

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O acompanhamento da evolução da temperatura de equipamentos e sistemas de usinas hidrelétricas e subestações se constitui em recurso para o planejamento da sua manutenção, preditiva ou corretiva. Quando a temperatura se eleva a valores superiores aos especificados pelo fabricante dos equipamentos, ou projetista dos sistemas, considera-se que deve ter havido uma deterioração da sua funcionalidade, podendo levar a uma perda do desempenho, e portanto, procedimentos de manutenção devem ser aplicados para restauração das suas características originais. Quanto mais cedo for detectada a anormalidade, menores serão os prejuízos provocados pela interrupção do funcionamento destes equipamentos e menores serão os custos de manutenção. Sendo assim, o acompanhamento contínuo é um recurso importante de monitoramento da sua funcionalidade. Este pode ser feito com a instalação de sensores tradicionais, como termopares e termo-resistências, o que requer muitas vezes a parada das máquinas para sua colocação e manutenção, com os prejuízos associados. Além da necessidade da inserção de equipamentos para a conversão e envio do valor adquirido para supervisores remotos. Ultimamente, a tecnologia de medição remota de temperatura tem se desenvolvido de modo a se tornar importante para o diagnóstico de mau funcionamento.

A termografia analisa a radiação infravermelha emitida pelo alvo, objeto da análise, e interpreta o sinal, associando uma temperatura ao mesmo, pelas leis da transferência de calor por Radiação. Os termovisores indicam com uma razoável exatidão, o valor de temperatura quando as condições de observação são ideais, isto é, uniformidade de temperatura e conhecimento das propriedades radiantes da superfície emissora. Quando a superfície não é uniforme em temperatura e as propriedades superficiais do alvo não são conhecidas, um problema de interpretação do sinal surge, fazendo com que esta ferramenta se torne mais qualitativa do que quantitativa. Muitas vezes, por exemplo, existe entre o alvo e o termovisor uma janela de observação, e sua transparência deve ser levada em consideração.

Assim, o uso do termovisor para indicar com uma incerteza adequada a temperatura, depende de uma calibração e da interpretação do seu sinal em diferentes condições de operação, normalmente diferentes das de calibração.

Pretende-se nesta dissertação, desenvolver uma infra-estrutura para calibração de termovisores e interpretar adequadamente o sinal infravermelho. Para isto, foi desenvolvida uma metodologia para analisar os resultados, consistindo da calibração em condições ideais, determinação das propriedades superficiais de Radiação (usando também o próprio termovisor e equipamentos auxiliares), e procedimentos para a separação dos diferentes sinais, calculando a influência de cada um sobre a incerteza da temperatura desejada, o que será objeto principal desta análise. As necessidades de sensoriamento da temperatura, que utilizou-se são:

[1] Temperatura dos rotores dos geradores	: 20 a 150 °C
[2] Temperatura dos enrolamentos estatóricos	: 20 a 120 °C
[3] Temperatura das juntas de vedação dos eixos	: 20 a 150 °C
[4] Temperatura de resfriadores de ar	: 20 a 110 °C
[5] Temperatura de óleo e enrolamento de transformadores	: 20 a 150 °C
[6] Temperatura de contatos elétricos	: até 350 °C

Os valores acima foram atribuídos de acordo com a experiência prática da Light. As incertezas desejadas para os itens 1 a 5 são de 2%. Já para o item 6 aumenta para 5%.

A indicação de temperatura pelo termovisor, segundo o fabricante, tem uma incerteza de ± 2 °C, ou 2 %, o que for maior. O termovisor tem o recurso de ajuste da emissividade para a superfície alvo, que deve ser conhecida para que se faça sua calibração.

A emissividade da superfície pode ser estimada através de duas metodologias.

- 1ª metodologia: Inicialmente, o termovisor é calibrado tomando como referência um corpo negro existente no INMETRO na faixa da temperatura ambiente até 150 °C. Após esta fase, o termovisor foi utilizado para medição da temperatura da superfície de uma placa, pintada de preto e colocada em um banho de temperatura controlada. Sua temperatura foi medida com termopares calibrados referenciados a

padrões rastreados à Rede Brasileira de Calibração. Variando-se a emissividade ajustada no termovisor até que a temperatura conhecida do corpo negro coincida com a temperatura indicada pelo termovisor, pode-se estimar a emissividade da superfície.

- 2ª metodologia: Através de um balanço térmico em um sistema que consiste de dois cilindros concêntricos, com as superfícies do espaço anular pintadas de preto, e uma resistência elétrica inserida no cilindro interno para o fornecimento de calor ao sistema. Este pode ser considerado radial, pois as bases estão isoladas. As bases são consideradas adiabáticas. Dessa forma toda energia térmica é transmitida para a superfície do cilindro mais externo, e a elevação de temperatura correspondente é medida com o termovisor.

Através da comparação entre os valores medidos pela 1ª e a 2ª metodologia, a emissividade da superfície pode ser determinada, e ajustada no termovisor para medição de temperaturas com superfícies semelhantes.

1.2. Monitoramento atual da temperatura dos equipamentos elétricos

Realizamos uma análise de algumas normas e procedimentos técnicos da Light Energia S.A. e CELG – Companhia Energética de Goiás, empresas de energia elétrica, com relação aos limites de temperatura incluídos nas mesmas. Escolhemos também trabalhos técnicos que relacionam o desempenho dos equipamentos e sua temperatura de operação.

Na análise agrupamos as normas que apesar de terem como objetivo equipamentos de finalidades diferentes, sua definição de limites operativos e de ensaio são relacionados para as mesmas normas ABNT. Dessa forma um equipamento tipo de cada grupo foi escolhido como objeto de análise. Na Fig. (1) temos um diagrama unifilar típico da representação dos equipamentos básicos envolvidos em um processo de distribuição, e nas Fig. (2), (3), (4), (5) e (6) as respectivas imagens representados no unifilar.

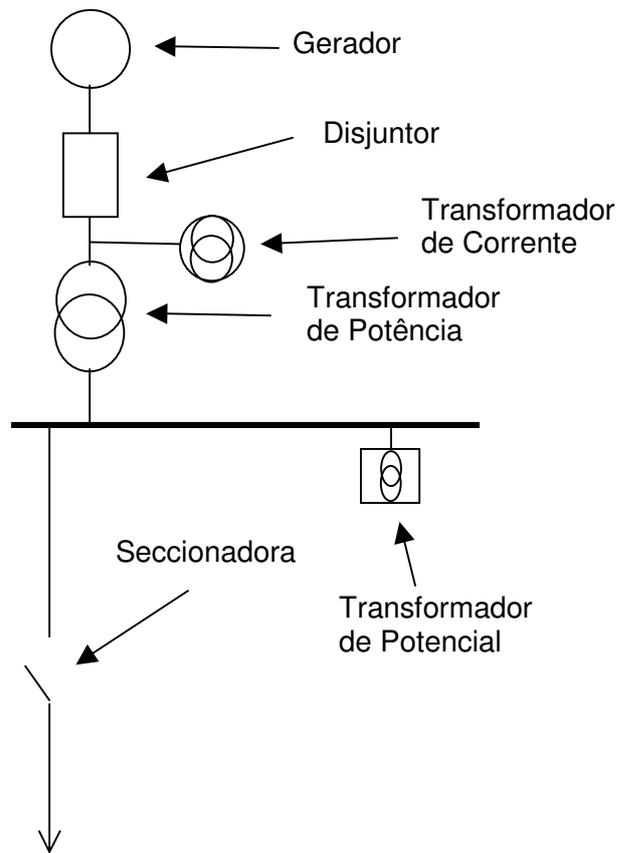


Figura 1 - Unifilar Típico



Figura 2 - Transformador de corrente



Figura 3 - Transformador de potencial indutivo



Figura 4 - Transformador de potência



Figura 5 - Disjuntor a gás SF6



Figura 6 - Seccionadora

Na tabela (1) encontramos um conjunto de normas da ABNT que são base para as normas Light e CELG citadas nas tabelas (2) e (3).

Tabela 1 - ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NORMA	DESCRIÇÃO
NBR IEC 60694	“Especificações comuns para normas de equipamentos de manobra de alta-tensão e mecanismos de comando”;
NBR IEC 62271	“Seccionador, chaves de terra e aterramento rápido”;
NBR 7118	“Disjuntores de alta-tensão”;
NBR 6856	“Transformador de corrente”;
NBR 6855	“Transformador de potencial indutivo”;
NBR 5356	“Transformador de potência”;
NBR 7034	“Materiais isolantes elétricos – classificação térmica”.
NBR 5416	“Aplicação de cargas em transformadores de potência – Procedimento”
NBR 5034	“Buchas para tensões alternadas superiores a 1kV”

NBR – Normas Brasileiras de Referência

Tabela 2 – Normas da Light

NORMA	DESCRIÇÃO
PTL 0123GE/93-R0	“Critério de inspeção de equipamentos elétricos por termografia” - procedimento;
NTL 0177/94-R0	“Chave seccionadora unipolar de distribuição”;
NTL 0010/99-R3	“Transformador de potência acima de 3MVa”;
NTL 0053/99-R3	“Transformador de potencial para fins de proteção e medição”;
NTL 0106/99-R2	“Disjuntor de tensão nominal de 15Kv até 36,2 Kv – Uso externo”;
NTL 0112/99-R3	“Disjuntor com isolamento a gás SF6 para tensão nominal de 145 kV”;
NTL 0121/98-R3	“Transformador de corrente para fins de proteção e medição”.

PTL – Procedimento Técnico Light

NTL – Norma Técnica Light

Tabela 3 – Normas da CELG

NORMA	DESCRIÇÃO
NTC-55	“Chave seccionadora tripolar para operação em carga” – especificação;
NTC-45	“Disjuntor de alta tensão”.

NTC – Norma Técnica CELG

As normas foram escolhidas tomando como base os principais equipamentos existentes em uma estrutura de geração e distribuição de energia elétrica.

As empresas de energia elétrica possuem suas normas baseadas nas da ABNT, podendo ser complementadas por outras normas internacionais ou por posturas específicas de acordo com a necessidade.

Nestas normas encontramos vários aspectos intrínsecos a operação e ensaio dos equipamentos, entre eles os limites de temperatura para as condições normais de operação, as temperaturas de ensaio que os mesmos devem ser submetidos e as devidas correções caso os mesmos sejam submetidos a ambientes e/ou temperaturas diferentes dos definidos em norma.

Para certos tipos de equipamentos, como transformadores de potência e motores, as variações de temperatura podem promover uma maior ou menor disponibilidade na sua capacidade projetada. Já para outros equipamentos, como chaves seccionadoras, pode levar a perda da capacidade operativa do equipamento pela degradação da estrutura do equipamento, principalmente no que se refere aos seus contatos.

Pelas premissas citadas acima, nos leva a concluir pela necessidade da supervisão e controle da temperatura dos equipamentos, buscando usar cada vez mais materiais que suportem temperaturas elevadas, permitindo dessa forma uma folga operativa com relação aos limites de temperatura.

A temperatura que o equipamento está submetido é soma dos fatores térmicos incidentes, e é função dos seguintes fatores:

- Temperatura ambiente;
- Elevação de temperatura devido às perdas (elétricas, mecânicas e magnéticas).

Observamos que quaisquer perdas que venham a ocorrer, independente de sua origem, levam a um aquecimento, que somado ao valor da temperatura ambiente determina o valor que deve ser suportado pelos materiais utilizados.

Essas perdas, e particularmente as perdas joule, são função da corrente elétrica. Portanto, para reduzir a elevação de temperatura e conseqüente essas perdas, levando-se em consideração que as perdas dielétricas e as magnéticas não são facilmente modificadas, resulta que o controle da temperatura se dará pela redução da corrente, acarretando a uma diminuição do desempenho do equipamento.

$$P_j = I^2.R \quad (1)$$

onde:

P_j = perdas joule, medida em watts (W)

I = corrente circulante pelo equipamento (A)

R = resistência do meio circulante (Ω)

Os equipamentos têm seus valores operativos limitados às condições de temperatura a que estão sendo submetidos. Esses valores são baseados nas características materiais da sua construção e projeto.

A norma NBR 7034 tem como objetivo, servir de orientação na escolha dos materiais isolantes mais freqüentemente usados em equipamentos elétricos no tocante à sua classe de temperatura. A atribuição de determinada classe de temperatura ao material isolante não é obrigatória, uma vez que os limites de temperatura somente podem ser fixados com base em ensaios adequados ou pela experiência. A estabilidade térmica de alguns materiais pode ser alterada quando usados em combinações com outros. E a viabilidade do uso dos mesmos em determinadas classes está ligada ao tipo de operação a que será submetido. [1]

Dessa forma, os limites definidos nas normas procuram proteger o equipamento da sua degradação funcional, que pode levar a perda de seu desempenho. A quantificação dessa degradação, e o efeito no desempenho dependem da realização de ensaios adequados.

A norma NBR 7034 estabelece as classes de temperaturas dos materiais isolantes elétricos com base na temperatura máxima que podem suportar em condições normais de operação durante a sua vida útil.

As classes de temperatura dos materiais isolantes e as respectivas temperaturas limite são indicadas na tabela (4). [1]

Tabela 4 - Classes de temperatura

Classes	Temperaturas (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	acima de 180

As classes de temperatura agrupam materiais ou combinações de materiais que demonstre a sua capacidade de suportar satisfatoriamente a temperatura atribuída para aquela classe. Essa capacidade pode ser demonstrada através de ensaio ou pela experiência.

As diferenças de temperatura entre as classes são representadas na Tabela (5).

Tabela 5 - Diferença entre as classes de temperatura

Classes	Diferença de temperatura (°C)
Y e A	15
A e E	15
E e B	10
B e F	15
F e H	25

Comparando as diferenças de temperatura encontradas na Tabela (5), com uma incerteza de medição ± 2 °C, verificamos que para esta incerteza temos uma participação de até 20 % entre as faixas.

Dessa forma valores de incerteza maiores provocam o comprometimento significativo do acompanhamento dos limites de temperatura para os materiais isolantes usados nos equipamentos.

Para o Transformador de Potência, temos a norma NBR 5356, nela encontramos o item 4.1.1 – Temperatura do meio resfriamento (temperatura ambiente) que define as condições normais de funcionamento, para uma altitude não-superior a 1000 m. Vide as tabelas (6) e (7).

Tabela 6 - Transformadores resfriados a ar

Temperatura ambiente	Temperatura média em qualquer período de 24 h
não-superior a 40° C	não-superior 30° C

Tabela 7- Transformadores resfriados a água

Temperatura ambiente	Temperatura média em qualquer período de 24 h
não-superior a 30° C	não-superior 25° C

Obs.: “temperatura mínima da água de resfriamento não-inferior a 1°C, exceto se forem utilizados anti-congelantes adequados para funcionamento com temperatura de 20° C negativos.”[2]

O item 5.8 – Limite de elevação de temperatura, da mesma norma, define o procedimento que deve ser adotado para manter a elevação de temperatura do transformador dentro de valores compatíveis, Tabelas (6) e (7), não comprometendo dessa forma sua funcionalidade estabelecida em projeto.

Nesta situação para valor de potência nominal igual ou superior a 10MVA e temperaturas que não excedam 10 °C a redução deve corresponder ao excesso de temperatura. Para potência nominal inferior a 10 MVA, as reduções devem ser as seguintes:

- a) 5 °C, se o excesso de temperatura for igual ou inferior a 5° C;
- b) 10 °C, se o excesso de temperatura for superior a 5°C e igual ou inferior a 10°C.

Para temperaturas superiores a 10 °C em transformadores resfriados a ar e, 25 °C para transformadores resfriados a água, os limites de elevação de temperatura estão sujeitos a acordo entre fabricante e comprador.

Como foi observado para NBR 7034 anterior, podemos realizar a mesma análise. Considerando a tabela para transformadores resfriados a ar, Tabela (6); um excesso de temperatura de 5 °C e incertezas da ordem de ± 2 °C, teremos 40 % da margem definida para o excesso de temperatura, comprometida com a incerteza. Dessa forma o conhecimento da incerteza de medição do equipamento utilizado, tem papel fundamental na correção que deve ser aplicada para garantir tanto a segurança operacional do equipamento como sua vida útil.

Na literatura técnica encontramos poucos trabalhos que procuram determinar as possíveis alterações físicas do equipamento e a respectiva estimativa de redução da vida útil, caso os valores limites referenciados sejam ultrapassados.

Entre esses trabalhos, podemos citar a aplicação da “Lei de Arrhenius”, Eq. (2), que é utilizada para relacionar a taxa de envelhecimento do material isolante com o tempo e a temperatura que é submetido um transformador.

$$EV_u = K \times a^{\left(\frac{A+B}{T_{hs}+273}\right)} \quad (2)$$

Sendo:

- A e B constantes do material
- T_{hs} a temperatura do ponto mais quente do material, em °C
- K uma constante que depende da formulação
- $a = 10$ ou $e (=2,71828)$

Para a aplicação desta fórmula, utilizam-se valores de A e B característicos do material isolante empregado, e a temperatura T_{hs} é a temperatura do ponto mais quente (hottest spot).[3]

A equação utilizada para o cálculo da expectativa de vida do transformador é o encontrado na NBR 5416, a seguir (3).

$$EV_{NBR}(t) = 10^{\left(\frac{6972,15}{t+273} - 14,133\right)} \quad (3)$$

Assim, se o transformador trabalha com temperatura nominal do ponto mais quente ($T_{hs}=95$ °C) continuamente a sua vida será aproximadamente $V_N=70000$ horas (aproximadamente 8 anos).

Dessa forma, a cada hora trabalhada com 95 °C ele perde uma hora de vida. Se trabalhar com temperatura $T_i > T_N$, conforme ilustrado na Fig. (7), sua vida será V_i horas menor que V_N .

Em uma hora que ele trabalhar com T_i ele perderá:

$$\frac{V_N}{V_i} \text{ horas de vida} \quad (4)$$

Se na hora seguinte ele trabalhar com temperatura T_i^* :

$$\frac{V_N}{V_i^*} \text{ pu} \quad (5)$$

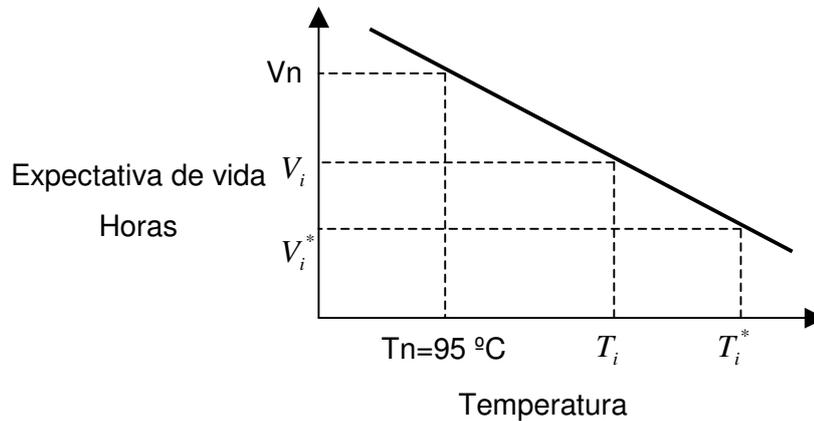


Figura 7 - Vida x Temperatura do ponto mais quente

E, portanto nas das horas consecutivas perderá:

$$\frac{V_N}{V_i} + \frac{V_N}{V_i^*} = V_N \cdot \left(\frac{1}{V_i} + \frac{1}{V_i^*} \right) \quad (6)$$

Quando a soma atingir o valor 1,0 exauriu a vida do transformador.

Outro tipo de trabalho que possui um interesse imediato nos projetos do setor elétrico, é o que relaciona a potência útil de um motor elétrico com a temperatura. Como normalmente esse equipamento fica em local abrigado, a deficiência de dissipação do calor no ambiente gerado pelo equipamento ou pelo seu funcionamento anormal, provoca uma diminuição da sua potência útil como podemos verificar na tabela abaixo.

Tabela – Fator de multiplicação (K) da potência útil em função da temperatura ambiente (T) em °C, para uma altitude de 1000 m.[4]

Tabela 8 – Fator de multiplicação x Temperatura ambiente

T	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
K	1,16	1,13	1,11	1,08	1,06	1,03	1,00	0,95	0,92	0,88	0,83

Como podemos comprovar, variações de 5 °C levam uma perda de potência útil da ordem de 2% a 5%. Dessa forma um termovisor com uma incerteza de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ pode representar uma perda de até 2% de potência útil.

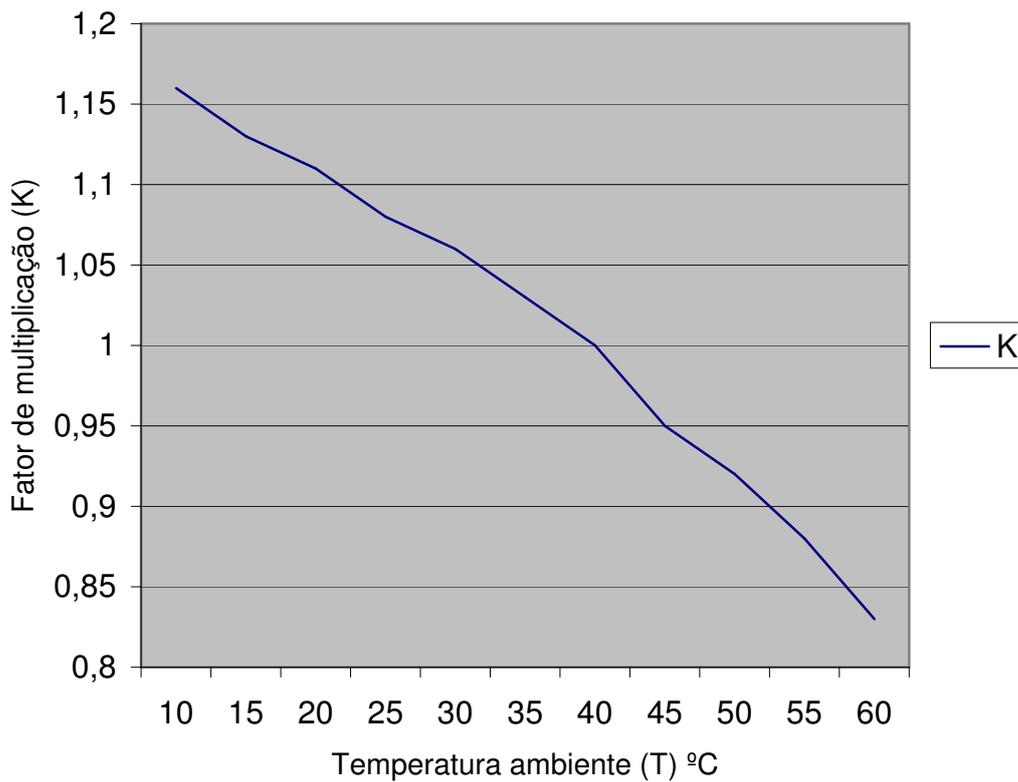


Figura 8 – Fator de Multiplicação (K) x Temperatura Ambiente

Nas tabelas (9) e (10), retirada das normas NBR 5356 e 6855, verificamos a ausência de informações que caracterizem as perdas sofridas no equipamento pela quebra dos limites de temperatura.

Tabela 9 – Limites de elevação de temperatura (NBR 5356)

Tipos de transformadores		Limites de elevação de temperatura (°C) ^(A)					
		Dos enrolamentos			Do óleo	Das partes metálicas	
		Método da variação da resistência		Do ponto mais quente		Em contato com a isolamento sólida ou adjacente a ela	Não em contato com a isolamento sólida e não adjacente a ela
Circulação do óleo natural ou forçada sem fluxo de óleo dirigido	Circulação forçada de óleo com fluxo dirigido	55	60		65		
				Em óleo		Sem conservador ou sem gás inerte acima do óleo	55
Com conservador ou com gás inerte cima do óleo	55 65 ^(D)	60 70	65 80		55 ^(C) 65 ^(D)		

- ^(A) Os materiais isolantes, de acordo com experiência prática e ensaios, devem ser adequados para o limite de elevação de temperatura em que o transformador é enquadrado.
- ^(B) Medida próxima à superfície do óleo.
- ^(C) Medida próxima à parte superior do tanque, quando tiver conservador, e próxima à superfície do óleo, no caso de gás inerte.
- ^(D) Quando é utilizada isolamento de papel, este deve ser termoestabilizado.

Tabela 10 – Limites de elevação de temperatura (NBR 6855)

Tipo de transformador de potencial indutivo - TPI	Classe de temperatura	Limites de elevação de temperatura (°C) ^(A)				
		Dos enrolamentos		Do líquido isolante	Das partes metálicas	
		Método da variação da resistência	Circulação forçada de óleo com fluxo dirigido		Em contato com ou adjacentes à isolamento	Outras partes
Com isolamento líquida e conservador ou gás inerte sobre o líquido isolante	A(105°C)	55	65	55 ^(B)	Não devem atingir temperatura superior à máxima especificada para o ponto mais quente da isolamento adjacente	Não deve atingir temperatura excessiva que possa prejudicar a isolamento
Com isolamento líquida e sem conservador ou gás inerte sobre o líquido isolante	A(105°C)	55	65	50 ^(C)		
Com isolamento sólida	A(105°C) E(120°C) B(130°C) F(155°C) H(180°C)	55°C 70°C 80°C 105°C 130°C	65°C 80°C 90°C 115°C 140°C			

^(A) Os TPI de uma classe de temperatura específica podem usar, na sua isolamento, combinações de materiais das classes A e H (105°C a 180°C), desde que tais combinações sejam usadas em locais do TPI não sujeitos a elevações de temperatura superiores às permitidas para o material de classe mais baixa da combinação.

^(B) Medida próxima à parte superior do tanque.

^(C) Medida próxima à superfície.

Na tabela (11) relacionamos as normas Light com as da ABNT citadas nas mesmas, os itens da norma Light são os que identificam as temperaturas dos equipamentos.

Tabela 11 – Relação normas LIGHT x ABNT

norma Light	Item da norma Light	norma ABNT
PTL 0123GE/93-R0	-	-
NTL 0177/94-R0	<ul style="list-style-type: none"> • 5.2.13 • 7.3.4 	<ul style="list-style-type: none"> • NBR 6935 (Tabela 9) • NBR 10478
NTL 0010/99- R3	<ul style="list-style-type: none"> • 4, 5 e 6 	<ul style="list-style-type: none"> • NBR 5356
NTL 0053/99-R3	<ul style="list-style-type: none"> • 4 e 5 	<ul style="list-style-type: none"> • NBR 6855
NTL 0106/99-R2	<ul style="list-style-type: none"> • 4 	<ul style="list-style-type: none"> • NBR 7118
NTL 0112/99-R3	<ul style="list-style-type: none"> • 4 	<ul style="list-style-type: none"> • NBR 7118
NTL 0121/98-R3	<ul style="list-style-type: none"> • 4 	<ul style="list-style-type: none"> • NBR 6856

1.3. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivos descrever os aspectos de manutenção onde se pode utilizar o termovisor, o desenvolvimento de uma metodologia para a calibração e determinação da incerteza de medição de temperatura deste último, e finalmente, sugerir um limite superior de temperatura de operação dos equipamentos elétricos, a partir dos valores encontrados em normas utilizadas e levando-se em consideração a incerteza de medição de temperatura pelo termovisor.

1.4. Estrutura da dissertação

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos teóricos da medição do termovisor.

No capítulo 3 são apresentados os aspectos de manutenção que podem ter apoio do termovisor.

O capítulo 4 apresenta o procedimento experimental da calibração do termovisor.

O capítulo 5 apresenta os resultados.

E finalmente o capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo.