

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JONATHAN HENRIQUE EFIGÊNIO DE  
OLIVEIRA

INSPEÇÃO AUTOMATIZADA  
UTILIZANDO TERMOGRAFIA

Porto Alegre  
2010

**JONATHAN HENRIQUE EFIGÊNIO DE  
OLIVEIRA**

**INSPEÇÃO AUTOMATIZADA  
UTILIZANDO TERMOGRAFIA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Área de concentração: Controle e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Walter Fetter Lages

Porto Alegre  
2010

**JONATHAN HENRIQUE EFIGÊNIO DE  
OLIVEIRA**

**INSPEÇÃO AUTOMATIZADA  
UTILIZANDO TERMOGRAFIA**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Walter Fetter Lages, UFRGS  
Doutor pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – São José dos Campos, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Silvia Silva da Costa Botelho, FURG  
Doutora pelo Centre National de la Recherche Scientifique, França

Prof. Dr. Jacob Scharcanski, UFRGS  
Doutor pela University of Waterloo, Canadá

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Coordenador do PPGEE: \_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, novembro de 2010.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos difíceis.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas do PPGEE pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e apoio na revisão deste trabalho.

À CAPES pela provisão da bolsa de mestrado.

Ao Prof. Dr. Roberto Petry Homrich por disponibilizar a fonte necessária para os ensaios que validam o método.

## RESUMO

Os métodos mais utilizados para manutenção e inspeção em linhas de transmissão são caros, perigosos e pouco precisos. Este trabalho propõe um método de manutenção preventiva mais eficiente, autônomo, para um trabalho rápido e que não ofereça riscos aos trabalhadores envolvidos. O método visa a utilização de um dispositivo móvel que se locomoverá ao longo das linhas de transmissão e fará a inspeção. Foi utilizada uma câmera infravermelha e desenvolvido um método que processa os dados gerados pela câmera para assim permitir a automatização desejada desta manutenção preventiva. Esta câmera, ao invés de formar imagens utilizando as frequências eletromagnéticas na faixa do visível, que são refletidas pelos objetos, utiliza as frequências na faixa infravermelho, que são emitidas pelo próprio objeto que está sendo inspecionado. O objetivo é encontrar regiões das linhas de transmissão com elevada temperatura e acusar a falha, se for o caso, tão logo ela tenha sido detectada pela câmera e assim sendo possível saber a localização aproximada da falha e a melhor providência a ser tomada.

**Palavras-chave:** Visão computacional, processamento de imagens, termografia.

## **ABSTRACT**

The methods used for maintenance and inspection of transmission lines are expensive, dangerous and inaccurate. This work proposes a method for preventive maintenance where is more efficient, autonomous, faster and that offers no risk to workers. The method aims to use a mobile device that travels along the transmission lines and performs the inspection. An infrared camera is used to develop a method that processes the generated data in order to enable the automation of preventive maintenance. This camera, instead of forming images by using the electromagnetic frequencies in the visible range, which are reflected from objects, uses frequencies in the infrared, which are emitted by the object under inspected. The goal is to find regions of transmission lines with high temperatures and detect the fault, if any, the position of the fault and determine the best action to be taken.

**Keywords:** computer vision, image processing, thermography.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Exemplos de torres utilizadas em linhas de transmissão de energia elétrica. . . . .	17
Figura 2:	Corte de um cabo ACSR. . . . .	18
Figura 3:	Exemplos de isoladores do tipo pilar. . . . .	18
Figura 4:	Diagrama da corrosão na alma de aço de cabos tipo ACSR. . . . .	19
Figura 5:	Esquemáticação do princípio do método. . . . .	21
Figura 6:	Método para uma dimensão. . . . .	23
Figura 7:	Método para as três dimensões. . . . .	24
Figura 8:	Espectro eletromagnético, na faixa entre 0,7 e 15 $\mu$ m utilizado para medição e análise térmicas (MIOTTO, 2008). . . . .	27
Figura 9:	Radiância espectral de um corpo negro em função da temperatura (INFRATEMP, 2006). . . . .	27
Figura 10:	Emissividade x reflexividade. . . . .	29
Figura 11:	Configuração experimental para a caracterização de parâmetros microbolômetro utilizando um instrumento eletrônico (adaptado de (GU, 1998)). . . . .	31
Figura 12:	Esquema de um detector térmico de radiação de banda espectral mostrando os elementos básicos da sua construção e operação (MIOTTO, 2008). . . . .	33
Figura 13:	Focalização da imagem. . . . .	34
Figura 14:	Esquema dos detectores térmicos adaptado de (YON et al., 2003). . . . .	35
Figura 15:	Escala de cinza (LUZ, 2010). . . . .	36
Figura 16:	Visualização da imagem radiométrica com diferentes pseudocolorizações. . . . .	37
Figura 17:	Inspeção de um Sistema de energia (LAND, 2004). . . . .	40
Figura 18:	Inspeção de um conector (LAND, 2004). . . . .	41
Figura 19:	Extração de componentes do sistema elétrico. . . . .	43
Figura 20:	Câmera da FLIR A320. . . . .	46
Figura 21:	Pacote RTP. . . . .	48
Figura 22:	SDP Descritor da sessão retornado pela câmera. . . . .	53
Figura 23:	Pilha de Protocolos. . . . .	54
Figura 24:	Pacote RTP para <i>stream</i> de vídeo descompactado. . . . .	56
Figura 25:	O hotspot e a região de referência. . . . .	59
Figura 26:	Segmentação. . . . .	60
Figura 27:	Exemplo de Dilatação adaptado de (NEVES; FACON, 1999). . . . .	62
Figura 28:	Hotspot detectado. . . . .	63
Figura 29:	Região para cálculo da temperatura de referência $T_{ref}$ . . . . .	65

Figura 30:	Funções de pertinência. . . . .	67
Figura 31:	Cabo de alumínio intacto. . . . .	70
Figura 32:	Cabo de alumínio com falha. . . . .	72
Figura 33:	Segmento do cabo de alumínio fino intacto. . . . .	74
Figura 34:	Segmento do cabo de alumínio fino onde existe uma falha. . . . .	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Sistemas de distribuição e transmissão de energia. . . . .	16
Tabela 2:	Classificação da faixa do infravermelho. . . . .	29
Tabela 3:	Máxima Temperatura Admissível. . . . .	41
Tabela 4:	Classificações dos graus de criticidade. . . . .	42
Tabela 5:	Critérios de Prioridades. . . . .	42
Tabela 6:	Tipos de <i>Payload</i> especificados no cabeçalho RTP. . . . .	50
Tabela 7:	<i>Resource</i> utilizados para setar o tipo de valores contidos nos <i>frames</i> da câmara. . . . .	54
Tabela 8:	<i>Resources</i> Diversos. . . . .	55
Tabela 9:	Tipos de <i>streams</i> da FLIR A320. . . . .	55
Tabela 10:	Condições de Medidas Quantitativas. . . . .	65
Tabela 11:	Condições de Medidas Qualitativas. . . . .	66
Tabela 12:	Dados técnicos da linha de transmissão (para cabos de alumínio). . . . .	69
Tabela 13:	Análise para resultado final no cabo intacto. . . . .	71
Tabela 14:	Análise para resultado final no cabo após a falha. . . . .	71
Tabela 15:	Análise para resultado final no trecho de cabo intacto. . . . .	73
Tabela 16:	Análise para resultado final no trecho de cabo com falha. . . . .	73

## LISTA DE ABREVIATURAS

RFC	<i>Request for Comments</i>
IETF	<i>Internet Engineering Task Force</i>
TCP	<i>Transfer Control Protocol</i>
UDP	<i>User Data Protocol</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
RTSP	<i>Real Time Streaming Protocol</i>
SDP	<i>Session Description Protocol</i>
RTP	<i>Real-time Transport Protocol</i>
ITADA	<i>Thermography Anomaly Detection Algorithm</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
FPA	<i>Focal Plane Array</i>
AAC	<i>All Aluminun Cable</i>
AAAC	<i>All Aluminun Alloy Cable</i>
ACSR	<i>Aluminun Cable Steel Reinforced</i>
ACAR	<i>Aluminun Cable Alloy Reinforced</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
1.1	Objetivos	15
1.2	Organização da Dissertação	15
<b>2</b>	<b>LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</b>	16
2.1	Introdução	16
2.2	Aspectos Construtivos	16
2.2.1	Torres	17
2.2.2	Cabos Condutores e Cabos Guarda	17
2.2.3	Isoladores	18
2.2.4	Para-Raios	18
2.3	Causas de Desgaste em Linhas de Transmissão	18
2.4	Inspeção de Linhas de Transmissão	20
2.4.1	Condições locais	20
2.4.2	Inspeção pelo Método da Medição da Resistência	20
2.4.3	Métodos para Inspeção de Superfícies de Cabos	21
2.5	Conclusão	24
<b>3</b>	<b>TERMOGRAFIA</b>	26
3.1	Introdução	26
3.2	Aspectos Físicos	26
3.3	Emissividade	28
3.4	Detectores de Infravermelho	29
3.4.1	Detectores de Fótons	30
3.4.2	Detectores Térmicos	30
3.5	Termovisores	32
3.5.1	Sistema Óptico	33
3.5.2	Focal Plane Array	34
3.5.3	Parâmetros Importantes	34
3.5.4	A Formação da Imagem Digital Infravermelha	35
3.6	Tipos de termografia	38
3.6.1	Termografia Ativa	38
3.6.2	Termografia Passiva	38
3.7	Conclusão	38

<b>4</b>	<b>TERMOGRAFIA APLICADA A SISTEMAS ELÉTRICOS</b>	40
4.1	Introdução	40
4.2	Aplicação da Termografia	40
4.3	Métodos de inspeção automatizada	42
4.3.1	Análise por Componentes	42
4.3.2	Método dos Coeficientes Invariantes	44
4.3.3	Ensaio Não Destrutivos	44
4.4	Conclusão	45
<b>5</b>	<b>RECEPÇÃO DA IMAGEM</b>	46
5.1	Introdução	46
5.2	FLIR A320	46
5.3	Protocolos de comunicação	47
5.3.1	Real-time Transport Protocol	48
5.3.2	Real Time Streaming Protocol	49
5.3.3	Session Description Protocol	51
5.3.4	Interação entre protocolos	52
5.3.5	Ajuste de Parâmetros da Câmera	54
5.3.6	Recepção da <i>Stream</i>	55
5.4	Conclusão	57
<b>6</b>	<b>PROCESSAMENTO DA IMAGEM</b>	58
6.1	Introdução	58
6.2	Algoritmo ITADA	58
6.3	Segmentação	59
6.3.1	Escolha da temperatura limiar $T_t$	60
6.4	Deteção dos Hotspots	61
6.5	Cálculo da temperatura de referência	64
6.6	Classificação dos Hotspots	65
6.7	Conclusão	68
<b>7</b>	<b>RESULTADOS</b>	69
7.1	Introdução	69
7.2	Ensaio com Cabo de alumínio	69
7.3	Ensaio com Cabo de alumínio Fino	73
7.4	Conclusão	76
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	77
8.1	Conclusões	77
8.2	Trabalhos Futuros	78
	<b>REFERÊNCIAS</b>	79
	<b>APÊNDICE A ROBÔS MÓVEIS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO</b>	85
A.1	Introdução	85
A.2	Mecanismo Proposto por (GONÇALVES, 2006)	87
A.3	Mecanismo de Rodas Andarilhas	90
A.4	Configuração Simples	92
A.5	Configuração Simples com Hastes	93

A.6	Configuração com Dois Sistemas de Locomoção . . . . .	94
A.7	Configuração com Três Sistemas de Locomoção . . . . .	95
A.8	Robô Lagarta . . . . .	96
A.9	Rolos Emborrachados . . . . .	97
A.10	Robô Elipsóide . . . . .	98
A.11	Robô com Garras . . . . .	98
A.12	Robô Equilibrista . . . . .	99
A.13	Robô Dirigível . . . . .	100

# 1 INTRODUÇÃO

O sistema de energia elétrica é formado por muitos componentes desde usinas geradoras de alta potência até as instalações prediais que permitem a utilização da energia pelos usuários. Dentro deste sistema um dos componentes mais importantes são as linhas de transmissão. Linhas de transmissão (LT) são condutores através dos quais a energia elétrica é transportada dos centros geradores aos centros consumidores. Estão sujeitas a tensões na ordem de centenas de milhares de Volts. Podem ser aéreas ou subterrâneas e são constituídas principalmente de alumínio.

As linhas de transmissão aéreas estão sujeitas a muitas condições adversas impostas pelo clima ou pela região onde são instaladas, por exemplo, se estão num local com constantes queimadas ou que a vegetação local esteja de alguma forma forçando sua estrutura. Essas condições adversas com o tempo podem levar a perdas de transmissão primeiro com uma diminuição na carga entregue e em casos mais graves a uma falta total de fornecimento.

Faltas não programadas podem levar a multas para as concessionárias de energia, grandes prejuízos para muitas empresas bem como podem gerar danos irreparáveis a vidas de muitas pessoas, caso de alguém cuja vida dependa do funcionamento de algum aparelho. Tendo em vista estes aspectos é importante monitorar as condições físicas e elétricas das linhas de transmissão para se estimar a vida útil de seus componentes bem como planejar, se necessário, uma ação corretiva (BEZERRA; RÉGIS JÚNIOR; LUNA, 1999).

É um procedimento comum das concessionárias de energia fazerem manutenções corretivas tentando evitar falhas eminentes ou consertando as que já ocorreram. O ideal é a implantação de uma manutenção preditiva que, além de levar em conta a vida útil, observa as condições que podem levar a degeneração destes componentes, a fim de preservá-los, planejar ações corretivas mais efetivas e construir um histórico das áreas estudadas, o que aumenta o conhecimento da situação destas áreas e torna o trabalho nestas linhas menos perigoso (MORÍNIGO; MINAMI, 2006).

O problema é a extensão das linhas e o alto custo dos métodos atuais que dificultam muito a monitoração das condições das linhas. Os métodos atuais de inspeção de linhas de transmissão envolvem operações tediosas e de alto custo. A utilização de operadores humanos inspecionando visualmente grandes extensões de cabos é extremamente repetitiva e monótona, o que favorece a desatenção e consequentemente falhas no processo de inspeção.

A termografia, que envolve a visualização das ondas de calor emitidas pelos objetos, é uma tecnologia cada vez mais utilizada em inspeções e em vários segmentos da indústria, pois é um método não destrutivo, rápido, não necessita contato com o material analisado e não necessita de interrupção de funcionamento em inspeções de

dispositivos elétricos e mecânicos, é de fácil implementação, em geral é apenas necessário uma câmera termográfica, e permite rápida detecção de falhas. Visualmente se pode perceber pontos quentes que indicam falhas de alguma natureza como falta de lubrificação em sistemas mecânicos ou mal contato em alguma conexão elétrica.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo desta dissertação é a implementação de um método de detecção automática de falhas utilizando a termografia. Como o reconhecimento de falhas não será mais feito por um agente humano a câmera pode estar em lugares perigosos ou inacessíveis para os inspecionadores e ainda pode fazer a inspeção de forma dinâmica, ou seja, não necessitando ficar estática e podendo fazer o imageamento de posições diferentes mais rapidamente. O objetivo é que este método seja preciso, rápido e mais eficiente que os usualmente utilizados com inspecionadores humanos.

## **1.2 Organização da Dissertação**

Esta dissertação foi dividida em alguns capítulos. No capítulo seguinte serão abordadas as características das linhas de transmissão e as manutenções atuais que motivaram o desenvolvimento desta tese. No terceiro capítulo é apresentado como funciona a termografia, a teoria envolvida e os dispositivos utilizados. O capítulo quatro mostra como a termografia vem sendo aplicada em sistemas elétricos. O capítulo cinco aborda os protocolos necessários para o recebimento da imagem termográfica e o capítulo seis mostra como foi desenvolvido o método de processamento de imagens que faz o reconhecimento da falha. O sétimo capítulo mostra os resultados obtidos no ensaio que validam o trabalho feito até então. O oitavo capítulo apresenta a conclusão e propõe trabalhos que possam dar continuidade a esta dissertação.

## 2 LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

### 2.1 Introdução

O principal alvo desta dissertação é o estudo das condições das linhas de transmissão. Para isso é importante conhecer suas características, seu local de instalação e que tipo de materiais serão frequentemente encontrados atreladas a ela. Desta forma é possível saber como essas variáveis vão influenciar no método proposto e se alguma eventual adaptação ou modificação será necessária. Além disso é importante conhecer os tipos de danos que podem sofrer os cabos, a origem deles e quais serão as consequências destes danos, dessa forma o problema pode ser identificado mais rapidamente e com maior precisão.

Este capítulo tem por objetivo apresentar os principais aspectos construtivos das linhas de transmissão. Aborda também a origem dos mais comuns danos sofridos pelas LT's.

### 2.2 Aspectos Construtivos

Linhas de transmissão são condutores através dos quais a energia elétrica é transportada entre os centros produtores e os centros consumidores.

Cada tipo de linha possui propriedades diferentes que dependem de frequência, nível de tensão, quantidade de potência a ser transmitida, modo de transmissão (aéreo ou subterrâneo), distância entre os terminais transmissor e receptor, etc.

A tabela 1 mostra a divisão em camadas dos sistemas de transmissão e distribuição com suas respectivas tensões.

Tabela 1: Sistemas de distribuição e transmissão de energia.

Componente	Tensão(kV)
Geração	2.2 - 22.0
Transmissão	138 - 1000
Sub transmissão	22 - 138
Distribuição	Distribuição primária 3.8 - 22
	Distribuição secundária 0.11 - 0.440

Os assuntos aqui tratados estão direcionados para linhas de transmissão de potência aéreas. O sistema de transmissão de energia elétrica compreende toda rede que interliga as usinas geradoras às subestações da rede de distribuição (LEÃO, 2009).

Os componentes básicos de uma linha de transmissão aérea são os condutores e cabos guarda, isoladores, as torres e os pára-raios.

### 2.2.1 Torres

As torres são estruturas que servem de suporte para os cabos. Devem mantê-los a uma distância segura tanto um do outro quanto de edificações locais. Para que atendam essas especificações elas são feitas de diferentes tamanhos e formas. Na figura 1 podem-se ver alguns exemplos de torres utilizadas por empresas de transmissão de energia elétrica (MOREIRA, 2008. 138).

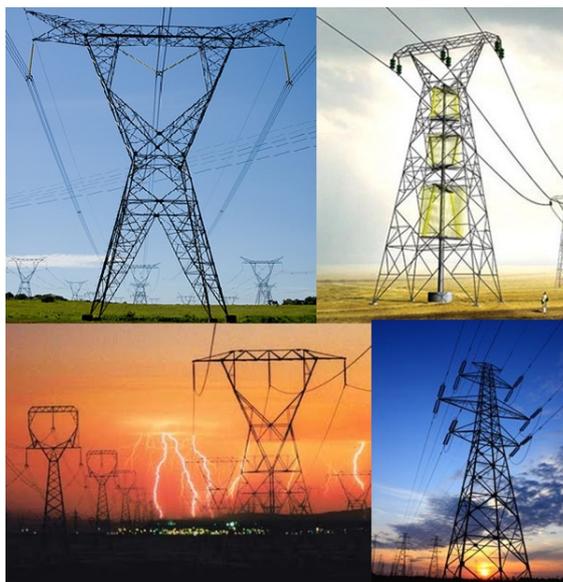


Figura 1: Exemplos de torres utilizadas em linhas de transmissão de energia elétrica.

### 2.2.2 Cabos Condutores e Cabos Guarda

Os cabos condutores são aqueles que transportam a energia elétrica. Os cabos guardas se localizam normalmente acima dos cabos condutores e têm como função proteger os cabos condutores de descargas elétricas.

Os materiais condutores mais empregados para as LTs são o cobre e o Alumínio (LEÃO, 2009). Atualmente os cabos condutores de alumínio têm substituído os condutores de cobre, isto porque apesar de terem um diâmetro maior para a mesma resistência, são bem mais leves e mais baratos (MOREIRA, 2008. 138).

O cabo de Alumínio é um condutor encordoado concêntrico composto de uma ou mais camadas de fios de alumínio, ver figura 2. Esse encordoamento pode variar conforme a aplicação (PHELPS DODGE, 2010).

Estes cabos de alumínio podem ser puros, AAC (*All Aluminum Cable* ou Cabo Todo de Alumínio) ou de uma liga de alumínio com magnésio ou silício, AAAC (*All Aluminum Alloy Cable* ou Cabo Todo de Liga de Alumínio). Estes dois tipos ainda podem ser reforçados com um cabo de aço no centro para aumentar a resistência mecânica, são o ASCR (*Aluminum Cable Steel Reinforced* ou Cabo de Alumínio Reforçado com Aço) e o ACAR (*Aluminum Cable Alloy Reinforced* ou Cabo de Liga de Alumínio Reforçado com Aço). Os cabos guarda não necessitam conduzir energia elétrica, sendo apenas importante a resistência mecânica, logo são feitos de

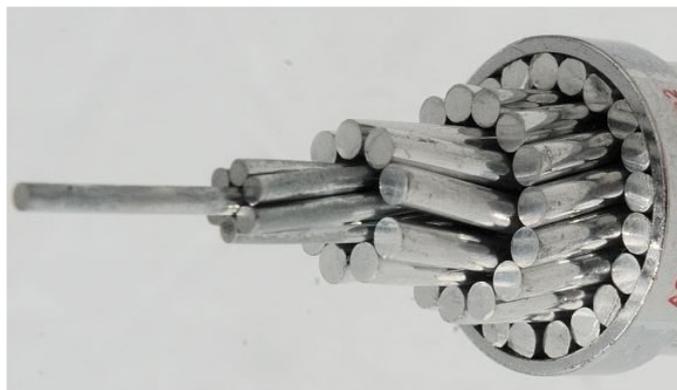


Figura 2: Corte de um cabo ACSR.

fios de aço torcidos (MOREIRA, 2008. 138).

### 2.2.3 Isoladores

Os isoladores servem para sustentar os cabos e isolá-los eletricamente das torres. Um isolador deve ter principalmente resistências elétrica e mecânica elevadas. Pois deve suportar o peso dos cabos, suportar variações de temperatura e não permitir que alguma corrente passe por ele. Inclusive seu formato deve ser adequado para impedir correntes de contornamento, descargas que podem ocorrer entre o condutor e a parte metálica da torre.

Atualmente os isoladores são feitos de porcelana ou de vidro e são agrupados formando uma cadeia de isoladores (MOREIRA, 2008. 138).

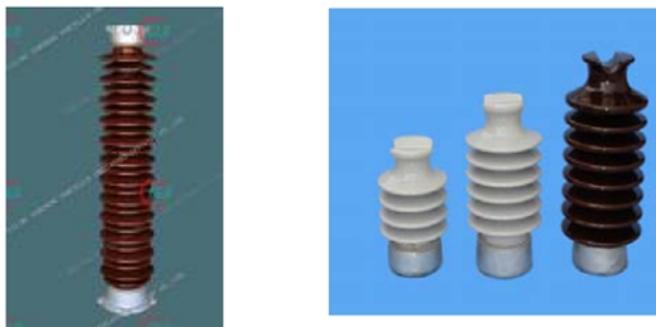


Figura 3: Exemplos de isoladores do tipo pilar.

### 2.2.4 Para-Raios

Para-raios são dispositivos construídos para absorver e drenar para a terra a energia proveniente de sobretensões no sistema elétrico que poderiam danificar os equipamentos em uma subestação. Comporta-se como um circuito aberto em condições normais, e como um curto-circuito enquanto existirem sobretensões, podem ser encontrados dentro dos isoladores (BEZERRA; RÉGIS JÚNIOR; LUNA, 1999).

## 2.3 Causas de Desgaste em Linhas de Transmissão

Aqui são citados alguns fatores que podem levar a danificação dos cabos.

**Vibrações Eólicas:** Ventos transversais brandos que incidem sobre os condutores podem provocar trações mecânicas superiores a suas cargas de ruptura provocando uma deterioração gradual. Essa deterioração pode provocar a ruptura parcial dos condutores, e é um defeito de difícil localização visual à distância (BEZERRA; RÉGIS JÚNIOR; LUNA, 1999).

**Temperatura dos Cabos:** O aquecimento das conexões elétricas pode provocar dilatações que eliminam por completo os contatos elétricos interrompendo o transporte da energia elétrica. Pode ser resultado de material mal escolhido ou conexão mal feita (BEZERRA; RÉGIS JÚNIOR; LUNA, 1999).

**Oxidação dos Cabos:** A oxidação nos condutores ocorre na alma de aço, após longos períodos de operação e pode ser acelerada em decorrência da agressividade do meio ambiente (umidade, acidez, etc.) (BEZERRA; RÉGIS JÚNIOR; LUNA, 1999). A chuva que penetra no cabo pode trazer consigo substâncias como o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), o cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) e o ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ). Esses compostos reagem com o alumínio formando o cloreto de alumínio ( $\text{AlCl}_3$ ), este por sua vez penetra na graxa e reage com a película de zinco, corroendo-a lentamente (MOREIRA, 2008. 138) como pode ser visto na figura 4. Essa corrosão enfraquece o condutor e pode causar a ruptura dele (BEZERRA; RÉGIS JÚNIOR; LUNA, 1999). Pela corrosão ser na parte interna do cabo, de dentro para fora, só é possível constatar sua existência a olho nu quando a corrosão já esta em estágio bem avançado (MOREIRA, 2008. 138).

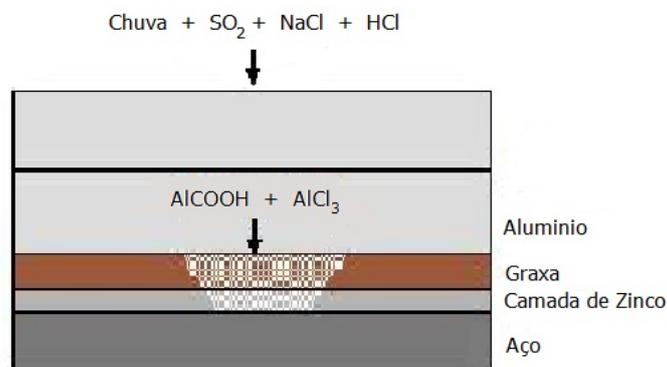


Figura 4: Diagrama da corrosão na alma de aço de cabos tipo ACSR.

**Poluição dos Isoladores:** É caracterizada pelo depósito de contaminantes que podem ser industriais, marítimos ou ambientais. Esses depósitos, a umidade e uma tensão elétrica mais elevada podem levar a formação de indesejáveis correntes de contornamento sobre a cadeia de isoladores e a consequente interrupção no fornecimento de energia (BEZERRA; RÉGIS JÚNIOR; LUNA, 1999).

**Falhas por Descargas Elétricas:** Se as torres não estiverem bem aterradas elas podem sofrer danos por descargas elétricas (BEZERRA; RÉGIS JÚNIOR; LUNA, 1999).

**Falhas de Fabricação:** As falhas que surgem nos cabos durante a sua fabricação, dependendo do tamanho, podem vir a degradar o material.

Desgaste de Juntas e Grampos: Juntas e grampos devem ser capazes de suportar toda a tensão elétrica do condutor com qualquer corrente e a qualquer temperatura, além de suportar o peso do cabo. Devem também garantir um bom contato dos condutores, o pouco contato entre os cabos aumenta a resistência elétrica. Isso provoca um aquecimento excessivo que pode danificar a junta (MOREIRA, 2008. 138).

## 2.4 Inspeção de Linhas de Transmissão

Geralmente a manutenção praticada pelas empresas é baseada apenas em manuais de periodicidade, que raramente são revisados, onde são determinados por tipo/fabricante os intervalos de tempo entre cada intervenção, o que é utilizado apenas para gerar uma programação estimada das metas de manutenção.

Em centros de operação e distribuição mais modernos, observa-se uma semi-automatização, envolvendo tecnologia de captura de dados e transmissão em tempo real, permitindo o conhecimento remoto dos estados dos dispositivos e a realização de manobras, em alguns casos permite a obtenção de históricos dos parâmetros de tensão, corrente e temperatura.

O que se observa nas maiores concessionárias é a implantação de algumas ferramentas informatizadas, desenvolvidas de forma integrada durante o processo de informatização das empresas, utilizando-se dos mesmos procedimentos de outros países mais desenvolvidos de manutenção preventiva sem dispor de recursos por eles disponibilizados de manutenção preditiva adequada, implicando na baixa eficiência de tal gerenciamento. O impacto maior é facilmente observado pela aplicação de sistemas que executam principalmente o controle e acompanhamento contábil e administrativo das atividades das empresas, mas cujo módulo de manutenção, que necessita ser acompanhado devidamente e adaptado por uma dinâmica própria, não é executado com uma eficácia desejada (MORÍNIGO; MINAMI, 2006).

É importante saber a vida útil remanescente de condutores ACSR face ao acúmulo de vibrações eólicas ou ao estado de oxidação da alma de aço desses condutores, se as conexões elétricas devem ser refeitas ou se as linhas devem passar por um processo de repotencialização. Para a averiguação desses aspectos das instalações elétricas alguns métodos de manutenção são utilizados, neste trabalho são abordados os utilizados para reconhecimento do estado das linhas.

### 2.4.1 Condições locais

A linha está sujeita a falhas por ventos transversais quando estes ultrapassam velocidades de 6 m/s. A identificação do fenômeno se dá através de vibrógrafos nas linhas.

As distâncias condutor-solo devem assegurar que os condutores, mesmo aquecidos pelo efeito Joule e ação do Sol, não violem as condições de segurança estabelecidas em normas técnicas que levam em consideração o comportamento eletromecânico da linha de transmissão em condições de carregamento normal ou contingências e degradação superficial dos condutores (BEZERRA; RÉGIS JÚNIOR; LUNA, 1999).

### 2.4.2 Inspeção pelo Método da Medição da Resistência

É um método utilizado principalmente para juntas, consiste na medição da resistência elétrica dos condutores. Um condutor em mal estado tem sua resistência

aumentada. A condição de uma junta é dada pela razão da resistência elétrica da junta e a resistência elétrica de um mesmo comprimento do condutor no qual ela está conectada. Uma junta adequada deve ter a sua resistência entre 30% e 80% do valor da resistência do condutor com mesmo comprimento.

É um método eficaz, mas a dificuldade de se acessar algumas regiões da instalação, às vezes, oferece um empecilho grande às medições (MOREIRA, 2008. 138).

### 2.4.3 Métodos para Inspeção de Superfícies de Cabos

A fabricação de cabos com a superfície totalmente perfeita é impossível de se obter, mas na prática defeitos menores que certa magnitude não degradam a qualidade do cabo. No passado, os fabricantes utilizavam como método de inspeção tanto o toque quanto a visão como maneira de detectar defeitos na superfície (HAMID; WLODARSKI; BRENNAN, 1999). Entretanto devido à subjetividade inerente e natureza inconsistente, tanto a inspeção visual quanto manual não provem um resultado satisfatório. Visando contornar esse problema, diversos métodos para inspecionar cabos foram criados. A seguir, serão apresentados alguns destes.

#### 2.4.3.1 Detecção por Contato

As irregularidades da superfície são lidas e convertidas em um sinal elétrico, que é armazenado e interpretado. Isto permite que diferentes tipos de análise possam ser feitas ao mesmo tempo.

#### 2.4.3.2 Detecção por Corrente de Foucault

O princípio do método, mostrado na figura 5 está em fazer circular uma corrente através de uma bobina, chamada de bobina de excitação. Um cabo é passado através desta bobina. Essa corrente que passa pela bobina de excitação produz um campo magnético no cabo, o qual induz correntes parasitas no cabo. Imperfeições na superfície do cabo levam a variações no padrão da corrente parasita. Essas variações nas correntes parasitas induzem sinais em outra bobina. Os sinais obtidos são medidos e analisados.

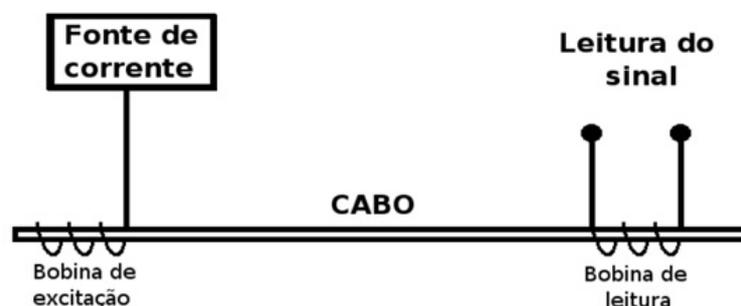


Figura 5: Esquemática do princípio do método.

As técnicas de análise através das correntes de Foucault geralmente são utilizadas para detectar defeitos em largas superfícies. Com o emprego dessa técnica, ficou estabelecido que sistemas baseados nesse método tem um resultado limitado devido a várias razões, como por exemplo, a limitação do tipo de material a ser inspecionado. Geralmente os instrumentos que utilizam esse método requerem que o material a ser

inspecionado seja condutor. Outra limitação são os tipos de defeito que o mesmo pode detectar. Somente defeitos localizados em uma faixa entre 0,1mm até 0,5mm (dependendo da frequência de excitação) em profundidade podem ser detectados. Já defeitos como os de continuidade longitudinal (arranhões) não conseguem ser detectados pelo método.

Na teoria, esse método de análise pelas correntes de Foucault é não-intrusivo. Entretanto, considerando que essa técnica requer que as bobinas fiquem bem próximas e ao redor do material a ser inspecionado, existe um risco grande de um contato entre o material e as bobinas. Tal contato pode ocasionar dano tanto às bobinas quanto a superfície do material analisado. Outro fator é que o método para ter uma boa precisão necessita que o material esteja bem centralizado em relação às bobinas. E considerando que vibrações durante o processo de inspeção são comuns, a desempenho deste método pode ser bastante prejudicado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO, 2010).

#### 2.4.3.3 *Detecção por Sensores Magnéticos*

O princípio de operação do método de detecção de defeitos através de sensores magnéticos está na medição da alteração de campos magnéticos causada pela variação das propriedades da superfície do cabo. Esse método só é efetivo quando aplicado a materiais magnéticos. O sensor mais largamente empregado é o chamado fluxgate sensor, sendo seu uso descrito por (WEI; JIANXIN, 2002). Pode ser usado em uma configuração longitudinal para detecção de campos magnéticos fracos. Com esse arranjo, o sensor fica localizado paralelo ao cabo.

Nesse método, o cabo é primeiramente magnetizado até a saturação na direção axial para produzir um campo magnético residual constante. Áreas com defeito resultarão na quebra do campo e irão mostrar uma mudança na saída do sinal do sensor. Informações relevantes sobre o cabo defeituoso são obtidas através da análise da distribuição das quebras do campo.

#### 2.4.3.4 *Visão Artificial-Imagem Capturada por CCD*

CCD (*Couple Charged Device*) é uma das tecnologias mais difundidas para obtenção de imagens. Baseia-se no uso do efeito fotoelétrico, onde cada pixel se forma através da acumulação de elétrons, essa acumulação gerada devido a incidência de fótons em um material sensível. Após a formação desses píxeis, os mesmos são agrupados visando formar um *frame*. Esse *frame* é processado por um computador com o objetivo de encontrar alguns tipos de características. Algumas dessas características podem ser consideradas defeitos.

Diversos sistemas de inspeção automática de superfícies estão sendo desenvolvidos utilizando visão artificial. No trabalho de (VASCOTTO, 1996) é mostrado um sistema para inspeção de superfícies baseado em fibra-óptica e CCD. O sistema é capaz de inspecionar superfícies e localizar defeitos cuja área mínima tenha um tamanho de 0,5 mm<sup>2</sup>, movendo-se a até 240 m/min. Caso mais de uma câmera seja utilizada, a área mínima pode ser reduzida, e a velocidade de inspeção aumentada, chegando a 700 m/min no sistema proposto.

Um dos inconvenientes de utilizar sistemas de inspeção baseados em CCD é a necessidade de uma boa iluminação para conseguir um resultado eficiente. Dentre as possíveis fontes de iluminação pode-se citar lâmpadas fluorescentes, lâmpadas halógenas, diodos emissores de luz no espectro infra-vermelho e ultra-violeta. Cada

aplicação determina o tipo de iluminação necessária.

#### 2.4.3.5 Inspeção Utilizando Laser

O princípio do mecanismo de operação de sistemas de inspeção de superfícies baseados em laser está na detecção de radiação laser descontinuada. Existem essencialmente duas técnicas que utilizam laser como meio de inspeção de superfícies. A primeira técnica é um sistema de inspeção de plano simples que mede defeitos de diâmetro em somente um eixo do cabo. O segundo é um sistema de três planos que cobre a total circunferência do cabo, com  $120^\circ$  entre cada eixo.

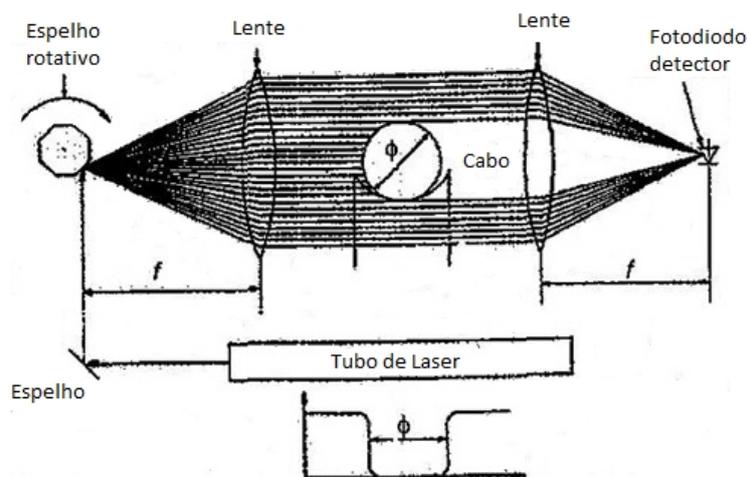


Figura 6: Método para uma dimensão.

O método de inspeção para uma dimensão consiste em focar a luz do laser em um espelho rotativo. Esse espelho transforma o feixe simples de luz em um conjunto de feixes, como mostra a figura 6. Estes feixes passam através de uma lente, que os paraleliza e faz com que eles incidam sobre o cabo. Após incidir sobre o cabo, os feixes passam por outra lente que faz a convergência destes visando focá-los em uma fotocélula. Através da incidência desses raios é possível saber o formato do cabo.

O princípio utilizado pelo método de inspeção para as três dimensões utiliza três fontes de laser projetadas no cabo, conforme pode ser visto na figura 7, e três fotocélulas correspondentes. A intensidade da radiação laser no lado oposto a sua incidência tem um valor proporcional ao seu diâmetro.

A detecção por laser é utilizada principalmente em fibras-ópticas. O método da análise das três dimensões é capaz de detectar defeitos de até  $200 \mu\text{m}$  em comprimento em um cabo de diâmetro de  $100 \mu\text{m}$ , a uma velocidade de até  $1000 \text{ m/s}$ . Apesar de precisa, essa técnica esbarra no alto custo envolvido.

#### 2.4.3.6 Emissão Acústica

Uma área contendo defeitos é uma área de concentração de tensões que, uma vez estimulada por um esforço externo, origina uma redistribuição de tensões localizada. Este mecanismo ocorre com a liberação de ondas de tensão na forma de ondas mecânicas transientes. A técnica consiste em captar esta perturbação no meio, através de transdutores distribuídos de forma estacionária sobre a estrutura. Estes receptores passivos, estimulados pelas ondas transientes, transformam a energia mecânica em

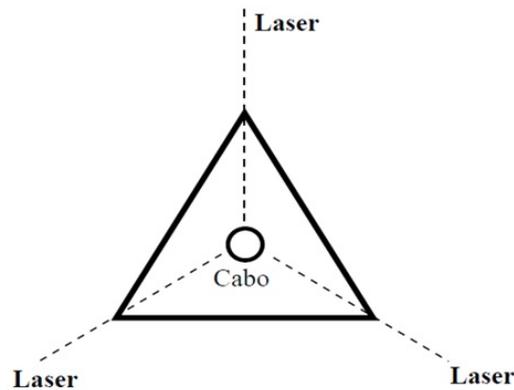


Figura 7: Método para as três dimensões.

elétrica sendo os sinais digitalizados e armazenados para futura análise através de parâmetros estabelecidos.

Este método detecta as discontinuidades nos estágios iniciais e permite que toda a superfície do equipamento em teste seja testada em um único ensaio. A inovação desta técnica está na possibilidade de realizar o teste com o equipamento em operação.

O ensaio por emissão acústica necessita que o material ou equipamento a ser ensaiado receba um estímulo externo, térmico ou mecânico, a fim de ativar as fontes de emissão acústica. Se o nível de tensão aplicado ao material ou equipamento não for o suficiente para ativar as fontes, o método considera os defeitos não críticos, ou seja, aceitáveis. Entre suas aplicações podem-se citar teste em tubulações, tanques, estruturas de fibras de vidro, máquinas rotativas e monitoramento de soldas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO, 2010).

#### 2.4.3.7 *Ultra-som*

Ondas ultra-sônicas podem ser usadas para detectar defeitos, medir espessuras ou caracterizar materiais. Transdutores permitem captar ondas de alta frequência que refletem cada vez que encontram uma discontinuidade. O ensaio por ultra-som é utilizado na inspeção de soldas, avaliação do efeito da corrosão, detecção de defeitos laminares em chapas planas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO, 2010).

## 2.5 Conclusão

Este capítulo versou sobre os aspectos importantes a serem levados em consideração no método proposto neste trabalho. As torres que servem de sustentação para os cabos também servem de obstáculos para as inspeções. Locais com presença constante de ventos fortes tem uma pré disposição a falhas sem falar que o vento impõe outra dificuldade aos métodos de inspeções desenvolvidos. Também é possível notar que o bom funcionamento das linhas depende de junções elétricas bem feitas, logo é importante que o método desenvolvido englobe também a análise da situação das juntas. Pode-se também assumir que independente da causa o principal pro-

blema nos condutores é a diminuição de sua condutividade o que em menor escala gera perdas na entrega de energia e em um nível mais grave pode levar a completa interrupção do fornecimento de energia. Outro ponto importante neste capítulo foi a análise de técnicas de inspeção em cabos já existentes, a automação desejada poderia utilizar alguns destes métodos, porém, como será elucidado nos próximos capítulos a termografia oferece algumas vantagens como a não necessidade de contato físico e a não necessidade de desenergização das linhas além de funcionar bem em superfícies curvas ou retas de maior ou menor espessura.

## 3 TERMOGRAFIA

### 3.1 Introdução

A termografia é um método de inspeção de equipamentos elétricos e mecânicos a partir de imagens de distribuição de calor (termogramas) (INFRATEMP, 2006). É uma técnica de inspeção não destrutiva e não invasiva que utiliza a radiação infravermelha emitida pelos corpos já que esta radiação aumenta proporcionalmente com a temperatura. Regiões com temperaturas elevadas em equipamentos eletromecânicos podem ser detectadas com esta técnica de inspeção e dependendo do seu valor uma falha pode ser rapidamente apontada. Devido a essas características, a termografia tem sido cada vez mais usada para manutenção preventiva e preditiva em diversos segmentos, tais como: indústrias metalúrgicas, químicas, siderúrgicas entre outras (PELIZZARI et al., 2006).

### 3.2 Aspectos Físicos

A radiação térmica é a energia emitida continuamente por todo corpo que se encontre a uma temperatura acima do zero absoluto (0 K ou -273,15° C). Essa energia é transmitida no espaço na forma de ondas eletromagnéticas ou fótons. A radiação não necessita de um meio para se propagar e sofre atenuação quando propagada em um meio que não seja o vácuo.

O fluxo máximo de radiação emitido por um corpo ideal à temperatura T é dado pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_n = \sigma T_{sup}^4 \quad (1)$$

Onde

$T_{sup}$  é a temperatura absoluta em Kelvin (K) da superfície

$\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )

$E_n$  é a energia irradiada, emitância, do corpo negro

O corpo negro é um objeto ideal que apresenta emissividade igual a 1, ou seja absorve toda a energia eletromagnética que incide sobre ele (ÁLVARES, 2008. 119)

A radiação infravermelha é uma radiação eletromagnética localizada na parte invisível do espectro eletromagnético como mostra a figura 8.

A radiação infravermelha tem comprimentos de onda longos dados por (PELIZZARI et al., 2006):

$$\lambda = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{T} \quad (2)$$

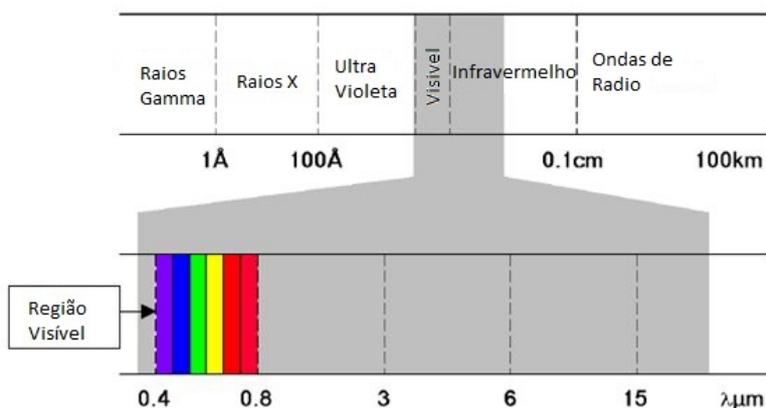


Figura 8: Espectro eletromagnético, na faixa entre 0,7 e 15  $\mu\text{m}$  utilizado para medição e análise térmicas (MIOTTO, 2008).

A expressão (2) descreve a relação entre o comprimento de onda  $\lambda$  (em metros) e a temperatura absoluta da radiação. Dessa forma é possível escolher a faixa espectral de abrangência do termógrafo em função da temperatura a ser medida (PELIZZARI et al., 2006).

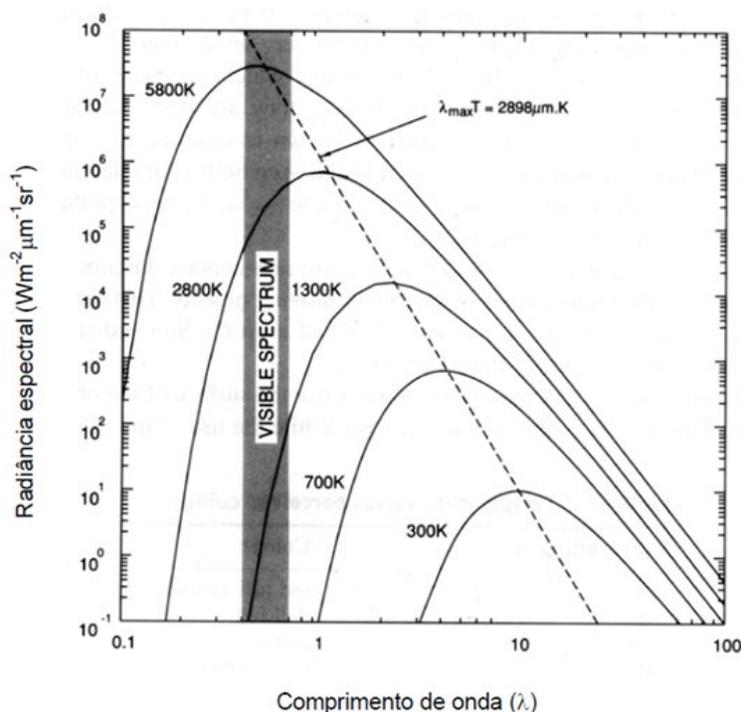


Figura 9: Radiação espectral de um corpo negro em função da temperatura (INFRATEMP, 2006).

A figura 9 apresenta um gráfico de radiação por comprimento de onda. Cada curva representa uma temperatura e a área delimitada por cada uma das curvas representa a emitância. A vantagem de se usar a emitância ao invés de outras grandezas ópticas é que a emitância independe da distância até a superfície e do tamanho da superfície.

A escala horizontal indica os comprimentos de onda nos quais a radiação é emitida. A radiação emitida em comprimentos de onda menores que  $0,4\mu\text{m}$  é chamada de ultra-violeta ou UV enquanto que a radiação emitida nos comprimentos maiores que  $0,7\mu\text{m}$  é chamada de infravermelha ou IV.

Pode-se observar a partir da figura 9 que para objetos abaixo de 700 K ( $500^\circ\text{C}$ ) toda a radiação está na invisível região do infravermelho. Conforme a temperatura aumenta as curvas de radiância começam a beirar a extremidade vermelha do espectro visível. Aumentando mais ainda o espectro de emissão move-se em direção ao visível e os objetos podem ser vistos com as cores apresentadas na região visível da figura 8. Em temperaturas acima de 1773K a 2073K os objetos tornam-se tão brilhantes que é difícil distinguir as cores e os contornos.

A observação das curvas da figura 9 permite concluir que à medida que aumenta a temperatura do objeto, a curva aumenta em amplitude e o valor de pico desloca-se para os comprimentos de onda menores. Assim é necessário uma temperatura muito elevada para que a energia emitida por um objeto pudesse ser visualizada.

### 3.3 Emissividade

A habilidade de um corpo radiar energia é chamada emissividade. É uma característica da superfície, que depende não apenas do tipo de material, mas da condição da superfície e do comprimento de onda em que a radiação é emitida, o que, por sua vez, depende da temperatura do corpo (figura 9).

O corpo negro não só absorve toda a energia eletromagnética que incide sobre ele, mas também radia a maior quantidade de energia possível em uma determinada temperatura. Na prática, os objetos reais não são corpos negros e tendem tanto a emitir quanto a refletir a radiação. A emitância de um corpo real, à mesma temperatura, é sempre menor do que a emitância do corpo negro, e é dado pela relação:

$$E_R = \varepsilon\sigma T_{sup}^4 \quad (3)$$

Onde a emissividade  $\varepsilon$ , relação entre a emitância de um corpo real e a de um corpo ideal com máxima capacidade de emissão, tem valores na faixa de  $0 \leq \varepsilon \leq 1$  e  $E_R$  representa a capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação ao corpo negro. Um corpo negro não apresenta, necessariamente, a cor preta. Trata-se de um termo usado para descrever um objeto capaz de absorver toda a energia que o atinge e de emitir a máxima radiação para uma dada temperatura (INFRATEMP, 2006).

A figura 10 mostra o comportamento tanto da energia que incide quanto da energia que é gerada por um corpo real. Num corpo aquecido, à medida que a energia gerada se desloca para a superfície, uma certa quantidade é refletida de volta e não deixará o corpo por radiação. Quanto a energia gerada uma parte é absorvida, outra é refletida e outra passa através do corpo. Nesta parcela refletida pode aparecer a radiação emitida por outros corpos aquecidos.

Um corpo negro ideal não reflete energia.

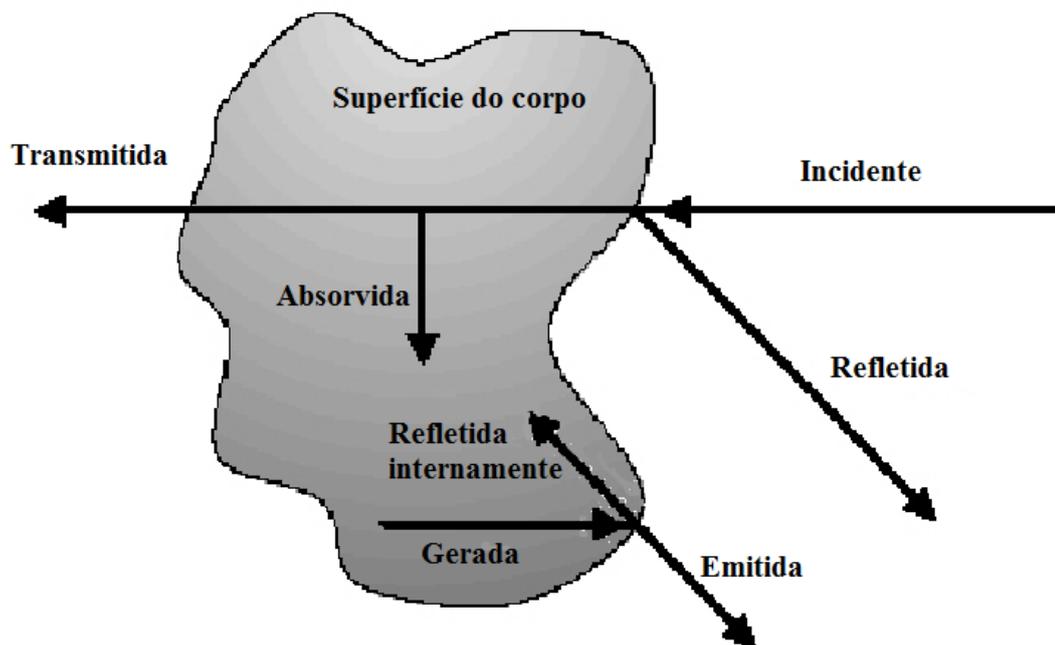


Figura 10: Emissividade x reflexividade.

### 3.4 Detectores de Infravermelho

Os detectores são dispositivos destinados a reconhecer a presença ou intensidade de um fenômeno físico, transformando esse dado em informação passível de ser processada. A função dos detectores infravermelhos é converter a energia radiante captada pelo sistema em outra forma mensurável de energia, geralmente um sinal elétrico.

São vários os materiais utilizados na fabricação de detectores. Eles variam conforme a faixa de infravermelho com a qual se pretende trabalhar como mostra a tabela 2.

Tabela 2: Classificação da faixa do infravermelho.

Faixa	Comprimento de Onda( $\mu\text{m}$ )
Infravermelho muito próximo	0.78 - 1.1
Infravermelho próximo	1.1 - 3.0
Infravermelho médio	3.0 - 6.0
Infravermelho distante	6.0 - 15.0
Infravermelho muito distante	15 - 1000

Os elementos detectores para as faixas do infravermelho muito próximo e do infravermelho próximo trabalham principalmente com a luz refletida. As faixas infravermelho médio e infravermelho distante são designadas como infravermelho térmico.

Pode-se classificar os detectores de infravermelho em duas classes: detectores de fótons e detectores térmicos.

### 3.4.1 Detectores de Fótons

Nos detectores de fótons a radiação é absorvida pelo material, carregam os elétrons da banda de valência para a banda de condução. Os elétrons livres resultantes podem ser induzidos a produzir uma corrente elétrica, seja aplicando-se um potencial através do dispositivo (modo fotocondutivo) ou pela presença de uma junção PN (modo fotovoltaico). Seu sinal só depende do número de fótons que interagem com os elétrons e por isso sua resposta é rápida, da ordem de poucos  $\mu\text{s}$ . Estes tipos de detectores apresentam uma dependência seletiva do comprimento de onda e uma ótima relação sinal/ruído. A desvantagem deles é precisarem de resfriamento criogênico, o que os tornam grandes, pesados e dispendiosos. Eles precisam de refrigeração, para evitar a corrente de escuro, que é a corrente que surge devido à temperatura e não à radiação infravermelha e interfere na medida (ÁLVARES, 2008. 119). Além disso operam somente em comprimentos de onda curto (INFRATEMP, 2006), infravermelho muito próximo e infravermelho próximo.

### 3.4.2 Detectores Térmicos

Nos detectores térmicos o efeito da radiação incidente que é absorvida altera a temperatura do material do elemento detector, resultando na mudança de alguma propriedade física do material que assim gera um correspondente sinal elétrico na saída. Eles tem larga faixa de sensibilidade espectral e tempo de resposta relativamente longos devido à inércia térmica dos componentes.

Os efeitos térmicos são geralmente independentes do comprimento de onda. Assim, o sinal de saída dependerá, sobretudo, da potência de radiação e não do conteúdo espectral (ÁLVARES, 2008. 119).

Os detectores térmicos podem ser do tipo bolômetro, piroelétrico ou termopilha.

#### 3.4.2.1 Detectores Térmicos Piroelétrico

Consiste de uma tira de material que quando é aquecido pela radiação incidente produz uma carga entre as duas faces. A pulsação da radiação produz uma corrente alternada que é proporcional ao aumento da radiação incidente.

Nestes detectores a carga em sua superfície se altera conforme muda a radiação recebida. O detector não pode atingir o equilíbrio térmico quando o material medido ainda estiver mudando de temperatura já que ele responde às mudanças de entrada de radiação (ocorreria saturação).

A mudança no detector pode ser comparada a uma mudança na carga de um capacitor, que deve ser lida com um circuito de alta impedância. Detectores Piroelétricos tem revestimentos absorventes de radiação de modo que podem ser detectores de banda larga. A resposta pode ser restringida selecionando o material de revestimento com características adequadas (OMEGA ENGINEERING, 2008).

#### 3.4.2.2 Detectores Térmicos de Termopilha

Uma termopilha é um dispositivo que consiste numa coleção de termopares conectados em série. Termopares são estruturas baseadas no efeito Seebeck (HERWAARDEN; SARRO, 1986), que consiste no aparecimento de uma diferença de potencial entre dois condutores diferentes expostos à mesma variação de temperatura. Assim um lado destas estruturas bimetálicas é exposto à radiação e o outro isolado da radiação de modo a se obterem medidas da intensidade de energia radiante através

dos valores obtidos para diferença de potencial.

Avanços em fabricação de filmes finos do termopilha possibilitaram melhoria no tempo de resposta. Um encapsulamento com temperatura controlada é usado, pois é necessário a compensação da temperatura ambiente na utilização dos termopilhas (OMEGA ENGINEERING, 2008).

### 3.4.2.3 Detectores Térmicos Microbolômetro

Bolômetros são basicamente resistores que tem sua resistência elétrica alterada com a variação de temperatura (OMEGA ENGINEERING, 2008). Para atingir alta sensibilidade o coeficiente de resistividade deve ser o maior possível e o ruído dos contatos com o material deve ser baixo. O elemento detector é suspenso sobre conexões de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  as quais são conectadas a um substrato de silício. As conexões de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  provém de isolamento térmica entre o microbolômetro e o substrato com o estágio de leitura.

Em (GU, 1998) foi utilizado um circuito elétrico com uma ponte de *Wheatstone*, figura 11, para se obter os parâmetros térmicos de um microbolômetro. Os semicondutores usados são de silício ou óxido de vanádio ou composto de silício e platina.

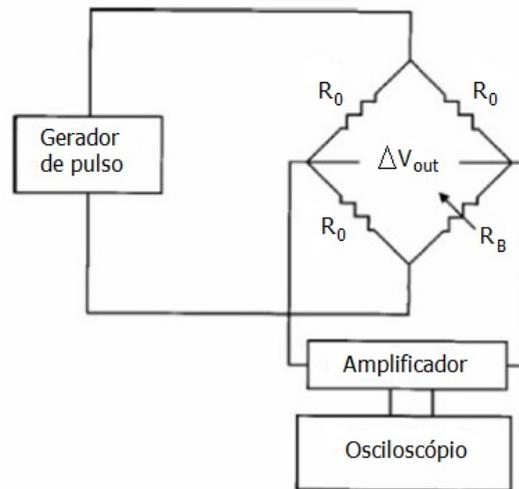


Figura 11: Configuração experimental para a caracterização de parâmetros microbolômetro utilizando um instrumento eletrônico (adaptado de (GU, 1998)).

O resistor  $R_B$  representando um microbolômetro, três resistores de referência  $R_0$ , um gerador de pulso, um amplificador e um osciloscópio foram utilizados. À temperatura ambiente, os resistores têm a mesma resistência e a tensão  $\Delta V_{out}$  é igual a zero. Quando o pulso quadrado de tensão advindo do gerador de pulso é aplicado à ponte a resistência  $R_B$  é alterada devido ao aumento de temperatura e as três resistências de referência permanecem praticamente iguais por estarem isoladas. A resposta térmica do microbolômetro pode ser demonstrada pela expressão:

$$H \frac{d\Delta T}{dt} = \frac{V_B^2}{4R_0} - G\Delta T \quad (4)$$

onde:

$V_B$  é a tensão do pulso aplicado à ponte

$G$  é a condutância térmica

$H$  é a capacitância vinculada ao aquecimento

$R_0$  é a resistência do microbolômetro à temperatura ambiente

$\Delta T$  é o aumento da temperatura no sensor

A potência gerada pelo microbolômetro durante a aplicação da tensão é:

$$P = \frac{V_B^2}{4R_0} \quad (5)$$

Considerando a mudança da resistência do microbolômetro até os termos de primeira ordem de  $\Delta T$  a temperatura do microbolômetro é como uma função no tempo e pode ser obtida pela expressão:

$$\Delta T = \frac{V_B^2}{4GR_0} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{k}} \right] \quad (6)$$

O aumento da temperatura do microbolômetro altera sua resistência, esta alteração depende do coeficiente de temperatura do resistor. A mudança na resistência produz uma tensão através da ponte, que é dada por:

$$\Delta V_{out} = \frac{\beta V_B^3}{16GR_0} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{k}} \right] \quad (7)$$

Onde,  $k$  é a constante de tempo térmica do microbolômetro e é dada por  $k=H/G$ ,  $\beta = (1/R)(\Delta R/\Delta T)$  é o coeficiente de temperatura do elemento sensor do microbolômetro.

O uso de arranjo de microbolômetros em câmeras infravermelho de custo mais baixo tem sido cada vez mais difundido. Várias empresas tem investido na produção de arranjos de plano focal não resfriados para uso comercial e militar utilizando os microbolômetros (ÁLVARES, 2008. 119).

### 3.5 Termovisores

São os aparelhos que formam os termogramas. Os termogramas são as imagens que permitem a visualização da distribuição de temperatura da superfície focalizada. Representam as temperaturas dos corpos na forma de cores, e como a imagem obtida com o termógrafo é provida de uma escala que correlaciona cor e temperatura, é possível a obtenção de resultados esclarecedores quanto a problemas ligados direta ou indiretamente à temperatura. Com estas imagens, também é possível obter-se a temperatura em um ponto ou área do objeto analisado (PELIZZARI et al., 2006).

Em temperaturas normais a maioria dos corpos é percebida pela visão humana por causa da luz que refletem e não pela luz emitida. Como mostra a figura 9, mesmo em temperaturas da ordem de milhares de Kelvin mais de 90% da irradiação térmica não é percebida pela visão humana (ÁLVARES, 2008. 119).

Seu princípio básico é filtrar e medir com um detector de sinal a radiação provinda de um objeto e enviar o sinal medido para um processador (INFRATEMP, 2006), como esquematizado na figura 12. A radiação é coletada por um arranjo óptico fixo e dirigida a um detector térmico, que converte a radiação incidente em um sinal de natureza elétrica. A lente é usada para focalizar a imagem. O filtro seleciona a banda de comprimento de onda para o qual o termômetro é sensível. Um amplificador amplia o sinal da saída do detector e um indicador de temperatura analógico ou

digital mostra o valor medido. O dispositivo para ajuste da emissividade serve para adequar melhor as medidas às condições ambientes (MIOTTO, 2008).

Os termômetros de radiação possuem três características principais que os distinguem dos demais termômetros.

- São termodinâmicos: baseiam-se numa lei física universal que descreve objetos reais com alta exatidão.
- Não necessitam contato: Podem ser usados para medir a temperatura de objetos distantes ou em movimento. Isto torna possível medir a temperatura em locais muito hostis para qualquer termômetro de contato.
- Usam a superfície do objeto de interesse como sensor (INFRATEMP, 2006).

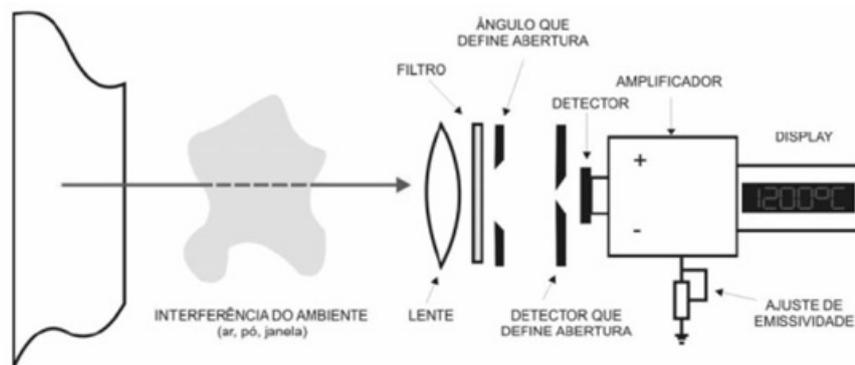


Figura 12: Esquema de um detector térmico de radiação de banda espectral mostrando os elementos básicos da sua construção e operação (MIOTTO, 2008).

### 3.5.1 Sistema Óptico

O sistema óptico de um termômetro de radiação compreende a lente, algumas vezes com uma lente secundária ou abertura à sua frente, um diafragma para restringir a área da lente que é efetivamente usada e um delimitador de campo localizado na frente do detector.

Todos os termômetros coletam radiação de uma zona cônica bem definida, na frente do termômetro, referida como alvo. O tamanho mínimo ou máximo do alvo é definido pelo FOV (*Field of View* ou campo de visão). Vide figura 13.

A figura 13 mostra os tamanhos de alvos que são medidos a diferentes distâncias do sistema óptico. O ponto focal do instrumento do exemplo é 170 mm, distância na qual o alvo precisa ter pelo menos 2 mm para garantir que o campo de visão esteja completamente preenchido. O instrumento pode ser usado a 200 mm do alvo; nesse caso o diâmetro mínimo do alvo é 9 mm.

O campo de visão de um termômetro é definido pela distância entre o delimitador de campo e o centro óptico da lente, dividido pelo tamanho da abertura do delimitador de campo. O campo de visão pode ser expresso em termos de um ângulo ou em termos de uma razão entre uma distância focal e o tamanho do alvo nessa

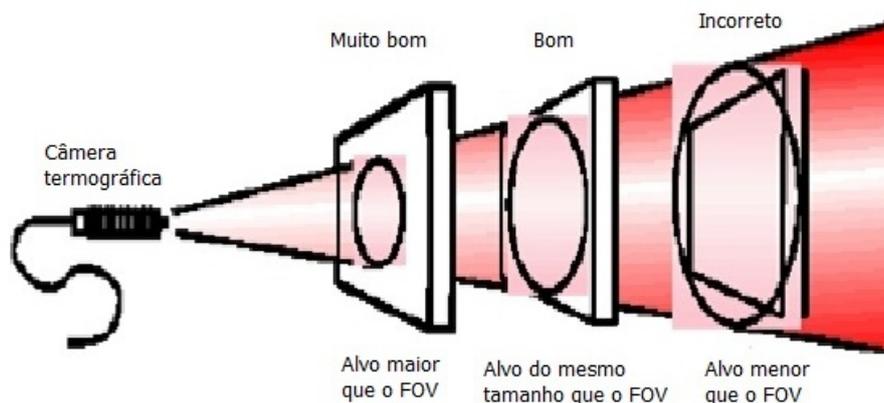


Figura 13: Focalização da imagem.

distância. Isso significa que um termômetro com um campo de visão de 100:1, a uma distância de 1000 mm, enxerga um alvo de 10 mm.

Os fabricantes de termômetros de radiação normalmente fornecem uma carta óptica do termômetro com os tamanhos de alvos em várias distâncias.

Embora um termômetro tenha um ponto focal determinado, ele pode ser usado a qualquer distância, desde que o alvo seja grande o suficiente e que, entre o alvo e o termômetro, não haja nenhum obstáculo que reduza a energia incidente (INFRA-TEMP, 2006).

### 3.5.2 Focal Plane Array

Para posterior formação da imagem os detectores são arranjados em matrizes, essas matrizes são denominadas *Focal Plane Array* (FPA), são os arranjos de plano focal, onde cada detector deste arranjo se constituirá em um pixel.

A estrutura esquemática de um detector térmico não resfriado é mostrado na figura 14. Estes detectores medem o aumento de temperatura por causa da absorção da radiação infravermelha por um elemento isolado termicamente. Detectores térmicos são compostos principalmente de um absorvedor de infravermelho incorporado a um elemento termômetro. O elemento termômetro induzido pelo aumento de temperatura gera um sinal elétrico.

Considerando uma matriz bidimensional de detectores, um circuito de leitura é designado para fazer a medida da resistência de cada bolômetro e formatar os resultados em um único fluxo de dados para fins de imagem de vídeo. Finalmente, devido à forte correlação entre o isolamento térmico e a sensibilidade, e para um melhor desempenho, o detector não resfriado deve ser operado sob vácuo, normalmente  $10^{-2}$  Torr (YON et al., 2003).

### 3.5.3 Parâmetros Importantes

A escolha da câmera deve levar em conta a finalidade de seu uso. Desta forma é possível especificar requisitos da imagem, determinação dos requisitos de medição, portabilidade, tolerância ao meio ambiente de utilização, requisitos de registro e processamento, disponibilidade de assistência técnica e custo.

Variáveis a considerar:

- Resolução espacial da imagem.

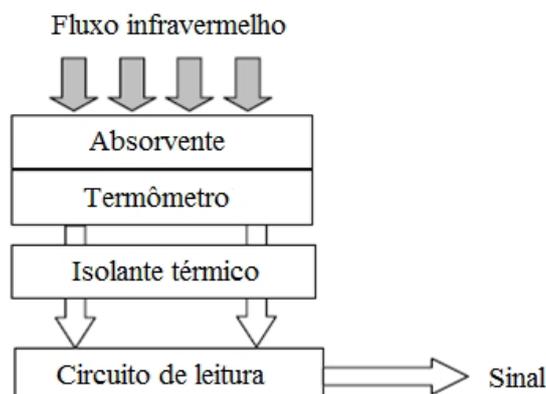


Figura 14: Esquema dos detectores térmicos adaptado de (YON et al., 2003).

- FOV - *Field of View* .
- Distância entre a lente da câmera e o objeto-alvo mais próximo.
- Profundidade do campo é a profundidade máxima de uma cena que permanece em foco.
- Qual é o menor nível de energia que pode ser medido.
- Faixas do infravermelho que a câmera detecta.
- Intervalo de medição de temperatura.
- Resolução radiométrica, qual é a menor variação de temperatura detectada pela câmera (LISBOA, 2010).

As câmeras modernas para inspeção infravermelha tendem para configurações de baixo custo utilizando FPAs de detectores térmicos não resfriados, sem obturador mecânico tornando-se mais leves e compactas. Suas lentes são construídas geralmente de materiais de germânio ou silício (ÁLVARES, 2008. 119).

### 3.5.4 A Formação da Imagem Digital Infravermelha

Uma imagem pode ser considerada como uma função de duas variáveis  $f(x,y)$ , onde os argumentos representam a posição espacial do valor e o valor da função corresponde a sua amplitude.

A digitalização em coordenadas espaciais é denominada amostragem da imagem e é determinada pela dimensão do arranjo e a resolução espacial. Quanto maior for a dimensão, maior será a imagem, quanto maior for a resolução maior serão os detalhes discerníveis na imagem. A imagem digital é uma aproximação da imagem contínua, quanto maior for o número de píxeis utilizados para se representar uma mesma imagem maior será a sua resolução. Quanto maior é o grau de amostragem e de quantização, melhor a aproximação da imagem original. A limitação encontra-se nos detalhes construtivos da câmera, na memória requerida e no processamento digital.

A amplitude define um nível de temperatura. A imagem digital é usualmente obtida através de processos de digitalização onde valores reais são transformados em

valores inteiros. A digitalização em termos de amplitude é denominada quantização. A figura 15 mostra uma imagem que representa a relação entre valor numérico de 256 níveis (quantizado com valores binários de 8 bits) e o respectivo nível de temperatura.

124	135	141	255
110	120	128	141
108	115	120	135
98	110	119	128

Figura 15: Escala de cinza (LUZ, 2010).

Em resumo, uma imagem digital é uma matriz retangular preenchida por valores inteiros como mostra a figura 15. Cada uma das posições dessa matriz é denominado pixel (GONZALEZ; WOODS, 2000).

Para saber o que cada pixel representa em uma imagem digital é necessário conhecer as propriedades radiométricas do aparelho utilizado para se construir a imagem. As características radiométricas descrevem como o sistema responde a vários níveis de radiação (HONKAVAARA; MARKELIN, 2007).

Em geral estas imagens radiométricas são utilizadas para detecções automáticas de determinadas características, neste trabalho, por exemplo, é o reconhecimento de níveis de temperatura. Para a visualização das imagens outros aspectos são mais importantes e todos envolvem realce de determinadas características para fácil reconhecimento por parte de um espectador humano. No caso de imagens termográficas o que importa é deixar nítido a diferença entre altas e baixas temperaturas e para isso se utiliza uma pseudocolorização.

#### 3.5.4.1 Características Radiométricas

Estas imagens termográficas são obtidas por câmeras equipadas com sensores térmicos do tipo microbolômetros e detectam comprimentos de onda na faixa do infravermelho, vide figura 8.

A formação dessas imagens se dá através da construção de um arranjo de elementos detectores dispostos adequadamente em um plano focal. Como resultado, cada elemento detector do arranjo ficará associado a um pixel da imagem formada.

Com relação à amostragem da imagem, pode-se citar que, atualmente, tem-se adotado arranjos de microbolômetros em matrizes 160x120, 320x240 ou 640x480.

Durante a exposição à superfície de interesse, cada elemento detector gera um sinal que é relacionado com o nível de radiação recebido e sua área.

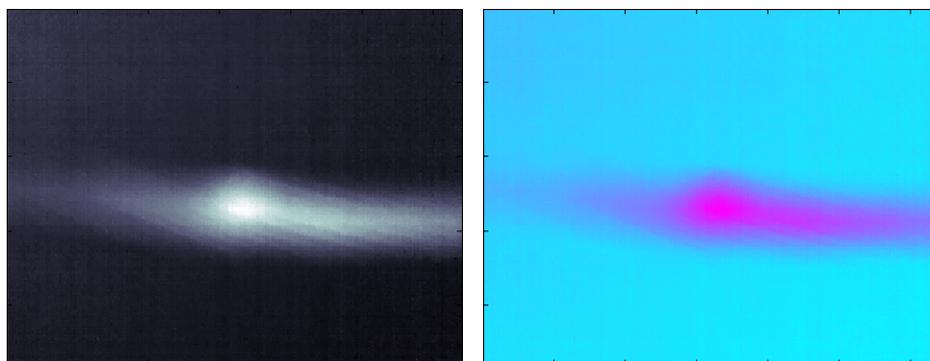
Este nível de sinal sofre ainda o efeito da eficiência quântica detectiva, que é definida como a transferência da relação sinal-ruído e que depende da área do elemento detector e sua eficiência de conversão. Quando a energia radiante é focalizada sobre o microbolômetro e é absorvida, a temperatura do elemento detector aumenta e altera sua resistência.

A análise da imagem infravermelha exige um entendimento do nível de temperatura, que representa uma medida da resposta do detector de infravermelho à potência radiante infravermelho que é absorvida e integrada por todos os ângulos. Esta resposta é não linear e depende dos comprimentos de onda passados pelos filtros da câmera e também da temperatura ambiente. A potência radiante que recai sobre o elemento detector é uma função complexa da radiância da superfície do objeto e do ângulo sólido que depende do sistema ótico da câmera. Como o nível de temperatura é obtido mais por uma integração do que por média, os arranjos de elementos sensores que incorporam um tempo de integração ajustável que permite também ajustar a faixa de temperatura (ou seja, estabelecendo-se o tempo de captura ajusta-se a faixa de temperatura). Este ajuste é efetuado eletronicamente na câmera, embora também possa ser efetuado com o uso de filtros. Quando a câmera e o sistema ótico estiverem calibrados para uma faixa específica de temperatura, os valores são então mapeados a temperaturas de tal modo que os níveis de temperatura podem ser interpretados linearmente em termo da temperatura da fonte, com o nível zero correspondendo a menor temperatura da faixa e o nível superior ao topo da faixa (ÁLVARES, 2008. 119).

A resolução radiométrica é o quanto de variação de energia pode ser detectado pelos sensores assim uma resolução radiométrica maior resulta em uma imagem térmica com valores mais próximos da realidade.

#### 3.5.4.2 Pseudocolorização

Para permitir a visualização de uma imagem digital infravermelho é utilizada a pseudocolorização. É uma técnica onde são atribuídas cores diferentes a distintas regiões dos valores de píxeis de uma imagem utilizando uma palheta (ou *palette*) de cores (MARQUES FILHO; NETO, 1999). A figura 16(a) mostra uma imagem com tons de cinza enquanto a figura 16(b) mostra a mesma imagem utilizando cores que variam do ciano ao magenta. As diferentes técnicas de visualização na imagem pseudocolorizada servem, por exemplo, para realçar as diferenças entre regiões de temperaturas diferentes deixando mais claro o que é quente e o que é frio.



(a) Pseudocolorizada.

(b) Pseudocolorizada com outra palheta.

Figura 16: Visualização da imagem radiométrica com diferentes pseudocolorizações.

## 3.6 Tipos de termografia

A inspeção de materiais utilizando a termografia pode ser ativa ou passiva.

### 3.6.1 Termografia Ativa

É usada quando não há fluxo de calor através do material. Para avaliar materiais ou componentes que são termicamente estáticos (todos os pontos estão em temperatura ambiente) é necessário gerar um fluxo de energia térmica, de tal forma que as propriedades estruturais do material possam melhorar ou impedir esse fluxo. Quando isso é feito de forma eficaz, os termogramas das amostras de teste indicam variações nessas propriedades estruturais.

A termografia ativa implica a introdução de uma quantidade sistemática e controlada de calor para a amostra em teste, a monitorização termográfica das superfícies da amostra e a busca por anomalias nos padrões térmicos indicará um “defeito” em conformidade com o estabelecido critério. Esta abordagem tem sido amplamente utilizado com sucesso por muitos anos pela indústria aeroespacial na avaliação de estruturas para detecção de impurezas, falhas, vazios, *unbonds*, delaminações e variações na integridade estrutural.

Os vazios e delaminações têm pior condutividade térmica do que o material laminado, eles impedem o fluxo de calor e a superfície monitorada aparecerá mais fria do que os vazios e delaminações. As obstruções de metal tem uma maior condutividade térmica do que o material laminado, aumentam o fluxo de calor e a superfície monitorada irá aparecer mais quentes sobre a obstrução de metal (AMMIRATO; ZAYICEK, 2006).

### 3.6.2 Termografia Passiva

A termografia passiva utiliza o fluxo de calor já existente na amostra. Há inúmeros casos em que as condições térmicas existentes são exploradas pela termografia para revelar características estruturais em artigos de teste (AMMIRATO; ZAYICEK, 2006) assim como em sistemas de energia onde a passagem de corrente elétrica gera calor naturalmente.

## 3.7 Conclusão

A termografia é a utilização dos fótons emitidos pelos corpos conforme aumentam a temperatura. Essas ondas eletromagnética são invisível aos olhos humanos mas podem ser captadas por sensores específicos. Esses sensores são dispostos em matrizes nos aparelhos chamados câmeras termográficas que formam as imagens. Eles permitem a medição de temperaturas sem a necessidade do contato físico.

A utilização das câmeras termográficas exigem alguns cuidados, algumas só funcionam bem sob alta refrigeração, por exemplo, além disso, ajustes como emissividade e distância do objeto em análise da lente permitem medidas mais precisas, mesmo que os corpos não tenham um comportamento ideal de emissividade perfeita. É importante saber que tipo de dados estão sendo lidos da câmera para uma correta interpretação, essas imagens podem ter diferentes resoluções dependendo do número de sensores e diferentes níveis de exatidão dependendo da sensibilidade dos sensores e da quantização efetuada.

Algumas câmeras disponibilizam suas imagens em diferentes formatos como *JPEG*

(*Joint Photographic Experts Group*) (INDEPENDENT JPEG GROUP, 2007) ou *PNG (Portable Network Graphics)* (WORLD WIDE WEB CONSORTIUM, 1995).

É importante ressaltar a vantagem das câmeras de microbolômetros que não necessitam de refrigeração e, embora não tenham uma resposta tão rápida quanto os detectores de fótons, têm uma medida bastante precisa.

## 4 TERMOGRAFIA APLICADA A SISTEMAS ELÉTRICOS

### 4.1 Introdução

A termografia é uma técnica bastante empregada na inspeção de componentes e sistemas elétricos. Muitos sintomas de falhas estão ligados à elevação de temperatura em sistemas elétricos, é o caso de maus contatos e degradação dos condutores onde a resistência elétrica fica demasiadamente elevada e ocorre a dissipação de calor (PELIZZARI et al., 2006). Por essa causa torna-se de grande importância para o setor o desenvolvimento de processos confiáveis de medida de temperatura.

O presente capítulo apresenta como tem sido aplicado a termografia em sistemas elétricos.

### 4.2 Aplicação da Termografia

Convencionalmente são utilizados termovisores para avaliar o estado térmico desses condutores afetados (BEZERRA; RÉGIS JÚNIOR; LUNA, 1999).

A figura 17 mostra um *hotspot*, uma região onde existe um aquecimento desproporcional em relação ao resto dos componentes, criado por uma conexão ruim em um sistema de distribuição de energia.

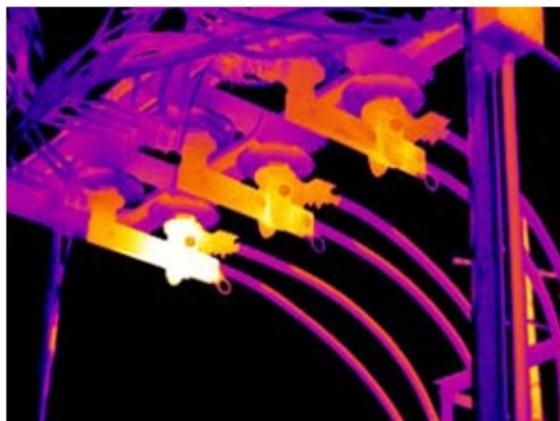


Figura 17: Inspeção de um Sistema de energia (LAND, 2004).

A inspeção termográfica pode ser realizada com os equipamentos em operação normal, não acarretando qualquer risco ao funcionamento, a sua segurança ou a sua infra-estrutura.



Figura 18: Inspeção de um conector (LAND, 2004).

A motivação principal da aplicação dessa ferramenta é a identificação das regiões de possíveis falhas. Isso possibilita tomada de providências antes que as falhas ocorram e permite direcionar a intervenção da manutenção corretiva de forma programada, ponderada ao grau de criticidade da região quente.

São considerados regiões quentes as partes dos circuitos que apresentam temperatura superior a Máxima Temperatura Admissível (MTA) para o funcionamento em regime contínuo de cada componente ou parte de circuito elétrico ou eletrônico em inspeção. Assim, cada componente pode apresentar valores diferentes de MTA. Esses valores podem ser obtidos através de normalização disponível ou fornecidos pelos fabricantes.

Os valores de MTA genericamente podem ser considerados de  $60^{\circ}$  para cabos isolados em Subestações ou redes de distribuição de energia elétrica ou  $70^{\circ}\text{C}$  para as demais aplicações e  $90^{\circ}\text{C}$  para conexões. As medições finais são corrigidas em função da temperatura ambiente e para a condição de carga nominal. A tabela 3 mostra alguns valores de MTA (BRITO; LAMIN FILHO; ALVES, 2004).

Tabela 3: Máxima Temperatura Admissível.

Componente Industrial	MTA( $^{\circ}\text{C}$ )
Condutor encapado (Isolação de Cloreto de Polivinila (PVC))	70
Condutor encapado (Isolação de Borracha Etileno Propileno (EPR))	90
Condutor encapado (Isolação de Polietileno Reticulado (XLPE))	90
Régua de Bornes	70
Conexões Mediante Parafusos	70
Conexões e Barramentos de Baixa Tensão	90
Conexões Recobertas de Prata ou Níquel	90
Transformadores Secos	Ponto Mais Aquecido
Classe de Isolação 105	65
Classe de Isolação 130	90
Classe de Isolação 155	115
Classe de Isolação 180	140

O grau de criticidade, uma medida de quão perto de romper está o cabo, é

um valor já corrigido em função do MTA para cada componente inspecionado, tabela 4, (CANÇADO; FELIPE, 2000).

Tabela 4: Classificações dos graus de criticidade.

Grau de criticidade da “região quente” quanto ao risco do componente falhar	Intervenção da manutenção
Baixo	Rotina de manutenção
Médio	Intermediária(avaliar componente)
Alto	Urgência(reparar o mais rápido possível)
Falha Iminente	Emergencial(reparar imediatamente)

Na tabela 5, têm-se os critérios de prioridades a serem tomados de acordo com a variação de temperatura  $\Delta T$  encontrado na medição (BRITO; LAMIN FILHO; ALVES, 2004). Onde  $\Delta T$  refere-se à diferença entre o MTA do componente subtraída

Tabela 5: Critérios de Prioridades.

Classificação	$\Delta T$	$\Delta T$	MTA Cabos	MTA Conector	MTA
	Baixa Tensão( $^{\circ}$ C)	Alta Tensão( $^{\circ}$ C)	de Alta Tensão( $^{\circ}$ C)	Alta Tensão( $^{\circ}$ C)	Isolação Padrão( $^{\circ}$ C)
Rotina	10,0	10,0	68,3	79,5	43,3
Intermediária	16,6	20,0	76,7	87,8	48,9
Séria	23,3	30,0	85,0	96,1	54,4
Emergencial	30,0	40,0	98,9	110,0	60,0

da temperatura de um componente similar de referência (Tabela 5) (CANÇADO; FELIPE, 2000).

### 4.3 Métodos de inspeção automatizada

Os termovisores são empregados para se fazer a inspeção, e assim um usuário ao ver a imagem pode notar a presença de um *hotspot*. Em pequena escala e em instalações abertas esta é uma boa solução, porém quando o objetivo é a rápida detecção ou quando locais de difícil acesso tem que ser inspecionados a utilização apenas do diagnóstico humano começa a ser inviável. Nesse ponto surge a necessidade de um reconhecimento computadorizado de falhas.

#### 4.3.1 Análise por Componentes

Em (ISHINO, 2002) o autor propõe a extração dos diferentes aparatos presentes na imagem termográfica em termos do gradiente de temperatura local. Cada objeto por causa de sua natureza apresentará uma distribuição diferente de temperatura. O autor propõe a separação destes aparatos para analisa-los individualmente. A figura 19(a) mostra uma instalação elétrica e a figura 19(b) mostra sua imagem térmica. A figura 19(c) mostra os aparatos identificados pelo método.

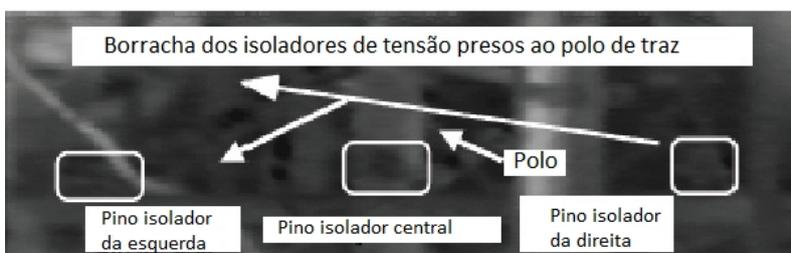
Em cada aparato é calculada a temperatura média dos píxeis mais quentes. Caso a temperatura aumente em algum local dos polos essa média também tem seu valor aumentado e assim pode identificar se existe algum aparato com falha. Esse método abrange o imageamento de vários componentes pois a câmera termográfica esta longe dos condutores e por isso não foi conveniente utilizá-lo.



(a) Foto dos componentes.



(b) Imagem Termográfica.



(c) Detecção dos aparatos presentes na imagem termográfica.

Figura 19: Extração de componentes do sistema elétrico.

### 4.3.2 Método dos Coeficientes Invariantes

Em (KORENDO; FLORKOWSKI, 2001) o método é desenvolvido utilizando um *toolbox* do *software* Matlab, o IR-TEP (*InfraRed Trend Evaluation Package* ou Pacote de Avaliação de Propagação Infravermelho). Possui uma série de ferramentas de visualizações que permitem realces de determinadas características e diferentes paletas de cores.

O método assume qual a variação de temperatura está relacionada com a variação da resistência dos condutores pela seguinte expressão:

$$T = T_{amb} + cI^2R \quad (8)$$

onde:

$c$  é uma constante(kelvin/Watt)

$T_{amb}$  é a temperatura ambiente

$R$  é a resistência

$I$  é a corrente elétrica

É definida uma variável  $\Delta T$  como sendo a diferença entre a temperatura da superfície ( $T$ ) e a temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ). Assumindo que a dissipação de calor se dá apenas por convecção e não por radiação ou condução é possível dizer que a razão entre o ( $\Delta T$ ) de duas partes do condutor é invariante a mudanças de carga ( $I$ ) e condições ambientes. Assim:

$$\frac{\Delta T_i}{\Delta T_j} = \frac{\Delta T_i^*}{\Delta T_j^*} = tif_{i,j} \quad (9)$$

Onde:

$i, j$  indexam partes diferentes do condutor

$\Delta T^*$  é a medida de temperatura com condições de carga e ambiente alteradas em relação a  $\Delta T$

$tif$  é o *thermal invariant factor* ou fator de temperatura invariante

O  $tif$  é o valor utilizado para se fazer o diagnóstico. Um valor limiar (*threshold*) de  $tif$  é estabelecido para três situações: normalidade, cautela e emergência. Conforme o  $tif$  calculado ultrapasse estes  $tif_{threshold}$  a região da imagem termográfica analisada será classificada como normal, estado de alerta e perigo.

O problema deste método é que os  $tifs$  foram estabelecidos para elementos distintos desconectos, ou seja, para as regiões que englobam terminações de cabos e conexões elétricas.

### 4.3.3 Ensaios Não Destrutivos

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são definidos como testes para o controle da qualidade, realizados sobre peças acabadas ou semi-acabadas, para a detecção de falta de homogeneidade ou defeitos, através de princípios físicos definidos, sem prejudicar a posterior utilização dos produtos inspecionados.

Constituem uma das principais ferramentas do controle da qualidade e são utilizados na inspeção de produtos soldados, fundidos, forjados, laminados, entre outros, com vasta aplicação nos setores petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico,

naval, auto-peças e transporte rodo-ferroviário (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO, 2010).

Alguns destes ensaios foram mencionados na seção 2.4 e a termografia pode ser usada como um ensaio não destrutivo em inspeções de superfícies, no caso de sistemas de energia, nas superfícies dos condutores.

Em (FAN; SUN; YANG, 2005) é implementado um método que estima o tamanho, a profundidade e a condutividade térmica das falhas de acordo com a distribuição de temperatura na superfície, utiliza termografia passiva em regime permanente.

Em (DURRANI et al., 1988) é apresentado um método para peças recém fabricadas onde se utiliza o comportamento transitório da distribuição de temperatura para detectar falhas no interior do material.

Em (MALDAGUE; KRAPEZ; POUSSART, 1990) as formas e os locais das falhas no material são detectadas pela distribuição espacial dos píxeis. Uma nova imagem termográfica é formada onde só aparecem com uma intensidade limitada. Esse limite é gradualmente aumentado, quando na nova imagem surge uma borda ou um aglomerado de píxeis próximos então este é o local da falha.

Em (DURRANI et al., 1987) o material é sujeito a pulsos de calor e o comportamento transitório da distribuição de temperatura é utilizado para a detecção da falha.

Em (KOJIMA; KAWAGUCHI, 1993) uma rede neural artificial é aplicada pra classificar imagens termográficas dos materiais. Uma rede neural *feed-forward* com camadas ocultas pode ser ensinada a classificar os dados de testes em categorias apropriadas.

## 4.4 Conclusão

A termografia já é amplamente utilizada para instalações elétricas, sua utilização permite fácil reconhecimento de locais com falhas por parte dos técnicos responsáveis. Já foram estabelecidas níveis de temperatura que especificam o bom funcionamento de cada componente de uma instalação e níveis que indicam a intensidade da falha no caso de sua existência.

## 5 RECEPÇÃO DA IMAGEM

### 5.1 Introdução

Este Capítulo trata da recepção da imagem da câmera termográfica. A recepção da imagem envolve a escolha da melhor interface de comunicação entre a câmera termográfica e o computador que a processa. Definido isso deve-se entender como os dados são transmitidos através desta interface para poder recebê-los interpretá-los e armazená-los de forma mais conveniente para análise. Este capítulo busca elucidar todas as escolhas e implementações bem como as ferramentas utilizadas para essa parte do método desenvolvido.

### 5.2 FLIR A320

A câmera termográfica utilizada para o desenvolvimento desta tese é a câmera da empresa FLIR modelo A320 mostrada na figura 20.



Figura 20: Câmera da FLIR A320.

Este modelo é um dispositivo de vídeo que pode entregar imagens através de redes IP. As principais características deste modelo da FLIR são:

- Tipo de Detector Microbolômetro de Arranjo de Plano Focal não resfriado.
- Faixa Espectral 7.5 a 13.0  $\mu\text{m}$ .
- Faixas de Temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $+120^{\circ}\text{C}$  ou de  $0^{\circ}\text{C}$  to  $+350^{\circ}\text{C}$  opcionalmente pode ir acima de  $+1200^{\circ}\text{C}$ .
- Precisão (% da leitura):  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  ou  $\pm 2\%$ .

- Lente de 25 graus integrada com foco motorizado, automático ou manual.
- Permite ajuste de emissividade.
- Suporte para várias resoluções de imagens até imagens mais nítidas-320x240 píxeis.
- Possibilidade de alterar a taxa de *frames*.
- É possível escolher o tipo de codificação do vídeo como MPEG-4 ou RAW.

A conexão física de maior interesse nesta câmera é a Ethernet. Por ela é possível trocar dados e enviar comandos utilizando diferentes protocolos de baixo nível. Para fazer esse acesso podem ser usados diferentes serviços: telnet, ftp, http, CIFS, FLIR resource socket, RTP. Mais de um deles podem estar sendo utilizados simultaneamente (FLIR, 2007):

- Telnet: A câmera é acessada através de comandos no *prompt* do terminal.
- FTP: Os arquivos podem ser transferidos de/para a câmera usando o protocolo FTP.
- HTTP: Um *WEB browser* pode ser utilizado para fazer o acesso aos dados da câmera.
- CIFS: *Common Internet File System*. Por este serviço é possível mapear uma pasta de arquivos que se encontra na câmera como uma pasta localizada no computador do usuário.
- Socket: Os comandos são passados através de funções específicas que permitem ler e estipular determinados parâmetros da câmera.
- RTP: A câmera transmite seus dados por pacotes RTP e recebe comandos pelo protocolo RTSP, abordados na sessão a seguir.

Para o processamento da imagem *on-line* o serviço mais adequado da câmera é o RTP. Neste serviço a câmera vai funcionar na rede como um servidor de vídeos.

### 5.3 Protocolos de comunicação

Para a implementação deste trabalho foi necessário o entendimento e a utilização de alguns protocolos de comunicação, dos quais podem ser destacados, o RTP, o RTSP e o SDP que serão abordados neste capítulo.

Estes Protocolos são padronizados pela IETF (sigla em inglês de *Internet Engineering Task Force*), comunidade internacional que se propõe a identificar e propor soluções referentes às questões que envolvem a internet, e são descritas nas RFC's (*Request for Comments*), documentos publicados pela IETF.

Os protocolos IP, *Internet Protocol*, descrito no RFC791 (POSTEL, 1981a) TCP, o protocolo TCP, *Transmission Control Protocol*, documentado no RFC793 (POSTEL, 1981b) e protocolo UDP, *User Datagram Protocol*, documentado no RFC768 (POSTEL, 1980) são utilizados para se trocar dados entre dois ou mais computadores.

### 5.3.1 Real-time Transport Protocol

Descrito no RFC1889 (SCHULZRINNE et al., 1996), o RTP (*Real-Time Transport Protocol*) define um formato para empacotamento de dados que trafegam na Internet e que são enviados e lidos simultaneamente como áudio e vídeos interativos ou videoconferências. Esses dados de áudio e vídeo transmitidos pela Internet são chamados de *stream*.

O RTP não fornece nenhum mecanismo para garantir a entrega dos dados nem a entrega na ordem certa dos pacotes, ele assume que os pacotes vindos das camadas mais baixas do serviço já estão ordenados.

Uma sessão RTP é o nome dado a associação entre um grupo de participantes que estão trocando dados entre si empacotados com o RTP.

Diferentes tipos de *stream* serão enviados em diferentes sessões de RTP mesmo que façam parte da mesma comunicação. Por exemplo, em uma videoconferência são transmitidos dois tipos de *stream* (áudio e vídeo), os pacotes de áudio serão transmitidos por uma sessão RTP enquanto os pacotes contendo as imagens serão transmitidas por uma sessão RTP diferente. Esse tipo de comportamento permite que o receptor escolha uma *stream* em particular de uma fonte que forneça várias *streams*.

O RTP suporta uma grande variedade de formatos multimídia, ou seja, a *stream* pode conter vídeos nos formatos H.264, MPEG-4, MJPEG, MPEG entre outros como pode ser visto na tabela 6.

A figura 21 mostra como é o cabeçalho dos pacotes RTP.

V	P	X	CC	M	PT	<i>sequence number</i>
<i>timestamp</i>						
identificador SSRC						
identificadores CSRC						

Figura 21: Pacote RTP.

- V (Versão) - 2 bits: Identifica a versão de RTP utilizada.
- P (*Padding*) - 1 bit : Este bit é “um” quando existem um ou mais octetos adicionais ao final do pacote que não fazem parte dos dados.
- X (Extensão) - 1 bit: Se este bit for “um”, o cabeçalho fixo será seguido de apenas uma extensão de cabeçalho.
- Contagem de CSRC - 4 bits: Quantidade de identificadores CSRC (Fonte Contribuinte ou *Contributing Source*) presentes no cabeçalho. O número de CSRC's está limitado entre 0 e 15.
- M (Marcador) - 1 bit: Este bit pode ser usado pela aplicação para marcar determinados pacotes.

- PT Tipo de dados - 7 bits: Este campo define que tipo de dados há no pacote, tabela 6.
- Número de Sequência - 16 bits: Este campo serve para ordenar os pacotes de uma comunicação, sendo que o primeiro pacote recebe um número de sequência aleatório e os seguintes recebem o número de sequência do pacote imediatamente anterior incrementado de um.
- Carimbo de Tempo - 32 bits: Ilustra o momento em que o primeiro octeto dos dados foi gerado.
- Identificador SSRC (Fonte de Sincronização ou *Synchronization Source*) - 32 bits : Identifica as fontes de sincronização. Cada participante de uma sessão RTP escolhe de forma aleatória um identificador SSRC que irá identificá-lo dentro desta sessão frente aos outros participantes. A probabilidade de duas fontes escolherem o mesmo SSRC é quase nula, mas mesmo assim, todas as aplicações RTP devem estar preparadas para detectar e solucionar colisões.
- Identificador CSRC (Contributing Source) - 32 bits: Identifica as fontes que contribuíram para a formação dos dados contidos no pacote. Este identificador se aplica a pacotes gerados por Misturadores.

O tipo de *payload* (*payload type* ou PT) é o tipo de informação ou de dado em tempo real contido em cada pacote. Ele serve para o identificar para o cliente o tipo de dado e assim não se gastar tempo averiguando o conteúdo do pacote para saber o formato da informação que carrega. Os valores de 96 a 127 da tabela 6 podem ser usados informar diferentes tipos de *payload* dependendo do servidor que disponibilizará os dados. No caso da FLIR A320, ver tabela 22, os valores 96, 97, e 98 servem para o formato MPEG4, os valores 100 e 101 servem para o formato FCAM, formato proprietário, e os valores 103 e 104 para o formato RAW.

### 5.3.2 Real Time Streaming Protocol

O *Real Time Stream Protocol* é um protocolo de internet utilizado para controle de servidores que enviam *streams*. Foi desenvolvido pela *Multiparty Multimedia Session Control Working Group* (MMUSIC WG) da IETF e descrito na RFC2326 (SCHULZRINNE; RAO; LANPHIER, 1998). Basicamente este protocolo propõe uma lista de comandos que controlam e estabelecem uma sessão de mídia. Sessão de mídia aqui é o mesmo que a sessão RTP onde a *stream* disponibilizada pelo servidor é de dados de voz e/ou de vídeo. Seus comandos são:

- OPTIONS: Comando utilizado para pedir ao servidor os tipos de comandos que ele irá aceitar
- DESCRIBE: Descreve os tipos de mídia disponíveis pelo servidor.
- ANNOUNCE: Serve para fazer a descrição dos tipos de mídia novamente, ou na hora em que o cliente quiser ou toda vez que uma nova *stream* é adicionada pelo servidor.
- SETUP: Ajusta todas as especificações necessária para o envio da *stream*.

Tabela 6: Tipos de *Payload* especificados no cabeçalho RTP.

PT	tipo de codificação	audio/video (A/V)	taxa de clock (Hz)
0	PCMU	A	8000
3	GSM	A	8000
4	G723	A	8000
5	DVI4	A	8000
6	DVI4	A	16000
7	LPC	A	8000
8	PCMA	A	8000
9	G722	A	8000
10	L16	A	44100
11	L16	A	44100
12	QCELP	A	8000
13	CN	A	8000
14	MPA	A	90000
15	G728	A	8000
16	DVI4	A	11025
17	DVI4	A	22050
18	G729	A	8000
25	CelB	V	90000
26	JPEG	V	90000
31	H261	V	90000
32	MPV	V	90000
33	MP2T	AV	90000
34	H263	V	90000
96–127	dynamic	?	

- PLAY: Inicia o envio da *stream*.
- PAUSE: Pausa o envio da *stream*, que depois é retomado exatamente de onde parou caso seja enviado um PLAY.
- REDIRECT: Comando enviado pelo servidor para indicar pro cliente que este deve se conectar em outro servidor.
- RECORD: Utilizado para não apenas receber a *stream*, mas também armazená-la.
- TEARDOWN: Para o envio da *stream*, que para ser retomado deve se iniciar todo o processo de novo com o SETUP e o PLAY.
- GETPARAMETER: Pega um parâmetro específico do *stream* enviado, como pacotes recebidos ou jitter.
- SETPARAMETER: Altera o valor de um parâmetro específico do *stream* enviado.

Os comandos suportados pela câmera são OPTIONS, DESCRIBE, SETUP, PLAY, PAUSE e TEARDOWN.

### 5.3.3 Session Description Protocol

O protocolo *Session Description Protocol*, documentado no RFC4566 (HANDLEY; JACOBSON; PERKINS, 2006) propõe um formato para descrever os parâmetros de inicialização de uma sessão RTSP em strings ASCII. Esta descrição serve para anunciar uma sessão, fazer um convite de início de uma sessão ou fazer negociações quanto aos parâmetros da sessão. Uma sessão é descrita por uma série de atributos. A maneira como o SDP apresenta estes atributos é colocando um valor por linha. O caracter que representa este atributo é seguido pelo símbolo de '=' e depois por uma *string* que informa o valor deste atributo:

Descrição da Sessão propriamente dita:

- v= versão do protocolo
- o= identificador da sessão
- s= nome da sessão
- i= informação sobre a sessão
- u= URI da descrição
- e= endereço de e-mail
- p= número de telefone
- c= informações da conexão
- b= informações de largura de banda
- z= ajustes de hora local

- k= chave encryptografada
- a= atributos da sessão

Descrição de tempo:

- t= tempo que a sessão esta ativa
- r= número de vezes a ser repetida

Descrição de mídia, podem ter vários dependendo do número de mídias disponibilizados pelo servidor:

- m= nome da mídia e endereço de transporte
- i= título da mídia
- c= informações da conexão
- b= informações da largura de banda
- k= chave encryptografada
- a= atributos da mídia

A figura 22 mostra a descrição da sessão estabelecida com a FLIR. Nela é possível ver a versão do protocolo, o identificador, o nome, informações adicionais, o momento do inicio, informação da conexão, o tipo de mídia e uma série de atributos da sessão.

#### 5.3.4 Interação entre protocolos

A aplicação de multimídia consiste em vários fluxos de áudio, vídeo, texto entre outros. Esses fluxos são multiplexados na camada RTP que os codifica em pacotes RTP. Pacotes UDP são gerados e incorporados a pacotes IP. Como o computador está em uma rede Ethernet, os pacotes IP serão inseridos em quadros Ethernet para transmissão. A pilha de protocolos para essa situação é mostrada na figura 23.

A função básica do RTP é multiplexar diversos fluxos de dados de tempo real sobre um único fluxo de pacotes UDP. O fluxo UDP pode ser enviado a um ou a vários destinos. Como o RTP utiliza simplesmente o UDP normal, a princípio, seus pacotes não são tratados de maneira especial pelos roteadores e não há nenhuma garantia na entrega dos pacotes.

Cada pacote enviado em um fluxo RTP recebe um número de sequência. Essa numeração permite ao destino descobrir se algum pacote esta faltando e tomar a atitude apropriada, tipicamente a retransmissão não é uma boa opção, pois o pacote retransmitido provavelmente chegaria tarde demais para utilização. Como consequência, o RTP não tem nenhum controle de fluxo, nenhum controle de erros, nenhuma confirmação e nenhum mecanismo para solicitar retransmissões (TANENBAUM, 2003).

O SDP é utilizado para determinar parâmetros da conexão entre o cliente e o servidor. São enviados da câmera para o computador que recebe as imagens termográficas. O RTSP é utilizado para enviar comandos que controlam o fluxo de dados do servidor para o cliente.

```

RTSP/1.0 200 OK
CSeq: 2
Date: 24 Jun 2010 20:57:18 GMT
Content-Type: application/sdp
Content-Length: 1028
Content-Base: rtsp://10.1.32.1/
v=0
o=- 0 0 IN IP4 10.1.32.1
s=IR stream
i=Live infrared
t=now-
c=IN IP4 10.1.32.1
m=video 13124 RTP/AVP 96 97 98 100 101 103 104
a=control:rtsp://10.1.32.1/sid=96
a=framerate:30
a=rtpmap:96 MP4V-ES/90000
a=framesize:96 640-480
a=fmtp:96
profile-level-id=5;config=000001B005000001B509000001010000012002045D4C28A021E0A4C7
a=rtpmap:97 MP4V-ES/90000
a=framesize:97 320-240
a=fmtp:97
profile-level-id=5;config=000001B005000001B509000001010000012002045D4C285020F0A4C7
a=rtpmap:98 MP4V-ES/90000
a=framesize:98 160-128
a=fmtp:98
profile-level-id=5;config=000001B005000001B509000001010000012002045D4C28282080A4C7
a=rtpmap:100 FCAM/90000
a=framesize:100 320-240
a=fmtp:100 sampling=mono; width=320; height=240; depth=16
a=rtpmap:101 FCAM/90000
a=framesize:101 160-120
a=fmtp:101 sampling=mono; width=160; height=120; depth=16
a=rtpmap:103 raw/90000
a=framesize:103 320-240
a=fmtp:103 sampling=mono; width=320; height=240; depth=16
a=rtpmap:104 raw/90000
a=framesize:104 160-120
a=fmtp:104 sampling=mono; width=160; height=120; depth=16

```

Figura 22: SDP Descritor da sessão retornado pela câmera.

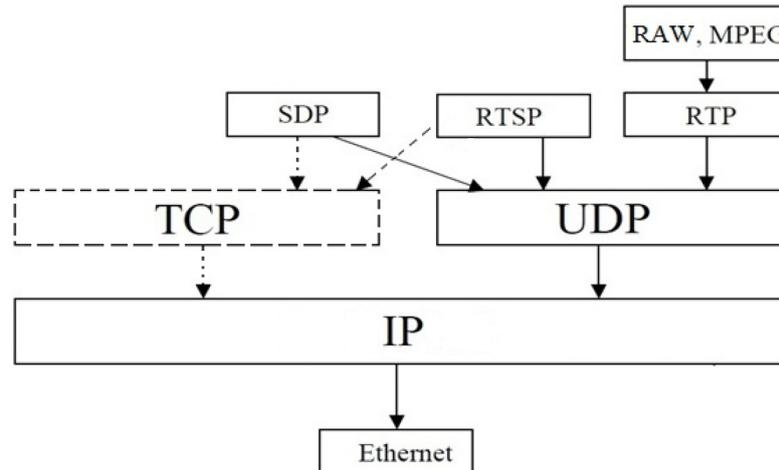


Figura 23: Pilha de Protocolos.

### 5.3.5 Ajuste de Parâmetros da Câmera

Esta etapa consiste no ajuste e parâmetros da câmera FLIR A320 para a sua resposta de temperatura ser o mais precisa possível.

Existem 3 leituras diferentes dos dados que podem ser obtidas da câmera em modo RAW:

- píxeis de 16 bits linear em sinal: valor de radiância medido dos sensores.
- píxeis de 16 bits linear em temperatura, resolução espectral de 0.1 K (0 K - 6553 K): valor de radiância passado para temperatura.
- píxeis de 16 bits linear em temperatura, resolução espectral de 0.0 1K (0 K - 655 K): valor de radiância passado para temperatura.

Para definir qual destes formatos a câmera vai enviar é feita uma configuração pela interface telnet. Utiliza-se os *resources* da tabela 7:

Tabela 7: *Resource* utilizados para setar o tipo de valores contidos nos *frames* da câmera.

<i>Resource</i>	Valor	Modo de Operação
.tlut.active	true	Temperature linear mode
.tlut.active	false	Raw mode (valor linear do pixel)
.tlut.format	0	100 mK resolution (0 - 6535 K)
.tlut.format	1	10 mK resolution (0 - 653 K)

Os valores utilizados para o processamento são os de temperatura. Caso sejam utilizados os dados radiométricos da câmera (Raw mode da tabela 7), os valores dos sensores devem ser transformados para temperatura por software. A câmera pode fazer esta conversão, no entanto alguns parâmetros devem ser determinados para que a câmera possa fazer a correta conversão dos valores lidos de radiância para temperatura:

- Ajuste da lente.

- Condições Ambientais.
- Características do Objeto.

#### 5.3.5.1 Ajuste da Lente

Conforme a lente escolhida para a câmera, diferentes limites de temperatura podem ser medidos. E apenas dentro desta faixa os valores poderão ser detectados com exatidão. O tipo de lente deve ser determinado antes de se iniciar a inspeção. A lente utilizada de Germânio permite medidas de temperatura de  $-20^{\circ}$  a  $120^{\circ}\text{C}$ .

#### 5.3.5.2 Condições Ambientais

A temperatura ambiente deve ser fornecida para se fazer a compensação nas temperaturas medidas.

#### 5.3.5.3 Características do Objeto

A emissividade de um objeto representa o quanto de energia ele emite. Um corpo ideal emite toda a energia gerada pelo seu aumento de temperatura, porém os objetos reais não tem este tipo de comportamento sendo sua emissividade afetada pela sua forma e natureza. Este parâmetro também deve ser informado para a câmera.

Tabela 8: *Resources* Diversos.

<i>Resource</i>	Modo de Operação
.image.sysimg.basicImgData.objectParams.ambTemp	ajusta a temperatura ambiente
.image.sysimg.basicImgData.objectParams.emissivity	ajusta a emissividade do objeto

A temperatura ambiente do laboratório estava em torno de  $27^{\circ}\text{C}$  e a emissividade utilizada para o alumínio é de 0.2.

### 5.3.6 Recepção da *Stream*

As *streams* são descritas e apresentadas utilizando o protocolo SDP. Através dele é possível saber quais *streams* estão disponíveis e as suas características. Inicialmente deve-se solicitar que a câmera liste as *streams* disponíveis enviando o comando DESCRIBE. A tabela 9 mostra estas *streams*, ela foi construída com informações extraídas do descritor de sessão enviado pela câmera da figura 22.

Tabela 9: Tipos de *streams* da FLIR A320.

Codificação	Resolução
MPEG4	640 x 480
MPEG4	320 x 240
MPEG4	160 x 120
FCAM	320 x 240
FCAM	160 x 120
RAW	320 x 240
RAW	160 x 120

As três primeiras *streams* são codificadas em MPEG4. A diferença entre uma e outra é a resolução, quanto maior a resolução maior o nível de detalhamento. As

duas *streams* seguintes estão em um formato proprietário definido pelo fabricante e não tem muita utilidade neste trabalho.

As duas últimas *streams* estão em formato RAW que é um formato de vídeo sem compressão e o que muda de uma pra outra é a resolução.

A *stream* utilizada para este trabalho é a RAW 320 x 240, cuja maior resolução permite maior precisão no local do reconhecimento de temperaturas na imagem.

Depois é enviado um comando para a câmera transmitir a *stream* escolhida. Para receber essas *streams* é necessário criar uma sessão RTP.

Iniciada a sessão o computador começa a receber os pacotes RTP. Destes pacotes são extraídos os píxeis, valores inteiros entre 0 e 65535 devido a quantização da temperatura ser feita com 16 bits. O formato do pacote RTP para o formato RAW é descrito no RFC 4175 (*RTP Payload Format for Uncompressed Video*) (GHARAI; PERKINS, 2005) e mostrado na figura 24.

V	P	X	CC	M	PT	<i>sequence number</i>	
<i>timestamp</i>							
SSRC							
<i>Extended Sequence Number</i>					<i>Length</i>		
<i>Line N°</i>					C	<i>Offset</i>	
<i>Length</i>					F	<i>Line N°</i>	
<i>Offset</i>							
<i>Lines of video data</i>							

Figura 24: Pacote RTP para *stream* de vídeo descompactado.

- *Length* - 16 bits: Tamanho da linha da imagem.
- *Line No.* - 15 bits: Número da linha da imagem.
- *Offset* - 15 bits: Offset do primeiro pixel do payload de dados dentro da linha.
- *C* - 1 bit: Indica se uma parte do *payload* é utilizado para informações do vídeo e não faz parte da imagem.
- *F* - 1 bit: Indica se a linha pertence aos *frames* pares ou ímpares em vídeos *Interlacing*.
- *Payload Data* - Os píxeis da linha que formam a imagem.

Cada 16 bits desse *payload* forma um pixel da imagem termográfica. Eles são transferidos na ordem de bytes da rede (*Big Endian*), ou seja, primeiro os bits mais significativos e depois os menos significativos. Depois de recebidos e armazenados em matrizes que constituirão os *frames*, o envio da *stream* é parado pelo programa e a sessão é encerrada.

A *stream* RAW é formada pelos valores detectados pelos sensores possuindo, a taxa de transferência dos seus *frames* fica em torno de 7.8 *frames* por segundo.

O Software Live 555 (LIVE NETWORKS, 2006) foi utilizado para enviar os comandos do protocolo RTSP que controlam as *streams* de dados:

- RTSP/DESCRIBE.
- RTSP/SETUP.
- RTSP/GETPARAMETER.
- RTSP/PLAY.
- RTSP/PAUSE.
- RTSP/TEARDOWN.

## 5.4 Conclusão

Para recepção da imagem é necessário solicitar ao servidor o envio do Descritor de Sessão onde entre outras opções são listadas as *streams* disponíveis pela câmera, tabela 9. Então é estabelecida uma sessão RTP com o servidor por onde será feita a troca dos pacotes de imagem RAW. Os pacotes são recebidos e armazenados no cliente em matrizes de 320x240 que constituem as imagens termográficas que serão processadas. Uma vez terminada a recepção o envio da *stream* é terminado e a sessão RTP é fechada.

## 6 PROCESSAMENTO DA IMAGEM

### 6.1 Introdução

Depois de recebido uma imagem ou um *frame*, que corresponde a um intervalo do cabo sob inspeção, é necessário o processamento desta imagem termográfica para julgar a presença de alguma falha. Para fazer esta detecção foi utilizado o *Thermography Anomaly Detection Algorithm* (ITADA) proposto por (CHOU; YAO, 2009).

O método descrito neste capítulo faz a detecção de regiões quentes e utiliza como critério para determinar a sua criticidade tabelas de valores de temperatura utilizadas em inspeções termográficas (tabela 4).

### 6.2 Algoritmo ITADA

É um método que visa o processamento de imagem térmica baseada em métodos estatísticos e morfológicos. Técnicas de processamento são usados para identificar pontos quentes, regiões quentes e as temperaturas de referência. Análises qualitativas e quantitativas são realizadas sobre as informações coletadas e resultados da inspeção são apresentados depois destas informações serem processadas.

Primeiro se eliminam as baixas temperaturas, ou a temperatura de *background*, dessa forma a análise é feita apenas sobre os componentes quentes, ou seja, eletricamente carregados, o *foreground*. Então são detectados as regiões mais quentes, os *hotspots*. Destas regiões aquelas que apresentam a área muito pequena são descartadas da análise pois significam um ruído na imagem. Em seguida são determinadas as regiões que serão utilizadas como referência. A região de referência tem de ser escolhida a partir de uma área com a mesma estrutura e características semelhantes. Um exemplo de *hotspot* e referência é mostrado na figura 25. É calculada a média da temperatura destas regiões e através destes valores a situação do cabo será caracterizada.

As peças defeituosas são detectadas determinando quais destas áreas nas imagens de infravermelho estão com temperaturas superiores aos níveis normais pré-estabelecidos. Os resultados da inspeção são classificados em diferentes categorias dependendo dos níveis de temperatura detectada. O objetivo é identificar e dar a localização provável das peças defeituosas para os agentes responsáveis pela reparação e manutenção.

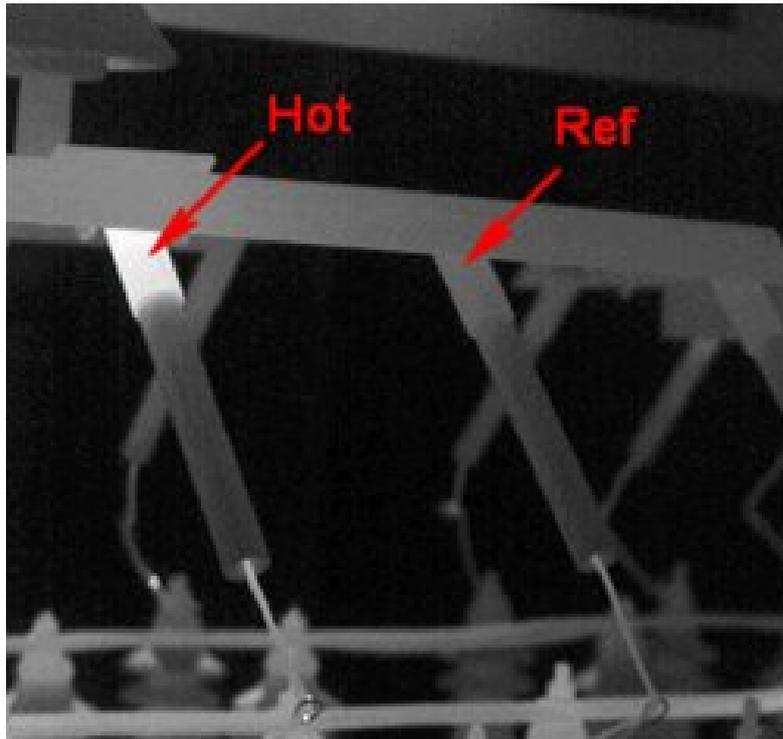


Figura 25: O hotspot e a região de referência.

### 6.3 Segmentação

De posse da imagem com os valores de temperatura radiométrica a primeira parte do processamento é a segmentação. Segmentação é o processo pelo qual a imagem é dividida em partes ou objetos constituintes (GONZALEZ; WOODS, 2000).

Neste trabalho as partes que interessam ser analisadas são as regiões quentes, ou seja, os componentes eletricamente energizados da imagem termográfica. Em instalações de energia, o equipamento sempre tem temperaturas mais elevadas do que o meio ambiente, assim o alvo da análise pode ser separado do resto. Para tanto são definidos dois conjuntos de valores e um valor limiar:

- Temperatura de *Foreground*: Componentes quentes onde é necessário fazer a verificação da existência de temperaturas extremas.
- Temperatura de *Background*: Partes frias da imagem que não devem entrar na análise, pois além de dificultar o processamento não englobam componentes elétricos.
- Temperatura *threshold* ( $T_t$ ): Valor limiar de temperatura utilizado pra separar os valores de *Foreground* e os valores de Background.

Dado um valor limiar a segmentação pode ser feita zerando-se os píxeis referentes a temperatura de *background*. A máscara de píxeis do *foreground* é a matriz  $\beta$ . Para obtê-la, os píxeis da imagem  $\alpha$  assumem o valor 1 quando são superiores a  $T_t$  e assumem o valor 0 quando inferiores a  $T_t$ .

$$\beta(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } \alpha(x, y) \geq T_t \\ 0 & \text{se } \alpha(x, y) < T_t^* \end{cases} \quad \forall 0 \leq x < W, 0 \leq y < H \quad (10)$$

sendo:

$\alpha$  a imagem original.

$T_t$  é o valor limiar de temperatura.

$W$  é a largura da imagem.

$H$  é a altura da imagem.

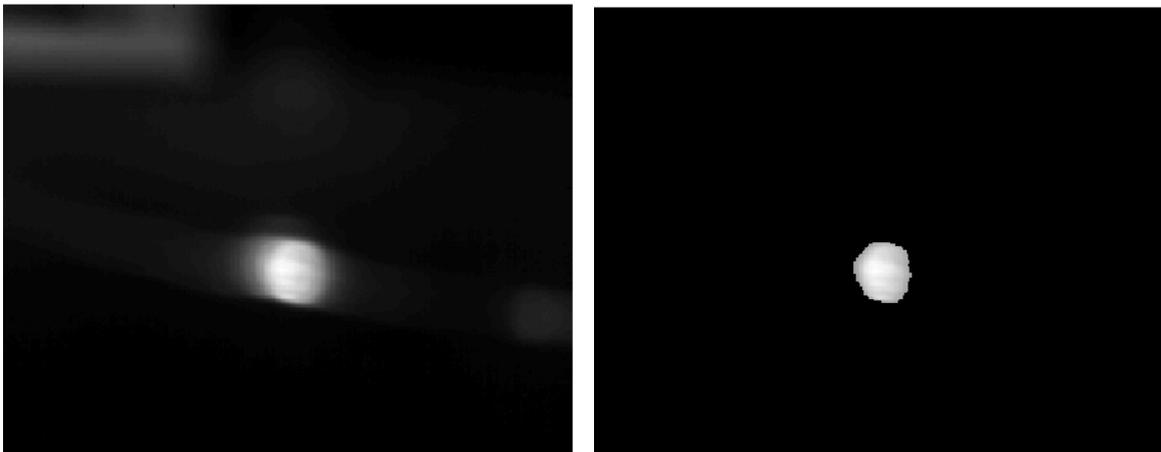
$x$  e  $y$  são os valores inteiros que indicam a posição do pixel.

A máscara  $\beta$ , além de um passo intermediário da segmentação, também é necessária para a definição da região de referência, mostrada adiante.

A imagem segmentada  $\gamma$  é a que apresenta o *foreground* da imagem termográfica.

$$\gamma(x, y) = \begin{cases} \alpha(x, y) & \text{se } \beta(x, y) = 1 \\ 0 & \text{se } \beta(x, y) = 0 \end{cases} \quad \forall 0 \leq x \leq W, 0 \leq y \leq H \quad (11)$$

A figura 26 mostra a imagem termográfica em escala de cinza original e a imagem termográfica segmentada  $\gamma$  sem a presença dos píxeis definidos como *background*.



(a) Imagem termográfica original.

(b) *Foreground* da imagem termográfica original.

Figura 26: Segmentação.

### 6.3.1 Escolha da temperatura limiar $T_t$

Para uma segmentação satisfatória, é necessário a escolha de um bom limiar, e devido as variações de temperatura obtidas pela câmera é necessário que este limiar seja calculado dinamicamente. Um limiar fixo poderia desprezar todos os dados lidos se fosse muito alto e poderia impedir a segmentação se fosse muito baixo. Portanto, o método de Otsu foi utilizado (OTSU, 1979) por ser um método altamente difundido em limiarização de imagens.

Os píxeis da imagem são divididos em duas classes  $C_b$  e  $C_f$  (*background* e *foreground*, respectivamente) utilizando um limiar de valor  $T_t$ , assim  $C_b$  denota píxeis com valores  $[0, T_t]$  e  $C_f$  denota píxeis com valores  $[T_t + 1, L]$  com  $L$  sendo a maior temperatura presente na imagem.

Para os píxeis de uma imagem com valores em nível de cinza entre  $[0, L]$ . O número de píxeis com o valor  $i$  é denotado por  $n_i$ . O conjunto de todos os  $n_i$  representa o histograma da imagem:

$$n_i = n_0, n_1, n_2, n_3 \dots n_L \quad (12)$$

O número total de píxeis da imagem é denotado por  $M$ :

$$M = n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_L \quad (13)$$

O histograma pode ser normalizado de forma que a probabilidade de um pixel possuir um nível de cinza  $n_i$  é dada por:

$$p_i = n_i/M \quad (14)$$

Seja  $w$  a probabilidade de ocorrência de cada grupo

$$w_b = \sum_{i=1}^{T_t} p_i \quad (15)$$

$$w_f = \sum_{i=T_t+1}^L p_i \quad (16)$$

$\mu$  a média de cada grupo

$$\mu_b = \sum_{i=1}^{T_t} \frac{ip_i}{w_b} \quad (17)$$

$$\mu_f = \sum_{i=T_t+1}^L \frac{ip_i}{w_f} \quad (18)$$

e  $\mu_T$  a média total da imagem.

$$\mu_T = \sum_{i=1}^L ip_i \quad (19)$$

O limiar procurado  $T_t^*$  é o valor que maximiza a variância entre as classes  $C_b$  e  $C_f$  e é dada por:

$$\sigma_W^2 = w_b(\mu_b - \mu_T)^2 + w_f(\mu_f - \mu_T)^2 \quad (20)$$

ou seja:

$$T_t^* = \arg \max_{T_t} \sigma_W^2 \quad (21)$$

## 6.4 Detecção dos Hotspots

*Hotspot* é uma região quente na imagem termográfica. Eles são detectados utilizando os píxeis mais quentes da imagem que depois serão sucessivamente dilatados. Uma restrição é imposta para esta dilatação não se expandir indefinidamente.

Os valores maiores do que um limiar estabelecido,  $T_{maxhot}$ , são utilizados como sementes para a seleção de candidatos a *hotspots*, ou seja:

$$\Omega_0(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } \alpha(x, y) \geq T_{maxhot} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad \forall 0 \leq x < W, 0 \leq y < H \quad (22)$$

O  $T_{maxhot}$  é um valor que limita uma faixa estreita de valores de temperatura abaixo da maior temperatura do *foreground*, no presente caso foi utilizado o valor de 0.0392:

$$T_{maxhot} = T_{max} - 0,0392(T_{max} - T_{min}) \quad (23)$$

onde

$T_{max}$  é a maior temperatura presente no *foreground*.

$T_{min}$  é a menor temperatura presente no *foreground*.

A imagem  $\Omega_0$  passa por um processo de dilatação (GONZALEZ; WOODS, 2000) para determinar quais são os componentes conectados e assim encontrar todos os *hotspots* da imagem termográfica.

O efeito da dilatação sobre uma imagem é o crescimento ou expansão dos píxeis com valor maior que zero. É a união das translações do elemento estruturante com os píxeis de valor maior que zero da imagem a ser dilatada. A figura 27(b) ilustra o efeito da dilatação na imagem da figura 27(a) utilizando como elemento estruturante uma matriz quadrada de tamanho  $7 \times 7$  preenchida com 1.

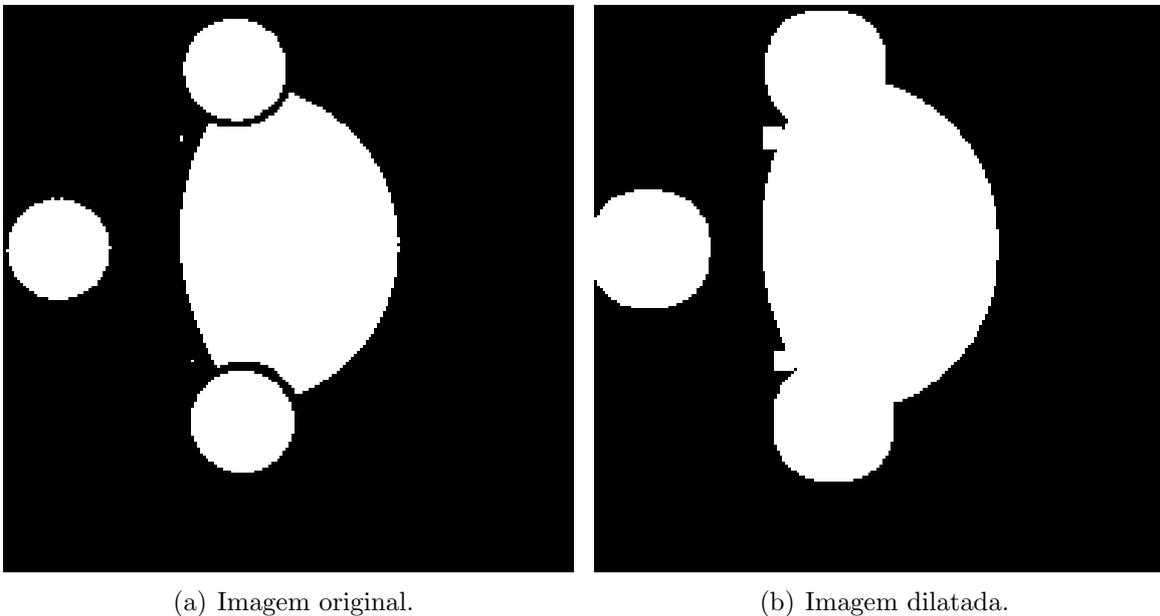


Figura 27: Exemplo de Dilatação adaptado de (NEVES; FACON, 1999).

A dilatação é realizada recursivamente. Para que a dilatação não acabe se expandindo por toda a imagem uma restrição é estabelecida, é uma matriz formada a parti de um limiar,  $T_{hotspot}$ :

$$C(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{se } \gamma(x, y) \geq T_{hotspot} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad \forall 0 \leq x < W, 0 \leq y < H \quad (24)$$

Então com um elemento estruturante adequado a imagem  $\Omega_0$  será dilatada sucessivas vezes até que sua intersecção com uma matriz de restrição não mais se altere.

$$\Omega_k = (\Omega_{k-1} \oplus B) \cap C \quad k = 1, 2, 3, .. \quad (25)$$

onde:

$\Omega_k$  é a imagem intermediária resultante de (25) em cada iteração.

$B$  é uma matriz  $3 \times 3$  preenchida com píxeis de valor 1.

O  $T_{hotspot}$  é o valor de temperatura que delimita os *hotspots*, especifica uma faixa de temperatura abaixo da máxima temperatura do *foreground* sendo 0,627 da amplitude de temperatura do *foreground*.

$$T_{hotspot} = T_{max} - 0,627(T_{max} - T_{min}) \quad (26)$$

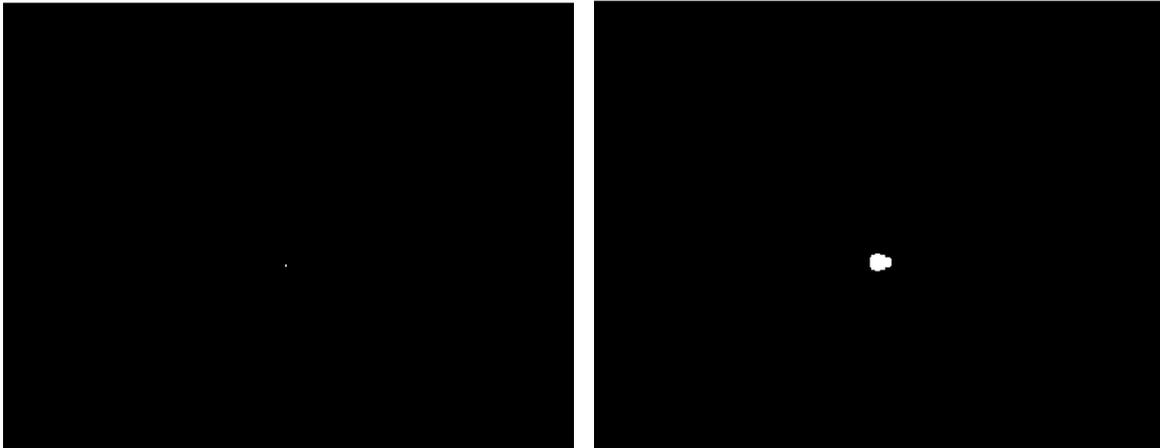
O método converge quando  $\Omega_k = \Omega_{k-1} = \Omega^*$ , de forma que  $\Omega^*$  representa a máscara de todos os *hotspots* encontrados.

Os valores 0,00392 e 0,0627 das expressões (26) e (23) respectivamente foram determinados experimentalmente e podem ser alterados para se aumentar os valores definidos como os mais quentes ou aumentar a temperatura mínima pertencente a um *hotspot*.

Cada região com um conjunto de píxeis de mesmo valor interligados de  $\Omega^*$  será nomeada de  $A_i$ ,  $i = 1 \dots N_h$ , onde  $N_h =$  número de *hotspots*.

A figura 28 ilustra a detecção dos píxeis de maior valor da imagem termográfica e como eles foram usados para a dilatação e identificação dos *hotspots*.

Na figura 28(a) é apresentado a imagem  $\Omega_0$  onde é possível ver os píxeis que são maiores que o  $T_{maxhot}$ . Na figura 28(b) é mostrado a imagem  $\Omega^*$ . Nela pode-se ver a presença do  $A_1$  apenas, pois o número de *hotspots* encontrados,  $N_h$ , é igual a 1.



(a) Píxeis maiores que  $T_{maxhot}$  e sementes da dilatação.

(b) Dilatação até temperatura  $T_{hotspot}$ .

Figura 28: Hotspot detectado.

Agora calcula-se a área  $D$  de cada componente conectado da imagem  $\Omega^*$  para definir se esta região é um *hotspot* realmente ou um ruído. A área é o número de píxeis de cada *hotspot*  $A_i$  em  $\Omega^*$  e é calculado como  $D_i$ ,  $i = 1 \dots N_h$ :

$$D_i = \sum_{x=0}^W \sum_{y=0}^H A_i(x, y) \quad (27)$$

Se algum destes conjuntos tiver um número pequeno de píxeis é considerado uma falsa zona de calor elevado, um ruído, e deve ser ignorado. A princípio o número de pixels mínimo estabelecido é 5 (CHOU; YAO, 2009), porém este valor pode ser modificado conforme a distância entre a câmera e o alvo da inspeção.

O *hotspot* utilizado para o diagnóstico da imagem termográfica é o de maior área já que representa a fonte de calor mais intenso na imagem. Ele pode ser encontrado como indicado:

$$\zeta = \arg \max_{1 \leq i \leq N_h} (D_i), \quad \forall D_i \geq 5 \quad (28)$$

O *hotspot* de maior área corresponde ao  $A_\zeta$ . No exemplo das figuras 26 e 28 o  $\zeta = 1$ , pois só existe  $A_1$  e seu  $D_1$  é maior que 5.

A região  $A_1$  delimita o *hotspot* de maior área e que será utilizado para o diagnóstico do segmento do cabo, figura 26(b). Como um *hotspot* não possui a mesma temperatura em todos os seus píxeis, a temperatura de um *hotspot* é definido como sendo o valor médio de seus píxeis:

$$T_{hot} = \frac{1}{D_\zeta} \left( \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} \gamma(x, y), \quad \forall (x, y) \in A_\zeta \right) \quad (29)$$

onde  $T_{hot}$  é a temperatura média do *hotspot* usado para diagnóstico.

## 6.5 Cálculo da temperatura de referência

Agora que os *hotspots* foram detectados, é possível excluir seu efeito da imagem termográfica para o cálculo da temperatura de referência, ou seja, a temperatura das regiões dos mesmos componentes energizados que apresentam aquecimento normal. Esta região é dada pela máscara do *foreground* subtraída da máscara dos *hotspots*,  $\rho(x, y) = \beta(x, y) \cap \Omega^*(x, y)$ . A temperatura de referência,  $T_{ref}$ , é a média aritmética dos valores de píxeis desta região na imagem  $\gamma$ .

Sendo  $Mref$  o somatório dos valores de temperatura da região cuja máscara é  $\rho(x, y)$ .

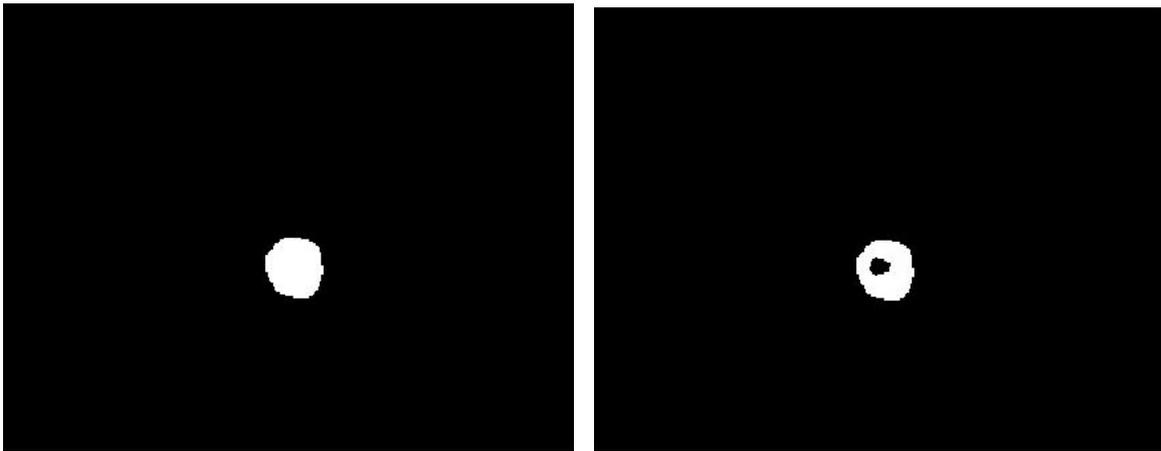
$$Mref = \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} \gamma(x, y), \quad se \rho(x, y) = 1 \quad (30)$$

e  $Nref$  a quantidade de píxeis da região cuja máscara é  $\rho(x, y)$

$$Nref = \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} \rho(x, y) \quad (31)$$

o  $T_{ref}$  é a temperatura média da região cuja máscara é  $\rho(x, y)$ .

$$T_{ref} = \frac{Mref}{Nref} \quad (32)$$

(a) Região do *foreground*  $\beta$ .(b) Região de referência  $\beta - \Omega^*$ .Figura 29: Região para cálculo da temperatura de referência  $T_{ref}$ .

## 6.6 Classificação dos Hotspots

Nesta etapa do método é feita a classificação do *hotspot*, ou seja, é aqui que o resultado sobre a situação no segmento de cabo inspecionado será gerado, indicando se a situação está normal ou fora dos padrões aceitáveis.

Existem duas maneiras de fazer a medição de temperatura. O primeiro é “quantitativo”, que terá o valor exato de temperatura dos objetos. Este método não é geralmente tão importante durante a inspeção térmica já que a precisão desses valores são frequentemente afetadas por fatores ambientais, tais como a temperatura do ambiente atual, umidade e emissividade, etc.

Tabela 10: Condições de Medidas Quantitativas.

Condição	Limites de Temperaturas (°C)
Normal	$T_{hot} \leq 68,3$
Rotina	$68,3 < T_{hot} \leq 76,7$
Intermediária	$76,7 < T_{hot} \leq 85,0$
Séria	$85,0 < T_{hot} \leq 98,9$
Emergência	$98,9 < T_{hot}$

O segundo tipo é “qualitativa”. Nesta análise ao invés de usar apenas o valor da temperatura do *hotspot* para se fazer o diagnóstico é utilizado a medida  $\Delta T$ , que é a diferença entre o valor de temperatura do *hotspot*,  $T_{hot}$ , e o valor de temperatura de outras partes do equipamento com condições semelhantes,  $T_{ref}$ .

$$\Delta T = T_{hot} - T_{ref} \quad (33)$$

A situação final do cabo pode ser definida utilizando os dois métodos de medida através da lógica Fuzzy.

A teoria de conjuntos Fuzzy permite especificar quão bem um objeto satisfaz uma descrição não determinística. Utiliza-se um valor numérico do intervalo  $[0,1]$ , chamado grau de pertinência, para dimensionar o quanto um objeto pertence a uma determinada classe fuzzy. Um conjunto fuzzy é formado por elementos que não estão

Tabela 11: Condições de Medidas Qualitativas.

Condição	Limites de Temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ )
Normal	$\Delta T \leq 10$
Rotina	$10 < \Delta T \leq 20$
Intermediária	$20 < \Delta T \leq 30$
Séria	$30 < \Delta T \leq 40$
Emergência	$40 < \Delta T$

classificados de uma forma determinada, exemplos: morno, pequeno, perto, ativo, quase, alto, parcialmente.

A lógica fuzzy vem sendo aplicada nas seguintes áreas:

- Análise de dados
- Construção de sistemas especialistas
- Controle e otimização
- Reconhecimento de padrões

Cada uma das tabelas 10 e 11 utilizadas para classificação do cabo podem ser convertidas para um conjunto de funções de pertinência fuzzy (MF). A Função de pertinência reflete o conhecimento que se tem em relação a intensidade com que o objeto pertence ao conjunto fuzzy. Os conjuntos fuzzy são as classes Normal, Rotina, Intermediária, Séria e Emergência representadas nos gráficos da figura 30.

Para cada valor  $T_{hot}$  e  $\Delta T$  é atribuído um grau de pertinência da situação do cabo conforme as curvas do gráfico.

Os valores  $C_n$ ,  $C_r$ ,  $C_i$ ,  $C_s$  e  $C_e$  indicam para o  $T_{hot}$  medido os fatores de pertinência do cabo para cada uma das classes normal, rotina, intermediário, sério e emergência respectivamente. E os valores  $C_nref$ ,  $C_rref$ ,  $C_iref$ ,  $C_sref$  e  $Ceref$  indicam para o  $\Delta T$  medido os fatores de pertinência do cabo para cada uma das classes normal, rotina, intermediário, sério e emergência.

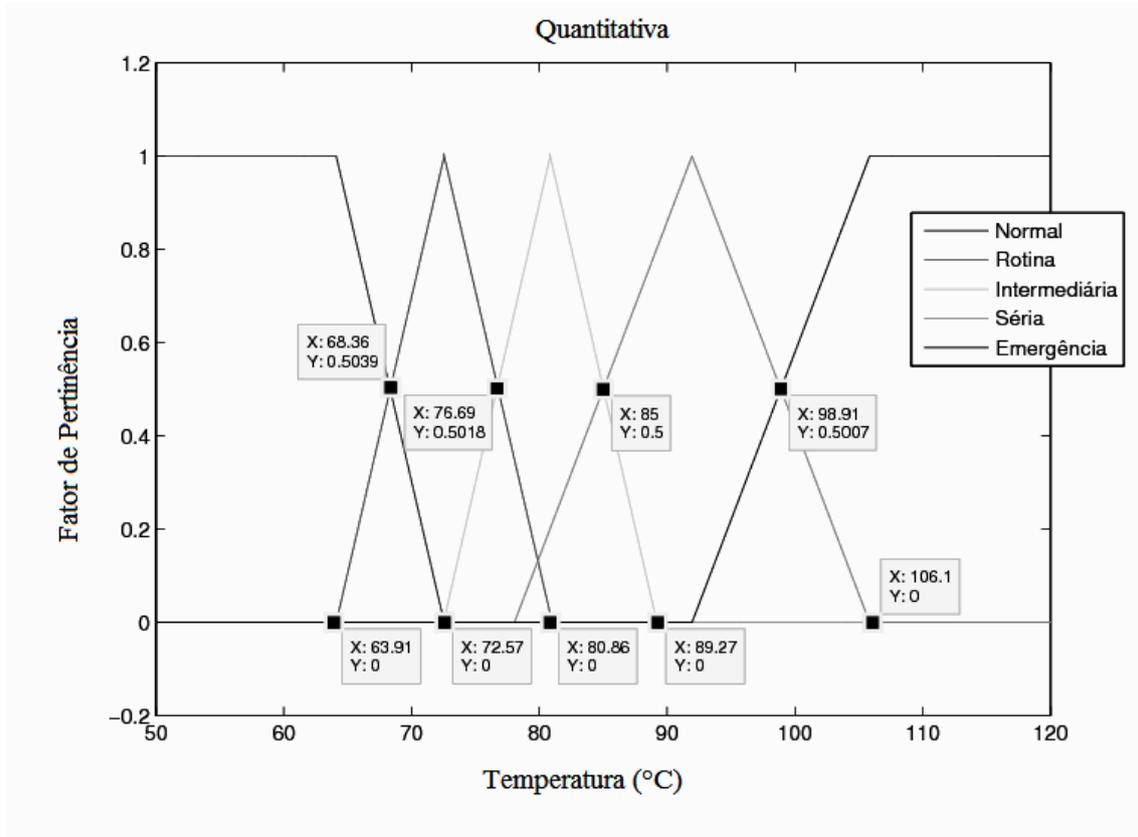
A situação final do cabo é dada pela classe que tiver o maior grau de pertinência médio. Ou seja, para cada classe somam-se os percentuais e divide por dois e o percentual médio maior é o que determina a situação do cabo.

Por exemplo, para uma inspeção onde foram encontrados valores de  $T_{hot}=70^{\circ}\text{C}$  e  $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ , pelos gráficos encontram-se as seguintes porcentagens de pertinência:

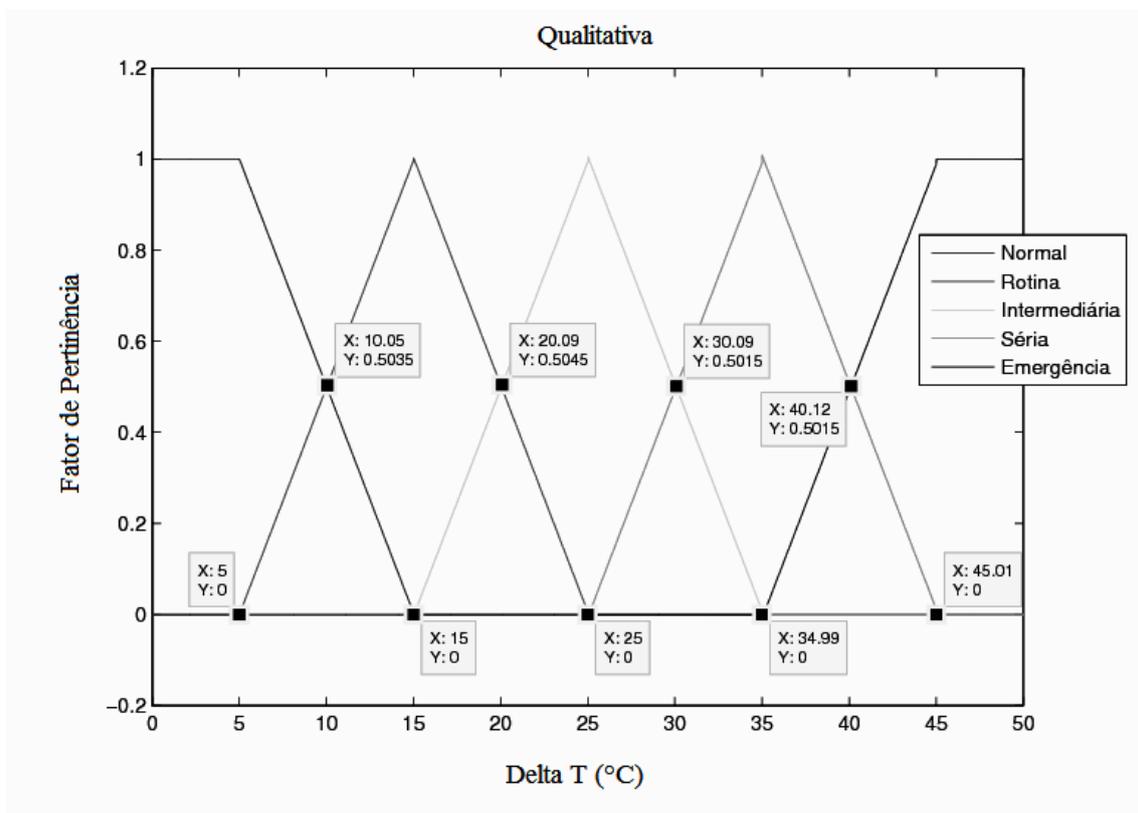
- $C_n = 0.34$  e  $C_nref = 0$
- $C_r = 0.6$  e  $C_rref = 0.5$
- $C_i = 0$  e  $C_iref = 0.5$
- $C_s = 0$  e  $C_sref = 0$
- $C_e = 0$  e  $Ceref = 0$

Assim calcula-se seus fatores de pertinência médios:

- $\overline{C_n} = 0.17$



(a) Quantitativa.



(b) Qualitativa.

Figura 30: Funções de pertinência.

- $\overline{C_r} = 0.55$
- $\overline{C_i} = 0.25$
- $\overline{C_s} = 0$
- $\overline{C_e} = 0$

O maior grau de pertinência médio é o  $\overline{C_r} = 0.55$  que corresponde a uma situação Rotina do cabo nenhuma ação imediata precisa ser tomada.

## 6.7 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as ferramentas matemáticas utilizadas para o processamento digital da imagem termográfica. Foi utilizada a segmentação para tirar da análise as partes componentes não elétricos e ambientes. Foram identificados os pixel mais quentes e através deles foram identificados os *hotspots*. O *hotspot* de maior tamanho indica o local de maior geração de calor e por isso ele é utilizado para o diagnóstico. É calculada sua temperatura através da média dos valores dos píxeis e esse valor juntamente com uma tabela indica a presença de falha ou não.

## 7 RESULTADOS

### 7.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados alguns ensaios utilizando diferentes materiais para se inspecionar.

O *software* foi desenvolvido para ser usado em um dispositivo móvel que percorra as linhas de transmissões a fim de que esteja próximo da parte energizada e que outros componentes quentes não interfiram nas medições. Este tipo de dispositivo ainda não está disponível, então foi criado um ambiente no qual a análise possa ser feita da maneira mais próxima à manutenção objetivada, simulando a transmissão. Foi escolhido um cabo com dimensões e materiais como os usados em instalações elétricas e este cabo será submetido a correntes de altos valores como costumam passar nas linhas que entregam alta potência na ordem de centenas de MVA.

### 7.2 Ensaio com Cabo de alumínio

Cabos em linhas de transmissão podem mudar de materiais e de tamanho dependendo da região e da potência que estão transmitindo. A tabela 12 utilizada como referência foi montada com base em dados técnicos de uma instalação em São Paulo (MENDES; DOMINGUES; LOPES, 2004).

Tabela 12: Dados técnicos da linha de transmissão (para cabos de alumínio).

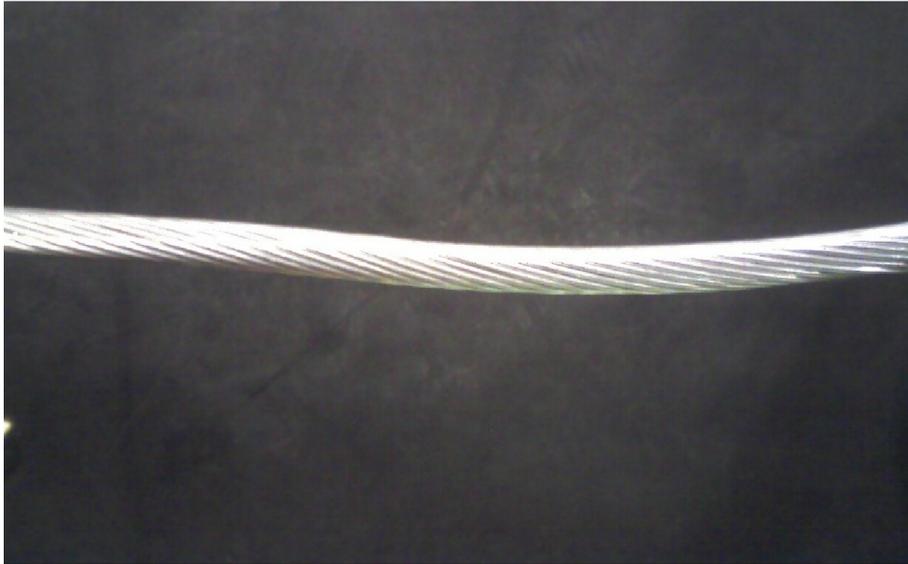
Tensão Projetada	138kV
Tensão de Operação	88kV
Potencia projetada	300MVA
Potência operada	225 MVA
Corrente nominal da LT	980 A
Seção do cabo	322mm <sup>2</sup>

Assim, um cabo de alumínio será submetido a centenas de Ampéres. Para a obtenção desta corrente em laboratório esta sendo utilizado uma fonte de corrente DC da TDK Série ESS. É uma fonte DC de alta potência com alimentação trifásica e geração de tensão e corrente controlada. É capaz de gerar tensões até 600V e correntes até 1400A.

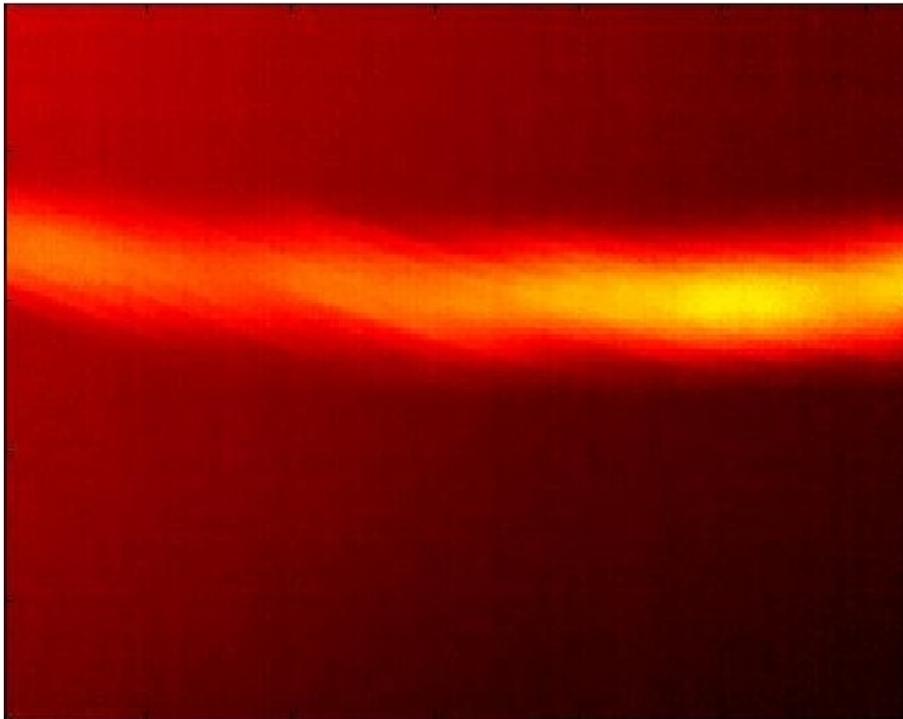
Este experimento tem por objetivo mostrar que o método pode ter uma resposta satisfatória em uma situação real. O um cabo possui dimensões que reproduzem os utilizados nas instalações como pode ser visto na figura 31(a). Este cabo de

alumínio tem alma de aço, uma seção de  $250\text{mm}^2$  e suporta correntes na ordem de centenas de Ampères, carga que as linhas de transmissão são submetidas. Este cabo foi conectado a fonte e foi submetido a uma corrente de 500 A DC.

A imagem termográfica correspondente é mostrada na figura 31(b). As imagens termográficas apresentadas nos resultados utilizam uma palheta com cores que variam do preto, mais frio, até o vermelho, mais quente. Nesta imagem é possível ver uma região quente, mas esta região tem um valor de temperatura aceitável,  $T_{hot}=27^\circ\text{C}$ ,  $5^\circ\text{C}$  mais quente que a região mais fria,  $\Delta T=5^\circ\text{C}$ . Tanto a análise qualitativa quanto a análise quantitativa resultam que é um cabo com situação normal.



(a) Imagem no espectro visível.



(b) Imagem termográfica.

Figura 31: Cabo de alumínio intacto.

Tabela 13: Análise para resultado final no cabo intacto.

Valores medidos		
$T_{hot}$	27°C	
$\Delta T$	5°C	
Graus de Pertinência		
Quantitativo	Qualitativo	Médio
$C_n = 1$	$C_{nref} = 1$	$\overline{C_n} = 1$
$C_r = 0$	$C_{rref} = 0$	$\overline{C_r} = 0$
$C_i = 0$	$C_{iref} = 0$	$\overline{C_i} = 0$
$C_s = 0$	$C_{sref} = 0$	$\overline{C_s} = 0$
$C_e = 0$	$C_{eref} = 0$	$\overline{C_e} = 0$

O maior grau de pertinência médio é o  $\overline{C_n} = 1$  que corresponde a uma situação Normal do cabo.

Então este mesmo cabo foi danificado como pode ser visto na figura 32(a) e uma nova imagem termográfica foi obtida e mostrada na figura 32(b).

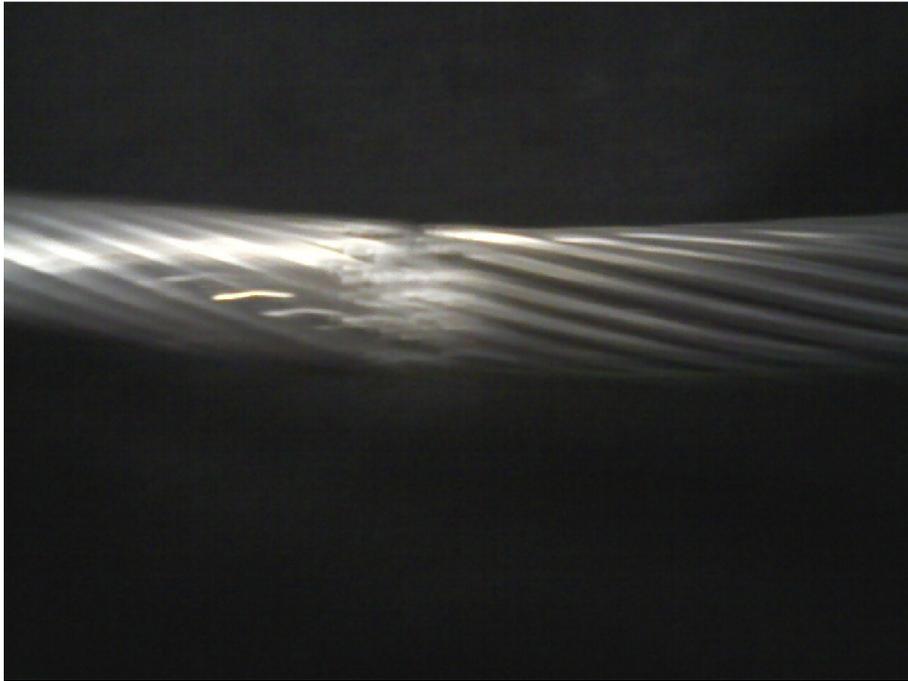
No local onde foi feita a falha ocorreu um aumento de temperatura em relação a imagem termográfica do teste anterior, na figura 31(b). No primeiro teste a temperatura estava em torno de 27°C, após a falha o teste acusou uma temperatura de 42°C. O método proposto detectou esta região quente e o diagnóstico desta falha. Pela análise quantitativa esta temperatura não ultrapassa os limites aceitáveis de operação e a situação do cabo é normal.

Mas para uma segurança maior no resultado uma análise qualitativa também é feita, e esta não leva em consideração apenas a temperatura medida, mas sim a diferença entre a temperatura de referência e a temperatura do *hotspot*. Esta diferença ficou em torno de 20°C o que indica que a situação do cabo esta fora da normalidade, situação Rotina. Assim:

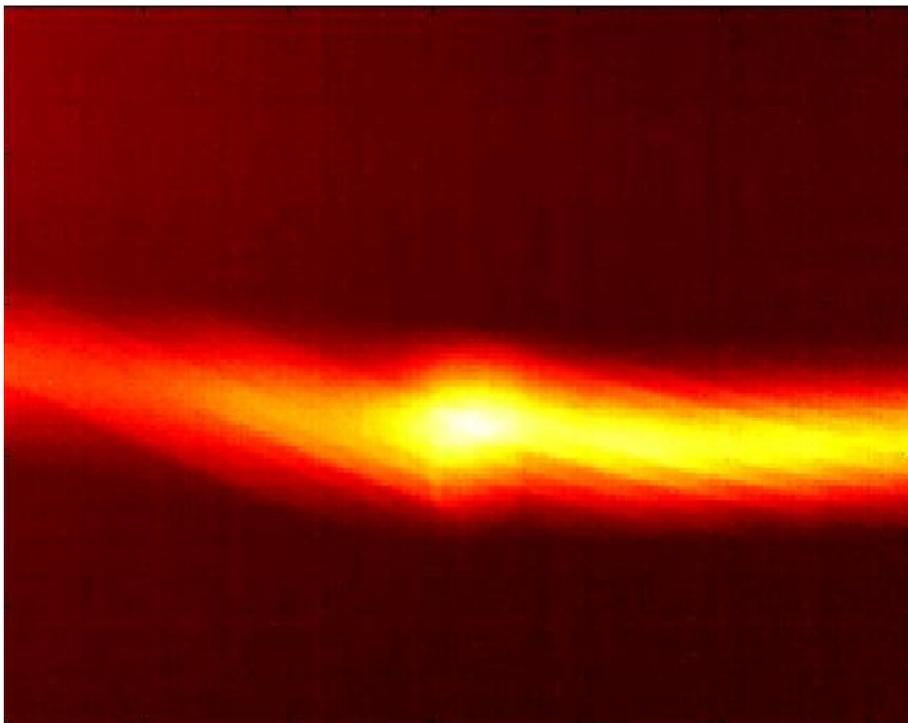
Tabela 14: Análise para resultado final no cabo após a falha.

Valores medidos		
$T_{hot}$	42°C	
$\Delta T$	20°C	
Graus de Pertinência		
Quantitativo	Qualitativo	Médio
$C_n = 1$	$C_{nrel} = 0$	$\overline{C_n} = 0.5$
$C_r = 0$	$C_{rrel} = 0.5$	$\overline{C_r} = 0.25$
$C_i = 0$	$C_{irel} = 0.5$	$\overline{C_i} = 0.25$
$C_s = 0$	$C_{srel} = 0$	$\overline{C_s} = 0$
$C_e = 0$	$C_{ere} = 0$	$\overline{C_e} = 0$

O maior grau de pertinência médio é o  $\overline{C_n} = 0.5$  que corresponde a uma situação Normal do cabo. Ainda que este esteja dissipando mais calor ele não corre risco de rompimento e numa instalação real não necessitaria de substituição ou reparos.



(a) Imagem no espectro visível.



(b) Imagem termográfica.

Figura 32: Cabo de alumínio com falha.

### 7.3 Ensaio com Cabo de alumínio Fino

Foi agora escolhido um cabo de alumínio com dimensões reduzidas que permitissem resultados mais extremos com as correntes geradas em laboratório, como pode ser visto na figura 33(a). Este cabo de alumínio tem uma seção de  $25\text{mm}^2$  e foi submetido a uma corrente de 500 A DC.

A imagem termográfica correspondente é mostrada na figura 33(b). Nesta imagem a região mais quente apresenta um valor de temperatura  $T_{hot}=52,75^\circ\text{C}$ ,  $7,2^\circ\text{C}$  mais quente que a região mais fria do próprio cabo,  $\Delta T=7,2^\circ\text{C}$ . Tanto a análise qualitativa quanto a análise quantitativa resultam que é um cabo com situação normal.

Tabela 15: Análise para resultado final no trecho de cabo intacto.

Valores medidos		
$T_{hot}$	52,75°C	
$\Delta T$	7,2°C	
Graus de Pertinência		
Quantitativo	Qualitativo	Médio
$C_n = 1$	$C_nrel = 0.77$	$\overline{C_n} = 0.89$
$C_r = 0$	$C_rrel = 0.22$	$\overline{C_r} = 0.11$
$C_i = 0$	$C_irel = 0$	$\overline{C_i} = 0$
$C_s = 0$	$C_srel = 0$	$\overline{C_s} = 0$
$C_e = 0$	$C_ere = 0$	$\overline{C_e} = 0$

O maior grau de pertinência médio é o  $\overline{C_n} = 0.89$  que corresponde a uma situação normal do cabo.

Em outro segmento deste mesmo cabo foram feitos cortes que prejudicaram a condutividade dele, figura 34(a), e uma nova imagem termográfica foi obtida como mostra a figura 34(b). Nesta imagem a região mais quente apresenta um valor de temperatura  $T_{hot}=124,57^\circ\text{C}$ ,  $31,07^\circ\text{C}$  mais quente que a região “fria” do próprio cabo,  $\Delta T=31,07^\circ\text{C}$ . A análise quantitativa acusa uma situação de emergência, enquanto a análise qualitativa resulta em um segmento em situação séria.

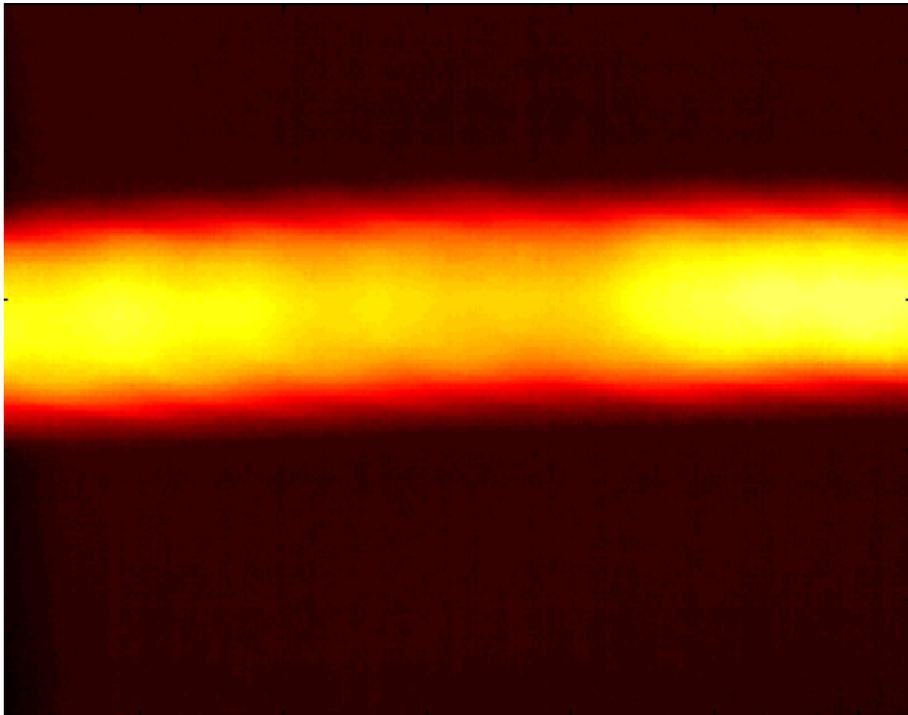
Tabela 16: Análise para resultado final no trecho de cabo com falha.

Valores medidos		
$T_{hot}$	124,57°C	
$\Delta T$	31,07°C	
Percentuais de Pertinência		
Quantitativo	Qualitativo	Médio
$C_n = 0$	$C_nrel = 0$	$\overline{C_n} = 0$
$C_r = 0$	$C_rrel = 0$	$\overline{C_r} = 0$
$C_i = 0$	$C_irel = 0.37$	$\overline{C_i} = 0.18$
$C_s = 0$	$C_srel = 0.6$	$\overline{C_s} = 0.3$
$C_e = 1$	$C_ere = 0$	$\overline{C_e} = 0.5$

O maior percentual médio é o  $\overline{C_e} = 0.5$  que corresponde a uma situação emergência do cabo. Isto se confirmou com o rompimento do cabo durante este ensaio



(a) Imagem no espectro visível.

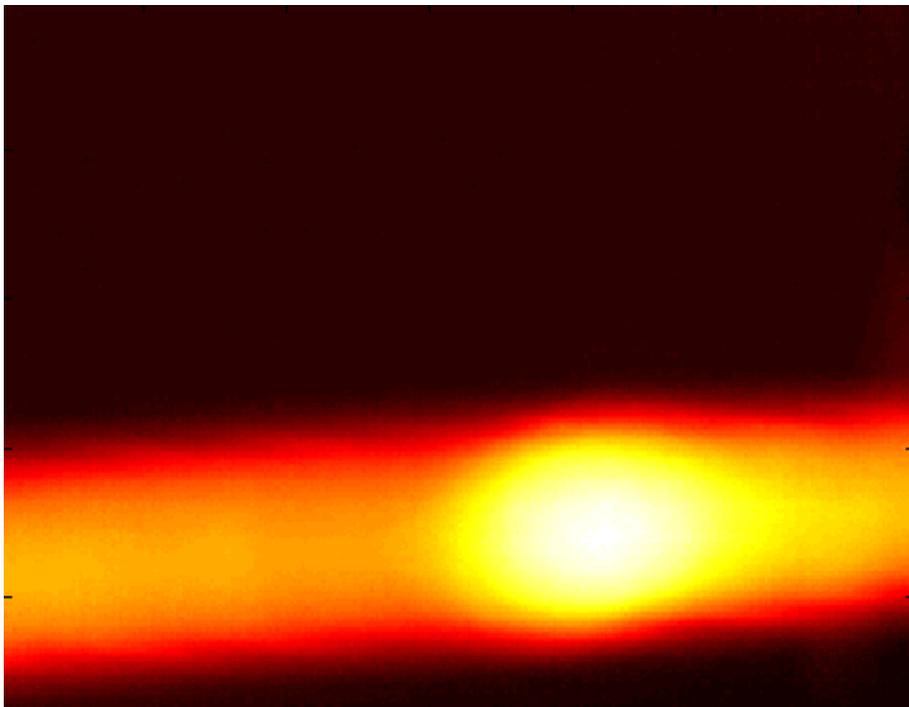


(b) Imagem termográfica.

Figura 33: Segmento do cabo de alumínio fino intacto.



(a) Imagem no espectro visível.



(b) Imagem termográfica.

Figura 34: Segmento do cabo de alumínio fino onde existe uma falha.

## 7.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados dois ensaios utilizando a câmera termográfica. Os passos intermediários da detecção dos *hotspots* deste cabo de alumínio mais grosso foram apresentados para dar dimensão do efeito da variação dos parâmetros do método e como os valores escolhidos permitem um resultado satisfatório.

Já o ensaio com o cabo de alumínio mais fino serve para mostrar como o método se comportará numa inspeção real e como será seu resultado frente a uma falha iminente. Com ele, foi possível utilizar um comprimento maior de cabo e fazer uma falha apenas em uma parte. Conforme a câmera recebia as imagens dos sucessivos segmentos de cabo, eles eram processados e o diagnóstico era gerado. E por ser mais fino a corrente usada em laboratório permitiu um aquecimento maior sendo possível se chegar a um nível crítico. Quando a câmera recebeu o segmento com falha foi diagnosticado uma situação de emergência como era esperado.

Os valores das tabelas 10 e 11 são fixos o que torna este método bastante específico na sua aplicação, estes valores poderiam ser ajustados levando em consideração o tamanho e o material do condutor e também o nível de demanda de energia que muda conforme o local e a hora. Isto faria do método uma ferramenta mais genérica o que permitiria a sua utilização para inspeções de outros tipos de equipamentos elétricos além de proporcionar resultados mais precisos. O que também poderia melhorar os resultados é a escolha da função de pertinência utilizada para o diagnóstico. Ela também poderia ser alterada conforme as especificações de material e demanda, isso aumentaria a precisão do diagnóstico.

## 8 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um método de inspeção automatizada em linhas de transmissão.

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais desta dissertação obtidas após a obtenção dos resultados termográficos em condutores de cobre e alumínio através de ensaios realizadas em laboratório. São apresentadas sugestões de trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa.

### 8.1 Conclusões

A utilização da termografia se mostra muito eficaz na inspeção de sistemas elétricos, seu uso é cada vez mais difundido. A automação de inspeções torna o processo de identificação de falhas mais rápido e preciso e tende a permitir novas possibilidades de inspeções como a utilizando robôs móveis. Para a automação torna-se indispensável o processamento de imagens. O processamento de imagens oferece muitas ferramentas de detecção de características específicas em uma imagem, destas ferramentas algumas se adaptam melhor às imagens termográficas como as apresentadas neste trabalho para detecção de *hotspots*.

As linhas de transmissão tem um papel fundamental na entrega de energia elétrica para os usuários e uma falha em sua estrutura pode significar uma interrupção no abastecimento de energia. Por isso manutenções preventivas são importantes, elas ajudam a manter as condições físicas das linhas impedindo faltas no abastecimento e perdas de potência na linha. A sua inspeção oferece muitas dificuldades devido aos materiais atrelados a elas como os globos sinalizadoras, as juntas em locais de difícil acesso e as próprias torres que fazem sua sustentação e acabam oferecendo obstáculos aos equipamentos utilizados nas inspeções.

A termografia provém um ótimo método de inspeção, pois retira a necessidade do contato e da aproximação das linhas energizadas o que é mais seguro para os técnicos envolvidos. Unido a vantagem da segurança, a termografia permite automatizar o processo de inspeção utilizando as imagens termográficas captadas no processo. Assim foi utilizado um algoritmo de processamento de imagens que identifica regiões de temperatura elevada e as classifica conforme o nível desta temperatura. De acordo com esta classificação é possível saber o real risco de rompimento dos cabos.

O método se mostrou eficaz no reconhecimento de zonas quentes. É possível notar pelos resultados que a câmera é bastante robusta a ruídos o que dificulta a detecção de falsas falhas. A temperatura do cabo foi medida também com outros métodos para testar a exatidão da câmera. Esta exatidão aliado à forma como foi definida a área correspondente ao *hotspot* e à referência diminuem as chances de

diagnósticos errados.

## 8.2 Trabalhos Futuros

Esta dissertação serve como base para pesquisas mais amplas acerca de técnicas envolvendo imageamento infravermelho. O que se buscou foi investigar a aplicação de uma metodologia de inspeção em linhas de transmissão baseada em técnicas de Termografia. Melhorias neste processo podem ser implementadas. O inspeção proposta leva em consideração que as falhas sejam vistas pela câmera termográfica, porém como a câmera não pode pegar todos os ângulos do cabo existe uma chance de alguma falha não ser captada pela câmera. O método proposto visa a utilização de um dispositivo móvel para transportar a câmera termográfica enquanto ela faz a aquisição de imagens. Neste processo nenhum dispositivo móvel conseguirá manter-se estático em relação a linha de transmissão, as próprias condições climáticas podem levar a oscilações da linha que farão com que exista um borramento nas imagens termográficas sendo necessário um outro pré processamento da imagem para estabilizá-la.

Outra ponto fundamental que pode ser explorado é a implementação do dispositivo móvel que possa aproveitar o trabalho desenvolvido nesta tese para efetivamente fazer a inspeção. Algumas configurações já estão sendo estudadas como pode ser visto no Apêndice A, porém ainda não se tem um protótipo que possa ser usado para fins práticos.

## REFERÊNCIAS

- ÁLVARES, R. C. **Diagnóstico de falhas em pára-raios utilizando termografia**. 2008. 119. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- AMMIRATO, F.; ZAYICEK, P. **Infrared thermography field application guide**. Disponível em: <<http://mydocs.epri.com/docs/public/TR-107142.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **Ensaio não destrutivo - correntes parasitas**. Disponível em: <[http://www.abende.org.br/info\\_end\\_oquesao\\_correntes.php](http://www.abende.org.br/info_end_oquesao_correntes.php)>. Acesso em: 10 abr. 2010.
- BECKER, M.; LANDRE, J.; SANTOS, S. Design of mechatronic system to inspect power transmission lines and towers. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS, ELECTRICAL DRIVES, AUTOMATION AND MOTION, 16., 2006, Taormina. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2006. v.1, p.774-779.
- BEZERRA, J. M. B.; RÉGIS JÚNIOR, O.; LUNA, R. Monitoração de parâmetros eletromecânicos de linhas de transmissão com vistas a avaliação do estado operacional e recapitação. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15., 1999, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Itaipu/Cigré, 1999.
- BRITO, J. N.; LAMIN FILHO, P. C. M.; ALVES, P. A. S. Implantação do programa de manutenção preditiva de painéis elétricos através da análise termoelétrica. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA E INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS, 11., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Excelência Consultoria Treinamento, 2004.
- CAMPOS, M. F. M. et al. A mobile manipulator for installation and removal of aircraft warning spheres on aerial power transmission lines. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2002, Washington D.C. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2002. v.4, p.3559-3564.
- CANÇADO, M.; FELIPE, J. L. A termografia como manutenção preditiva em telecomunicações. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE

INFRA-ESTRUTURA PARA TELECOMUNICAÇÕES, 3., 2000, Florianópolis.  
**Anais...** Florianópolis: CININTEL 2000, 2000.

CHOU, Y. C.; YAO, L. Automatic diagnostic system of electrical equipment using infrared thermography. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF SOFT COMPUTING AND PATTERN RECOGNITION, 2009, Malaca. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2009. p.155–160.

DURRANI, T. et al. Reconstruction techniques for the inspection of composite materials using thermal images. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING, 1988, Nova York. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1988. v.2, p.863–866.

DURRANI, T. et al. Thermal imaging techniques for the non destructive inspection of composite materials in real-time. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING, 1987, Dalas. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1987. v.12, p.598–601.

FAN, C.; SUN, F.; YANG, L. A general quantitative identification algorithm of subsurface defect for infrared thermography. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFRARED AND MILLIMETER WAVES, 30., 2005; INTERNATIONAL CONFERENCE ON TERAHERTZ ELECTRONICS, 13., 2005, Williamsburg. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2005. v.2, p.341–342.

FLIR. **ICD A320 Camera - PC**. Wilsonville: FLIR Systems, 2007.

GHARAI, L.; PERKINS, C. **RTP Payload Format for Uncompressed Video RFC 4175**. [S.l.]. Internet Engineering Task Force, Network Working Group, 2005.

GONÇALVES, R. G. Robô móvel suspenso por cabo. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 16., 2006, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: FEMEC, 2006.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

GU, X. Determination of thermal parameters of microbolometers using a single electrical measurement. **American Institute of Physics**, Singapore, v.72, p.3, 1998.

HAMID, H. A.; WLODARSKI, W.; BRENNAN, F. Defect detection systems for enameled copper wire, cable, and optical fiber: state of the art and current trends. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, Melbourne, v.15, n.6, p.20–37, Nov./Dec. 1999.

HANDLEY, M.; JACOBSON, V.; PERKINS, C. **Session Description Protocol(SDP) RFC 4566**. [S.l.]. Internet Engineering Task Force, Network Working Group, 2006.

HERWAARDEN, A. W. V.; SARRO, P. M. Thermal sensors based on the seebeck effect. **Sensors and Actuators**, Delft, v.10, p.321–346, 1986.

HONKAVAARA, E.; MARKELIN, L. Radiometric Performance of Digital Image Data Collection - A Comparison of ADS40/DMC/Ultra Cam and EmergeDSS. In: PHOTOGRAMMETRIC WEEK, 2007, Estugarda. **Proceedings...** Heidelberg: Wichmann, 2007. p.117–129.

INDEPENDENT JPEG GROUP. **JPEG Homepage**. Disponível em: <<http://www.jpeg.org/jpeg/index.html>>. Acesso em: 20 jul. 2010.

INFRATEMP. **Termômetros infravermelhos teoria básica**. Disponível em: <[http://www.infratemp.com.br/tecnologia/Apostila\\_TermometriaIV.pdf](http://www.infratemp.com.br/tecnologia/Apostila_TermometriaIV.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2009.

ISHINO, R. Detection of a faulty power distribution apparatus by using thermal images. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 2002, Nova York. **Proceedings...** Nova York: IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. v.2, p.1332–1337.

JIANG, S. Y. et al. Development of Hanging-Arm Inspection Robot for High-Voltage Transmission Line. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTICS AND APPLICATION, 2008, Wuhan. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2008. p.1089–1098.

KOJIMA, F.; KAWAGUCHI, H. Backpropagation learning algorithm for nondestructive testing by thermal imager [aerospace materials]. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, 1993, Nagoya. **Anais...** Piscataway: IEEE, 1993. v.1, p.955–958.

KORENDO, Z.; FLORKOWSKI, M. Thermography based diagnostics of power equipment. **Power Engineering Journal**, Cracow, v.15, n.1, p.33–42, Feb. 2001.

LAND. **A basic guide to thermography**. Disponível em: <[http://www.lirkorea.com/Landinstruments.net%20Website/infrared/downloads/pdf/thermography\\_guide.pdf](http://www.lirkorea.com/Landinstruments.net%20Website/infrared/downloads/pdf/thermography_guide.pdf)>. Acesso em: 06 jan. 2010.

LEÃO, R. P. S. **Linhas de transmissão de energia elétrica**. Disponível em: <<http://www.dee.ufc.br/~rleao/GTD/Transmissao.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2010.

LI, T.; LIJIN, F.; HONGGUANG, W. Development of an Inspection Robot Control System for 500kV Extra-High Voltage Power Transmission Lines. **SICE Annual Conference**, Sapporo, p.1819–1824, 2004.

LISBOA, F. **Alternativa high-tech para reduzir custos de processos**. Disponível em: <[http://www.nei.com.br/artigos/download/abril\\_2010\\_temperatura.pdf](http://www.nei.com.br/artigos/download/abril_2010_temperatura.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2010.

LIVE NETWORKS. **LIVE555 Streaming Media**. Disponível em: <<http://www.live555.com/>>. Acesso em: 01 mar. 2009.

LUZ, A. da. **Recuperação de imagens médicas padrão DICOM**. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~awangenh/InfoMed/2005/recuperacao.html>>. Acesso em: 17 maio 2010.

MALDAGUE, X.; KRAPEZ, J. C.; POUSSART, D. Thermographic nondestructive evaluation (NDE): an algorithm for automatic defect extraction in infrared images. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, Quebec, v.20, n.3, p.722–725, May/June 1990.

MARQUES FILHO, O.; NETO, H. V. **Processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999.

MENDES, L. M. R.; DOMINGUES, I. T.; LOPES, J. C. R. **Aspectos construtivos da substituição de condutores ACSR por cabo TACSR (termoresistente) e TACIR**. 2004.

MIOTTO, R. **Evolução do conceito de medição de temperatura sem contato**. Disponível em: <<http://www.pirometro.com.br>>. Acesso em: 25 out. 2009.

MONTAMBAULT, S.; POULIOT, N. LineScout Technology: development of an inspection robot capable of clearing obstacles while operating on a live line. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON TRANSMISSION DISTRIBUTION CONSTRUCTION, OPERATION AND LIVE-LINE MAINTENANCE, 11., 2006, Albuquerque. **Anais...** Piscataway: IEEE, 2006. p.15–19.

MOREIRA, P. L. F. **Sistema robótico para inspeção de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. 2008. 138. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MORÍNIGO, M. A.; MINAMI, N. K. **A qualidade dos serviços de distribuição em linhas de subtransmissão e subestações das concessionárias de energia elétrica no Estado de São Paulo**. Disponível em: <[http://sg.cier.org.uy/cdi/cier-zeus.nsf/a09704559db030fc03256f050077c9f5/2402540EF216338A032572260060154B/\\$FILE/Trabajo%2029.pdf](http://sg.cier.org.uy/cdi/cier-zeus.nsf/a09704559db030fc03256f050077c9f5/2402540EF216338A032572260060154B/$FILE/Trabajo%2029.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2009.

MOSCATO, L. et al. Inspection robot for high-voltage transmission lines. **ABCM Symposium Series in Mechatronics**, Rio de Janeiro, v.1, p.1–7, 2004.

NEVES, L. A. P.; FACON, J. **Abordagem morfológica para a avaliação da inclinação de documentos contendo linhas**. Disponível em: <<http://www.ppgia.pucpr.br/~facon/Artigos/JNcle99.PDF>>. Acesso em: 20 out, 2010.

OMEGA ENGINEERING. **Transactions in measurement and control**. Disponível em: <<http://www.omega.com/literature/litdownload.html#horizons>> . Acesso em: 20 out. 2009.

OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, Nova York, v.9, n.1, p.62–66, Jan. 1979.

PELIZZARI, E. et al. Aplicações da Termografia como Ferramenta de Manutenção Preditiva em Conectores Elétricos. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2006, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** São Paulo: IPEN, 2006.

PHELPS DODGE. **Cabos de alumínio norma ASTM**. Porto Alegre, 2010. Catálogo do fabricante.

POSTEL, J. **User Datagram Protocol(UDP) RFC 768**. [S.l.]. Internet Engineering Task Force, Network Working Group, 1980.

POSTEL, J. **Internet Protocol(IP) RFC 791**. [S.l.]. Internet Engineering Task Force, Network Working Group, 1981.

POSTEL, J. **Transmission Control Protocol (TCP) RFC 793**. [S.l.]. Internet Engineering Task Force, Network Working Group, 1981.

SAWADA, J. et al. A mobile robot for inspection of power transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Nova York, v.6, n.1, p.309–315, Jan. 1991.

SCHULZRINNE, H. et al. **A transport protocol for real-time applications (RTP) RFC 1889**. [S.l.]. Internet Engineering Task Force, Network Working Group, 1996.

SCHULZRINNE, H.; RAO, A.; LANPHIER, R. **Real time streaming protocol(RTSP) RFC 2326**. [S.l.]. Internet Engineering Task Force, Network Working Group, 1998.

TANENBAUM, A. S. **Redes de computadores**. Amsterdam: Campus, 2003.

VASCOTTO, M. High speed surface defect identification on steel strip. **Mettalurgical Plant and Technology International**, Dusseldórfia, v.1, p.70–73, 1996.

VENTRELA, A. et al. Robô móvel aplicado á inspeção em linhas de transmissão. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2., 2003, Salvador. **Anais...** Brasília DF: ANEEL, 2003. v.1, p.1015–1020.

WEI, G.; JIANXIN, C. A transducer made up of fluxgate sensors for testing wire rope defects. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Nova York, v.51, n.1, p.120–124, Feb. 2002.

WORLD WIDE WEB CONSORTIUM. **Portable Network Graphics**. Disponível em: <<http://www.w3.org/Graphics/PNG/>>. Acesso em: 20 jul. 2010.

YON, J. et al. Infrared microbolometer sensors and their application in automotive safety. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MICROSYSTEMS FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS, 2003, Berlin. **Proceedings...** Berlin: VDI/VDE Innovation, 2003. p.137–157.

ZHOU, F. et al. Control of an inspection robot for 110kv power transmission line based on expert system design methods. **IEEE Conference on Control Applications**, Toronto, v.28, p.1563–1568, 2005.

## APÊNDICE A ROBÔS MÓVEIS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

### A.1 Introdução

Aqui são apresentados alguns modelos propostos de robôs que podem ser usados para fazer a inspeção das linhas de transmissão.

Este capítulo irá tratar dos principais fatores que devem ser considerados dentro do projeto do sistema mecânico de um robô para inspeção em linhas de transmissão.

Os robôs pra inspeção de linhas de transmissão de alta voltagem são sistemas eletromagnéticos complexos que envolvem diferentes campos e o sistema interior é baseado em estrutura mecânica que deve incorporar funções como caminhar sem balançar ao longo da linha, transpassar obstáculos automaticamente, equilíbrio na postura, baterias substituíveis sem necessidade de se remover o robô da linha entre outras coisa (JIANG et al., 2008).

Em (MOSCATO et al., 2004), foi colocado que o desenvolvimento do sistema mecânico de um robô para inspeção em linhas de transmissão deve ter como principais pontos o sistema de locomoção que será utilizado e a influência do vento no equilíbrio do robô, o que influenciará diretamente sua forma geométrica.

No projeto apresentado em (LI; LIJIN; HONGGUANG, 2004), é ressaltado também, a importância do material utilizado para a confecção do compartimento que abrigará a eletrônica embarcada do robô. Essa importância deve-se à necessidade de se construir uma blindagem para proteger os circuitos eletrônicos de interferências eletromagnéticas que possam causar algum mau funcionamento do sistema.

Algumas configurações mecânicas dos sistemas de locomoção para robôs que operam em linhas de transmissão já foram propostas na literatura. Em (MOSCATO et al., 2004) elas são divididas em quatro grupos e podem ser vistas na figura 35.

Algumas configurações foram desenvolvidas com o intuito de se conseguir superar os obstáculos encontrados ao longo de uma linha de transmissão. Em (MONTAMBAULT; POULIOT, 2006), é feita uma classificação dos principais obstáculos encontrados, de acordo com o seu comprimento e essa classificação é apresentada na tabela 17 (MOREIRA, 2008. 138).

Tabela 17: Classificação dos obstáculos.

Tipo de obstáculo	Comprimento em metros
Amortecedores	0.10
Cadeia de isoladores em suspensão	0.20 - 0.25
Cadeia de isoladores em suspensão em V	0.60 - 0.70
Esferas de sinalização	0.75
Cadeia de isoladores em amarração	1.35 - 2.00

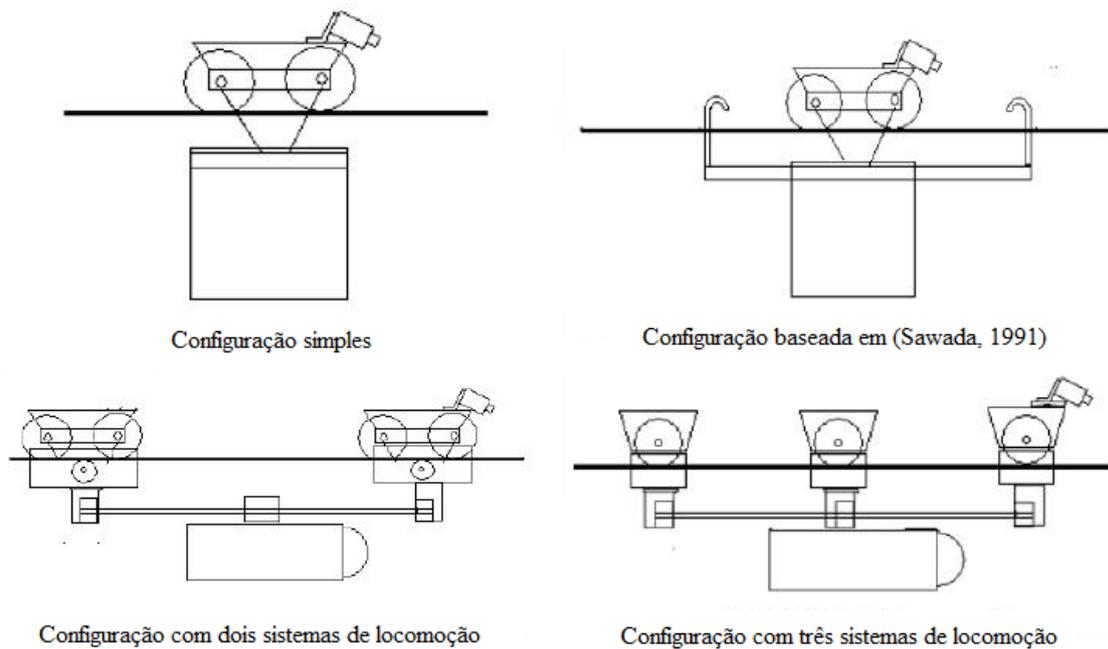


Figura 35: Diferentes configurações dos sistemas de locomoção utilizados em robôs para inspeção em linhas de transmissão (MOSCATO et al., 2004).

## A.2 Mecanismo Proposto por (GONÇALVES, 2006)

Na figura 36 é apresentado um esquema geral do robô móvel com os parâmetros utilizados na análise cinemática. Ele é composto por dois pares de pernas idênticas, dianteira e traseira, acionadas por um só motor, interligadas por uma correia sincronizadora. Cada par de pernas é composto por dois mecanismos biela-manivela-deslizante  $OABC$  e  $OA'BC'$ , onde os segmentos  $BC$  e  $BC'$  têm comprimento variável. Os pés correspondem aos pontos  $C$  (pé direito) e  $C'$  (pé esquerdo). O ângulo de entrada do movimento  $\theta$  é definido como o ângulo entre a manivela de entrada,  $OA$ , e a linha horizontal. A fase entre o segmento  $OA$  e o segmento  $OA'$  é  $\pi$  radiano.

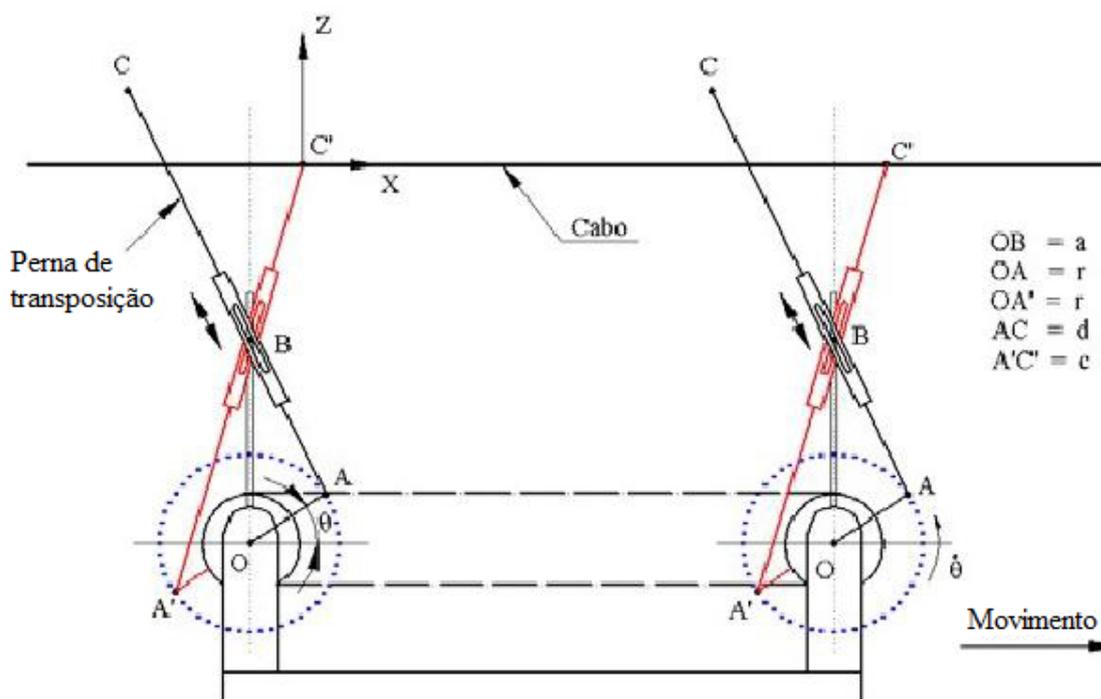


Figura 36: Esquema da vista lateral do robô móvel e seus parâmetros.

Assim, o robô tem duas pernas direitas e duas pernas esquerdas onde, cada perna do mesmo lado tem o mesmo movimento. A estabilidade é assegurada pelo contato com o fio, a cada instante, dos pés do mesmo lado. Na figura 36, os pés esquerdos,  $C'$ , estão em contato com o fio. Os segmentos  $AC$ ,  $A'C'$ ,  $OA$  e  $OB$  são denotados por  $d$ ,  $c$ ,  $r$  e  $a$ , respectivamente. No protótipo apresentado na figura 37, o acionamento das pernas é feito por um motor de corrente contínua e a variação das pernas é garantida por um fuso acionado por motor passo.

A análise de transposição de obstáculos é realizada a partir da colisão do pé do robô com o obstáculo. O método consiste em fazer recuar o pé toda vez que ele encontra o obstáculo. Este recuo equivale a girar a manivela de entrada  $OA$  no sentido contrário de um ângulo  $\Delta\theta$ . Após o recuo, a perna é alongada de um comprimento  $\Delta c$ . Após a primeira colisão e o alongamento da perna de  $\Delta c$ , ela volta a se movimentar, permitindo ultrapassar o obstáculo.

Caso ocorra uma segunda colisão, é possível calcular o raio do obstáculo (considerado como uma esfera) e a posição do seu centro a partir das coordenadas das duas colisões e dos parâmetros das pernas do robô. Com o valor do raio do obstáculo



Figura 37: Configuração geral do robô suspenso por fio.

é possível obter o comprimento da perna para que o obstáculo seja transposto. É possível que, mesmo com o comprimento obtido a partir do raio do obstáculo, o pé venha a colidir novamente com ele. Este caso ocorre quando o obstáculo ocupa a posição de retorno do pé sobre o fio. Após o alongamento da perna e se não houver mais colisões com o obstáculo, podem ocorrer duas situações. Na primeira, o obstáculo não obstrui a posição de apoio do pé sobre o fio, considerando o comprimento normal da perna. Neste caso, após o alongamento da perna, e se não ocorrer mais colisão, antes do pé tocar o fio, a perna é reduzida para seu comprimento normal.

A segunda situação corresponde ao caso em que o obstáculo ocupa a posição de retorno do pé sobre o fio, figura 38. Neste caso, para que o robô não apresente um movimento instável, o comprimento da perna cujo pé está apoiado no fio também varia, de tal forma que, quando estiver os quatro pés sobre o fio, as quatro pernas tenham o mesmo comprimento. Para que isto ocorra, após o pé transpor o obstáculo e a perna estiver reduzindo seu comprimento para que o pé apóie no ponto definido por  $x_f$ , a perna de apoio é alongada até que, quando o pé de transposição apoiar sobre o fio, as quatro pernas estejam com o mesmo comprimento. O retorno das pernas para o comprimento normal se dá no passo seguinte. Para isto, no início do novo passo, a perna, do pé que retornou ao fio, é reduzida até seu comprimento normal. Desta forma, a perna que irá para o espaço, mantendo seu comprimento, deixará o fio, reiniciando a operação de movimentação fora do fio, figura 39.

Dois dos princípios de desenvolvimento deste robô são a simplicidade e a controlabilidade. Neste sentido, foram utilizadas funções lineares, dependentes do ângulo de entrada  $\theta$ , para a variação dos comprimentos das pernas direita,  $d$ , e da esquerda,  $c$  (GONÇALVES, 2006).

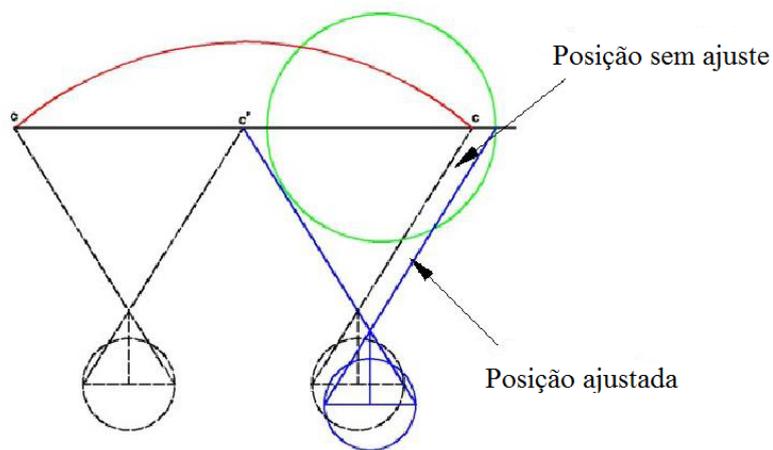


Figura 38: Procedimento para transposição quando o obstáculo ocupa a posição de retorno do pé.

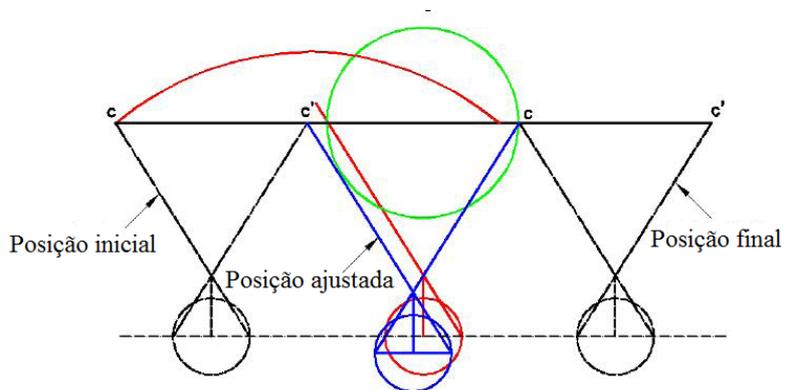


Figura 39: Procedimento para correção do comprimento da perna.

### A.3 Mecanismo de Rodas Andarilhas

O mecanismo proposto em (JIANG et al., 2008) de rodas andarilhas é composto de rodas que movem o robô, de braços suspensos, do motor principal, do eixo de transmissão, das correntes da transmissão, da engrenagem de rosca. A figura 40 mostra o esquema deste robô.

O motor principal gira o eixo de transmissão para girar o primeiro nível de correntes de transmissão, e três engrenagens são instaladas no eixo principal, enquanto as três engrenagens bem encaixadas com três engrenagens de rosca que estão no fim dos braços suspensos, por isso essas engrenagens podem ser giradas, e o robô pode andar sem balançar. Para locomoção ele utiliza rodas com calço feitas de borracha de nylon para aumentar a adesão entre a roída e o fio. O mecanismo inteiro pode andar com equilíbrio nas linhas de transmissão de alta voltagem cujo ângulo de inclinação não ultrapasse  $30^\circ$ .

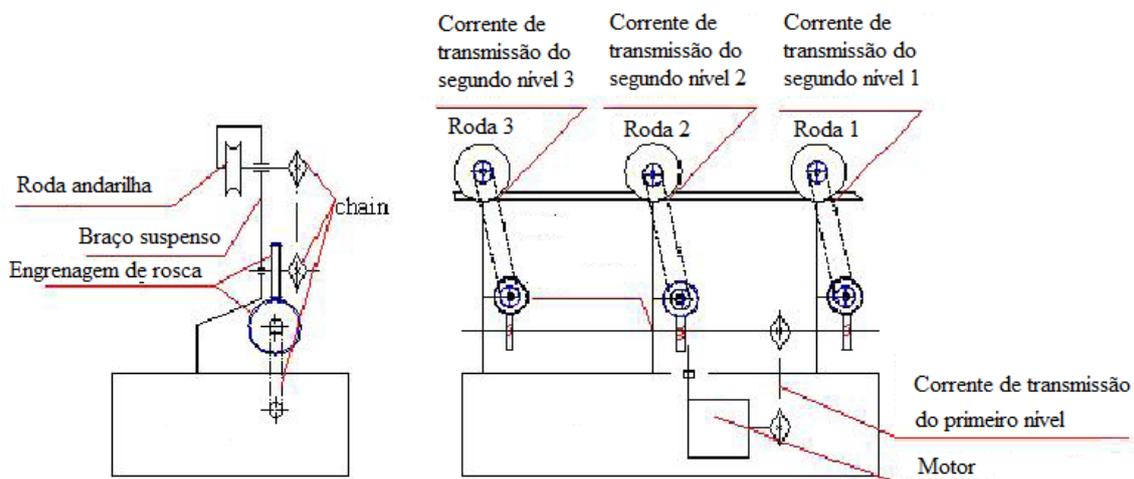


Figura 40: Mecanismo de rodas andarilhas.

Desviar todos os tipos de obstáculos nas linhas de transmissão é a chave da inspeção no desenho do mecanismo do robô. Pelo fato do robô ficar suspenso nas linhas de transmissão, ambos o deslocamento normal e o equilíbrio da postura do robô devem ser garantidos quando desviar de um obstáculo. Para isso um novo mecanismo de desvio de obstáculo foi desenhado. A figura 41 mostra sua estrutura.

Este mecanismo de desvio de obstáculos é composto pelo motor, o relé eletromagnético, mecanismo de movimento com bielas configuradas em X, o disco giratório com sulcos para passar o movimento para as bielas e os braços suspensos. O motor para desvio de obstáculos une o eixo motriz com a engrenagem de redução, quando o robô detecta um obstáculo e vai desviar, o relé fecha e o eixo motriz gira juntamente com o parafuso guia, além disso, a porca reversível que esta instalada no parafuso guia é girada ao longo do parafuso guia, e a biela de transmissão em X é movida pela porca, então os braços suspensos são movidos pelo disco giratório com sulcos através das bielas de transmissão em X, assim o robô pode desviar do obstáculo com rapidez e precisão.

Quando o robô esta desviando do obstáculo, o centróide do robô irá mudar de posição, o que levará a mudar a posição do robô. Para o robô manter a sua postura enquanto move os braços suspensos, um mecanismo de balanço lateral é projetado.

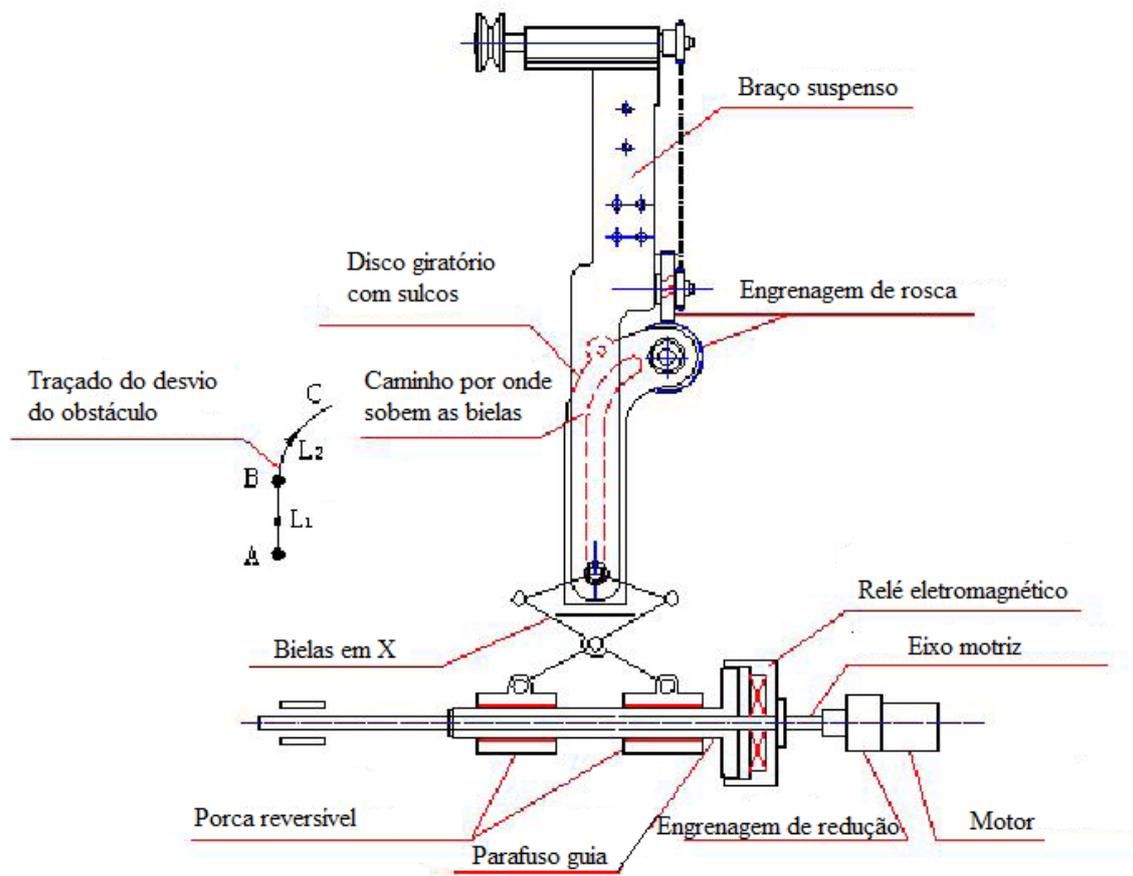


Figura 41: Mecanismo de desvio de obstáculo.

A figura 42 mostra seu princípio. Quando o robô está movendo os braços, o mecanismo de balanço irá mover a caixa de bateria, se somente o disco giratório com sulcos é projetado para o movimento dos braços, o centróide do robô permanecerá imóvel enquanto os braços se movem.

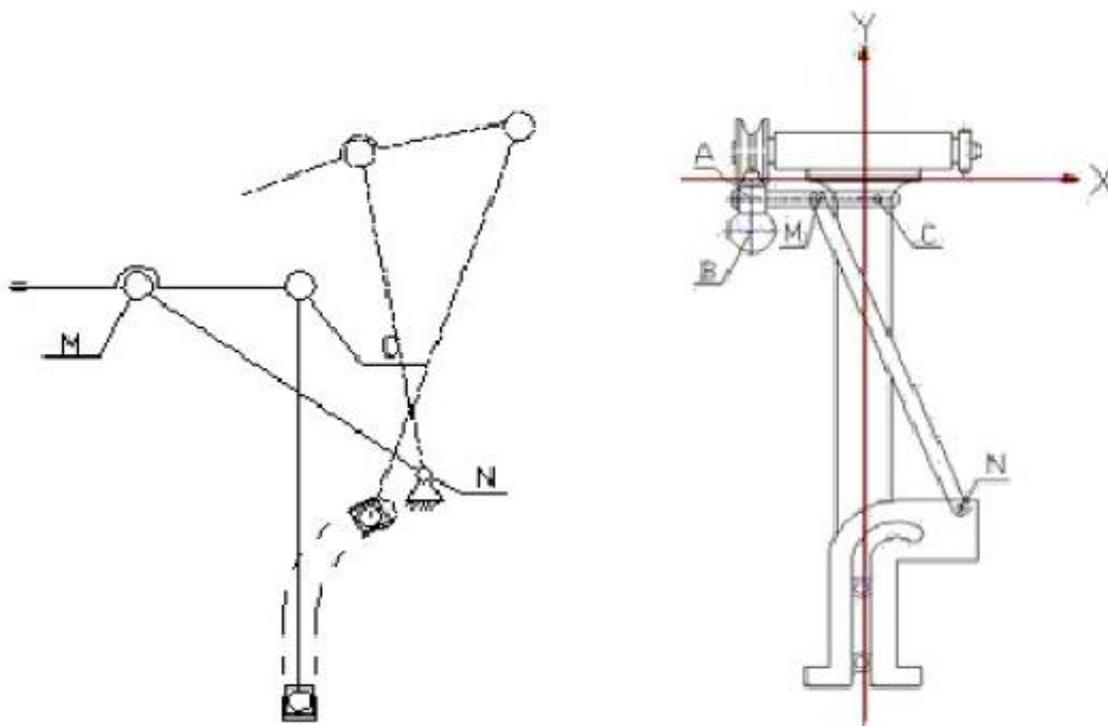


Figura 42: Mecanismo de fixação de enlace.

Quando o braço traseiro e o dianteiro estão subindo, o centro de gravidade do corpo do robô não vai mais estar apoiado, se nenhuma compensação for feita o robô irá girar em torno da roda central e inclinar. Para prevenir este tipo de movimento, um conjunto de mecanismo fixadores foram instalados respectivamente nos braços dianteiros e traseiros do robô. Este mecanismo é composto de quadros de apoio que se conectam com o ponto C dos braços suspensos, a biela que conecta o ponto N da placa sulcada com o ponto M do quadro de suporte da roda fixadora, o eixo da roda fixadora e o disco com sulcos, além disso essas estruturas compuseram uma estrutura de quatro pólos. Quando um braço suspenso está no ponto inicial, a roda de fixação está em contato com a linha, uma vez que o corpo comece a se inclinar, a roda de fixação irá suprimir esta tendência do corpo. Quando o braço suspenso subir, a roda fixadora pode prontamente abrir, assim a interferência do movimento será evitada.

#### A.4 Configuração Simples

Essa configuração proposta em (MOREIRA, 2008. 138) é eficiente para a realização de tarefas em um vão de linha de cada vez. A figura 43 mostra um exemplo de configuração desse tipo. Ela é mais apropriada para linhas que não possuam obstáculos nos cabos analisados que impeçam o deslocamento do robô, sendo capaz

de atender uma quantidade razoável de linhas de transmissão.

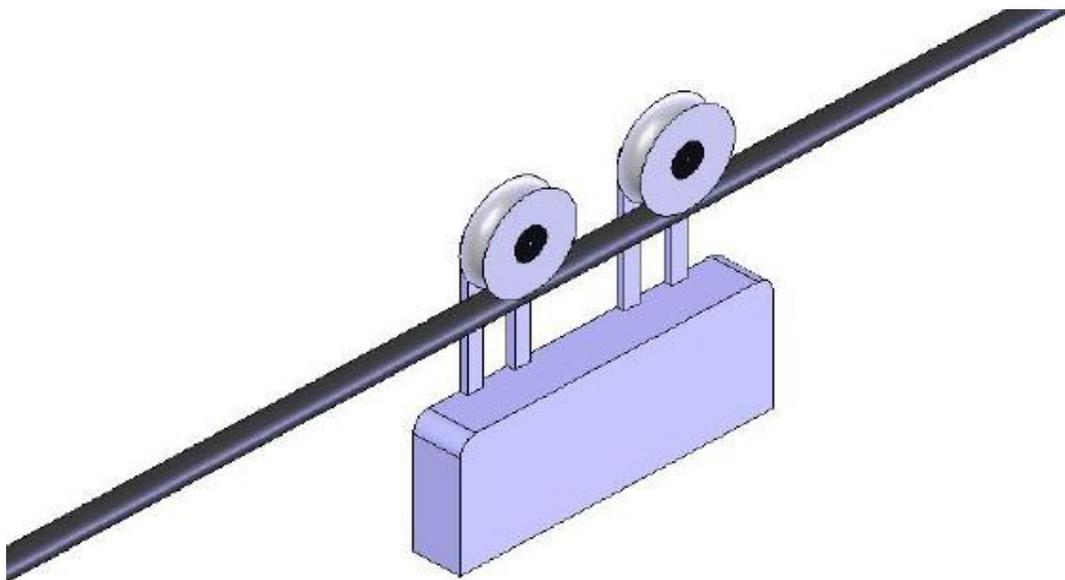


Figura 43: Configuração simples com duas polias utilizadas em robôs para inspeção em linhas de transmissão.

Alguns robôs desenvolvidos com essa estrutura foram empregados em aplicações como instalação de esferas de sinalização em cabos guarda (CAMPOS et al., 2002), inspeção de cabos condutores com sensores de corrosão por corrente de fuga (SAWADA et al., 1991), degelo dos cabos guarda e medição da resistência elétrica das juntas de cabos condutores (MONTAMBAULT; POULIOT, 2006). Esta última aplicação usava uma variação da arquitetura da figura 43, empregando três polias.

No caso de linhas que tenham peças colocadas nos cabos para alguma finalidade, esse tipo de arquitetura não consegue ser utilizado em toda a extensão do vão entre torres de maneira autônoma, requerendo a intervenção de um operador humano para transpor os obstáculos existentes.

## A.5 Configuração Simples com Hastes

Essa configuração utiliza hastes que se prendem ao cabo para a transposição de obstáculos. Exemplos de robôs que utilizam esta configuração são os propostos por (SAWADA et al., 1991) e (MONTAMBAULT; POULIOT, 2006).

(SAWADA et al., 1991) desenvolveu um sistema com duas polias e uma haste retrátil em forma de arco (figura 44). Ao se aproximar do obstáculo, ele abre a haste, prendendo-a em um ponto anterior e outro posterior ao obstáculo, e passa a se locomover pela haste. Depois de ultrapassado o empecilho, ele retorna ao cabo.

(MONTAMBAULT; POULIOT, 2006) desenvolveu o único robô capaz de transpor obstáculo que pôde ser encontrado na literatura até o final do ano de 2007, e que tenha sido testado em linhas vivas. Ele desenvolveu um sistema semelhante ao de (SAWADA et al., 1991), no momento em que o robô se aproxima do obstáculo uma haste presa ao robô se desloca para frente e se prende ao cabo logo após o obstáculo. O robô então retrai as roldanas e passa a se deslocar pela haste; após

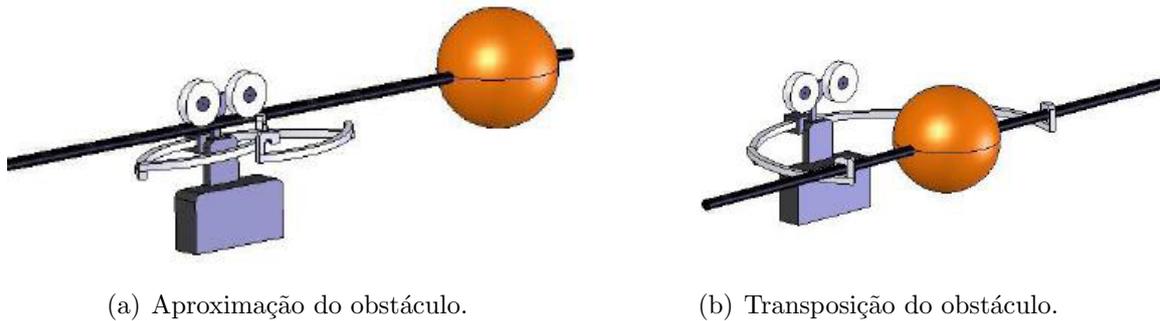


Figura 44: Funcionamento da configuração com hastes, para transposição de obstáculos, desenvolvida por (SAWADA et al., 1991).

passar pelo obstáculo as roldanas são posicionadas no cabo novamente. Até então o robô era capaz de transpor obstáculo com um comprimento de 75 cm. A figura 45 ilustra esse procedimento.

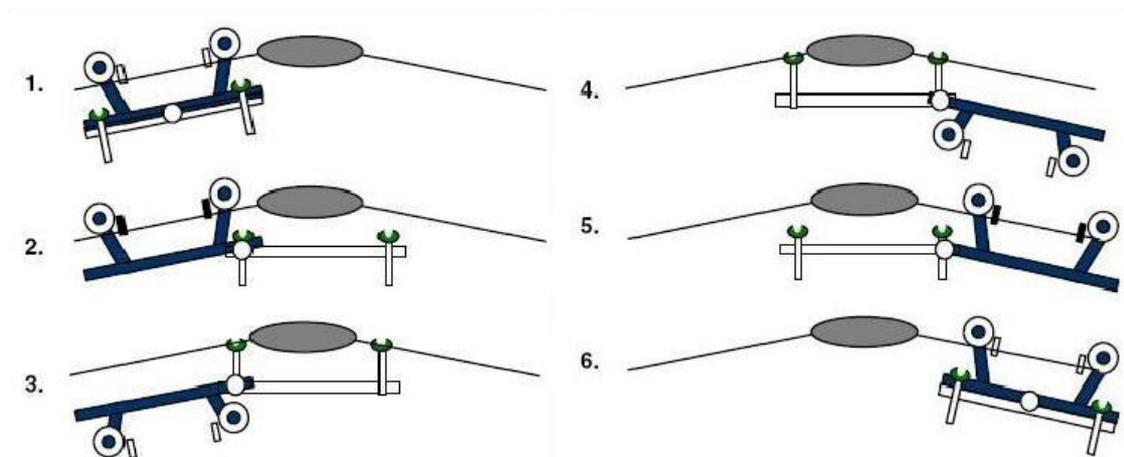


Figura 45: Funcionamento da configuração com hastes, para transposição de obstáculos, desenvolvida em (MONTAMBAULT; POULIOT, 2006).

## A.6 Configuração com Dois Sistemas de Locomoção

Esta configuração consiste em dois sistemas de locomoção, onde cada um dos sistemas possui três rodas. Quando o primeiro sistema de locomoção encontra um obstáculo, o corpo do robô se move para trás; o primeiro sistema de locomoção se desacopla do cabo e o robô anda para frente até o primeiro sistema de locomoção ultrapassar o obstáculo.

O primeiro sistema de locomoção é, então, acoplado ao cabo novamente e em seguida o corpo do robô se movimentava para frente; por último, o segundo sistema de locomoção se desacopla e também transpõe o obstáculo. Todo este procedimento é ilustrado na figura 46. Esta configuração é proposta em (MOSCATO et al., 2004).

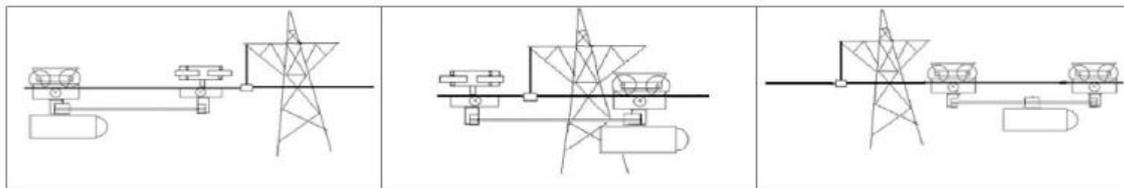


Figura 46: Funcionamento da configuração com dois sistemas de locomoção.

## A.7 Configuração com Três Sistemas de Locomoção

Esta configuração foi proposta em (VENTRELA et al., 2003) e (ZHOU et al., 2005) com a intenção de superar obstáculos e pode ser considerada equivalente a configuração com dois sistemas de locomoção.

Por utilizar três sistemas de locomoção, esta configuração consegue ultrapassar obstáculos sem a necessidade de movimentar o corpo do robô. Para que isso possa acontecer, deve-se ultrapassar um sistema de locomoção de cada vez, sendo assim o robô apoiado sempre em pelo menos dois sistemas. A configuração proposta por (VENTRELA et al., 2003) pode ser observada na figura 47.

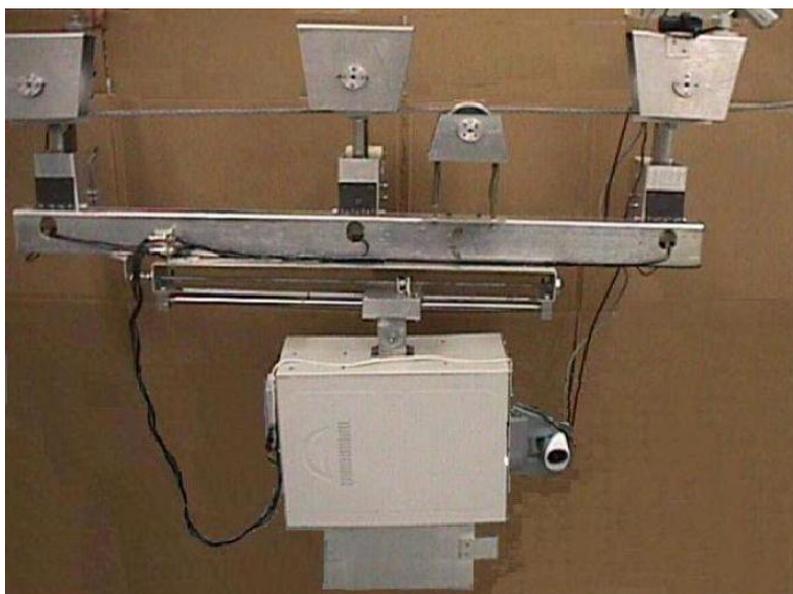


Figura 47: Configuração com três sistemas de locomoção (VENTRELA et al., 2003).

O robô desenvolvido por (ZHOU et al., 2005) é um pouco diferente daquele desenvolvido por (VENTRELA et al., 2003). Ele também utiliza três sistemas de locomoção, mas esses sistemas estão em três hastes articuladas que são coordenadas por um sistema de controle para transpor os obstáculos. Ao todo são necessários 16 motores para o seu funcionamento. A complexidade maior dessa arquitetura exige um método de controle mais elaborado para superar as obstruções. Na figura. 48, pode-se observar o robô desenvolvido por (ZHOU et al., 2005).

Nos exemplos empregando configurações que possibilitam transpor obstáculos sem auxílio de um operador apresentados, a tarefa a ser executada é somente a inspeção visual. Nesses exemplos, não existe nenhum sensor acoplado ao cabo. A utilização de sensores para inspeção das condições do cabo significaria um aumento

significativo na complexidade da estrutura e do método de controle. Apresentadas as configurações mecânicas normalmente utilizadas, passou-se ao estudo do efeito do vento no equilíbrio do robô.

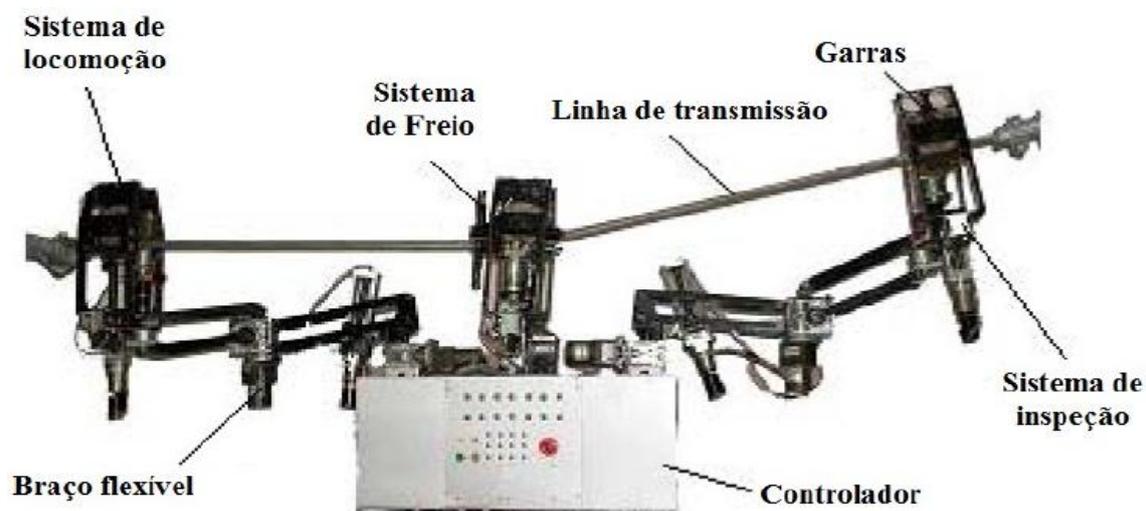
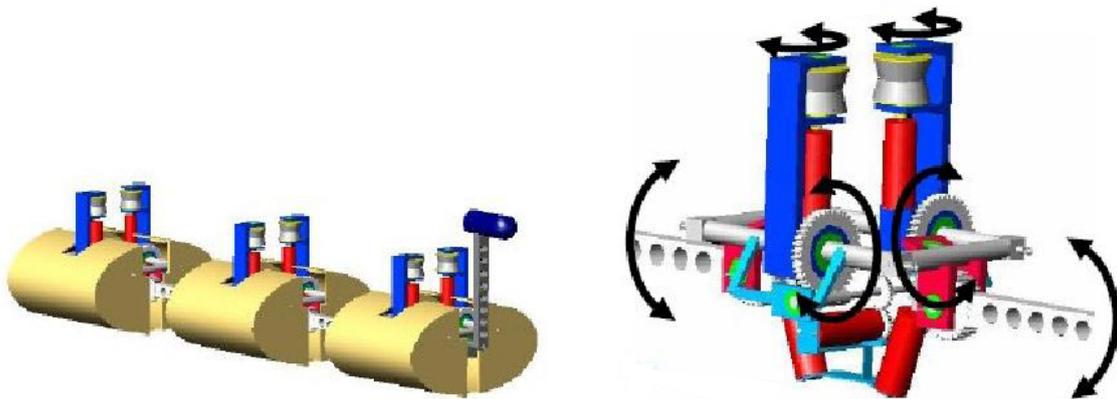


Figura 48: Robô com três sistemas de locomoção desenvolvido em (ZHOU et al., 2005).

## A.8 Robô Lagarta

Esta proposta de (BECKER; LANDRE; SANTOS, 2006) consiste de um robô dividido em três segmentos (figura 49). Cada segmento tem seu conjunto de rolos que se prendem lateralmente a linha energizada e move o robô. Ele também tem juntas rotacionais que ligam estes rolos. Esta junta controla o movimento de abrir e fechar dos rolos (aumentando ou diminuindo o ângulo entre eles). O movimento é responsável por prender e soltar o cabo. Os segmentos dianteiros e traseiros do robô são conectados ao segmento do meio por duas juntas rotacionais. Estas juntas controlam a posição angular relativa entre os segmentos. Quando o obstáculo é detectado em frente ao segmento dianteiro, ele solta o cabo. Os outros dois segmentos continuam presos e movem o robô pra frente até que o segmento do meio detecte o obstáculo. Então o segmento dianteiro volta a prender-se no cabo e o segmento médio solta o cabo. Os segmentos presos movem o robô para frente até que o ultimo segmento detecte o obstáculo. Ele solta o cabo, o robô vai pra frente e depois de passar o obstáculo o segmento traseiro volta a prender o cabo. Essa seqüência de ações de solta, move e prende é repetida toda vez que o robô encontra um obstáculo. Se o obstáculo é muito grande, como na transposição de uma torre, o robô pode imitar o movimento do corpo de uma lagarta procurando um galho para se prender.



(a) Vista do robô formada por três segmentos unidos por juntas rotacionais. (b) Vista detalhada do segmento médio mostrando a estrutura, os 5 motores, os dois rolos e as 10 engrenagens juntamente com seus movimentos representados por arcos.

Figura 49: Detalhamento do robô.

## A.9 Rolos Emborrachados

Esta proposta de (BECKER; LANDRE; SANTOS, 2006) também usa rolos presos as linhas para fazer locomoção do robô, nesse caso são rolos cilíndricos e emborrachados (figura 50). O robô tem apenas um corpo principal que contém todos os mecanismos. Os rolos se locomovem transversalmente movendo três engrenagens que movem três compartimentos onde os rolos estão posicionados. A maneira como ele passa pelo obstáculo é parecida com a do robô lagarta descrita anteriormente cada par de rolos solta o cabo simultaneamente, de tal forma contornando o obstáculo um par por vez.

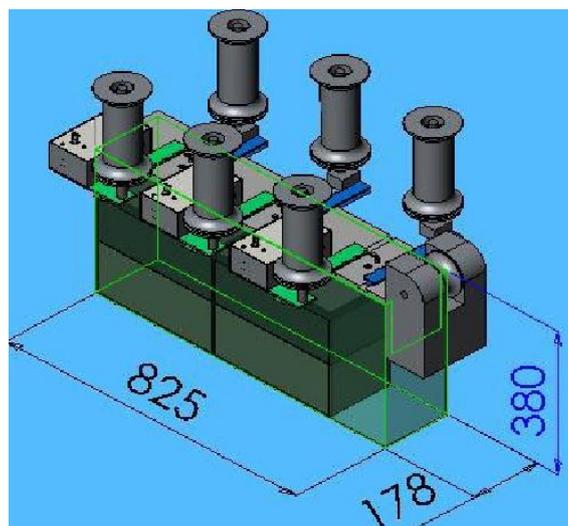


Figura 50: Vista do robô com suas dimensões (em mm) formado pelo corpo principal e seis rolos que prende lateralmente a linha energizada.

## A.10 Robô Elipsóide

Este modelo mecânico de robô de (BECKER; LANDRE; SANTOS, 2006) tem quatro braços articulados que giram longitudinalmente quando estão desviando de um obstáculo (figura 51). O braço da frente contém o sensor para inspeção da linha. Os outros três braços prendem verticalmente a linha de transmissão usando três conjuntos de rolos. Cada conjunto de rolos tem dois rolos. O rolo superior do conjunto é conectado ao compartimento móvel por uma engrenagem motora que move o rolo verticalmente, assim permite que o conjunto de rolos se prenda e se solte da linha. Para o robô transpassar o obstáculo, um braço vai transpassar ele por vez.

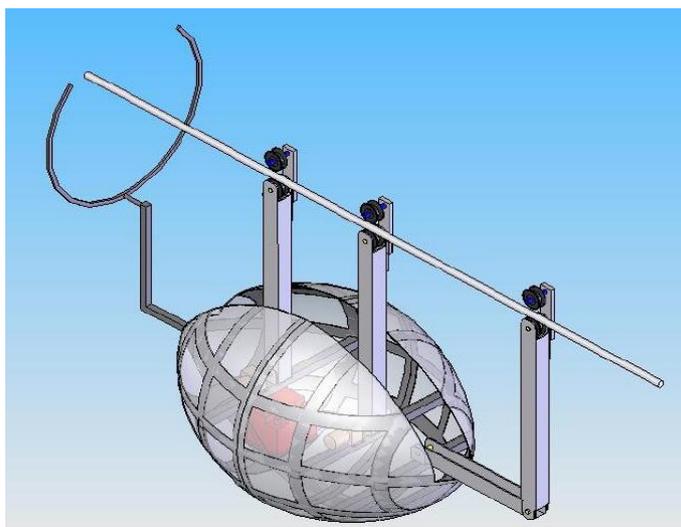


Figura 51: Vista do robô de formato de um elipsóide.

## A.11 Robô com Garras

Nesta proposta de (BECKER; LANDRE; SANTOS, 2006) o robô possui quatro braços, cada braço tem uma garra na ponta com as quais o robô se prende a linha de transmissão essas garras abrem e fecham permitindo o robô se prender ou se soltar da linha. Cada braço esta conectado a um compartimento, cada compartimento é movimentado por uma engrenagem motora que gera um movimento vertical para cima e para baixo. O conjunto composto por motor, engrenagem, braço e garra é conectado em uma superfície que desliza em um guia de orientação. Um sistema de engrenagens faz esse movimento longitudinal.

Este sistema de engrenagens é responsável por movimentar as mesas metálicas 1 e 2 pra frente enquanto move as mesas 3 e 4 para traz e vice-versa (figura 52). Este movimento das mesas e conseqüentemente das garras é o que permite a transposição de obstáculos. Enquanto as garras 1 e 2 estão presas 3 e 4 estão soltas, enquanto elas se soltam elas se movem para baixo e suas mesas se movem para frente. Depois que esse movimento se completa os braços 3 e 4 sobem e suas garras se prendem ao cabo, então é a vez das garras 1 e 2 se soltarem, seus braços descerem, suas mesas irem para frente ate o obstáculo estar contornado. Os braços 1 e 2 então sobem e se prendem no fio e assim sucessivamente.

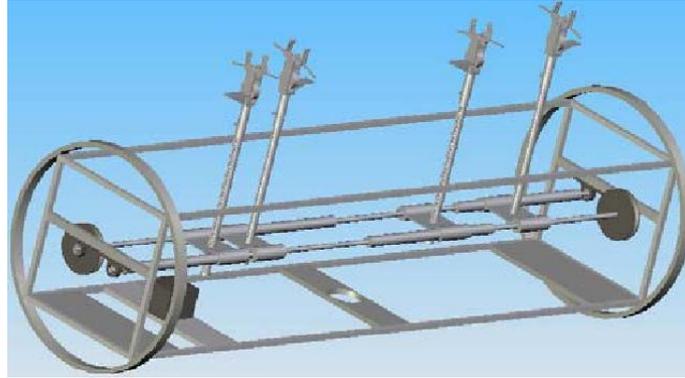


Figura 52: Visão interna do robô.

## A.12 Robô Equilibrista

Este mecanismo proposto por (BECKER; LANDRE; SANTOS, 2006) imita o movimento do brinquedo "João bobo". O peso do robô deve ser simetricamente distribuído ao longo do seu eixo longitudinal e seu centro de massa deve estar abaixo do cabo onde ele está fazendo a verificação. Assim ele balança para os lados, mas não cai, o robô usa o conceito de estabilidade passiva pra prover rápida resposta a distúrbios externos como ventos laterais.

O robô usa três rolos emborrachados para suporte vertical do robô na linha e para movimentação dele. Os rolos são conectados em bifurcações suspensas e são movimentados por três conjuntos de correias e polias conectadas ao motor, ao eixo e as engrenagens. A figura 53 mostra o esquema do robô.

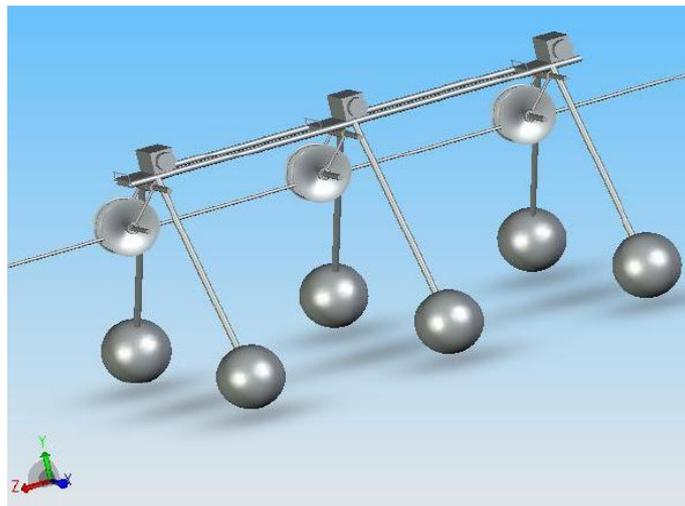


Figura 53: Vista geral do robô equilibrista.

Cada bifurcação suspensa tem uma junta rotacional e uma mola que a conecta com o robô e permite que elas girem quando o robô está desviando de um obstáculo.

Se, quando ele está se movendo no cabo, o sensor frontal detectar um obstáculo, o robô diminui sua velocidade e cada rolo passa pelo obstáculo rotacionando suas bifurcações suspensas assim como um carro faz quando passa por uma lombada.

### A.13 Robô Dirigível

Proposto por (BECKER; LANDRE; SANTOS, 2006), a idéia é um veículo voador não controlado por humanos. O veículo mais econômico em termos de gasto de combustível e mais simples de fazer seu posicionamento é o dirigível que utiliza gás Hélio para flutuar e geralmente usam dois motores, aerofólios e posicionadores angulares em sua cauda como mostra a figura 54.



Figura 54: Robô dirigível.