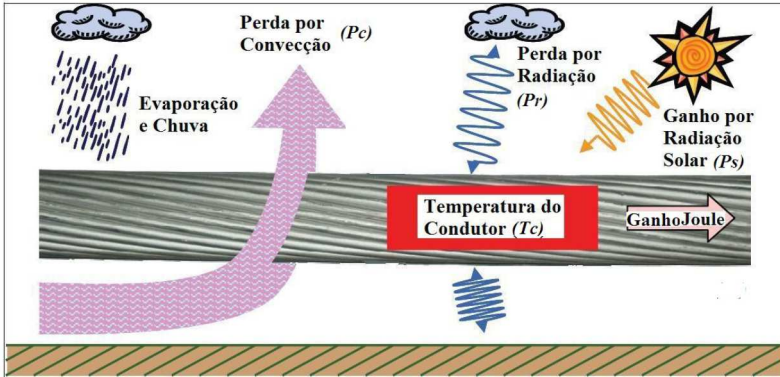


Figura 3 – Esquema do balanço térmico em um cabo aéreo (adaptado de Muhr, 2008).

Os primeiros trabalhos de ampacidade apareceram na década de 1930 (Black e Rehberg, 1985). Entretanto, House e Tuttle (1959) enunciaram uma equação [2.22] que pudesse calcular a máxima corrente elétrica do condutor  $I$ , para uma determinada temperatura limite do mesmo.

$$I = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s}{R}} \quad [2.22]$$

Essa equação se baseia na primeira lei da termodinâmica e traduz o balanço de energia do condutor em função de suas características físicas e variáveis meteorológicas na sua vizinhança, onde:

- $P_s$  – calor absorvido devido à radiação solar (W/m);
- $P_c$  – calor perdido por convecção (W/m);
- $P_r$  – calor perdido por radiação (W/m);
- $R$  – resistência do cabo ( $\Omega$ /m);

Desta forma, para uma corrente elétrica  $I$  que percorre o condutor com uma resistência elétrica  $R$ , tem-se uma geração de calor dada por um fluxo positivo, ou seja, o condutor sofre um aquecimento por efeito Joule,  $R \cdot I^2$ .

Estando o condutor exposto às condições climáticas locais, quando o sol emite radiação solar sobre o condutor, tem-se um ganho de

calor por radiação solar ( $P_s$ ), que causa um aumento na temperatura do condutor. No entanto, à medida que o condutor se aquece, sua temperatura atinge valores superiores à temperatura ambiente. Assim, o condutor perde calor por radiação térmica ( $P_r$ ).

Finalmente, tem-se a perda de calor por convecção ( $P_c$ ), que é causada principalmente pelo vento; seu fluxo de calor é negativo, pois o vento que passa sobre o condutor retira o calor de sua superfície e causa seu resfriamento.

Uma análise dos termos que compõem a equação [2.22] foi apresentada por Camargo (2009), onde são feitas algumas considerações em que é possível afirmar de acordo com Nogueira et al. (2001) que:

- O calor ganho por radiação solar ( $P_s$ ) não é tão relevante, sendo contrabalanceado pelo calor irradiado ( $P_r$ );
- O principal fator climático que afeta o carregamento dos cabos é o vento. Portanto ventos fortes são mais favoráveis ao carregamento do que a ausência de sol;
- Na maior parte do tempo, a linha de transmissão poderá ter limites de carregamento muito superiores àqueles estabelecidos em projeto, pois levam em conta cenários conservadores (velocidades baixas de vento, sol a pino, temperatura ambiente elevada entre outros).

Normalmente, as linhas de transmissão são construídas para uma determinada temperatura de projeto definida por estudos econômicos (custo versus temperatura de projeto) e baseando-se na experiência operativa das empresas. A Tabela 1 mostra a temperatura típica de operação das linhas, para algumas empresas do setor elétrico.

Tabela 1 – Temperatura de operação das linhas. Adaptada de Camargo (2009).

<i>Empresa</i>	<i>Temperatura de projeto (°C)</i>	<i>Temperatura de emergência (°C)</i>
CEMIG	60	75
LIGTH	55	100
ELETRONORTE	70*	90
COPEL	55	75
ELETROSUL	70**	90
CESP	60***	90
FURNAS	60	90
CEEE	50	60

\* - usa também 60°C e 80°C para temperatura de projeto e 100 °C para emergência;

\*\* - usa também 65°C;

\*\*\* - usa também 70°C.

A definição de operação em emergência encontrada no item 3.5 da atual NBR 5422 é:

“situação em que a linha transporta corrente acima do valor nominal do projeto, durante períodos de tempo considerados curtos em relação ao período anual de operação”. (NBR 5422, item 3.5)

A mesma norma também conceitua as condições de emergência no item 10.4, bem como apresenta a delimitação da condição de emergência.

### 2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Diversas técnicas são as técnicas utilizadas para medição de temperatura, por exemplo, medição de temperatura por expansão gasosa e de líquidos, termopares, termoresistores, circuitos integrados – CIs, radio frequency identification – RFID, medição por infravermelho – IR, entre outros.

Neste trabalho foi utilizada a medição de temperatura por meio de semicondutores de silício com resistência variável em função da temperatura, comumente chamados de termistores.

A aplicação dos termistores é simples e dispensa o uso de uma eletrônica mais apurada, com amplificadores e filtros, como no caso dos termopares. Os termistores também dispensam o uso de comunicação digital de dados, como a utilizada em alguns modelos de CI e RFID. Além disso, apresentam um custo sensivelmente menor que a maioria dos sensores de temperatura.

Em comparação às demais técnicas, além da fácil aplicação, o uso de termistores para a faixa de temperatura de interesse (de 20°C a 100°C), se mostra eficiente, se considerados que desvios em torno de 0,3°C não são relevantes para a aplicação.

Existem basicamente dois tipos de termistores, o NTC (coeficiente negativo de temperatura) e o PTC (coeficiente positivo de temperatura). Sua estrutura é bastante simples e robusta. Pode ser montado dentro de bainhas para proteger o elemento sensor ou ser

posicionado diretamente em contato com o mensurando. Dentre os dois tipos, o NTC possui uma característica mais linear da curva temperatura versus resistência ôhmica. Esse foi o tipo utilizado neste trabalho.

Quanto à conexão com a eletrônica, o NTC pode ser utilizado em forma de ponte resistiva, utilizando de um até quatro resistores. A variação de temperatura que leva à variação ôhmica de uma resistência, por consequência faz variar uma tensão em determinado ponto da ponte resistiva. Com isso, é possível relacionar a tensão medida com a temperatura por meio de uma curva de calibração. O esquema básico da ligação do NTC é mostrado na Figura 4.

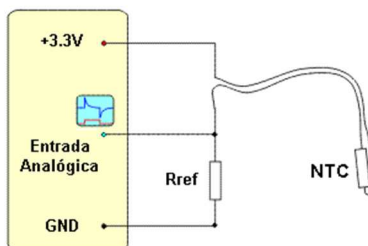


Figura 4 – Esquema básico para medição de temperatura com NTC.

A tensão fornecida pelo NTC na entrada analógica, geralmente é recebida por um conversor analógico digital. A curva do sensor NTC utilizado é apresentada na Figura 5 e demonstra de forma clara que o elemento é não linear e possui uma variação decrescente de resistência em função do aumento da temperatura.

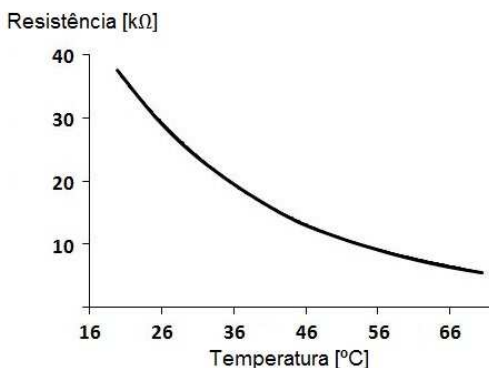
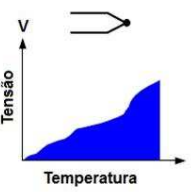
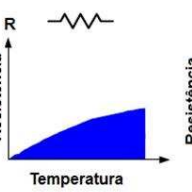
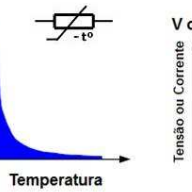
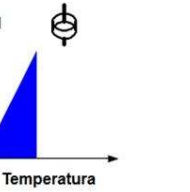


Figura 5 – Variação ôhmica em função da temperatura para um termistor do tipo NTC.

A Tabela 2 apresenta diferentes curvas típicas de variação de resistência em função da temperatura para alguns sensores de temperatura. Também são relacionadas algumas das vantagens e desvantagens em relação aos demais, como resposta térmica, faixa de temperatura, auto-aquecimento, linearidade, custo, facilidade de aplicação, entre outros.

Tabela 2 - Comparação entre métodos de medição de temperatura.

TERMOPAR	TERMORESISTOR	TERMISTOR NTC	SENSOR CI
			
<b>VANTAGENS</b>			
Auto-alimentação	Alta estabilidade	Elevado sinal de saída	Elevada Linearidade
Simplicidade	Maior linearidade que o Termopar	Rápida resposta	Saída amplificada
Robustez		Medição em duas pontas	Baixo Custo
Baixo Custo			
Ampla faixa de temperatura			
<b>DESVANTAGENS</b>			
Não-linearidade	Alto custo relativo	Não-linearidade	T < 250°C
Baixo nível de sinal	Resposta lenta	Faixa de temperatura limitada	Requer fonte de precisão
Necessidade de referência	Requer fonte de precisão	Fragilidade	Resposta lenta
Baixa estabilidade	Pequena variação na resistência	Requer fonte de precisão	Auto-aquecimento
Baixa sensibilidade	Requer medição em quatro pontas	Auto-aquecimento	Configurações limitadas

Fonte: desenvolvido pelo autor.

Uma característica importante que alguns elementos sensores apresentam – como os termistores e termoresistores – é o auto-aquecimento. O auto-aquecimento advém da necessidade do elemento sensor ser percorrido por corrente elétrica para realizar a medição e devido a isso o mesmo dissipa uma potência que causa a elevação da temperatura do elemento sensor. Esse aumento de temperatura pode ser compensado pela calibração em alguns casos, entretanto se possível, deve ser evitado. O sensor aplicado nesse trabalho é um NTC com resistência ôhmica de 30kΩ a 26°C. Isso confere ao sensor um auto-aquecimento muito pequeno, que pode ser desconsiderado. Em casos que esse

aquecimento prejudica significativamente as medições, utiliza-se a alimentação periódica do sensor, alimentando o elemento somente no instante de medição.

Vale ressaltar que a escolha adequada do resistor que compõe a ponte resistiva permite que o sistema trabalhe na região mais linear do sensor, na faixa de interesse de medição.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE MEDIÇÃO DE INCLINAÇÃO

Muitas técnicas podem ser utilizadas para medição de inclinação. Entretanto uma tecnologia amplamente aplicada nas mais diversas soluções de engenharia e que tem inúmeras vantagens, dentre elas a exatidão da medida, a ausência de elementos móveis e a facilidade da automação da medição é a tecnologia 3D-MEMS (Micro Electronic Machine Systems).

Essa tecnologia se baseia na construção de microcomponentes mecânicos incorporados a chips de silício que permitem a realização de diversos tipos de montagens associando a dinâmica dos sistemas mecânicos aos sistemas eletrônicos.

Como resposta, um sensor de medição de inclinação baseado nessa tecnologia é capaz de fornecer uma tensão elétrica proporcional à inclinação do elemento sensor.

Em “An Introduction to MEMS” (2002), é feita uma revisão bibliográfica sobre a tecnologia e suas aplicações, bem como os conceitos físicos utilizados na implementação de diferentes tipos de transdutores que empregam tal tecnologia em seu funcionamento. Dentre os diversos transdutores que podem ser criados pela tecnologia MEMS, destacam-se para medição de inclinação os sistemas ópticos, térmicos e capacitivos.

Existem outros tipos de sensores para medição de inclinação, entretanto a maior parte utiliza partes móveis de massa considerável para isso. Como exemplos desses dispositivos citam-se os dispositivos a pêndulo. Muitas vezes esses sistemas não permitem a automação da medição.

## 2.5 ASPECTOS DO ELETROMAGNETISMO

A modelagem de dispositivos eletromagnéticos é baseada nas Equações de Maxwell (Bastos, 2003). A primeira delas descreve como se

relacionam o campo magnético  $\mathbf{H}$  [Ae/m] e a densidade superficial de corrente  $\mathbf{J}$  [Ae/m<sup>2</sup>]:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad [2.23]$$

A seguinte relação constitutiva [2.24] exprime a interdependência entre o campo  $\mathbf{H}$  e a indução magnética (ou densidade de fluxo magnético)  $\mathbf{B}$  [T]:

$$\mathbf{B} = \|\mu\| \mathbf{H} \quad [2.24]$$

onde  $\|\mu\|$  é o tensor de permeabilidade magnética. Se a permeabilidade magnética é a mesma em todas as direções dentro do meio, a equação acima pode ser simplificada por:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad [2.25]$$

A permeabilidade magnética é constante se o meio for linear e pode ser uma função do valor da indução quando o meio for não linear, tal como nos materiais ferromagnéticos.

Aplicando-se uma integração de superfície em ambos os lados de (19), tem-se:

$$\iint_S \text{rot } \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} \quad [2.26]$$

Em [2.26], o operador “ $\cdot$ ” indica o produto escalar. A integração de superfície da densidade superficial de corrente dá como resultado a força magnetomotriz  $ni$ , onde  $n$  é o número de espiras em que circula a corrente elétrica  $i$ [A]. Ao lado esquerdo de [2.26] pode-se aplicar o Teorema de Stokes transformando a integração de superfície na integral ao longo da linha  $L(S)$  que envolve a superfície  $S$ . Assim [2.26] pode ser reescrita como:

$$\oint_{L(S)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = n i \quad [2.27]$$



Por outro lado, voltando à indução magnética, a sua integração superficial nos fornece o fluxo magnético  $\varphi$  [Wb], isto é:

$$\varphi = \iint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad [2.28]$$

A tensão  $v$  [V] nos terminais de uma bobina de  $n$  espiras, aparece pela variação temporal do fluxo magnético:

$$v = -n \frac{d}{dt} \varphi \quad [2.29]$$

## 2.6 ASPECTOS RELACIONADOS À ALTA TENSÃO

O uso de dispositivos eletrônicos em contato direto com cabos de alta tensão não é uma prática muito comum nos sistemas de energia. Geralmente os dispositivos eletrônicos dos sistemas de monitoramento e controle operam em ambientes de baixo nível de tensão e corrente, proporcionados por transformadores de instrumentação que reduzem os valores usuais de potencial e corrente para que possam ser manipulados em níveis mais baixos. Isso acarreta menores custos, facilidade de implementação e segurança de operação.

Entretanto, existem equipamentos eletrônicos com finalidade de medição de grandezas elétricas e mecânicas que necessitam operar em alta tensão. Recentemente, com o advento de novas tecnologias de monitoramento e controle associadas às soluções tecnológicas propostas para a adequação dos sistemas de automação de subestações conforme a norma IEC-61850, cresce a quantidade de dispositivos eletrônicos que operam sob influência de campos eletromagnéticos de grande intensidade irradiados das partes energizadas dos sistemas de energia.

De acordo com Leão (2008), tais campos são capazes de gerar radiointerferências (RI) nos dispositivos eletrônicos das vizinhanças, além de ruído audível e efeito corona (que pode ser observado a olho nu em algumas situações).

Os efeitos da manifestação de descargas parciais, ou mesmo o corona, indução eletromagnética e RI, podem interferir nos circuitos eletrônicos integrados aos dispositivos, impedindo seu funcionamento adequado e, além disso, o aquecimento de partes do instrumento que podem ser percorridas por correntes induzidas.

### 2.6.1 Considerações sobre o efeito das pontas

O fenômeno conhecido como “efeito de pontas” é muito popular na engenharia elétrica e a ele é comumente atribuído a muitos comportamentos relacionados às descargas atmosféricas. Na área de sistemas de energia está fortemente ligado ao efeito corona, que será apresentado a seguir.

O efeito das pontas constitui uma fonte constante de preocupação para os engenheiros, sobretudo na área de alta tensão, pois é causador de campos elétricos intensos que podem, eventualmente, causar a ruptura de dielétricos. Em Bastos (2008), é demonstrado que a intensificação do campo elétrico numa região de ponta ocorre de forma inversamente proporcional ao raio de curvatura que a origina, ou seja, quanto mais aguda, maior a intensidade de campo na região.

Em equipamentos que são submetidos à alta tensão se busca sempre minimizar as pontas agudas em sua geometria externa, para que com isso diminua a ocorrência de corona nessas regiões. Pode-se ainda utilizar de artifícios, como os anéis anti-corona, que buscam diminuir a intensidade de campos elétricos em algumas regiões para níveis aceitáveis, com a cobertura da área afetada pelo efeito das pontas.

Em (Bastos, 2008) também é descrito um exemplo onde se avalia a ruptura de dielétrico no ar envolvendo uma esfera condutora carregada.

Considera-se uma esfera de raio  $r$  carregada com uma carga  $qs$ , onde o ar a sua volta possui rigidez dielétrica  $K = 3kV/mm$ . Aplicando-se o teorema de Gauss a uma esfera genérica de raio  $R > r$ , encontra-se o valor máximo de potencial na casca esférica para não haver ruptura.

A equação [2.30] mostra o valor máximo de potencial na casca esférica para não haver ruptura, considerando que o potencial no infinito tende a zero e o campo elétrico em seu interior seja nulo (Bastos, 2008).

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R} \quad [2.30]$$

Sendo que a carga  $Q$  é dada por:

$$Q = qs \ 4\pi R^2 \quad [2.31]$$

E,

$$q_s = \epsilon_0 K \quad [2.32]$$

Onde:

$\epsilon_0$  – Permissividade elétrica do meio (F/m);  
 K – Rigidez dielétrica do meio (kV/mm);  
 $q_s$  – Densidade superficial de carga (C/m<sup>2</sup>);  
 R – Raio da esfera condutora (m).

Assim, substituindo as equações [2.31] e [2.32] na equação [2.30], tem-se que o valor máximo em (kV) do potencial na casca esférica para não haver ruptura dielétrica do ar é:

$$V = K R \quad [2.33]$$

Observa-se então que quanto maior o raio da esfera, maior será a tensão que a mesma poderá ser submetida sem que ocorra a ruptura dielétrica.

Com auxílio do software EFCAD, desenvolvido pelo GRUCAD-UFSC, foi realizada uma simulação para entender como se daria a distribuição do campo elétrico no entorno da esfera, quando a mesma estiver instalada no cabo da LT. A Figura 6 mostra o comportamento dos campos no entorno de uma esfera carregada.

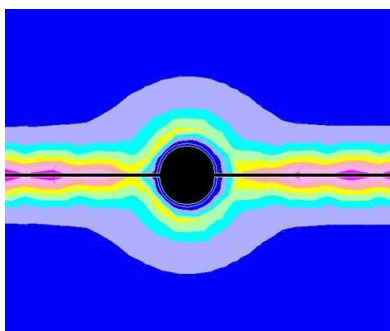


Figura 6 – Simulação do comportamento do campo elétrico no entorno de uma esfera carregada.

Na Figura 6 as regiões com maior valor de campo elétrico estão em tom vermelho, enquanto as regiões de menor valor de campo elétrico aparecem em azul.

## 2.6.2 Considerações sobre o efeito corona

O termo corona é comumente utilizado para descrever as descargas elétricas que ocorrem em partes dos sistemas de energia submetidos a grandes gradientes de potencial elétrico, resultando na ionização do ar sem que haja a formação de um caminho condutivo completo entre as partes envolvidas, ou entre condutor e a terra. Pode ainda ser entendido como uma perda de carga criada pela ionização do ar que envolve um condutor carregado com carga elétrica (Bastos, 2008).

O efeito corona é uma manifestação oriunda da presença de intensos campos elétricos, igualmente as descargas parciais, que são similares a ele, porém de manifestação em locais específicos como cavidades no interior de componentes submetidos à alta tensão, a exemplo, cerâmicas de porcelana, vidro ou materiais poliméricos usados como dielétricos ou sob a superfície dos dispositivos, principalmente se estas apresentarem irregularidades ou até mesmo acúmulo de sujeira.

“Estudos sobre radiointerferência proveniente de linhas de transmissão comprovam que, geralmente, quanto maior a tensão, maior será o efeito corona e que este efeito aumenta com a umidade e chuva porque tornam o ar mais condutivo. O ruído corona induzido é quase sempre pior durante a chuva, quando a precipitação cai em forma de gotas nas bordas inferiores das linhas de transmissão”. (Leão, 2008, p. 38).

Para o ar, o valor de campo elétrico para que tal fenômeno se crie é usualmente superior a  $3 \times 10^6$  V/m, sendo que este pode variar em função das condições diversas de pressão, temperatura, umidade e pureza do ar, entre outros fatores relativos à forma do objeto (Bastos, 2008).

A manifestação do efeito corona deve ser evitada tanto quanto possível, devido ao fato de que se trata de uma perda técnica onde parte da energia do sistema envolvido é utilizada para formação das correntes parasitas que geram as descargas.

As consequências da manifestação do efeito corona durante a operação de sistemas de energia, podem acarretar em prejuízos financeiros relacionados a reparos e substituição prematura de equipamentos, além da redução na segurança e eficiência dos sistemas de comunicação, com grande potencial de acarretar prejuízos causados pela eventual interrupção dos serviços ou falha de equipamentos (Filho, 2006).

Além das modificações físico-químicas não desejáveis que o corona causa na superfície do material em questão, dependendo da concepção física e geométrica da superfície, ele pode evoluir criando arcs elétricos de maior intensidade e extensão causando prejuízos ainda maiores.

Uma forma bastante usual de se verificar a manifestação do efeito corona é por meio do uso de câmeras especiais adaptadas à visão noturna. Tais equipamentos são capazes de detectar a irradiação no comprimento de ultravioleta (de 100nm a 400nm). Quando da ocorrência do efeito corona, há criação de ozônio no ar em torno, que pode então ser detectado pela câmera.

A Figura 7 mostra uma imagem noturna de uma linha de transmissão, onde se pode verificar a manifestação do efeito.

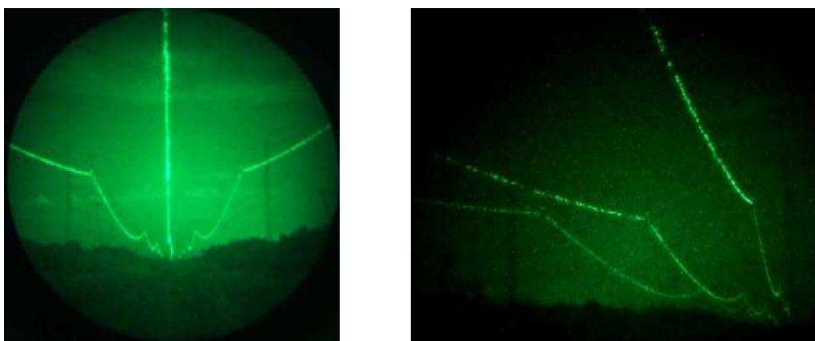


Figura 7 – Manifestação de Corona em linhas de transmissão

Fonte: Régis, 2007 et.al.

Existem outras formas de se detectar qualitativamente o efeito corona, por meio de inspeções aéreas com voos de helicóptero e uso de alguns equipamentos. Entretanto, uma análise quantitativa mais detalhada por componente, pode ser realizada como uso específico de equipamentos em ambiente de laboratório.

### **2.6.3 Considerações sobre interferência e incompatibilidade eletromagnética**

O ruído em radiofrequência gerado por uma linha de transmissão de alta tensão é causado principalmente pelo efeito corona, por isoladores defeituosos ou contatos frouxos, permitindo a existência de descargas elétricas, que variam conforme as condições atmosféricas (Leão, 2008).

O ruído de linha de transmissão pode ser transmitido por condução, indução ou radiação. A interferência pode ser conduzida através da transmissão para a fonte de alimentação do rádio. Pode viajar por indução quando a LT está suficientemente próxima à antena ou a alguma parte do receptor, ou até perto de outra LT.

Para a recepção de sinais de rádio livres de interferência é necessário haver uma elevada relação SNR (relação sinal/ruído) na entrada do receptor, a qual poderá ficar comprometida caso o nível de recepção dos sinais de rádio sejam baixos e as condições atmosféricas sejam propícias à geração de ruído em RF.

O nível de ruído de rádio de uma linha de transmissão CA será mais alto durante o tempo de chuva forte, quando os condutores estão saturados com a queda de água sobre os mesmos, potencializando a manifestação do efeito corona. Por outro lado, será mais baixo em tempo bom, quando o número de insetos e partículas de vegetação sobre a LT é menor.

A blindagem contra os efeitos causados pela radiointerferência pode ser feita de diferentes formas, de acordo com a natureza da interferência. Quando da elaboração de uma blindagem, é necessário ser definida a natureza da interferência, as fontes que podem causar a interferência, além de características como banda de incidência, intensidade, e o nível que se deseja proteger o dispositivo. Assim, é necessário um estudo preliminar para que se conheçam os parâmetros envolvidos a fim de se determinar a forma mais eficiente de proteger o dispositivo.

## 2.7 ANÁLISE DE INCERTEZA DA MEDIÇÃO

### 2.7.1 Incerteza Expandida (U)

Na análise da incerteza da medição utilizada para o processo de calibração neste trabalho, se consideraram as fontes de incerteza como não correlacionadas e o processo de calibração se deu forma análoga, tanto para os sensores de temperatura, quanto para o sensor de inclinação.

Durante o processo de calibração dos instrumentos, o objetivo principal é gerar uma equação polinomial, que associa o efeito físico manifestado pelo sensor, a uma tensão elétrica, estabelecendo assim uma relação entre a medida materializada e o sinal elétrico fornecido pelo instrumento. A partir dessa equação, o software do dispositivo transforma o valor de tensão lido em um valor da grandeza materializada em questão e disponibilizada ao usuário.

A análise de incerteza aplicada aos valores medidos durante o processo de calibração busca fornecer o valor da incerteza expandida (U). Esse valor associado ao valor da medição gera o resultado da medição, ou seja:

$$\text{Resultado da Medição} = \text{Valor} \pm U$$

Para obter a incerteza expandida (U) por meio da calibração é necessário determinar a estimativa do desvio padrão da distribuição de erros da medição  $s$ :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n - 1}} \quad [2.34]$$

Assim, a incerteza padrão da medição  $u$  é igual a  $s$  e  $v$  corresponde aos graus de liberdade, dado por:

$$v = n - 1 \quad [2.35]$$

Com isso, a repetitividade  $Re$  que define a faixa dentro da qual, para uma dada probabilidade, o erro aleatório é esperado, é dada por:

$$Re = t \cdot u, \quad [2.36]$$

sendo  $t$  o coeficiente de Student para  $v$  graus de liberdade.

De acordo com Albertazzi (2008), o valor do  $t$  de Student para  $v = 9$  é de 2,32, para um intervalo de confiança de 95,45%.

### 2.7.2 Estimativa da incerteza combinada ( $u_c$ )

Frequentemente na medição direta os efeitos associados às várias fontes de incerteza se manifestam sobre a indicação do sistema de medição de forma aditiva. É como se houvesse uma soma dos efeitos de várias variáveis aleatórias. Assim, neste caso, a incerteza combinada ( $u_c$ ) da influência das várias fontes de incerteza pode ser estimada a partir das incertezas de cada fonte de erro por:

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_n^2 \quad [2.37]$$

Durante os processos de calibração foram utilizados padrões de comparação que possuem determinada incerteza. Essa incerteza deve ser combinada de forma a permitir que a medição seja expressa levando em conta a contribuição desse fato por meio da equação [2.37]. Após isso aplicou-se o coeficiente de Student na incerteza combinada, a fim de se obter o valor da incerteza expandida ( $U$ ).

Dentre os vários valores de incerteza expandida obtidos ao longo dos pontos de calibração levantados, o valor adotado para a medida final foi o da maior incerteza expandida, ou seja, o maior valor em módulo do erro que pode ser cometido pelo sistema de medição nas condições em que foi avaliado, estando esse critério a favor da confiabilidade da medição, é conhecido também como erro máximo.



### 3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Esse capítulo traz em detalhes informações sobre os aspectos construtivos das partes do sistema proposto, abordando as etapas de desenvolvimento e montagem. O capítulo é subdividido em:

- Composição da estrutura mecânica;
- Sistema de aquisição e envio de dados;
- Aspectos construtivos do transformador;
- Princípios de funcionamento da fonte de alimentação;
- Medição de temperatura;
- Medição de inclinação.

#### 3.1 COMPOSIÇÃO DA ESTRUTURA MECÂNICA

Os componentes da estrutura mecânica do dispositivo foram projetados a fim de se manter a ideia inicial que visa à versatilidade de fixar o equipamento ao redor condutor.

Em toda a montagem mecânica, as partes móveis são sempre um desafio a parte. A conformidade das peças e ajustes necessários para que não haja folgas excessivas ou mesmo desalinhamento entre as partes e consequentes problemas de encaixe são sempre pontos de grande importância a serem observados durante a concepção e confecção das partes móveis.

Buscando suavizar as quinas e partes pontiagudas, foi criada uma envoltória esférica em alumínio. O formato esférico foi escolhido por ser a geometria em que a densidade superficial de carga se distribui de forma mais uniforme, minimizando com isso a ocorrência do efeito corona.

##### 3.1.1 A esfera de alumínio

A solução proposta de se criar uma esfera para envolver os dispositivos eletrônicos e magnéticos que compõem o equipamento foi testada no início do processo de desenvolvimento com diferentes materiais.

O alumínio é um material paramagnético e condutor de eletricidade. Quando comparado com o aço-silício, uma material ferromagnético, se exposto a grande intensidade de campos magnéticos variantes no tempo, os materiais ferromagnéticos apresentam de forma

mais acentuada correntes de Foucault e consequente aquecimento. Enquanto em materiais paramagnéticos, como o alumínio, esse efeito pode ser considerado desprezível.

Além de vantagens magnéticas em relação a outros materiais, o alumínio é um material relativamente leve e facilmente moldado devido ao baixo ponto de fusão de 660,3 °C. Pode ser facilmente furado, usinado ou desgastado.

Durante o desenvolvimento do equipamento, foram experimentadas esferas de alumínio de diferentes diâmetros e espessura. Foram ao todo três protótipos em alumínio, onde também foram exploradas diferentes formas de criar as articulações entre as partes móveis.

No decorrer dos testes mecânicos de resistência da esfera, alguns problemas foram encontrados devido ao fato de que esferas com espessura inferior a 3 mm se deformam facilmente, e com isso o encaixe das partes móveis articuladas é prejudicado.

Uma implicação recorrente ao desalinhamento das partes é o mau acoplamento mecânico do núcleo magnético do transformador. Devido a isso, ocorre a diminuição da área efetiva do núcleo e ruídos audíveis de grande intensidade durante o funcionamento do equipamento, causados por entreferros indesejados que surgem na união entre as partes do núcleo magnético.

Dentre os diferentes protótipos testados, a esfera de alumínio bipartida, fundida em forma de areia, atendeu de forma eficaz as necessidades do projeto.

O processo de fundição em forma de areia é um dos mais simples e baratos processos de fundição utilizados hoje em dia. Basicamente compreende a montagem de um molde em uma forma, também chama de “caixa de machos”, que contém as dimensões do modelo usado de referência para sua “impressão” na areia.

Esse modelo pode ser feito de plástico, madeira, metal, ou até mesmo por outra peça equivalente a requerida, porém recoberta por algumas camadas de tinta ou outro material usado para aumentar a espessura do molde, a fim de compensar o efeito da contração da peça devido ao resfriamento após a fundição.

Para a criação do modelo utilizado na fundição da esfera de alumínio, utilizou-se uma esfera inflável de látex, com as dimensões aproximadas das requeridas. A esfera foi recoberta com a aplicação de várias camadas de fibra de vidro e resina, a fim de se moldar ao redor da esfera de látex, uma esfera rígida e com a espessura desejável para o molde. Após atingir a espessura de 10 mm, a esfera foi partida ao meio,

originando os moldes para que pudesse ser montada a forma de areia para fundição.

A Figura 8 mostra o resultado da fundição em forma de areia e a caixa de machos apoiando as semiesferas fundidas. Ao lado direito da caixa de machos, aparece uma forma de areia montada e os orifícios por onde se derrama o metal fundido, que toma a forma do molde.



Figura 8 - Esferas de alumínio logo após a fundição e caixa de machos.

Após a fundição é necessário trabalhar a peça, a fim de se retirar inconformidades em sua superfície, além de realizar os cortes e furos necessários para o perfeito encaixe das demais partes.

### **3.1.2 O confinamento de resina**

O processo todo de desenvolvimento das partes mecânicas integrantes do sistema envolveu além da adequação de peças por meio de desbastes, furos e usinagem, também a fabricação de partes.

O confinamento de resina foi moldado em resina Epóxi e sua função é receber o núcleo do transformador e suas bobinas.

O confinamento de resina foi moldado no interior da própria semiesfera e para conter a resina líquida, foram colocados anteparos de alumínio. Para estancar qualquer eventual vazamento entre a esfera e os anteparos foi utilizada massa plástica automotiva ao longo do encontro das duas peças.

Contudo para que o confinamento tenha o formato do núcleo e sua bobina, foi usinada uma peça em teflon, cuja finalidade é preencher o

espaço a ser ocupado pelo núcleo e sua bobina, para que a resina Epóxi se moldasse no formato adequado da peça que ali será encaixada.

A Figura 9 mostra separadamente os anteparos colocados para conter o avanço da resina líquida.



Figura 9 - Anteparos de alumínio selados com massa plástica.

A Figura 10 mostra a peça que formou o molde introduzido na semiesfera durante a deposição da resina para que o berço tomasse a forma do posterior núcleo que seria encaixado nele.



Figura 10 – Deposição de resina com o molde do núcleo posicionado.

Após o período de cura da resina o molde de teflon é retirado e são realizados alguns ajustes para um melhor encaixe do núcleo. Na base do confinamento de resina são adicionadas duas molas para que a metade inferior do núcleo possa se ajustar à outra metade durante o fechamento da esfera. Durante seu funcionamento a força aplicada pelas molas reforça a união entre as partes do núcleo para minimizar o entreferro e possíveis ruídos audíveis ocasionados pelo atrito entre as partes.

A Figura 11 mostra o núcleo montado no confinamento de resina, do mesmo lado onde são adicionadas as molas na base do berço.



Figura 11 – Confinamento de resina com núcleo montado.

As molas na base do núcleo são colocadas apenas em um dos lados da esfera. No lado oposto ao da colocação das molas, o núcleo se mantém fixo ao confinamento de resina, sem qualquer liberdade mecânica para ajuste.

### 3.1.3 Sistema de Climpagem

Conforme apresentado anteriormente, a necessidade de se permitir instalar o instrumento e retirá-lo com facilidade, remeteu à utilização de uma montagem mecânica similar a alicates amperímetros, onde por meio de uma articulação, fixa-se o instrumento ao redor do condutor de interesse, podendo ser também facilmente removido após o uso.

Para realizar a fixação, a esfera possui uma dobradiça que permite sua abertura em 90° e com isso o cabo pode facilmente assentar

nas buchas de apoio. Após o fechamento da esfera as buchas promovem a sustentação do dispositivo no cabo. Outra função das buchas é assegurar um bom contato térmico entre o sensor de temperatura e o cabo, já que o sensor é instalado em uma das buchas. A Figura 12 mostra como o sistema é articulado por meio da dobradiça.



Figura 12 – Dobradiça de articulação da esfera.

Oposto à dobradiça está o dispositivo de fechamento da esfera. Esse dispositivo permite que a esfera seja travada fechada, apenas com o movimento natural da articulação. Para a abertura é necessário que seja pressionado um ponto de junção da peça. A Figura 13 mostra o dispositivo.



Figura 13 – Sistema de fechamento da esfera.

A Figura 14 apresenta a esfera já trabalhada na forma como foi usada para montagem da eletrônica em seu interior.



Figura 14 - Esfera de alumínio para montagem da eletrônica.

## 3.2 SISTEMAS DE AQUISIÇÃO E ENVIO DE DADOS

Essa secção apresenta detalhes de hardware e software que foram implementados a fim de se medir e enviar os dados a distância, bem como armazenar e disponibilizar ao usuário.

### 3.2.1 Eletrônica de aquisição

Basicamente a eletrônica utilizada se divide em dois módulos, os módulos escravos e o módulo mestre. Os módulos escravos estão no interior da esfera e são responsáveis por realizar a aquisição das informações dos sensores de temperatura e inclinação por meio de conversores A/D e enviar essa informação via sem fio.

O envio dessas informações é feito por radiofrequência a um módulo mestre que funciona junto a um computador onde o software de aquisição coleta os dados e disponibiliza ao usuário.

Os dois tipos de módulos utilizam internamente um sistema de rádio da família XBee. Fabricados pela DIGI, esses sistemas são relativamente baratos e de simples utilização. Além disso, são integrados com microcontrolador e conversor A/D, suas entradas analógicas e digitais podem ser utilizadas facilmente para leitura dos sensores, e na transmissão dos dados possuem recursos para minimizar falhas de comunicação.

O modelo XBee-PRO® 900/900 DigiMesh foi escolhido por possuir algumas das características eletrônicas já citadas e operar numa frequência de 900MHz, de uso aberto no Brasil. A Figura 15 mostra o módulo utilizado.

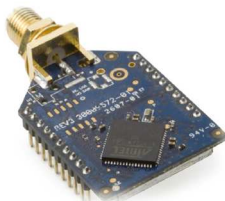


Figura 15 – Módulo XBee-PRO® 900/900 DigiMesh.

Usando modulação em frequência na transmissão, o sistema de rádio conta com um modo de transmissão conhecido pela sigla FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). Nele, o sistema pula (hop) de uma frequência para outra após um curto período de tempo, de



aproximadamente 10ms, garantindo que se houver alguma interferência na transmissão naquele instante ou mesmo de um outro sistema FHSS transmitindo na mesma área, a comunicação só será afetada durante um curto intervalo de tempo.

O sistema FHSS tem boa performance na transmissão de dados em ambientes abertos (regiões urbanas), onde existe a intensa presença de ruídos e outros sistemas FHSS operando na mesma área. A Figura 16 apresenta a utilização de banda livre para determinadas frequências ao redor do mundo.

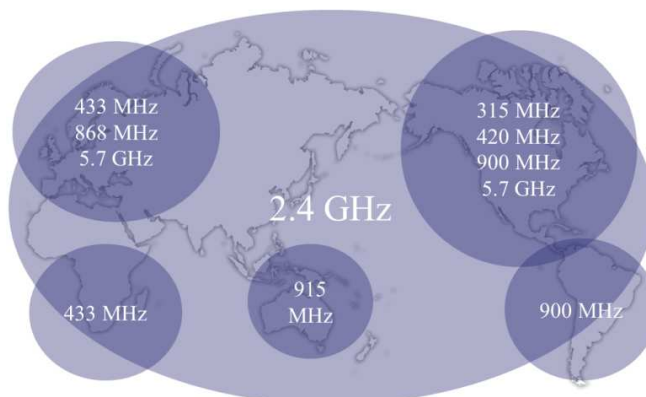


Figura 16 - Bandas de frequência de uso livre pelo mundo.

Fonte: Digi (2012).

As principais características técnicas do módulo utilizado estão no Anexo B. Dentre suas características vale destacar que a alimentação do sistema é feita em 3,3V, sendo os seis conversores A/D integrados de 10 bits e que utilizam como tensão de referência a tensão de alimentação.

Para uso do módulo radiotransmissor integrado aos sensores, foi criada uma placa de circuito impresso que faz a regulação da tensão de alimentação para os sensores e módulo de rádio. Nessa placa também foram implementados os divisores de tensão usados na medição de temperatura via NTC.

A Figura 17 mostra a placa de circuito impresso onde são montados os reguladores de tensão, filtros e módulo de rádio. Essa placa também recebe a conexão de todos os sensores.

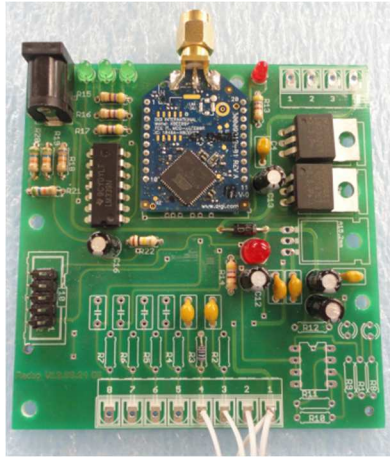


Figura 17 – Placa de rádio e instrumentação.

A placa e o módulo de rádio estão preparados para leitura de seis sinais analógicos, entretanto na aplicação dedicaram-se dois canais especificamente para medição de inclinação e temperatura. Os demais canais foram usados por outros sensores de temperatura instalados em pontos de interesse como o núcleo do TC, o módulo de RF, o retificador CA/CC e a carcaça do instrumento durante os ensaios que serão apresentados na secção 4.

A PCI é alimentada por uma placa conversora que usa como fonte de energia o transformador que envolve a LT. A tensão de alimentação pode ser feita entre 3,3V a 8,3V.

### 3.2.2 Topologia da rede de comunicação e método de transmissão de dados

A tecnologia utilizada nos módulos XBee-PRO® 900/900 DigiMesh emprega uma topologia de rede que pode ser utilizada em diferentes formações. A rede “mesh”, como é conhecida, possui o diferencial de encontrar caminhos alternativos ao longo dos enlaces, a fim de que a informação sempre seja trocada entre os dispositivos, de forma confiável, mesmo que algum caminho não esteja disponível, ou seja, é um sistema sem uma topologia física pré-estabelecida.

Tais características conferem ao sistema maior flexibilidade a mudanças da topologia física dos dispositivos, além de eventuais falhas que venham a ocorrer em alguns nós da rede, podendo assim alterar-se as

rotas de comunicação sem afetar os demais dispositivos que compõem a rede. A Figura 18 exemplifica como pode ser a topologia do sistema.

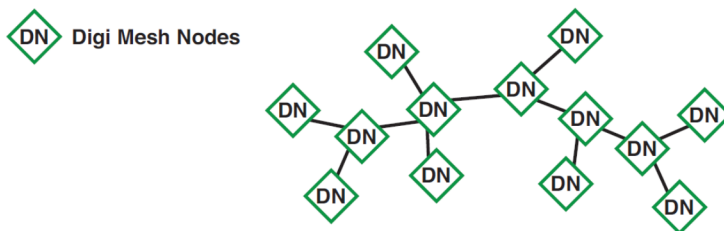


Figura 18 - Exemplo de uma possível topologia Mesh.

Dos diversos nós do sistema, representados como DN, qualquer um deles, desde que especificado anteriormente, poderia assumir a função de mestre e assim requisitar a leitura dos demais sem que a topologia fosse alterada.

O fato de não haver necessidade de pré-rotar o enlace, acarreta maior flexibilidade e confiabilidade ao sistema. Uma vez que todos os módulos possuem endereço fixo, independente da topologia a ser utilizada em dado momento, o módulo questionado vai responder respectivamente à base de comunicação onde está localizado o dispositivo mestre.

Numa aplicação onde vários dispositivos necessitassem ser montados em linha, como pode ocorrer em uma linha de transmissão, os dispositivos conversariam entre si. Com isso seria possível acessar pontos distantes da base de comunicação por meio dos saltos que cada dispositivo adicionaria ao enlace, expandindo assim seu alcance.

### 3.2.3 Automação da Medição

Para realizar a automação da medição e aquisição de dados via PC, a fim de disponibilizar as informações coletadas pelo módulo mestre, optou-se desenvolver de um programa em plataforma Builder C++. A Figura 19 mostra uma tela do programa que disponibiliza as informações de temperatura ao usuário.



Figura 19 – Tela do monitor de temperatura.

A apresentação dos dados pode ser feita na forma visual conforme a Figura 19 e ainda o programa disponibiliza um log dos dados por meio da criação de um documento de texto que contém todos os dados da medida, como data, hora, valor da medição e canal que originou o valor. Isso permite importar os dados desse arquivo por meio de outras ferramentas, como macros criadas em Excel e gerar relatórios diversos.

### 3.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO TRANSFORMADOR

A fim de prover a potência necessária para a alimentação da eletrônica, foi criado um transformador tipo janela, que tem como circuito primário o cabo da LT. O secundário do transformador é composto por um enrolamento montado em série nas metades que compõem o núcleo.

Composto por duas partes fixas às semiesferas da estrutura mecânica, o núcleo do transformador se separa durante a abertura do equipamento, permitindo que o cabo da LT seja posicionado e removido de seu interior.

O transformador em questão baseia-se no funcionamento dos transformadores de corrente, porém diferenciando-se destes em alguns aspectos, portanto serão apresentados alguns detalhes a respeito dos transformadores de corrente, que foram o ponto de partida para a solução encontrada na alimentação do equipamento.

#### 3.3.1 Tipos de transformadores de corrente

Os transformadores de corrente (TCs) tem aplicações específicas nos sistemas de energia, sendo transformadores de instrumentação, basicamente utilizados nas funções de medição e proteção. São dispositivos instalados em série com o circuito de interesse, e que permitem que em seu secundário sejam reproduzidos submúltiplos dos valores de corrente elétrica que percorrem seu circuito primário.

Existem diferentes formas de se montar o núcleo e a distribuição dos enrolamentos de um transformador de corrente. Cada diferente forma reúne vantagens em relação às demais de acordo com a aplicação.

A seguir estão relacionados os tipos mais comuns de TCs:

- Tipo barra
- Tipo enrolado
- Tipo janela
- Tipo bucha
- Com núcleo dividido
- Com vários enrolamentos primários
- Com vários enrolamentos secundários
- Com vários núcleos secundários

Dentre os diferentes tipos, o TC com núcleo dividido geralmente é composto por partes articuladas, como em alicates amperímetros. Outra possibilidade para esse tipo de TC é o núcleo partido, onde o núcleo é composto por duas ou mais partes que se encaixam. Na montagem articulada ou partida existe uma grande preocupação com os entreferros que se formam nas uniões entre as partes móveis do núcleo. O fato é que os entreferros podem contribuir de forma a aumentar a relutância do circuito magnético e também gerar dispersão de fluxo nesses pontos.

A Figura 20 apresenta um núcleo articulado e seu circuito primário e secundário.

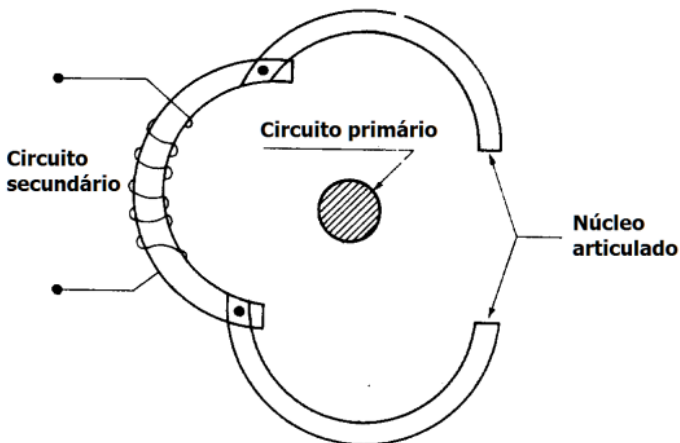


Figura 20 – TC articulado.

### 3.3.2 Detalhes sobre o núcleo do transformador

Inicialmente o núcleo do transformador foi construído a partir de chapas metálicas de aço silício de grãos não orientados (GNO), entretanto algumas dificuldades de ordem mecânica foram encontradas nos pontos de união entre as partes do núcleo. Para contornar essa dificuldade optou-se por utilizar um núcleo de Ferrite.

Na montagem utilizaram-se dois núcleos de Ferrite em formato de U. As faces planas do núcleo de Ferrite facilitam a união entre as duas peças em U de maneira uniforme, diminuindo a dispersão de fluxo na região de contato entre eles.

Algumas mudanças de ordem eletromagnética acontecem com a alteração do material do núcleo de aço silício GNO para o Ferrite. Das características magnéticas dos materiais, se destaca o laço de histerese e ponto de saturação, que para o Ferrite é mais baixo que o aço silício, aproximadamente 0,5 tesla e 1 tesla, respectivamente. Além disso, por não ser condutor, o Ferrite apresenta menor perda por correntes de Foucault em relação ao aço silício.

A curva de magnetização fornecida pelo fabricante do material Ferrite que compões o núcleo do TC é apresentada na Figura 21.

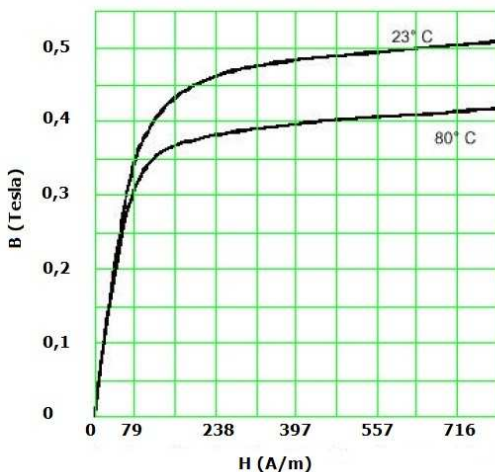


Figura 21 - Curva BxH do Ferrite IP12E.

Uma questão importante a ser considerada ao usar um núcleo de Ferrite é o formato e tamanho das partes, já que se restringem as opções comerciais oferecidas no mercado. O Ferrite é um material que se despedaça durante processos de corte ou desbaste, e também trinca facilmente quando sofre pequenos impactos.

As dimensões do núcleo utilizado e demais características fornecidas pelo fabricante são apresentadas no anexo C. A Figura 22 mostra uma das metades que forma o núcleo.

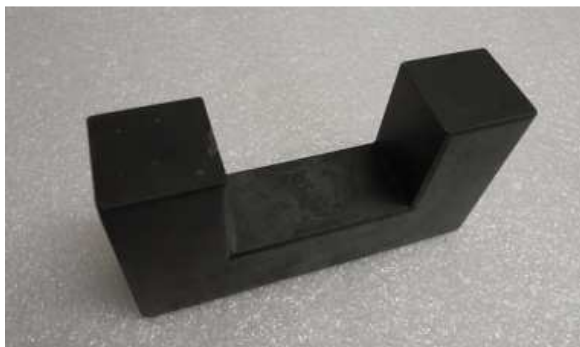


Figura 22 – Núcleo U em Ferrite.

Limitada a geometria do núcleo, os demais parâmetros do projeto do transformador como número de espiras, espessura dos condutores e

distribuição dos enrolamentos deve se adequar a fim de se obter as características desejáveis.

Uma questão muito importante na montagem do núcleo é o acoplamento mecânico entre as duas partes U que o formam. É indispensável que esta conexão seja estável o suficiente para que o atrito gerado em função das forças magnéticas geradas pelo funcionamento do transformador não cause desgaste das partes, que são muito sensíveis a choques mecânicos.

Além disso, o acoplamento mecânico se não realizado de forma adequada, pode implicar no aparecimento de entreferros indesejáveis no transformador.

Para a montagem das duas metades do núcleo, foi criado um confinamento de resina, já apresentado anteriormente. Fixo em cada semiesfera, sua função é prover suporte e alinhamento para o núcleo e seus enrolamentos.

### 3.3.3 Detalhes sobre as bobinas do transformador

As bobinas do transformador foram enroladas manualmente com fio esmaltado de 19 AWG, cujo diâmetro é de 0,912mm. Foram utilizadas 220 espiras em cada metade do núcleo. As bobinas são ligadas em série aditiva após a montagem dos núcleos no confinamento de resina.

A figura 23 mostra uma das bobinas montadas no núcleo.

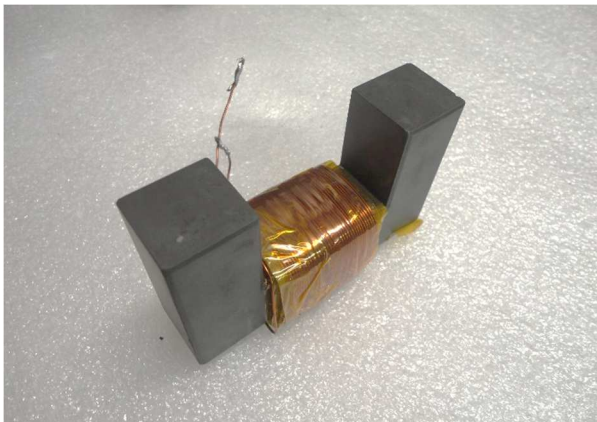


Figura 23 – Enrolamento montado no núcleo de Ferrite.



Após enroladas, as bobinas recebem a aplicação de uma fita adesiva que resiste a temperaturas elevadas, para isolar o fio esmaltado do contato direto com outras partes.

### 3.4 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

A partir dos terminais do secundário do transformador, foi montado um circuito com a finalidade de retirar a potência necessária para a alimentação dos circuitos eletrônicos do equipamento, ao mesmo tempo que realiza o controle da tensão na saída do transformador, para evitar sua saturação.

Uma condição bem conhecida do funcionamento dos TCs – e que nunca é recomendada – é seu funcionamento com as bobinas do secundário em aberto. Ao operar em aberto, quando percorrido por grandes correntes no primário, surgem tensões elevadas nas bobinas do secundário, devido à saturação do núcleo e consequente aumento da variação de fluxo.

Nessa condição de operação surgem forças de grande intensidade entre as partes do núcleo, dificultando sua separação mecânica. Isso gera um problema a ser contornado, pois em situações em que o dispositivo necessitar ser removido da linha, durante a operação, as metades do núcleo não se separariam facilmente.

Para inibir o surgimento das tensões elevadas no secundário do transformador e consequentemente controlar o dispositivo para evitar sua saturação, a fonte de alimentação faz o chaveamento do circuito secundário na busca de manter a tensão na saída da fonte, dentro de um limiar definido anteriormente.

O circuito opera de forma a satisfazer os dois principais requisitos dos circuitos eletrônicos por ele alimentados. A potência necessária, que pode chegar a aproximadamente 1W (durante a transmissão de dados) e uma tensão, que deve estar entre 5,2 V a 6,2V, antes de alimentar os reguladores de tensão da placa do módulo de rádio e instrumentação.

A Figura 24 mostra um esquema básico do circuito proposto.

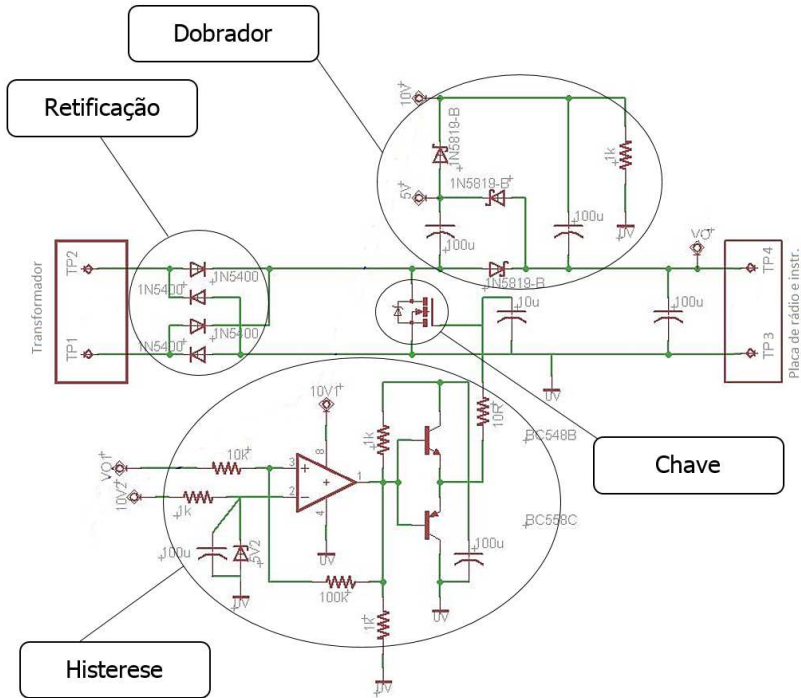


Figura 24 – Circuito da fonte de alimentação

No circuito apresentado na Figura 24, pode-se observar que logo após o secundário do transformador, há um retificador de onda completa seguido de um transistor, que funciona como uma chave. Esse transistor tem a função de curto-circuitar o secundário do transformador, limitando assim a tensão de saída quando esta ultrapassa o limiar pré-determinado.

O circuito de histerese tem como função comandar a chave que faz o curto-circuito do secundário do transformador. Configurado para trabalhar entre 5,2 e 6,2V o circuito de histerese identifica a tensão na antes da placa de rádio e instrumentação e então comanda o fechamento da chave quando a tensão ultrapassar o limiar superior (6,2V), e mantendo a chave fechada, comanda sua abertura assim que a tensão passa a ser menor que o limiar inferior (5,2V).

A função do circuito dobrador é gerar uma tensão de 10V para que o circuito de histerese possa comandar adequadamente a chave, que precisa ser acionada com uma tensão de 10V.

### 3.5 MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

Não considerando as restrições de operação dos sistemas de potência, como limites de tensão e estabilidade, a capacidade de transmissão de energia em linhas aéreas depende apenas do limite térmico dos seus condutores, isto é, da máxima temperatura permitida nos cabos (Camargo, 2009).

Seguramente as condições climáticas adversas sob as quais trabalham os cabos das linhas de transmissão inferem um fator complicador no desenvolvimento de um sistema de medição de temperatura para essa finalidade. Também vale ressaltar que qualquer manutenção nesse tipo de ambiente tem alto custo, inclusive envolvendo operações de risco, além de mão de obra especializada. Tais fatores foram de grande importância na concepção das etapas do desenvolvimento da solução apresentada.

Na ótica deste trabalho, o desafio de medir a temperatura dos cabos aéreos das linhas de transmissão impulsionou não só a busca da forma mais simples e eficiente de se medir a temperatura, porém também como fazê-la de forma barata e robusta, com a exatidão requerida pela aplicação. A solução encontrada foi a medição direta da temperatura, por meio do contato direto de um elemento sensor com o cabo de interesse.

#### 3.5.1 Montagem do sensor de temperatura

Para permitir um contato direto com a superfície do cabo, uma das buchas de apoio do cabo possui um sensor de temperatura acoplado, que realiza a medição da temperatura.

A bucha que possui o sensor de temperatura é fabricada em Nylon, material com baixa condutividade térmica, importante para que não haja uma grande troca de calor entre o cabo e a bucha. Dessa forma reduz-se uma possível diferença de temperatura devido à resistência de contato.

A Figura 25 mostra um detalhe da bucha com o sensor já montado na carcaça esférica de alumínio.



Figura 25 – Bucha com sensor de temperatura.

Na Figura acima, o sensor está imediatamente atrás do filme de alumínio. O filme de alumínio é utilizado para aumentar a área de contato do sensor, melhorando a condução de calor para o elemento. Para preencher os espaços existentes entre o elemento sensor e o filme de alumínio é utilizada pasta térmica.

### 3.5.2 Calibração em temperatura

Para realizar a calibração em temperatura foi utilizado um banho térmico, onde os sensores foram submersos dentro de luvas plásticas para evitar o contato dos condutores com a água. O banho, Marca MicroQuímica modelo MQPBP-01 de propriedade do LMPT, é mostrado na Figura 26.



Figura 26 - Banho térmico utilizado para calibração dos sensores.

O banho térmico possui ajuste digital de temperatura e apresenta o valor em um display. Entretanto para calibração em temperatura não foi utilizado o termômetro do banho e sim um termômetro padrão do tipo bulbo de mercúrio com resolução de 0,1°C.

Para análise de incerteza adotou-se a incerteza de  $\pm 0,05$  °C do termômetro de bulbo.

Iniciou-se a calibração com uma temperatura de 20°C, que foi elevada para 70°C com passos de 5°C. Antes de se realizar a aquisição dos dados foram aguardados 20 minutos para o sistema atingir o equilíbrio térmico entre cada patamar de temperatura. Foram realizadas 10 medidas em cada ponto.

Durante a calibração os seis sensores estavam imersos no mesmo banho. Para cada sensor foi levantada uma equação de 3º grau (vide Figura 42), que posteriormente foi utilizada no software de supervisão para fornecer o valor de temperatura obtido em função da tensão lida para cada canal. A calibração em temperatura foi realizada no LMPT – EMC.

### 3.6 MEDIÇÃO DE INCLINAÇÃO

Para medir a inclinação do cabo, optou-se pelo uso de um sensor 3D-MEMS, fixado diretamente à carcaça do instrumento. O sensor utilizado é do tipo biaxial, permitindo medir a inclinação longitudinal sofrida pelo cabo e também a inclinação transversal causada pelo vento. Porém a medição da inclinação transversal não foi explorada no trabalho.

#### 3.6.1 Montagem do sensor de inclinação

O sensor foi montado de forma a informar a inclinação longitudinal do cabo em relação ao equipamento. A Figura 27 mostra o sensor utilizado.



Figura 27 – Sensor de inclinação.

A Figura 28 mostra o sensor já instalado no equipamento. Foi realizada a fixação na lateral do confinamento de resina por meio de parafusos em suas duas abas de fixação. As especificações técnicas do sensor são apresentadas no anexo D.



Figura 28 – Posição do sensor de inclinação.

### 3.6.2 Calibração em inclinação

A calibração em inclinação foi realizada de forma análoga à calibração em temperatura. Para realizar a calibração foi utilizado um cabeçote divisor, comumente utilizado em equipamento de fresa. A montagem do equipamento no cabeçote divisor, por meio de um tubo

metálico, permitiu reproduzir a inclinação sofrida pelo cabo na LT com precisão. A Figura 29 mostra como foi realizado o posicionamento do dispositivo no cabeçote por meio de um tubo de aço que simula o cabo da LT. A calibração em inclinação foi realizada no LABTERMO – EMC.



Figura 29 – Equipamento montado no cabeçote divisor.

O cabeçote fresador possui uma manivela que gira a castanha de forma precisa, permitindo o posicionamento do tubo na posição desejada. A envoltória da castanha possui marcações que vão de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , em intervalos de  $1^\circ$  e a manivela possui marcações num intervalo de  $9^\circ$ , ou seja, cada volta da completa da manivela, o eixo da castanha varia  $9^\circ$ . A resolução das marcações na manivela são de 1 arco-minuto, que equivale a  $1/60^\circ$ .

Para se determinar a referência do sistema, utilizou-se um nível quadrangular de precisão, com uma incerteza de zero de  $\pm 0,029^\circ$ . Esse nível foi colocado sobre o tubo conforme mostra a Figura 30. Os equipamentos utilizados na calibração em inclinação são de propriedade do LABTERMO – EMC.



Figura 30 – Aplicação do nível de precisão no sistema de inclinação com cabeçote fresador.

Iniciou-se a calibração com a referência em  $0^\circ$ , e então em passos de  $0,5^\circ$  se elevou a inclinação do sensor até  $45^\circ$ . Foram ao todo 10 medidas para cada ponto.

A medição de inclinação foi realizada com o uso da eletrônica do próprio equipamento, utilizando uma fonte externa de 5Vcc para alimentação do sistema.

Os valores medidos resultaram numa equação de  $3^\circ$  grau (vide Figura 43), que posteriormente utilizada no software de supervisão, permitiu fornecer o valor de inclinação do cabo em função da tensão lida no respectivo canal.



## 4 ENSAIOS REALIZADOS

Após a calibração dos sensores, foram realizados ensaios a fim de se avaliar o comportamento do dispositivo durante seu funcionamento. O objetivo principal dos ensaios foi avaliar os possíveis desvios de medição que o dispositivo poderia sofrer sob certas condições, ou até mesmo avarias permanentes.

Foram realizados ensaios em alta corrente, com baixa tensão, e outro apenas submetendo o dispositivo à alta tensão.

### 4.1 ENSAIOS EM ALTA TENSÃO

O ensaio em alta tensão compreendeu a aplicação de um potencial superior ao que o sistema estaria submetido sob condições normais de funcionamento. Entendem-se como condições normais a exclusão de surtos de tensão, possivelmente ocasionados por descargas atmosféricas ou faltas no sistema.

Como o dispositivo fora concebido para funcionamento em linhas de 230kV, adotou-se esta como tensão de referência em regime. Entretanto, para testar o funcionamento do dispositivo além de sua capacidade nominal, o mesmo foi submetido a uma tensão de até 450kV durante os testes. O potencial foi aumentado gradativamente, enquanto foi realizado o monitoramento das leituras e medido a intensidade do sinal de recepção da comunicação via rádio.

Os ensaios de alta tensão foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da Eletrosul – LALTE, localizado no município de São José, Santa Catarina. O laboratório possui equipamentos calibrados para fornecer medidas elétricas em aplicações como verificação de isolamento de equipamentos de alta tensão, descargas parciais, capacidade de interrupção de disjuntores, entre outros.

O arranjo experimental foi montado de forma a permitir que o sistema pudesse ser monitorado visualmente durante os testes e também eletronicamente, de forma remota, por meio da aquisição das medições realizadas pelos sensores do dispositivo.

Todos os ensaios que submeteram o sistema à alta tensão, assim como as montagens do aparato experimental, foram realizadas com auxílio dos técnicos e engenheiros do LALTE.

Para elevar o dispositivo ao potencial previsto em sua utilização, quando instalado em uma LT, conforme apresentado nos objetivos específicos do trabalho, foi utilizada uma fonte ressonante. O

equipamento é capaz de aplicar os níveis de tensão requeridos, de forma gradual.

O aparato experimental vinculado à fonte de alta tensão do LALTE está associado a equipamentos capazes de realizar a medição de descargas parciais. Foram realizadas medições relativas a essa grandeza para avaliar o nível de descargas em que o equipamento poderia trabalhar sem apresentar falhas.

A partir das medições de descargas parciais foi possível estabelecer uma comparação entre a tensão e a disponibilidade do sistema – tendo em vista que as descargas parciais geram interferências que podem comprometer seriamente a comunicação via rádio, a exemplo, o efeito Corona, já mencionado anteriormente.

A Figura 31 apresenta esquematicamente a configuração dos diferentes equipamentos.

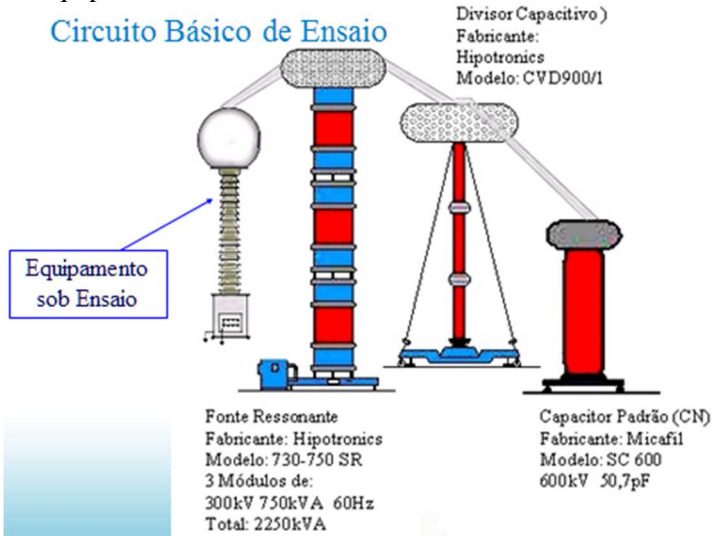


Figura 31 – Representação do aparato experimental.

A Figura 32 apresenta uma foto do aparato experimental e seus demais componentes, conforme o circuito básico de ensaio da Figura 31. A Figura 32 também mostra o dispositivo de medição de inclinação e temperatura, indicado por uma seta, montado em uma barra de alumínio, apoiada entre o divisor capacitivo e um equipamento que está servindo apenas como suporte para o arranjo experimental.



Figura 32 - Aparato experimental, conforme a representação da Figura 31.

A Figura 33 mostra as pontas criadas com arame de aço, dispostas ao redor do dispositivo, com a finalidade de aumentar a intensidade de efeito corona ao redor do mesmo, a fim e testar o sistema numa condição mais susceptível a apresentar falhas.

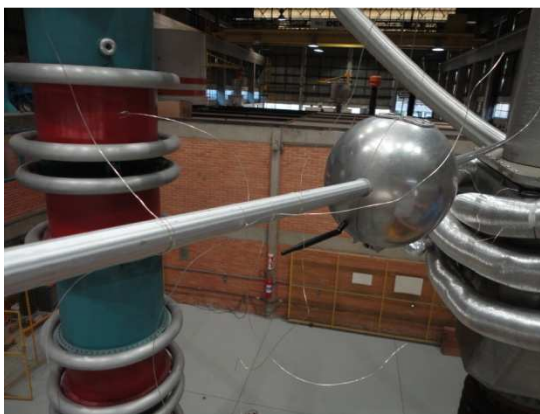


Figura 33 – Montagem com pontas de arame na proximidade do dispositivo para intensificar efeito corona nas proximidades.

A Figura 34 mostra outra geometria onde o equipamento foi montado, de forma a se intensificar a manifestação do efeito corona. O equipamento foi colocado em uma terminação do aparato experimental, condição que favorece a ocorrência de efeito Corona, por se tratar de uma ponta além do alcance dos equipotencializadores dispostos no arranjo.



Figura 34 – Dispositivo montado em terminação do aparato experimental.

## 4.2 ENSAIOS EM ALTA CORRENTE

A fonte de corrente utilizada nos ensaios permite o ajuste gradual do valor de corrente conforme necessário. Trata-se de uma fonte comercial, fabricada pela Instronic, modelo FCT-7,5 N° série 131, 220V 60Hz EG 0461717 Eletrosul. Sua capacidade é de até 2kA.

Os ensaios em alta corrente também foram realizados no LALTE. Todo o arranjo experimental foi montado de forma a permitir que o sistema pudesse ser monitorado também visualmente durante os testes, além de eletronicamente, por meio da aquisição de dados dos sensores do dispositivo. Para o monitoramento de corrente foi utilizado um alicate amperímetro calibrado.

Todos os ensaios que submetem o sistema a alta corrente, assim como as montagens do aparato experimental, foram realizados com auxílio dos técnicos e engenheiros do laboratório.

O ensaio em alta corrente, diferente do ensaio em alta tensão, não só verificou o funcionamento do dispositivo num ambiente de exposição a campos de grande intensidade, bem como validou o funcionamento do sistema de alimentação por indução magnética do próprio cabo onde é instalado.

O equipamento foi montado num cabo Grosbeak (anexo A), sendo percorrido por corrente alternada proveniente de uma fonte variável. Os testes aconteceram em ambiente de laboratório; logo não ocorreu a troca

de calor devida ao vento e o aquecimento por radiação solar, naturais ao meio de operação em determinadas situações.

Durante os testes a corrente aplicada foi aumentada gradualmente até a corrente nominal do cabo, 790 ampères. Também se efetuou um teste de curta duração, onde se elevou a corrente para 1000A durante 30 segundos, com a finalidade de avaliar o comportamento do sistema em condição de sobrecarga, que poderiam causar avarias nos circuitos internos.

A Figura 35 apresenta uma foto do aparato experimental montado para os testes em alta corrente.



Figura 35 – Aparato experimental dos testes em alta corrente.

A Figura 36 indica com uma seta o alicate amperímetro instalado na linha de corrente.



Figura 36 – Alicate amperímetro para testes em alta corrente.

### 4.3 ENSAIOS DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Esta etapa de testes ocorreu durante o desenvolvimento da fonte de alimentação. Os ensaios foram realizados no LMPT e LABTERMO-EMC.

Para se obter valores de corrente compatíveis com os encontrados nas LTs, que variam de algumas dezenas de ampères até alguns milhares, foi montada uma bancada que utilizou como carga um aquecedor de água com potência nominal de 5000W, alimentado pela rede elétrica de 220Vca. Os condutores de alimentação do aquecedor foram dispostos em espiras, criando um circuito primário para o transformador. Com isso foi possível obter o campo necessário para ativar o dispositivo e ainda variar essa corrente em função do número de espiras que se utilizava no primário.

Após o desenvolvimento da fonte de alimentação, foram realizados testes no LALTE. Nesta etapa se avaliou o funcionamento da fonte de alimentação para maiores períodos de funcionamento e valores de corrente além do nominal, para o cabo utilizado.

Para que a fonte de alimentação funcione corretamente, é necessário reproduzir a intensidade de corrente encontrada nos cabos de LT, como se o dispositivo estivesse instalado em uma linha real. O funcionamento da fonte está vinculado basicamente à intensidade de corrente alternada que percorre o condutor. O nível de tensão em que se reproduz a corrente não influencia o funcionamento do equipamento, entretanto, restrições quanto a efeitos como Corona, que são de ordem elétrica, devem ser considerados como, já apresentado anteriormente.

## 5 RESULTADOS

Algumas etapas do desenvolvimento do equipamento apresentaram resultados que já foram mostrados na secção de aspectos construtivos.

Parte fundamental dos resultados obtidos com o desenvolvimento do equipamento se deve aos testes da fonte de alimentação e aos testes em alta tensão e alta corrente, bem como à calibração dos sensores utilizados. Esses resultados serão apresentados em detalhes nessa secção.

### 5.1 FUNCIONAMENTO DA FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Durante os ensaios da fonte de alimentação, buscou-se a verificação das formas de onda em alguns pontos do circuito eletrônico.

Os testes da fonte de alimentação mostraram que o sistema de medição de inclinação e temperatura só inicia a operação para correntes maiores que 60A, no circuito primário do transformador.

Uma vez que os dispositivos eletrônicos do equipamento utilizam tensão de 3,3V, a fonte deve manter a tensão na entrada da placa de rádio e instrumentação, entre 6,2V e 5,2V, para qualquer valor de corrente no primário entre 60A e 1000A.

A figura 37 mostra a tensão na entrada da placa de rádio e instrumentação (CH 1), para uma corrente de 46,2A aplicada no circuito primário do transformador. A tensão verificada neste ponto ainda será estabilizada e filtrada pelos circuitos da placa de rádio e instrumentação. Também é possível visualizar o sinal de acionamento do transistor de chaveamento do transformador (CH 2).

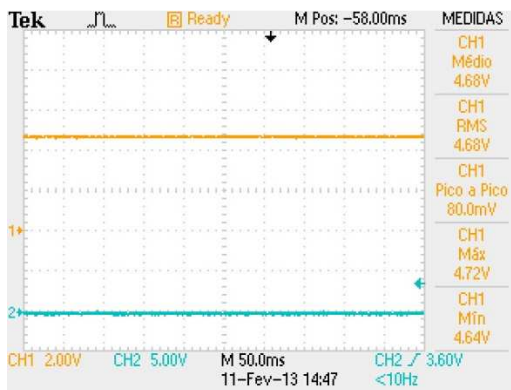


Figura 37 - Fonte de alimentação operando em 46,2A.

Pode-se observar que antes do circuito eletrônico entrar em funcionamento, devido à corrente no primário do transformador ser inferior a 60A, não há chaveamento do transformador. Isso se deve ao fato da tensão na entrada dos reguladores não atingir limiar superior estabelecido pelo circuito de histerese, que é de 6,2V.

A Figura 38 mostra o mesmo tipo de análise feita para Figura 37, porém para um valor de corrente de 62A no primário do transformador.

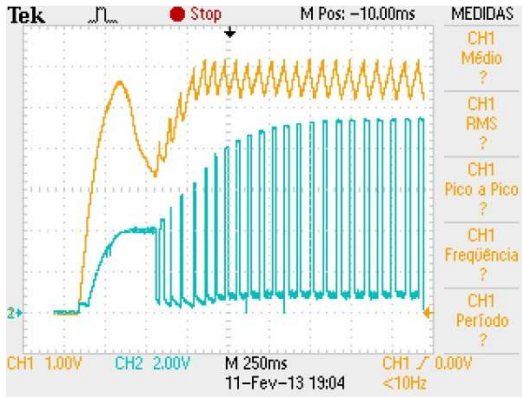


Figura 38 – Fonte de alimentação operando em 62A.

Importante observar que no início da operação, o sistema parte sem qualquer fonte de alimentação, logo, existe um período de aproximadamente 500ms de inicialização do sistema, onde a tensão sofre algumas variações diferentes de sua operação em regime permanente.

A partir do início da operação do circuito, já se observa a ação do chaveamento (CH 2), que logo após os 500ms de inicialização, ocorre sempre que a tensão (CH 1) atinge o limiar superior (6,2V). Assim que a tensão (CH 2) cai abaixo do limiar inferior (5,2V), a chave se abre e a tensão volta a subir na entrada dos reguladores da placa de rádio e instrumentação (CH 2).

A Figura 39 mostra o mesmo caso, porém para uma corrente primária de 762A.



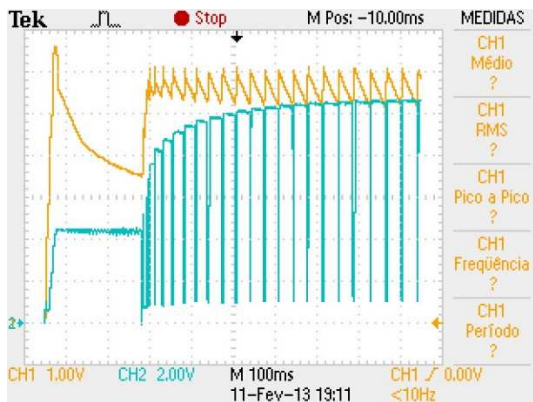


Figura 39 - Fonte de alimentação operando em 762A.

Verifica-se que existe nesse caso, durante a inicialização, uma sobre tensão, além dos 6,2V, do limiar superior para acionamento do chaveamento do secundário do transformador. Esse pico inicial não danifica a eletrônica. Também é possível verificar que o período de estabilização é mais rápido, durando aproximadamente 250ms, a partir do acionamento pela corrente do primário.

Observa-se também na Figura 39, que o tempo em que o transistor permanece fechado, realizando o curto-circuito do secundário, é maior que no caso anterior.

Além da análise das formas de onda, foi monitorada a temperatura dos componentes da fonte de alimentação. Durante todo o período de funcionamento da fonte, os valores medidos ficaram muito abaixo dos limites indicados pelos fabricantes. Monitorou-se também a temperatura dos enrolamentos do transformador, onde a máxima registrada foi de 42°C, para a condição de maior corrente, em que o dispositivo permaneceu operando por 30 minutos a uma corrente de 762A.

## 5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS EM ALTA TENSÃO

Durante os ensaios em alta tensão, além da análise da recepção de dados e possíveis variações que estes pudessem sofrer, mediu-se o valor das descargas parciais. Com isso, obteve-se uma relação entre o nível de tensão e os valores de descarga para o arranjo experimental utilizado.

Foram realizados testes em duas montagens diferentes; na primeira, o dispositivo foi colocado conforme a Figura 32, apresentada na

secção 4.1, fixo a uma barra de alumínio apoiada nas extremidades. Ainda nessa geometria, para aumentar a ocorrência de descargas na região do dispositivo, foram adicionadas pontas feitas com fios de aço, conforme pode-se visualizar na Figura 33, apresentada na secção 4.1.

Neste teste, a tensão foi elevada até 450kV e o dispositivo não apresentou qualquer anormalidade de funcionamento, sendo que os valores de descarga não ultrapassaram 1700pC.

No segundo teste, o dispositivo foi montado na ponta de uma barra metálica, com intuito de intensificar ainda mais as descargas e criar uma condição de pontas ainda mais intensa, aumentando a incidência de descargas do sistema. Essa geometria pode ser visualizada na Figura 34, apresentada na secção 4.1.

À medida que o potencial aplicado aumenta, as descargas parciais aumentam, até um ponto em que o dispositivo não consegue mais se comunicar. Neste segundo teste, a ocorrência das descargas levou o sistema a um ponto em que a partir dos 165kV a comunicação falhou continuamente. Entretanto, quando reduzido o potencial para 160kV o sistema retornou ao funcionamento normal. A Tabela 3 mostra os valores de descarga medidos para essa montagem em comparação com a tensão aplicada.

Tabela 3 – Relação entre tensão aplicada e descargas parciais.

Tensão (kV)	Descargas parciais (pC)
10	7
50	130
100	200
130	1600
140	2900
150	3200
160	3500
170	3800
200	4500

Durante os testes não se observou o efeito corona de forma visual, somente ruídos característicos do fenômeno.

Também não foi observada qualquer avaria no sistema, seja na carcaça do equipamento ou na eletrônica. A temperatura dos componentes permaneceu conforme sua operação normal, na ausência de alta tensão. Durante esse teste, os dispositivos da eletrônica foram alimentados com uma bateria de 9V, pois não havia corrente fluindo no interior do dispositivo, logo sua alimentação teve que ser feita por esta fonte auxiliar.

### 5.3 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA

Além da calibração dos sensores de temperatura utilizados, foi realizada juntamente com os módulos de eletrônica que compõe o sistema, uma tomada de dados comparando os valores de temperatura medidos pelo equipamento, com os valores medidos por um instrumento de referência.

Esse teste foi realizado durante os ensaios de alta corrente, devido à necessidade de se verificar a ocorrência de possíveis interferências na medição de temperatura, quando o sistema estivesse em operação.

A Figura 40 apresenta uma curva de comparação dos valores de temperatura medidos na superfície do cabo, com dois sensores montados ao lado da bucha de acoplamento, na parte externa da esfera. Um sensor foi utilizado como padrão e o outro sensor é do próprio dispositivo.

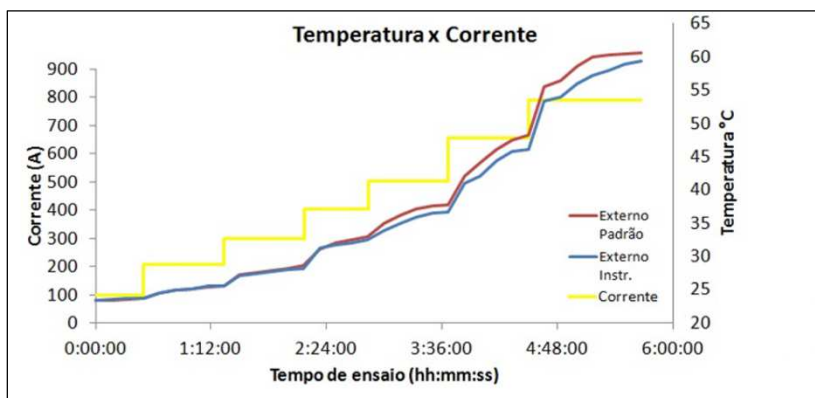


Figura 40 – Comparação entre os valores de temperatura obtidos com o próprio instrumento e um padrão, posicionados sobre o cabo, externamente à esfera.

A Figura 41 apresenta a curva de comparação dos valores de temperatura de forma análoga à Figura 40, porém com os sensores montados internamente à esfera. Um sensor é utilizado como padrão e o outro sensor é do próprio dispositivo.

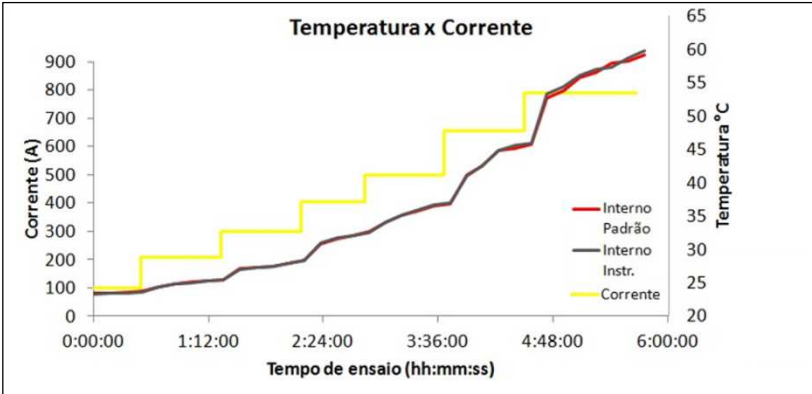


Figura 41 – Comparação entre os valores de temperatura obtidos com o próprio instrumento e um padrão, posicionados sobre o cabo, internamente à esfera.

Além permitir uma avaliação do comportamento das medições dos sensores de temperatura, o teste em alta corrente também permitiu validar o funcionamento do sistema da fonte de alimentação do dispositivo.

Durante os testes de alta corrente, outros sensores de temperatura, além dos utilizados na medição de temperatura do cabo, foram instalados em alguns pontos da eletrônica. A fim de se observar a elevação de temperatura de determinadas partes, os sensores foram instalados: na carcaça do equipamento, no retificador da fonte de alimentação, no núcleo ferromagnético e no módulo de rádio.

A temperatura medida sempre se manteve abaixo do limite admissível para os componentes em questão.

A calibração dos sensores de temperatura, originou as equações utilizadas pelo software para conversão dos valores de tensão lidos pelo A/D em um equivalente de temperatura. A Figura 42 mostra para um canal, a média dos valores medidos ao longo do processo de calibração e também a equação polinomial que melhor se ajusta à interpolação dos pontos.

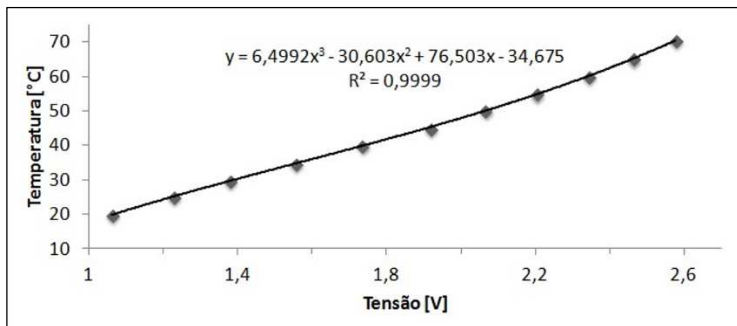


Figura 42 – Curva de calibração em temperatura.

A aplicação da teoria de incerteza de medição descrita no item 2.7 conferiu aos canais de temperatura, uma incerteza de  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ .

#### 5.4 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DO SENSORE DE INCLINAÇÃO

Após a calibração do sensor, foi realizada uma verificação dos valores mensurados pelos sensores de inclinação, para validar se estes estavam dentro dos limites de incerteza determinados pela calibração. Para isso, foi utilizado o mesmo sistema de inclinação montado para calibração. Não foi constatada qualquer discrepância além dos desvios aceitáveis entre os valores indicados pelo sistema de inclinação e o valor medido pelo dispositivo.

Durante os testes em alta tensão e corrente, os valores obtidos pelo sensor de inclinação, foram avaliados apenas para se verificar a estabilidade e disponibilidade da medida. Os valores se mantiveram disponíveis durante todo o tempo, não ocorrendo elevação de temperatura das partes do sensor, além da temperatura ambiente.

A calibração do sensor de inclinação, originou a equação utilizada pelo software para conversão dos valores de tensão lidos pelo A/D em um equivalente de inclinação do equipamento. A Figura 43 mostra, para o respectivo canal, a média dos valores medidos ao longo do processo de calibração e também a equação polinomial que melhor se ajusta à interpolação dos pontos.

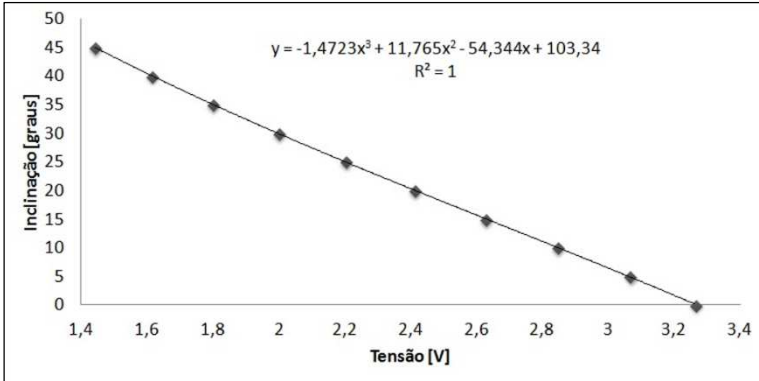


Figura 43 – Curva de calibração em inclinação.

A aplicação da teoria de incerteza de medição descrita no item 2.7 conferiu ao canal de inclinação, uma incerteza de  $\pm 0,1^\circ$ .

## 5.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS DE MEDIÇÃO

No sistema desenvolvido, a determinação da flecha do condutor pode ser realizada de forma indireta, seja pela medição da inclinação do cabo ou pela medição da temperatura. O segundo caso pode ser avaliado tomando-se como base a dilatação linear sofrida pelo cabo. Para essa análise, é necessário se conhecer os parâmetros da linha em uma determinada condição e a partir desta, analisar a variação do seu comprimento e flecha em função da temperatura.

Qualquer que seja o método utilizado, há de se considerar os erros incorridos na medição das grandezas relacionadas na determinação da flecha, conforme já apresentado.

De acordo com o apresentado no item 2.1.4, a Figura 44 mostra uma curva típica da variação da flecha em função da variação de temperatura, para um vão de 400m, considerado o cabo ACSR modelo Grosbeak 636, cujo coeficiente de dilatação linear é  $0,000023 \text{ [m /}^\circ\text{C]}$ .

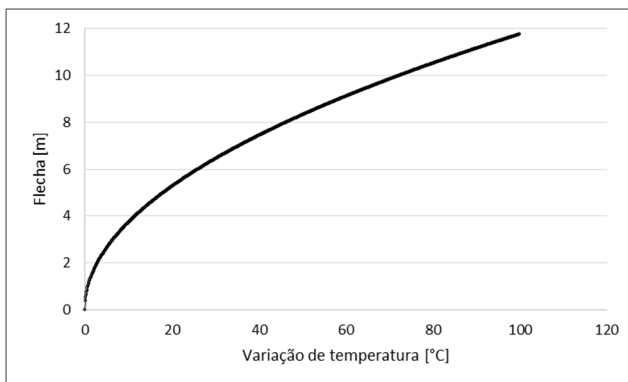


Figura 44 – Flecha em função da variação da temperatura.

De acordo com o apresentado no item 2.1.4, a Figura 45 apresenta a curva típica do comportamento da flecha em função da inclinação, para um vão de 400m, utilizando 60° como valor máximo de inclinação.

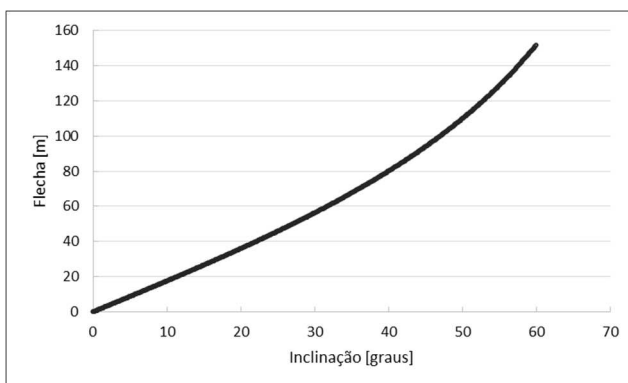


Figura 45 – Flecha em função da inclinação.

Para realizar a comparação entre os dois métodos de medição, estabeleceu-se uma relação da grandeza mensurada, com valores típicos de flecha para o vão de 400m. Com isso, foi feita uma comparação entre a resolução dos dois sensores.

A Figura 46 expressa a resolução obtida na medida da flecha para cada 0,1°C de variação do cabo, no vão típico de 400m.

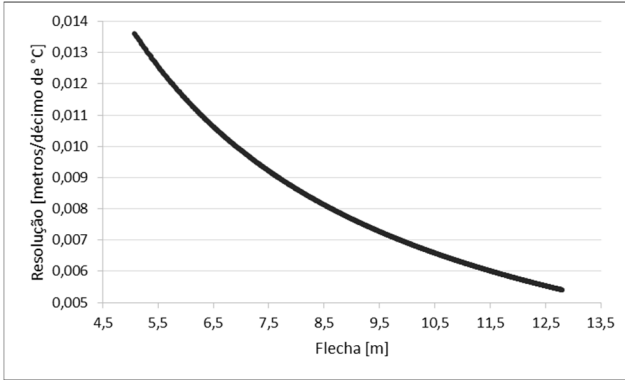


Figura 46 – Resolução da flecha em função da temperatura.

O valor da resolução da flecha apresentado na Figura 46, mostra que para cada décimo de °C que pode ser medido pelo instrumento, há uma variação da ordem de 1cm de flecha.

A Figura 47 expressa a resolução obtida na medida da flecha para cada 0,1° de inclinação do cabo, tomando como base o vão típico de 400m.

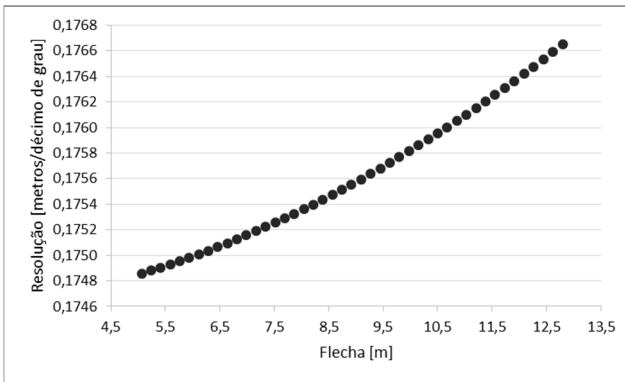


Figura 47 – Resolução da flecha em função da inclinação.

Através da resolução da flecha, a Figura 47 mostra que para cada décimo de grau de inclinação, há uma variação da ordem de 17cm de flecha.

Diante da avaliação das resoluções apresentadas pelos dois métodos de medição, é notável que a medição de temperatura fornece uma medida muito mais precisa da flecha do condutor, do que a medição de inclinação.



## 6 CONCLUSÕES

O objetivo de se desenvolver um dispositivo para operar em alta tensão de forma autoalimentada, capaz de realizar medição de temperatura e inclinação de um cabo de LT, foi alcançado com sucesso. Os resultados mostraram que os materiais e métodos adotados no desenvolvimento do sistema se comportaram satisfatoriamente, garantindo que a medição de temperatura e inclinação possa ser realizada de forma autônoma e remota.

A comparação entre os dois métodos apresentados para determinação da flecha, indicou a vantagem de se medir a temperatura na busca de uma maior precisão dessa medida. Devemos considerar entretanto, que a medição de temperatura em apenas um ponto do cabo necessita ser validada quanto à amostragem que fornece, a fim de se utilizá-la como representativa da temperatura de todo o vão.

Mesmo sendo a medição de inclinação cerca de 10 vezes menos precisa que a medição de temperatura, na determinação da flecha do condutor, com os sensores utilizados, a medição de inclinação demonstra ser uma medida distribuída dos parâmetros mecânicos que envolvem o fenômeno térmico de dilatação linear do cabo.

De acordo com os ensaios realizados, pode-se concluir que o equipamento se comportou de forma adequada quando exigida sua retirada da linha, mesmo sendo ela percorrida por correntes até os valores nominais. Além disso, o dispositivo inicia a operação de forma autônoma, assim que a corrente primária é maior ou igual a 60A, sem a necessidade de qualquer interferência externa ou ainda uso de fonte de alimentação auxiliar.

Foi constatado por meio dos ensaios em alta tensão e alta corrente, que o envio de dados foi realizado de forma confiável. Não foram identificadas interferências que alterassem a qualidade dos valores informados. Mesmo existindo um nível de descargas parciais, no qual ocorreu a interrupção do envio de dados, após redução dos níveis de descarga, a comunicação foi restabelecida e se manteve a disponibilidade dos dados.

Mesmo sendo utilizada uma antena externa de formato pontiagudo, o sinal de rádio não foi afetado por descargas parciais, a ponto de prejudicar a qualidade de envio e recepção de dados.

De forma geral, o trabalho foi bem sucedido e pode contribuir com muitas informações úteis a outros trabalhos que venham ser desenvolvidos explorando ainda mais o tema proposto.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Testes adicionais a serem realizados com objetivo de se verificar o funcionamento do equipamento em condições de falta do sistema elétrico e ainda sob chuva e descargas atmosféricas, que podem atingir a linha em operação e danificá-lo.

Mais sensores podem ser adicionados ao sistema, permitindo ainda o monitoramento de outras variáveis como: corrente e tensão elétrica, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade e direção do vento.

A adição de um sensor ultrassônico de medição de altura entre o ponto de flecha máximo do cabo e o solo, teria um grande potencial de aumentar a resolução do sistema para a medição da flecha, e inclusive permitir a medição de alterações da altura da linha em relação ao solo, causadas por cheia de rios, veículos ou vegetação que estejam sob a linha de transmissão.

A melhor vedação das bordas de fechamento visando o aumento da resistência do equipamento a chuva e poeira deve ser considerada.

Por fim, outra modificação mecânica que agregará muito ao equipamento diz respeito ao desenvolvimento de um sistema de articulação a ser operado por uma vara de manobra, facilitando assim a instalação em linha viva.

## REFERÊNCIAS

SIPOT, 2013 – Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro. Site acessado em 21 de Agosto de 2013, às 19:21. [http://www.eletrabras.com.br/EM\\_Atuario\\_SIPOT/sipot.asp](http://www.eletrabras.com.br/EM_Atuario_SIPOT/sipot.asp)

ONS, 2013 – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Site acessado em 19 de maio de 2013, às 22:14. [http://www.ons.org.br/conheca\\_sistema/o\\_que\\_e\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx)

PAR 2012-2014 – Plano de Ampliações e Reforços 2012-2014, versão executiva – Publicação disponível no site acessado em 19 de maio de 2013, às 23:06. [http://www.ons.org.br/plano\\_ampliacao/plano\\_ampliacao.aspx](http://www.ons.org.br/plano_ampliacao/plano_ampliacao.aspx)

NOTA TÉCNICA DEA, 2011 – Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2011-2020) – Empresa de Pesquisa Energética – Série: Estudos de Energia. Rio de Janeiro. Fevereiro de 2011.

CAMARGO, C. Celso de Brasil – Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos fundamentais. 4ª ed. rev. – Florianópolis: Ed. da USFC, 2009.

MORGAN, V. T. – Probability methods for calculating the current capacity of overhead transmission line. In: International Symposium on Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems, 1986. Toronto. Anais. Toronto: [s.n.], 1986.

FRONTIN Sergio de Oliveira – Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão – Brasília: Goya, 2010. ISBN: 978-85-88041-02-8.

BARTHOLD, L. O.; DOUGLASS, D. E.; WOODFORD, D. A. Maximizing the capability of existing ac transmission lines. In: CIGRÉ Session 2008, Paris.

SAKAGAMI, Yoshiaki; HAAS, Reinaldo; SCUSSEL, Julio Nelson; GRUMICHE, Rodrigo; COLLE, Sergio – Rede de Monitoramento em Linhas de Transmissão (RMLT): resultados do piloto. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia - XV CBMET 2008, São Paulo. Anais do XV CBMET 2008.

THRASH, Ridley; HUDSON, Gerald; COOPER, Dave SANDERS, Gene – Overhead Conductor Manual: Soutwire Company. First Edition 1994.

BEER, Ferdinand Pierre; JOHNSTON, E. Russel – Mecânica vetorial para engenheiros: Estática. 5<sup>a</sup> ed. revisada. São Paulo: McGraw Hill, 2007.

National Electrical Code – NEC®; 2011 Edition – Article 100; ISBN: 978-087765913-6

MUHR, M.; PACK, S.; JAUFER S.; HAIMBL W.; MESSNER, A. Experiences with the weather parameter method for the use in overhead line monitoring systems. In: CIGRÉ Session 2008. Paris. Anais... Paris: [s.n.], 2008. B2-105.

BLACK, W. Z.; REHBERG, R. L. Simplified model for steady state and real-time ampacity of overhead conductors. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 104, n. 10, p. 29-42, 1985.

HOUSE, H.; TUTTLE, P. Corrent-carrying capacity of ACSR. AIEE Transaction, v. 77, n. 2, p. 1169-1177, 1959.

NBR 5244: Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rio de Janeiro, 1985.

An Introduction to MEMS – Faraday Partnership Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering Loughborough University. © 2002 Loughborough University - ISBN 1-84402-020-7.

BASTOS, João. P. Assumpção; SADOWSKI, Nelson – Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods, Marcel Dekker, New York, 2003.

FILHO, Edino B. Guidice; MOURÃO, Miguel A. M.; CRUZ, Hugo B. S.; SILVA, Elson J.; GUIMARÃES Gernan E.; BOAVENTURA, Wallace C.; LOPES, Ivan J. S. – Efeito Corona em SE de 500kV da CEMIG: Investigação Experimental e Modelagem Computacional. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – Anais SBSE, 2006.

IEC 61850 – Communication Networks and Systems in Substations.

International Electrotechnical Commission, 2013.

LEÃO, R. Micheletto – Rádio Interferência Proveniente de Linhas de Transmissão de Alta Tensão. Porto Alegre. EDIPUCRS, 2008 – ISBN 978-85-7430-779-4.

BASTOS, João Pedro Assumpção – Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-estática, Editora da UFSC, 2ª Edição Revisada, Florianópolis, 2008.

BICHELS, Arlei. Carregamento de Linhas Aéreas de Transmissão. Determinação de Limites “normal” e de “sobrecarga”. Nota Técnica SPE/DPTE – 009/83 – COPEL.

ALBERTAZZI, Armando; SOUZA, André R. de – Fundamentos de metrologia científica e industrial. Barueri, SP: Manole, 2008. ISBN 978-85-204-2116-1.

Digi (2012) – Site acessado em 04 de outubro de 2013, às 22:32. <http://www.digi.com/technology/rf-articles/rf-basics>

INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEM. The thermal behavior of overhead conductors Section 1 & 2: Mathematical model for evaluation of conductor temperature in the steady state and application thereof. *Electra*, n. 144, p. 107-125, outubro.1992.

BORGES, Fátima – Comunicação Industrial d Redes – Schneider Electric n° 2; Edição de Setembro de 2007 – Centro de Formação da Schneider Electric Portugal. Edição de Setembro de 2007.

OLHARC, M. Le transformateur de courant pour la protection en HT. *Cahier technique Schneider Electric* n° 164 édition, décembre 1992.

NASCIMENTO, Carlos A. M; CASTRO, Antônio C. – Controle e monitoramento de temperatura de condutores em linhas áreas de alta tensão. Cemig Distribuição S.A. – 2006.

SILVA, A. P.; BZERRA, J. M. B. – Análise Crítica de Modelos de Ampacidade para Condutores Especiais. *Anais SBSE 2006 – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*.

SEVERINO, Juciléia Filomena Barbosa – Sistema digital de medição direta da flecha em linhas de transmissão com o uso de sensores ópticos e comunicação via tecnologia GPRS. Dissertação de mestrado UFJR. Juiz de Fora, MG, Abril de 2006.

CAVACO, Marco Antonio M.; BENEDET, Mauro Eduardo – Medição de temperatura em pontos quentes de subestação utilizando sensores passivos e ativos. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecânica. Vol 15, Nº 1, pp 13-22, 2011.

RÉGIS, O. Jr.; EUARDO, J. V.; LIMA, O. V. F.; DART, F. C. – LT de emergência de 500kV com um condutor por fase: estudos, medições e constatações. XIX SNPTEE, GLT 08 Grupo III. Rio de Janeiro, 2007.

## ANEXOS

Anexo A – Principais características do condutor de alumínio ACSR modelo Grosbeak 636 MCM.

Características	Valores	Unidade
<b>Dimensionais</b>		
Número de fios de alumínio	26	[-]
Diâmetro dos fios de alumínio	3,973	[mm]
Número de fios de aço	7	[-]
Diâmetro dos fios de aço	3,089	[mm]
Diâmetro da alma de aço	9,27	[mm]
Diâmetro do condutor	25,15	[mm]
Peso nominal do Alumínio(aprox.)	893	[kg/km]
Peso nominal do aço (aprox.)	409,8	[kg/km]
Massa aproximada	1302,8	[kg/km]
<b>Elétricas</b>		
Resistência elétrica máx. C.C. a 20°C	0,09	[W/km]
Resistência máx. CA 60Hz a 20°C	0,0885	[W/km]
Resistência máx. CA 60Hz a 70°C	0,108	[W/km]
Ampacidade	790	[A]
Carga de ruptura (Classe A)	11.427	[kgf]
Carga de ruptura (Classe B)	11.067	[kgf]
<b>Físicas</b>		
Tipo de Alumínio	1305-19H	[-]
Massa específica 20°C	2.705	[kg/m <sup>3</sup> ]
Resistividade máxima a 20°C	0,028264	[W:mm <sup>2</sup> /m]
Coeficiente de variação da resistência a 20°C	0,00403	[W/°C]
Coeficiente de dilatação linear	0,000023	[m/°C]
Calor específico (Cp)	867	[J/kg°C]
Condutividade térmica (k)	203	[W/m°C]

Fonte: Nexans (2009)

## Anexo B – Características do módulo XBee-PRO® 900/900 DigiMesh.

Platform		XBee-PRO® DigiMesh™ 900
<b>Performance</b>		
RF Data Rate		156 Kbps
Indoor/Urban Range		450 ft (140 m)
Outdoor/RF Line-of-Sight Range		Up to 1.8 miles (3 km)
Outdoor/RF Line-of-Sight Range w/ High-Gain Antenna		Up to 6 miles (10 km)
Transmit Power		50 mW (+17 dBm)
Receiver Sensitivity (10% PER)		-100 dBm
<b>Features</b>		
Serial Data Interface		3.3V CMOS Serial UART (5V tolerant inputs)
Configuration Method		AT & API, local or over-the-air
Frequency Band		900 MHz ISM
Interference Immunity		FHSS
Serial Data Rate		Up to 230 Kbps
ADC Inputs		Coming in future firmware revisions
Digital I/O		Coming in future firmware revisions
Antenna Options		Wired Whip, U.FL connector, RPSMA connector
<b>Networking &amp; Security</b>		
Encryption		128-bit AES
Reliable Packet Delivery		Retries/Acknowledgments
Addressing Options		PAN ID, channel, 64-bit address
Channels		8 hopping patterns on 12 channels or single channel
<b>Power Requirements</b>		
Supply Voltage		3.0 – 3.6 VDC
Transmit Current		210 mA
Receive Current		80 mA
Power-Down Current		60 uA @ 3.3V
<b>Regulatory Approvals</b>		
FCC (USA)		Yes
IC (Canada)		Yes
C-TICK (Australia)		No

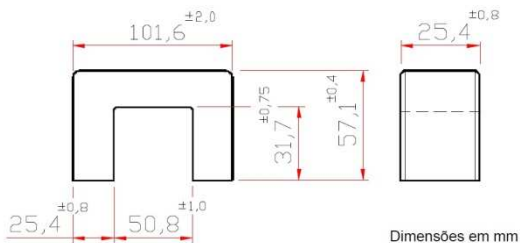


## Anexo C – Núcleo de Ferrite Thornton, modelo NC-100/57/25.

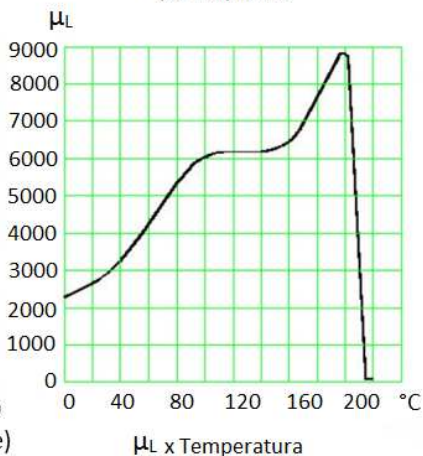
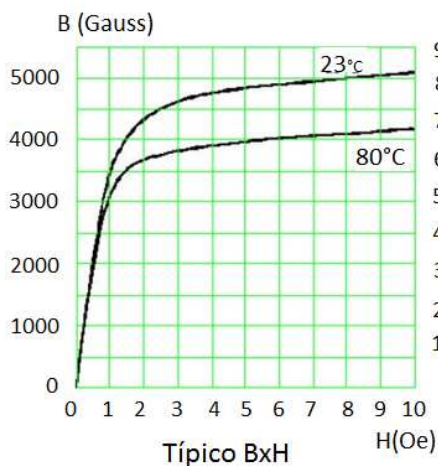
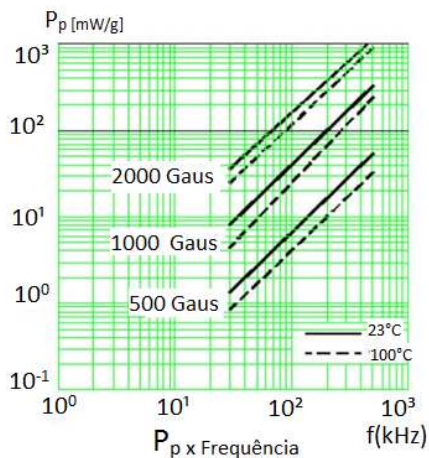
### Parâmetros Efetivos do Núcleo:

$\Sigma l/A$	0,477	mm <sup>-1</sup>
Le	308,19	mm
Ae	645,15	mm <sup>2</sup>
Amin	- - -	mm <sup>2</sup>
Ve	198836,1	mm <sup>3</sup>

Peso Aprox. (pç) 495,0 g



IP12E			
SIMB.	CONDIÇÕES	VALOR	UNIDADE
$\mu_i$	23 °C	2300 ± 25%	- - -
B	15 Oe, 23 °C	5100	Gauss
P <sub>P</sub>	2000 Gauss	110	mW/g
	100 KHz, 80 °C		
T <sub>C</sub>	- - -	> 210	°C
$\rho$	- - -	4800	Kg/m <sup>3</sup>



Onde:

$\Sigma l/A$  – Fator do núcleo [ $\text{mm}^{-1}$ ]

$l_e$  – Comprimento efetivo [mm]

$A_e$  – Área efetiva [ $\text{mm}^2$ ]

$V_e$  – Volume efetivo [ $\text{mm}^3$ ]

$\mu_i$  – Permeabilidade Inicial

$B$  – Densidade do Fluxo Magnético

$P_p$  – Perda por Potência

$\rho$  – Densidade

---

## Anexo D – Especificações do sensor de inclinação VTI Technologies, modelo SCA121T-D05.

Parameter	Condition	SCA121T-D03	SCA121T-D05	SCA121T-D07	Units
Measuring range	Nominal	±90	±90	±30	°
		±1	±1	±0.5	g
Supply Voltage		7...35	5±0.25	7...35	V
Offset (Output at 0g)		2.5	Vdd/2	2.5	V
Offset calibration error	Max deviation	±1.5	±1.5	±1.5	°
Sensitivity		2	2	4	V/g
	between 0...1° <sup>(1)</sup>	35	35	70	mV/°
Sensitivity calibration error		±1.5	±1.5	±1.5	%
Offset temperature dependency	-25...85°C	±1	±1	±1	°
	0...70°C	±0.5	±0.5	±0.5	°
Sensitivity temperature dependency	-25...85°C	-1.5...+0.5	-1.5...+0.5	-1.5...+0.5	%
	0...70°C	-0.8...+0.3	-0.8...+0.3	-0.8...+0.3	%
Typical non-linearity	Measuring range			±0.57	°
Frequency response	-3dB LP <sup>(2)</sup>	8-28	8-28	8-28	Hz
Ratiometric error	Vdd = 4.75...5.25V		±2		%
Cross-axis sensitivity	Max.	4	4	4	%

Note 1. The angle output has SIN curve relationship to voltage output.

Note 2. The frequency response is determined by the sensing element's internal gas damping.