



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA AUTÔNOMO PARA INSPEÇÕES VISUAIS
E TERMOGRÁFICAS EM SUBESTAÇÕES DE
ENERGIA ELÉTRICA

SELSON CARIAS GOMES JÚNIOR

Belo Horizonte, março de 2017

Selson Carias Gomes Junior

SISTEMA AUTÔNOMO PARA INSPEÇÕES VISUAIS E TERMOGRÁFICAS EM SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientador: Prof. Dr. Matheus Pereira Porto

UFMG

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG

Tel.: +55 31 3409.5145

E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"SISTEMA AUTÔNOMO PARA INSPEÇÕES VISUAIS E
TERMOGRÁFICAS EM SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA"**

SELSON CARIAS GOMES JUNIOR

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Energia e Sustentabilidade**".

Dissertação aprovada no dia 10 de março de 2017.

Por:

Prof. Matheus Pereira Porto
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Rudolf Huebner
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Antônio Augusto Torres Maia
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Prof. Roberto Márcio de Andrade
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

G633s Gomes Junior, Selson Carias.
Sistema autônomo para inspeções visuais e termográficas em subestações de energia elétrica [manuscrito] / Selson Carias Gomes Junior. - 2017. xvii, 96 f., enc.: il.

Orientador: Matheus Pereira Porto.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 86-96.

Bibliografia: f. 79-85.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Robôs móveis - Teses. 3. Subestações elétricas - Teses. 4. Termografia - Teses. I. Porto, Matheus Pereira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)

À minha mãe, Vera, que sempre se esforçou para que eu pudesse estudar e viver em condições melhores do que as que ela já viveu.

Que um dia exista oportunidades para que mais filhos e filhas de empregadas domésticas possam estudar nas mesmas instituições que os filhos e filhas dos patrões.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente à minha mãe, Vera, mulher forte e sensível, que sempre me ensinou o certo, e que o amor não tem limites. Ao meu padrasto Mario, pelo apoio e amizade constantes.

Ao meu orientador, Professor Matheus Porto, pela compreensão e apoio na execução deste trabalho.

Ao Professor Roberto Márcio, que sempre acreditou na minha capacidade e incentivou meu crescimento como profissional. Que nossas discussões e reflexões nunca se acabem.

Aos amigos, Flávio, Rafael, Glenda, Bruno e Willian, pelos anos de boa convivência.

A todos e todas que passaram pelo LabTerm e pelo Diglab, que possibilitaram a realização deste trabalho. Ao Anderson, do Departamento de Química, que sempre colaborou com nossas demandas. Aos amigos e amigas do Labbio e do galpão da mecânica.

À Ana, que segue junto comigo por todos os caminhos. Esta conquista é nossa.

“Vinte e sete anos contrariando a estatística”

Racionais Mc's

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	i
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	xi
SÍMBOLOS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo Geral.....	2
1.2. Objetivos Específicos	2
2. SETOR ELÉTRICO	4
2.1. Geração, transmissão e distribuição de energia	4
2.1.1. Energia Elétrica em Minas Gerais	5
2.2. Subestações de energia	5
2.3. Equipamentos das Subestações.....	7
3. TERMOGRAFIA	9
3.1. Termografia Qualitativa e Termografia Quantitativa	9
3.2. Radiação Térmica	10
3.2.1. Radiação Infravermelha.....	11
3.4. Análise de incerteza no resultado termográfico.....	13
3.4.1. Fontes de incerteza de medição na termografia.....	14
3.4.2. Incertezas intrínsecas associadas à Termografia	15
3.4.3. Incertezas extrínsecas associadas à Termografia.....	18

3.4.4.	Obtenção da incerteza padrão na medição termográfica	19
4.	MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS	21
4.1.	Manutenção	21
4.1.1.	Classificação da Manutenção	22
4.2.	Gestão de Ativos	24
4.2.1.	Estabelecendo a gestão de Ativos – PAS-55	24
5.	AUTOMATIZAÇÃO DA INSPEÇÃO	27
5.1.	Robôs de inspeção	27
5.2.	Inspeção em cabos de transmissão	29
5.3.	Inspeção em subestações	31
5.3.1.	Monitoramento em local fixo	31
5.3.2.	Robô que se move sobre cabos	32
5.3.3.	Robô que se move sobre viga H	33
5.3.4.	SmartGuard	35
5.4.	Comparação entre as soluções de monitoramento	37
6.	SISTEMA AUTÔNOMO PROPOSTO	38
6.1.	Histórico	38
6.2.	Prova de Conceito	39
6.3.	Aperfeiçoamento do Protótipo	43
6.3.1.	Estrutura de Fixação	43
6.3.2.	Conjunto de Movimentação e Chassi	45
6.3.3.	Conjunto Eletrônico	46
6.3.4.	Conjunto de Visão	48
6.4.	Sistema Autônomo de Inspeção	48
7.	METODOLOGIA DOS TESTES REALIZADOS	51

7.1.	Verificação de termocâmeras.....	51
7.2.	Testes com equipamentos de subestação.....	53
7.3.	Testes de deslocamento	57
7.4.	Programação da rotina de inspeções	58
7.4.1.	Simulação das inspeções	60
8.	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA.....	61
8.1.	Análise da incerteza da inspeção termográfica.....	61
8.1.1.	Componentes da incerteza Intrínseca	61
8.1.2.	Componentes da incerteza extrínseca.....	63
8.2.	Testes de posicionamento	68
8.3.	Inspeções simuladas.....	69
8.4.	Desempenho do Sistema.....	75
9.	CONCLUSÕES	77
9.1.	Recomendações para trabalhos futuros.....	78
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
	ANEXO A	86
	ANEXO B	87
	ANEXO C	89
	ANEXO D	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Trajetória da energia elétrica, começando na geração, passando pela transmissão e distribuição, até chegar ao consumidor. Adaptado: (ENERGIA ELÉTRICA EM FOCO, 2016).....	4
Figura 2.2 – Subestação Muiraquitã, localizada na cidade de Santarém – PA.....	6
Figura 2.3 – Rack metálico de uma subestação abrigada. Adaptado: (GRUPO SANTIN). ..	6
Figura 2.4 – Detalhe da organização dos equipamentos numa SE. Legenda: (1,12) – torre de transmissão;	7
Figura 3.1 – Inspeção termográfica em terminais de fusíveis. Adaptado: (MARANTAR ENGENHARIA).....	10
Figura 3.2 – Representação de Frederick William Herschel durante a realização de experimentos.....	11
Figura 3.3 – Espectro eletromagnético com detalhe para região do infravermelho e as faixas de interesse para a termografia. Adaptado: (SANTOS, 2006).	12
Figura 3.4 – Balanço de radiação. Adaptado: (FLIR, 2010).	13
Figura 3.5 – Comparação entre uma imagem térmica de um conector elétrico e uma imagem no visível. Fonte: (GOMES, TEIXEIRA, et al., 2011).	19
Figura 4.1 – Evolução temporal das técnicas e conceitos de manutenção. Adaptado: (LAFRAIA, 2001).	22
Figura 4.2 – Gráfico destacando o nível ótimo de realização de manutenções preventivas que diminui o custo total da manutenção. Fonte: (BWS CONSULTORIA, 2015).	23
Figura 4.3 – Classes de ativos listadas pela PAS-55.	25

Figura 4.4 – PDCA proposto pela PAS 55 para integração do sistema de gestão. Fonte: (BSI, 2008).....	26
Figura 5.1 – Robô para inspeção em cordões de solda, desenvolvido por Okamoto (2011).	27
Figura 5.2 – Imagem de um cordão de solda com a análise instantânea feita pelo robô desenvolvido por Okamoto (2011) para localização do centro do cordão de solda e correção da posição.	28
Figura 5.3 – “Pipeline pig” em teste no laboratório, fazendo uma curva de 90°. Fonte: (CHOI e RYEW, 2002).	28
Figura 5.4 – Detalhe da comunicação sem fio entre o robô e a central. Adaptado: (QI, ZHANG, et al., 2009).	29
Figura 5.5 – detalhes construtivos do LineScout. Fonte: (POULIOT e MONTAMBAULT, 2011).....	29
Figura 5.6 – Cabos partidos, corrosão e quebra na estrutura captadas pelo LineScout durante uma inspeção em campo. Fonte: (POULIOT, RICHARD e MONTAMBAULT, 2015). ...	30
Figura 5.7 – LineScout manobrando por um obstáculo. Fonte: (POULIOT e MONTAMBAULT, 2011).	30
Figura 5.8 – Proposta de Monitoramento apresentada pela FLIR®. Fonte: (FLIR, 2011). .	31
Figura 5.9 – Robô desenvolvido por Pinto (2008) se movendo sobre os cabos de aço instalados na subestação.	32
Figura 5.10 – Projeto elaborado por Pinto (2008) para a estrutura instalada na subestação para movimentação do robô.	33
Figura 5.11 – Detalhe dos componentes do robô proposto por Pinto (2008).....	33

Figura 5.12 – Vista em perspectiva do projeto de Sampaio (2014) e imagem de sua construção.....	34
Figura 5.13 – Imagens captadas pelo robô apresentado por Sampaio (2014) mostrando a configuração da região, correspondente a uma conexão elétrica, onde deve ser avaliada a temperatura média.	34
Figura 5.14 – Modelos do robô SmartGuard. Fonte: (LI, WANG e LI, 2013).	35
Figura 5.15 – Itens que compõem o SmartGuard. Adaptado de (WANG, GUO, et al., 2011).	36
Figura 5.16 – Imagens registradas e analisadas pelas câmeras do SmartGuard. Fonte: (WANG, GUO, et al., 2011).....	36
Figura 6.1 – Monitoramento Autônomo para Para-Raios, desenvolvido por Silvino & Peterson (2010).....	38
Figura 6.2 – Modelo tridimensional da plataforma de movimentação do protótipo. Fonte: Arquivo LabTerm.	40
Figura 6.3 – Esquemático do conjunto eletrônico embarcado no protótipo. Adaptado de (URSINE, 2013).	40
Figura 6.4 – Modelo tridimensional finalizado, e suas principais medidas (em mm). Fonte: Arquivo LabTerm.	41
Figura 6.5 – Protótipo realizando testes de inspeção. Fonte: (CALADO, 2013).	41
Figura 6.6 – Percurso de testes com sessão reta de 6 m e curva de 1,25 m de raio. Adaptado de (CALADO, 2013)	42

Figura 6.7 – Imagens registradas durante os testes com o protótipo. As imagens da direita mostram a sobreposição das imagens termográficas sobre as imagens digitais dos equipamentos utilizados nos testes. Adaptado de (CALADO, 2013).	42
Figura 6.8 – Blocos que compõem o Sistema Autônomo de Inspeção.	43
Figura 6.9 – Esboço da estrutura de fixação e movimentação do sistema. Fonte: Arquivo LabTerm.	44
Figura 6.10 – Projeto final da estrutura de fixação. Fonte: Arquivos LabTerm.....	44
Figura 6.11 – Conjunto de Movimentação, com detalhe dos itens do truck motor e do truck de condução. Fonte: Arquivos LabTerm.	45
Figura 6.12 – Conjunto de movimentação, chassi e Pan/Tilt montados. Fonte: Arquivos LabTerm.	46
Figura 6.13 – Configuração do conjunto de controle. Fonte: Arquivos LabTerm.	47
Figura 6.14 – A unidade de inspeção se comunica com a subestação, e esta permite ao centro de controle acessar todo o sistema, através da internet ou da rede interna. Fonte: Arquivos LabTerm.	48
Figura 6.15 – Câmera termográfica Flir A315 e câmera IP, da marca Onvif, que compõem o conjunto de visão. Fonte: (FLIR, 2016).	48
Figura 6.16 – Medidas do robô, em mm e imagem do projeto finalizado. Fonte: Arquivo LabTerm.	49
Figura 6.17 – Projeto virtual finalizado do Sistema Autônomo de Inspeção. Fonte: Arquivo LabTerm.	50

Figura 6.18 – Versão final do Sistema Autônomo de Inspeção construído e instalado no Laboratório de Termometria da UFMG, onde foram realizados os testes de validação. Fonte: Arquivo LabTerm.	50
Figura 7.1 – Bancada para verificação de termocâmeras mostrando as termocâmeras Flir® SC660 e Flir® A315, e o corpo negro FLUKE 418. Fonte: (SILVA, 2015).	52
Figura 7.2 – Termogramas registrados pela SC660 durante a verificação. Em cada imagem, o corpo negro ocupa uma área diferente, para garantir a ampla verificação dos pixels da matriz de sensores. Adaptado: (SILVA, 2015).....	53
Figura 7.3 – Bancada de testes de circulação de corrente montada com uma chave seccionadora.	54
Figura 7.4 – Equipamentos utilizados nos ensaios de corrente. À esquerda, chave seccionadora antiga. Ao centro, chave seccionadora nova. À direita, conexão H. Adaptado de (SILVA, 2015).	54
Figura 7.5 - Esquemático do posicionamento das câmeras durante as inspeções	55
Figura 7.6 – Fluxograma com o esquema de execução dos testes de corrente. A primeira coluna se refere a preparação da estrutura, a segunda e a terceira coluna se refere ao registro das imagens. O caminho preto se refere aos níveis de corrente elétrica testados.....	56
Figura 7.7 – Cenário montado no LabTerm para execução das inspeções. A esquerda o robô sobre os trilhos afixados na parede, com a bancada de testes de corrente ao fundo e os para-raios montados a esquerda.....	58
Figura 7.8 – Tela de controle de movimentação do veículo e posicionamento do Pan/Tilt.	59
Figura 7.9 – Reconhecimento do ativo, com a área selecionada para obtenção das temperaturas.....	60

Figura 8.1 – Interface utilizada para captação das imagens do conjunto de visão.	63
Figura 8.2 - Imagens da conexão H registrados da posição 1. À esquerda, a imagem registrada pela SC660 e à direita, as imagens registradas pela A315.	64
Figura 8.3 - Imagens da chave seccionadora nova registradas da posição 2. À esquerda, a imagem registrada pela SC660 e à direita, as imagens registradas pela A315.....	64
Figura 8.4 –Imagens da chave seccionadora antiga registradas da posição 3. À esquerda, a imagem registrada pela SC660 e à direita, as imagens registradas pela A315.....	65
Figura 8.5 – Indicações da temperatura máxima e incerteza para a chave seccionadora usada com circulação de corrente de 500 A.	66
Figura 8.6 – Indicações da temperatura máxima e incerteza para a chave seccionadora nova com circulação de corrente de 500 A.	66
Figura 8.7 – Indicações da temperatura máxima e incerteza para a conexão H com corrente de 200 A.	67
Figura 8.8 – Erro percentual relativo em função dos deslocamentos.	69
Figura 8.9 – Primeiro ponto de inspeção englobando toda a chave seccionadora usada.	70
Figura 8.10 – Segundo ponto de inspeção na chave seccionadora usada, focando no ponto de contato.	71
Figura 8.11 – Terceiro ponto de inspeção, focando no para-raios central.....	71
Figura 8.12 – Primeiro ponto de inspeção englobando toda a chave seccionadora nova.....	72
Figura 8.13 – Segundo ponto de inspeção na chave seccionadora nova, focando na conexão com o cabo.....	72
Figura 8.14 – Terceiro ponto de inspeção desta rotina, focando no para-raios central.	73
Figura 8.15 – Primeiro ponto de inspeção englobando a conexão H.	73

Figura 8.16 – Segundo ponto de inspeção englobando, focando na conexão com o cabo... 74

Figura 8.17 – Terceiro ponto da inspeção, focando no para-raios central..... 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 5-1 – Quadro com as principais características dos sistemas apresentados na seção 5.3.	37
Tabela 7-1 – Características das termocâmeras. Fonte: (FLIR, 2010) (FLIR, 2016).	51
Tabela 7-2 – Distâncias das termocâmeras ao equipamento inspecionado.	55
Tabela 7-3 – Valores de Emissividade obtidos.	57
Tabela 7-4 – Posições definidas sobre os trilhos.	57
Tabela 8-1 – Valores do Mínimo Erro médio para cada termocâmera. Adaptado de (SILVA, 2015).	61
Tabela 8-2 – Incerteza associada a DTR. Adaptado de (SILVA, 2015).	62
Tabela 8-3 – Repetitividade das temperaturas analisadas. Adaptado de (SILVA, 2015). ...	62
Tabela 8-4 – Valores adotados para a Uniformidade de Medição. Adaptado de (SILVA, 2015).	63
Tabela 8-5 – Valores de NGE obtidos nos manuais das termocâmeras. Fonte: (FLIR, 2016).	63
Tabela 8-6 – Valores das faixas de incerteza dos componentes da incerteza extrínseca utilizadas nos cálculos da incerteza do resultado das inspeções termográficas.	65
Tabela 8-7 – Indicações de temperatura e faixas de incerteza obtidas após a análise do resultado das inspeções termográficas realizadas durante os testes de corrente elétrica.	67
Tabela 8-8 – Valores percentuais relativos da incerteza de medição considerando os valores apresentados na Tabela 8-7.	68

SÍMBOLOS

Letras Latinas

A	Área [m ²]
c	Coefficiente de sensibilidade
d	Distância [m]
E	Poder emissivo [W/m ² .µm]
E_b	Poder emissivo do corpo negro [W/m ² .µm]
G	Irradiância [W/m ² .µm]
I	Corrente elétrica [A]
k	Número de bits do conversor A/D da termocâmara
P	Potência [W]
r	Coefficiente de correlação
R	Resistência elétrica [Ω]
Re	Número de Reynolds [adimensional]
S	Sinal eletrônico gerado pelo sensor
T	Temperatura [K]
u	Incerteza padrão combinada
W	Radiação [J]

Letras Gregas

ε	Emissividade [adimensional]
τ	Transmissividade [adimensional]
α	Absortividade [adimensional]
ρ	Refletividade [adimensional]

σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$]
λ	Comprimento de onda [m]

Subscritos

<i>ob</i>	Referente ao objeto
<i>padrão</i>	Referente ao padrão de medida
<i>atm</i>	Referente à atmosfera
<i>refl</i>	Referente a reflexão da radiação do ambiente
<i>int</i>	Referente aos parâmetros intrínsecos
<i>span</i>	Referente à amplitude de temperatura

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
PPGMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
BIG	Banco de Informações de Geração
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
EIA	U.S. Energy Information Administration
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SEs	Subestações de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
END	Ensaios Não Destrutivos
NDTE	Non Destructive Thermal Evaluation
MWIR	Mid-Wave Infrared
LWIR	Long-Wave Infrared
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
MMC	Método de Monte Carlo
ME	Mínimo Erro
RE	Repetitividade
KPI	Key Performance Indicator
IAM	Institute of Asset Management
PAS	Publicly Available Specification
BSI	British Standards Institution
PDCA	Plan, Do, Check, Action
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento

LabTerm	Laboratório de Termometria da UFMG
DigLab	Laboratório de Digitalização da UFMG
DTR	Resolução Digital da Temperatura
UM	Uniformidade da medição
NGE	Erro gerado pelo ruído
NETD	Noise Equivalent Temperatura Difference

RESUMO

Para garantir o fornecimento de energia elétrica, as concessionárias de energia devem manter seus ativos físicos operando de forma satisfatória e eficiente. Para verificação das condições operacionais destes ativos, são realizadas inspeções termográficas periódicas, monitorando a temperatura superficial dos equipamentos e identificando condições irregulares de operação. Por motivos financeiros e técnicos, estas inspeções podem não ocorrer na frequência adequada para garantir a detecção de anomalias no funcionamento dos equipamentos. Como as inspeções são basicamente manuais, existem ainda fatores limitantes relativos a padronização das inspeções e dos resultados obtidos. Com o objetivo de apresentar uma alternativa a esta situação, este trabalho traz o detalhamento do projeto de um sistema autônomo de inspeções termográficas, suas características construtivas, e os resultados dos testes de validação da proposta. Este sistema utiliza trilhos instalados na subestação para se movimentar, e realiza inspeções termográficas e visuais nos componentes, de forma programada e autônoma, com padronização das informações coletadas e aumentando significativamente a frequência das inspeções executadas. Os testes realizados apontaram que o sistema cumpre com as condições propostas para sua construção. Todos os dados são transmitidos pelos trilhos, assim como a energia elétrica necessária para o funcionamento. Os testes de deslocamento apontam um erro máximo de 6% nas posições de parada de inspeção. As incertezas associadas ao resultado da inspeção termográfica tem baixa variação, sendo mais elevadas em componentes com emissividade menores. A comparação com inspeções manuais mostra que o sistema tem desempenho satisfatório, credenciando-o como uma possível alternativa para o monitoramento de equipamentos de subestações de energia.

Palavras Chaves: *termografia, inspeção autônoma, robô móvel, subestações, monitoramento autônomo.*

ABSTRACT

To ensure the supply of electricity it is essential for utilities to maintain full operation of its assets, efficiently and optimally. To evaluate the operating conditions of the power substations' assets, thermographic inspections occur periodically, monitoring equipment's surface temperature looking for irregular operating conditions. Due to a number of factors, sometimes the frequency of inspections is less than adequate to ensure the detection of anomalies at the asset. Moreover, as all manual activity, it is difficult to standardize the execution, making room for failure. In order to present an alternative to these questions, this work detail the project, construction characteristics and laboratory validation of an autonomous system of thermal and visual inspection for electrical substations. This system moves on rails and performs scheduled inspections autonomously and collects information about the operating conditions of the assets in a standardized manner, significantly increasing the number of inspections of equipment. The tests showed that the system complies with the conditions proposed for its construction. All data is transmitted by the rails, as well as the electrical energy required for operation. The displacement tests indicate a maximum error of 6% in the inspection stop positions. The uncertainties associated to the thermographic inspection result have low variation, being higher in components with lower emissivity. The comparison with manual inspections shows that autonomous inspections performed by the system have satisfactory performance, accrediting the system as a solution to the problem of monitoring substation's assets.

Keywords: *thermography, autonomous inspection, mobile robot, substation, autonomous monitoring.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil figura entre os dez maiores consumidores de energia elétrica do mundo. O desenvolvimento do setor elétrico é um tema fundamental nas discussões sobre crescimento do país. A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, responsável pela regulação do setor, pressiona as concessionárias para que sejam mais eficientes na entrega da energia, reduzindo custos e perdas. A remuneração das concessionárias leva em conta o tamanho do parque instalado de ativos e custos associados a manutenção.

Para garantir uma operação lucrativa e satisfazer as expectativas dos *interessados*, as agências buscam obter o melhor desempenho possível dos ativos, com estratégias para prolongamento da vida útil, reduzindo intervenções e substituições. Neste contexto, toda informação referente ao estado de funcionamento dos equipamentos é valiosa, e a termografia, técnica de monitoramento da temperatura superficial dos corpos, pode ser utilizada de forma eficiente e confiável para obtenção de informações pela equipe técnica.

A termografia é utilizada na inspeção dos ativos do setor elétrico associada a critérios de comparação da temperatura superficial. Normalmente, esta temperatura é comparada a temperatura ambiente e a temperatura de um componente idêntico, operando em condições semelhantes de funcionamento. Dependendo dos valores das diferenças das temperaturas encontradas são feitas recomendações à equipe de manutenção, como inspecionar novamente o ativo dentro de 90 dias, ou sua substituição imediata.

Devido a fatores como número limitado de inspetores, custos, alta demanda de serviços, nem sempre estas inspeções são feitas nos prazos corretos, prejudicando a identificação na alteração dos padrões de operação dos equipamentos. Diante deste cenário, alternativas para automação das inspeções termográficas têm sido propostas com o objetivo de aumentar a frequência das inspeções, criação de um histórico das informações de funcionamento dos ativos, padronização das inspeções e do registro de dados, que resultam no aumento da confiabilidade dos resultados e da tomada de decisão pelo gestor, melhorando a eficiência da estrutura e a redução de custos.

Com os avanços tecnológicos, a utilização de robôs para inspeções no setor elétrico tem se mostrado uma tendência. O LineScout, por exemplo, é utilizado para inspeções em

cabos de transmissão. Utilizando roldanas e articulações, o robô consegue se mover pelos cabos enquanto realiza inspeções visuais e termográficas (POULIOT, RICHARD e MONTAMBAULT, 2015). Para inspeções em subestações, existem robôs que se movem sob cabos de aço instalados ao lado da subestação, como desenvolvido pela USP (PINTO, MASUDA, *et al.*, 2008). O SmartGuard, desenvolvido por um grupo de pesquisa associado ao *Shandong Electric Power Research Institute*, é um robô autônomo de inspeção que circula sobre trechos pavimentados da subestação. O projeto já apresentou várias atualizações, e está presente em várias subestações chinesas (WANG, GUO, *et al.*, 2011).

Diferente dos demais robôs citados, este trabalho apresenta características do projeto, da construção e da validação em laboratório de um robô autônomo para inspeções termográficas em equipamentos de subestações elétricas. O robô se move sobre trilhos instalados dentro da subestação, não interferindo na circulação de pessoas e veículos, e fica mais próximo dos componentes, melhorando o alcance da inspeção. Os trilhos são utilizados como meio para transmissão dos dados, comunicação com o sistema e condução da energia elétrica.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma solução para automação das inspeções termográficas nas subestações de energia elétrica. Este trabalho foi desenvolvido no contexto do P&D 426, realizado a partir da parceria entre a UFMG e a CEMIG-D.

1.2. Objetivos Específicos

- Apresentar a evolução do projeto do sistema autônomo de inspeção, detalhando as fases que levaram ao estado atual;
- Discutir as características do Sistema Autônomo de Inspeção, os aspectos construtivos, detalhando os conjuntos que o compõem, as características de funcionamento e a validação em laboratório, a partir dos testes de inspeção;

- Abordar os aspectos relacionados a incerteza do resultado de medição termográfica, comparando os resultados das inspeções feita pelo Sistema Autônomo de Inspeção e inspeções manuais.

2. SETOR ELÉTRICO

2.1. Geração, transmissão e distribuição de energia

Ao longo do ano de 2014, o Brasil consumiu aproximadamente 475.334 GWh de energia elétrica (EPE, 2015), deixando o país em 9º na classificação mundial (EIA, 2016), sendo o Setor Industrial o responsável por 38% deste consumo.

No Brasil, as tensões das linhas de transmissão ficam entre 230 kV e 750 kV quando saem das usinas geradoras até chegarem as subestações de energia - SEs de distribuição, que abaixam a tensão para níveis entre 50 kV e 230 kV e alimentam as redes de distribuição que, finalmente, entregam a energia ao consumidor (ABRADEE, 2012). As distribuidoras de energia elétrica são responsáveis por garantir o fornecimento de energia aos consumidores. No consumidor residencial, a tensão pode ser de 110 V ou 220 V. Para alguns consumidores industriais, as linhas operam com tensões entre 2,3 kV e 88 kV. A Figura 2.1 ilustra a interligação entre as fases de geração, transmissão e distribuição de energia.

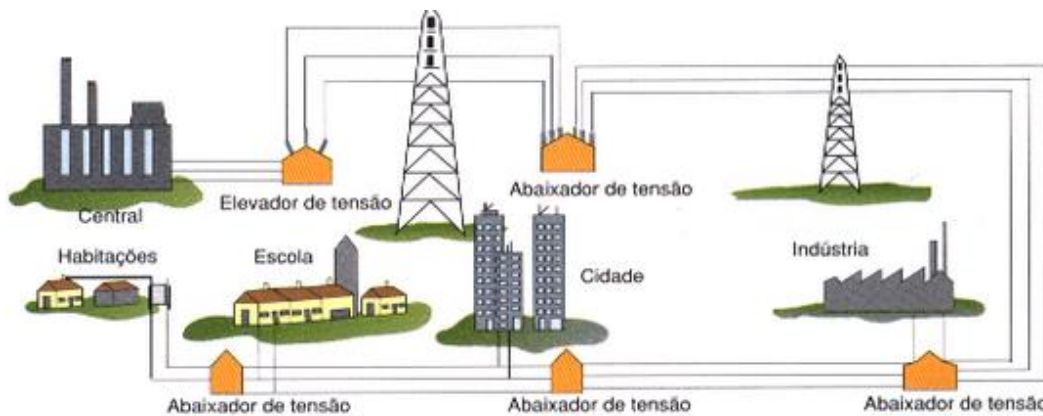


Figura 2.1 – Trajetória da energia elétrica, começando na geração, passando pela transmissão e distribuição, até chegar ao consumidor. Adaptado: (ENERGIA ELÉTRICA EM FOCO, 2016).

2.1.1. Energia Elétrica em Minas Gerais

A Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG é a responsável pelo gerenciamento das questões relativas à geração, distribuição e transmissão de energia elétrica no estado. Conforme os dados do Relatório de Sustentabilidade de 2014 a CEMIG tem 70 usinas em operação, resultando em uma capacidade de geração de 7.717 MW, dos quais 7361 MW, ou 95,39%, são gerados por usinas hidroelétricas, e 491.848 km de linhas de transmissão, subtransmissão e distribuição (CEMIG, 2014). Em Minas Gerais, haviam 391 subestações de energia, de acordo com levantamento dos dados de 2012. A maior parte das subestações do estado, e do país, são instaladas a céu aberto (CEMIG, 2013).

2.2. Subestações de energia

As linhas de transmissão operam com tensões diferentes de acordo com os pontos de interligação. Isto é necessário para minimizar as perdas devido ao aquecimento dos condutores e conexões por efeito Joule, descrito na Equação 2.1. A Potência (P) gerada no processo é proporcional ao quadrado da corrente. Quanto menor o valor desta variável, menores serão as perdas devido a este fenômeno.

$$P = R \cdot I^2 \quad (\text{Eq. 2.1})$$

As mudanças nos níveis de tensão são feitas nas Subestações de Energia (SEs), que podem ser SEs elevadoras ou abaixadoras de tensão, de acordo com a necessidade. As SEs elevadoras normalmente estão interligadas as saídas das usinas geradoras. Seu papel de elevar as tensões à níveis de transmissão e subtransmissão tem o objetivo de reduzir o valor da corrente que circula pelos cabos condutores, permitindo a utilização de condutores de menor diâmetro. As SEs abaixadoras estão próximas aos pontos de maior consumo de energia. Reduzir o nível de tensão é importante para segurança dos consumidores e evitar interferências eletromagnéticas (MUZY, 2012).

A Figura 2.2 mostra uma subestação à céu aberto. Este tipo de SEs são instaladas em locais amplos, ao ar livre, ficando expostas ao ambiente. As SEs do tipo abrigadas são

instaladas em construções apropriadas, edificações ou construções subterrâneas. Alguns equipamentos das SEs abrigadas são instalados em cabines, conforme a Figura 2.3, que garantem o isolamento e a segurança necessária aos mantenedores da estrutura (MUZY, 2012). Por ocuparem menos espaço físico, e permitir que sejam instaladas em edifícios, as subestações abrigadas têm se tornado o principal modelo para as novas instalações.



Figura 2.2 – Subestação Muiraquitã, localizada na cidade de Santarém – PA.

Fonte: (GAZETA DE SANTARÉM).



Figura 2.3 – Rack metálico de uma subestação abrigada. Adaptado: (GRUPO SANTIN).

2.3. Equipamentos das Subestações

A Figura 2.4 ilustra a disposição dos equipamentos dentro de uma subestação. O transformador é um dos equipamentos principais, além de ser um dos mais valiosos dentro da subestação, pois é o responsável efetivo pela elevação ou redução da tensão. Para operações de manutenção, ou desligamento de um conjunto de equipamentos, podem ser utilizadas as chaves seccionadoras e os disjuntores. Para proteção das SEs existem, além dos disjuntores, os para-raios e o cabo guarda. Existem alguns equipamentos auxiliares, como os medidores de corrente e tensão, que monitoram o funcionamento das SEs. Cabos condutores e conexões levam a energia de um ponto a outro (ABRADEE, 2012).

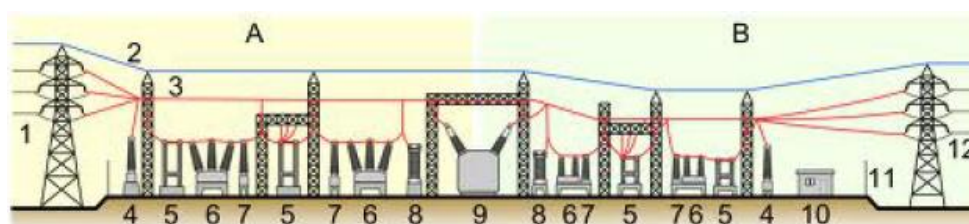


Figura 2.4 – Detalhe da organização dos equipamentos numa SE. Legenda: (1,12) – torre de transmissão; (2) – cabo guarda; (3) - cabos condutores; (4) – para-raios; (5) chave seccionadora; (6) – disjuntores; (7) – medidor de corrente; (8) – medidor de tensão; (9) – transformador; (10) sala de controle; (11) cerca. Fonte: (ABRADEE, 2012).

Transformadores, conexões, chaves seccionadoras, para-raios, e cabos condutores estão entre os itens mais visados pelas equipes de manutenção das SEs, pois são componentes que desempenham papéis fundamentais. Uma falha em um destes componentes pode gerar interrupção no fornecimento de energia e a concessionária pode ser penalizada.

2.3.1. Inspeção em equipamentos de subestação

Inspeções são realizadas para que se possa avaliar o estado geral de um determinado componente. Em subestações são realizadas periodicamente inspeções visuais e termográficas. As inspeções visuais buscam por sujeiras, corpos estranhos, como pipas ou galhos de árvores que ficam presos aos equipamentos, e demais não-conformidades.

As inspeções termográficas buscam avaliar o estado de funcionamento dos equipamentos, por meio da medição e comparação das temperaturas superficiais apresentadas. No setor elétrico, a temperatura dos equipamentos é uma informação chave. Alterações na temperatura podem estar diretamente associadas ao funcionamento inadequado dos equipamentos, devido a circulação de corrente e sua relação com o efeito Joule. Em conexões, cabos e chaves seccionadoras, por exemplo, temperaturas superficiais relativamente elevadas em relação à temperatura ambiente indicam que estes componentes estão dissipando muita energia. Caso não estejam operando com correntes elétricas elevadas, este fato pode ser sinal de degradação, que leva ao aumento da resistência elétrica.

Nas inspeções termográficas em subestações, é comum a busca pelos chamados “pontos quentes”, que ocorrem quando são registradas temperaturas elevadas em componentes. Como estes pontos destoam visualmente, são identificados com certa facilidade e exigem certa atenção da equipe de manutenção. De acordo com Diniz, *“a termografia se tornou praticamente a única técnica de predição de manutenção em grande parte dos equipamentos, com periodicidade variando de trimestral a semestral”* (DINIZ, 2013).

3. TERMOGRAFIA

Conhecer a distribuição de temperatura da superfície dos corpos é importante para se construir um diagnóstico amplo. Obter este dado térmico sem a necessidade de contato direto com o alvo é uma condição desejável no monitoramento em diversos tipos de aplicações. Com o avanço tecnológico, vários sistemas de aquisição de dados têm se tornado mais acessíveis do ponto de vista econômico, favorecendo a difusão de técnicas mais eficientes em várias áreas. Comumente utilizada em inspeções industriais e aplicações científicas, a termografia atende estas características e vem sendo cada vez mais utilizada fora da área industrial, como na manutenção de prédios e no auxílio a identificação de doenças (CHRZANOWSKI, 2010).

A Termografia é uma técnica de avaliação da temperatura superficial de um determinado objeto sem a necessidade de contato físico. A NBR 15424, de 2006, classifica o método como um tipo de Ensaio Não Destrutivo e define Termografia como uma técnica de sensoriamento remoto que permite a obtenção de imagens térmicas de componentes, equipamentos ou processos, a partir da radiação infravermelha emitida pelos corpos, proporcionalmente a sua temperatura (ABNT, 2006). Termografia também pode ser definida como Ensaio Térmico Não Destrutivo (NDTE – Non Destructive Thermal Evaluation). É importante ressaltar que a Termografia ocorre pela captação da radiação infravermelha por uma termocâmera, ou termovisor, e não pela medição direta de temperatura.

3.1. Termografia Qualitativa e Termografia Quantitativa

Análises termográficas meramente visuais, geralmente comparativas, em uma inspeção termográfica, sem preocupação com os valores da temperatura apresentadas pelo termovisor, e sim com a distribuição desta temperatura, é o que se chama de Termografia Qualitativa. Visa a busca por regiões de uma superfície, ou componentes de um processo, que destoam visualmente do restante do cenário, e que possam indicar uma condição de funcionamento inadequado (KOMINSKY, LUCKINO e MARTIN, 2006). Em sistemas

elétricos, normalmente, um “ponto quente” pode ser um elemento em condições improprias, conforme exemplo da Figura 3.1. Não é necessário conhecer muitas informações dos equipamentos inspecionados, a avaliação qualitativa comparativa é suficiente para apontar o aquecimento fora do padrão no conector da esquerda.



Figura 3.1 – Inspeção termográfica em terminais de fusíveis. Adaptado: (MARANTAR ENGENHARIA).

A Termografia Quantitativa diz respeito à uma análise mais criteriosa dos resultados de uma inspeção termográfica. Informações sobre o ambiente onde ocorre a inspeção, como temperatura ambiente e umidade, devem ser registrados, assim como devem ser conhecidas algumas características a respeito do objeto, como emissividade e condições gerais da superfície. Todos estes dados são considerados com o intuito de ser conhecer os detalhes do resultado da medição, o valor da temperatura e sua incerteza, a classificação da seriedade das anomalias, e outros aspectos relevantes.

3.2. Radiação Térmica

Todos os corpos com temperatura superiores ao zero absoluto, 0 K , emitem radiação térmica, com comprimento de onda entre $\lambda = 0,1\ \mu\text{m}$ até $\lambda = 100\ \mu\text{m}$. Existem duas teorias para explicação da propagação da radiação: a teoria de Maxwell e a teoria de Planck. A teoria de Maxwell, utilizada para predição das propriedades de radiação de materiais, assume que a radiação térmica emitida se comporta como ondas eletromagnéticas, enquanto a teoria de Planck afirma que a radiação são fótons ou quantas de energia, e é utilizada para estimar a quantidade de energia emitida por um corpo em função de sua temperatura (OZISICK, 1985).

3.2.1. Radiação Infravermelha

Em 1800, Frederick William Herschel, mostrado na Figura 3.2, astrônomo alemão erradicado na Inglaterra, buscava compreender algumas das propriedades da luz solar, especificamente se as cores refratadas pelo prisma tinham temperaturas diferentes. Com o auxílio de um prisma e de termômetros de bulbo, Herschel fez medições comparativas das temperaturas das cores e observou que, partindo da cor violeta e indo até a cor vermelha, a temperatura aumentava. Com isso, Herschel acabou medindo também a temperatura na região logo após a cor vermelha, e registrou um valor de temperatura maior do que quando fez a medição nas cores visíveis, e atribuiu este fenômeno à presença de “raios caloríficos”. Após executar outros experimentos, Herschel constatou que estes “raios caloríficos” se comportavam como as outras formas de radiação conhecidas, sendo refletidos, absorvidos, refratados e transmitidos. Posteriormente, este tipo de radiação foi chamada de radiação infravermelha (CALTECH). A radiação infravermelha ocupa a faixa entre $\lambda = 0,78 \mu\text{m}$ até $\lambda = 1000 \mu\text{m}$.

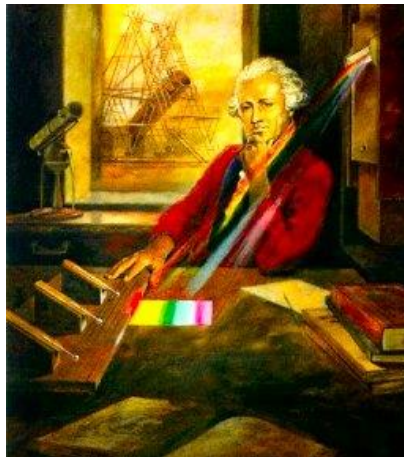


Figura 3.2 – Representação de Frederick William Herschel durante a realização de experimentos.

Fonte: (CALTECH).

Para a Termografia, o interesse principal se concentra nas faixas entre $\lambda = 3 \mu\text{m}$ até $\lambda = 5 \mu\text{m}$, compreendida pela subdivisão *Mid-Wave Infrared*- MWIR (infravermelho de ondas médias), e de $\lambda = 7 \mu\text{m}$ até $\lambda = 14 \mu\text{m}$, compreendida pela subdivisão *Long-Wave Infrared* - LWIR (infravermelho de ondas longas), conforme mostrado na Figura 3.3. Para fins de

esclarecimentos, existem outras propostas de divisões e subdivisões do espectro infravermelho (CHRZANOWSKI, 2010) (TEIXEIRA, 2012), o que pode gerar alguma confusão quanto a classificação.

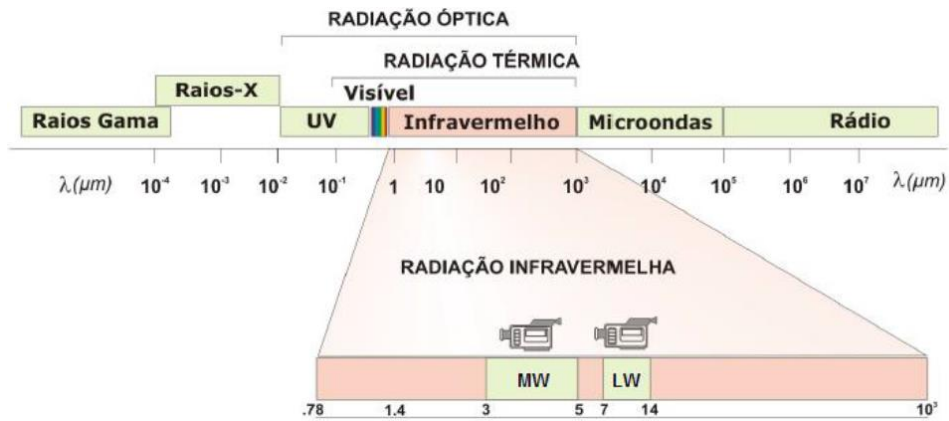


Figura 3.3 – Espectro eletromagnético com detalhe para região do infravermelho e as faixas de interesse para a termografia. Adaptado: (SANTOS, 2006).

3.3. Balanço da radiação infravermelha

Em uma inspeção termográfica, todo o ambiente exerce sua influência na radiação captada pela termocâmera. O objeto alvo emite radiação, que é função de sua temperatura, e reflete parte da radiação que incide sobre ele. Quando existem muitas fontes de calor no ambiente onde será realizada a termografia, a influência será mais alta quanto maior for a temperatura destas fontes. Em ambientes abertos, a influência da radiação solar deve ser avaliada com cuidado. A Figura 3.4 ilustra as parcelas a serem consideradas no balanço de radiação.

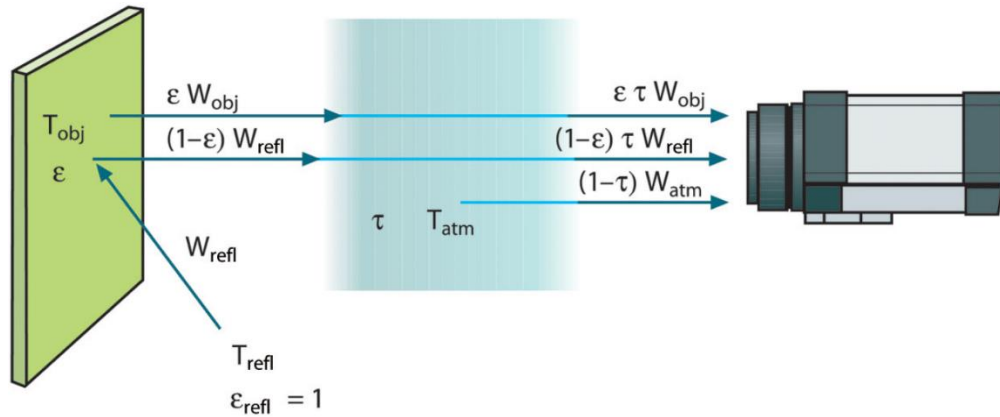


Figura 3.4 – Balanço de radiação. Adaptado: (FLIR, 2010).

Assim, a Equação 3.1 quantifica a radiação que chega (W_{tot}) nos sensores da termocâmara, considerando a parcela emitida pelo objeto (W_{obj}), a parcela de radiação que é refletida pelo objeto (W_{refl}), e a parcela que é emitida pela atmosfera (W_{atm}).

$$W_{tot} = \epsilon \tau W_{obj} + (1 - \epsilon) \tau W_{refl} + (1 - \tau) W_{atm} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde:

ϵ : emissividade;

τ : transmissividade;

W_{tot} : radiação total que chega a termocâmara [J];

W_{obj} : parcela de radiação emitida pelo objeto [J];

W_{refl} : parcela de radiação refletida pelo objeto [J];

W_{atm} : parcela de radiação emitida pela atmosfera [J].

3.4. Análise de incerteza no resultado termográfico

Para descrever um fenômeno ou processo físico de forma clara é importante expressar a intensidade das grandezas envolvidas. A melhor maneira de fazer isto é utilizando números provenientes da medição destas grandezas. Em 1883, Lord Kelvin declarou: “*O conhecimento amplo e satisfatório sobre um processo ou um fenômeno somente existirá quando for possível medi-lo e expressá-lo por meio de números*”. Entende-se que medir é a

maneira pela qual se obtêm o valor de uma determinada grandeza física (mensurando), sendo que este valor deve estar atrelado à um padrão reconhecido internacionalmente (ALBERTAZZI G. JR. e SOUZA, 2008).

O processo de medição inclui o mensurando, o sistema de medição, o operador, o procedimento e as condições ambientais. A medição fornece uma indicação, um número que não considera possíveis erros. Estes erros podem ser estimados se calcularmos a incerteza da medição. O resultado de medição, descrito na Equação 3.2, é a faixa de valores na qual o valor verdadeiro da grandeza medida pode ser encontrado (ALBERTAZZI G. JR. e SOUZA, 2008). Para se medir com qualidade, todos estes aspectos devem ser considerados.

$$\text{Resultado de Medição} = (\text{indicação} \pm \text{incerteza})[\text{unidade}] \quad (\text{Eq. 3.2})$$

3.4.1. Fontes de incerteza de medição na termografia

As fontes de incertezas podem ser classificadas como intrínsecas, que se referem as características construtivas da termocâmara e nem sempre podem ser corrigidas, e extrínsecas (ou externas), que se referem as incertezas inerentes ao monitoramento das condições ambientais da medição e dos parâmetros físicos. A temperatura do objeto indicada pela termocâmara relaciona todas estas grandezas, conforme a Equação 3.3.

$$T_{ob} = f(\varepsilon, d, T_{ref}, T_{atm}, S) [K] \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Onde:

T_{ob} : Temperatura do objeto indicada pela termocâmara;

ε : emissividade;

d : distância;

T_{ref} : temperatura refletida;

T_{atm} : temperatura atmosférica;

S : sinal eletrônico gerado pelo sensor.

3.4.2. Incertezas intrínsecas associadas à Termografia

As incertezas intrínsecas se referem as variações relacionadas à eletrônica da termocâmara, e representa a incerteza associada ao termo S da Equação 3.3. Para quantificá-lo é necessário estimar os valores dos componentes citados nesta seção. Mais detalhes sobre o processo para obtenção de incertezas intrínsecas podem ser consultados em (TAVARES, 2006) (CHRZANOWSKI, 2001).

O Mínimo Erro – ME representa a dispersão da temperatura medida pelo termovisor em relação ao mensurando analisado. A média de n indicações de ME pode ser calculada pela diferença entre a temperatura média indicada pelo padrão, que pode ser um corpo negro, e pela termocâmara, como mostrado na Equação 3.4, e o desvio padrão, considerado com distribuição retangular, dado pela Equação 3.5.

$$\overline{ME} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\overline{T}_{padr\tilde{a}o,i} - \overline{T}_{obj,i}] \quad (\text{Eq. 3.4})$$

$$s_{ME}(\overline{T}_{obj}) = \frac{\overline{ME}}{\sqrt{12}} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Onde:

$\overline{T}_{padr\tilde{a}o,i}$: temperatura média indicada pelo padrão;

$\overline{T}_{obj,i}$: temperatura média indicada pela termocâmara;

s_{ME} : desvio padrão da ME ;

\overline{T}_{obj} : média das temperaturas indicadas pela termocâmara.

A Repetitividade, RE , se refere a precisão da medição em condições idênticas. O cálculo é feito pelo desvio padrão da média, em n indicações da temperatura do mensurando, conforme a Equação 3.6 e a Equação 3.7, que deve estar nas mesmas condições de quando foi calculado o ME (TEIXEIRA, 2012).

$$S_{RE}(\bar{T}_{obj}) = \frac{S_{RE}(T_{obj})}{\sqrt{n}} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

$$S_{RE}(T_{obj}) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_{obj} - \bar{T}_{obj})^2} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Onde:

S_{RE} : desvio padrão da RE;

T_{obj} : temperatura indicada pela termocâmara;

\bar{T}_{obj} : média das temperaturas indicadas pela termocâmara.

De caráter amplamente intrínseco, a Resolução Digital da Temperatura – DTR , representa a menor diferença entre duas indicações diferentes de temperatura em um corpo negro que podem ser captadas pela termocâmara. Depende fortemente dos blocos eletrônicos, cujas informações não são facilmente fornecidas pelo fabricante, mas a DTR pode ser estimada pela Equação 3.8, e o desvio padrão, considerado com distribuição retangular, dado pela Equação 3.9.

$$DTR = \frac{\Delta T_{span}}{2^k} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

$$S_{DTR}(\bar{T}_{obj}) = \frac{DTR}{\sqrt{12}} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Onde:

ΔT_{span} : amplitude de temperatura da termocâmara;

k : número de bits do conversor A/D da termocâmara;

S_{DTR} : desvio padrão da DTR;

\bar{T}_{obj} : média das temperaturas indicadas pela termocâmara.

A Uniformidade de Medição – UM , é a faixa de indicações da temperatura do corpo negro em diferentes posições do campo de visão da termocâmara, sendo as temperaturas máximas e mínimas as informações utilizadas para determinação do UM . A Equação 3.10 é utilizada para obtenção da UM , e o desvio padrão, considerado com distribuição retangular, é dado pela Equação 3.11.

$$UM = \delta_T = \bar{T}_{max} - \bar{T}_{min} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

$$s_{UM}(\bar{T}_{obj}) = \frac{\delta_T}{\sqrt{12}} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

Onde:

δ_T : sensibilidade para um campo de visão não uniforme;

\bar{T}_{max} : média das indicações de temperatura máxima;

\bar{T}_{min} : média das indicações de temperatura mínima;

s_{UM} : desvio padrão da UM ;

\bar{T}_{obj} : média das temperaturas indicadas pela termocâmara.

Utilizando as orientações do GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (JCGM, 2008), e de posse dos parâmetros para quantificação dos elementos das incertezas, e outros que podem ser obtidos nos manuais das termocâmeras, é possível obter uma expressão que considera a incerteza padrão combinada intrínseca total, dada pela Equação 3.12.

$$u_{int} = \sqrt{s_{UM}^2(\bar{T}_{obj}) + s_{DTR}^2(\bar{T}_{obj}) + s_{RE}^2(\bar{T}_{obj}) + s_{ME}^2(\bar{T}_{obj}) + s_{NGE}^2(\bar{T}_{obj})} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

Onde:

u_{int} : incerteza padrão combinada intrínseca;

s_{UM} : desvio padrão da UM ;

s_{DTR} : desvio padrão da DTR ;

S_{RE} : desvio padrão da RE;

S_{ME} : desvio padrão da ME;

S_{NEDT} : desvio padrão da NGE.

3.4.3. Incertezas extrínsecas associadas à Termografia

As incertezas extrínsecas em termografia estão ligadas as condições do ambiente de inspeção e as características da superfície do objeto inspecionado. Como mostrado na Equação 3.7, os parâmetros relacionados às condições da inspeção são temperatura atmosférica, temperatura refletida e distância. A temperatura refletida, quando não existe outra fonte relevante de radiação no ambiente, é normalmente considerada igual a temperatura atmosférica. Estes parâmetros são medidos por instrumentos específicos, como termopares e trena, e a variação associada a cada um depende dos dados metrológicos destes instrumentos.

A emissividade, elemento da incerteza extrínseca em termografia associada à superfície do objeto, é a mais difícil de ser obtida. O valor da emissividade pode variar devido a uma série de fatores, como forma da superfície, rugosidade, presença de sujeira, oxidação e temperatura do objeto. (TEIXEIRA, 2012) em sua dissertação, aponta que a emissividade é a variável que mais influência no resultado da medição, principalmente se for muito baixa, como no caso dos metais polidos. Revestir estas superfícies é uma alternativa que eleva a emissividade e reduz a incerteza de medição.

As cores da superfície do objeto não exercem influência no resultado de medição de uma inspeção termográfica. Análises de incerteza mostram que uma superfície com temperatura uniforme, pintada de cores diferentes, além de apresentar o mesmo aspecto na imagem térmica, mostra as mesmas indicações de valores de temperatura nas regiões pintadas, independente das cores (GOMES, TEIXEIRA, *et al.*, 2011). Isto ocorre devido à capacidade de absorção e emissão de radiação em função dos comprimentos de onda. As termocâmeras captam radiação da faixa do infravermelho médio, como mostrado na Seção 3.2.1, que não compreende o espectro do visível. As cores, como os humanos enxergam, não influenciam na inspeção termográfica. A Figura 3.5 ilustra esta situação.

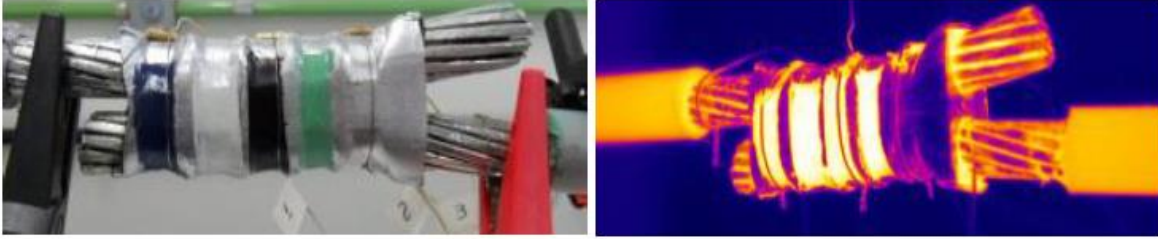


Figura 3.5 – Comparação entre uma imagem térmica de um conector elétrico e uma imagem no visível. Fonte: (GOMES, TEIXEIRA, *et al.*, 2011).

3.4.4. Obtenção da incerteza padrão na medição termográfica

Neste trabalho foram utilizadas as orientações do método GUM para análise e expressão das incertezas em medições indiretas. De forma simplificada, este método considera que existe uma contribuição para a incerteza originada em cada variável que compõe o mensurando. Considerando o mensurando (y) que é função das variáveis (x_1, x_2, \dots, x_n) tem-se a incerteza padrão combinada expressa pela Equação 13, conforme a lei de propagação de incertezas:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i) u(x_j) r_{i,j}(x_i, x_j) \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Onde:

$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i}$ é o coeficiente de sensibilidade de y em relação a x_i ;

$r_{i,j}$ = coeficiente de correlação entre as variáveis x_i e x_j que mede a dependência mútua relativa entre as variáveis.

Para T_{ob} , é necessário relacionar as parcelas de incerteza relativas à emissividade, temperatura atmosférica, temperatura refletida, distância e a incerteza intrínseca. A Equação 3.14 apresenta foi utilizada para obtenção da incerteza padrão combinada de T_{ob} .

$$u_c(T_{ob}) = \sqrt{(c_\varepsilon u(\varepsilon))^2 + (c_{T_{atm}} u(T_{atm}))^2 + (c_{T_{ref}} u(T_{ref}))^2 + (c_d u(d))^2 + u_{int}^2} \quad (\text{Eq. 3.14})$$

Onde:

$u_c(T_{ob})$: incerteza padrão combinada de T_{ob} ;

c_ε : coeficiente de sensibilidade da emissividade;

$u(\varepsilon)$: incerteza padrão da emissividade;

$c_{T_{atm}}$: coeficiente de sensibilidade da temperatura atmosférica;

$u(T_{atm})$: incerteza padrão da temperatura atmosférica;

$c_{T_{ref}}$: coeficiente de sensibilidade da temperatura refletida;

$u(T_{ref})$: incerteza padrão da temperatura refletida;

c_d : coeficiente de sensibilidade da distância;

$u(d)$: incerteza padrão da distância;

u_{int} : incerteza padrão combinada intrínseca.

Os coeficientes de sensibilidade podem ser aproximados com a utilização de séries de Taylor. Teixeira (2012) apresenta o desdobramento das equações para o cálculo das parcelas de primeira ordem. O programa de cálculo Matlab® foi utilizado para obtenção dos valores destas parcelas. O procedimento para o cálculo, com as equações e o código implementado, estão apresentados no ANEXO B.

4. MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS

A manutenção se refere a realização de atividades que visam preservar a capacidade original de operação dos equipamentos e prevenir eventuais degradações causadas pelo uso contínuo dos mesmos. Do ponto de vista da gestão, a manutenção também implica em avaliar a melhor forma de utilização dos equipamentos com o objetivo de evitar as falhas, reduzindo custos e aumentando a produtividade (SILVA, 2009). Aliando estes conceitos ao ponto de vista da sustentabilidade e preservação do meio ambiente, chega-se a ideia da Gestão de Ativos.

4.1. Manutenção

A seguinte definição de manutenção, de autoria desconhecida, ilustra um pouco da discussão a respeito do tema: *“Manutenção é... quando tudo vai bem, ninguém se lembra que ela existe. Quando algo vai mal, dizem que ela não existe. Quando é para gastar, acha-se que não é preciso que exista, porém, quando realmente não existe, todos concordam que deveria existir!”*

Com a Revolução Industrial no final do século XIX, máquinas mecânicas começaram a ser utilizadas em larga escala e os reparos eram feitos diante da quebra ou inutilização de algum componente, sem muito controle. Henry Ford foi um dos primeiros a introduzir conceitos estruturados na realização deste trabalho (TAVARES, 1996). Com a Primeira Guerra Mundial (1914), as empresas buscavam produzir maiores quantidades com o menor consumo e a necessidade de realizar a manutenção dos equipamentos em menos tempo era um dos caminhos. Neste momento foram criados os “Setores de Manutenção”. Mais estruturada, ainda na busca pelo aumento da produção, a “manutenção preventiva” surge entre as grandes guerras.

Durante a década de 60 as ideias da confiabilidade e estatística são praticadas e desenvolvidas, utilizando critérios de falhas. A busca pela previsão do estado de funcionamento deu origem as práticas de Manutenção Preditiva na década de 80. Esta caminhada, associada a expansão da informática, deu origem a sistemas computadorizados

de gerenciamento de manutenção, permitindo amplo domínio do histórico dos equipamentos, tornando possível investigações mais amplas sobre as causas das falhas, e ampliando o espaço da manutenção preditiva (ZAIIONS, 2003). O desenvolvimento das técnicas e da gestão da manutenção são historicamente motivados pela busca contínua do aumento da eficiência. A Figura 4.1 aborda a linha temporal com o surgimento e desenvolvimento dos conceitos.

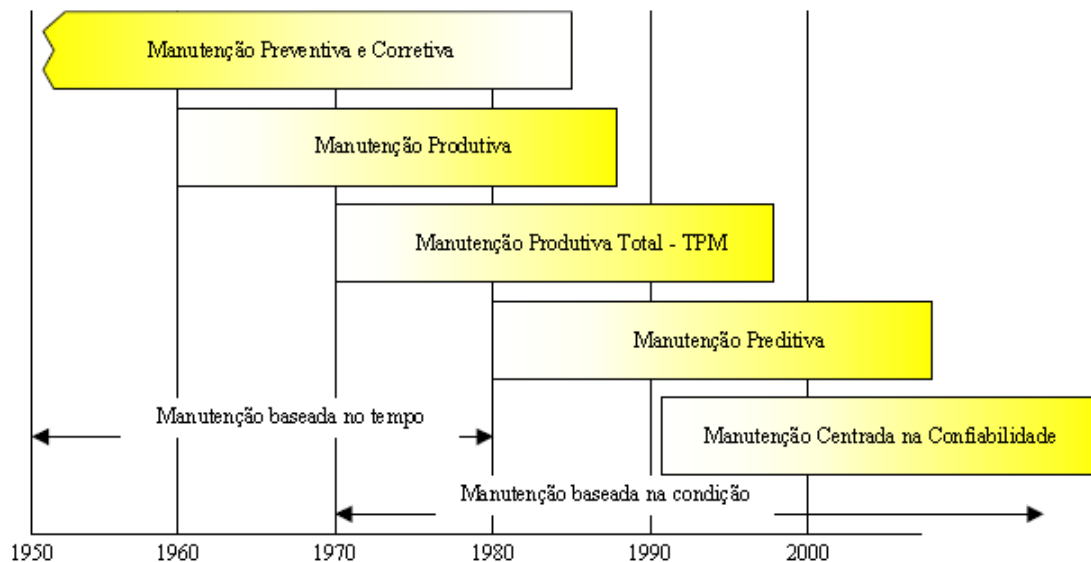


Figura 4.1 – Evolução temporal das técnicas e conceitos de manutenção. Adaptado: (LAFRAIA, 2001).

4.1.1. Classificação da Manutenção

Dependendo do contexto da realização da manutenção, existem pelo menos três tipos básicos que devem ser conhecidos: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva.

Manutenção corretiva trata da intervenção na falha inesperada, visando a volta ao estado normal de operação. Este tipo de falha pode causar a parada total do equipamento e a suspensão da produção. Sendo considerada o tipo mais crítico, a manutenção corretiva deve ser realizada o mais rápido possível, porém questões logísticas, disponibilidade da equipe e de estoque de peças podem agravar ainda mais os custos resultantes da falha do equipamento. A manutenção corretiva é uma abordagem que nunca deixará ser praticada já que os

mecanismos de predição de falha, por mais avançados que possam ser, não tem capacidade de apontar falhas aleatórias (BLOCH, 1997).

A NBR 5642 define manutenção preventiva como “*Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item*” (ABNT, 1994). Diferente da manutenção corretiva, a manutenção preventiva não é reativa e sim proativa. Para realização de forma adequada é necessário um programa de ações adequado aos equipamentos e a rotina da indústria e equipe de manutenção especializada na atividade. Pode ser realizada periodicamente ou quando houver algum indicio de redução da produtividade de determinado equipamento (ZAIONS, 2003). Existe uma frequência ótima de realização de manutenção preventiva que gera redução no número de falhas e diminui a realização das manutenções corretivas. Este ponto ótimo deve ser encontrado para que seja alcançado um patamar mínimo de custos de manutenção. A Figura 4.2 ilustra este aspecto.

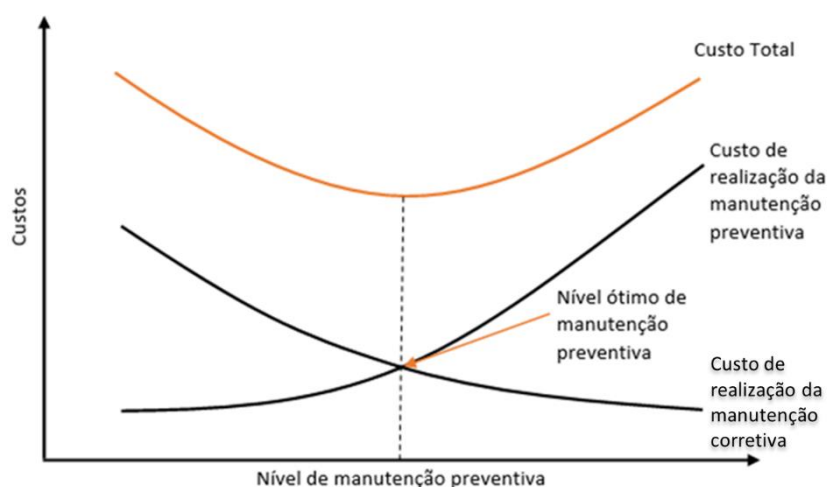


Figura 4.2 – Gráfico destacando o nível ótimo de realização de manutenções preventivas que diminui o custo total da manutenção. Fonte: (BWS CONSULTORIA, 2015).

A manutenção preditiva é talvez a mais estruturada e que demanda mais organização dos gestores. De acordo com a NBR 5642, manutenção preventiva pode ser definida como “*Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e*

diminuir a manutenção corretiva”. Aqui, de fato, busca-se prever a ocorrência da falha e planejar interferências antes que estas ocorram. É necessário que os indicadores de operação dos equipamentos sejam acompanhados constantemente, através de inspeções realizadas de tempos em tempos. Os custos da manutenção preventiva são mais elevados, pois demandam equipes bem treinadas e equipamentos específicos. Os ganhos se dão no aumento dos intervalos de manutenção e o conhecimento detalhado do estado das máquinas, fornecendo possibilidades de intervenção pontuais e de baixo custo (PAULINO, 2014).

4.2. Gestão de Ativos

Como visto na seção 4.1, a medida que os sistemas computacionais se estabeleceram como ferramenta de auxílio na análise de dados foi possível realizar comparações de parâmetros de operação, por meio de indicadores de desempenho (KPIs), e avaliações mais precisas das intervenções realizadas nos equipamentos. Desta forma, a indústria pode melhorar as práticas de gerenciamento da manutenção, buscando níveis mais altos de eficiência e diminuindo custos. O papel estratégico da manutenção fica evidente neste cenário e ganha mais importância, sendo pensada não só para solucionar os problemas atuais, mas ainda mais os problemas futuros. Este planejamento de longo prazo envolve questões econômicas e técnicas, e demanda estudos dos cenários para determinar a priorização dos investimentos. Neste contexto que surge a então chamada Gestão de Ativos (DINIZ, 2013).

De acordo com a definição do *Institute of Asset Management* (IAM), Gestão de Ativos se refere a uma abordagem que visa otimizar a utilização dos ativos em benefício da organização e de seus colaboradores, gerando o máximo de valor, considerando os ativos como parte do meio e buscando ações sustentáveis, que os ativos têm ciclo de vida e um risco associado à sua posse e manutenção (BSI, 2014).

4.2.1. Estabelecendo a gestão de Ativos – PAS-55

A PAS-55 se refere a *Publicly Available Specification 55*, ou Especificação aberta ao público 55, e foi originalmente publicada pelo *British Standards Institution* (BSI) em 2004, em parceria com o IAM. O objetivo da PAS-55 é reunir as especificações e boas práticas

para um modelo de gestão de ativos que possa ser amplamente compreendido e adotado pela comunidade internacional (BSI, 2008). Em 2014, um comitê internacional, que reuniu membros de 31 países, chegou a publicação da ISO 55000, uma série de normas que abordam todos os aspectos da PAS-55 (ABNT, 2014). Mesmo focada em ativos físicos, a ISO 55000 busca estabelecer níveis excelentes de eficiência e produtividade, resultando em geração de valor e aumentando o impacto da marca (QUERINO, 2015). A norma é focada na gestão de ativos físicos, mas destaca a relação entre as diferentes classes de ativos listados na Figura 4.3.



Figura 4.3 – Classes de ativos listadas pela PAS-55.

A especificação estabelece que a gestão de ativos deve ser feita de forma holística, exige muito rigor na coleta e documentação dos dados relevantes, sugerindo auditorias periódicas e revisão dos indicadores. A informação deve ser de qualidade e circular de forma pertinente para garantir embasamento na tomada de decisão. A bem conhecida técnica PDCA, Figura 4.4, deve ser aplicada constantemente em todos os setores da organização visando o alinhamento do sistema de gestão.

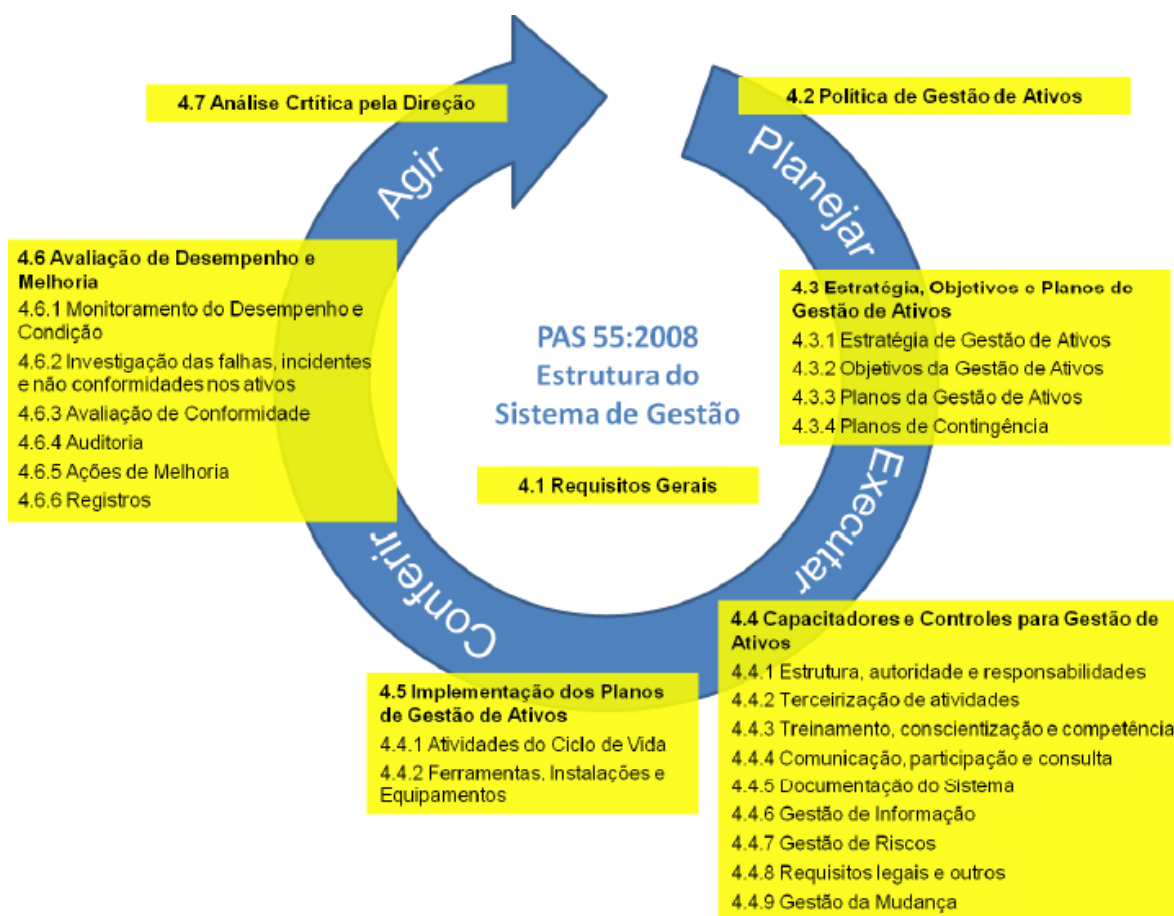


Figura 4.4 – PDCA proposto pela PAS 55 para integração do sistema de gestão. Fonte: (BSI, 2008).

5. AUTOMATIZAÇÃO DA INSPEÇÃO

Para praticar uma Gestão de Ativos de qualidade, é necessário ter acesso a informações relevantes sobre o estado de operação dos equipamentos. Para que estas informações sejam coletadas e armazenadas de forma satisfatória, deve existir uma metodologia bem definida que deve ser seguida passo a passo. Em diversas áreas tem se discutido maneiras de garantir a qualidade destas informações que, em geral, caminham para a automatização dos processos. Em alguns cenários é mais fácil pensar a automatização de medições e inspeções, como na linha de produção de peças simples, mas em subestações de energia elétrica ou refinarias, as demandas são mais complexas.

Diversos grupos de pesquisa, muitos ligados à área de manutenção e monitoramento, trabalham com a proposta de inspeção de ativos feito por robôs ou unidades automatizadas. A justificativa para o desenvolvimento deste tipo de equipamento inclui argumentos comuns, como melhora da qualidade das informações registradas, segurança da operação, agilidade e economia de custos com mão de obra (OKAMOTO, GRASSI, *et al.*, 2012).

5.1. Robôs de inspeção

A Figura 5.1 mostra um robô para inspeção em cordões de solda de esferas de armazenamento de gás.

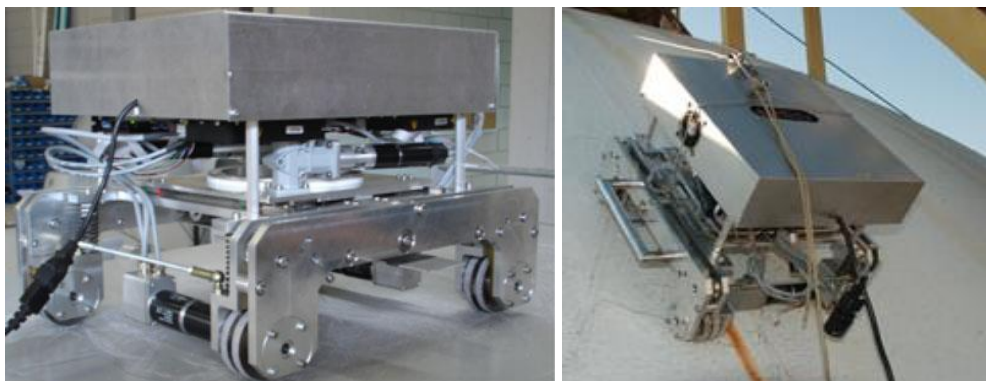


Figura 5.1 – Robô para inspeção em cordões de solda, desenvolvido por Okamoto (2011).

O robô possui rodas de material magnético, que garantem a adesão à superfície da esfera, um conjunto de câmeras digitais, lasers e sensores que avaliam as propriedades do cordão de solda. Os dados são enviados utilizando uma conexão sem fio para uma central de dados. O robô foi projetado com molas e aparatos mecânicos que permitem que ele se mova em linha reta pela superfície esférica, para poder acompanhar toda a extensão do cordão. Um cabo conectado ao robô fornece a energia elétrica, com tensão de 220V. A inspeção se dá de forma autônoma. O controle de posição é feito pela detecção do centro do cordão de solda, através de técnicas de detecção de imagem, conforme imagens da Figura 5.2. A estrutura toda pesa aproximadamente 28 kg, e atinge a velocidade máxima de 200mm/s (OKAMOTO, GRASSI, *et al.*, 2012).

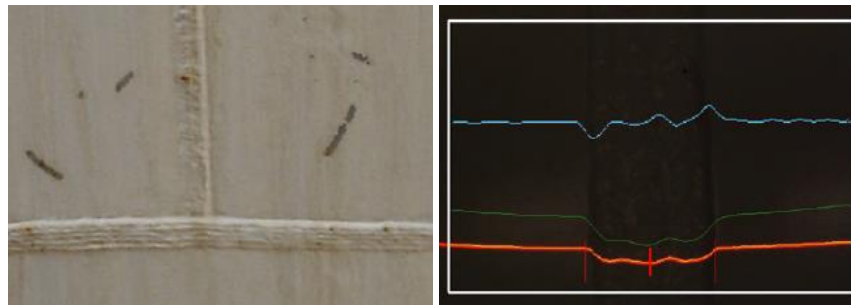


Figura 5.2 – Imagem de um cordão de solda com a análise instantânea feita pelo robô desenvolvido por Okamoto (2011) para localização do centro do cordão de solda e correção da posição.

Robôs também podem ser utilizados para inspeções no interior de tubulações de gás (CHOI e RYEW, 2002). Entre os profissionais da área, este equipamento é chamado de “*pipeline pig*” (QI, ZHANG, *et al.*, 2009). Estes robôs são articulados, e devem ter a capacidade de fazer as curvas de 90° nas curvas de derivação das tubulações, conforme Figura 5.3.

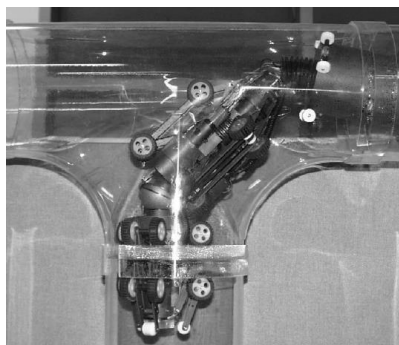


Figura 5.3 – “Pipeline pig” em teste no laboratório, fazendo uma curva de 90°. Fonte: (CHOI e RYEW, 2002).

Os projetos mais antigos deste tipo de sistema contavam com um cabo para o envio das informações (Tether cable). Atualmente é possível fazer o controle e a troca de dados com o robô sem a necessidade de conexão por cabo. Esta funcionalidade demanda muita pesquisa, já que as tubulações são metálicas e podem dificultar as transmissões dos sinais (QI, ZHANG, *et al.*, 2009). Na central do sistema, embarcada em um veículo terrestre, está instalada a antena para captação do sinal, mostrada na Figura 5.4.

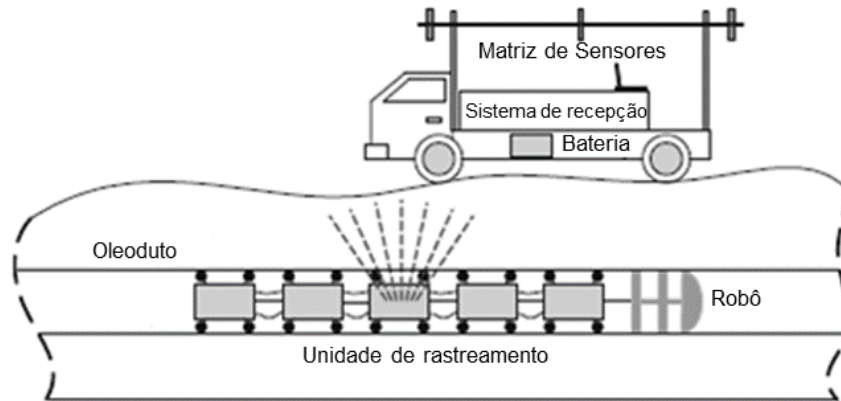


Figura 5.4 – Detalhe da comunicação sem fio entre o robô e a central. Adaptado: (QI, ZHANG, *et al.*, 2009).

5.2. Inspeção em cabos de transmissão

O LineScout, apresentado na Figura 5.5, é um robô de inspeção em cabos de transmissão desenvolvido pela Hydro-Québec, utilizado em campo desde 2006.

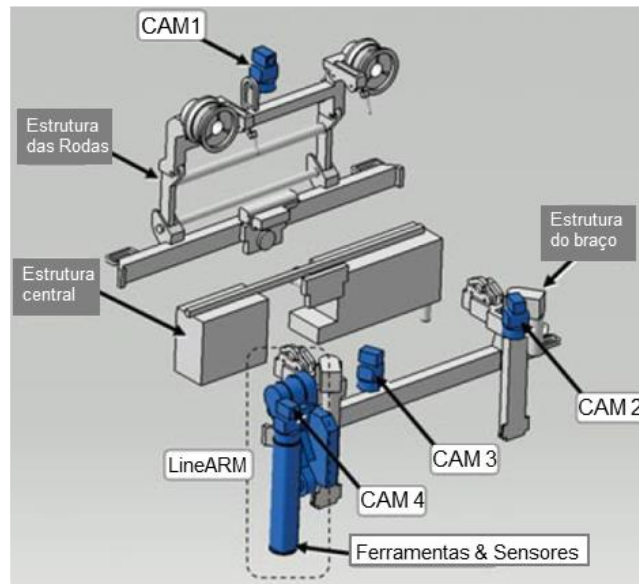


Figura 5.5 – detalhes construtivos do LineScout. Fonte: (POULIOT e MONTAMBAULT, 2011).

A inspeção de linhas de transmissão é uma atividade que apresenta uma série de dificuldades, já que existem milhares de quilômetros de cabos instalados. O LineScout carrega câmeras e sensores para monitoramento dos cabos, e realiza a transmissão das informações em tempo real, como apresentado na Figura 5.6.



Figura 5.6 – Cabos partidos, corrosão e quebra na estrutura captadas pelo LineScout durante uma inspeção em campo. Fonte: (POULIOT, RICHARD e MONTAMBAULT, 2015).

O LineScout foi projetado para se mover pelos próprios cabos de transmissão, utilizando rodas em formato de roldanas, e é articulado de tal forma que consegue ultrapassar os obstáculos encontrados nas linhas (POULIOT e MONTAMBAULT, 2011), mostrado na Figura 5.7. O LineScout já foi utilizado em diversos países e seu projeto, iniciado em 2003, continua sendo aperfeiçoado (POULIOT, RICHARD e MONTAMBAULT, 2015).

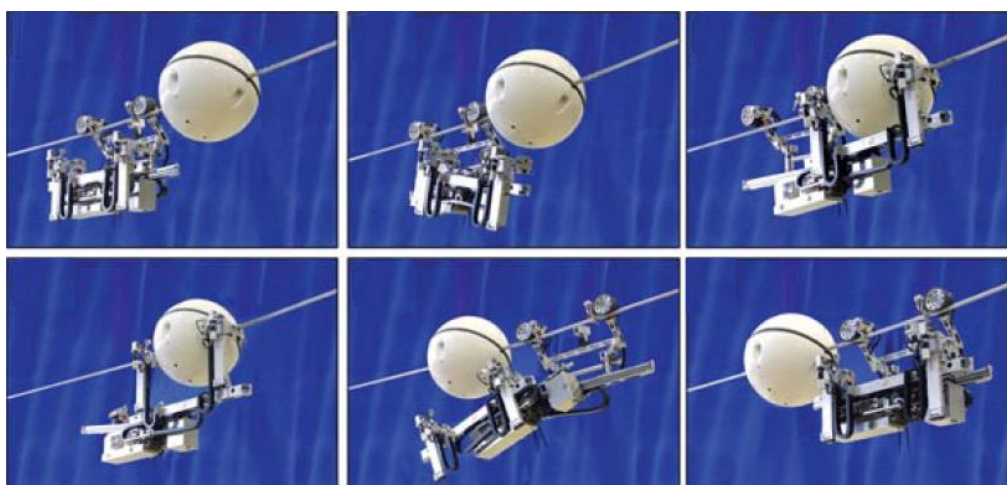


Figura 5.7 – LineScout manobrando por um obstáculo. Fonte: (POULIOT e MONTAMBAULT, 2011).

5.3. Inspeção em subestações

5.3.1. Monitoramento em local fixo

A FLIR®, em parceria com a Pivotal Vision®, oferece uma solução comercial para monitoramento de subestações em tempo real. Basicamente, consiste na instalação de câmeras fixas, estáticas ou acopladas a sistemas Pan/Tilt ao longo da subestação de energia elétrica, visando o monitoramento contínuo de equipamentos chave, que custam milhares de dólares. Toda informação captada pelo sistema é enviada para uma central, que não precisa estar dentro das SEs. A proposta inclui acesso às câmeras através da internet, funciona 24 horas e permite vigilância patrimonial (FLIR, 2011). A Figura 5.8 mostra o projeto do sistema de forma esquemática.

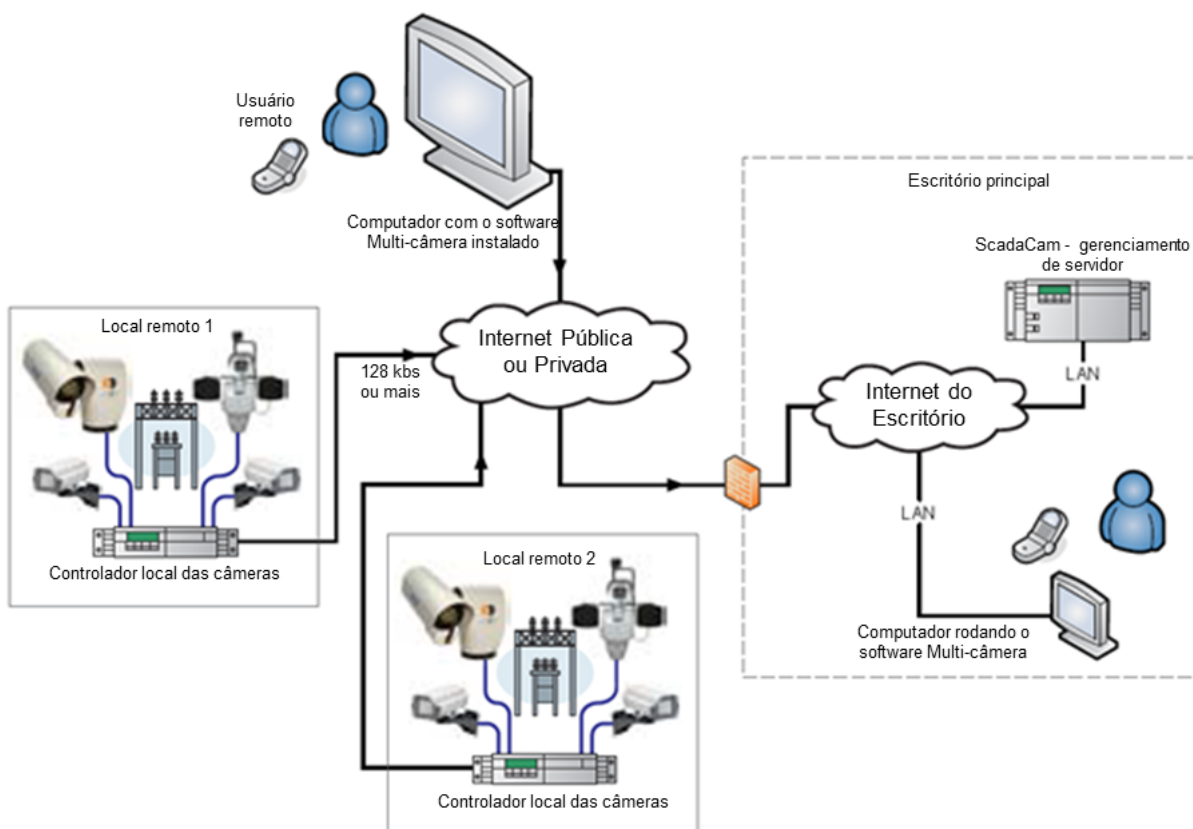


Figura 5.8 – Proposta de Monitoramento apresentada pela FLIR®. Fonte: (FLIR, 2011).

5.3.2. Robô que se move sobre cabos

O sistema desenvolvido por Pinto (2008), apresentado na Figura 5.9, monitora locais de temperatura elevada dentro de uma subestação. A procura por pontos quentes norteia as inspeções termográficas de caráter qualitativo realizadas por este robô. Quando o sistema detecta um destes pontos quentes, uma mensagem é enviada para a sala de controle, e a ocorrência verificada.



Figura 5.9 – Robô desenvolvido por Pinto (2008) se movendo sobre os cabos de aço instalados na subestação.

O robô se move sob um cabo de aço instalado ao longo da lateral da subestação, em um vão de 80m e o fornecimento de energia é feito por um cabo com tensão de 220 V, que é fixado no robô, conforme Figura 5.10.

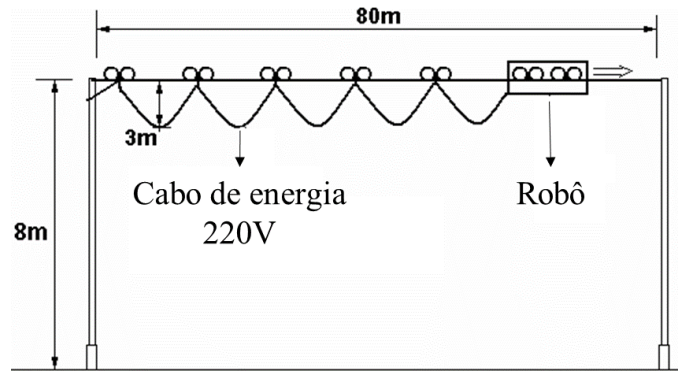


Figura 5.10 – Projeto elaborado por Pinto (2008) para a estrutura instalada na subestação para movimentação do robô.

O sistema é composto por uma câmera termográfica FLIR A20 e uma câmera de monitoramento. Para movimentação sobre os cabos foram utilizados polias e motores para tração. Além destes, o conjunto eletrônico auxiliar é o responsável pelo controle do sistema e pela transmissão de dados sem fio. Detalhes podem ser vistos na Figura 5.11

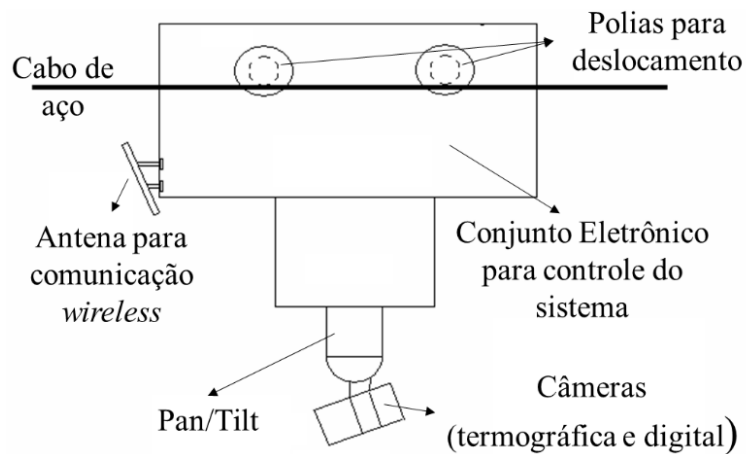


Figura 5.11 – Detalhe dos componentes do robô proposto por Pinto (2008).

5.3.3. Robô que se move sobre viga H

O robô apresentado por Sampaio (2014) se movimenta por uma viga tipo H, mostrado na Figura 5.12. O conjunto mecânico de movimentação, composto por motor de passo, seis rodas e algumas engrenagens, está montado na parte de cima do robô. O processador Arduino é utilizado para controle e comunicação com o computador central e é instalado em uma caixa protegida lado do conjunto mecânico.

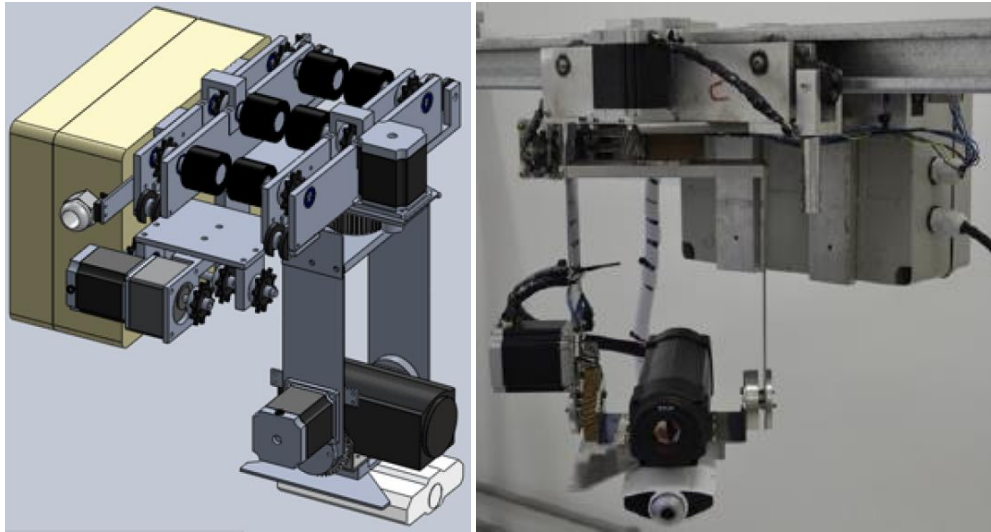


Figura 5.12 – Vista em perspectiva do projeto de Sampaio (2014) e imagem de sua construção.

Para realização das inspeções, o sistema é configurado para se deslocar até uma posição de referência, e então buscar por um determinado equipamento. Se não consegue atingir o objetivo, a rotina é reiniciada, com o robô voltando a posição original. Quando a identificação do ativo é feita com sucesso, conforme Figura 5.13, a temperatura média é captada, utilizando algoritmos de rede neural, e comparada com a temperatura média histórica deste equipamento. Se houver uma diferença considerável entre os valores, é gerado um relatório apontando um possível problema no item inspecionado.

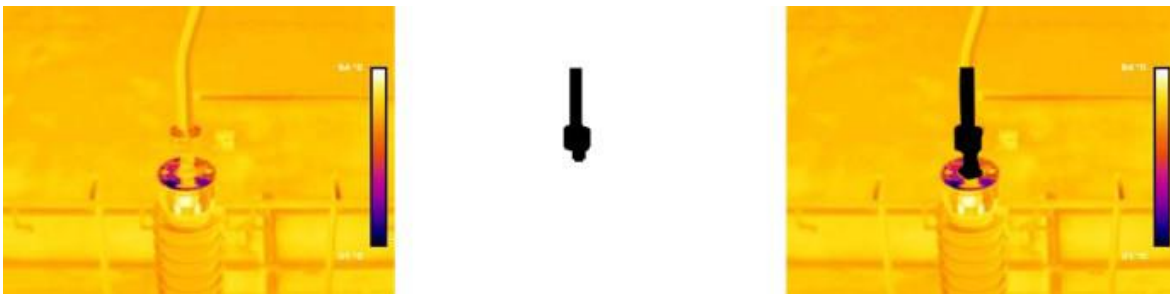


Figura 5.13 – Imagens captadas pelo robô apresentado por Sampaio (2014) mostrando a configuração da região, correspondente a uma conexão elétrica, onde deve ser avaliada a temperatura média.

5.3.4. SmartGuard

O SmartGuard, desenvolvido pela Shandong Electric Power Research Institute, sediado em Jinan, na China, é uma alternativa para o monitoramento de subestações. Alguns modelos desenvolvidos estão mostrados na Figura 5.14. Estes robôs foram feitos para suportar as condições climáticas do país e da estrutura física da subestação. Os estudos envolvendo o SmartGuard são desenvolvidos desde 2004 (WANG, GUO, *et al.*, 2011).



Figura 5.14 – Modelos do robô SmartGuard. Fonte: (LI, WANG e LI, 2013).

A alimentação é feita por baterias, sendo que o sistema é programado para se direcionar ao abrigo e fazer a recarga. O conjunto de visão é composto por uma termocâmera e uma câmera de monitoramento afixadas em um caixa, para proteção. Esta caixa é montada sobre um sistema pan-tilt, permitindo mobilidade. O robô se move por trajetos pavimentados dentro da subestação, e utiliza GPS e marcações na pista para orientação e posicionamento no percurso (WANG, GUO, *et al.*, 2011). A Figura 5.15 mostra os principais elementos do robô.

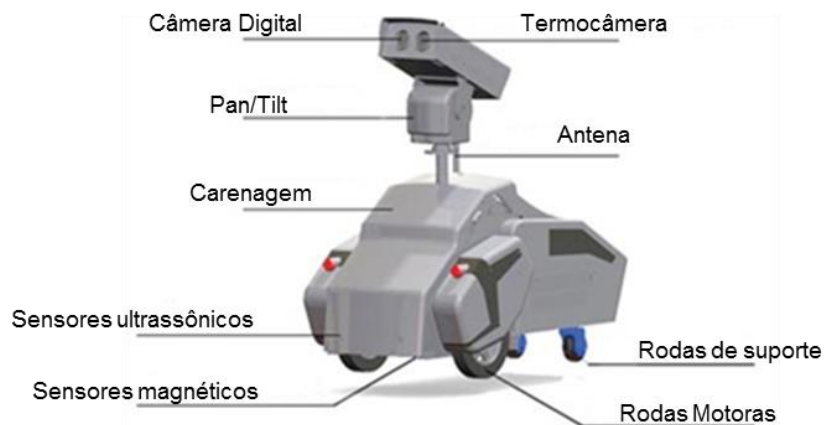


Figura 5.15 – Itens que compõem o SmartGuard. Adaptado de (WANG, GUO, *et al.*, 2011).

O sistema é programado para realizar a inspeção na subestação de forma autônoma. Também conta com um algoritmo para análise de imagens que é responsável por identificar os componentes, fazer comparações para indicar se há funcionamento de forma irregular, cuja funcionalidade está ilustrada na Figura 5.16. A técnica de fusão de imagem é utilizada para ajudar na identificação do equipamento que deve sofrer intervenção.



Figura 5.16 – Imagens registradas e analisadas pelas câmeras do SmartGuard. Fonte: (WANG, GUO, *et al.*, 2011).

5.4. Comparação entre as soluções de monitoramento

Na seção 5.3 foram apresentados quatro sistemas para a realização de inspeções e monitoramento de equipamentos de subestações de energia elétrica. A Tabela 5-1 reúne características relevantes destes sistemas.

Tabela 5-1 – Quadro com as principais características dos sistemas apresentados na seção 5.3.

Autor	Meio de movimentação	Tipo de alimentação	Transmissão da informação	Alcance da Inspeção
FLIR®/ <i>Pivotal Vision</i> ®	Fixo	Conectado à rede da SE	Cabo <i>Ethernet</i>	Limitada
Pinto, 2008	Cabo de aço ao lado da SE	Cabo	Sem fio	Limitada
Sampaio, 2014	Trilhos	Cabo	Cabo <i>Ethernet</i>	Onde houver trilhos
Wang, 2011	Pista pavimentada	Bateria	Sem fio	Onde houver pista

O meio pelo qual cada sistema se movimenta está diretamente ligado ao alcance da inspeção. O sistema proposto por FLIR®/ *Pivotal Vision*® é fixado em um ponto, e consegue inspecionar apenas os itens próximos, sendo necessário a instalação em vários pontos da subestação, o que aumenta muito os custos do projeto e deixa a inspeção limitada a estas áreas. O controle é feito manualmente, necessitando de um operador dedicado.

A solução proposta por Pinto (2008), por ser instalada ao lado das subestações, fica a uma distância relativamente longa dos equipamentos a serem inspecionados, diminuindo a qualidade da informação captada. Além disso, o robô necessita de um cabo para fornecimento da energia elétrica, que pode trazer algumas complicações a segurança da instalação do sistema. O sistema apresentado por Sampaio (2014) também necessita de cabo para alimentação do robô e transmissão da informação captada, o que pode gerar problemas de mobilidade e segurança no ambiente da subestação.

O SmartGuard é o sistema mais completo entre os que foram apresentados. Porém, necessita de pistas pavimentadas na subestação para poder se movimentar. No Brasil, a maior parte das subestações é construída a céu aberto, e faz-se necessário a busca por soluções que se adequam a esta realidade.

6. SISTEMA AUTÔNOMO PROPOSTO

6.1. Histórico

Em 2002, através do projeto de pesquisa e desenvolvimento - P&D 021 – *Novas técnicas de manutenção preditiva em para-raios*, estudos mostraram a importância da utilização da termografia para inspeções de para-raios. Com a finalidade de entender melhor as possibilidades desta técnica para a área de manutenção, outros P&Ds foram feitos em parceria com a UFMG (CEMIG, 2010).

O P&D 169 – *Tecnologia de processamento de imagens radiométricas para aplicações em ambiente de subestação de energia*, de 2006, teve a proposta de desenvolver um programa para análise das imagens térmicas, e assim não depender do programa fornecido pelo fabricante, que tinha custos associados. O P&D 170 - *Protótipo para monitoramento e diagnóstico automático de falhas em para-raios, incluindo os de carboneto de silício, utilizando técnicas de sistema de infravermelho* teve a proposta de desenvolver um sistema autônomo para o monitoramento de para-raios, que ao final da inspeção gera um relatório sobre o estado de operação do equipamento, conforme esquema mostrado na Figura 6.1 (CEMIG, 2010).

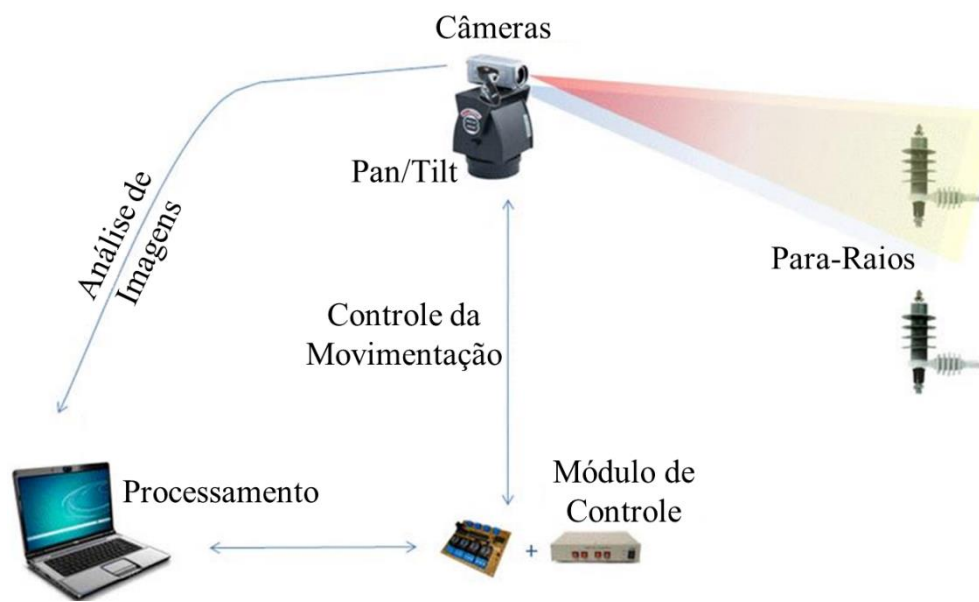


Figura 6.1 – Monitoramento Autônomo para Para-Raios, desenvolvido por Silvino & Peterson (2010).

Iniciado em 2010, o P&D 235 - *Metodologia para melhoria da confiabilidade da termografia em sistemas de distribuição* desenvolveu um programa, apresentado nas imagens do ANEXO C deste documento, para integração da análise das imagens térmicas e elaboração dos diagnósticos dos equipamentos inspecionados em subestações, como uma ferramenta de auxílio a gestão da manutenção. Uma revisão metrológica rigorosa foi realizada para entender, de fato, os efeitos das propriedades superficiais dos equipamentos na análise do resultado da medição termográfica, com destaque para a alta incerteza associada a baixa emissividades das superfícies (TEIXEIRA, 2012).

Em 2012, o P&D 426 - *Sistema automatizado para o monitoramento e diagnóstico de falhas em ativos de subestações, sem desligamento, através do varredura, localização, aquisição, tratamento e processamento de imagens no espectro visível e no infravermelho*, também realizado em parceria com a UFMG, no ambiente do LabTerm e do DigLab, foi gerador do projeto e da construção do “Sistema Autônomo para Inspeções Visuais e Termográficas em Subestações de Energia Elétrica” abordado neste trabalho.

6.2. Prova de Conceito

Diante do histórico apresentado, a ideia dos grupos de pesquisadores do LabTerm e DigLab era apresentar uma proposta de sistema de inspeção que fosse adaptada a estrutura comumente encontrada nas SEs brasileiras, sem pavimentação e com pedras de cascalho no chão.

Para isso, foram levantadas algumas características que deveriam estar presentes no sistema:

- trilhos para movimentação, afixados a certa altura do solo;
- nenhum tipo de cabeamento afixado ao robô;
- fonte de energia proveniente de uma bateria ou transmitida pelos trilhos;
- controle e transmissão de informações realizadas via *wireless*, ou utilizando os trilhos.

O primeiro protótipo, chamado de prova de conceito, foi construído para validar todas estas características. A parte mecânica, apresentada na Figura 6.2, era composta pela base,

fabricada a partir de uma placa de nylon, e dois *trucks* afixados por conjuntos de eixo e rolamentos. No *truck* motor, estão montadas rodas de material plástico, com rolamento interno, que fornecem o torque, além das engrenagens e dois motores de corrente contínua. O segundo *truck* têm duas rodas metálicas, responsáveis pelo contato elétrico com os trilhos e transmissão da energia.

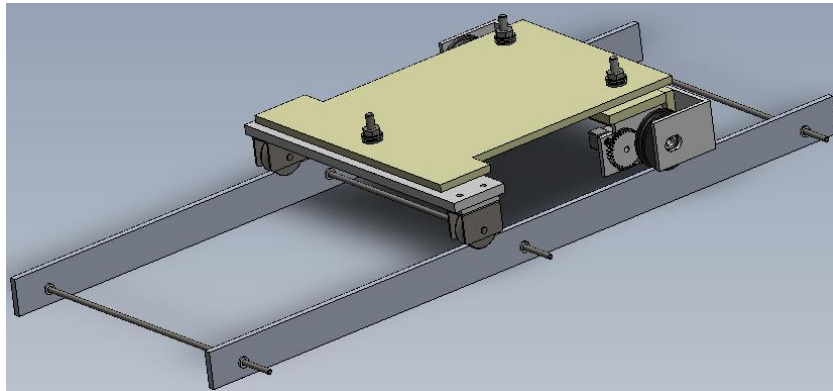


Figura 6.2 – Modelo tridimensional da plataforma de movimentação do protótipo. Fonte: Arquivo LabTerm.

O conjunto eletrônico foi construído com microcontrolador Arduíno, drivers, motores de corrente contínua e encoders, além de um equipamento Pan/Tilt, onde foram instaladas a câmera termográfica e as câmeras digitais, e um computador central. Estes componentes foram conectados conforme a Figura 6.3 (URSINE, 2013).

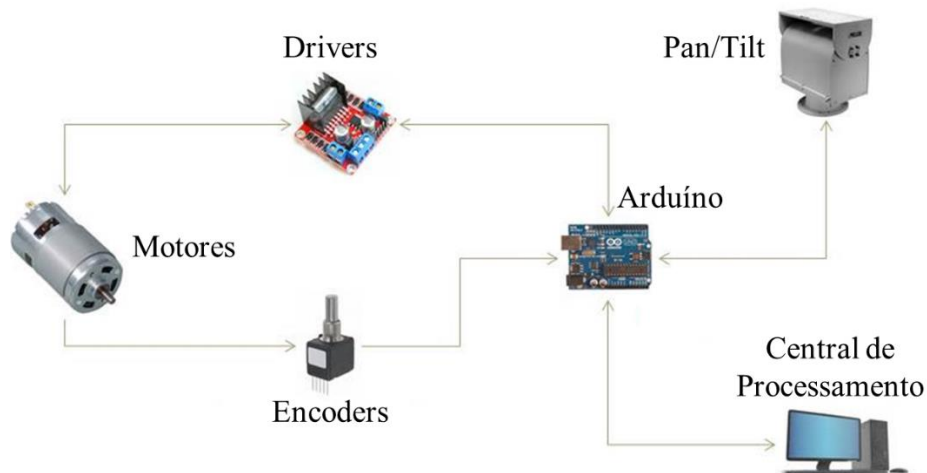


Figura 6.3 – Esquemático do conjunto eletrônico embarcado no protótipo. Adaptado de (URSINE, 2013).

O projeto mecânico foi alterado várias vezes, para que pudesse comportar todos os componentes e se adequar as necessidades do sistema eletrônico. Uma segunda plataforma

foi instalada e uma carcaça para proteção construída. A Figura 6.4 mostra o modelo tridimensional finalizado da prova de conceito, com suas medidas de altura, largura e comprimento. Na Figura 6.6 está apresentado o protótipo construído para realização dos testes em laboratório e validação do sistema de identificação de conectores e para-raios (CALADO, 2013).

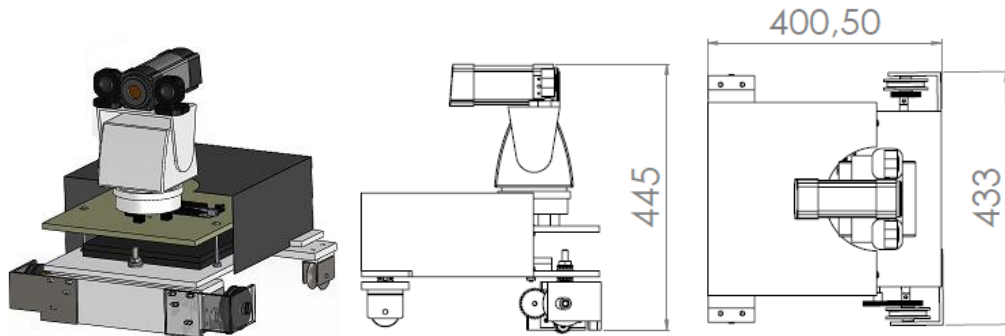


Figura 6.4 – Modelo tridimensional finalizado, e suas principais medidas (em *mm*). Fonte: Arquivo LabTerm.



Figura 6.5 – Protótipo realizando testes de inspeção. Fonte: (CALADO, 2013).

Um percurso de trilhos, Figura 6.6, foi projetado para o deslocamento do robô, contendo uma seção reta e uma seção curva, para demonstração do funcionamento da estrutura mecânica. A Figura 6.7 mostra as imagens captadas pelo protótipo durante a realização dos testes.

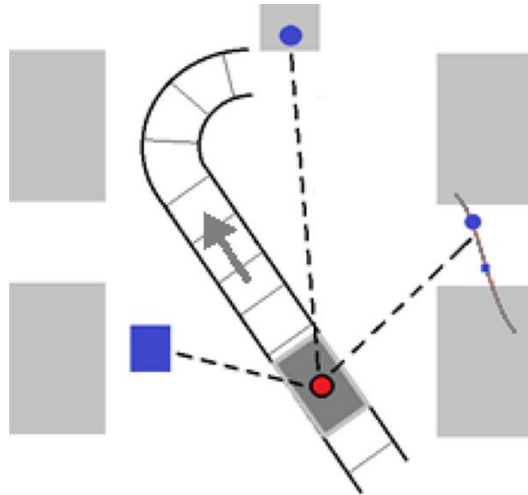


Figura 6.6 – Percurso de testes com sessão reta de 6 m e curva de 1,25 m de raio. Adaptado de (CALADO, 2013)

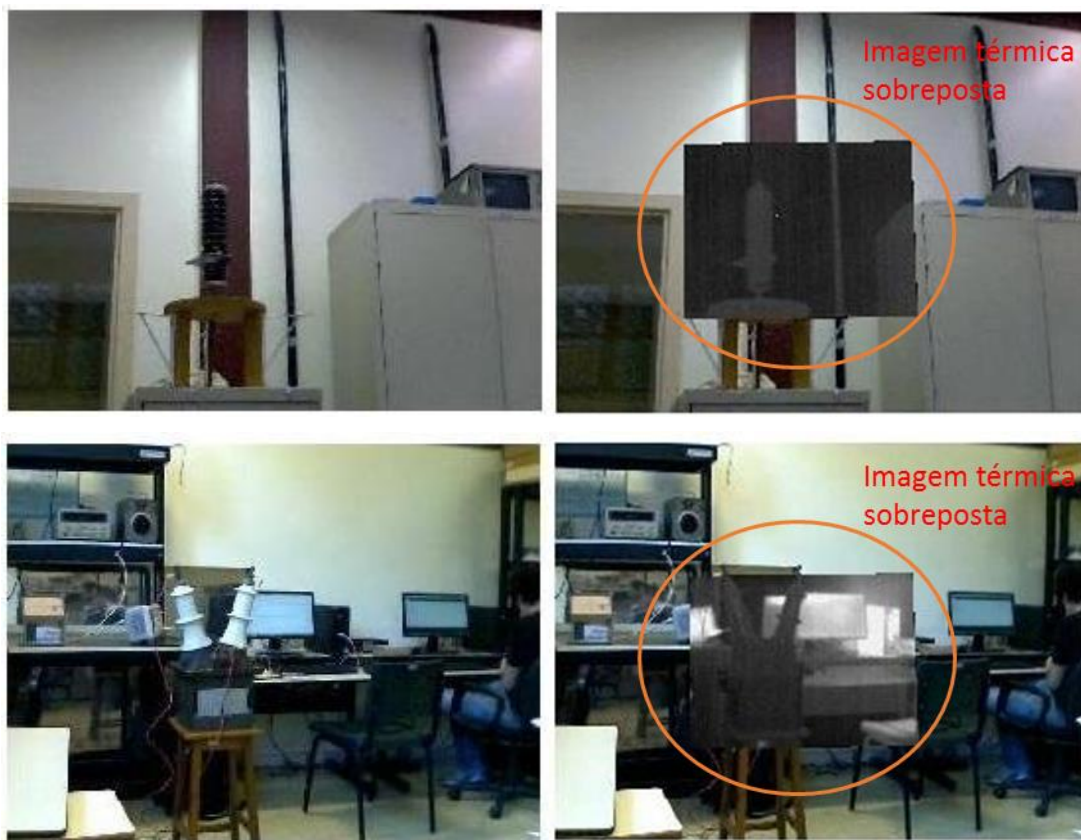


Figura 6.7 – Imagens registradas durante os testes com o protótipo. As imagens da direita mostram a sobreposição das imagens termográficas sobre as imagens digitais dos equipamentos utilizados nos testes.

Adaptado de (CALADO, 2013).

6.3. Aperfeiçoamento do Protótipo

Após a realização de vários testes, avaliando o deslocamento do sistema, o funcionamento da parte mecânica e os detalhes do sistema de visão, foi feita uma avaliação dos conjuntos e definidas algumas mudanças, levando a construção de um protótipo novo. Este deveria ser menor, mais leve, utilizar componentes com características padronizadas, possíveis de serem adquiridos no mercado.

Como apresentado em detalhes, os trilhos metálicos condutores foram mantidos, para transmissão da energia elétrica e transmissão de dados. O projeto mecânico foi revisto, para diminuir o tamanho do robô e possibilitar que o sistema se movesse por trajetos retos e curvos com sucesso. O desenvolvimento deste novo protótipo foi guiado com a proposta de ser fabricado em escala. O Sistema Autônomo de Inspeção, conforme a Figura 6.8 é composto pela Estrutura de Fixação e a Unidade Autônoma de Inspeção, também chamada por veículo ou robô.

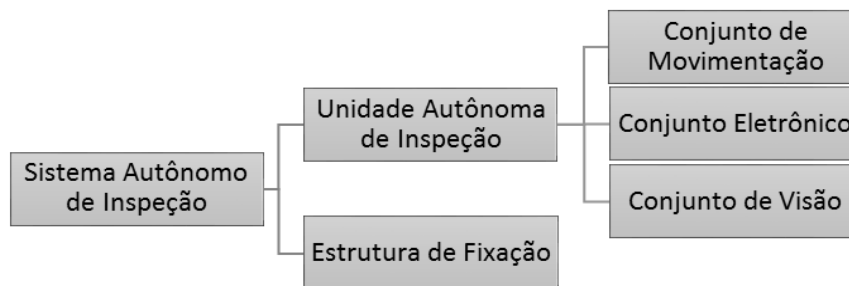


Figura 6.8 – Blocos que compõem o Sistema Autônomo de Inspeção.

6.3.1. Estrutura de Fixação

A Figura 6.9 apresenta um esboço da estrutura de movimentação e fixação, que serviu de base para concepção do projeto definitivo. A estrutura é composta por quatro elementos básicos:

- mão francesa: para fixação da estrutura;
- suporte: elemento de fixação dos trilhos à mão francesa;
- espaçador: garante a distância adequada e o isolamento elétrico entre as barras;
- trilhos: meio para locomoção do robô e condução da energia elétrica.

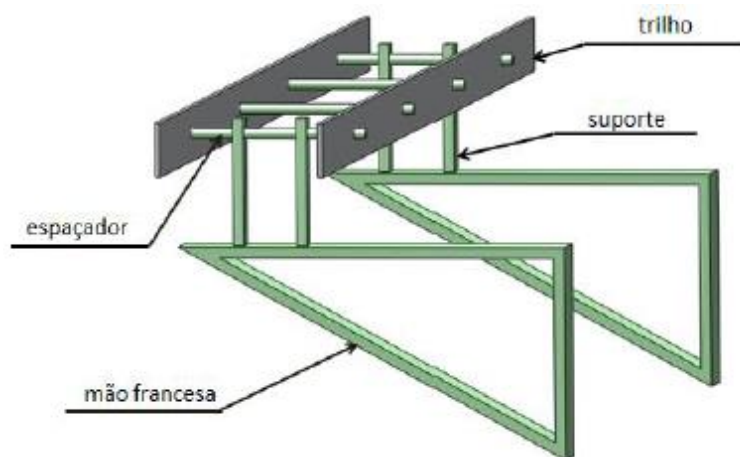


Figura 6.9 – Esboço da estrutura de fixação e movimentação do sistema. Fonte: Arquivo LabTerm.

Inicialmente, a proposta considerava instalar 24 m de trilhos em uma subestação, incluindo uma curva de 90°. Para os testes realizados no laboratório, um trecho reto de 4 m foi construído. A seleção dos materiais utilizados, e o cálculo considerado para dimensionamento das peças é discutido com detalhes em Gomes (2014).

Para os trilhos, foram utilizadas barras de alumínio Al 1200 H14. Os espaçadores e suportes são barras de aço rosqueadas, e os isoladores, que garantem o isolamento elétrico entre o trilho e o espaçador, são de nylon. Para garantir o contato físico sem contato elétrico entre isolamento e suporte, foram utilizadas braçadeiras revestidas com borrachas. A mão francesa é de perfilado de aço. A Figura 6.10 mostra como ficou o projeto final da estrutura e suas medidas.

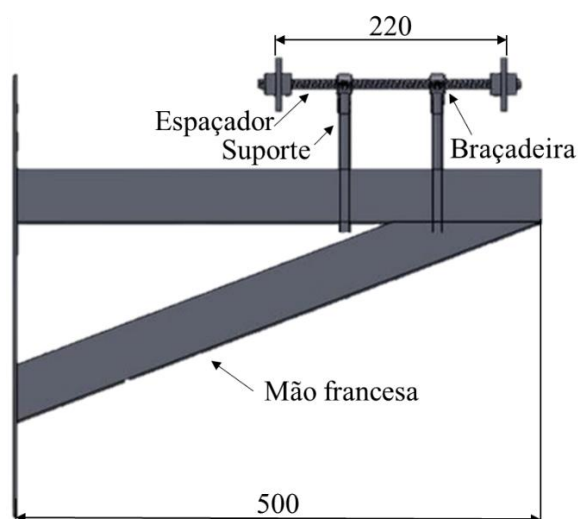


Figura 6.10 – Projeto final da estrutura de fixação. Fonte: Arquivos LabTerm.

6.3.2. Conjunto de Movimentação e Chassi

O conjunto de movimentação, que pode ser visto na Figura 6.11, garante o descolamento do robô sob os trilhos e a condução da energia elétrica. No *truck* motor, dois motores de corrente contínua, alimentados com 12 V, estão acoplados a engrenagens que fazem a redução da velocidade garantindo o torque necessário. A velocidade de cruzeiro projetada é de 0,33 m/s. Visando melhorar a performance nas curvas, e garantir que o robô esteja centralizado sob os trilhos, adotou-se o modelo de rodas com formato levemente cônico, baseado no formato das rodas utilizadas em alguns tipos de trens de carga, (RAILWAY TECHNICAL, 2016). O material utilizado destas rodas é o poliacetal de boa resistência e isolante para a eletricidade. Para garantir uma redundância no controle da velocidade, um *encoder* está acoplado ao eixo de uma das rodas. No *truck* de condução, as rodas, de latão, têm as mesmas dimensões e formato. Quando em contato com os trilhos, elas conduzem a energia para o conjunto eletrônico.

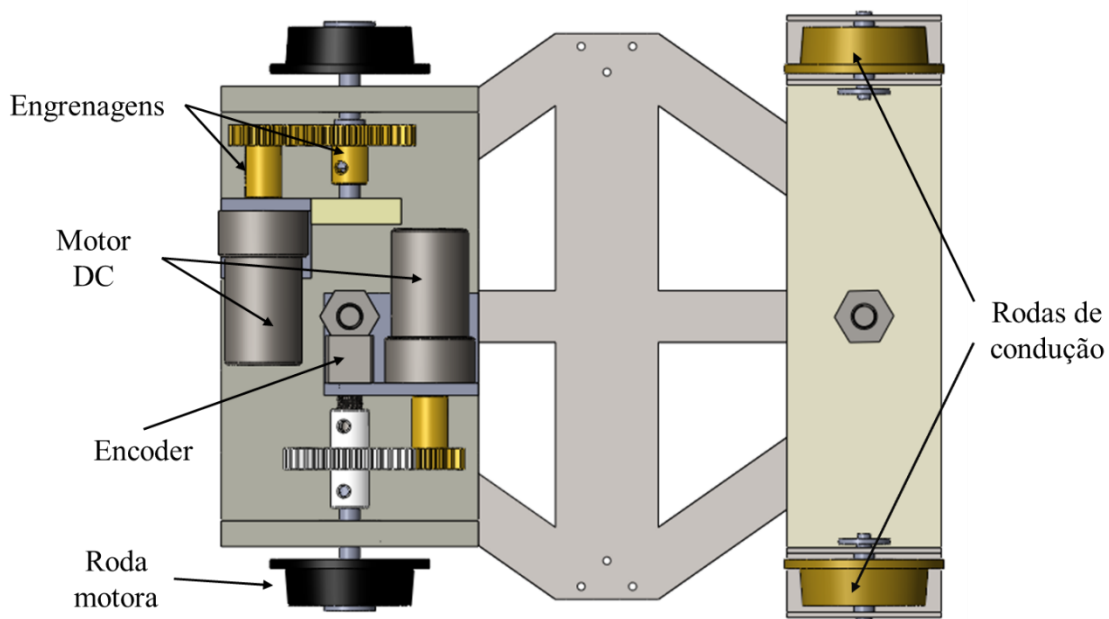


Figura 6.11 – Conjunto de Movimentação, com detalhe dos itens do truck motor e do truck de condução.

Fonte: Arquivos LabTerm.

O chassi foi projetado considerando o peso do conjunto eletrônico e do conjunto de visão. Para reduzir o peso total foram feitos alguns cortes na base. Para suportar o Pan/Tilt, uma estrutura em arco foi construída. A Figura 6.12 mostra toda a estrutura mecânica montada, composta por conjunto motor, chassi e o Pan/Tilt.



Figura 6.12 – Conjunto de movimentação, chassi e Pan/Tilt montados. Fonte: Arquivos LabTerm.

6.3.3. Conjunto Eletrônico

O conjunto eletrônico, cuja configuração é mostrada de forma esquemática na Figura 6.13, é responsável pelo controle da movimentação e posicionamento do robô, do posicionamento das câmeras do conjunto de visão, e pela transmissão dos dados coletados pelas câmeras.

Um microprocessador PIC realiza a leitura de posição do encoder acoplado junto à engrenagem de uma das rodas motoras. Para redundância do controle de posição, alguns ímãs foram instalados nos espaçadores dos trilhos, há uma distância de 1,5m. Ao detectar a presença destes ímãs, o conjunto de controle é informado sobre a posição exata do robô, e pode fazer eventuais correções. O momento em que o robô inicia o ciclo de inspeções, e os pontos de parada para inspeção, são pré-programados e armazenados em um computador de bordo industrial, padrão PC/104. Este computador de bordo, modelo ARK-3399 fabricado

pela Advantech®, é responsável pela execução das rotinas de inspeção, assim como armazenar os dados coletados.

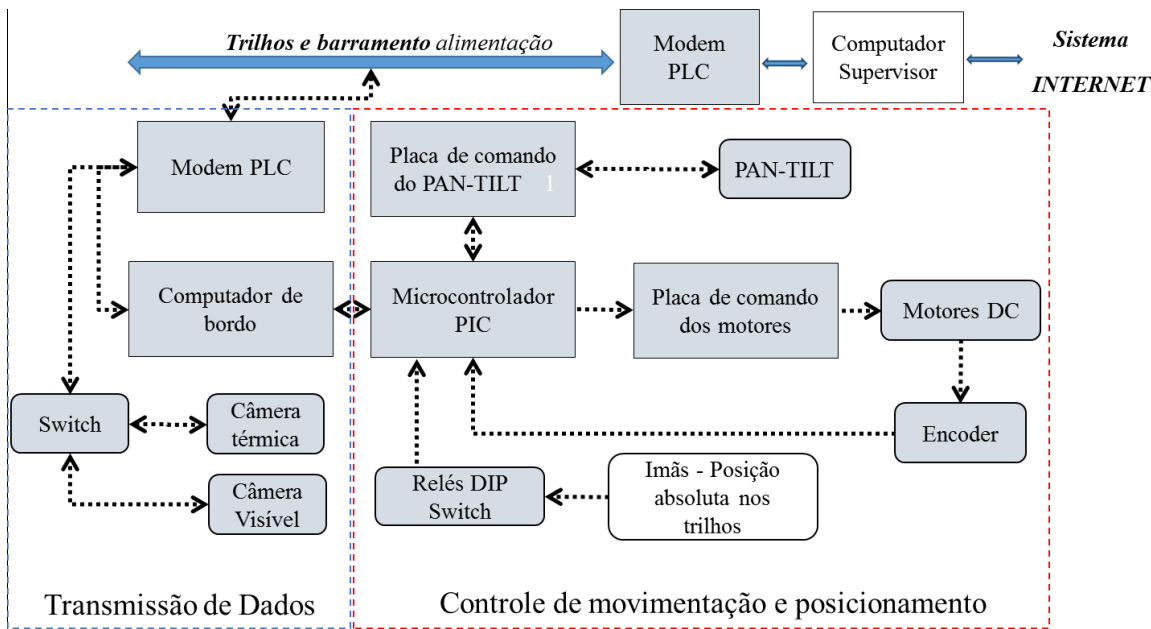


Figura 6.13 – Configuração do conjunto de controle. Fonte: Arquivos LabTerm.

A unidade de inspeção se comunica com um computador supervisor, localizado na subestação. A comunicação unidade/computador supervisor é feita através da própria rede elétrica, graças a utilização da tecnologia PLC (Power Line Communication) utilizada no projeto. Um modem PLC está embarcado na Unidade e outro no computador supervisor. Desta forma, são evitados problemas de interferência eletromagnética, além de eliminar a necessidade de repetidores de sinal, utilizados em distâncias maiores de transmissão, ou obstáculos ao sinal como paredes e lajes. O sistema pode ser acessado de forma remota, pela internet ou sistema interno, permitindo acesso às imagens das câmeras, ao controle da movimentação da unidade e do Pan/Tilt, conforme o fluxo de informações mostrado na Figura 6.14.



Figura 6.14 – A unidade de inspeção se comunica com a subestação, e esta permite ao centro de controle acessar todo o sistema, através da internet ou da rede interna. Fonte: Arquivos LabTerm.

6.3.4. Conjunto de Visão

O Conjunto de Visão é composto por uma câmera termográfica e uma câmera convencional. Estas câmeras são IP, que permitem acesso remoto direto. A câmera digital convencional, da marca Onvif®, é responsável pela captação da imagem no espectro do visível. A termocâmera Flir® A315 capta a radiação infravermelha. Esta termocâmera pode inspecionar superfícies com até 350°C (FLIR, 2016). As câmeras, mostradas na Figura 6.15 estão instaladas em uma estrutura montada junto ao Pan/Tilt. O Pan/Tilt utilizado é o modelo PT785 fabricado pela ServoCity®, com um servo motor acoplado ao Pan, que permite liberdade de movimento de 0° a 270° na horizontal, e outro servo motor acoplado ao Tilt, que permite liberdade de movimento de 0° a 180° na vertical.

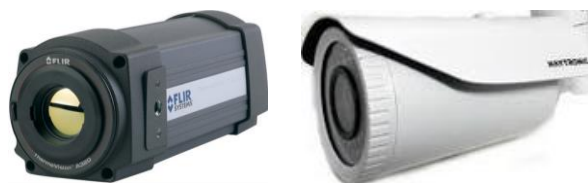


Figura 6.15 – Câmera termográfica Flir A315 e câmera IP, da marca Onvif, que compõem o conjunto de visão. Fonte: (FLIR, 2016).

6.4. Sistema Autônomo de Inspeção.

A medida que o robô foi sendo construído, algumas alterações necessárias foram realizadas. A construção da carenagem externa foi feita em acrílico. Um tubo duplamente revestido com alumínio foi utilizado para evitar a exposição dos cabos das câmeras à

interferências eletromagnéticas. Todo o conjunto eletrônico foi armazenado em uma caixa, com exceção das câmeras e dos sensores magnéticos, fabricada em AlSi₁₂, que garante resistência mecânica e proteção contra interferência de origem eletromagnética (ROLEC ENCLOSURES, 2016). A Figura 6.16 mostra o modelo tridimensional, suas medidas e uma imagem do robô construído.

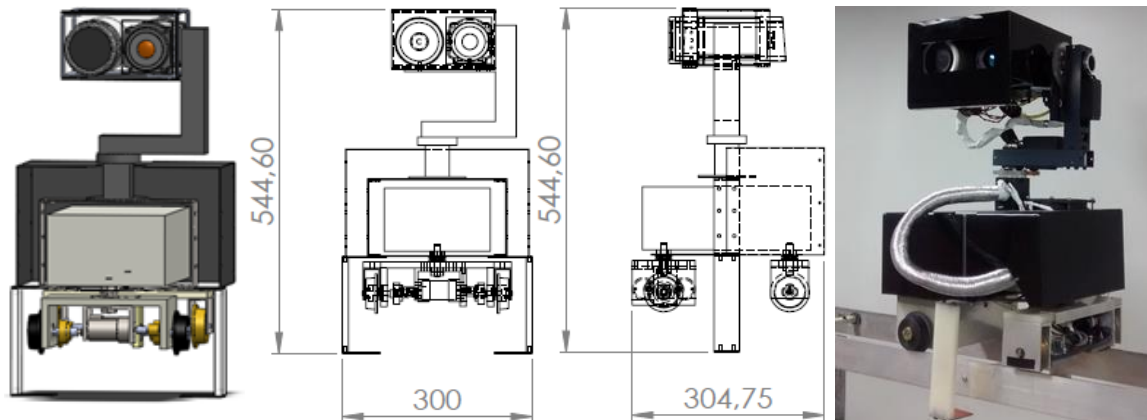


Figura 6.16 – Medidas do robô, em *mm* e imagem do projeto finalizado. Fonte: Arquivo LabTerm.

Na construção do Sistema, alguns componentes foram fabricados de forma manual, exclusivamente para este projeto. São eles: rodas, chassi, carenagem e a caixa das câmeras. O restante dos componentes foram adquiridos junto aos fornecedores locais. Aos trilhos, foram adicionados isoladores, fabricados em material epóxi, aos espaçadores, como forma de garantir uma redundância no isolamento, conforme a Figura 6.17, que mostra o desenho final da proposta do Sistema Autônomo de Inspeção. Tubos de PVC foram adicionados aos trilhos para fixação dos ímãs.

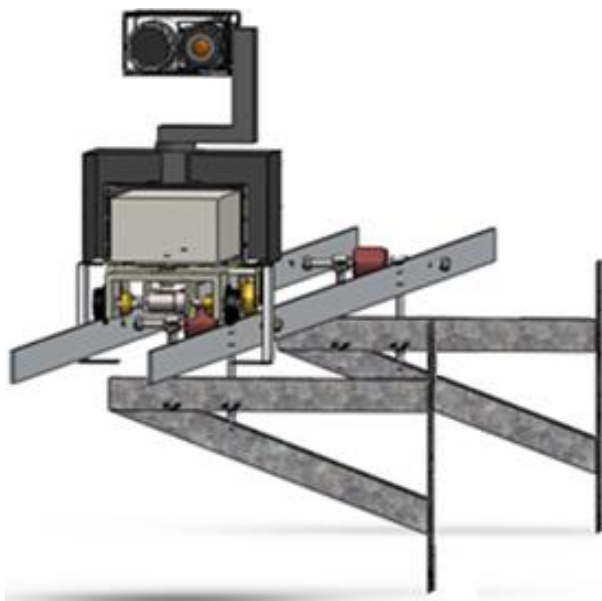


Figura 6.17 – Projeto virtual finalizado do Sistema Autônomo de Inspeção. Fonte: Arquivo LabTerm.

A instalação do sistema foi feita no laboratório de Termometria, mostrado na Figura 6.18, onde foram realizados os testes de movimentação inspeção e a validação do Sistema Autônomo de Inspeção. Os trilhos têm 4m de comprimento, e três mãos-francesas foram utilizadas para suporte.



Figura 6.18 – Versão final do Sistema Autônomo de Inspeção construído e instalado no Laboratório de Termometria da UFMG, onde foram realizados os testes de validação. Fonte: Arquivo LabTerm.

7. METODOLOGIA DOS TESTES REALIZADOS

Durante a finalização da construção do projeto foram elaboradas rotinas de testes para verificação do funcionamento adequado do Sistema Autônomo de Inspeção e validação da proposta de inspeção autônoma. Os testes foram realizados no LabTerm – Laboratório de Termometria da UFMG, que têm a estrutura necessária para testes de componentes do sistema elétrico.

7.1. Verificação de termocâmeras

Com o objetivo de estimar as incertezas intrínsecas associadas às termocâmeras, foram realizados testes de verificação com o auxílio de um corpo negro FLUKE 4181. Foram verificadas as câmeras Flir® SC660, de operação manual, e a Flir® A315, de monitoramento contínuo, conforme a metodologia proposta por (TEIXEIRA, 2012). A Tabela 7-1 apresenta algumas características destas termocâmeras. A Termocâmera FLIR SC660 é utilizada em situações onde é necessário informações mais acuradas sobre os itens inspecionados, já que possui alta resolução e alta sensibilidade térmica, e por isso foi desenvolvida para o ambiente de pesquisa (FLIR, 2010). A FLIR A315 foi projetada para ser utilizada em situações de monitoramento contínuo, e tem resolução e sensibilidade térmica menores que a SC660.

Tabela 7-1 – Características das termocâmeras. Fonte: (FLIR, 2010) (FLIR, 2016).

	SC660	A315
Resolução (pixels térmicos)	640x480 (alta resolução)	320x240
Sensibilidade térmica	< 30mK (alta sensibilidade)	< 50mK
Especificação de uso	Utilizada para fins de pesquisa	Utilizada para monitoramento contínuo
Comando	Manual	Computador

A Figura 7.1 mostra a bancada de verificação de termocâmeras configurada para a realização dos testes. Esta verificação consiste em configurar uma determinada temperatura no corpo negro, aguardar a estabilização, e então registrar imagens termográficas. A posição relativa entre as câmeras e o corpo negro deve variar de forma que a área de inspeção do corpo negro apareça em regiões diferentes da imagem térmica. Assim, pixels diferentes da matriz de sensores são verificados a cada posição. Em cada posição, registrou-se 5 termogramas com cada uma das termocâmeras, como mostrado na Figura 7.2. A verificação das termocâmeras seguiu os seguintes passos:

1. Climatização do laboratório (temperatura ambiente entre 20°C e 25°C);
2. Termocâmeras alinhadas na estrutura de posicionamento;
3. Estrutura de posicionamento fixada a 0,7m do corpo negro;
4. Configuração da temperatura no corpo negro (aguardando a estabilização):
 - a. Foram configuradas as temperaturas: 35°C, 50°C, 75°C e outros 9 pontos com intervalo de 25°C, até chegar a 300°C;
5. Registro de 5 imagens térmicas com a SC660;
6. Registro de 5 imagens térmicas com a A315.

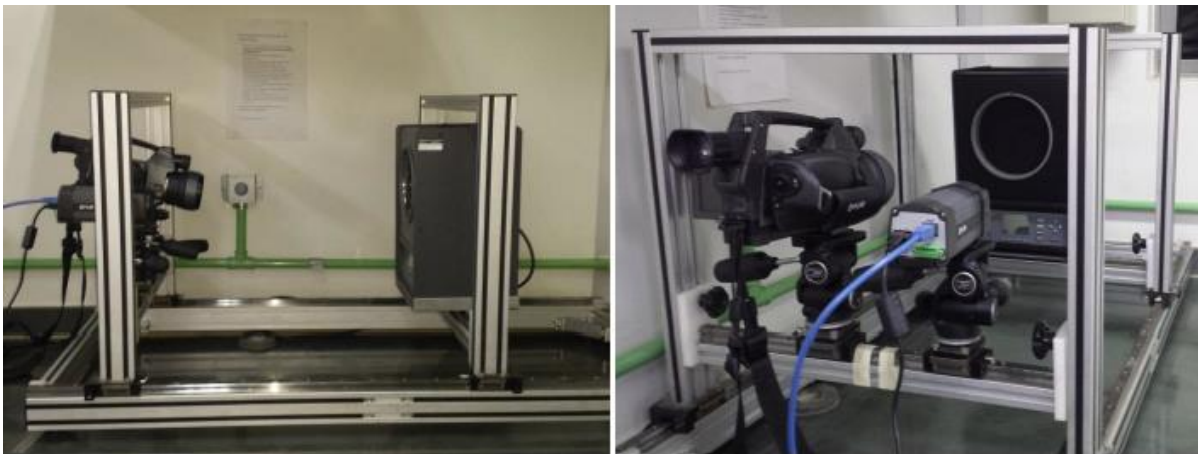


Figura 7.1 – Bancada para verificação de termocâmeras mostrando as termocâmeras Flir® SC660 e Flir® A315, e o corpo negro FLUKE 418. Fonte: (SILVA, 2015).

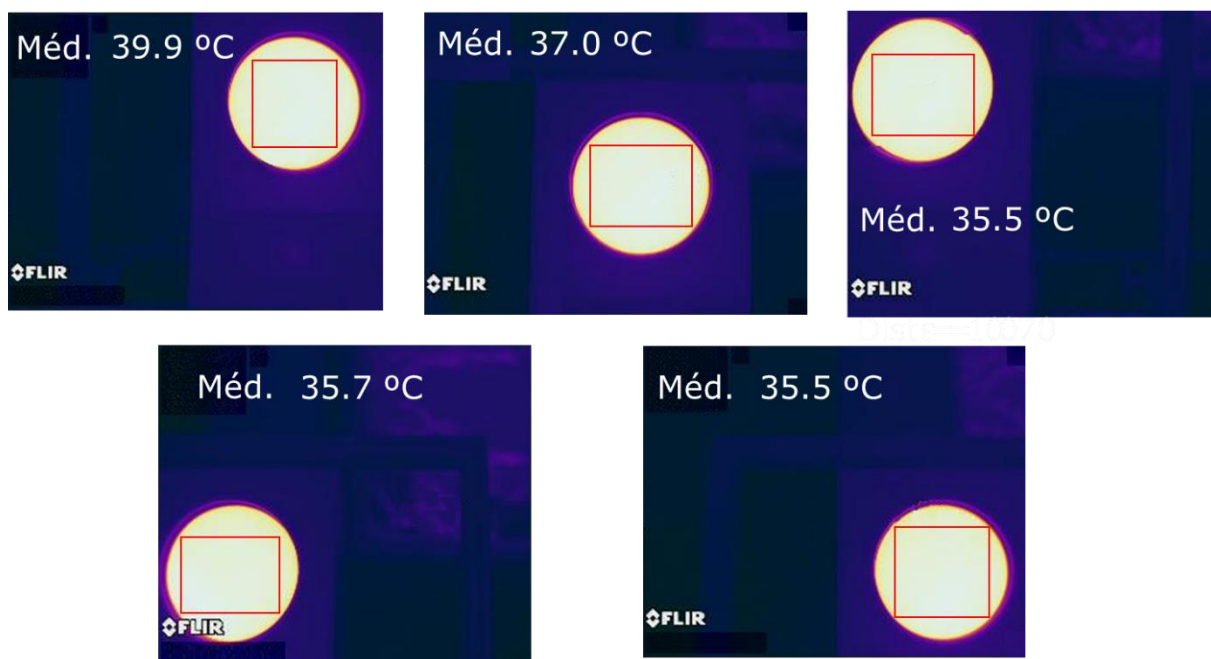


Figura 7.2 – Termogramas registrados pela SC660 durante a verificação. Em cada imagem, o corpo negro ocupa uma área diferente, para garantir a ampla verificação dos pixels da matriz de sensores. Adaptado: (SILVA, 2015).

7.2. Testes com equipamentos de subestação

A estrutura do LabTerm foi utilizada para montagem de um cenário que simule o ambiente de uma subestação de energia elétrica. A bancada de testes de circulação de corrente elétrica foi utilizada para montagem dos componentes, mostrada na Figura 7.3. Esta bancada conta com a mesa de testes e a fonte de corrente elétrica LET-1000-RD, fabricada pela EuroSMC®. Para registro da temperatura utilizou-se o DataLogger Agilent 24970A, onde foram instalados termopares do tipo K, e um computador para coleta das informações de temperatura. O Termohigrômetro de bancada, da marca Testo®, foi utilizado para monitoramento da temperatura ambiente e umidade do laboratório.

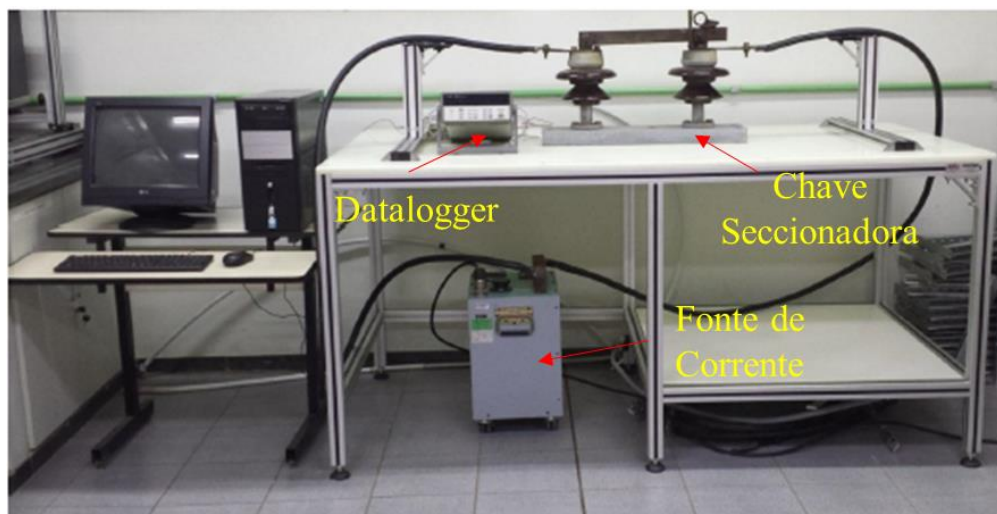


Figura 7.3 – Bancada de testes de circulação de corrente montada com uma chave seccionadora.

Adaptado de (SILVA, 2015).

Neste trabalho optou-se pela utilização de equipamentos que são comuns nas SEs. Foram testadas duas chaves seccionadoras, sendo uma retirada de linha por estar no fim da vida útil, e outra nova, nunca utilizada em uma instalação, e uma conexão do tipo H, muito utilizado nos cabos condutores instalados nos postes de rua e em SEs. Todos estes equipamentos são apresentados na Figura 7.4.



Figura 7.4 – Equipamentos utilizados nos ensaios de corrente. À esquerda, chave seccionadora antiga. Ao centro, chave seccionadora nova. À direita, conexão H. Adaptado de (SILVA, 2015).

Para efeitos de comparação entre a inspeção autônoma e a inspeção manual, além da termocâmera Flir® A315, foi utilizada a termocâmera Flir® SC660 para registro das imagens térmicas, sendo que esta última foi manipulada por dois operadores. A Figura 7.5 ilustra o posicionamento das câmeras durante as inspeções. As imagens foram registradas de três

distâncias diferentes, conforme a Tabela 7.2, sendo três imagens registradas por cada termocâmera em cada uma destas posições.

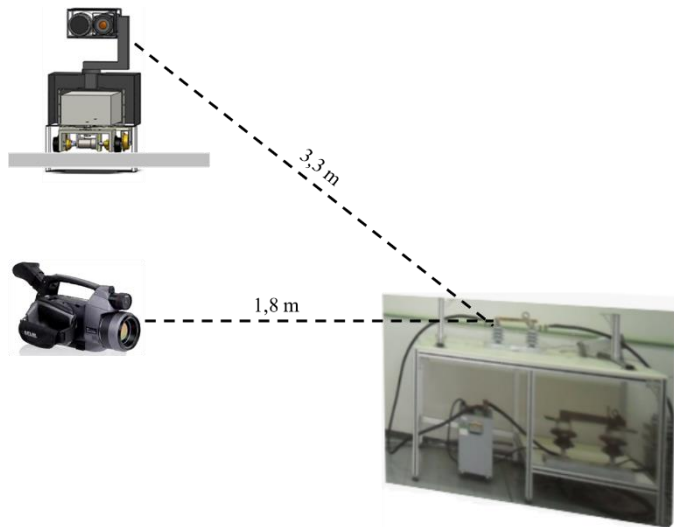


Figura 7.5 - Esquemático do posicionamento das câmeras durante as inspeções

Tabela 7-2 – Distâncias das termocâmeras ao equipamento inspecionado.

	A315 [m]	SC660 [m]
Posição 1	3,3	1,8
Posição 2	4,2	3,3
Posição 3	5,5	4,8

Os testes foram executados conforme as orientações contidas no fluxograma da Figura 7.6. Após a montagem entrar em regime permanente, as imagens devem ser registradas com as termocâmeras SC660 e a A315, e todos os dados registrados.

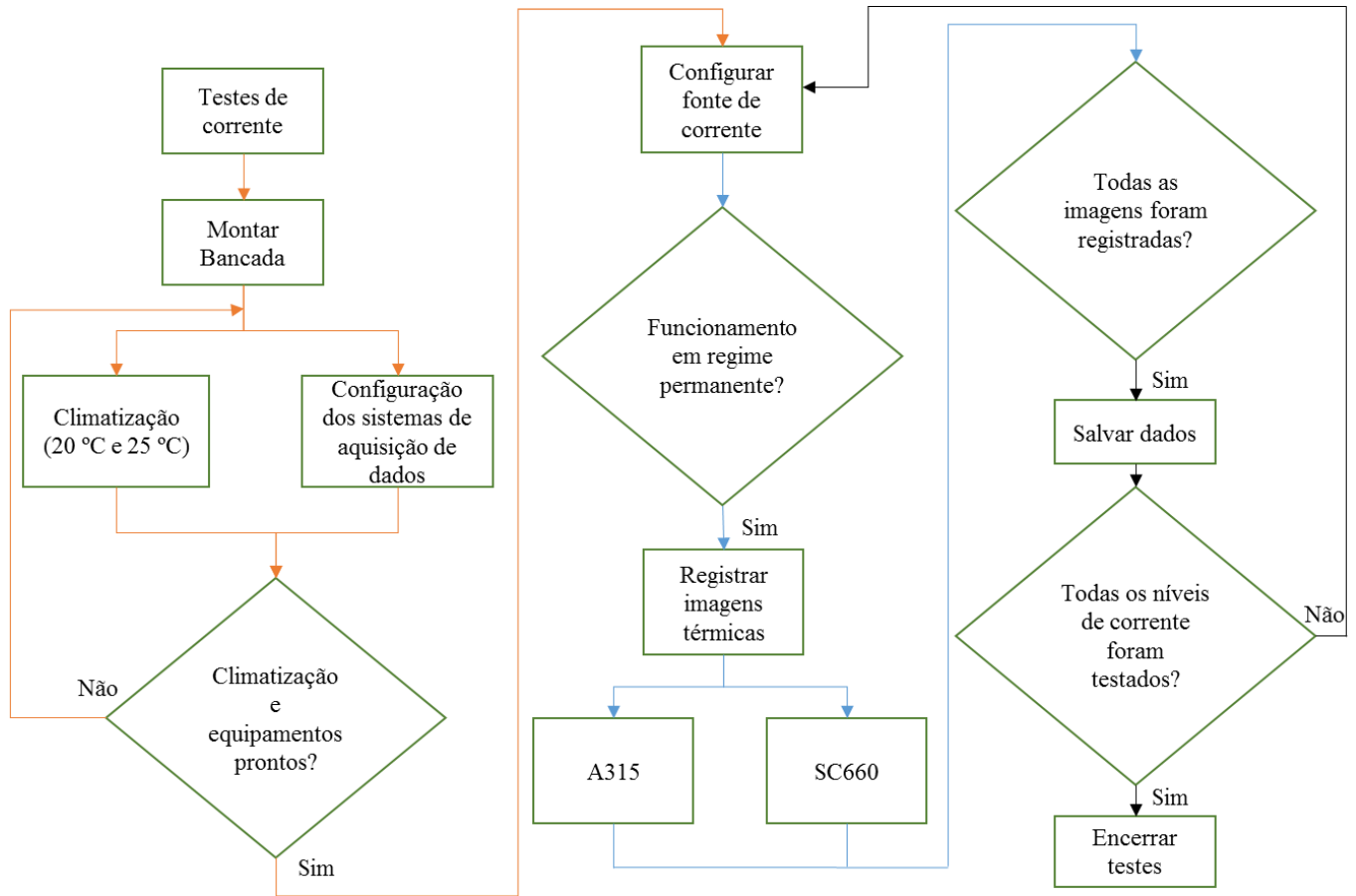


Figura 7.6 – Fluxograma com o esquema de execução dos testes de corrente. A primeira coluna se refere a preparação da estrutura, a segunda e a terceira coluna se refere ao registro das imagens. O caminho preto se refere aos níveis de corrente elétrica testados.

As emissividades das superfícies das áreas de interesse de cada um dos equipamentos foram obtidas pelo método de comparação utilizando a fita isolante. Este método consiste em aplicar uma fita adesiva de emissividade conhecida na superfície do objeto de interesse. Com a termocâmara posicionada, obtêm-se a indicação da temperatura sobre a fita. Na sequência, a termocâmara é configurada para obter a indicação de temperatura da região adjacente à fita adesiva, e então altera-se a emissividade até a indicação de temperatura desta região ser igual a indicação da temperatura sobre a fita. As emissividades encontradas estão apresentadas na Tabela 7.3.

Tabela 7-3 – Valores de Emissividade obtidos.

Equipamento	ϵ
Seccionadora Antiga	0,81
Seccionadora Nova	0,30
Conexão H	0,20

7.3. Testes de deslocamento

Para verificar a performance do controle de posicionamento do robô, foram executados testes de movimentação sobre os trilhos. Foram estabelecidos cinco marcos de posição, cada um equivalente à uma determinada quantidade de pulsos sentidos pelo sensor encoder. O primeiro foi chamado de “ponto de base”, e equivale a 90 pulsos. Todos os pontos e suas respectivas posições estão mostrados na Tabela 7.4.

Tabela 7-4 – Posições definidas sobre os trilhos.

Ponto	Posição [pulsos]
Base	90
1	200
2	320
3	450
4	580

No trajeto de ida, o veículo parte do ponto base e se locomove até o ponto 1, onde faz uma parada. Essa programação se repete pelos demais pontos até chegar ao ponto 4. No trajeto de volta, o veículo parte do ponto 4 direto para o ponto de base, sem outras paradas. Em toda parada foi registrado o número de pulsos percebido pelo sensor durante o deslocamento. A diferença entre a quantidade de pulsos da referência do ponto e a quantidade de pulsos percebidos pelo encoder foi a métrica utilizada para avaliar a performance.

7.4. Programação da rotina de inspeções

Para validar as funcionalidades do Sistema Autônomo de Inspeção, foram programadas rotinas de inspeções em equipamentos posicionados no LabTerm, conforme mostra a Figura 7.7.



Figura 7.7 – Cenário montado no LabTerm para execução das inspeções. A esquerda o robô sobre os trilhos afixados na parede, com a bancada de testes de corrente ao fundo e os para-raios montados a esquerda.

Sobre a bancada de testes de circulação de corrente elétrica, foram montados os equipamentos mostrados na Figura 7.4, um por vez. Posicionados ao lado direito, uma estrutura de sustentação com três para-raios montados em linha.

Para poder controlar o deslocamento do veículo sobre os trilhos, estabelecer os pontos de parada e o reconhecimento dos ativos, foi desenvolvida uma interface para navegação e comando do sistema. Esta interface, mostrada na Figura 7.8, tem visual semelhante ao de um *joystick*. Através dela é possível comandar o veículo até a posição desejada, e então movimentar o Pan/Tilt.



Figura 7.8 – Tela de controle de movimentação do veículo e posicionamento do Pan/Tilt.

Após a movimentação do robô, é necessário enquadrar os ativos, e confirmar o reconhecimento destes, como mostrado na Figura 7.9. Esta plataforma de controle está instalada no computador de bordo do veículo, e pode ser acessada pela rede através do software TeamViewer®. Após a programação desta rotina, o Sistema executa de forma autônoma as inspeções nos equipamentos nos horários programados.



Figura 7.9 – Reconhecimento do ativo, com a área selecionada para obtenção das temperaturas.

7.4.1. Simulação das inspeções

O cenário da Figura 7.7 foi utilizado durante as simulações das inspeções autônomas, que seguiram os seguintes passos:

- 1) O robô parte do ponto base;
- 2) percorre 2000 mm e faz a parada neste ponto;
- 3) focalização dos dois pontos de inspeção no ativo sobre a bancada, e mais um ponto de inspeção no para-raios;
- 4) As imagens térmicas e os dados de temperatura são armazenados.

O objetivo destas simulações é verificar o funcionamento do robô, enquanto alternativa para o monitoramento autônomo de subestações, e o desempenho dos conjuntos de controle, movimentação e visão.

8. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA

Para que os objetivos estabelecidos no início do projeto sejam satisfeitos, o Sistema deve realizar inspeções autônomas programadas nos equipamentos de subestações. Neste capítulo serão abordados os detalhes do desempenho quanto a avaliação da temperatura superficial dos equipamentos, o deslocamento do sistema a partir da programação da rotina de inspeção e capacidade do sistema de operar inspeções autônomas e disponibilizar os resultados.

8.1. Análise da incerteza da inspeção termográfica

Para obtenção da incerteza associada ao resultado de medição, foram estimados os valores de cada componente da incerteza através da verificação das termocâmeras, para obtenção da incerteza intrínseca, detalhado na seção 7.1, e dos testes com os equipamentos de subestações, para obtenção da incerteza extrínseca, detalhados na seção 7.2.

8.1.1. Componentes da incerteza Intrínseca

Fazendo a análise das imagens térmicas coletadas durante a verificação das termocâmeras, com as imagens mostradas na Figura 7.2, foi possível calcular o Mínimo Erro – *ME* apresentado pelas termocâmeras utilizando a Equação 3.4. Os valores do ME médio obtidos são mostrados na Tabela 8-1.

Tabela 8-1 – Valores do Mínimo Erro médio para cada termocâmera. Adaptado de (SILVA, 2015).

ME médio [K]	
A315	1,67
SC660	0,37

O cálculo da Resolução Digital da Temperatura – *DTR*, feito conforme a Equação 3.9, considerou que os conversores A/D das termocâmeras FLIR têm pelo menos 8 bits,

estratégia mais conservadora de análise, visto que os valores específicos de bits não são disponibilizados. Os valores da DTR são mostrados na Tabela 8-2.

Tabela 8-2 – Incerteza associada a DTR. Adaptado de (SILVA, 2015).

	Amplitude de Temperatura [K]	DTR [K]
A315	273 – 673	1,367
SC660	273 – 773	1,953

A Repetitividade – *RE* foi calculada para cada temperatura testada, a partir da Equação 3.7, como sendo o próprio desvio padrão da temperatura média indicada por cada termocâmara, conforme valores mostrados na Tabela 8.3.

Tabela 8-3 – Repetitividade das temperaturas analisadas. Adaptado de (SILVA, 2015).

Temperatura [K]	A315 [K]	SC660 [K]
308,15	0,084	0,045
323,15	0,055	0,089
348,15	0,055	0,045
373,15	0,045	0,064
398,15	0,055	0,045
423,15	0,045	0,045
448,15	0,089	0,058
473,15	0,045	0,084
498,15	0,055	0,045
523,15	0,055	0,045
548,15	0,071	0,071
573,15	0,055	0,055

Para determinar a Uniformidade de Medição – *UM*, foram registrados termogramas com o corpo negro ocupando diferentes posições no campo de visão das termocâmeras, como mostrado na Figura 7.2. A *UM* foi calculada utilizando a Equação 3.10 e a incerteza associada, dada pelo desvio padrão, pela Equação 3.11. Com o intuito de adotar uma posição mais conservadora, para cada termocâmara foram adotados os maiores valores de *UM*, mostrados na Tabela 8.4.

Tabela 8-4 – Valores adotados para a Uniformidade de Medição. Adaptado de (SILVA, 2015).

Termocâmara	UM _{max} [K]
A315	0,318
SC660	0,202

Para finalizar o cálculo da incerteza intrínseca é necessário levar em conta o erro gerado por Ruído – NGE, que é informado nos manuais dos equipamentos como sensibilidade térmica ou NETD. Os valores utilizados são mostrados na Tabela 8-5.

Tabela 8-5 – Valores de NGE obtidos nos manuais das termocâmeras. Fonte: (FLIR, 2016).

Termocâmara	NGE [mK]
A315	50
SC660	30

8.1.2. Componentes da incerteza extrínseca

Os testes com os componentes de subestação, detalhados na seção 7.2, foram utilizados para simulação das condições de inspeção e para análise da incerteza de medição das inspeções, comparando o resultado da inspeção autônoma simulada e da inspeção manual. A interface preliminar de visualização, mostrada na Figura 8.1, foi desenvolvida para captar as informações das câmeras do conjunto de visão do robô.



Figura 8.1 – Interface utilizada para captação das imagens do conjunto de visão.

As imagens apresentadas na Figura 8.2, Figura 8.3 e Figura 8.5 são exemplares dos termogramas captados pela SC660, que também mostram os parâmetros da inspeção, e pela A315 durante a realização dos testes. Os dados de temperatura utilizados para o cálculo da incerteza foram extraídos destas imagens. A Tabela 7-2 mostra as distâncias das posições de registro das imagens.

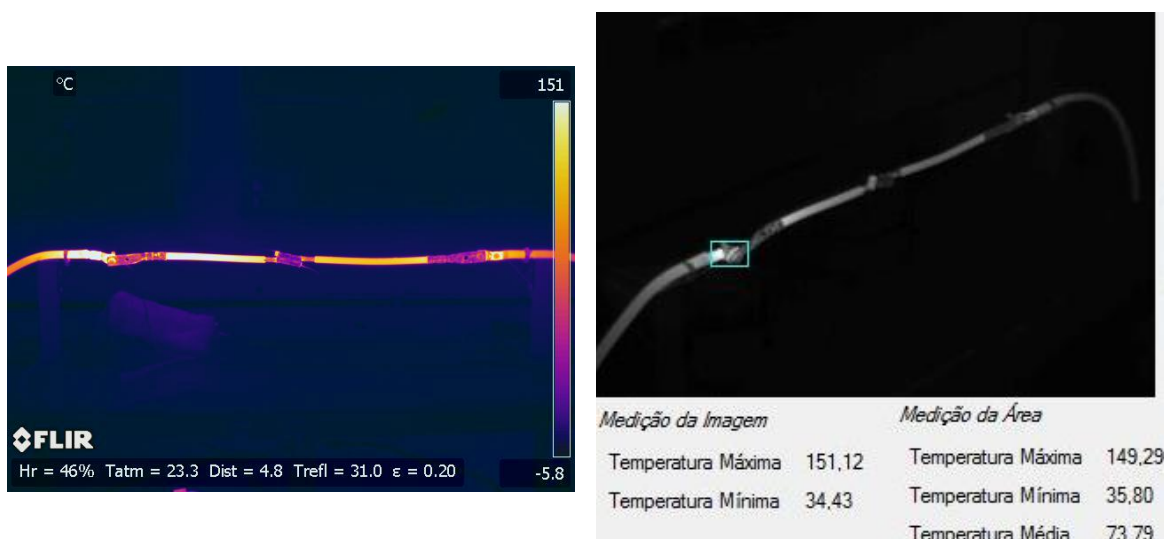


Figura 8.2 - Imagens da conexão H registrados da posição 1. À esquerda, a imagem registrada pela SC660 e à direita, as imagens registradas pela A315.



Figura 8.3 - Imagens da chave seccionadora nova registradas da posição 2. À esquerda, a imagem registrada pela SC660 e à direita, as imagens registradas pela A315.

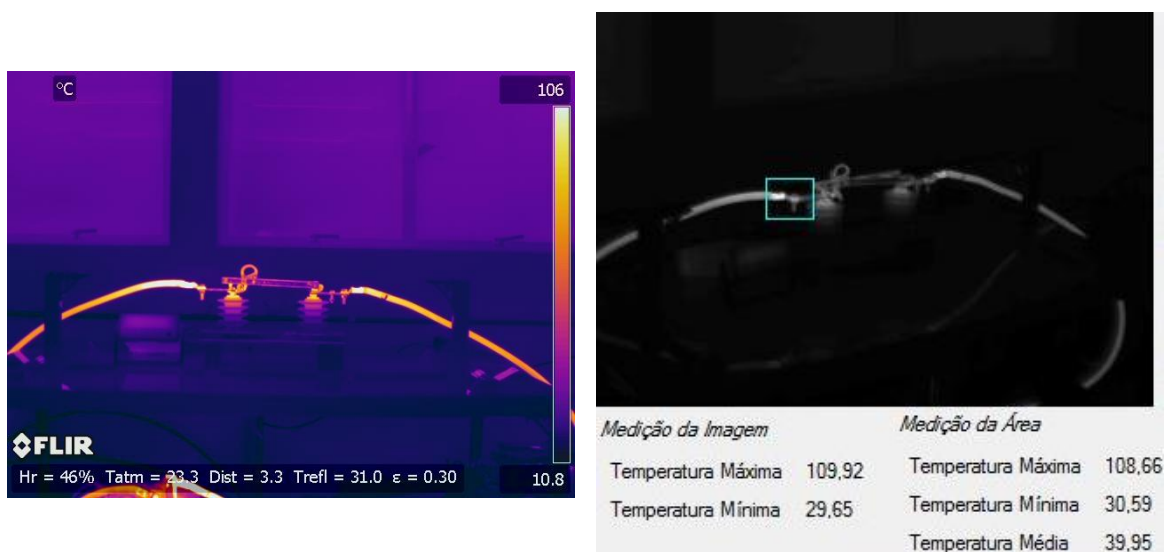


Figura 8.4 –Imagens da chave seccionadora antiga registradas da posição 3. À esquerda, a imagem registrada pela SC660 e à direita, as imagens registradas pela A315.

O ANEXO D contém algumas das tabelas utilizadas para obtenção da incerteza padrão expandida, com base nas orientações do GUM e da pesquisa de Teixeira (2012). As incertezas associadas à temperatura ambiente, temperatura refletida e distância, estão apresentadas na Tabela 8-6. As termocâmeras foram configuradas com os mesmos parâmetros de emissividade, temperatura ambiente, temperatura refletida, distância e umidade. Como a análise foi feita com base em áreas selecionadas nas imagens térmicas, optou-se por trabalhar com a temperatura máxima registrada nesta área.

Tabela 8-6 – Valores das faixas de incerteza dos componentes da incerteza extrínseca utilizadas nos cálculos da incerteza do resultado das inspeções termográficas.

Parâmetro	Faixa de incerteza
Temperatura ambiente	± 1 °C
Temperatura refletida	± 1 °C
Distância	$\pm 0,1$ m

Optou-se por apresentar os dados para os ensaios com corrente de 500 A, para as chaves seccionadoras, e de 200 A para a conexão H, por apresentarem valores de temperatura com maior amplitude, e por consequência, maior dispersão nos resultados em cada uma das posições mencionadas na Tabela 7.2.

A Figura 8.5, a Figura 8.6 e a Figura 8.7 mostram os gráficos com os valores de temperatura identificados para a chave seccionadora usada, a chave seccionadora nova e a conexão H, respectivamente, com a incerteza padrão expandida obtida em cada situação. A Tabela 8-7 apresenta estas informações em formato numérico.

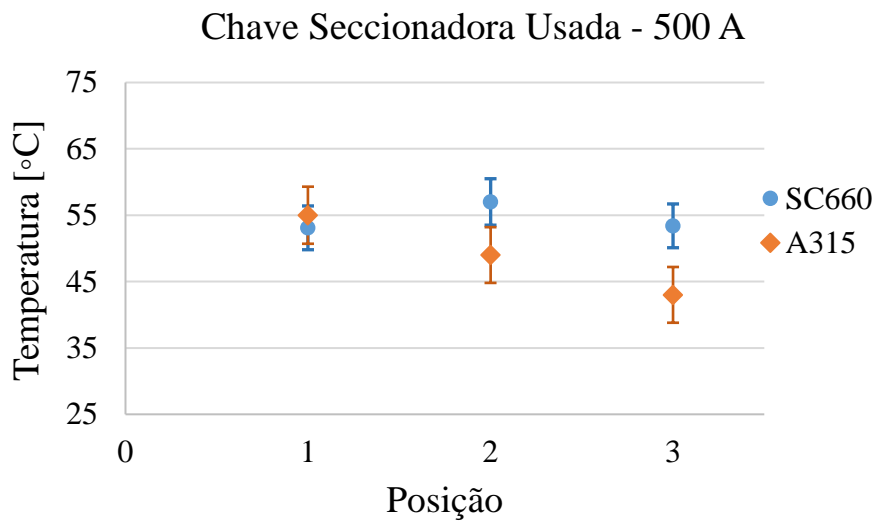


Figura 8.5 – Indicações da temperatura máxima e incerteza para a chave seccionadora usada com circulação de corrente de 500 A.

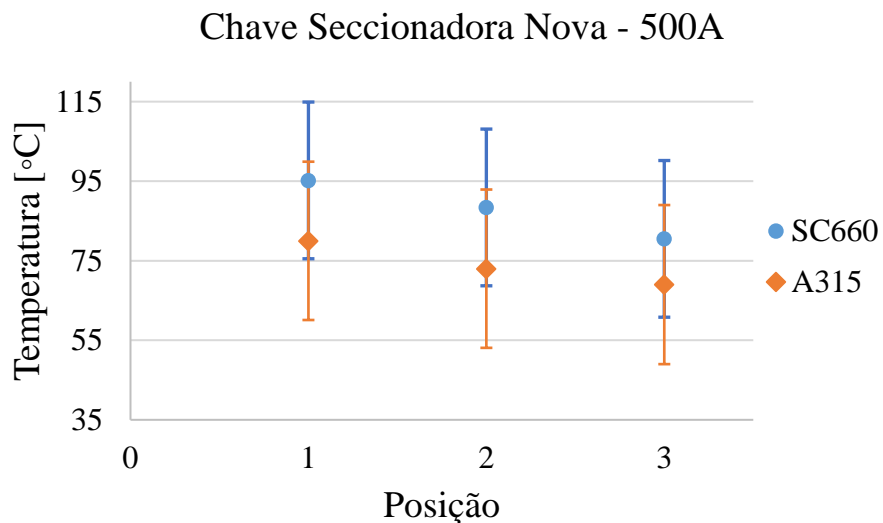


Figura 8.6 – Indicações da temperatura máxima e incerteza para a chave seccionadora nova com circulação de corrente de 500 A.

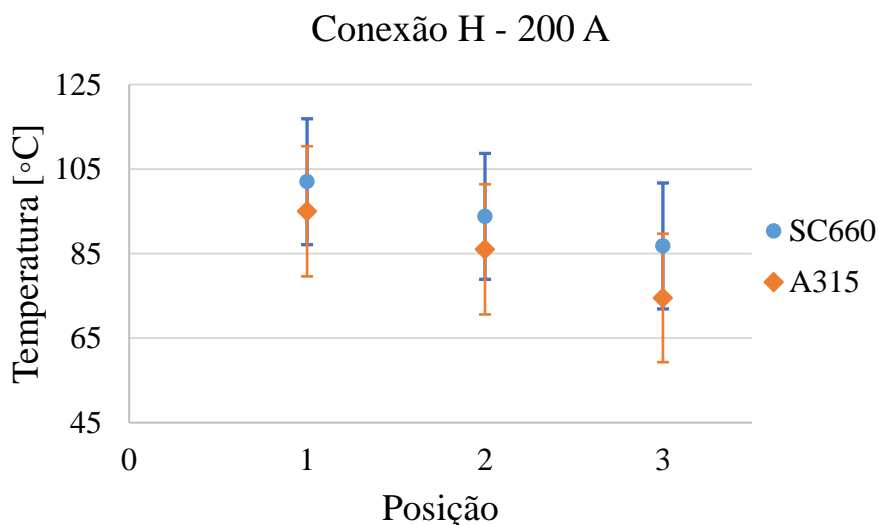


Figura 8.7 – Indicações da temperatura máxima e incerteza para a conexão H com corrente de 200 A.

Tabela 8-7 – Indicações de temperatura e faixas de incerteza obtidas após a análise do resultado das inspeções termográficas realizadas durante os testes de corrente elétrica.

	Posição	Seccionadora Antiga		Seccionadora Nova		Conexão H	
		Indicação [°C]	Incerteza [°C]	Indicação [°C]	Incerteza [°C]	Indicação [°C]	Incerteza [°C]
SC660	1	53,1	3,3	95,2	22,4	102,0	12,3
	2	57,0	3,5	88,4	21,4	93,8	13,6
	3	53,4	3,3	80,5	20,8	86,8	14,9
A315	1	55,2	4,3	80,0	20,3	95,0	12,2
	2	49,3	4,2	69,5	17	86,0	12,2
	3	43,5	4,2	70,0	17,2	74,5	13,8

Pode-se observar uma tendência de queda nas indicações de temperatura de ambas as termocâmeras, que ocorre a medida que a distância entre a termocâmera e o equipamento inspecionado aumenta. Uma possível causa é o fato de se trabalhar com a temperatura máxima da área selecionada ao redor do componente na imagem térmica. A temperatura máxima é utilizada como referência por ser captada da superfície do componente sob inspeção, e não do restante do cenário englobado pela área selecionada., já que este componente está a uma temperatura mais elevada que o restante do ambiente.

O valor da incerteza varia pouco, conforme a Tabela 8.8, independente do equipamento inspecionado. Isto indica que a variação da distância não é contribuição

relevante para a mudança da incerteza do Sistema. A incerteza é proporcional a temperatura de cada indicação, por isso as indicações maiores têm incertezas associadas maiores.

Tabela 8-8 – Valores percentuais relativos da incerteza de medição considerando os valores apresentados na

Tabela 8-7.

	Posição	Seccionadora Antiga	Seccionadora Nova	Conexão H
SC660	1	6,2%	23,5%	12,1%
	2	6,1%	24,2%	14,5%
	3	6,2%	25,8%	17,2%
Desvio Médio		0,0%	0,9%	1,7%
A315	1	7,8%	25,4%	12,8%
	2	8,5%	24,5%	14,3%
	3	9,7%	24,6%	18,5%
Desvio Médio		0,7%	0,4%	2,2%

As indicações da termocâmara A315 tem maior variação com o aumento da distância, como na Figura 8.3, onde é possível verificar que não existe interseção entre as faixas de incerteza para as inspeções 2 e 3 da chave seccionadora antiga. Neste caso, como a incerteza associada quase não varia, uma razão pode ser a falta de exatidão da área selecionada no termograma para obtenção da indicação de temperatura. Esta funcionalidade do sistema pode ser trabalhada para melhora da confiabilidade dos resultados. A chave seccionadora nova, que tem a menor emissividade, tem os maiores valores relativos de incerteza.

8.2. Testes de posicionamento

Para o cálculo do erro percentual relativo de posicionamento foi utilizada a Equação 8.1. O erro de posicionamento do trajeto de volta é calculado entre o ponto 1 e o ponto base, e não entre o ponto 4 e o ponto base.

$$Erro \% = \frac{Pulsos\ do\ ponto - Pulsos\ percebidos}{(Pulsos\ do\ ponto_n - Pulsos\ do\ ponto_{n-1})} \cdot 100\% \quad (Eq. 8.1)$$

Ao todo, foram realizados 22 testes de deslocamentos do veículo. A Figura 8.8 mostra o gráfico do erro percentual relativo de posicionamento em função do teste de deslocamento realizado. O erro máximo observado nos trajetos de ida foi de aproximadamente 6%, observado no deslocamento do ponto 3 para o ponto 4. No trajeto de volta é possível perceber uma estabilização do erro relativo em aproximadamente 2%. Os erros observados, tanto nos trajetos mais curtos quanto no trajeto maior, são relativamente baixos.

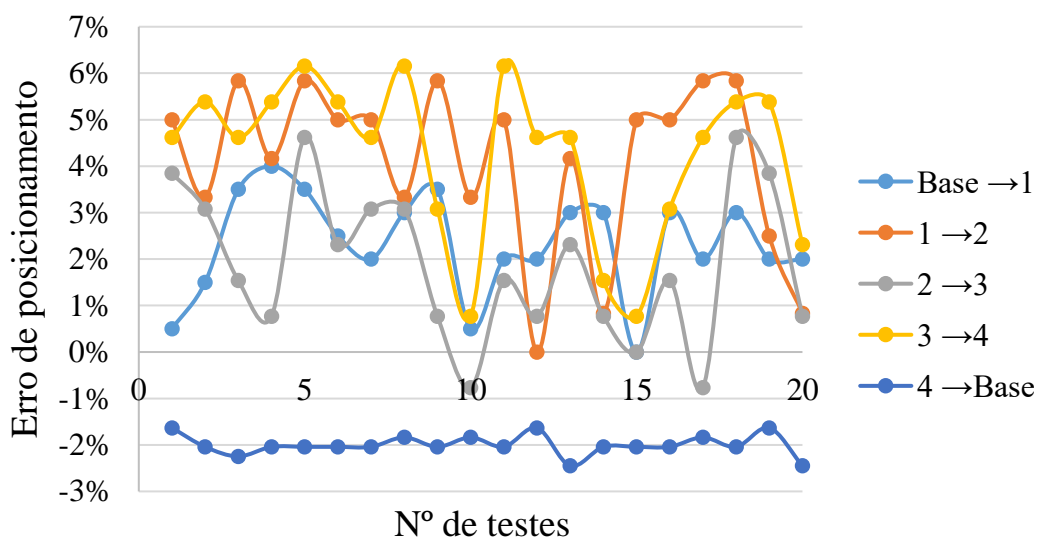


Figura 8.8 – Erro percentual relativo em função dos deslocamentos.

8.3. Inspeções simuladas

Após a finalização completa do Sistema Autônomo de Inspeção, incluindo a montagem da carenagem, do conjunto de visão e das interfaces de software, o sistema foi intensamente testado. Sobre a bancada de testes de circulação de corrente elétrica, foram montados os equipamentos mostrados na Figura 7.4, um por vez. Posicionados ao lado direito, uma estrutura de sustentação com três para-raios montados em linha, conforme a Figura 7.7.

As imagens resultantes das inspeções estão mostradas na Figura 8.9, Figura 8.10 e Figura 8.11 se referem a inspeção realizada no cenário com a chave seccionadora usada, a Figura 8.12, Figura 8.13 e Figura 8.14 se referem a inspeção realizada no cenário com a chave

seccionadora nova, e por fim, a Figura 8.15, Figura 8.16 e Figura 8.17 se referem a inspeção realizada no cenário com a conexão H. O sistema foi capaz de realizar as inspeções de forma autônoma, conforme a programação implementada. As temperaturas máximas, mínimas e médias indicadas se referem a área selecionada na imagem e levam em conta a emissividade informada para cada ativo.

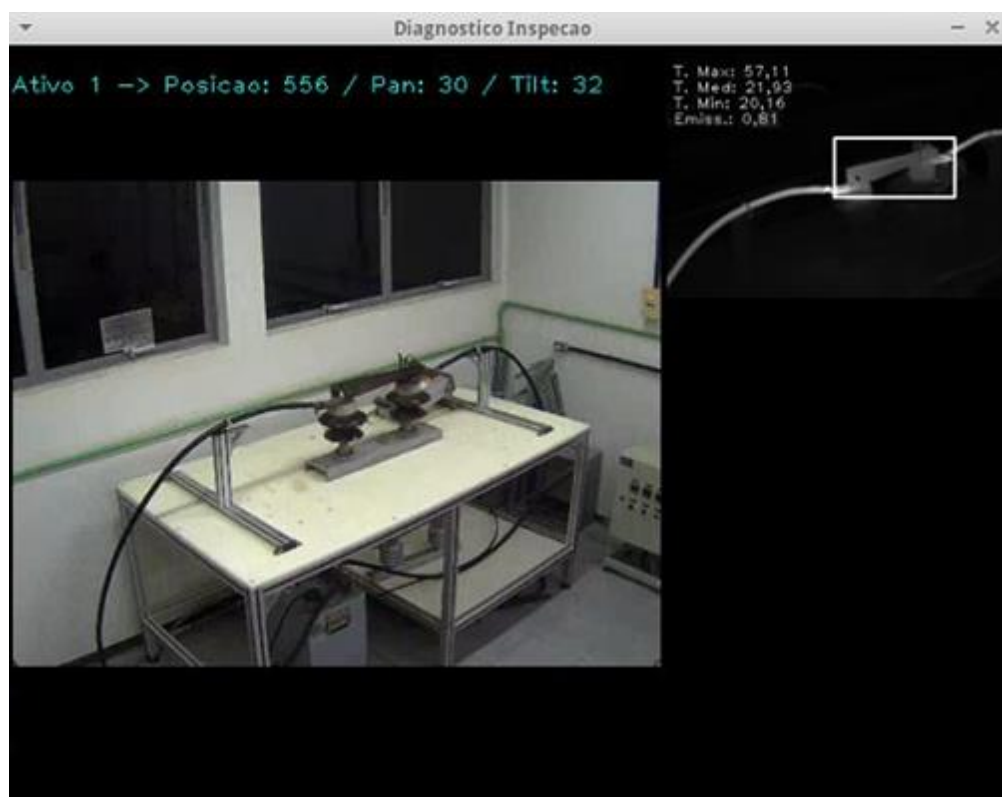


Figura 8.9 – Primeiro ponto de inspeção englobando toda a chave seccionadora usada.

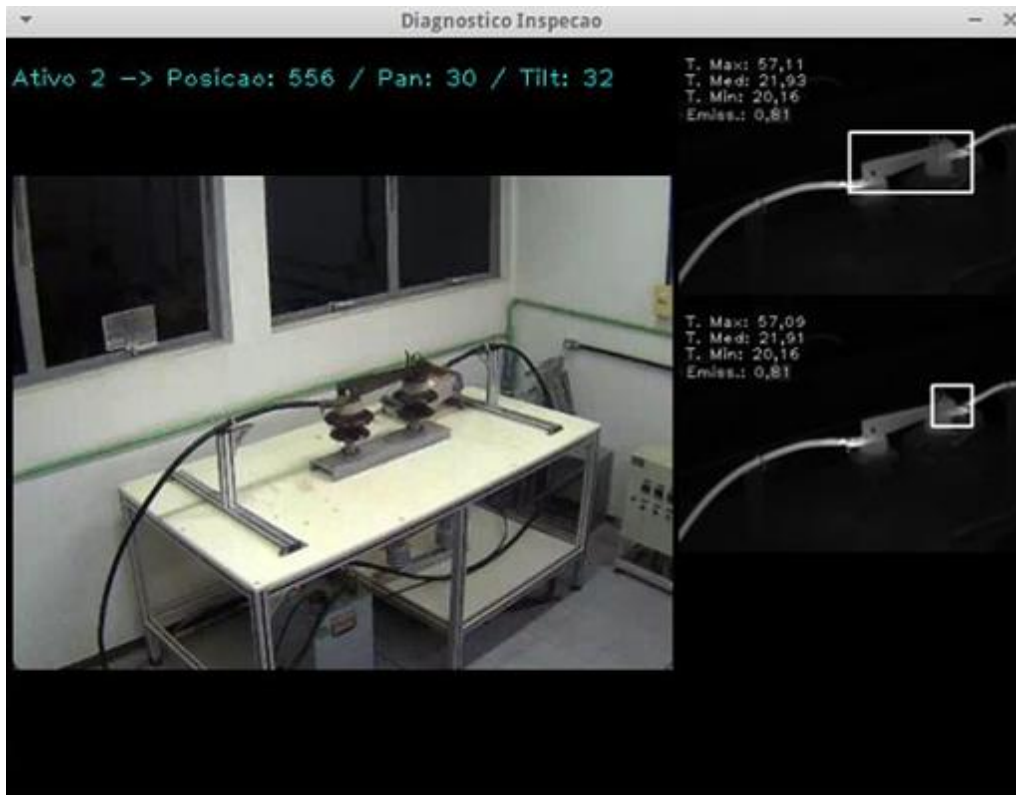


Figura 8.10 – Segundo ponto de inspeção na chave seccionadora usada, focando no ponto de contato.



Figura 8.11 – Terceiro ponto de inspeção, focando no para-raios central.

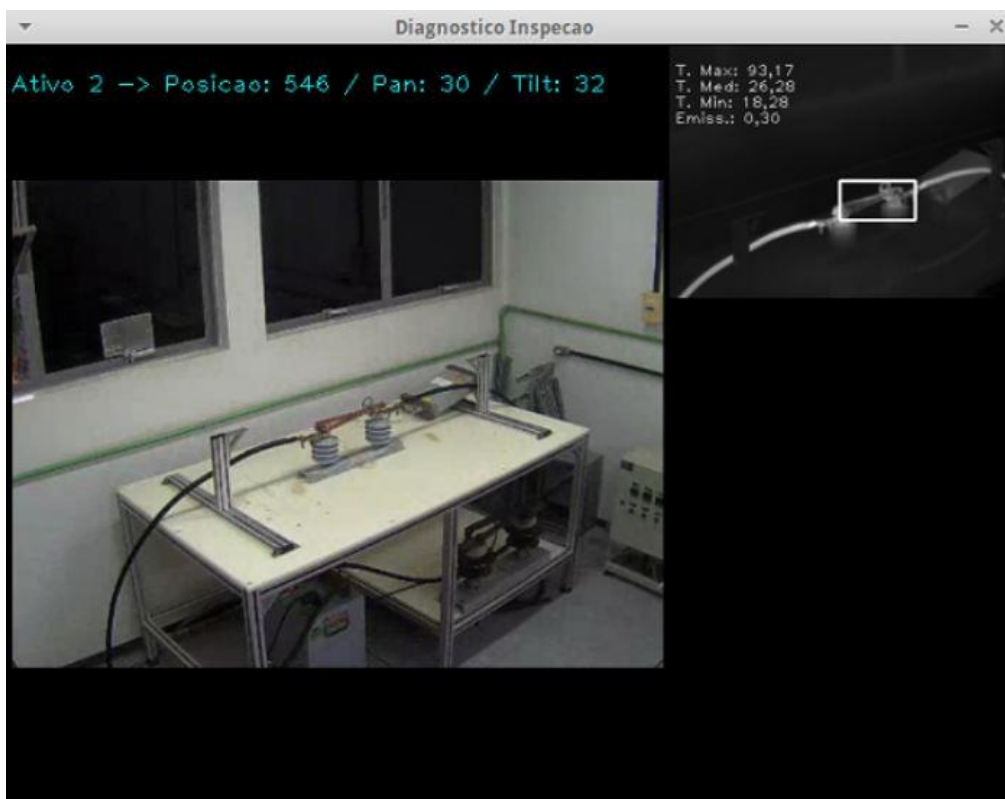


Figura 8.12 – Primeiro ponto de inspeção englobando toda a chave seccionadora nova.

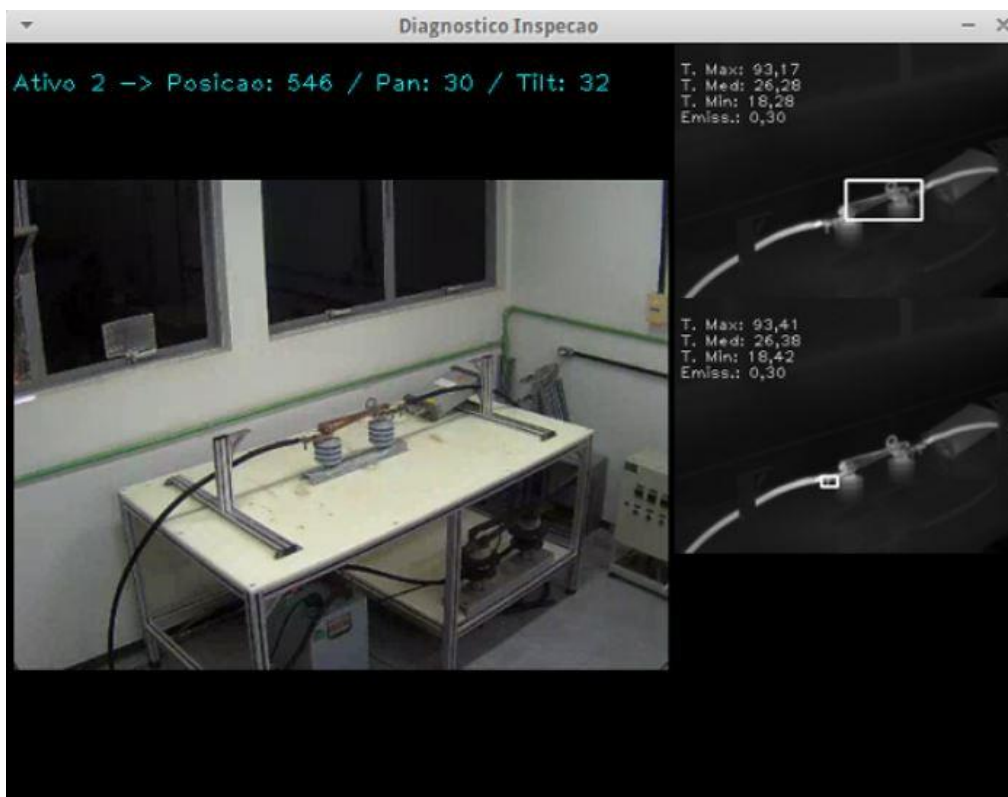


Figura 8.13 – Segundo ponto de inspeção na chave seccionadora nova, focando na conexão com o cabo.

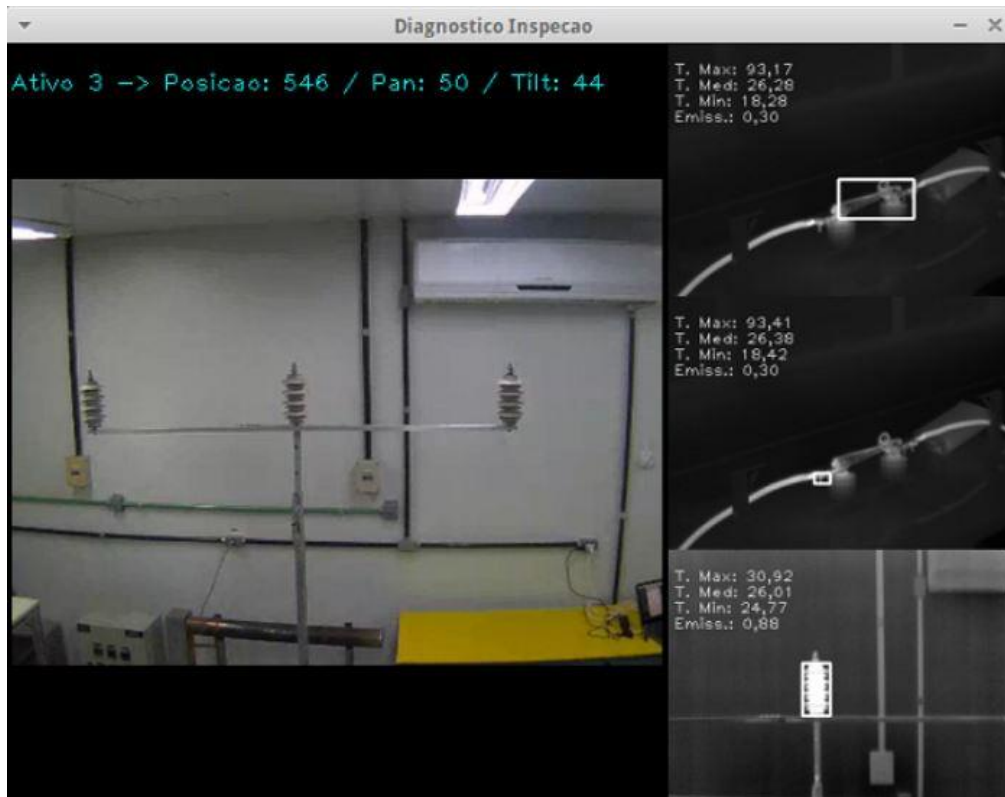


Figura 8.14 – Terceiro ponto de inspeção desta rotina, focando no para-raios central.



Figura 8.15 – Primeiro ponto de inspeção englobando a conexão H.

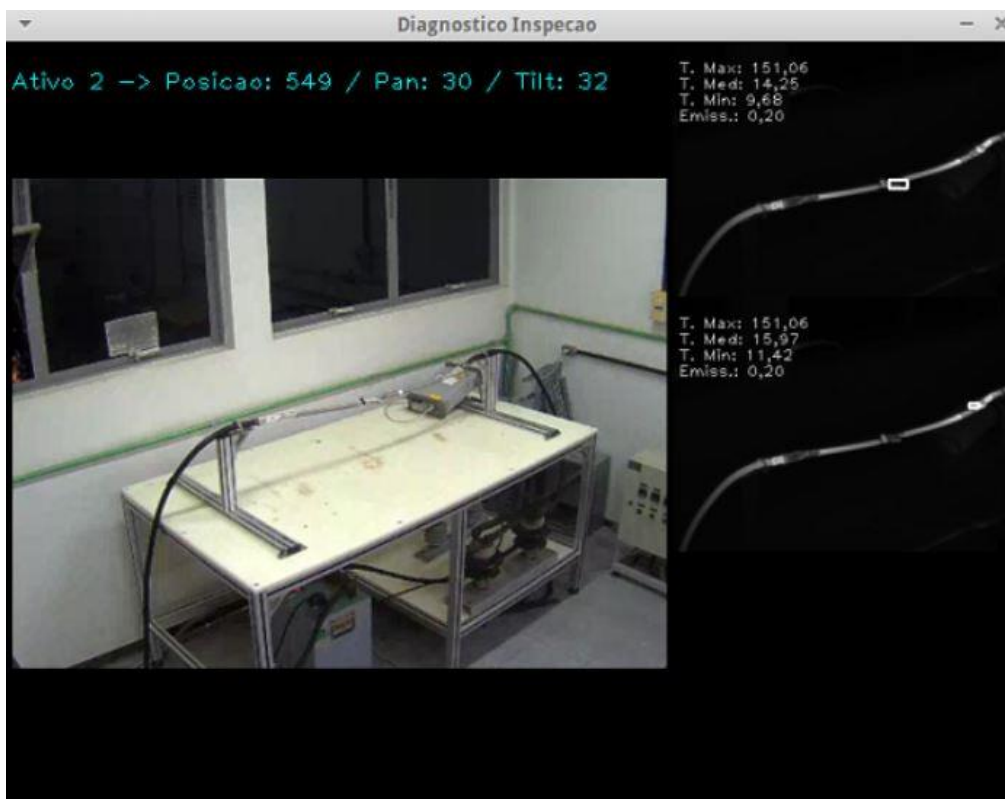


Figura 8.16 – Segundo ponto de inspeção englobando, focando na conexão com o cabo.



Figura 8.17 – Terceiro ponto da inspeção, focando no para-raios central.

8.4. Desempenho do Sistema

Os testes apresentados no Capítulo 7 foram realizados para avaliação do desempenho do Sistema, que para ser validado, deve realizar as inspeções de forma autônoma e satisfatória. O Sistema atende aos objetivos estabelecidos na sua concepção:

- Isolamento elétrico da estrutura de fixação;
- Movimentação sobre trilhos;
- Energia conduzida pelos trilhos;
- Transmissão de dados pelos trilhos;
- Realização das inspeções autônomas, nos pontos de inspeção pré-definidos, conforme a programação implementada.

A identificação dos componentes é uma característica que pode ser trabalhada para que haja melhora da confiabilidade do sistema, tornando os valores das indicações de temperatura do robô mais coerentes. Como a termocâmera SC660 é de utilização científica, é esperado que, de maneira geral, tenha uma confiabilidade maior que a termocâmera A315, o que justifica, em parte, as diferenças nos valores das indicações. A comparação entre os resultados termográficos mostra um comportamento semelhante entre as câmeras no que se refere aos valores percentuais de incerteza, com pouca variabilidade, conforme os dados da Tabela 8.8.

As alternativas para realização de inspeções autônomas introduzidas na Tabela 5.1 não apresentam análises qualitativas dos resultados das inspeções, inviabilizando comparações de desempenho tanto do aspecto dos resultados da inspeção quanto de desempenho funcional dos sistemas. Com relação às características gerais, é possível afirmar que o sistema proposto se difere da alternativa proposta pela FLIR®/*Pivotal Vision*® por ser móvel e ter custos menores, visto que a termocâmera é o elemento de custo mais elevado nos sistemas, além da mobilidade pela subestação. Com relação ao sistema proposto por Pinto (2008) e a solução proposta por Sampaio (2014), a transmissão dos dados e condução da energia é feita pelos trilhos, sem a necessidade de cabos. Com relação a solução proposta por Wang (2011), o sistema se move por trilhos suspensos, adequados às subestações brasileiras.

Durante os testes realizados no LabTerm, o sistema atendeu as expectativas para o seu estágio de desenvolvimento, se movendo adequadamente sobre os trilhos, sendo que o maior erro de posicionamento observado foi de 6%, focalizando os equipamentos nos pontos de inspeção, registrando as informações e transmitindo-as para o centro de controle, operando conforme a rotina de inspeção programada.

9. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os detalhes da elaboração e desenvolvimento do projeto, etapas de construção, melhoria e testes de um sistema autônomo de inspeção termográfica e visual em ativos de subestações de energia elétrica. O sistema é composto pela unidade autônoma, chamada de “robô móvel” ou “veículo”, e pela estrutura de fixação e alimentação.

A estrutura de fixação foi projetada para garantir o isolamento elétrico necessário a segurança do Sistema e da subestação, e com características para suportar os esforços mecânicos envolvidos. A utilização dos trilhos para movimentação do veículo, fornecimento de energia elétrica e circulação de dados não apresentou nenhum tipo de prejuízo ao funcionamento do sistema.

A unidade móvel se desloca sobre os trilhos de forma satisfatória. O formato cônico das rodas colabora para que o veículo fique centralizado, e não foi observado nenhum tipo de desgaste relevante em nenhum componente mecânico. Alguns elementos da unidade móvel tiveram que ser fabricados de forma customizada, fato esperado em projetos com esta originalidade. Os testes de posicionamento do veículo sobre os trilhos apresentam resultados satisfatórios, visto que o maior desvio de posicionamento encontrado é de 6%.

A análise de incerteza do resultado de medição termográfico mostra que o procedimento de inspeção autônoma tem aspectos que devem ser trabalhados para melhora dos resultados, como o aprimoramento da técnica de reconhecimento dos equipamentos. No caso mais crítico, se compararmos os valores das indicações da conexão H observamos as maiores variações à medida que a posição de inspeção foi mudada, chegando à 20,5 °C para os valores indicados pela termocâmera A315. Os valores percentuais relativos da incerteza apresentaram pouca variação, sendo que a chave seccionadora, equipamento de menor emissividade, apresentou o maior valor percentual relativo da incerteza, em torno de 24%.

Após a definição das instruções de inspeção, com a identificação dos pontos de parada e do reconhecimento dos ativos, a unidade autônoma realizou a inspeção conforme a rotina programada, nos períodos definidos, gerando informações sobre o estado da temperatura superficial dos ativos, conforme as imagens da seção 8.3.

O Sistema autônomo de inspeção se apresenta como uma alternativa interessante no âmbito da manutenção preditiva. Com este sistema é possível implementar a padronização das inspeções, que serão realizadas em distâncias pré-definidas, utilizando valores específicos de emissividade para cada ativo, e realizadas com uma frequência significativamente maior do que as equipes de inspeção das concessionárias podem realizar, visto que só em Minas Gerais são mais de 400 subestações.

O Sistema não precisa ser recarregado, nem de cabos conectados para o funcionamento, diferente das outras soluções encontradas. Por utilizar trilhos suspensos, pode ser mais facilmente adaptado a realidade das subestações brasileiras, que normalmente tem o chão de pedras e cascalhos, e não é pavimentada.

Do ponto de vista da segurança, o Sistema Móvel Autônomo colabora para que a equipe de inspeção não fique exposta ao ambiente da subestação, e possa se dedicar a análise dos resultados e emissão dos diagnósticos. O responsável pela gestão de ativos terá resultados com maior grau de confiabilidade, e possibilidade de acompanhamento do histórico de funcionamento do equipamento, otimizando a tomada de decisão.

9.1. Recomendações para trabalhos futuros

Para validação da proposta, recomenda-se a instalação do Sistema Móvel Autônomo em uma subestação para avaliação do seu desempenho em campo, e comparação real dos resultados obtidos com a inspeção feita pelo operador.

Melhora no processo de identificação do equipamento inspecionado e da extração das informações de temperatura.

Implementação de uma plataforma de diagnóstico, que a partir dos resultados gerados pelo sistema, indique ao gestor da manutenção alternativas para a tomada de decisão.

Análise da viabilidade econômica da implementação do Sistema Móvel Autônomo em algumas das subestações de Minas Gerais, incluindo o retorno sobre o investimento, custos e economias geradas.

Análise da viabilidade econômica do projeto de uma linha de produção para construção de unidades móveis e sistemas de fixação em larga escala.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 5462 - Confiabilidade e Manutenibilidade**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1994.

ABNT. **NBR 15424 - Ensaios não destrutivos - Termografia - Terminologia**. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2006.

ABNT. **NBR ISO 55000 - Gestão de ativos — Visão geral, princípios e terminologia**. ABNT. [S.l.]. 2014.

ABRADEE. Redes de Energia Elétrica. **Abradee**, 2012. Disponível em: <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>>. Acesso em: Jan 2016.

ALBERTAZZI G. JR., A.; SOUZA, A. R. D. **Fundamentos de Metrologia científica e industrial**. 1ª. ed. Barueri: Manole, 2008. ISBN: 978-85-204-2116-1.

BLOCH, H. P. **Machinery Failure Analysis and Troubleshooting**. 1ª. ed. Houston: Gulf Publishing Company, 1997.

BSI. **PAS 55 - Public Available Specification 55**. BSI - British Standards. London. 2008.

BSI. **PAS-55: Asset Management**. BSI British Standards. Londres. 2014.

BWS CONSULTORIA. Gestão da Manutenção. **BWS Consultoria**, 2015. Disponível em: <<http://www.bwsconsultoria.com/2015/09/gestao-da-manutencao.html>>. Acesso em: fev 2016.

CALADO, F. A. R. **Sistema de Visão Multiespectral para uma Plataforma Robótica de Inspeção Termográfica em Subestação de Energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte. 2013.

CALTECH. Herschel discovers infrared Light. **Cool Cosmos**. Disponível em: <http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/classroom_activities/herschel_bio.html>. Acesso em: Fev 2016.

CEMIG. **Revista P&D**. CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2010.

CEMIG. **Relatório Administrativo**. CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.

CEMIG. **Relatório Anual de Sustentabilidade**. CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2014.

CHOI, H. R.; RYEW, S. M. Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines. **Mechatronics**, v. 12, p. 713-736, 2002. ISSN 0957-4158.

CHRZANOWSKI, K. **Non-contact thermometry- Measurement Errors**. 1^a. ed. Warsaw: Polish Chapter of SPIE, 2001. ISBN: 83-904273-5-5.

CHRZANOWSKI, K. **Testing Thermal Imagers – Pratical GuideBook**. Warsaw: Military University of Technology, 2010. ISBN: 978-83-61486-81-7.

DINIZ, H. E. P. **Termografia Quantitativa como Ferramenta de Gestão de Ativos do Sistema Elétrico de Potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte. 2013.

EIA. International Energy Statistics. **U.S. Energy Information Administration**, Jan 2016.

Disponível em: <<https://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=44&pid=44&aid=2>>. Acesso em: fev 2016.

ENERGIA ELÉTRICA EM FOCO. Transmissão De Energia Elétrica. **http://energiaeletricaemfoco.blogspot.com.br/**, Jan 2016. Disponível em: <<http://energiaeletricaemfoco.blogspot.com.br/2014/11/transmissao-de-energia-eletrica.html>>. Acesso em: mar 2016.

EPE. **Consumo mensal de energia elétrica por classe (regiões e subsistemas) – 2004-2015**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília. 2015.

FLIR. **User's Manual - SC6XX Series**. [S.l.]: FLIR, 2010.

FLIR. **Application history - Thermal imaging cameras for electric substation monitoring**. FLIR. [S.l.]. 2011.

FLIR. **FLIR A315 / A615 Technical Specifications**. FLIR Systems. [S.l.]. 2016.

GAZETA DE SANTARÉM. Celpa inaugura subestação de energia. **Gazeta de Santarém**. Disponível em: <<http://www.gazetadesantarem.com.br/cidade/celpa-inaugura-subestacao-de-energia/>>. Acesso em: Fev 2016.

GOMES, S. C. J. **Projeto Estrutural de um Sistema Autônomo para Inspeção em Subestações de Distribuição de Energia Elétrica**. Monografia (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte. 2014.

Gomes, Selson C. Jr.; Teixeira, G. G. D.; Ferreira, R. A. M.; Andrade, R. M. Análise da influência das cores na emissividade de superfícies no espectro do infravermelho. **VII Seminário Fluminense de Engenharia**, Niterói, Out 2011.

GRUPO SANTIN. Cliente: VALE. **Grupo Santin**. Disponível em: <<http://www.gruposantin.com.br/project/mariana/>>. Acesso em: Fev 2016.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 5ª. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

JCGM. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement - GUM**. JCGM - Joint Committee for Guides in Metrology 1. [S.l.]. 2008.

KOMINSKY, J.; LUCKINO, J. S.; MARTIN, T. F. **Passive infrared thermography - A qualitative method for detecting moisture anomalies in building envelopes**. [S.l.]. 2006.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Qualimark, 2001.

LI, L.; WANG, B.; LI, Y. The Application of Image Based Visual Servo Control System for SmartGuard. **10th IEEE International Conference on Control and Automation**, Hangzhou, p. 1342-1345, 2013.

MALDAGUE, X. **Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation**. Université Laval. Quebec. 2000.

MARANTAR ENGENHARIA. Termografia aplicada à manutenção de equipamentos elétricos. **Marantar**. Disponível em: <<http://www.marantar.net/2013/07/termografia-manutencao-eletrica.html>>. Acesso em: Fev 2016.

MUZY, G. L. C. D. O. **Subestações Elétricas**. Monografia (Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro. 2012.

Okamoto, J. Jr.; Grassi, V. Jr.; Amaral, P. F. S.; Pinto; M., B. G.; Pipa, D.; Pires, G. P.; Martins, M. V. M. Development of an Autonomous Robot for Gas Storage Spheres Inspection. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, v. 66, p. 23-35, 2012. ISSN 66:23–35.

OZISICK, M. **Heat Transfer - A basic approach**. Raleigh: MCGraw-Hill, 1985.

PAULINO, M. E. C. Considerações sobre manutenção: Aspectos relacionados à manutenção de equipamentos e de instalações. **O setor Elétrico**, v. 97, 2014.

Pinto, J. K. C.; Masuda, M.; Magrini, L. C.; Jardini, J. A.; Garbelloti, M. V. Mobile robot for hot spot monitoring in electric power substation. **2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition**, p. 1-5, 2008. ISSN 2160-8563.

POULIOT, N.; MONTAMBAULT, S. Field-Oriented Developments for LineScout Technology and Its Deployment on Large Water Crossing Transmission Lines. **Journal of Field Robotics**, v. 29, p. 25-46, 2011. ISSN 1556-4967.

POULIOT, N.; RICHARD, P.; MONTAMBAULT, S. LineScout Technology Opens the Way to Robotic Inspection and Maintenance of High-Voltage Power Lines. **IEEE Power and Energy Technology Systems Journal**, v. 2, p. 1-11, 2015. ISSN 2332-7707.

Qi, H.; Zhang, X.; Chen, H.; Ye, J. Tracing and localization system for pipeline robot. **Mechatronics**, v. 19, p. 76-84, 2009. ISSN 0957-4158.

QUERINO, T. F. **Metodologia de Gestão de Ativos da Chave Seccionadora de 15 kV**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte. 2015.

RAILWAY TECHNICAL. Wheels and Boogies. **Railway Technical**, fev 2016. Disponível em: <<http://www.railway-technical.com/whlbog.shtml>>. Acesso em: mar 2016.

ROLEC ENCLOSURES. **conFORM - Datasheet**. ROLEC Enclosures. [S.l.]. 2016.

SAMPAIO, D. J. B. S. Thermographic Inspection using a Microcontroller-based Camera Positioning System. **Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), 2014 3rd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry**, 2014.

SANTOS, L. **Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão**. UNIFEL. Itajubá. 2006.

SILVA, A. V. D. Aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade para Desenvolvimento de um Plano de Manutenção em uma Distribuidora de Combustíveis. **XXIX Encontro Nacional dos Estudantes de Engenharia de Produção**, Salvador, 2009.

SILVA, B. P. A. D. **Comissionamento de um Sistema de Medição Autônomo de Inspeção em Componentes em Estações Elétricas**. Monografia (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte. 2015.

SILVINO, J. L.; RESENDE, P. Prototype for automatic monitoring and failure diagnosis of surge arresters using infrared techniques. **International Conference on Grounding and Earthing. Salvador: Brazilian Society for Electrical Protection**, Salvador, 2010.

TAVARES, L. A. **Excelência na Manutenção - Estratégias, Otimização e Gerenciamento**. 1ª. ed. Salvador: Casa da Qualidade Editora Ltda, 1996.

TAVARES, S. G. **Desenvolvimento de uma metodologia para aplicação de ensaios térmicos não destrutivos na avaliação da integridade de obras de arte**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte. 2006.

TEIXEIRA, G. G. D. **Confiabilidade Metrológica em Termografia Aplicada em Sistemas Elétricos**. Belo Horizonte: Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 2012.

URSINE, W. **Monitoramento Autônomo de Para-Raios de ZnO**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte. 2013.

Wang, B.; Guo, R.; Li, B.; Han, L.; Sun, Y.; Wang, M. SmartGuard: An Autonomous Robotic System for Inspecting Substation Equipment. **Journal of Field Robotics**, v. 29, p. 123-137, 2011. ISSN 1556-4967.

ZAIONS, D. R. **Consolidação da Metodologia de Manutenção Centrada em Confiabilidade em uma planta de Celulose e Papel**. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2003.

ANEXO A

A.1 Valores de emissividade dos materiais

Material	Especificação	Temperatura [°C]	Emissividade
3m	Fita elétrica em vinil	< 105	0,96
Aço inoxidável	polido	70	0,14
Água	destilada	20	0,96
Água	gelo	0	0,98
Alumínio	polido	50 - 100	0,04 - 0,06
Alumínio	oxidado, fortemente	50 - 500	0,2 - 0,3
Borracha	dura	20	0,95
Carbono	Grafite	20	0,98
Cobre	polido	20	0,07
Cobre	oxidado	50	0,6 - 0,7
Ferro	líquido	1300	0,28
Ferro	polido	38	0,21
Ferro	oxidado	38	0,63
Gesso	-	20	0,8 - 0,9
Granito	rugoso	21	0,88
Latão	folha, laminado	20	0,06
Latão	opaco, oxidado	20 - 350	0,22
Madeira	aplainada	20	0,8 - 0,9
Madeira	esmerilada	-	0,5 - 0,7
Pele	humana	32	0,98
Plástico	circuito impresso	70	0,91
Plástico	poliuretano	70	0,55
Plástico	PVC	70	0,93
Reboco	rugoso	20	0,91
Solo	saturado com água	20	0,95
Solo	seco	20	0,92
Tijolo	refratário	17	0,68
Tinta	à óleo	100	0,94
Zinco	polido	200 - 300	0,04 - 0,05
Zinco	folha	50	0,2

Fonte: (FLIR, 2010).

ANEXO B

B.1 Cálculo dos coeficientes de sensibilidade

Teixeira (2012) aborda em seu trabalho uma extensa reflexão sobre os procedimentos de análise de incertezas em inspeções termográficas. Para o cálculo dos coeficientes de sensibilidade apresentados na Equação 3.14, serão usadas utilizadas as Equações B.1, B.2, B.3 e B.4 (TEIXEIRA, 2012).

$$C_{\varepsilon} = \frac{R(S_{ob}-S)T_{ob}^2}{\varepsilon B S_{ob}^2 \exp(B/T_{ob})} \quad (\text{Eq. B.1})$$

$$C_d = \frac{BR\varepsilon\tau(\alpha+2\beta\sqrt{d})(S-S_{atm})}{2\sqrt{d}K^2\ln(F+R\varepsilon/K)^2(F+R\varepsilon/K)} \quad (\text{Eq. B.2})$$

$$C_{T_{ref}} = \frac{(\varepsilon-1)T_{ob}^2 S_{ref}^2 \exp(B/T_{ref})}{\varepsilon T_{ref}^2 S_{ob}^2 \exp(B/T_{ob})} \quad (\text{Eq. B.3})$$

$$C_{T_{atm}} = \frac{(\tau-1)T_{ob}^2 S_{atm}^2 \exp(B/T_{atm})}{\varepsilon T_{atm}^2 S_{ob}^2 \exp(B/T_{ob})} \quad (\text{Eq. B.4})$$

Onde:

ε e τ : emissividade e transmissividade, respectivamente;

B, R e F: constantes de calibração do termovisor;

$S, S_{ob}, S_{ref}, S_{atm}$: sinal elétrico proporcional a irradiação total captada pelo termovisor;

S_{ob}, S_{ref}, S_{atm} : sinal elétrico proporcional a radiação emitida pelo objeto, pelo ambiente e pela atmosfera, respectivamente.

B.2 Código implementado no Matlab® para cálculo dos coeficientes de sensibilidades

```
%Dados do equipamento
Emis=0.75; Tob= 273 + 102; d=4.8;

%Condições do ambiente
Tatm = 273 + 23.6; Tref = Tatm;
```

```

%Constantes
R = 20651.19; B = 1494.26; F = 1;
alfa=0.008; beta=0; dcal = 0.1;

%Modelo matematico da medição
Trans = exp(-alfa*(sqrt(d)-sqrt(dcal))-beta*(d-dcal));
Satm = R/(exp(B/Tatm)-F);
Sref = R/(exp(B/Tref)-F);
Sob = R/(exp(B/Tob)-F);
S = Emis*Trans*Sob + (1-Emis)*Trans*Sref + (1-Trans)*Satm;

% COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE de 1º Ordem

% Coef. Sens. Emissividade
Df_DEmis = (R*(Sob-Sref)*Tob^2)/(Emis*Sob^2*exp(B/Tob)*B)

% Coef. Sens. Distância
K = Satm*(1-Trans)+Sref*(Emis-1)+S*Trans;
Df_Dd = (B*R*Emis*Trans*(alfa+2*beta*sqrt(d))*(S-Satm))/...
(2*sqrt(d)*K^2*log(F+(R*Emis)/K)^2*(F+(R*Emis)/K))

% Coef. Sens. Temperatura Ambiente
Df_DTo = -(exp(B/Tref)*(Emis-
1)*Tob^2*Sref^2)/(Emis*Tref^2*exp(B/Tob)*Sob^2)

% Coef. Sens. Temperatura Atmosférica
Df_DTatm = -(exp(B/Tatm)*(Trans-1)*Tob^2*Satm^2)/...
(Emis*Trans*Tatm^2*exp(B/Tob)*Sob^2)

```


ANEXO C

C.1 Telas do software desenvolvido no P&D 235

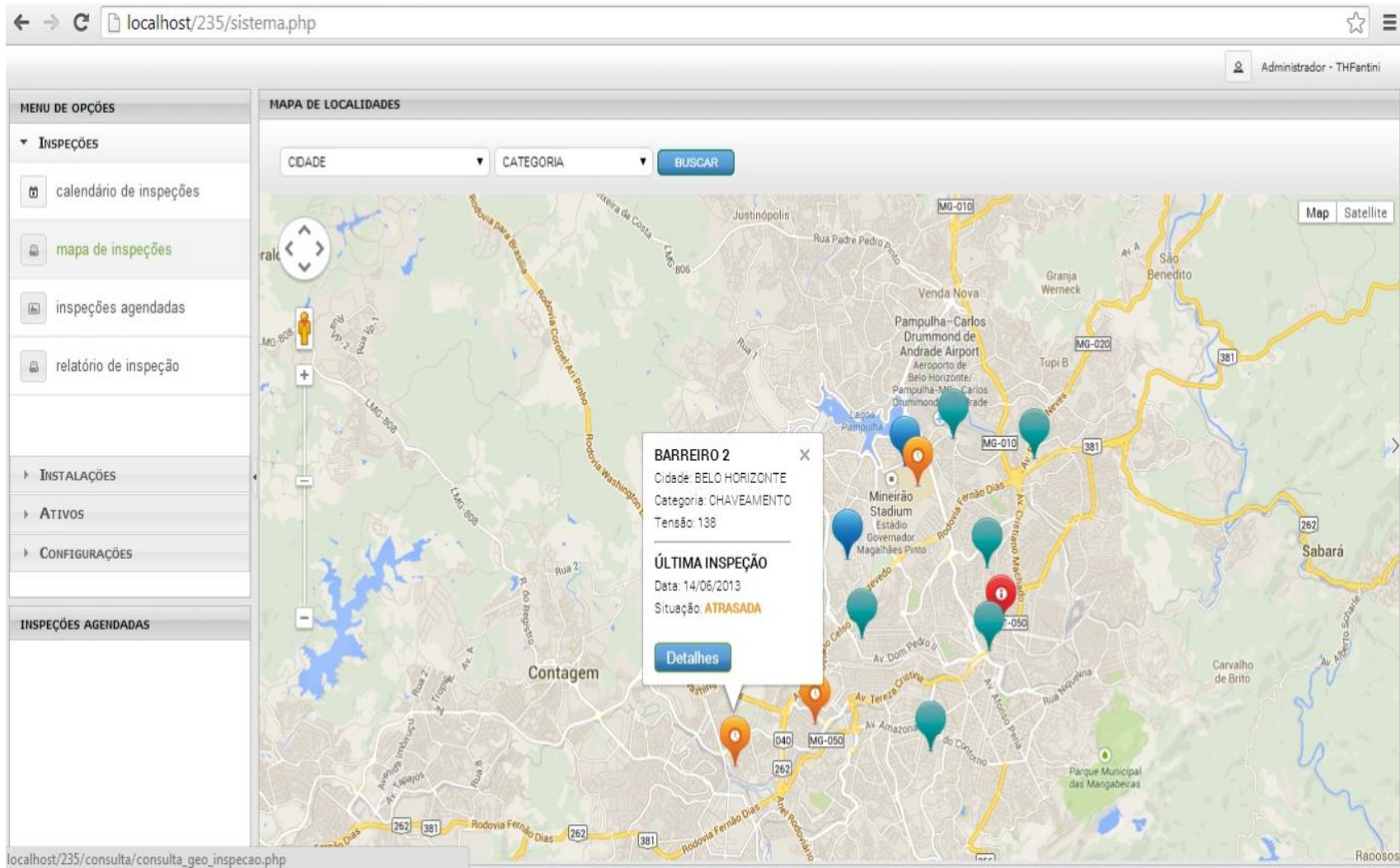


Figura C.1 – Tela de georeferenciamento do software desenvolvido no P&D 235. Fonte: Arquivo LabTerm.

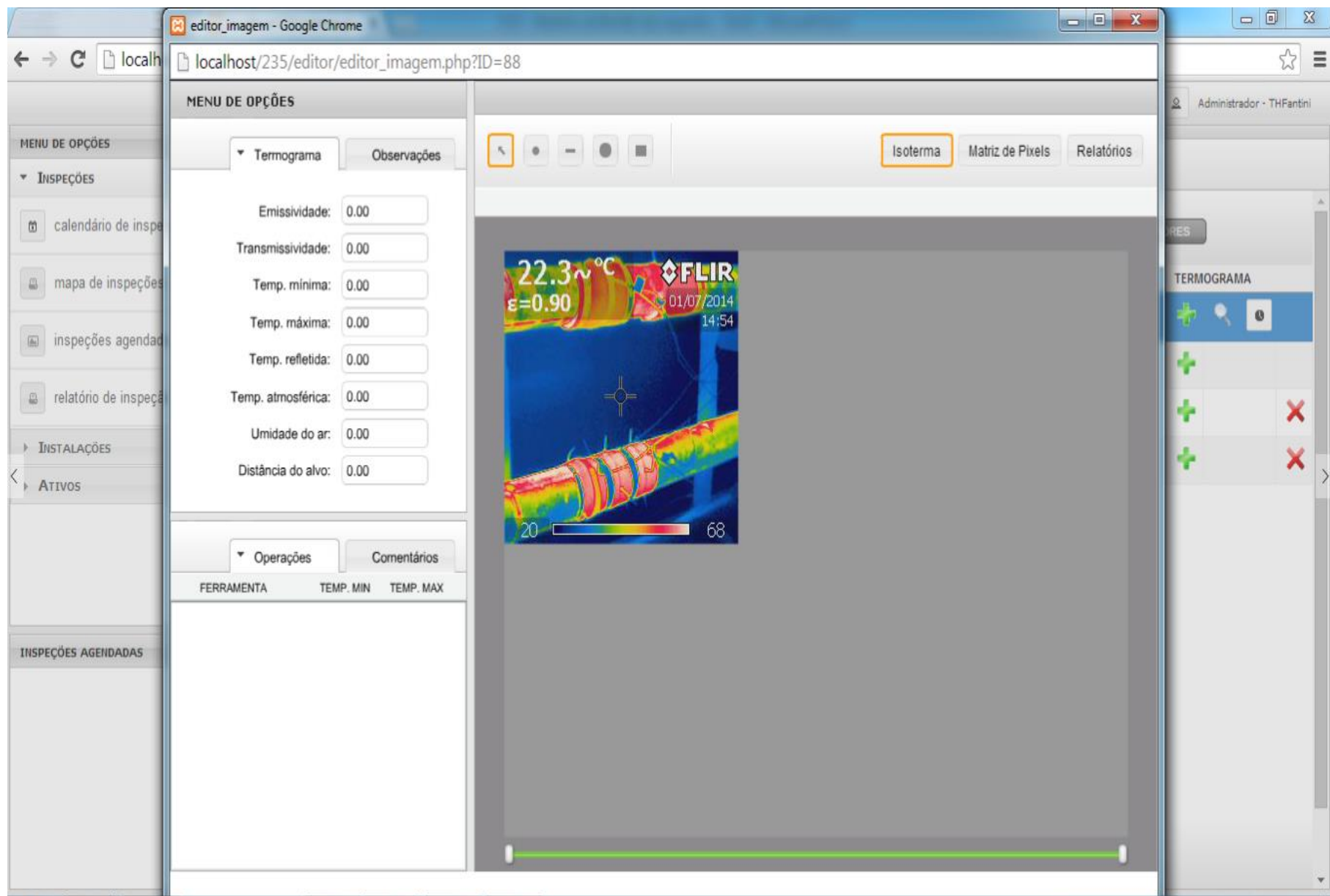


Figura C.2 – Tela do software de análise de termogramas e gestão de ativos físicos. Fonte: Arquivo LabTerm.

ANEXO D

Chave Seccionadora Antiga – 500 A – Termocâmara SC660

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM											
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição	Div.	±u _i	Incerteza Padrão Combinada ±u _c	Coeficiente de Sensibilidade - c _i	Contribuição p/ Incerteza - c _i u(x _i)	Graus de Liberdade, v = n-1	Graus de Liberdade v _{eff}	Contribuição
Temperatura Ambiente, u(Tamb) Desvio de temperatura, u(Δtamb) Resolução, u(Tamb,res) Calibração, u(Tamb,cal)	22,800	°C				0,611692	0,1	0,061169164	x	x	2,11%
	1,000	°C	uniforme	1,7321	0,5774				infinito	0,00E+00	
	0,050	°C	uniforme	1,7321	0,0289				infinito	0,00E+00	
	0,400	°C	normal	2	0,2000				infinito	0,00E+00	
Emissividade, u(ε) Desvio, u(Δε)	0,810	-				0,043300	36,5	1,580451	x	x	54,47%
	0,075	-	uniforme	1,732	0,0433				infinito	0,00E+00	
Temperatura Refletida, u(Tref) Desvio de temperatura, u(Δtamb) Resolução, u(Tamb,res) Calibração, u(Tamb,cal)	22,800	°C				0,611692	0,17	0,103987579	x	x	3,58%
	1,000	°C	uniforme	1,7321	0,5774				infinito	0,00E+00	
	0,050	°C	uniforme	1,7321	0,0289				infinito	0,00E+00	
	0,400	°C	normal	2	0,2000				infinito	0,00E+00	
Distância Certificado de calibração	3,300	m	Normal	1,732	0,05773	0,057733	0,0639	0,003689163	infinito	0,00E+00	0,13%
	0,100	m									
Incerteza Intrínseca - SC660 Erro Gerado por Ruído, u(NGE, ou NETD) Repetitividade, u(RE) Resolução digital da temperatura, u(DRT) Mínimo erro, u(ME) Uniformidade da medição, u(MU)	0,03	°C	uniforme	1,7321	0,0173	0,582070	1	0,582069827	x	x	20,06%
	0,064	°C	normal	2,2361	0,0286				4	1,68E-07	
	1,953	°C	uniforme	3,4641	0,5638				infinito	0,00E+00	
	0,37	°C	uniforme	3,4641	0,1068				infinito	0,00E+00	
	0,318	°C	uniforme	3,4641	0,0918				infinito	0,00E+00	
	57	°C	normal	2,0000	0,5700				0,570000	1	
1,14	°C										
Incerteza Padrão Combinada							±u _c =	1,78	6,01E+07		
Incerteza Padrão Expandida - ±U						K =	1,96	3,49	°C		
										100,00%	

Chave Seccionadora Antiga- 500 A – Termocâmara A315

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM												
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição	Div.	$\pm u_i$	Incerteza Padrão Combinada $\pm u_c$	Coefficiente de Sensibilidade - c_i	Contribuição p/ Incerteza - $c_i u_i(x_i)$	Grus de Liberdade, ν = $n-1$	Grus de Liberdade ν_{eff}	Contribuição	
Temperatura Ambiente, $u(T_{amb})$	23,700	°C				0,611692	0,02	0,012233833	x	x	0,19%	
	Desvio de temperatura, $u(\Delta t_{amb})$	1,000	°C	uniforme	1,7321				0,5774	infinito		0,00E+00
	Resolução, $u(T_{amb}, res)$	0,050	°C	uniforme	1,7321				0,0289	infinito		0,00E+00
	Calibração, $u(T_{amb}, cal)$	0,400	°C	normal	2				0,2000	infinito		0,00E+00
Emissividade, $u(\epsilon)$	0,810	-				0,043300	92	3,983604	x	x	61,632%	
	Desvio, $u(\Delta \epsilon)$	0,075	-	uniforme	1,7321				0,0433	infinito		0,00E+00
Temperatura Refletida, $u(T_{ref})$	23,700	°C				0,611692	0,25	0,152922911	x	x	2,37%	
	Desvio de temperatura, $u(\Delta t_{amb})$	1,000	°C	uniforme	1,7321				0,5774	infinito		0,00E+00
	Resolução, $u(T_{amb}, res)$	0,050	°C	uniforme	1,7321				0,0289	infinito		0,00E+00
	Calibração, $u(T_{amb}, cal)$	0,400	°C	normal	2				0,2000	infinito		0,00E+00
Distância	5,500	m	Normal	1,7321	0,057733	0,057733	0,04	0,002309335	infinito	0,00E+00	0,04%	
	Certificado de calibração	0,100										m
Incerteza Intrínseca - A315	Erro Gerado por Ruído, $u(NGE)$	0,05	°C	uniforme	1,7321	0,0289	0,626253	2	1,25250674	x	x	19,38%
	Repetitividade, $u(RE)$	0,064	°C	normal	2,2361	0,0286				4	1,68E-07	
	Resolução digital da temperatura, $u(DRT)$	1,367	°C	uniforme	3,4641	0,3946				infinito	0,00E+00	
	Mínimo erro, $u(ME)$	1,67	°C	uniforme	3,4641	0,4821				infinito	0,00E+00	
	Uniformidade da medição, $u(MU)$	0,17	°C	uniforme	3,4641	0,0491				infinito	0,00E+00	
Calibração A315	53	°C	normal	2,0000	0,5300	0,530000	2	1,06	infinito	0,00E+00	16,40%	
	Certificado (2% da leitura °C)	1,06										°C
Incerteza Padrão Combinada											100,00%	
						$\pm u_c =$		4,31		2,06E+09		
Incerteza Padrão Expandida - $\pm U$						K =	1,96	8,45		°C		

Chave Seccionadora Nova – 500 A – Termocâmara SC660

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM											
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição	Div.	±ui	Incerteza Padrão Combinada ±uc	Coefficiente de Sensibilidade - c _i	Contribuição p/ Incerteza - c _i u(x _i)	Graus de Liberdade, v = n-1	Graus de Liberdade v _{eff}	Contribuição
Temperatura Ambiente, u(Tamb)	23,700	°C				0,611692	0,02	0,012233833	x	x	0,32%
Desvio de temperatura, u(Δtamb)	1,000	°C	uniforme	1,7321	0,5774				infinito	0,00E+00	
Resolução, u(Tamb,res)	0,050	°C	uniforme	1,7321	0,0289				infinito	0,00E+00	
Calibração, u(Tamb,cal)	0,400	°C	normal	2	0,2000				infinito	0,00E+00	
Emissividade, u(ε)	0,810	-				0,043300	32,7	1,415911	x	x	36,68%
Desvio, u(Δε)	0,075	-	uniforme	1,732	0,0433				infinito	0,00E+00	
Temperatura Refletida, u(Tref)	23,700	°C				0,611692	0,19	0,116221412	x	x	3,01%
Desvio de temperatura, u(Δtamb)	1,000	°C	uniforme	1,7321	0,5774				infinito	0,00E+00	
Resolução, u(Tamb,res)	0,050	°C	uniforme	1,7321	0,0289				infinito	0,00E+00	
Calibração, u(Tamb,cal)	0,400	°C	normal	2	0,2000				infinito	0,00E+00	
Distância	4,200	m	Normal	1,732	0,05773	0,057733	0,05	0,002886669	infinito	0,00E+00	0,07%
Certificado de calibração	0,100	m									
Incerteza Intrínseca - A315						0,626253	2	1,25250674	x	x	32,45%
Erro Gerado por Ruído, u(NGE)	0,05	°C	uniforme	1,7321	0,0289				infinito	0,00E+00	
Repetitividade, u(RE)	0,064	°C	normal	2,2361	0,0286				4	1,68E-07	
Resolução digital da temperatura, u(DRT)	1,367	°C	uniforme	3,4641	0,3946				infinito	0,00E+00	
Mínimo erro, u(ME)	1,67	°C	uniforme	3,4641	0,4821				infinito	0,00E+00	
Uniformidade da medição, u(MU)	0,17	°C	uniforme	3,4641	0,0491				infinito	0,00E+00	
Calibração A315	53	°C	normal	2,0000	0,5300	0,530000	2	1,06	infinito	0,00E+00	27,46%
Certificado (2% da leitura °C)	1,06	°C									
Incerteza Padrão Combinada											100,00%
							±u _c =	2,17	1,32E+08		
Incerteza Padrão Expandida - ±U						K =	1,96	4,25	°C		

Chave Seccionadora Nova – 500 A – Termocâmara A315

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM											
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição	Div.	±ui	Incerteza Padrão Combinada ±uc	Coefficiente de Sensibilidade - c _i	Contribuição p/ Incerteza - c _i u(x _i)	Graus de Liberdade, v = n-1	Graus de Liberdade v _{eff}	Contribuição
Temperatura Ambiente, u(Tamb)	23,700	°C				0,611692	0,05	0,030584582	x	x	0,25%
Desvio de temperatura, u(Δtamb)	1,000	°C	uniforme	1,7321	0,5774				infinito	0,00E+00	
Resolução, u(Tamb,res)	0,050	°C	uniforme	1,7321	0,0289				infinito	0,00E+00	
Calibração, u(Tamb,cal)	0,400	°C	normal	2	0,2000				infinito	0,00E+00	
Emissividade, u(ε)	0,200	-				0,043300	196	8,486808	x	x	69,710%
Desvio, u(Δε)	0,075	-	uniforme	1,732	0,0433				infinito	0,00E+00	
Temperatura Refletida, u(Tref)	23,700	°C				0,611692	2,65	1,620982855	x	x	13,31%
Desvio de temperatura, u(Δtamb)	1,000	°C	uniforme	1,7321	0,5774				infinito	0,00E+00	
Resolução, u(Tamb,res)	0,050	°C	uniforme	1,7321	0,0289				infinito	0,00E+00	
Calibração, u(Tamb,cal)	0,400	°C	normal	2	0,2000				infinito	0,00E+00	
Distância	5,500	m	Normal	1,732	0,05773	0,057733	0,17	0,009814676	infinito	0,00E+00	0,08%
Certificado de calibração	0,100	m									
Incerteza Intrínseca - A315						0,626253	1	0,62625337	x	x	5,14%
Erro Gerado por Ruído, u(NGE)	0,05	°C	uniforme	1,7321	0,0289				infinito	0,00E+00	
Repetitividade, u(RE)	0,064	°C	normal	2,2361	0,0286				4	1,68E-07	
Resolução digital da temperatura, u(DRT)	1,367	°C	uniforme	3,4641	0,3946				infinito	0,00E+00	
Mínimo erro, u(ME)	1,67	°C	uniforme	3,4641	0,4821				infinito	0,00E+00	
Uniformidade da medição, u(MU)	0,17	°C	uniforme	3,4641	0,0491				infinito	0,00E+00	
Calibração A315	70	°C	normal	2,0000	0,7000	0,700000	2	1,4	infinito	0,00E+00	11,50%
Certificado (2% da leitura °C)	1,4	°C									
Incerteza Padrão Combinada											100,00%
							±u _c =	8,78	3,53E+10		
Incerteza Padrão Expandida - ±U							K =	1,96	17,20	°C	

Conexão H – 200 A – Termocâmara SC660

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM											
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição	Div.	±ui	Inceteza Padrão Combinada ±uc	Coefficiente de Sensibilidade - c _i	Contribuição p/ Inceteza - c _i u(x _i)	Graus de Liberdade, v = n-1	Graus de Liberdade v _{eff}	Contribuição
Temperatura Ambiente, u(Tamb)	23,600	°C				0,611692	0,0197	0,012050325	x	x	0,13%
Desvio de temperatura, u(Δtamb)	1,000	°C	uniforme	1,7321	0,5774				infinito	0,00E+00	
Resolução, u(Tamb,res)	0,050	°C	uniforme	1,7321	0,0289				infinito	0,00E+00	
Calibração, u(Tamb,cal)	0,400	°C	normal	2	0,2000				infinito	0,00E+00	
Emissividade, u(ε)	0,350	-				0,043300	157,479	6,818847	x	x	75,671%
Desvio, u(Δε)	0,075	-	uniforme	1,732	0,0433				infinito	0,00E+00	
Temperatura Refletida, u(Tref)	23,600	°C				0,611692	1,06	0,648393142	x	x	7,20%
Desvio de temperatura, u(Δtamb)	1,000	°C	uniforme	1,7321	0,5774				infinito	0,00E+00	
Resolução, u(Tamb,res)	0,050	°C	uniforme	1,7321	0,0289				infinito	0,00E+00	
Calibração, u(Tamb,cal)	0,400	°C	normal	2	0,2000				infinito	0,00E+00	
Distância	3,300	m	Normal	1,732	0,05773	0,057733	0,28	0,016165348	infinito	0,00E+00	0,18%
Certificado de calibração	0,100	m									
Inceteza Intrínseca - SC660						0,577736	1	0,577735767	x	x	6,41%
Erro Gerado por Ruído, u(NGE, ou NETD)	0,03	°C	uniforme	1,7321	0,0173				infinito	0,00E+00	
Repetitividade, u(RE)	0,064	°C	normal	2,2361	0,0286				4	1,68E-07	
Resolução digital da temperatura, u(DRT)	1,953	°C	uniforme	3,4641	0,5638				infinito	0,00E+00	
Mínimo erro, u(ME)	0,37	°C	uniforme	3,4641	0,1068				infinito	0,00E+00	
Uniformidade da medição, u(MU)	0,202	°C	uniforme	3,4641	0,0583				infinito	0,00E+00	
Calibração SC660	93,8	°C	normal	2,0000	0,9380	0,938000	1	0,938	infinito	0,00E+00	10,41%
Certificado (2% da leitura °C)	1,876	°C									
Inceteza Padrão Combinada							±u _c =	6,94	1,38E+10		
Inceteza Padrão Expandida - ±U							K =	1,96	13,60	°C	
										100,00%	

Conexão H – 200 A – Termocâmara A315

Cálculo da Incerteza de Medição - Método GUM												
Componentes de incerteza	Estimativa da grandeza	Unid.	Distribuição	Div.	±ui	Incerteza Padrão Combinada ±uc	Coefficiente de Sensibilidade - c _i	Contribuição p/ Incerteza - c _i u(x _i)	Graus de Liberdade, v = n-1	Graus de Liberdade Veff	Contribuição	
Temperatura Ambiente, u(Tamb)	23,600	°C				0,611692	0,024	0,014680599	x	x	0,17%	
	Desvio de temperatura, u(Δtamb)	1,000	°C	uniforme	1,7321				0,5774	infinito		0,00E+00
	Resolução, u(Tamb,res)	0,050	°C	uniforme	1,7321				0,0289	infinito		0,00E+00
	Calibração, u(Tamb,cal)	0,400	°C	normal	2				0,2000	infinito		0,00E+00
Emissividade, u(ε)	0,350	-				0,043300	142,46	6,168524	x	x	73,427%	
	Desvio, u(Δε)	0,075	-	uniforme	1,732				0,0433	infinito		0,00E+00
Temperatura Refletida, u(Tref)	23,600	°C				0,611692	1,18	0,721796139	x	x	8,59%	
	Desvio de temperatura, u(Δtamb)	1,000	°C	uniforme	1,7321				0,5774	infinito		0,00E+00
	Resolução, u(Tamb,res)	0,050	°C	uniforme	1,7321				0,0289	infinito		0,00E+00
	Calibração, u(Tamb,cal)	0,400	°C	normal	2				0,2000	infinito		0,00E+00
Distância	4,200	m	Normal	1,732	0,05773	0,057733	0,09	0,005196005	infinito	0,00E+00	0,06%	
	Certificado de calibração	0,100										m
Incerteza Intrínseca - A315	0,05	°C	uniforme	1,7321	0,0289	0,630712	1	0,630712098	x	x	7,51%	
	Erro Gerado por Ruído, u(NGE)	0,05	°C	uniforme	1,7321				0,0289	infinito		0,00E+00
	Repetitividade, u(RE)	0,045	°C	normal	2,2361				0,0201	4		4,10E-08
	Resolução digital da temperatura, u(DRT)	1,367	°C	uniforme	3,4641				0,3946	infinito		0,00E+00
	Mínimo erro, u(ME)	1,67	°C	uniforme	3,4641				0,4821	infinito		0,00E+00
	Uniformidade da medição, u(MU)	0,318	°C	uniforme	3,4641				0,0918	infinito		0,00E+00
Calibração A315	86	°C	normal	2,0000	0,8600	0,860000	1	0,86	infinito	0,00E+00	10,24%	
	Certificado (2% da leitura °C)	1,72										°C
Incerteza Padrão Combinada							±u _c =	6,30	3,85E+10			
Incerteza Padrão Expandida - ±U						K =	1,96	12,35	°C			
											100,00%	