

JOSÉ AUGUSTO DE AGUIAR

**A TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA COMO FERRAMENTA
DE MANUTENÇÃO PREDITIVA APLICADA
EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAS**

São Paulo

2009

JOSÉ AUGUSTO DE AGUIAR

**A TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA COMO FERRAMENTA
DE MANUTENÇÃO PREDITIVA APLICADA
EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS**

Monografia apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Especialista em Engenharia e
Gestão de Manufatura e Manutenção. –
MBA/USP.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto F. M. de Souza

São Paulo

2009

JOSÉ AUGUSTO DE AGUIAR

**A TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA COMO FERRAMENTA
DE MANUTENÇÃO PREDITIVA APLICADA
EM SISTEMAS ELÉTRICOS INDUSTRIAIS**

Monografia apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Especialista em Engenharia e
Gestão de Manufatura e Manutenção. –
MBA/USP.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto F. M. de Souza

São Paulo

2009

*À minha esposa Maria José e aos
meus filhos Nathália e Guilherme.
Símbolo de compreensão, amor,
amizade e harmonia.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus e Pai, por me dar sabedoria para compreender que a vida é um eterno aprendizado. Aquele que nos apresenta situações e personagens, que na maioria das vezes representam estar em direção oposta ao foco desejado, mas que no Seu tempo se revelam como peças fundamentais para alcançá-los.

À minha esposa e aos meus filhos que renunciaram a poucas horas de lazer que tinham para me incentivar e por participarem deste trabalho.

Ao Capitão de Mar e Guerra Luciano Pagano Júnior, que reconheceu meu trabalho e proporcionou minha participação neste Curso de Especialização em Engenharia e Gestão de Manufatura e Manutenção – MBA/USP.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP, especificamente no Centro Experimental Aramar, onde toda a aplicação e análise dos resultados deste trabalho foram executadas.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP, pela oportunidade de participação no curso de formação, capacitação e certificação de inspetor de termografia nível I, realizado pelo Infrared Training Center – ITC.

A todos aqueles que de alguma forma me incentivaram e valorizaram este trabalho.

RESUMO

As perdas de energia são cada vez menos aceitáveis em sistemas de energia elétrica. A redução das falhas catastróficas e dos prejuízos associados tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas de inspeção e manutenção preditiva. Entre estas se encontra a termografia infravermelha, técnica bastante empregada na inspeção de componentes e sistemas elétricos. Neste sentido, o trabalho pretende apresentar uma proposta para a manutenção preditiva em sistemas elétricos industriais fundamentados na técnica termográfica por infravermelho, com o desenvolvimento e adaptação de procedimentos utilizados por empresas que se utilizam da técnica como ferramenta de manutenção preditiva. A proposição de um plano para implantação da técnica nas unidades industriais e laboratoriais da empresa, o desenvolvendo de procedimentos e métodos adequados às necessidades, obtendo como resultado a máxima disponibilidade dos sistemas.

Palavras-chave: manutenção preditiva, termografia infravermelha, termovisor, termograma.

ABSTRACT

Energy losses are less and less acceptable in electric power systems. The reduction of catastrophic failures and losses associated has driven the development of inspection techniques and predictive maintenance. Among these is the infrared thermography, a technique widely used in inspection of components and electrical systems. In this sense, the paper intends to present a proposal for predictive maintenance in industrial electrical systems based on infrared thermographic technique, with the development and adaptation of procedures used by companies that use the technique as a tool for predictive maintenance. The proposal of a plan for deployment of technology in industrial and laboratory of the company, developing procedures and methods appropriate to the needs, which results in maximum system availability.

Keywords: predictive maintenance, infrared thermography, thermograms.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução das câmeras térmicas de 70 até os nossos dias	20
Figura 2 – Câmeras Modelo Série T – Flir Sistems	21
Figura 3 – Condução	25
Figura 4 – Convecção	26
Figura 5 – Radiação	27
Figura 6 – Campo oscilatório	28
Figura 7 – Comprimento de onda	29
Figura 8 – Curva de Planck	31
Figura 9 – Decomposição da luz branca e cores do espectro visível	32
Figura 10 – Corpo Negro	33
Figura 11 – Absorção, reflexão e transmissão	34
Figura 12 – Curva da distribuição espectral de fontes de radiação	36
Figura 13 – Espectro eletromagnético e as faixas nas quais são fabricados os termovisores para sistemas elétricos	37
Figura 14 – Diagrama simplificado de um termovisor	41
Figura 15 – Representação do Campo de Visão e do Campo de Visão Instantâneos	43
Figura 16 – Imagem visível e térmica da superfície de um ferro de passar roupa com diversas emissividades	51
Figura 17 – Fatores Ambientais que podem influenciar a inspeção termográfica	53
Figura 18 – Imagem térmica de painel elétrico do inversor de frequência	73
Figura 19 – Imagem térmica de conexão do contator e relê térmico	73
Figura 20 – Imagem térmica de conexão régua de borne de painel	74
Figura 21 – Imagem térmica corrigida de conexão do contator e relê térmico	75
Figura 22 – Imagem térmica corrigida de conexão régua de borne de painel	76
Figura 23 – Termograma da caixa de ligação do motor elétrico	75
Figura 24 – Termograma da base de fusível tipo NH	77
Figura 25 – Termograma da base de fixação de contator com reflexão	78
Figura 26 – Termograma da base de fixação de contator com reflexão reduzida	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Energia disponível nas faixas de comprimento de onda dos termovisores	42
Tabela 2 – Tabela de máxima temperatura admissível	65
Tabela 3 – Tabela de avaliação de severidade e recomendação	69

SUMÁRIO

1. Introdução	10
1.1 Objetivo do trabalho	11
1.2 Escopo do trabalho	11
1.3 Premissas	12
2. Caracterização da Empresa	13
3. Revisão da Literatura	15
3.1 História da Manutenção	15
3.2 História da Termografia	18
3.3 Revisão da Literatura	21
3.3.1 Teorias Envolvidas	22
3.3.1.1 Calor	23
3.3.1.2 Temperatura	23
3.3.1.3 Transferência de calor	24
3.3.1.3.1 Condução	24
3.3.1.3.2 Convecção	25
3.3.1.4 Radiação	26
3.3.1.4.1 Radiação Eletromagnética	27
3.3.1.4.2 Radiação Térmica	29
3.3.1.4.3 Espectro Visível	32
3.3.1.5 Corpo Negro	33
3.3.1.6 Emissividade	34
3.3.1.7 Considerações Sobre a Termografia	36
4. Fatores Limitantes da Termografia Infravermelha	39
4.1 Inspetores de Termografia	40
4.2 Equipamentos de Medição - Termovisão	41
4.2.1 Resposta Espectral	42
4.2.2 Resolução Espacial	42
4.2.3 Resolução da Medida	45
4.2.4 Faixa de Temperatura	47
4.2.5 Sensibilidade Térmica	47

4.3 Componentes ou Equipamentos sob Inspeção	48
4.3.1 Corrente Elétrica da Carga	48
4.3.2 Emissividade do Componente	50
4.4 Condições Ambientais	52
4.4.1 Transmitância Atmosférica	53
4.4.2 Atmosfera	54
5. Padronização de Procedimentos de Inspeção	56
5.1 Procedimento de Inspeção de Termografia em Equipamentos Elétricos	56
5.1.1 Objetivo	57
5.1.2 Abrangência	57
5.1.3 Definições	57
5.1.4 Responsabilidades	59
5.1.5 Equipamentos para Inspeção Termográfica	60
5.1.6 Atividade de Inspeção Termográfica	60
5.1.7 Procedimento de Inspeção	62
5.1.8 Analises dos Resultados	64
5.1.9 Recomendação para Inspeção de Componentes e Equipamentos	69
5.1.10 Modelo de Relatório de Inspeção Termográfica	70
6. Aplicação da Técnica de Manutenção Preditiva	72
6.1 Aplicações por Análise Qualitativa	72
6.2 Aplicações por Análise Quantitativa	74
7. Conclusão	79
Referências Bibliográficas	80
Anexos	82

1. Introdução

As perdas de energia são cada vez menos aceitáveis nos sistemas de energia elétrica. A redução das falhas catastróficas e dos prejuízos associados tem impulsionado a busca e o desenvolvimento de técnicas de inspeção e manutenção para os equipamentos dos sistemas elétricos industriais. Considerando os aspectos de disponibilidade da energia com qualidade, continuidade operacional dos equipamentos e baixo custo se faz necessário buscar a melhor estratégia de manutenção para garantir a operacionalidade dos equipamentos e sistemas.

Neste ponto, a manutenção preventiva determina intervenções periódicas e programadas para substituição ou reparo de componentes específicos em função de parâmetros como vida útil, recomendação de fabricantes, dados históricos ou tratamentos estatísticos, mas não no estado real de funcionamento dos componentes ou equipamentos.

Na manutenção preditiva a atuação é realizada com base em modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática, conforme descreve Pinto e Xavier (2007). As falhas podem ser localizadas e corrigidas em seus estágios iniciais, antes de se transformar nas falhas potenciais capazes de comprometerem o funcionamento dos sistemas elétricos industriais. Entre estas se encontra a termografia infravermelha, técnica bastante empregada na inspeção de componentes e sistemas elétricos.

É neste contexto onde está inserido a termografia infravermelha como ferramenta de manutenção preditiva, capaz de diagnosticar de forma prematura o início do processo de falha.

Considerando que as evoluções tecnológicas proporcionam um efeito extremamente dinâmico, pois as tecnologias dos equipamentos de inspeção e dos equipamentos sob inspeção estão em constante desenvolvimento, pessoas envolvidas tem diferentes enfoques e experiências sobre o processo global, o que leva a um desenvolvimento e adequação de um programa de termografia a ter constantes aprimoramentos.

Nos sistemas elétricos as falhas geralmente são precedidas de uma anormalidade térmica do componente elétrico, fato que faz da medição de temperatura um dos principais parâmetros de análise e diagnóstico na manutenção preditiva.

A medição de temperatura geralmente pode ser realizada por dois métodos, sendo a medição por contato, no qual são utilizados termômetros de contato e termopares, e a medição sem contato, na qual termômetros de infravermelho, pirômetros ópticos e câmeras térmicas (termovisores) podem ser empregados.

Fatores como segurança, distância do objeto a ser medido, agilidade na obtenção da medida e o caráter não destrutivo do método, fazem da medição sem contato uma opção bastante atraente para os sistemas elétricos. Dentre as alternativas de medição sem contato, a termografia possui a grande vantagem de ser um método visual capaz de examinar grandes superfícies em pouco tempo (alto rendimento), ideal para locais com grande quantidade de equipamentos a ser inspecionada. A termografia infravermelha é uma excepcional ferramenta de manutenção preditiva, que permite localizar anomalias nos sistemas elétricos, evitando inúmeras paradas não programadas e perdas de produção.

1.1 Objetivo do trabalho

Desenvolver a aplicação da técnica de termografia infravermelha e implantar procedimentos para manutenção preditiva em sistemas elétricos industriais para aplicação nas unidades industriais da empresa.

1.2 Escopo do trabalho

Apresentação e desenvolvimento da técnica de manutenção preditiva baseada na termografia infravermelha, desenvolvimento e adaptação de procedimentos para inspeção, adoção de metodologia para análise dos dados obtidos através de

parâmetros estabelecidos por empresas que se utilizam da técnica e aplicação através de casos reais.

1.3 Premissas

O trabalho a ser apresentado fundamenta-se em um conjunto de premissas, a saber:

- Todo o corpo com temperatura acima do zero absoluto (-273,15 °C, ou 0 K) emite radiação;
- Os mecanismos de transferência de calor de um corpo são funções das propriedades físicas e químicas de seus componentes, da sua estrutura de formação (disposição e organização dos seus elementos), de suas dimensões, do meio ambiente no qual o corpo está inserido e das interações entre o corpo e o meio;
- Os gradientes térmicos superficiais de um corpo retratam o estado de desequilíbrio térmico instantâneo deste corpo e, indicam as trocas térmicas no corpo e com o meio no qual esta inserido. Estas trocas térmicas são funções dos mecanismos de transferência de calor dominantes do fenômeno.

2. Caracterização da Empresa

A empresa está vinculada ao Governo Federal, fundada em 1986, denominada Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, instalada no interior do Estado de São Paulo no Centro Experimental Aramar, município de Iperó e que tem por objetivo a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias nas áreas nuclear, propulsão e geração de energia. Os programas de pesquisas e desenvolvimento da empresa estão divididos em vários empreendimentos, são concebidos e desenvolvidos privilegiando uma forte cultura experimental, quase sempre com a participação da indústria brasileira, meio acadêmico e institutos de pesquisas. Esse modelo gerencial permitiu, a um baixo custo, avanços tecnológicos significativos e a formação de técnicos especializados nas mais diversas áreas do conhecimento. Também permitiu que muitos dos produtos desenvolvidos fossem transferidos à sociedade civil, através da migração tecnológica, utilizando-se um dos seguintes modelos:

- i. Como sócios do "know how" das tecnologias ainda em desenvolvimento ou que necessitam de investimentos na adaptação para atendimento ao mercado.
- ii. Como fabricantes licenciadas e/ ou distribuidoras dos produtos desenvolvidos.
- iii. Como usuárias dos produtos desenvolvidos ou de produtos adaptados para as suas necessidades.

Devido a essas características de modelo gerencial e capacidade tecnológica a empresa estabelece parcerias com outras instituições governamentais afins para fabricação, nacionalização de elementos e componentes fundamentais para aplicação em projetos de interesse nacional.

No complexo industrial e laboratorial instalado no interior do estado de São Paulo, o sistema elétrico está dimensionado para o atendimento dos diversos empreendimentos industriais e laboratoriais existentes e também futuros. A subestação principal da empresa recebe a energia elétrica na classe de tensão de

88 kV, abaixando para a tensão de 13,8 kV e distribuindo a energia através de circuitos aéreos e subterrâneos, dependendo da classificação da unidade alimentada. Nas unidades industriais ou laboratoriais a tensão é novamente abaixada nas subestações individuais para as tensões industriais de 440, 380, 220 e 127 Volts, alimentando painéis, centros de controle de motores e outros sistemas para alimentação das cargas das unidades. As unidades com a classificação prioritária estão equipadas com sistemas de geração de emergência para garantia do suprimento de energia elétrica das cargas emergenciais.

Neste contexto o desenvolvimento do trabalho será realizado, considerando como foco inicial a aplicação da manutenção preditiva fundamentada na termografia infravermelha nos equipamentos dos sistemas elétricos instalados em locais abrigados, para fundamentar os conhecimentos e desenvolvimento da técnica e posteriormente estender a aplicação para sistemas instalados em locais desabrigados, sendo esta ultima objeto de estudo futuro.

3. Revisão da Literatura

3.1 Histórico da Manutenção

O termo manutenção na literatura especializada, tem origem no vocabulário militar, cujo sentido é manter, nas unidades de combate, o efetivo e o material em um nível constante. Já a definição sobre ‘manter’ é indicada, em vários dicionários, como causar continuidade ou reter o estado atual. Isto sugere que manutenção significa preservar algo. A esse respeito, Monchy (1989) apresenta a conceituação da Associação Francesa de Normalização, na qual a “manutenção é o conjunto de ações que permitam manter ou restabelecer um bem, dentro de um estado específico ou na medida para assegurar um serviço determinado”.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, na norma TB-116 de 1975, definia manutenção como o conjunto de todas as ações necessárias para que um item seja conservado ou restaurado de modo a poder permanecer de acordo com uma condição especificada. Já em uma versão revisada de 1994, designada NBR-5462, a manutenção é indicada como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida.

De um modo mais abrangente, o termo manutenção engloba os conceitos de prevenção (manter) e correção (restabelecer). Sendo assim, o estado específico ou serviço determinado implica na predeterminação do objetivo esperado, com quantificação dos níveis característicos. Monchy (1989) comenta ainda sobre a lacuna deixada por grande parte das definições, ao não fazerem referência ao aspecto econômico envolvido na realização de uma manutenção eficiente, que deveria assegurar que suas atividades conduzissem a um custo global otimizado.

Sobre o assunto, cabe também observar o posicionamento de Moubray (2000). Para o autor, ‘manter’ significa continuar em um estado existente, ou seja, a manutenção

é o conjunto de técnicas de atuação para que os ativos físicos (equipamentos, sistemas, instalações) cumpram ou preservem sua função ou funções específicas.

Em termos gerais, se pode afirmar que as causas e os efeitos das falhas merecem atenção especial e permanente, assim como o desenvolvimento de ações pró-ativas, com vistas a minimizar a ocorrência e as consequências das falhas, caso ocorram. O paradigma de que o aumento da produção depende de mais e melhores equipamentos, remonta à época da Revolução Industrial. Ao introduzir a preocupação extrema com a tarefa e a padronização dos métodos e procedimentos operacionais, Taylor confirmou essa premissa. Fayol, na seqüência, apresentou seus estudos com ênfase na estrutura e no processo. Somente mais tarde, no início da década de 30, surge a preocupação com a variável humana como elemento crítico no processo produtivo (Ferreira, 2000).

Como pode ser observado, existem muitas definições e conceitos apresentados para o termo 'manutenção'. Na maioria dos casos são enfocados os aspectos de prevenção do estado de funcionamento e a recuperação, no caso da ocorrência de falhas. Além disso, constata-se que, mais recentemente, os aspectos de custos e a dimensão humana das equipes de manutenção têm sido crescentemente considerados nessas definições.

A partir da Segunda Guerra Mundial teve origem a evolução das técnicas aplicadas na condução da manutenção. A indústria era predominantemente artesanal, naquela época, não se creditando qualquer importância à prevenção das falhas, uma vez que a estratégia de manutenção era considerada como conserto após a avaria. Ao mesmo tempo, a maioria dos equipamentos era simples e muitos deles sobre dimensionados, apresentando facilidade de reparo e alguma confiabilidade. Neste contexto, não havia necessidade de manutenção sistematizada, nem raramente era requerido pessoal especializado para a sua execução.

Com o aumento da mecanização na década de 50, após a Segunda Guerra Mundial, as indústrias passaram a depender cada vez mais das máquinas, que começaram a se multiplicar e modificar em tipo, quantidade e complexidade. Desse modo, prevenir a eventual paralisação das máquinas tornou-se cada vez mais relevante. Ainda de acordo com Moubray (2000), já nos anos 60, a manutenção consistiu basicamente

de revisões gerais dos equipamentos executados em intervalos definidos. Segundo alguns autores, nesse período, começaram a ser estruturados o conceito de 'manutenção preventiva'. O custo passou a ser um fator a exigir uma nova postura da gestão da manutenção. Este se tornou representativo frente aos demais custos operacionais. Os sistemas de planejamento e controle surgiram nesse momento, visando um melhor controle das ações de manutenção, desde aquela época indispensável para a eficácia de um processo de manutenção. Os primeiros sistemas informatizados foram esboçados e com o advento do computador, tornaram-se realidade.

No início da década de 70, a quantidade de capital investido em reparos e o custo do próprio capital direcionaram as ações objetivando o aumento da vida útil dos equipamentos e das instalações. Essa preocupação que se transformou na base para o desenvolvimento de novas técnicas de manutenção, nessa oportunidade, suportadas por computadores de grande porte.

As grandes transformações no setor tecnológico e industrial exigiram uma atenção muito mais intensa aos efeitos dos períodos de paralisação da produção, por exemplo, em face da tendência mundial de se trabalhar com estoques reduzidos. Associado a isso, a complexidade cada vez maior dos equipamentos, com a aceleração da automação, transformou a confiabilidade e a disponibilidade em fatores de importância para o desempenho operacional, refletidos diretamente nas atividades de manutenção. Os padrões de qualidade, tanto nos serviços quanto nos produtos, passaram a ser extremamente exigentes e a análise das falhas e de suas consequências para a segurança e o meio-ambiente, podem representar até mesmo a garantia de sobrevivência das empresas, tamanha é a vigilância e a cobrança da sociedade. O aspecto econômico deve ainda ser enfocado, considerando-se o compromisso com o retorno do capital investido, com montantes cada vez maiores e escassos. A evolução histórica da manutenção e dos processos industriais é abordada por Moubray (2000) com base em três gerações distintas. A primeira geração representou a ênfase no conserto após a falha. A segunda geração, por sua vez, esteve associada ao surgimento de maiores exigências com relação à disponibilidade operativa e a vida útil dos equipamentos, a custos menores. Já a terceira geração, que se refere aos tempos atuais, diz respeito aos requisitos

característicos, como: maior disponibilidade, confiabilidade, segurança e vida útil, com ausência de danos ao meio-ambiente e ações de manutenções eficazes, aliadas aos custos envolvidos.

Assim sendo, se pode afirmar que toda evolução tecnológica dos equipamentos, processos e técnicas de manutenção, o desenvolvimento de estudos relativos ao desgaste e controle das falhas e suas consequências, as necessidades de controles mais eficientes e de ferramentas de apoio à tomada de decisão, a dependência de equipes treinadas e motivadas para enfrentar os desafios, o desenvolvimento de novas técnicas e, consequentemente, os custos de manutenção e proporcionalmente as despesas globais, transformaram as áreas de manutenção em uma função estratégica para o sucesso empresarial. Cabe considerar também que a falha pode ocorrer, a despeito dos esforços no sentido de prevenir sua ocorrência, ou seja, em tese, se não existissem falhas não haveria manutenção. Desta forma, a tecnologia de manutenção deve ser desenvolvida para identificar as possíveis falhas, além de gerenciar suas consequências, com técnicas economicamente adequadas a serem aplicadas em cada situação específica.

3.2 Histórico da Termografia

Há menos de 200 anos, nem sequer se suspeitava da existência da porção de infravermelho no espectro eletromagnético. O significado original do espectro de infravermelho, ou simplesmente infravermelho, como é usualmente conhecido, como forma de radiação térmica é talvez menos óbvio atualmente do que na data de sua descoberta por Herschel em 1800.

A tecnologia aplicada à termografia teve seu início com a descoberta da radiação infravermelha pelo alemão Friedirich Wilhelm Herschel, mais conhecido por Sir Willian Herschel, astrônomo do rei inglês, George III. Sua descoberta foi obra do acaso, durante a procura de um novo material óptico para reduzir o brilho da imagem do Sol nos telescópios, durante as observações solares. Ao testar várias amostras

de vidro de cor que permitiam reduções semelhantes do brilho, ficou intrigado quando observou que algumas das amostras deixavam passar mais calor que outras. Com auxílio de um prisma e três termômetros de mercúrio com os bulbos pintados de preto, mediu a temperatura das várias componentes de cor da luz do sol refratados através do prisma e incididos em um anteparo. Observou um aumento da temperatura da cor violeta para a cor vermelha e também notou que o maior pico de temperatura ocorria na região escura, além do vermelho. Este resultado não era totalmente inesperado, uma vez que o cientista italiano Marsilio Landrini já tinha observado o efeito semelhante durante uma experiência realizada em 1777, (Flir Systems, 2008). Desta forma concluiu que existia luz invisível aquecendo os termômetros naquela região. Sendo assim deu o nome de Espectro Termométrico e à radiação o nome de Calor Negro. Mais tarde essa região do espectro eletromagnético passou a ser chamada de Região Infravermelha e a radiação, de Radiação Infravermelha, (Richards, 2001).

John Frederick William Herschel, filho de Sir William Herschel, quarenta anos mais tarde produziu a primeira imagem térmica e a registrou em papel, no qual deu o nome de termograma. Samuel Pierpont Langley, em 1880 inventou o bolômetro que foi aperfeiçoado por Charles Greeley Abbot. O bolômetro nada mais é do que um detector térmico que consiste de uma ponte de Wheatstone, na qual é conectada a um dos seus braços uma tira fina e enegrecida, cuja condutividade elétrica varia quando aquecida com a incidência das radiações infravermelhas. Com esse bolômetro foi possível detectar o calor emitido por uma vaca a uma distância de aproximadamente 400 metros, (Flir Systems, 2008).

O marco na evolução dessa tecnologia ocorreu em 1917, quando Case, desenvolveu o primeiro fotodetector, dispositivo baseado na interação direta entre os fôtons da radiação incidente com os elétrons do material e cuja sensibilidade e tempo de resposta eram superiores às do bolômetros, (Maldaque & Moore, 2001).

Mas o grande desenvolvimento da termografia foi resultado do interesse militar que já na I guerra mundial desenvolvia sistemas infravermelhos e durante a II Guerra Mundial obteve grandes avanços no desenvolvimento da visão noturna, mísseis guiados pelo calor e do primeiro “scanner” de linha. Segundo Holst (2000), até 1954

uma câmera térmica levava 45 minutos para criar uma imagem e só em meados da década de 60 é que foi lançada a primeira câmera de tempo real, ocasião em que se iniciou a comercialização de câmeras térmicas.

Na década de 70 chegaram ao Brasil os primeiros equipamentos de termografia, sendo as empresas do setor elétrico as pioneiras na sua aplicação. Nessa época, as câmeras térmicas empregavam detectores resfriados a nitrogênio líquido, sistemas de varredura óptico/mecânico para formar as imagens térmicas e a temperatura dos objetos inspecionados eram obtidos através de cálculos, (Santos et al, 2005).

Os avanços na tecnologia foram observados de 1970 até os nossos dias, como pode ser visto na Figura 1.

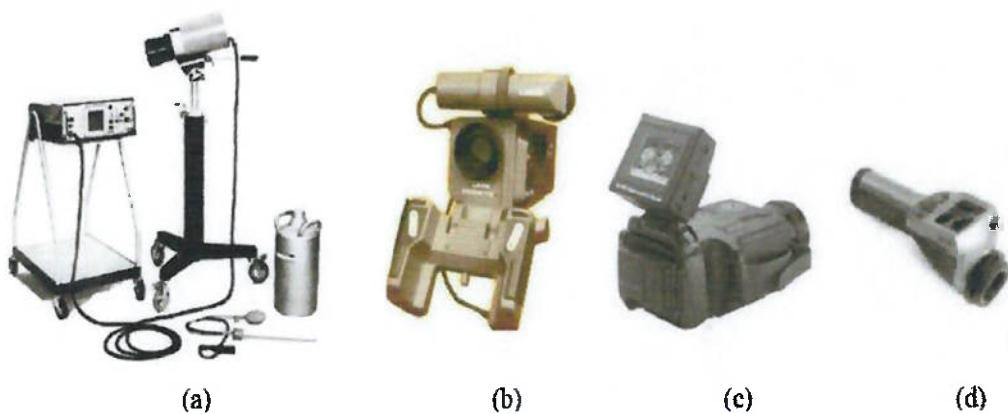


Figura 1 – Evolução das câmeras térmicas de 1970 até os nossos dias.

- a) Detector resfriado a nitrogênio líquido, sistema de varredura óptico/mecânico, peso total de 37 kg.
- b) Detector resfriado eletricamente, sistema de varredura óptico/mecânico, peso de 6,1 kg.
- c) Detector não resfriado, FPA (Focal Plane Array), peso de 2,7 kg.
- d) Detector não resfriado, FPA (Focal Plane Array), peso de 0,7 kg

Detectores de resfriamento criogênico evoluíram para resfriados eletricamente e em seguida para detectores sem resfriamento. Os sistemas de varredura óptico/mecânicos foram substituídos pela tecnologia de FPA (Focal Plane Array), o peso que nos anos 70 chegava próximo dos 40 kgf diminuiu para menos de 1 kgf, as leituras de temperatura passaram a ser mostradas diretamente no monitor da câmera e a sensibilidade térmica aumentou consideravelmente. Atualmente as câmeras térmicas são portáteis, podem ser conectadas ao computador e possuem

"softwares" para análise das imagens, facilitando ainda mais a aplicação da termografia em sistemas elétricos, (Santos et al, 2005).

A câmera utilizada no desenvolvimento do trabalho é de fabricação Flir Sistems, modelo T-200, com as características a saber: Faixas de medição: - 20 °C a 350 °C, com opcional até 1200 °C, Resolução Térmica: 0,08 °C a 30 °C; Detector de Matriz de Plano Focal: 320 x 240, conforme Figura 2.



Figura 2 – Câmeras Modelo Série T – Flir Sistems.

3.3 Revisão da Literatura

Com o avanço da tecnologia dos equipamentos aplicados na medição da radiação infravermelha, a velocidade na capacidade de redução no tamanho dos equipamentos, a tecnologia dos componentes eletrônicos, resultando em medidas em tempo real e o advento dos detectores mais sofisticados, os Termovisores tornaram-se mais fáceis de usar, aumentando o interesse pela aplicação da termografia infravermelha. Mesmo com a facilidade de utilização dos termovisores existe a necessidade de que a aplicação se proceda de forma correta nos sistemas elétricos. Algumas organizações internacionais, com o propósito de estabelecer procedimentos de inspeção padronizados, criaram normas referentes à termografia infravermelha. Dentre essas normas estabelecidas, algumas das mais difundidas são:

- *MIL-STD-2194 – Military Standard Infrared Thermal Imaging Survey Procedure for Electrical Equipment* elaborada pela *United States Navy*.
- *NETA MTS – Maintenance Testing Specification for Electrical Power Distribution Equipment and Systems* da *International Electrical Testing Association – NETA*.
- *TTCTTRAN.015 – Guidelines for Thermographic Inspection in Electrical Installations* desenvolvido pelo *Danish Technology Institute*.
- *E1934 – Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography* desenvolvido pela *American Society Testing and Material – ASTM*.

Uma comissão de estudos foi criada em 2005, dentro do Organismo de Normalização Setorial, credenciado pela ABNT, para tratar da elaboração das Normas Brasileiras de Termografia. Como resultado inicial apresentado a ABNT NBR 15424 - Ensaios não destrutivos – Termografia - Terminologia que foi elaborada no Organismo de Normalização Setorial de Ensaios Não Destrutivos (ABNT/ONS-58), pela Comissão de Estudo de Termografia (CE - 58:000.11). O projeto circulou em consulta nacional conforme a partir de 03.07.2006, com o número de Projeto 58:000.11-001, e válida a partir de 30.11.2006, (Santos, 2006).

3.3.1 Teorias envolvidas

A termografia é aplicada em sistemas elétricos com o propósito de analisar a distribuição térmica e medir temperaturas dos equipamentos e conexões através da detecção da radiação infravermelha, desta forma é de fundamental importância a revisão dos conceitos envolvidos nesse processo como: calor, temperatura e dos métodos de transferência de calor. Uma ênfase especial para a teoria da radiação.

3.3.1.1 Calor

Todo corpo tem certa quantidade de energia interna que está relacionada ao movimento aleatório de seus átomos ou moléculas. Essa energia interna é diretamente proporcional à temperatura do objeto. Quando dois corpos ou fluidos em diferentes temperaturas entram em interação (por contato, ou radiação), eles trocam energia interna até a temperatura de equilíbrio, essa transferência ocorre da região mais quente para a mais fria. A quantidade de energia transferida é a quantidade de calor trocado, se o sistema for isolado de outras formas de transferência de energia. Desta forma, o calor é um fenômeno transitório que encerra quando não existe mais diferença de temperatura, (Holst, 2000).

3.3.1.2 Temperatura

A Temperatura é um parâmetro físico (uma função de estado) descritivo de um sistema que vulgarmente se associa às noções de frio e calor, bem como às transferências de energia térmica, mas que se poderia definir, mais exatamente, sob um ponto de vista microscópico, como a medida da energia cinética associada ao movimento (vibração) aleatório das partículas que compõem um dado sistema físico.

A temperatura é devida à transferência da energia térmica, ou calor, entre dois ou mais sistemas. Quando dois sistemas estão na mesma temperatura, eles estão em equilíbrio térmico e não há transferência de calor. Quando existe uma diferença de temperatura, o calor será transferido do sistema de temperatura maior para o sistema de temperatura menor até atingir um novo equilíbrio térmico.

A temperatura está ligada à quantidade de energia térmica ou calor num sistema. Quanto mais se junta calor a um sistema, mais a sua temperatura aumenta. Ao contrário, uma perda de calor provoca um abaixamento da temperatura do sistema. Na escala microscópica, este calor corresponde à agitação térmica de átomos e

moléculas no sistema. Assim, uma elevação de temperatura corresponde a um aumento da velocidade de agitação térmica dos átomos.

Se dois objetos estão em equilíbrio térmico com um terceiro objeto, então eles estão em equilíbrio térmico um com o outro. Como consequência disso, existe certo atributo de estado que descreve os estados termodinâmicos dos objetos que estão em equilíbrio um com o outro, sendo denominado de temperatura, (Chrzanowski, 2001).

3.3.1.3 Transferência de calor

Transmissão de calor é a denominação dada à passagem da energia térmica (que durante a transferência recebe o nome de calor) de um corpo para outro ou de uma parte para outra de um mesmo corpo. Essa transmissão pode se processar através de três mecanismos: condução, convecção e radiação. É necessário o entendimento dos mecanismos físicos que permitem a transferência de calor de modo a poder quantificar a quantidade de energia transferida na unidade de tempo (taxa). Os mecanismos são:

- Condução: depende somente de um Δt ;
- Radiação: depende somente de um Δt ;
- Convecção: depende somente de um Δt e transporte de massa.

3.3.1.3.1 Condução

A condução pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto. Este mecanismo pode ser visualizado como a transferência de energia de partículas mais

energéticas para partículas menos energéticas de uma substância devido a interações entre elas.

Na condução a passagem da energia de uma região para outra se faz da seguinte maneira: na região mais quente, as partículas têm mais energia, vibrando com mais intensidade; com esta vibração cada partícula transmite energia para a partícula vizinha, que passa a vibrar mais intensamente; esta transmite energia para a seguinte e assim sucessivamente. A condução de calor é um processo que exige a presença de um meio material e que, portanto, não ocorre no vácuo. Como ilustração pode ser observada a figura 3.

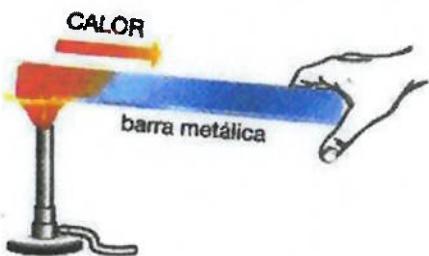


Figura 3 - Condução.

Para os líquidos o processo é basicamente o mesmo, embora as moléculas estejam menos espaçadas e as interações sejam mais fortes e mais freqüentes. Para os sólidos existem basicamente dois processos (ambos bastante complexos):

- Sólido mau condutor de calor: ondas de vibração da estrutura cristalina;
- Sólido bom condutor de calor: movimento dos elétrons livres e vibração da estrutura cristalina.

3.3.1.3.2 Convecção

A convecção pode ser definida como o processo pelo qual energia é transferida das porções quentes para as porções frias de um fluido através da ação combinada de: condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura.

Supondo um recipiente, com água, colocado sobre uma chama, à camada de água do fundo do recipiente recebe calor da chama por condução. Conseqüentemente, o volume desta camada aumenta, logo, sua densidade diminui então esta se desloca para a parte superior do recipiente sendo substituída por água mais fria e mais densa, proveniente da região superior. Esse processo continua com uma circulação contínua de corrente de água mais quente para cima e mais fria para baixo, o qual se denomina correntes de convecção, que são mostradas na figura 4.



Figura 4 - Convecção

3.3.1.4 Radiação

A radiação pode se definida como o processo pelo qual calor é transferido de uma superfície em alta temperatura para uma superfície em temperatura mais baixa quando tais superfícies estão separadas no espaço, ainda que exista vácuo entre elas. A energia assim transferida é chamada radiação térmica e é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas. O exemplo clássico é o próprio calor sol. Neste caso, mesmo havendo vácuo entre a superfície do sol e a superfície da terra, a vida na terra depende desta energia recebida. Esta energia chega na forma de ondas eletromagnéticas. As ondas eletromagnéticas são comuns a muitos outros fenômenos: raio-X, ondas de rádio e TV, microondas e outros tipos de radiações. As emissões de ondas eletromagnéticas podem ser atribuídas a variações das configurações eletrônicas dos constituintes de átomos e moléculas, e ocorrem devido a vários fenômenos, porém, para a transferência de calor interessa apenas

as ondas eletromagnéticas resultantes de uma diferença de temperatura (radiações térmicas). As suas características são:

- Todos os corpos em temperatura acima do zero absoluto emitem continuamente radiação térmica;
- As intensidades das emissões dependem somente da temperatura e da natureza da superfície emitente;
- A radiação térmica viaja na velocidade da luz (300.000 Km/s). É o processo de transmissão de calor através de ondas eletromagnéticas (ondas de calor).

Sendo uma transmissão de calor através de ondas eletromagnéticas, a radiação não exige a presença do meio material para ocorrer, isto é, a radiação ocorre no vácuo e também em meios materiais. Entretanto, não são todos os meios materiais que permitem a propagação das ondas de calor através deles. Toda energia radiante, transportada por onda de rádio, infravermelha, ultravioleta, luz visível, raios-X e raios gama, pode converter-se em energia térmica por absorção. Porém, só as radiações infravermelhas são chamadas de ondas de calor, que pode ser ilustrado conforme figura 5.

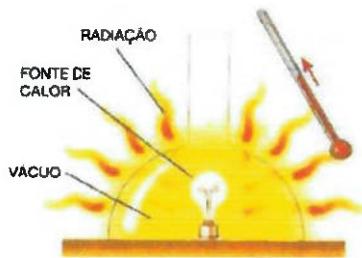


Figura 5 – Radiação

3.3.1.4.1 Radiação Eletromagnética

A transmissão de energia na forma de ondas, contendo um componente elétrico e outro magnético, por ser produzida pela aceleração de uma carga elétrica em um campo magnético. O espectro da radiação eletromagnética engloba a luz visível, os

raios gama, as ondas de rádio, as microondas, os raios x, ultravioleta, infravermelho. Esses nomes indicam áreas do espectro divididas com fins didáticos e práticos, pois o espectro é contínuo e não há diferenças abruptas entre as formas de radiação e todas são basicamente os mesmos fenômenos físicos. Por exemplo, todas se irradiam pelo espaço com a mesma velocidade, conhecida como "velocidade da luz", de cerca de 300 mil km/s. As diferenças estão no comprimento das ondas e na freqüência da radiação, que fazem com que tenham diferentes características, como o poder de penetração dos raios X ou o aquecimento do infravermelho. Uma fonte de radiação, como o Sol, pode emitir luz dentro de um espectro variado. A natureza da radiação foi um mistério para os cientistas durante muito tempo. No final do século XIX, Maxwell propôs que essa forma de energia viaja pelo espaço na forma de um campo oscilatório composto por uma perturbação elétrica e magnética na direção perpendicular às perturbações.

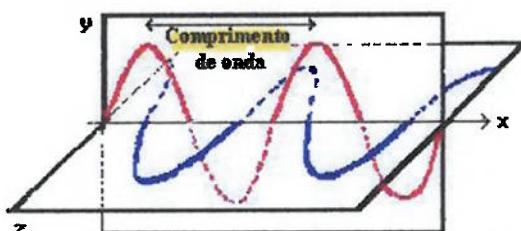


Figura 6 - Campo oscilatório

Na figura 6, podem ser observadas as oscilações no campo elétrico (vermelho); campo magnético (azul), que são ortogonais entre si - o campo elétrico fica no plano xy; o magnético no plano xz. A onda está viajando na direção x. Uma onda eletromagnética pode ser definida em termos de sua freqüência de oscilação, designada pela letra grega nu (ν). A onda se move em linha reta com uma velocidade constante (a velocidade da luz, c); a distância entre picos sucessivos é o comprimento da onda, λ , que é igual à sua velocidade dividida pela sua freqüência.

$$\lambda = c / \nu \quad (1)$$

O espectro eletromagnético cobre um intervalo enorme em comprimentos de onda, de comprimentos muito pequenos a comprimentos muito grandes. Veja a figura 7 abaixo.

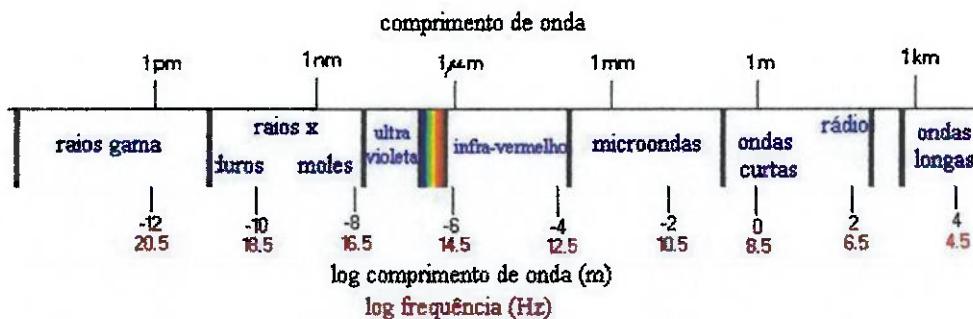


Figura 7 - Comprimento de onda

A única região do espectro que é visível aos olhos é a região do "visível", identificado pelas cores do arco-íris. O sol não é o único objeto que produz energia de radiação, pois qualquer objeto que estiver a temperatura maior do que 0º K irá emitir alguma radiação.

3.3.1.4.2 Radiação Térmica

A radiação térmica corresponde à fração de energia cujas características dependem somente da temperatura do corpo emissor. O grande desafio para os cientistas foi descobrir como relacionar a energia de radiação com a temperatura de um objeto.

Se um objeto for colocado em um recipiente cujas paredes estiverem a temperatura uniforme, esperamos que o objeto entre em equilíbrio térmico com as paredes do recipiente e que o objeto passe a emitir uma radiação parecida com a das paredes do recipiente. Tal objeto absorve e irradia a mesma quantidade de energia. Mas, uma superfície perfeitamente negra absorve toda a radiação incidente sobre ela e deve irradiar da mesma forma, se estiver em equilíbrio térmico. A radiação térmica em equilíbrio é então chamada de radiação do corpo negro.

A primeira relação entre temperatura e energia de radiação foi deduzida por J. Stefan em 1884 e explicada teoricamente por Boltzmann na mesma época.

Ela nos diz que:

$$\text{Energia total} = \sigma T^4 \quad (2)$$

Onde a energia total emitida pelo corpo negro é dada por unidade de área e por segundo, T é a temperatura absoluta (termodinâmica) e σ é a constante de Stefan-Boltmann.

A grande questão no início do século era explicar como esta energia radiante total emitida pelo corpo negro era distribuída entre as várias freqüências ou comprimentos de onda da radiação. A teoria clássica de osciladores eletromagnéticos, de J. C. Maxwell falhou na explicação da distribuição observada da radiação.

Max Planck desenvolveu uma fórmula concordante com os resultados experimentais introduzindo uma hipótese: o movimento térmico dos átomos e das moléculas, responsável pela geração das ondas eletromagnéticas, pode oscilar livremente em qualquer freqüência, mas a emissão de radiação decorrente dessa oscilação se dá de forma descontínua, ou seja, através de pulsos, chamados quanta e a energia emitida por eles é proporcional a freqüência de oscilação das partículas, na forma:

$$E=h.f \quad (3)$$

Onde: E [J] é a energia.

h [J.s] é a constante de Planck.

f [Hz] é a freqüência de oscilação.

Com essa hipótese, Planck deduziu a distribuição da radiação luminosa de um corpo negro e mostrou como ela varia com o comprimento de onda para uma dada temperatura.

A dedução de Planck também pode ser usada de forma inversa: dada certa distribuição de intensidade da luz emitida por um corpo negro, a lei de Planck pode ser usada para calcular a sua temperatura, comparando a forma da distribuição com a curva de Planck.

As curvas ilustradas na figura 8 mostram que quanto mais quente for um corpo, maior será sua luminosidade a pequenos comprimentos de onda. A superfície do sol tem uma temperatura de 6000 K, e a curva de Planck possui um pico na região do visível. Para corpos mais frios do que o sol o pico da curva de Planck se desloca

para comprimentos de onda maiores, até que se chega a uma temperatura tal que muito pouca radiação é emitida na região do visível.

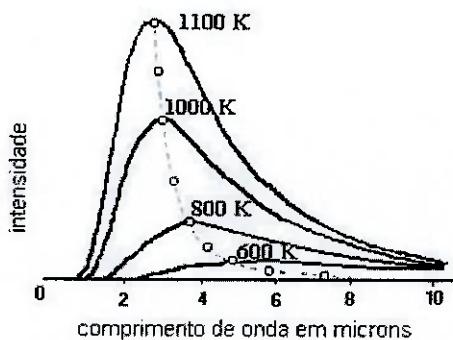


Figura 8 - Curva de Planck

Na figura 8, a linha tracejada representa o lugar geométrico da intensidade de radiação máxima para diferentes temperaturas, de acordo com a lei do deslocamento de Wien, que é a variação com a temperatura do comprimento de onda em que a intensidade é máxima.

A análise espectroscópica revelou que as intensidades das radiações térmicas variam como mostradas na figura 8. Existe um pico máximo de emissão para um determinado comprimento de onda (I_{\max}) cuja posição é função da temperatura absoluta do emissor (radiador).

Esta é uma representação gráfica da lei de Wien, que diz:

$$I_{\max} \sim 0.29/T \quad (4)$$

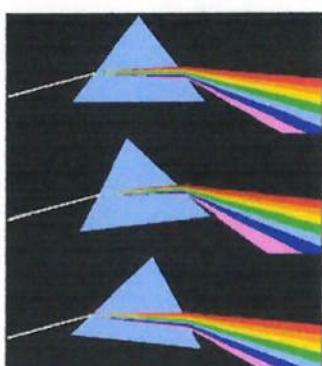
Onde, I_{\max} é o comprimento de onda máximo da radiação em cm, e T é a temperatura absoluta do corpo negro.

O corpo humano possui uma temperatura de cerca de 310 K e irradia basicamente no infravermelho longo.

A taxa de emissão de radiação por uma superfície é proporcional à área da superfície, aumenta com a quarta potência da temperatura absoluta do corpo e depende da natureza da superfície do corpo.

3.3.1.4.3 Espectro Visível

Espectro visível (ou espectro óptico) é a porção do espectro eletromagnético cuja radiação pode ser captada pela vista humana. Identifica-se esta radiação como sendo a luz visível, ou simplesmente luz. Esta faixa do espectro situa-se entre a radiação infravermelha e a ultravioleta. Para cada freqüência da luz visível é associada uma cor, que pode ser observado na figura 9.



Cor	Comprimento de onda	Freqüência
vermelho	~ 625-740 nm	~ 400-405 THz
laranja	~ 590-625 nm	~ 510-480 THz
amarelo	~ 565-590 nm	~ 530-510 THz
verde	~ 500-565 nm	~ 600-530 THz
ciano	~ 485-500 nm	~ 620-600 THz
azul	~ 440-485 nm	~ 680-620 THz
violeta	~ 380-440 nm	~ 790-680

Figura 9 - Decomposição da luz branca e cores do espectro visível

Isaac Newton (1642-1727), físico, matemático e astrônomo inglês, formulou vários princípios. Entre os mais importantes está a decomposição da luz solar no espectro, e os anéis coloridos da luz solar no espectro. Com seus estudos da óptica, formula sua teoria das cores, a partir de experiências com a decomposição da luz branca em prismas, demonstrando que essa não era simples e homogênea como se acreditava desde Aristóteles, e que as cores primárias, azul, amarelo e vermelho, não sofrem decomposição.

Newton fez passar um raio de luz solar através de um prisma de vidro, gerando um espectro de cores vermelho amarelo, azul, verde e violeta, na parede oposta, mostrando que este espectro era muito longo para ser explicado pela teoria da refração da luz então utilizada. Segundo essa teoria, todo raio de luz branca que atravessasse um prisma pelo mesmo ângulo seria refratado igualmente.

Newton mostrou que na verdade a luz branca é uma mistura de diversos tipos de raios, os quais são refratados em ângulos ligeiramente diferentes, e que cada diferente tipo de raio é responsável por certa cor no espectro.

3.3.1.5 Corpo Negro

Um dos fenômenos mais intrigantes estudados no final do século XIX era o da distribuição espectral da radiação do corpo negro. Um corpo negro consiste num objeto que absorve toda a radiação de que é alvo, em qualquer comprimento de onda. A aparente utilização imprópria de negro para um objeto que emite radiação é explicada pela Lei de Kirchhoff (segundo Gustav Robert Kirchhoff), que determina que um corpo capaz de absorver toda a radiação em qualquer comprimento de onda é igualmente capaz na emissão de radiações, exemplificado na figura 10. Um corpo negro é um sistema ideal que absorve toda a radiação que nele incide.

Na prática ele pode ser materializado por uma cavidade com uma abertura muito pequena, como por exemplo, os fornos de uma indústria siderúrgica. As características da radiação desta cavidade dependem somente da temperatura das paredes do radiador. Nas temperaturas ordinárias (abaixo de 600°C), a radiação térmica emitida por um corpo negro não é visível, pois a energia está concentrada na região do infravermelho do espectro eletromagnético. Quando o corpo negro é aquecido a quantidade de energia irradiada aumenta com a quarta potência da temperatura e a concentração de energia se desloca para os comprimentos de ondas menores.

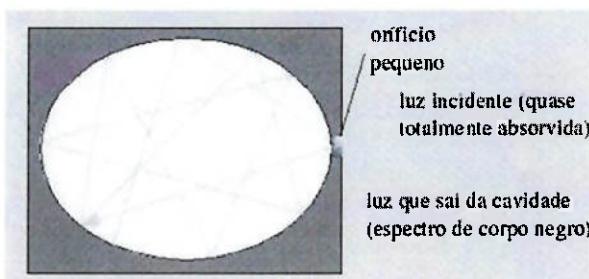


Figura 10 - Corpo Negro

3.3.1.6 Emissividade

A emissividade de um corpo é definida como sendo a razão da radiação emitida por este corpo em relação à radiação emitida por um corpo negro. Deste modo, a emissividade de um corpo negro é definida como numericamente igual a 1 (emissor perfeito). E, como todos os corpos não-negros irão emitir menos radiação do que um corpo negro, suas emissividades sempre serão menores que 1. Por outro lado, a emissividade será igual a 0 quando o corpo for um refletor perfeito. A emissividade é uma propriedade que deve ser determinada empiricamente para cada objeto.

Em outras palavras a emissividade é a habilidade de um objeto em emitir energia infravermelha e a energia emitida indica a temperatura de um objeto.

Emissividade espectral normal $\epsilon(\lambda, T)$: É a emissividade do corpo associada um dado comprimento de onda λ à temperatura T .

Quando a radiação atinge um corpo qualquer, podem ocorrer fenômenos tais como: uma fração " α " da radiação pode ser absorvida; uma fração " ρ " da radiação pode ser refletida e uma fração " τ " da radiação pode ser transmitida.

Somando-se os três coeficientes, para um mesmo comprimento de onda, tem-se:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (5)$$

Na Figura 11, tem-se a absorção, reflexão e transmissão da energia incidente em um corpo.

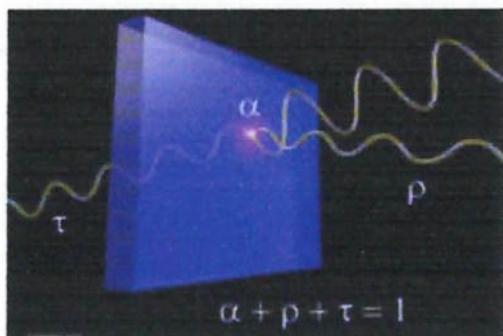


Figura 11 - Absorção, reflexão e transmissão

De acordo com a *Lei de Kirchhoff* existe uma igualdade entre a capacidade de um corpo em absorver a energia incidente e sua capacidade de remitir, em um mesmo comprimento de onda. Chama-se a esta última de emissividade (ϵ), a qual pode ser definida como sendo a relação entre a energia irradiada, em um dado comprimento de onda, por um corpo qualquer e um corpo negro à mesma temperatura.

$$\alpha = \epsilon \quad (6)$$

Corpo Negro, ou irradiador ideal, é um corpo que emite e absorve, a qualquer temperatura, a máxima quantidade possível de radiação em qualquer comprimento de onda. O irradiador ideal é um conceito teórico que estabelece um limite superior de radiação de acordo com a segunda lei da termodinâmica. É um conceito teórico padrão com o qual as características de radiação dos outros meios são comparadas. Esse corpo possui emissividade igual a "1", e também irradia o máximo de energia possível. Este corpo apresenta refletividade e transparência iguais à zero.

Por ser um fenômeno essencialmente de superfície, a emissividade é muito afetada pela textura dos materiais.

Para um mesmo material quanto mais lisa for a superfície menor será o seu valor de emissividade, porém quanto mais rugosa ou oxidada esta se apresentar maior será sua emissividade (Ferreira, 2002).

A emissividade também pode variar com o comprimento de onda. Em geral são classificados três tipos de corpos que são diferenciados pelo modo como sua emissividade varia com o comprimento de onda.

Corpo Cinzento é o corpo cuja energia emitida ou absorvida é uma fração da energia emitida ou absorvida por um corpo negro. As características de radiação dos corpos cinzentos se aproximam das características dos corpos reais, como mostra esquematicamente a figura 12.

- Corpo Negro: Emissividade constante e igual a 1 (corpo teórico);
- Corpo Cinza: Emissividade constante e menor que 1 (corpo teórico);
- Radiador Seletivo: Emissividade varia ao longo do espectro (corpo mais real).

O corpo humano é um ótimo exemplo de radiador seletivo, pois apresenta emissividades variáveis ao longo do espectro visível, quando se refere à cor da pele,

e outra o espectro infravermelho, onde todos os seres humanos apresentam a alta emissividade ($\epsilon=0,97$) devido à água existente na pele humana.

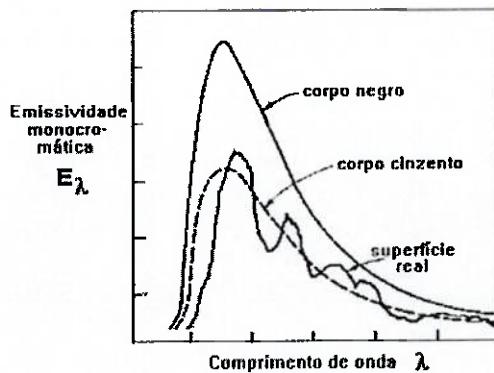


Figura 12- Curva da distribuição espectral de fontes de radiação.

Emissividade é a relação entre o poder de emissão de um corpo real e o poder de emissão de um corpo negro.

$$\varepsilon = \frac{E_c}{E_n} \quad (7)$$

Onde, E_c = poder de emissão de um corpo cinzento.

E_n = poder de emissão de um corpo negro.

Para os corpos cinzentos a emissividade (ε) é sempre menor que 1. Pertencem à categoria de corpos cinzentos a maior parte dos materiais de utilização industrial, para os quais em um pequeno intervalo de temperatura pode-se admitir a emissividade constante e tabelado em função da natureza do corpo. Para os metais, em virtude de suas características atômicas, isto não ocorre. Entretanto, para pequenos intervalos de temperatura, as tabelas fornecem valores constantes de emissividade aplicáveis aos metais.

3.3.1.7 Considerações sobre a Termografia

A termografia por infravermelho é a técnica que através de captação da radiação térmica emitida naturalmente pelos corpos, permite a formação de imagens térmicas (termogramas), e a medição da temperatura do alvo em tempo real.

Pelo fato de ser a temperatura a principal variável detectável no processo de falha de uma instalação elétrica, é onde está concentrada a maior aplicação da termografia na área industrial. Uma inspeção termográfica em instalações elétricas identificará problemas causados pelas relações corrente/ resistência, normalmente provocados por conexões frouxas, corroídas, oxidadas ou por falhas do componente em si. Além disto, erros de projeto, falhas em montagens e até o excesso e/ou falta de manutenções preventivas podem provocar sobre aquecimento nos sistemas elétricos.

Todos os objetos acima do zero absoluto (0 K ou - 273,16° C) emitem radiação térmica devido à agitação térmica de átomos e moléculas dos quais são constituídos. Quanto maior essa agitação, mais quente se encontra o objeto e mais radiação ele emite.

A radiação térmica pode ser emitida nas faixas de ultravioleta, visível, infravermelho e até na faixa de microondas do espectro eletromagnético, que pode ser observado na figura 13. Entretanto para temperaturas típicas encontradas na Terra, a maior parte da radiação é emitida dentro da faixa de infravermelho. Assim sendo, as câmeras térmicas (termovisores) são fabricadas com detectores que respondem a essa faixa do espectro.

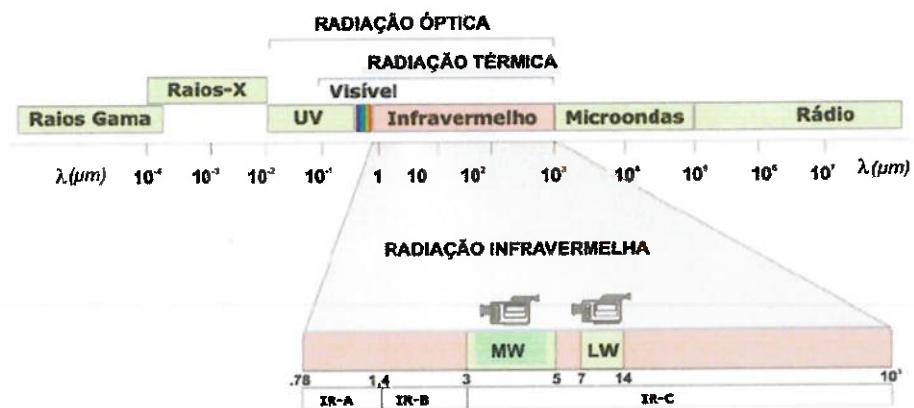


Figura 13 – Espectro eletromagnético e as faixas nas quais são fabricados os termovisores para sistemas elétricos.

As faixas de comprimento de onda utilizadas para a fabricação dos termovisores que são aplicados para trabalhos nos sistemas elétricos industriais são de 3 μm a 5 μm e de 8 μm a 14 μm , assinalado na figura 13. Para essas faixas a transmitância da atmosfera à radiação infravermelha é alta. A faixa mais recomendada por apresentar

uma transmitância ainda maior é a de 8 µm a 14 µm, (Ghosh & Galeski, 1984). Cabe salientar que essa faixa tem baixa sensibilidade a pontos falsos de alta temperatura provocados pelo reflexo solar e para as temperaturas que são encontradas normalmente nos sistemas elétricos, (Santos, 2006).

Os fatores limitantes das aplicações da termografia infravermelha serão apresentados no capítulo seguinte deste trabalho.

4. Fatores Limitantes da Termografia Infravermelha

Os equipamentos elétricos de uma instalação industrial podem apresentar problemas relacionados com alta resistência elétrica, circuitos abertos, curto circuitos, desequilíbrio de carga, sobrecarga, harmônicos, aquecimento indutivo e componente aplicados incorretamente, que são detectados pela termografia infravermelha.

Existem influências e limitações na tarefa do inspetor que opera a equipamento de termografia infravermelha, quando executa uma tomada de medida de um equipamento sob inspeção e detecta um defeito através da análise do termograma, que podem apresentar um diagnóstico incorreto ou até mesmo incapacitar a detecção do defeito.

Os fatores como a variação da corrente elétrica da carga do equipamento inspecionado, a baixa emissividade dos componentes sob inspeção, a pequena dimensão do componente inspecionado, a superfície do componente inspecionado são exemplos típicos que dificultam a inspeção termográfica. Para os equipamentos que estão instalados em ambientes abertos, além dos fatores relacionados anteriormente, influências ambientais como radiação solar, a atenuação atmosférica, o vento, a mudança na temperatura ambiente, chuva e umidade podem estar presentes e influenciar a inspeção. Para efeito de estudo deste trabalho somente serão considerados os equipamentos instalados em ambientes fechados.

É importante ressaltar que câmeras térmicas não medem temperatura diretamente, elas detectam a radiação térmica emitida pelo objeto inspecionado através de um detector, que gera um sinal de saída. O valor da intensidade desse sinal de saída, somado a alguns parâmetros fornecidos pelo operador da câmera, como emissividade, distância objeto à câmera e outros parâmetros relativos ao ambiente, são processados, transformados em imagens visíveis e leituras de temperatura. Sendo assim, a medida de temperatura depende da calibração da câmera térmica e dos parâmetros informados pelo operador, o que já evidencia a necessidade de um mínimo de conhecimento para a inserção de tais parâmetros.

4.1 Inspetores de Termografia

Segundo Sefrim, o inspetor de termografia pode ser considerado como o principal fator de limitação da inspeção termográfica. A interpretação dos resultados pode variar com o treinamento, motivação e até com a capacidade visual do inspetor.

O inspetor de termografia deve conhecer o funcionamento dos equipamentos sob inspeção, a operação e as características da câmera térmica utilizada. Deve ter conhecimento dos fatores como a variação da corrente elétrica da carga do equipamento inspecionado, a baixa emissividade dos componentes sob inspeção, a pequena dimensão e a superfície do componente inspecionado. Também é importante conhecer a teoria fundamental e básica que envolve a radiação infravermelha e os princípios de transferência de calor. Para obter resultados consistentes, o inspetor deve ser qualificado para a inspeção, ter um alto nível de treinamento e conhecimento para que possa ser capaz de discernir entre um defeito real e uma falsa anomalia, o que pode economizar milhares de Reais em paradas e manutenções desnecessárias (Santos, 2006). A importância da qualificação do inspetor é um diferencial para aplicação da ferramenta e obtenção de resultados satisfatórios.

Com o propósito de orientar o treinamento, a qualificação e a certificação de inspetores de termografia e reduzir suas limitações, normas têm sido criadas, dentre elas pode-se citar:

- SNT – TC – 1A – American Society for Nondestructive Testing – ASNT;
- ISO – 18436 – The International Organization for Standardization – ISO; e
- ISO – 9712 – The International Organization for Standardization – ISO.

No Brasil foi formado em 2005 o Grupo de Trabalho responsável pela elaboração da norma brasileira para certificação de inspetores de termografia. A coordenação do Grupo de Trabalho é responsabilidade da Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos – ABENDE, credenciada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT para elaboração de normas relativas a ensaios não destrutivos.

Para o caso do equipamento utilizado neste trabalho, o representante do fabricante da câmera no Brasil, disponibiliza o um centro de treinamento de infravermelho, que

proporciona cursos de formação de inspetores em conformidade com a norma da ASNT SNT-TC-1A.

4.2 Equipamento de Medição – Termovisor

A determinação do equipamento de medição certamente é um dos principais fatores que vai determinar a qualidade do diagnóstico efetuado. É através do termovisor que a radiação infravermelha emitida pelo objeto medido é capturada, transformada em imagem visível e em leituras de temperatura para análise e diagnóstico da falha.

A correta escolha do equipamento para inspeção termográfica em sistemas elétricos industriais depende do conhecimento de determinadas características técnicas do termovisor, do ambiente onde será utilizado e do tipo de componente que será inspecionado. Mesmo o inspetor mais qualificado não conseguirá obter bons resultados com uma câmera térmica inadequada, portanto características importantes devem ser observadas na sua escolha:

- Temperatura do objeto a ser inspecionado define a faixa de temperatura e a melhor faixa de comprimento de onda que o termovisor deve responder.
- Temperatura do ambiente de inspeção define a faixa de temperatura de operação do termovisor.

A figura 14 representa de modo simplificado o princípio de funcionamento de um termovisor.

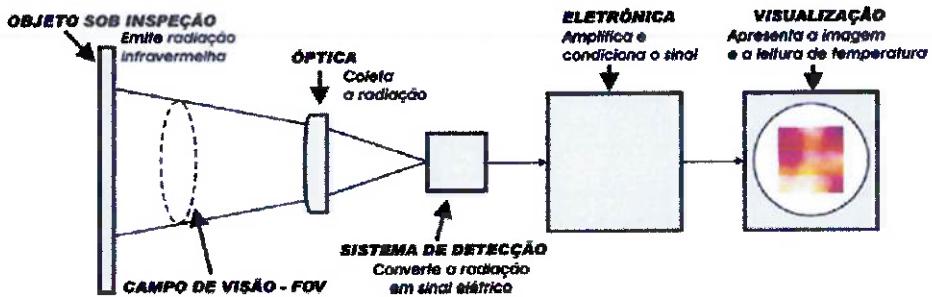


Figura 14 – Diagrama simplificado de um Termovisor.

4.2.1 Resposta espectral

As faixas de comprimento de onda mais utilizadas para a fabricação de câmeras térmicas aplicáveis ao sistema elétrico são de 2 a 5,6 μm e de 8 a 14 μm , faixas na qual a transparência da atmosfera à radiação infravermelha é alta.

Dentre elas, a mais recomendada é a de 8 a 14 μm por apresentar uma transmitância ainda maior (Ghosh & Galeski, 1994). Também é a faixa menos sensível a falsos pontos de alta temperatura resultante de reflexos e para temperaturas encontradas em sistemas elétricos, a radiação emitida nessa faixa é maior como pode ser observado na tabela 1 (Rogalsy & Chrzanowski, 2002).

Tabela 1 – Energia disponível nas faixas de comprimento de onda dos Termovisores

Região de Infravermelho (μm)	Radiação Solar ao Nível do Solo (W/m ²)	Emissão de um Corpo Negro a 290 K (W/m ²)
3 a 5	24	4,1
8 a 13	1,5	127

4.2.2 Resolução Espacial

É o menor detalhe de uma imagem que pode ser detectado e percebido pela câmera de termografia, sendo função do tamanho do detector e da óptica do sistema. Geralmente é especificado em radianos e definido como campo de visão instantâneo, utilizado no meio dos inspetores de termografia com a abreviatura derivada da expressão em inglês (Instantaneous Field of View – IFOV). Ele é equivalente à projeção de um pixel na superfície observada e, o somatório de todos os IFOVs forma o campo de visão (FOV), que é composto pela área total que pode

ser visualizada pelo termovisor. Os fabricantes de câmeras apresentam o campo de visão com a especificação em graus (Santos, 2006).

O campo de visão instantâneo – IFOV pode ser calculado a partir da expressão apresentada abaixo:

$$\text{IFOV} = (\text{FOV} / \text{Pix}) \quad (8)$$

Onde:

IFOV [mrad] – definido como o campo de visão instantâneo;

FOV [mrad] – é o campo de visão;

Pix – é o número de pixels.

Um equipamento de termografia com campo de visão de $24^\circ \times 18^\circ$ e resolução infravermelha de 320×240 pixels tem um campo de visão instantâneo de:

$$\text{IFOV}_{\text{horizontal}} = 24 \times 17,45 / 320 = 1,3 \text{ mrad}$$

$$\text{IFOV}_{\text{vertical}} = 18 \times 17,45 / 240 = 1,3 \text{ mrad}$$

Na expressão a constante numérica 17,45 ($\pi \cdot 1000 / 180^\circ$) é o resultado da conversão de graus em miliradianos.

Na figura abaixo estão representados o campo de visão – FOV e o campo de visão instantâneo – IFOV de um equipamento de termografia (Termovisor).

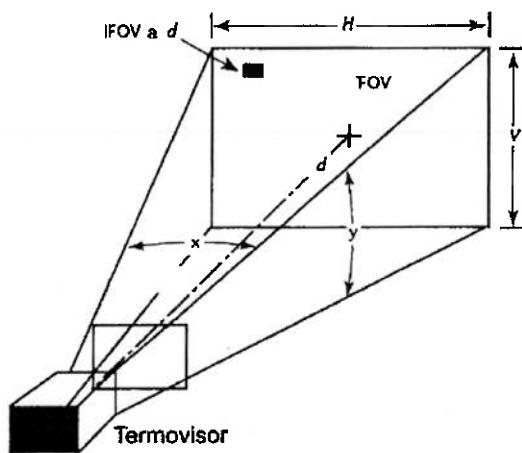


Figura 15 – Representação do Campo de Visão e do Campo de Visão Instantâneo.

O Campo de Visão Instantâneo é um parâmetro disponibilizado pelos fabricantes de equipamentos de termografia e possibilita o cálculo da distância máxima que um objeto de um tamanho determinado pode ser detectado, através da equação apresentada abaixo (Snell, 2005):

$$\text{Dist}_d = (D / \text{IFOV}) \quad (9)$$

Onde:

Dist_d [m] - definido como a distância máxima que um objeto de tamanho D pode ser detectado pelo equipamento de termografia;

D [m] – é o tamanho do objeto sob inspeção;

IFOV [rad] – é campo de visão instantâneo.

Para o equipamento de termografia com o campo de visão instantâneo igual a 1,3 mrad, pode detectar um objeto de 0,03 m x 0,03 m a uma distância máxima de:

$$\text{Dist}_d = 0,03 / 1,3 \times 10^{-3} = 23,08 \text{ m.}$$

Para aplicações onde os objetos estão localizados a uma distância grande e as suas dimensões são relativamente pequenas, o campo de visão instantâneo do equipamento de termografia utilizado pode fazer a diferença entre localizar ou não um defeito, como é o caso da aplicação de termografia em linhas de transmissão e subestações de alta tensão.

Para o caso da aplicação objeto deste trabalho, os componentes a serem medidos apresentam dimensões reduzidas, e o termovisor tem as seguintes características:

Campo de Visão: 25° x 19°; Resolução Infravermelha de: 200 x 150 pixels;

$$\text{IOFV}_{\text{horizontal}} = 25 \times 17,45 / 200 = 2,2 \text{ mrad}$$

$$\text{IOFV}_{\text{vertical}} = 19 \times 17,45 / 150 = 2,2 \text{ mrad}$$

Distância máxima que o equipamento pode detectar um objeto de 0,01 m x 0,01 m:

$$\text{Dist}_d = 0,01 / 2,2 \times 10^{-3} = 4,5 \text{ m.}$$

4.2.3 Resolução da Medida

Representa o menor objeto que pode ter sua temperatura medida com exatidão a uma determinada distância. Geralmente não é especificado pelos fabricantes de equipamentos de termografia, mas é tipicamente inferior a resolução espacial por um fator entre 2 e 4. Desta forma, em muitas situações, o objeto pode ser detectado pelo equipamento de termografia, mas a medição estará fora da resolução de medida do equipamento (Santos, 2006). Quando são fornecidos pelos fabricantes, geralmente estão especificados em radianos e definidos como campo de visão instantâneo de medida, com abreviatura derivada da expressão em inglês – MIFOV (Measuring Instantaneous Field of View). Snell (2005) afirma que as leituras de temperatura obtidas fora dos limites da resolução de medida, normalmente serão menores que a leitura real, o que pode ter grande influência na análise da severidade do defeito.

A expressão utilizada para calcular a distância máxima em que um objeto de tamanho definido pode ter a sua temperatura medida com exatidão como um equipamento de termografia é:

$$\text{Dist}_m = (D / \text{MIFOV}) (10)$$

Onde:

Dist_m [m] – definido como a distância máxima que um objeto de tamanho D pode ter sua temperatura medida com exatidão pelo equipamento de termografia;

D [m] – é o tamanho do objeto sob inspeção;

MIFOV [rad] – é campo de visão instantâneo de medida.

Para o caso do equipamento de termografia apresentado no tópico anterior de IFOV igual a 1,3 mrad e adotando que a resolução de medida é três vezes inferior à resolução espacial, um objeto de 0,03 m x 0,03 m poderá ter sua temperatura medida com exatidão a uma distância máxima de:

$$\text{Dist}_m = 0,03 / 1,3 \times 10^{-3} / 3 = 7,8 \text{ m}$$

Logo, para o exemplo apresentado na seção 4.2.2, o mesmo objeto pôde ser detectado por um equipamento de termografia de IFOV igual a 1,3 mrad a uma distância de 23,08 m, mas para ter sua medida com exatidão será necessário reduzir a distância para 7,8 m. Fatos como esses, muitas vezes desconhecidos dos inspetores de termografia, proporcionam grandes erros na medição da temperatura e consequentemente na análise e diagnóstico de um defeito.

Para reduzir ou eliminar a influência da distância devido à resolução de medida, os inspetores de termografia podem aproximar-se do componente sob inspeção até a uma distância na qual a temperatura possa ser medida com exatidão. Outra ação é melhorar a resolução de medida com uso de lentes telescópicas que podem ser definidas através da utilização das expressões apresentadas anteriormente.

Problemas de adequação do equipamento de termografia, adaptação de lentes especiais, distâncias são aplicáveis para medições em ambientes abertos, casos que não está contemplado por este trabalho, mas foram citados, pois servem como alerta para aplicações em subestações e linhas de transmissão de alta tensão.

Voltando para o caso da aplicação objeto deste trabalho o equipamento utilizado tem as seguintes características:

Campo de Visão: 25° x 19°; Resolução Infravermelha de: 200 x 150 pixels;

$$\text{IOFV}_{\text{horizontal}} = 25 \times 17,45 / 200 = 2,2 \text{ mrad}$$

$$\text{IOFV}_{\text{vertical}} = 19 \times 17,45 / 150 = 2,2 \text{ mrad}$$

Na expressão a constante numérica 17,45 ($\pi \cdot 1000 / 180^\circ$) é o resultado da conversão de graus em miliradianos.

Distância máxima que o equipamento pode detectar um objeto de 0,01 m x 0,01 m:

$$\text{Dist}_d = 0,01 / 2,2 \times 10^{-3} = 4,5 \text{ m.}$$

Determinar a que distância máxima a temperatura pode ser medida com exatidão, adotando que a resolução de medida é três vezes inferior à resolução espacial:

$$\text{Dist}_m = 0,01 / 2,2 \times 10^{-3} / 3 = 1,5 \text{ m}$$

Para a aplicação em sistemas elétricos industriais o equipamento está adequado, pois esta distância pode ser utilizada com segurança nos níveis de tensão existentes nas áreas industriais da empresa.

4.2.4 Faixa de Temperatura

Faixa de temperatura do termovisor aplicado para inspeção nos sistemas elétricos que pode variar desde a temperatura do ambiente onde está instalado o equipamento medido até a fusão dos materiais envolvidos. A faixa de temperatura dos termovisores normalmente comercializada, é suficiente para as inspeções em sistemas elétricos industriais, para o caso deste trabalho, o equipamento disponibiliza faixas de (-20 a 120 / 0 a 350 / 200 a 1200) graus Centígrados, sendo geralmente utilizada a faixa de 0°C a 350°C. Dificilmente a temperatura limite superior do termovisor será atingida, além de ser uma temperatura muito alta e que deve ser evitada nos sistemas elétricos, pois acima dessa temperatura parte da radiação emitida pelo objeto começa a entrar na faixa de comprimento de onda visível, podendo ser detectada sem o auxílio de um termovisor (Santos, 2006).

4.2.5 Sensibilidade Térmica

A sensibilidade térmica é a menor diferença de temperatura que pode ser detectada por um equipamento. Está diretamente relacionada com as propriedades do sistema óptico, da resposta do detector e do nível de ruído gerado no sistema, sendo geralmente especificada como a diferença de temperatura equivalente ao ruído. A sensibilidade térmica é inversamente proporcional à temperatura em que o

componente está envolvido, o que significa que o sistema torna-se mais ruidoso em baixas temperaturas e a resolução de temperatura diminui (Santos, 2006).

Quando a temperatura ambiente diminui, termovisores com resposta espectral na faixa de 3 µm a 5 µm tem a sua sensibilidade mais prejudicada do que termovisores com resposta espectral de 8 µm a 14 µm, (Holst, 2000).

4.3 Componentes ou Equipamentos sob Inspeção

A confiabilidade no resultado da inspeção termográfica depende, em grande parte, do conhecimento do inspetor no equipamento sob observação e do comportamento térmico dos seus componentes e do ambiente da instalação. É fundamental esse conhecimento do componente ou equipamento sob inspeção, pois determinar o que está dentro da normalidade e o que é uma anomalia torna-se muito difícil. Influências relacionadas ao componente sob inspeção como emissividade e a corrente elétrica da carga devem ser consideradas na avaliação.

4.3.1 Corrente Elétrica da Carga

A grande maioria das falhas nos sistemas elétricos é acompanhada ou precedida de sintomas que evidenciam a evolução de fenômenos térmicos, que torna de grande importância para o sistema o desenvolvimento de processos confiáveis de medida de temperatura. Esta necessidade justifica-se pelo volume de sintomas associados à elevação de temperatura em sistemas elétricos.

A evolução de processos de corrosão ou mau contato produzem calor aumentando da resistência de contato “R” do material. O calor decorre da dissipação de potência no ponto da falha “P”, sendo esta potência uma função do corrente passante “I” como apresentado na expressão abaixo:

$$P = R * I^2 \quad (11)$$

Como a resistência de contato é diretamente proporcional à resistividade do material, a qual varia com a temperatura, elevações na temperatura, aumentam a dissipação de calor e consequentemente as perdas de energia no sistema.

Quando os componentes ou equipamentos estão em funcionamento nas condições operacionais que os sistemas exigem, pode sofrer variações freqüentes de carga que proporcionam alterações no resultado da inspeção, sendo a corrente de carga um fator que deve ser observado em inspeções termográficas de sistemas elétricos industriais.

A circulação da corrente pelo componente sob inspeção não é a responsável pelo erro na medição da temperatura, mas ela pode interferir na análise e diagnóstico de uma anomalia ou defeito.

O ideal para eliminar a interferência da corrente de carga na inspeção de termografia seria a execução da inspeção com o componente ou o equipamento operando com sua capacidade máxima, a plena carga, mas normalmente esta situação nem sempre é possível, pois existe variação nas cargas dos sistemas elétricos industriais. Desta forma, na ocorrência de inspeções termográficas em que ocorra a situação de medição com carga abaixo de 100% da máxima, deve-se proporcionar mecanismos para compensar essas variações, recomenda-se a correção utilizando uma expressão matemática, de maneira que se pretende prever a temperatura do componente quando a corrente for máxima, fornecendo mais subsídios para uma melhor análise do equipamento sob inspeção. A expressão geralmente utilizada e recomendada nos procedimentos e instruções de empresas que tem como prática a inspeção termográfica nos sistemas elétricos como Petrobras, Eletronuclear, Furnas e SKF, é:

$$\Delta T_c = \Delta T_m \times (I_{max} / I_m)^2 \quad (12)$$

Onde:

ΔT_c [°C] – é a elevação da temperatura acima de uma temperatura de referência quando a corrente atinge o valor máximo I_{max} .

ΔT_m [°C] – é a elevação da temperatura acima de uma temperatura de referência quando medida com a corrente I_m .

I_{max} [A] – é a corrente máxima permitida.

I_m [A] – é a corrente circulante no instante da medida.

A aplicação da expressão para a correção de carga somente deve ser realizada para cargas iguais ou superiores a 50% da carga máxima.

A correção da carga é também denominada de fator de correção da carga, abreviado como FCC é apresentado no procedimento de avaliação de anomalia que está descrito na seção 5.1.8 deste trabalho.

4.3.2 Emissividade do Componente

A emissividade é a taxa de radiação emitida por um corpo real, comparada com a radiação emitida por um Corpo Negro, ambos à mesma temperatura, e de mesmo comprimento de onda. É uma propriedade relacionada com a superfície que determina a capacidade dessa superfície em emitir radiação. Os valores de emissividade variam de 0 (zero), considerado como refletor perfeito a 1 (um), considerado como emissor perfeito (Corpo Negro). A emissividade pode variar com a qualidade da superfície, com o comprimento de onda, com a geometria do objeto, com a temperatura e com o ângulo de visão, (Epperly, 1997). Os termovisores não medem a temperatura diretamente e sim a radiação, as leituras de temperatura fornecidas pelo termovisor tornam-se muito dependentes dessa propriedade, como pode ser observado na expressão abaixo que representa a radiância emitida por um objeto opaco e medida pelo termovisor, (Madding, 2002).

$$L_m = \varepsilon \cdot L(T_{objeto}) + (1 - \varepsilon) \cdot L(T_{fundo}) \quad (13)$$

Onde,

L_m [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$] – é a radiância medida pelo termovisor.

$\varepsilon \cdot L(T_{objeto})$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$] – é a radiância emitida pelo objeto.

$(1 - \varepsilon) \cdot L(T_{fundo})$ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$] – é a radiância refletida pelo objeto.

Com o propósito de representar o efeito da emissividade na radiação emitida por uma superfície e detectada por um termovisor, foi realizado um ensaio utilizando um ferro de passar roupa, onde foi alterada sua superfície para proporcionar áreas com emissividades diferentes, pela mudança de material da superfície ou pelo seu estado (polida suja ou áspera). Observa-se que apesar de toda a superfície estar à mesma temperatura, obtendo valor medido com termômetro de contato de 56° C , as áreas com maior emissividade se apresenta na imagem termográfica com maior indicação de temperatura e mais próxima da temperatura real da superfície, na imagem representada pelas áreas mais claras. Pode ser observado também na figura que superfícies polidas, adicionado na superfície do ferro um papel alumínio, apresentam baixa emissividade e na imagem térmica respondem com a indicação de baixa temperatura, muito diferente da temperatura real da superfície, na imagem representada pela área mais escura.



Figura 16 – Imagem visível e térmica da superfície de um ferro de passar roupa com diferentes emissividades

A emissividade é um fator que deve ser considerado nas inspeções termográficas de componentes dos sistemas elétricos industriais. Os termovisores estão equipados com recursos que permitem realizar ajuste de emissividade para compensar essa interferência, mas existe uma dificuldade muito grande em determinar o valor correto da emissividade dos vários componentes, conexões e equipamentos existentes nos

sistemas elétricos industriais. O valor da emissividade pode sofrer uma grande variação dependendo de fatores como sujeira, oxidação e corrosão. A melhor maneira de minimizar essa interferência é inserir um elemento de emissividade conhecida nos componentes inspecionados para que o valor da medição represente a sua temperatura real. Para o caso da câmera utilizada nesse trabalho, o recurso para minimizar o fator emissividade é a aplicação de uma fita de PVC (emissividade igual a 0,95) sobre as superfícies a serem inspecionadas, pois o PVC é transparente para o infravermelho, representando a temperatura mais próxima da superfície. Para componentes das instalações elétricas industriais em ambientes fechados a recomendação é utilizar como emissividade o valor de 0,85 (Santos, 2006).

4.4 Condições Ambientais

O ambiente onde é realizada a inspeção termográfica desempenha um papel importante nos resultados obtidos. Fatores como transmitância atmosférica, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, a radiação solar, o vento e a chuva podem afetar a distribuição térmica dos componentes sob inspeção, como também a quantidade de radiação infravermelha que chega ao equipamento de termografia. A atmosfera emitindo, absorvendo e dispersando a radiação, a radiação emitida pelo sol, a radiação emitida por objetos próximos ao objeto sob análise, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar interferem nos resultados da inspeção e no seu diagnóstico.

Os fatores como a radiação solar, o vento e a chuva não serão considerados neste trabalho, pois o objetivo é concentrar na inspeção de equipamentos elétricos instalados em ambientes fechados.

Na figura abaixo representa esquematicamente os fatores ambientais que podem influenciar a inspeção termográfica.

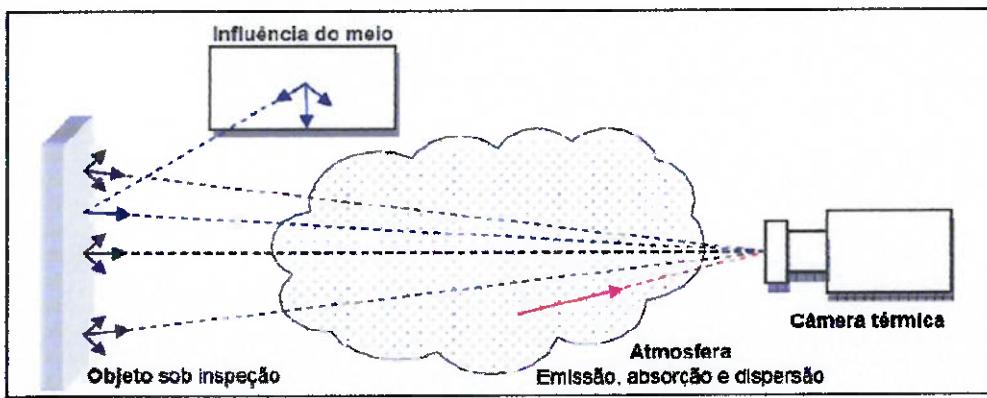


Figura 17 – Fatores ambientais que podem influenciar a inspeção termográfica.

4.4.1 Transmitância Atmosférica

A transmitância atmosférica varia com a umidade relativa do ar, com a temperatura e com quantidade de partículas dispersas no ar (poeira, poluição névoa e neblina).

A atmosfera interfere na radiação emitida pelos objetos através dos fenômenos de absorção, dispersão, emissão e turbulência.

Absorção: o fenômeno absorção provoca a atenuação da radiação e pode ser de dois tipos, sendo a absorção molecular e a absorção aerossol.

Em decorrência dos diversos componentes menores da atmosfera, a absorção molecular é uma fonte que provoca atenuação da propagação da radiação muito maior e significativa que a absorção aerossol.

Dispersão: é o fenômeno que provoca redistribuição do fluxo incidente em todas as direções de propagação e provoca a redução do fluxo na direção original. Da mesma forma que a absorção, também existe dois tipos distintos de dispersão atmosférica, a dispersão molecular e a dispersão aerossol. A transmitância atmosférica é mais afetada com a dispersão aerossol do que com a dispersão molecular. O efeito da dispersão diminui quando o comprimento de onda de propagação aumenta. Desta forma, a transmitância em um ambiente com fumaça é maior para o infravermelho na faixa de 8 μm a 14 μm do que para a faixa de 3 μm a 5 μm .

Emissão: o fenômeno da emissão adiciona uma radiação adicional à radiação emitida equipamento ou componente sob inspeção. Para o caso de inspeções termográficas em instalações elétricas industriais em ambientes abrigados, o efeito da emissão pode ser desprezado, pois a emissividade atmosférica é geralmente baixa e a temperatura da atmosfera na maior parte das inspeções termográficas é menor que a temperatura do objeto sob inspeção.

Turbulência: é causado por movimentação irregular do ar. Ela é perceptível quando as moléculas do ar com temperaturas diferentes são misturadas pelo vento e convecção. Sob o aspecto óptico, esse movimento resulta na flutuação aleatória do índice de refração da atmosfera, o que ocasiona uma imperfeição da imagem gerada pelo sistema óptico. Em inspeções de componentes instalados em ambientes abrigados e em sistemas elétricos industriais, onde as distâncias do componente e termovisor não ultrapassam 5 (cinco) metros, o efeito do fenômeno turbulência pode ser desprezado (Chrzanowski, 2001).

4.4.2 Atmosfera

A atmosfera é um objeto transmissivo entre o componente e o equipamento de inspeção termográfica. A faixa do comprimento de onda do termovisor deve ser selecionada de forma que a transmitância do meio (ar) seja muito alta. A atmosfera transmite a maior parte da radiação oriunda do componente, sendo absorvida uma pequena parte da radiação total emitida pelo objeto. Existe uma pequena perda da radiação total quando passa através da atmosfera para atingir o termógrafo. Tanto a parte que é emitida do componente sob inspeção como a parte que é refletida do ambiente ao redor serão igualmente atenuadas pela atmosfera. A atmosfera também emitirá sua própria radiação, porque se ela pode absorver também pode emitir.

Existem vários fatores que podem influenciar o efeito da atmosfera, sendo os mais importantes a distância do componente, a temperatura do ar e a umidade relativa.

Distância: o fator distância é facilmente comprehensível, pois quanto mais atmosfera entre o componente e o termovisor, maior a radiação absorvida e emitida.

Temperatura do Ar: o fator temperatura do ar afeta a radiação da própria atmosfera, pois quanto maior a temperatura maior a radiação.

Umidade Relativa do Ar: o fator umidade relativa do ar é a concentração de vapor de água no ar. O ar tem um limite de absorção, este limite é denominado saturação. Acima do limite de saturação (ponto de orvalho) a quantidade de água em excesso se precipita em forma de pequenas gotas de água ou neblina. A quantidade de água que o ar pode absorver antes de atingir a saturação depende da temperatura e aumenta progressivamente com ela.

5. Padronização de Procedimentos de Inspeção

Um procedimento de inspeção aplicado a termografia infravermelho em equipamentos elétricos industriais é fundamental devido à carência de publicações e normas nacionais sobre o assunto e também em razão das influências, limitações da termografia apresentadas nesse trabalho e da importância que ela tem alcançado nas diversas indústrias brasileiras e principalmente no setor energia elétrica.

O procedimento a ser apresentado representa o início da aplicação da técnica na empresa objeto desse trabalho, pode ser utilizado como base de procedimentos específicos para cada empresa. É importante ressaltar que um procedimento escrito jamais substitui ou elimina a necessidade de um profissional de termografia treinado, capacitado e qualificado para exercer a atividade, mas tem como objetivo orientar para proceder à execução de um modo seguro, repetitivo e padronizado na busca de respostas confiáveis e consistentes com o melhor benefício da técnica aplicada.

5.1 Procedimento de Inspeção de Termografia em Equipamentos Elétricos

O procedimento descrito na sequência é resultado da compilação de procedimentos de inspeção adotados por empresas do setor energético brasileiro e empresas prestadoras de serviços (PETROBRAS, FURNAS, ELETRONUCLEAR e SKF) e dos resultados obtidos pelos ensaios apresentados nesse trabalho e aplicações realizadas na implantação da tecnologia na empresa objeto desse trabalho.

Os critérios adotados para as análises dos resultados das medições realizadas, que estão apresentados na seção 5.1.8 são considerados extremamente conservadores, pois estão sendo adotados nas plantas nucleares do Centro Experimental Aramar, pertencente à Marinha do Brasil, como padrão inicial da aplicação da tecnologia de inspeção por termografia infravermelha.

5.1.1 Objetivo

O objetivo deste procedimento é fixar as condições exigíveis e práticas recomendadas à realização de inspeção termográfica em sistemas elétricos industriais, localizados em ambientes fechados, bem como disponibilizar um modelo de registro das anomalias encontradas e prover critérios para avaliação da severidade das anomalias térmicas.

5.1.2 Abrangência

Este procedimento se aplica a inspeção termográfica em sistemas elétricos como: transformadores, painéis elétricos e seus componentes, centro de controle de motores e seus componentes, motores elétricos, banco de baterias, bancos de capacitores, e equipamentos de manobra e proteção.

5.1.3 Definições

Para os propósitos deste procedimento são adotadas as definições da norma ABNT NBR 15424 e complementadas por outras definições não contempladas pela norma.

Atenuação Atmosférica: Perda resultante da propagação da radiação infravermelha pelo meio atmosférico, devido à absorção ou ao espalhamento da radiação. É função da distância, umidade, temperatura e partículas.

Corpo Negro: Corpo capaz de absorver toda a radiação nele incidente e, para uma dada temperatura, emitir o máximo possível de radiação térmica. O valor de sua emissividade é 1,0.

Emissividade: Parâmetro adimensional que estabelece a relação entre a quantidade de energia irradiada por um corpo qualquer e a que seria emitida por um corpo negro, à mesma temperatura e comprimento de onda. Varia entre 0 e 1.

Isotermas: Regiões, do objeto a ser inspecionado, com os mesmos níveis de temperatura.

Nível Isotérmico: Quantidade de radiação térmica emitida por uma superfície ou objeto em uma determinada faixa de temperatura.

Radiação Térmica: Energia radiante emitida por todo e qualquer objeto que esteja a uma temperatura acima do zero absoluto.

Referência: Objeto com emissividade conhecida tomado como objeto padrão.

Responsável pela Inspeção Termográfica: É o profissional que solicitou a inspeção termográfica.

Rota de Inspeção: Trajetória que o inspetor deve seguir para efetuar as inspeções, onde estão relacionados os componentes a ser inspecionado.

Saturação: Ajuste da imagem térmica à quantidade de energia que incide no detector, quando aplicável.

Temperatura Ambiente: Temperatura do ambiente onde está localizado o objeto a ser inspecionado.

Temperatura Atmosférica: Temperatura dos gases entre o aparelho e o objeto.

Temperatura de Referência: Temperatura conhecida da referência utilizada para a calibração do instrumento termográfico, quando aplicável.

Termografia: Técnica de sensoriamento remoto que possibilita a medição de temperaturas e a formação de imagens térmicas de um componente, equipamento ou processo, a partir da radiação infravermelha, naturalmente emitida pelos corpos, em função de sua temperatura.

Termografia Qualitativa: Depende da análise dos padrões térmicos para revelar a existência e localizar a posição de anomalias e avaliar.

Termografia Quantitativa: Utiliza as medições de temperatura como critério para determinar a severidade de uma anomalia e estabelecer prioridades de reparo.

Termografista: É o profissional capacitado a realizar e registrar através de documentação as inspeções termográficas. De acordo com sua capacitação também pode analisar e gerenciar os trabalhos das inspeções termográficas.

Termograma: Imagem obtida a partir da radiação térmica infravermelha, naturalmente emitida pelos corpos, em função de sua temperatura.

5.1.4 Responsabilidades

Termografista

- Obter a autorização de acesso e permissão de trabalho para inspecionar os ativos da unidade;
- Realizar em conjunto com o responsável pela área e pela inspeção termográfica, uma avaliação prévia dos riscos (APR). Planejar e avaliar as atividades e ações de forma a atender a todos os requisitos de segurança aplicáveis à área a ser inspecionada.
- Observar e saber examinar com atenção os efeitos das condições ambientais e das condições do ativo sob inspeção, ocorrências de reflexões, no instante da inspeção;
- Conhecer as características de funcionamento do ativo para realizar a inspeção;
- Observar e seguir a rota de inspeção elaborada pelo responsável pela inspeção termográfica;
- Registrar, conforme modelo, as anomalias térmicas encontradas.

Responsável pela Inspeção Termográfica

- Elaborar a rota de inspeção;
- Realizar em conjunto com o responsável pela área e o termografista, uma avaliação prévia dos riscos (APR). Planejar e avaliar as atividades e ações de forma a atender a todos os requisitos de segurança aplicáveis à área a ser inspecionada;
- Disponibilizar ao termografista a documentação necessária para autorização de acesso e permissão de trabalho para inspecionar os ativos da unidade.

5.1.5 Equipamento para Inspeção Termográfica

Deve ser utilizado o equipamento adquirido pela empresa, modelo T 200 de fabricação Flir com faixa espectral de 7,5 a 13 µm que tem capacidade de obter termogramas dotados de recursos para análises e determinação de regiões de diferentes temperaturas.

O equipamento a ser utilizado deve ter os seguintes requisitos:

- Possibilitar a inspeção termográfica na faixa de temperatura adequada para a aplicação da inspeção;
- Sistema de registro permanente de imagens (fotografia, registro digital);
- Possuir intercambialidade das lentes;
- Ser portátil com configuração compacta e resistente às condições de uso;

Ajuste do equipamento:

A verificação do ajuste do equipamento deve ser efetuada a cada início de serviço, utilizando o manual e acessando o “menu” no display do equipamento.

Calibração do equipamento:

O equipamento dotado de sistema automático de calibração deve ser calibrado, no máximo, a cada 3 anos.

5.1.6 Atividade de Inspeção Termográfica

Requisitos para Inspeção

- O inspetor deve executar o trabalho de inspeção termográfica sempre acompanhada de um trabalhador autorizado a trabalhar em instalações elétricas industriais;
- Obter a autorização de acesso e permissão de trabalho para inspecionar os ativos assinada pelo responsável da unidade a ser inspecionada;

- Obter relação de equipamentos que serão monitorados com a codificação cadastrada no sistema de controle de manutenção, juntamente com a rota de inspeção;

Materiais e Equipamentos Necessários para Inspeção

- Termovisor;
- Termo-higrômetro;
- Alicate amperímetro;
- Mala de ferramentas de eletricidade;
- Planilha de registro de anomalia em inspeção termográfica.

Requisitos de Segurança

- Verificar as recomendações de segurança industrial e proteção radiológica relacionadas na permissão de trabalho;
- Observar as especificações e os cuidados de segurança e operação, recomendados pelo fabricante no manual do equipamento utilizado para inspeção;
- Verificar a classe de tensão dos painéis e salas a serem medidas, com o objetivo de definir uma roupa adequada (EPI) a ser utilizada na medição;
- Observar na permissão de trabalho as recomendações dos equipamentos de proteção individual, como óculos de proteção, roupa apropriada, conforme risco elétrico, luvas, capacete e botas sem biqueira de aço;
- Não medir quaisquer equipamentos que possam oferecer riscos de choques elétricos;
- Não portar objetos metálicos como alianças, correntes, relógios de pulseira metálica e botas com biqueira de aço;
- Precaução no contato em componentes elétricos expostos como conexões, terminais e barramentos.

Recomendações para inspeção

Os seguintes cuidados devem ser observados quando da realização da inspeção:

- Evitar a inspeção quando o equipamento sob inspeção estiver com corrente elétrica de carga abaixo de 40% da sua corrente de carga plena (Santos, 2006);

- Certificar que o equipamento sob inspeção está em carga no período suficiente para que tenha atingido a estabilidade térmica;
- Garantir que o ângulo entre a lente do termovisor e o ponto inspecionado deve ser o mais próximo possível do perpendicular para minimizar a redução da emissividade por ângulos de observação muito agudos (Santos, 2006);
- Não efetuar a inspeção através de anteparos ou vidro;
- Evitar posicionar o aparelho nas proximidades de equipamentos elétricos que operam com freqüências elevadas, de modo a prevenir interferências;
- Cuidados devem ser tomados para evitar erros de interpretação causados pelo reflexo de componentes mais aquecidos;
- Efetuar correções de carga quando necessário;

5.1.7 Procedimento de Inspeção

Para a análise de uma inspeção o termografista segue duas técnicas de avaliação do ponto alvo, são elas:

Inspeção para análise Qualitativa: Este método é bastante eficaz quando se pretende analisar o perfil termográfico, sem considerar os valores de temperatura apresentados.

Neste caso, a atenção do termografista está detida basicamente à forma gráfica de como a temperatura está distribuída sobre o corpo ou objeto inspecionado. Nesta primeira análise, ainda em campo, o termografista deve levar em consideração todos os fenômenos da física envolvidos na respectiva cena, tais como: indução eletromagnética, a condução e convecção térmica e o efeito joule, dentre outros.

Nas análises qualitativas, tão ou mais importantes que os valores térmicos, são os perfis termográficos apresentados.

Inspeção para análise Quantitativa: Quando uma anormalidade é descoberta o propósito da inspeção é saber a seriedade da mesma. Geralmente os recursos existentes não são suficientes para avaliar a anormalidade diagnosticada. A termografia quantitativa necessita de uma série de critérios rigorosos para

determinar a seriedade do problema no equipamento, como avaliação da carga, equipamento, criticalidade, segurança e fatores ambientais.

Realizar as inspeções de acordo com a documentação do planejamento elaborada e estabelecida na rota de inspeção.

Para todos os equipamentos devem ser registrados como inspecionados para seu histórico. Aqueles equipamentos que apresentarem classificação térmica diferente da normal devem ser registrados de modo a permitir um adequado controle.

Quando detectar uma anormalidade na imagem térmica, deve-se tirar uma foto (termograma) do elemento que apresenta o ponto anormal, salvá-lo e registrar também a imagem digital. Nesse momento alguns pontos devem ser considerados:

- Aproximar o máximo possível para obter a imagem e a leitura de temperatura, respeitando as distâncias limites de segurança;
- Mudar de posição para avaliar a ocorrência de reflexões na imagem que possam proporcionar erro de diagnóstico;
- Ajustar o foco da câmera para melhor visualização da imagem para minimizar erros de leitura;
- Registrar a imagem de temperatura nos pontos de maior emissividade do objeto sob inspeção, localizado nas áreas com pintura ou com cavidades, ou atacadas por oxidação;
- Identificar e registrar os dados do ponto com anomalia, como dados de placa, fase, tensão e medir a corrente de carga;
- Preencher no formulário a área, o setor, o painel, o elemento, componente, o TAG do elemento, o número da imagem térmica (gerado automaticamente pela câmara termográfica) e número da respectiva fotografia digital. Também são informações importantes para a preparação do relatório e melhor identificação do ponto quente.

Na seqüência são apresentadas algumas recomendações quanto aos aspectos das periodicidades das inspeções termográficas:

- Adotar a periodicidade inicial no período máximo de 6 (seis) meses;
- A periodicidade de inspeção pode ser alterada em função do histórico do equipamento, e de problemas verificados durante a execução. A inspeção nos equipamentos deve ser efetuada preferencialmente antes de uma parada

- programada do equipamento possibilitando a avaliação da manutenção do mesmo;
- Inspecionar após intervenções da manutenção ou melhorias no equipamento;

5.1.8 Análises dos Resultados das Medições

Para uma análise conclusiva o inspetor de termografia de realizar uma criteriosa avaliação dos dados coletados, procedendo às correções dos dados obtidos para a constatação de uma anomalia térmica e mensurar sua gravidade para o sistema. Na seqüência são apresentados dois critérios para auxílio nas análises.

Como citado na seção 5.1, os critérios adotados são extremamente conservadores, pois são requisitos definidos nos padrões de manutenção utilizados nas unidades nucleares e industriais do Centro Experimental Aramar da Marinha do Brasil.

Cabe ressaltar que os procedimentos adotados na manutenção são revisados periodicamente sempre observando os dados nos históricos de manutenções dos equipamentos e análises dos registros das intervenções, o que pode resultar na revisão dos critérios adotados inicialmente.

1º - Critério para Identificação de uma Anomalia Térmica

O critério para identificação de uma anormalidade foi adaptado de procedimentos para inspeções termográficas em equipamentos elétricos de empresas prestadoras de serviços na área de termografia (Veratti, 2000).

Por este critério, uma anomalia térmica de um equipamento, também denominado como ponto quente no equipamento, pode ser considerada quando ocorrer:

- A temperatura do elemento estiver acima da máxima admissível;
- Existir uma diferença entre fases considerável (acima de 10%) entre as fases R, S, T;
- A temperatura estiver acima de 5°C acima da temperatura ambiente (esse último aplica-se para altas tensões – 13,8 kV);

Limites de temperatura

A máxima temperatura admissível – MTA, trata-se da máxima temperatura sob a qual o componente pode operar. Os valores de MTA são obtidos a partir das especificações técnicas dos componentes ou junto aos fabricantes. Como prática, caso não se conheça o valor de MTA a ser considerado, recomenda-se a fixação de 90 graus Centígrados como valor de referência para conexões e componentes metálicos e 70 graus Centígrados para cabos isolados (Verdini & Veratti).

A máxima temperatura admissível é aquela que a partir da qual tem início o processo de degradação do material.

Abaixo na tabela são apresentados valores para a máxima temperatura admissível de componentes elétricos, que estão fundamentados em normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), NBR 5410 e tabelas de fabricantes de componentes de aplicação industrial.

Tabela 2 – Tabela de Máxima Temperatura Admissível

Componente Industrial	Máxima Temperatura Admissível – MTA (°C)
Fios encapados (depende da classe de isolação)	70 a 100
Régua de bornes	70
Cabos isolados até 15 kV	70
Conexões mediante parafusos	90
Conexões e barramentos de baixa tensão	90
Conexões recobertas de prata ou níquel	90
Fusível (corpo)	100
Transformadores a óleo – conexões	60
Transformadores a óleo – corpo	90
Transformadores secos	
Classe de isolação 105 – ponto mais aquecido	65
Classe de isolação 130 – ponto mais aquecido	90
Classe de isolação 155 – ponto mais aquecido	115
Classe de isolação 180 – ponto mais aquecido	140

Podem ser utilizadas como temperatura máxima de referência, as mencionadas e recomendadas pelo fabricante do componente / equipamento.

Detectado o ponto quente de acordo com os critérios acima, a temperatura do mesmo será corrigida de acordo com a carga e velocidade do vento, sendo este último quando aplicados em ambientes externos ou abertos, não sendo objeto do

trabalho desenvolvido. Para realizar essas correções são usados os seguintes fatores:

Fator de Correção de Carga – FCC: No caso das medições não serem executadas a plena carga no circuito, é possível calcular o aquecimento a 100 % de carga a partir da fórmula e tabela mostradas abaixo:

$$\text{TCF} = \text{TMC} \times \text{FCC} \quad (14)$$

Onde: **TMC** – temperatura medida com a carga em que se encontra

TCF – temperatura corrigida final

FCC – fator de correção de carga

O fator de correção de carga é obtido através da formula:

$$\text{FCC} = (I_n / I_m)^2 \quad (15)$$

Onde: I_n = Carga nominal (ampéres);

I_m = Carga medida (ampéres).

Observação: Os valores do fator de correção de carga são válidos para cargas iguais ou superiores a 50% da carga nominal.

% Carga	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50
FCC	1,00	1,11	1,23	1,38	1,56	1,77	2,00	2,37	2,78	3,30	4,00

Fator de Correção da Emissividade: A emissividade é uma característica que depende da composição química e da textura do material. Assim, seu valor está diretamente relacionado com as características da superfície do componente, a formação de camadas de óxidos, poeira e pinturas alteram os valores de emissividade. Para componentes das instalações elétricas industriais em ambientes fechados a recomendação é utilizar como emissividade o valor de 0,85, como ajuste no parâmetro do termovisor.

Fator de Correção pela Temperatura Refletida: Em alguns casos o objeto que está sendo monitorado pode refletir a radiação infravermelha de outro objeto ocasionando erros de medidas. Caso haja a suspeita de que isso esteja acontecendo é de fundamental importância que o inspetor faça a medição de vários ângulos diferentes para a verificação e eliminação da ocorrência deste fenômeno.

Caso não conseguir eliminar a ocorrência desse fenômeno, uma maneira de se contornar esse problema é fixando um material de alta emissividade conhecida e baixa reflexão na área a ser medida.

Um dos métodos utilizados é a fixação de fita isolante ou fita crepe, que tem emissividades iguais a 0,98 e 0,95, respectivamente, sobre o objeto a ser monitorado. Em seguida fazer a leitura da temperatura sobre esse material fixo no objeto e adotá-lo como referência.

2º - Critério para Classificação da Anomalia Térmica

A classificação da anomalia térmica trata-se de uma complementação para análise e determinar a severidade do aquecimento ocorrido no objeto avaliado e proposição de providencias para adoção da manutenção.

Para esta etapa foi adotado o critério de avaliação utilizado por empresa da área de energia, adaptando às necessidades da empresa objeto deste trabalho (Verdini & Veratti).

Temperatura Corrigida Final (TCF)

A temperatura final corrigida é obtida da fórmula:

$$\text{TCF} = \text{ETC} + \text{Ta} \quad (16)$$

Onde: TFC = Temperatura final corrigida;

ETC = Elevação de temperatura corrigida;

Ta = Temperatura ambiente.

Sendo:

$$\text{ETC} = (\text{TMC} - \text{Ta}) \times \text{FCC} \quad (17)$$

Onde: ETC = Elevação de temperatura corrigida para carga nominal (100%);

FCC = Fator de correção de carga;

TMC = Temperatura medida;

Ta = Temperatura ambiente;

Classificação das Medições

A elevação máxima de temperatura admissível é obtida através da fórmula:

$$ET_{max} = MTA - Ta \quad (18)$$

Onde: ET_{max} = elevação máxima de temperatura admissível;

MTA = temperatura máxima admissível para o componente (tabela 2);

Ta = temperatura ambiente.

Observação: A MTA é normalmente especificada pelo fabricante do componente a partir da qual tem início o processo de degradação do material.

Fator de Elevação de Temperatura (FET)

É obtido através da fórmula:

$$FET = (ETC / ET_{max}) \quad (18)$$

Onde: FET = Fator de elevação de temperatura;

ETC = Elevação de temperatura corrigida;

ET_{max} = elevação máxima de temperatura admissível.

A classificação dos aquecimentos medidos e a determinação da providência a ser tomada seguem os critérios adotados pela Petrobras (ICON / N-2475), através da norma N-2475 – Inspeção Termográfica em Sistemas Elétricos - CONTEC – Comissão de Normas Técnicas apresentadas na tabela 3.

Os critérios são extremamente conservadores, podendo ser adotado, pois atendem aos requisitos definidos nos padrões de manutenção utilizados nas unidades nucleares e industriais do Centro Experimental Aramar da Marinha do Brasil.

Cabe ressaltar que os procedimentos adotados na manutenção são revisados periodicamente, sempre observando os dados nos históricos de manutenções dos equipamentos e análises dos registros das intervenções, o que pode resultar na revisão dos critérios adotados inicialmente.

Tabela 3 – Tabela de Avaliação de Severidade e Recomendação

Fator de Elevação de Temperatura (FET)	Classificação Térmica	Providências
0,9 ou mais	Severamente aquecido	Manutenção imediata
0,6 a 0,9	Muito aquecido	Manutenção programada
0,3 a 0,6	Aquecido	Em observação
Até 0,3	Normal	Normal

5.1.9 Recomendações para Inspeção de Componente e Equipamentos

Barramentos

- Verificar o equilíbrio entre fases com relação a correntes e temperaturas;
- Iinspecionar conexões;
- Verificar fugas pelos isoladores.

Painéis Elétricos

- Verificar as conexões da entrada e saída dos seguintes componentes: fusíveis, disjuntores, chaves seccionadoras, garras, TP's, TC's e relés; contatores; barramentos, réguas de bornes e semicondutores.

Bancos de Capacitores

- Verificar os terminais de entrada e saída e o corpo do capacitor.

Motores Elétricos e Geradores

- Verificar a carcaça, conexões dos cabos e acoplamentos.

Bancos de Baterias

- Verificar conexões e o corpo das baterias.

Cabos Isolados

- Verificar em cabos singelos se no percurso existe pontos de indução, tais como eletrocalhas metálicas, tampas de painéis ou outros componentes metálicos.
- Verificar também pontos de possíveis danos em isolamento de cabos.

Transformadores

- Ispencionar os conectores de entrada e saída e contatos das chaves seccionadoras, isolamento e buchas.
- Verificar a eficiência do sistema de resfriamento, comparando as temperaturas dos radiadores.

5.1.10 Modelo de Relatório de Inspeção Termográfica

O modelo de relatório de inspeção termográfico apresentado na sequência tem por objetivo registrar os parâmetros necessários para que o analista de termografia tenha condições de identificar o equipamento, avaliar as condições operacionais, diagnosticar a anormalidade e propor ação corretiva com prazos definidos para a manutenção executar.

DEPARTAMENTO DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL DIVISÃO DE MANUTENÇÃO ELÉTRICA																		
RELATÓRIO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA																		
NUMERO DO RELATORIO:	DATA:																	
DATA DE INSPEÇÃO:																		
FUNCIONÁRIOS																		
Nome:	MATRICULA:																	
Nome:	MATRICULA:																	
EQUIPAMENTO UTILIZADO																		
FABRICANTE:	MODELO:																	
N.º SÉRIE:	LENTE:																	
DADOS AMBIENTAIS																		
TEMPERATURA AMBIENTE:	UMIDADE (%):																	
PONTO DA ANOMALIA TÉRMICA																		
UNIDADE INDUSTRIAL:	TAG:																	
SISTEMA :	FABRICANTE:																	
EQUIPAMENTO:	MODELO:																	
IDENTIFICAÇÃO DO PONTO:																		
CORRENTE MEDIDA:	CORRENTE MÁXIMA:																	
EMISSIVIDADE:																		
TEMPERATURA DO PONTO:		TEMPERATURA MÁXIMA COMPONENTE:																
ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	0,00	FATOR ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	0,00															
IMAGEM																		
IMAGEM VISÍVEL		IMAGEM TERMOGRAFICA																
RECOMENDAÇÕES:		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fator de Elevação de Temperatura (FET)</th> <th>Classificação Térmica</th> <th>Providências</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,9 ou mais</td> <td>Severamente aquecido</td> <td>Manutenção imediata</td> </tr> <tr> <td>0,6 a 0,9</td> <td>Muito aquecido</td> <td>Manutenção programada</td> </tr> <tr> <td>0,3 a 0,6</td> <td>Aquecido</td> <td>Em observação</td> </tr> <tr> <td>Até 0,3</td> <td>Normal</td> <td>Normal</td> </tr> </tbody> </table>		Fator de Elevação de Temperatura (FET)	Classificação Térmica	Providências	0,9 ou mais	Severamente aquecido	Manutenção imediata	0,6 a 0,9	Muito aquecido	Manutenção programada	0,3 a 0,6	Aquecido	Em observação	Até 0,3	Normal	Normal
Fator de Elevação de Temperatura (FET)	Classificação Térmica	Providências																
0,9 ou mais	Severamente aquecido	Manutenção imediata																
0,6 a 0,9	Muito aquecido	Manutenção programada																
0,3 a 0,6	Aquecido	Em observação																
Até 0,3	Normal	Normal																
OBSERVAÇÕES:																		

6. Aplicação da Técnica de Manutenção Preditiva

O marco do início da aplicação da técnica de inspeção termográfica infravermelho no Centro Experimental Aramar, pertencente ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo foi fevereiro de 2009 quando foi adquirido um equipamento de inspeção de termografia infravermelho e a participação de dois funcionários em treinamento de formação, qualificação e certificação de inspetores de termografia nível I. As primeiras inspeções foram realizadas considerando apenas a análise qualitativa em equipamentos instalados nas unidades industriais da empresa.

Como todas as novas técnicas, primeiramente têm necessidade de provar sua funcionalidade e demonstrar que existe para auxiliar no processo de manutenção elétrica das instalações.

6.1 Aplicações por Análise Qualitativa

Como primeiros passos na aplicação da técnica como alvo inicial foi escolhida a unidade da estação de tratamento de esgoto da empresa.

Trata-se de um painel equipado com um inversor de frequência que aciona um motor acoplado a um compressor de ar com características de baixa pressão ($0,5 \text{ kgf/cm}^2$), porém com alta vazão de $2040 \text{ m}^3/\text{h}$, responsável por suprir o processo de tratamento de esgoto doméstico da empresa. A particularidade e motivo da escolha do painel foram pela sua importância ao processo, pois o mesmo acionamento pode alimentar dois conjuntos motor / compressor alternadamente e sua criticalidade ao processo, trata-se de um equipamento extremamente crítico ao de tratamento de esgoto.

A imagem térmica registrada de um componente do painel demonstrou uma variação na temperatura do condutor na fase T, de um circuito trifásico, conectado ao componente “contator de potencia” que alimenta o motor elétrico do conjunto compressor. A figura abaixo apresenta a imagem térmica analisada.

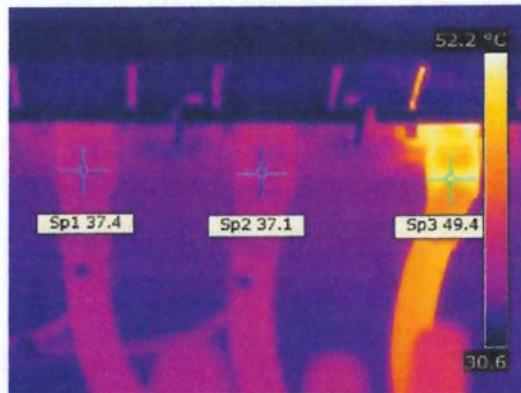


Figura 18 – Imagem térmica de painel elétrico do inversor de freqüência.

Outra aplicação de análise qualitativa foi realizada no painel de acionamento, comando e proteção das unidades de resfriamento de líquido (CHILLER), identificado como I394-PN001B, responsáveis pelo suprimento de água gelada para o sistema de ar condicionado de conforto e processos de três unidades industriais da empresa, que pode ser observado na imagem térmica ou termograma da figura abaixo.

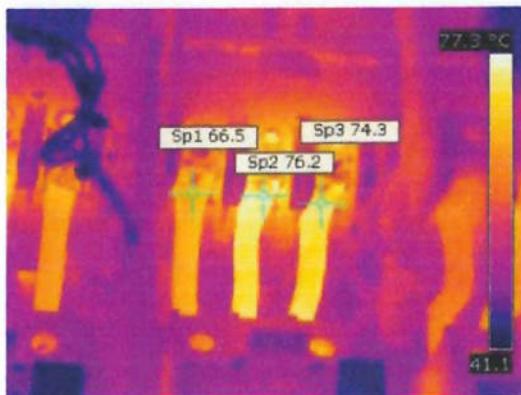


Figura 19 – Imagem térmica de conexão do contator e relé térmico.

Na análise comparativa de temperatura dos condutores do circuito trifásico da conexão do contator e relé térmico efetuado com condutor flexível, pode ser observada uma variação de temperatura nos condutores variando de 7,8°C a 9,7°C, que caracteriza a existência de uma anomalia. Foi realizada a intervenção e constatada a existência de má conexão e indícios de corrosão por mau contato e alta temperatura. Foi necessária a substituição do condutor e remoção de pontos de deposição de material no relé térmico e contator.

Mais um exemplo da aplicação de análise qualitativa foi realizado no quadro local das unidades de resfriamento de líquido, identificado como I394-CH001B da aplicação anterior que pode ser observado na imagem térmica ou termograma da figura abaixo.

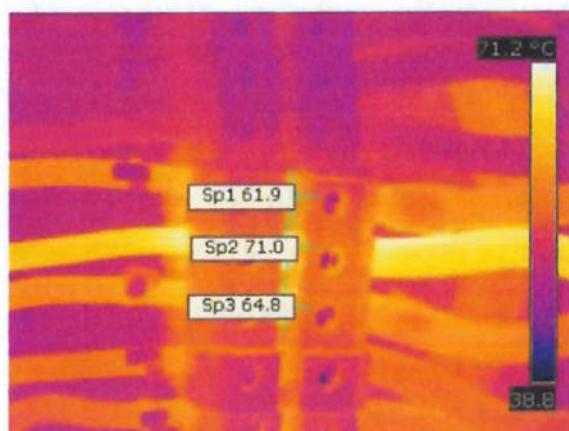


Figura 20 – Imagem térmica de conexão régua de borne de painel.

Trata-se da régua de borne de conexão da alimentação dos compressores semi-herméticos de refrigeração, onde pode ser verificada também a diferença nas temperaturas dos condutores, que por questão de ser carga trifásica necessariamente estão submetidos às mesmas correntes, logo as temperaturas deveriam estar muito próximas, com variações possíveis de até 10% entre as fases. Foi realizada a intervenção e constatada a existência de má conexão e indícios de corrosão por mau contato. Foi necessária a substituição do borne e retirada das extremidades dos condutores.

6.2 Aplicações por Análise Quantitativa

Para a aplicação de análise quantitativa foram utilizados os exemplos apresentados anteriormente e outros casos interessantes.

1º Caso Analisado: referente ao problema da conexão do contator e relé térmico do painel de acionamento, comando e proteção das unidades de resfriamento de líquido (CHILLER), identificado como I394-PN001B, foram realizadas as análises

conforme procedimentos descritos na seção correspondente deste trabalho, preenchidos o relatório de inspeção termográfica que está apresentado no anexo, realizado conforme descrito na sequência abaixo.

Aplicado as correções referentes à emissividade do material isolante do condutor (0,98), e corrigida a distância de medição (0,4 m), resultando na imagem térmica ou termograma da figura abaixo.



Figura 21 – Imagem térmica corrigida da conexão do contator e relé térmico.

Com aplicação dos valores da corrente elétrica medida, corrente máxima, temperatura máxima que o componente pode atingir, e temperatura ambiente, foram calculados os parâmetros de elevação máxima de temperatura corrigida (51,26°C) e fator de elevação temperatura (0,93), onde de acordo com a Tabela de Avaliação de Severidade e Recomendação (Tabela 3), pode ser avaliada a anomalia, classificada como “severamente aquecido”, e como providência a recomendação da “manutenção imediata” da anormalidade.

2º Caso Analisado: referente à anomalia na régua de borne do quadro local das unidades de resfriamento de líquido, identificado como I394-CH001B, realizadas as análises conforme procedimentos descritos na seção correspondente deste trabalho, preenchidos o relatório de inspeção termográfica que está apresentado no anexo, realizado conforme descrito na sequência abaixo.

Da mesma forma foram aplicadas as correções referentes à emissividade do material isolante do condutor (0,98), e corrigida a distância de medição (0,4 m), resultando na imagem térmica ou termograma da figura abaixo.



Figura 22 – Imagem térmica corrigida da conexão régua de borne de painel.

Com aplicação dos valores da corrente elétrica medida, corrente máxima, temperatura máxima que o componente pode atingir, e temperatura ambiente, foram calculados os parâmetros de elevação máxima de temperatura corrigida ($46,66^{\circ}\text{C}$) e fator de elevação temperatura (0,85). De acordo com a Tabela de Avaliação de Severidade e Recomendação (Tabela 3), pode ser avaliada a anomalia, classificada como “muito aquecido”, e como providência a recomendação da “manutenção programada” da anormalidade.

3º Caso Analisado: referente ao motor elétrico identificado como I394-MBO-102A, apresenta uma anomalia na caixa de ligação, conforme termogramas da figuras abaixo.

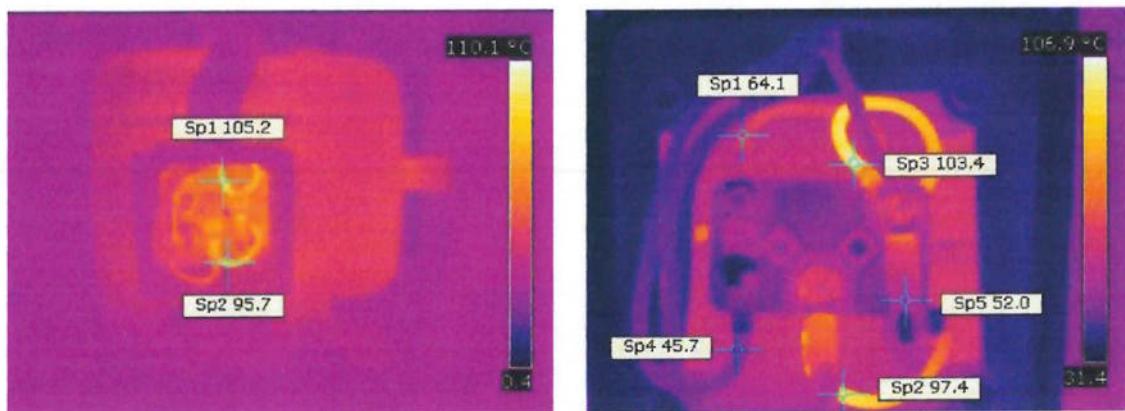


Figura 23 – Termogramas da caixa de ligação do motor elétrico.

Com aplicação dos valores da corrente elétrica medida, corrente máxima, temperatura máxima que o componente pode atingir, e temperatura ambiente, foram

calculados os parâmetros de elevação máxima de temperatura corrigida ($88,05^{\circ}\text{C}$) e fator de elevação temperatura (1,17). De acordo com a Tabela de Avaliação de Severidade e Recomendação (Tabela 3), pode ser avaliada a anomalia, classificada como “severamente aquecido”, e como providência a recomendação da “manutenção imediata” da anormalidade. A intervenção foi realizada com a retirada do motor para substituição dos condutores de ligação que acessam as suas bobinas antes da ocorrência da queima total ou parcial do equipamento.

4º Caso Analisado: referente ao fusível de alimentação do circuito de potência da unidade de resfriamento de líquido, identificado como I394-CH001A, apresenta uma anomalia na conexão da base do fusível, conforme termogramas da figuras abaixo.

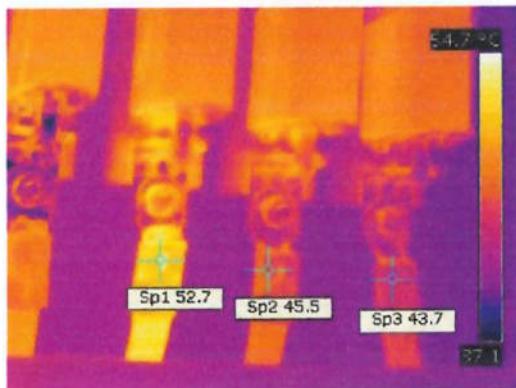


Figura 24 – Termograma da base de fusível tipo – NH.

Com aplicação dos valores da corrente elétrica medida, corrente máxima, temperatura máxima que o componente pode atingir, e temperatura ambiente, foram calculados os parâmetros de elevação máxima de temperatura corrigida ($38,73^{\circ}\text{C}$) e fator de elevação temperatura (0,77). De acordo com a Tabela de Avaliação de Severidade e Recomendação (Tabela 3), pode ser avaliada a anomalia, classificada como “muito aquecido”, e como providência a recomendação da “manutenção programada” da anormalidade. A intervenção foi realizada com a retirada do motor para substituição dos condutores de ligação que acessam as suas bobinas antes da ocorrência da queima total ou parcial do equipamento.

5º Caso Analisado: referente ao efeito da reflexão que ocorre de fontes de radiação térmica próxima ao componente avaliado, conforme termogramas da figuras abaixo.



Figura 25 – Termograma da base fixação de contator com reflexão.

Pode ser observado o fenômeno da reflexão na superfície polida do trilho de fixação do contator (Sp2 36,2°C), esse fenômeno pode provocar erro de interpretação em uma análise e também o aquecimento da bobina do contator (Sp1 37,9°C). No termograma seguinte foi deslocada a câmera para uma posição onde a reflexão foi reduzida, mas ainda podendo induzir ao erro.



Figura 26 – Termograma da base fixação de contator com a reflexão reduzida.

Agora pode ser observado o fenômeno da reflexão reduzido na superfície polida do trilho de fixação do contator (Sp2 28,7°C), esse fenômeno pode provocar erro de interpretação em uma análise e também o aquecimento da bobina do contator (Sp1 39,8°C).

7. Conclusão

A aplicação da termografia infravermelha como ferramenta de manutenção preditiva em sistemas elétricos industriais demonstrou ser extremamente efetiva, proporcionando a previsão das falhas e consequentemente as possíveis perdas de produção. Pode-se constatar, a partir dos resultados apresentados, que a aplicação da termografia infravermelha na manutenção de sistemas elétricos industriais, apresentou resultados satisfatórios e com alta confiabilidade nas duas metodologias de análises sugeridas, podendo-se atingir o diagnóstico do componente elétrico defeituoso. Torna-se extremamente importante destacar a necessidade do treinamento de formação, capacitação e certificação dos inspetores de termografia para a empresa, pois toda medição e registro da imagem, análise e diagnóstico da anomalia dependem fundamentalmente o inspetor termografista. Pode-se afirmar que aplicação da termografia como ferramenta de manutenção preditiva alcançou os objetivos para os quais foram propostos neste trabalho: a máxima operacionalidade da ferramenta, a máxima disponibilidade dos equipamentos e a consequente confiabilidade do sistema elétrico industrial. O procedimento de inspeção de termografia em equipamentos elétricos, apresentado na seção 5 foi elaborado e adaptado a partir de práticas de várias empresas, pode servir como um documento base para procedimentos mais específicos para empresas do setor industrial, adaptando-se conforme necessidade. Os procedimentos de avaliação das anormalidades podem futuramente ser alterados, de acordo com a base de dados das aplicações realizadas.

Certamente que esse trabalho motivou o interesse de toda a equipe da manutenção da empresa, nas modalidades de elétrica, mecânica, eletrônica e também a área de processo, o que ocasionará trabalhos, aplicações e novos desafios.

Referências Bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro, 1997.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; NBR-5462: Confiabilidade e Mantenibilidade. Rio de Janeiro, 1994.

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

Chrzanowski, K.; "Non-Contact Thermometry – Measurement Errors", SPIE PL, Research and development Treaties, 2001.

Eletronuclear, Usina Nuclear de Angra dos Reis; Manutenção Preditiva por Termografia – PT-T 12 Rev. 01 UNAR, 1999.

Flir Systems, Câmera FLIR T200 – Manual do utilizador – Publicação 1558809 [Português] Rev. A288 – 30 de Junho, 2008.

Ferreira, A. A.; Gestão Empresarial de Taylor aos Nossos Dias: Evolução e Tendências da Moderna Administração de Empresas. São Paulo: Pioneira, 2000.

Ferreira, Salomão D. A. A.; Estudos da Aplicação da Termografia como Ferramenta de Manutenção em Sistemas Elétricos de Potência. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2002.

Furnas, Furnas Centrais Elétricas S.A.; Medição de Temperatura com Equipamento Termográfico. FURNAS 1974.

Ghosh, Soumitra K., Galeski, Paul J.; "Criteria for Selection of Infrared Camera System"; Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE 1994.

Holst, G. C.; Common Sense to Approach to Thermal Imaging; JCD Publishing and SPIE Optical Engineering Press, 2000.

Madding, Robert P.; Emissivity Measurement and Temperature Correction Accuracy Considerations. Infrared Training Center, 2002.

Maldaque, Xavier P.V.; Moore, Patrick O.; Infrared and Thermal Testing – Vol. 3; ASNT 2001.

Monchy, F; A Função Manutenção. São Paulo: EBRAS/DURBAN, 1989.

Moubray, J.; RCM II: Manutenção Centrada em Confiabilidade. Grã Bretanha: Biddles Ltd., Guilford and King's Lynn, 2000. Edição Brasileira.

Petrobras, Ensaio Não Destrutivo - Termografia – N-2472 – Rev. C. Petrobras, Fev/2007.

Petrobras, Inspeção Termográfica em Sistemas Elétricos – N-2475 – Rev. C. Petrobras, Fev/2005.

Pinto, A. K.; Xavier, J. A. N. Manutenção: função estratégica. Rio de Janeiro: Quality Mark, 4º Reimpressão, 2007.

Rogalski, A; Chrzanowski; Infrared Devices and Techniques. Opto-Eletronics Rev. 10, nº2, 2002.

Richards, A.; "Alien Vision – Exploring the Electromagnetic Spectrum with Imaging Technology"; SPIE Press 2001.

Santos, Laerte; Barbosa, Luis C.; Araújo, R. A; Sinescalchi, R.T.; "As Diferentes Visões sobre a Aplicação da Termografia no Sistema Elétrico de Furnas e as Ações Adotadas para Buscar a Convergência entre Elas, com a Máxima Operacionalidade, Operacionalidade e Confiabilidade do Sistema"; XVIII SNPTEE 2005.

Santos, Laerte; "Termografia Infravermelha em Subestações de Alta Tensão Desabrigadas". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá, 2006.

Sefrim, R. J.; Defining the Elements for Successful Infrared Thermography; IR/INFO 1995.

SKF, Procedimento para Inspeção Termográfica em Equipamentos Elétricos. Rev. 0, SKF, 2005.

Snell, John; Best Practices for Using Infrared Thermography for Condition Monitoring of Oil-filled Utility Assets; Snell Infrared, 2005.

Veratti, A. B.; Termografia – Princípios e Aplicações; AGA 1984.

Veratti, A. B.; ICON Tecnologia – A Qualidade em Termografia: Objetivos e Metodologias de Critérios de medição em análise Termográficas.

Verdini, E.; Veratti, A. B.; Termografia Aplicada em Produção de Petróleo, Revista Eletricidade Moderna, Nº 316, Julho 2000.

ANEXO I

DEPARTAMENTO DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL DIVISÃO DE MANUTENÇÃO ELÉTRICA				
RELATÓRIO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA				
NUMERO DO RELATORIO:	RIT.ETE-001/09	DATA:	13/02/2009	
DATA DE INSPEÇÃO:	10/02/2009			
FUNCIONÁRIOS				
NOME:	Flávio Scruph Júnior	MATRICULA:	MI22-00	
NOME:	José Augusto de Aguiar	MATRICULA:	MI2-00	
EQUIPAMENTO UTILIZADO				
FABRICANTE:	FLIR	MODELO:	T200 - Western	
N.º SÉRIE:	402001930	LENTE:	25°X19°	
DADOS AMBIENTAIS				
TEMPERATURA AMBIENTE:	25	UMIDADE (%):	50	
PONTO DA ANOMALIA TÉRMICA				
UNIDADE INDUSTRIAL:	Estação de Tratamento de Esgoto do CEA			
SISTEMA :	Acionamento do Soprador de Ar	TAG:	I242 PN IV001	
EQUIPAMENTO:	Painel de Acionamento	FABRICANTE:	Rumo Engenharia	
MODELO:				
IDENTIFICAÇÃO DO PONTO:	Fase T da interligação do contator com chave fusível			
CORRENTE MEDIDA:	85	CORRENTE MÁXIMA:	104	
EMISSIVIDADE:	0,98 - condutor com isolação em PVC			
TEMPERATURA DO PONTO:	49,40	TEMPERATURA MÁXIMA COMPONENTE:	80,00	
ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	36,53	FATOR ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	0,66	
IMAGEM				
IMAGEM VISIVEL		IMAGEM TERMOGRAFICA		
RECOMENDAÇÕES:		Fator de Elevação de Temperatura (FET)		
Programar para avaliar a situação dos condutores e avaliar a situação do contator e relé termico.		0,9 ou mais	Severamente aquecido	Manutenção imediata
		0,6 a 0,9	Muito aquecido	Manutenção programada
		0,3 a 0,6	Aquecido	Em observação
		Até 0,3	Normal	Normal
OBSERVAÇÕES:				
<p><i>(This row contains four empty lines for observation notes.)</i></p>				

ANEXO I

DEPARTAMENTO DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL DIVISÃO DE MANUTENÇÃO ELÉTRICA			
RELATÓRIO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA			
NUMERO DO RELATORIO:	RIT.ETE-002/09	DATA:	19/02/2009
DATA DE INSPEÇÃO:	17/02/2009		
FUNCIONÁRIOS			
NOME:	Flávio Scruph Júnior	MATRICULA:	MI22-00
NOME:	José Augusto de Aguiar	MATRICULA:	MI2-00
EQUIPAMENTO UTILIZADO			
FABRICANTE:	FLIR	MODELO:	T200 - Western
N.º SÉRIE:	402001930	LENTE:	25°X19°
DADOS AMBIENTAIS			
TEMPERATURA AMBIENTE:	25	UMIDADE (%):	50
PONTO DA ANOMALIA TÉRMICA			
UNIDADE INDUSTRIAL:	Estação de Tratamento de Esgoto do CEA		
SISTEMA :	Acionamento do Soprador de Ar	TAG:	I242 PN IV001
EQUIPAMENTO:	Painel de Acionamento	FABRICANTE:	Rumo Engenharia
MODELO:			
IDENTIFICAÇÃO DO PONTO:	Fase T da interligação do contator com chave fusível		
CORRENTE MEDIDA:	85	CORRENTE MÁXIMA:	104
EMISSIVIDADE:	0,98 - condutor com isolamento em PVC		
TEMPERATURA DO PONTO:	31,20	TEMPERATURA MÁXIMA COMPONENTE:	80,00
ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	9,28	FATOR ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	0,17
IMAGEM			
IMAGEM VISÍVEL	IMAGEM TERMOGRAFICA		
RECOMENDAÇÕES:			
Manutenção foi executada com sucesso.	Fator de Elevação de Temperatura (FET)	Classificação Térmica	Providências
	0,9 ou mais	Severamente aquecido	Manutenção imediata
	0,6 a 0,9	Muito aquecido	Manutenção programada
	0,3 a 0,6	Aquecido	Em observação
	Até 0,3	Normal	Normal
OBSERVAÇÕES:	Foi verificado que o conjunto de fixação do terminal da chave fusível estava com pouco aperto. Executado inspeção nas terminações do cabo e chave fusível não apresentando sinais de oxidação ou corrosão.		

ANEXO I

DEPARTAMENTO DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL DIVISÃO DE MANUTENÇÃO ELÉTRICA																		
RELATÓRIO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA																		
NUMERO DO RELATORIO:	RIT.CUF-001/09	DATA:	13/02/2009															
DATA DE INSPEÇÃO:	10/02/2009																	
FUNCIONÁRIOS																		
NOME:	Flávio Scruph Júnior	MATRICULA:	MI22-00															
NOME:	José Augusto de Aguiar	MATRICULA:	MI2-00															
EQUIPAMENTO UTILIZADO																		
FABRICANTE:	FLIR	MODELO:	T200 - Western															
N.º SÉRIE:	402001930	LENTE:	25°X19°															
DADOS AMBIENTAIS																		
TEMPERATURA AMBIENTE:	30	UMIDADE (%):	60															
PONTO DA ANOMALIA TÉRMICA																		
UNIDADE INDUSTRIAL:	Central de Utilidades das Fábricas																	
SISTEMA :	Agua Gelada	TAG:	I394MBO102A															
EQUIPAMENTO:	Motor Elétrico	FABRICANTE:	WEG															
MODELO:	160M																	
IDENTIFICAÇÃO DO PONTO:	Caixa de ligação, condutor interno, fases S e T. - 105 °C																	
CORRENTE MEDIDA:	21	CORRENTE MÁXIMA:	23															
EMISSIVIDADE:	0,98 (Isolação PVC)																	
TEMPERATURA DO PONTO:	103,40	TEMPERATURA MÁXIMA COMPONENTE:	105,00															
ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	88,05	FATOR ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	1,17															
IMAGEM																		
IMAGEM VISÍVEL	IMAGEM TERMOGRAFICA																	
																		
RECOMENDAÇÕES:	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Fator de Elevação de Temperatura (FET)</th> <th>Classificação Térmica</th> <th>Providências</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,9 ou mais</td> <td>Severamente aquecido</td> <td>Manutenção imediata</td> </tr> <tr> <td>0,6 a 0,9</td> <td>Muito aquecido</td> <td>Manutenção programada</td> </tr> <tr> <td>0,3 a 0,6</td> <td>Aquecido</td> <td>Em observação</td> </tr> <tr> <td>Até 0,3</td> <td>Normal</td> <td>Normal</td> </tr> </tbody> </table>			Fator de Elevação de Temperatura (FET)	Classificação Térmica	Providências	0,9 ou mais	Severamente aquecido	Manutenção imediata	0,6 a 0,9	Muito aquecido	Manutenção programada	0,3 a 0,6	Aquecido	Em observação	Até 0,3	Normal	Normal
Fator de Elevação de Temperatura (FET)	Classificação Térmica	Providências																
0,9 ou mais	Severamente aquecido	Manutenção imediata																
0,6 a 0,9	Muito aquecido	Manutenção programada																
0,3 a 0,6	Aquecido	Em observação																
Até 0,3	Normal	Normal																
OBSERVAÇÕES:	MANUTENÇÃO IMEDIATA																	
<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>																		

ANEXO I

**DEPARTAMENTO DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL
DIVISÃO DE MANUTENÇÃO ELÉTRICA**
RELATÓRIO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

NUMERO DO RELATORIO:	RIT.CUF-002/09	DATA:	13/02/2009
DATA DE INSPECÃO:	10/02/2009		

FUNCIONÁRIOS

NOME: Flávio Scruph Júnior	MATRICULA: MI22-00
NOME: José Augusto de Aguiar	MATRICULA: MI2-00

EQUIPAMENTO UTILIZADO

FABRICANTE: FLIR	MODELO: T200 - Western
N.º SÉRIE: 402001930	LENTE: 25° X 19°

DADOS AMBIENTAIS

TEMPERATURA AMBIENTE:	30	UMIDADE (%):	50
-----------------------	----	--------------	----

PONTO DA ANOMALIA TÉRMICA

UNIDADE INDUSTRIAL:	Central de Utilidades das Fábricas	TAG:	I394PN001B
SISTEMA :	Central de Água Gelada	FABRICANTE:	Telemecanique
EQUIPAMENTO:	Contator e Relé Térmico		
MODELO:			
IDENTIFICAÇÃO DO PONTO:	Fases S e T da interligação com relé térmico - Circuito 5.2 - CH 001B		
CORRENTE MEDIDA:	48	CORRENTE MÁXIMA:	64
EMISSIVIDADE:	0,98 - condutor com isolamento em PVC		

TEMPERATURA DO PONTO:	72,00	TEMPERATURA MÁXIMA COMPONENTE:	80,00
ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	74,67	FATOR ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	1,49

IMAGEM

RECOMENDAÇÕES: Substituição dos condutores imediatamente e avaliar a situação do contator e relé termico.	Fator de Elevação de Temperatura (FET)	Classificação Térmica	Providências
		0,9 ou mais	Severamente aquecido
	0,6 a 0,9	Muito aquecido	Manutenção programada
	0,3 a 0,6	Aquecido	Em observação
	Até 0,3	Normal	Normal

OBSERVAÇÕES:	MANUTENÇÃO IMEDIATA

ANEXO I

DEPARTAMENTO DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL DIVISÃO DE MANUTENÇÃO ELÉTRICA			
RELATÓRIO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA			
NUMERO DO RELATORIO:	RIT.CUF-003/09	DATA:	13/02/2009
DATA DE INSPEÇÃO: 10/02/2009			
FUNCIONÁRIOS			
NOME: Flávio Scruph Júnior	MATRÍCULA: MI22-00		
NOME: José Augusto de Aguiar	MATRÍCULA: MI2-00		
EQUIPAMENTO UTILIZADO			
FABRICANTE: FLIR	MODELO: T200 - Western		
N.º SÉRIE: 402001930	LENTE: 25°X19°		
DADOS AMBIENTAIS			
TEMPERATURA AMBIENTE:	30	UMIDADE (%):	50
PONTO DA ANOMALIA TÉRMICA			
UNIDADE INDUSTRIAL:	Central de Utilidades das Fábricas		
SISTEMA :	Central de Água Gelada	TAG:	I394CH001B
EQUIPAMENTO:	Compressor Chiller	FABRICANTE:	Bitzer Frigor
MODELO:			
IDENTIFICAÇÃO DO PONTO:	Regua de conexão do Compressor fases R2, S2, T2		
CORRENTE MEDIDA:	48	CORRENTE MÁXIMA:	64
EMISSIVIDADE:	0,98 - condutor com isolamento em PVC		
TEMPERATURA DO PONTO:	68,10	TEMPERATURA MÁXIMA COMPONENTE:	90,00
ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	67,73	FATOR ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	1,13
IMAGEM			
IMAGEM VISIVEL	IMAGEM TERMOGRAFICA		
RECOMENDAÇÕES: Avaliação imediata dos condutores, bornes, substituir caso necessário.	Fator de Elevação de Temperatura (FET)	Classificação Térmica	Providências
	0,9 ou mais	Severamente aquecido	Manutenção imediata
	0,6 a 0,9	Muito aquecido	Manutenção programada
	0,3 a 0,6	Aquecido	Em observação
	Até 0,3	Normal	Normal
OBSERVAÇÕES: Manutenção imediata			

ANEXO I

DEPARTAMENTO DE MANUTENÇÃO INDUSTRIAL DIVISÃO DE MANUTENÇÃO ELÉTRICA			
RELATÓRIO DE INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA			
NUMERO DO RELATORIO:	RIT.CUF-004/09	DATA:	14/02/2009
DATA DE INSPEÇÃO:	10/02/2009		
FUNCIONÁRIOS			
NOME:	Flávio Scruph Júnior	MATRÍCULA:	MI22-00
NOME:	José Augusto de Aguiar	MATRÍCULA:	MI2-00
EQUIPAMENTO UTILIZADO			
FABRICANTE:	FLIR	MODELO:	T200 - Western
N.º SÉRIE:	402001930	LENTE:	25° X 19°
DADOS AMBIENTAIS			
TEMPERATURA AMBIENTE:	30	UMIDADE (%):	50
PONTO DA ANOMALIA TÉRMICA			
UNIDADE INDUSTRIAL:	Central de Utilidades das Fábricas		
SISTEMA :	Central de Água Gelada	TAG:	I394PN001A
EQUIPAMENTO:	Base de Fusível	FABRICANTE:	Siemens
MODELO:			
IDENTIFICAÇÃO DO PONTO:	Fases R da conexão de saída de alimentação do - Circuito 4 - CH 001A		
CORRENTE MEDIDA:	49	CORRENTE MÁXIMA:	64
EMISSIVIDADE:	0,98 - condutor com isolamento em PVC		
TEMPERATURA DO PONTO:	52,70	TEMPERATURA MÁXIMA COMPONENTE:	80,00
ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	38,73	FATOR ELEVAÇÃO MÁXIMA DE TEMPERATURA:	0,77
IMAGEM			
IMAGEM VISIVEL		IMAGEM TERMOGRAFICA	
RECOMENDAÇÕES:		Fator de Elevação de Temperatura (FET)	
Programar verificação da conexão de saída e avaliar a situação dos terminais e condutor.		0,9 ou mais	Severamente aquecido
		0,6 a 0,9	Muito aquecido
		0,3 a 0,6	Aquecido
		Até 0,3	Normal
OBSERVAÇÕES:		MANUTENÇÃO PROGRAMADA	