



**GRUPO – XIII**

**GRUPO DE ESTUDO GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E**  
**TECNOLOGIAS EMERGENTES – GTM**

**ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA EM SOBRECARGA – ANÁLISE DOS RESULTADOS**  
**UTILIZANDO A MEDIÇÃO INDIRETA (IMAGEM TÉRMICA) E DIRETA (FIBRA ÓPTICA) – CASO**  
**AUTOTRANSFORMADOR SE IPATINGA 1**

**Janaina Gomes da Costa (\*)**  
**CEMIG GT**

**RESUMO**

Transformadores de potência são os equipamentos mais importantes e onerosos do sistema de transmissão elétrico. Medidas que permitam o controle e o prolongamento da vida útil dos mesmos são interessantes tanto sob o ponto de vista econômico, quanto operacional. A manutenção e eventual prolongamento da vida útil de um transformador de potência estão intimamente ligados ao monitoramento e manutenção da temperatura de operação dentro dos limites aceitáveis de operação dos materiais que compõe o isolamento da parte ativa.

A operação do transformador a uma temperatura superior à qual ele foi projetado pode ocasionar envelhecimento acelerado devido a diminuição da eficácia e durabilidade dos isolamentos. Dessa forma, são fundamentais a fidelidade e funcionalidade do monitoramento da temperatura de operação em transformadores de potência.

Tradicionalmente, as temperaturas do óleo e enrolamentos em transformadores de potência são medidas de forma indireta. A temperatura no óleo é determinada por meio de sensor resistivo de temperatura, enquanto a temperatura dos enrolamentos é levantada por meio da variação da resistência elétrica de condutores em associação com o coeficiente térmico do material dos mesmos. Nas últimas décadas, a medição de temperatura de forma direta, por meio de sensores de fibra óptica, tem se mostrado uma possibilidade sobre os pontos de vista técnico e econômico para transformadores de potência de grande porte.

A proposta deste artigo é apresentar uma análise comparativa do registro das medições de temperatura obtidas de forma indireta (imagem térmica) e direta (fibra óptica) do ensaio de elevação de temperatura em sobrecarga do autotransformador monofásico 75MVA – 230/138kV fornecido à SE Ipatinga 1 em 2016. Os resultados apresentados podem inferir uma necessidade de atenção aos critérios tradicionalmente utilizados para a definição do ponto mais quente do enrolamento.

A pertinência e relevância do estudo em questão estão associadas ao elevado custo de transformadores de potência, bem como à sua importância no sistema elétrico. Justifica-se, portanto, a realização de estudos relativos a métodos que permitam a maior aproximação da temperatura do ponto mais quente dos enrolamentos visando a previsibilidade da vida útil dos transformadores, sob a ótica do envelhecimento pela ação da temperatura no isolamento, com o foco em medições de temperatura assertivas. Adicionalmente a medição de temperaturas via fibra óptica pode ser uma alternativa técnica interessante para a avaliação da temperatura em condições de sobrecarga devido ao reduzido tempo de resposta das medições obtidas por esta.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transformadores, medição, temperatura, hot-spot, sobrecarga

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência instalados no Sistema Interligado Nacional, devem ser especificados e dimensionados para vida útil estabelecida de 35 anos, conforme definido pela regulamentação do setor elétrico vigente. Ao longo da sua vida útil, este equipamento pode ser demandado para operar em condições de carregamento em condição normal de operação, carregamento em condição de emergência de curta duração e carregamento em condição de emergência de longa duração. Atualmente, o dimensionamento deve ser realizado considerando uma previsão de sobrecargas de 20% durante 4 horas e de 40% durante 30 minutos do seu ciclo diário de carga [1, 2].

O carregamento de um transformador está diretamente associado a temperatura da parte ativa, e esta por sua vez, caso os limites admissíveis sejam ultrapassados, promove uma taxa de envelhecimento superior a esperada, podendo culminar em falha do equipamento decorrente da degradação do isolamento sólido. Esta premissa, justifica os esforços para a melhoria do processo de determinação da temperatura, principalmente no que diz respeito a temperatura do ponto mais quente do enrolamento.

Os transformadores de potência fornecidos ao sistema de transmissão da Cemig GT nos últimos 10 anos foram especificados com os sistemas de medição indireta e direta de temperatura. Esta iniciativa se justifica tecnicamente visando a análise comparativa das medições de forma indireta e direta, com o objetivo de criar senso crítico a cerca desta última. Economicamente, considerando o porte dos transformadores, a inclusão deste requisito na especificação não resulta em expressivo aumento do preço final do equipamento e adicionalmente podem auxiliar na definição de parâmetros mais realísticos para as estimativas tradicionais de temperatura. Entretanto, esta medição ainda não é utilizada para pautar a operação sob a ótica de carregamento. O método tradicional de medição de temperatura ainda é utilizado uma vez que a medição direta apresenta algumas incertezas, tais como quantidade de pontos de medição, forma de fixação, entre outros.

## 2.0 - DESEMPENHO TÉRMICO

Um transformador terá sido dimensionado adequadamente quando, submetido às situações de referência constantes na especificação, tenha vida útil igual ou superior à vida útil contábil. O regime de operação deve ser tal que assegure que a vida útil do equipamento também seja igual ou superior à vida contábil, mesmo que a curva de carga real seja totalmente diferente (inferior ou superior) das curvas correspondentes às situações de referência para dimensionamento. Para tanto, é necessário um gerenciamento adequado do carregamento ao longo da vida do transformador, embasado por informações obtidas através de monitoramento [3]. Este é um desafio para as transmissora.

As corrente dos enrolamentos, temperaturas do óleo e do ambiente, são monitoradas, as quais formam a base de dados para cálculo do envelhecimento de um transformador obtida apartir da determinação da temperatura do ponto mais quente e aplicação direta da formulação de Arrhenius, conforme NBR 5416 e IEC 60076-7 [4, 5].

A especificação inadequada (incompleta ou confusa) pode resultar no dimensionamento e projeto incorreto do transformador, resultando em eventual limitação de carregamento deste ou envelhecimento precoce.

## 3.0 - MEDIÇÕES COM FIBRA ÓPTICAS [6]

As fibras ópticas não contêm materiais condutores e o seu princípio de funcionamento não se baseia em fenômenos elétricos ou magnéticos. Portanto, são um meio muito útil para medir a temperatura real do óleo dentro do enrolamento. No entanto, uma fibra óptica só será capaz de medir a temperatura em um ponto fixo. A localização do ponto mais quente do enrolamento (hot-spot), por outro lado, não pode ser prevista com precisão suficiente para a definição do posicionamento da fibra óptica exatamente nesse ponto.

As fibras ópticas proporcionam, uma imagem mais precisa das temperaturas no interior do transformador, entanto elas ainda não são adequadas para medir a temperatura exata do ponto quente. O aumento do número de pontos de medição pode melhorar a precisão da previsão do ponto mais quente, mas considerando o custo elevado destas fibras ópticas, esta alternativa pode impactar o custo de produção total do transformador. Adicionalmente, são necessários alguns cuidados durante a montagem no que diz respeito a fixação das fibras.

## 4.0 - AUTOTRANSFORMADOR – SE IPATINGA

O autotransformador utilizado para a análise proposta foi especificado conforme os requisitos atuais de carregamento, os quais contemplam a realização de ensaio de elevação de temperatura em sobrecarga, permitindo uma previsão do comportamento das temperaturas em condições de operação normal e em sobrecarga.

#### 4.1 Características técnicas

A seguir são apresentadas as principais características técnicas do banco de autotransformador:

- Potência nominal de cada unidade: 45/60/75MVA (AT/BT); 1,0 / 1,33/ 1,67MVA (TE)
- Tensão AT:  $230/\sqrt{3}$  kV ( $\pm 16 \times 0,625\%$ )
- Tensão BT:  $161/\sqrt{3}$  kV x  $138/\sqrt{3}$  kV
- Tensão TE: 13,8 kV
- Sistema de resfriamento: ONAN / ONAF1 / ONAF2
- Elevação de temperatura: conforme tabela 1
- Temperatura ambiente máxima da subestação: 40°C
- Carregamento: sobrecarga conforme prevista na Nota Técnica ONS NT 038/2014 – Rev. 0 [2]
- Perdas totais máximas: 225kW a 75°C

Tabela 1 – Elevação de temperatura especificada

Condição	Ponto de medição	Máxima elevação de temperatura admitida (°C)
Carregamento nominal	Temperatura média dos enrolamentos	65
	Ponto mais quente dos enrolamentos	80
	Óleo isolante – topo do óleo do tanque	65
Sobrecarga 1,2 pu por 4 horas	Ponto mais quente dos enrolamentos	90
	Óleo isolante – topo do óleo do tanque	70
Sobrecarga 1,4 pu por 30 minutos	Ponto mais quente dos enrolamentos	100
	Óleo isolante – topo do óleo do tanque	70

#### 4.2 Medição de temperatura - Acessórios

Tradicionalmente, o autotransformador é equipado com termômetros para: temperatura de topo do óleo e temperatura do enrolamento. A temperatura no óleo é determinada por meio de sensor resistivo de temperatura, enquanto a temperatura dos enrolamentos é levantada por meio da variação da resistência elétrica de condutores em associação com o coeficiente térmico do material dos mesmos.

No caso do banco de autotransformadores monofásicos fornecidos à SE Ipatinga, a medição de temperatura foi especificada e projetada com o fornecimento os seguintes acessórios:

- Monitor de Temperatura TM1-TM2 (Treetech)
- Monitor de temperatura direta LumaSMART (LumaSense Technologies)

##### 4.2.1 Monitor de Temperatura TM1-TM2 (Treetech) [7]

Foram utilizados para cada unidade monofásica, monitores de temperatura os quais, nesta aplicação, possuem as seguintes funções:

- TM1, monitora a temperatura do óleo e do enrolamento de AT através de:
  - ✓ Entrada para temperatura do óleo – Termoresistência PT-100 ;
  - ✓ Entrada de medição de corrente de carga, obtida pelo TC de imagem térmica do enrolamento de AT, para cálculo da temperatura do enrolamento.
- TM2, aplicado como complemento ao TM1, monitora a temperatura do enrolamento BT através de:
  - ✓ Entrada de medição de corrente de carga, obtida pelo TC de imagem térmica do enrolamento de BT, para cálculo da temperatura do enrolamento.

##### 4.2.2 Monitor de temperatura direta LumaSMART (LumaSense Technologies) [8]

Nesta aplicação foi utilizado um monitor para cada unidade monofásica onde das oito entradas disponíveis seis foram aplicadas, as quais monitoram a temperatura através da medição direta por meio de fibra ótica, sendo a seguinte disposição:

- (1) = sensor temp. enrolamento (instalado em enrolamento "série")
- (2) = sensor temp. enrolamento (instalado em enrolamento "série")
- (3) = sensor temp. enrolamento (instalado em enrolamento "comum")
- (4) = sensor temp. enrolamento (instalado em enrolamento "comum")
- (5) = sensor temp. núcleo (instalado no "núcleo")
- (6) = sensor temp. núcleo (instalado no "núcleo")
- (7) = reserva
- (8) = reserva

Uma vez que um aumento do número de pontos de medição poderia onerar consideravelmente o equipamento, foram previstos na especificação apenas dois pontos de medição para os enrolamentos e núcleo, visando um custo aceitável e uma avaliação experimental.

#### 4.3 Ensaio de elevação de temperatura

O ensaio de elevação de temperatura foi especificado para ser realizado através de medida da temperatura pelo método de imagem térmica, e adicionalmente, por sensores de medição por fibra ótica, em condição de operação normal e em sobrecarga.

Os ensaios de elevação de temperatura foram realizados na derivação de perdas máximas, considerando a sobreexcitação de 1,05 pu e corrente nominal da respectiva derivação.

##### 4.3.1 Resultados obtidos – Ensaio de Elevação de temperatura

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os resultados do ensaio de elevação de temperatura, realizado conforme procedimentos previstos na ABNT 5356-2, obtidos a partir da medição convencional (imagem térmica) para as condições de carregamento nominal. O ensaio foi realizado em todos os estágios de refrigeração. Serão apresentados os resultados obtidos no último estágio para o enrolamento de AT (série). Outros resultados serão apresentados de forma resumida em sequência.

Tabela 2 – Resultados – Ensaio Elevação de Temperatura – Enrolamento AT (série) – Base: 75MVA

Temperatura ambiente	21,0 °C
Temperatura média do enrolamento	66,5 °C
Temperatura óleo médio	49,9 °C
Temperatura óleo topo	60,2 °C
Elevação enrolamento/óleo médio	16,6 °C
Elevação enrolamento/óleo topo	6,3 °C
Elevação óleo médio/ambiente	28,9 °C
Elevação óleo topo/ambiente	39,2 °C
Elevação enrolamento/ambiente	45,5 °C

Dos valores apresentados na Tabela 2 pode-se obter o valor do ponto mais quente através de modelos propostos nas normas ABNT NBR 5416, IEC 60076-7 e segundo fabricante (através do fator de ponto mais quente informado no design review) conforme resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Cálculo da temperatura do ponto mais quente – Enrolamento AT (série) – Base: 75MVA

	Elevação Temperatura ponto mais quente / ambiente	Observação
ABNT 5416/1997	60,5°C	Elevação óleo topo/ambiente + Elevação enrolamento médio/óleo topo + 15°C (classe 65°C)
IEC 60076-7	60,8° C	Fator do ponto mais quente H (1,3*) x Elevação temperatura enrolamento médio/óleo médio + Elevação óleo topo/ambiente
Fabricante	62,9° C	Fator do ponto mais quente H (1,43**) x Elevação temperatura enrolamento médio/óleo médio + Elevação óleo topo/ambiente

\* A IEC 60076-7 sugere  $H = 1,3$  para transformadores de média potência e transformadores de grande porte

\*\* O valor de  $H = 1,43$  foi indicado pelo fabricante no design review

O valor da temperatura medido nas fibras óticas do enrolamento de AT nas condições do ensaio de elevação de temperatura na base 75MVA foi de 91,0°C. Considerando a temperatura ambiente de 21°C temos 70,0°C de elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento. O valor da medição direta foi maior que os valores sugeridos pelas normas e pelo fabricante para o ponto mais quente, apresentando um desvio significativo de 10%, o que sugere que estes métodos de cálculo não correspondem a uma estimativa acertiva ou conservadora, conforme esperado.

A literatura cita que pode haver gradientes de mais de 10°C entre diferentes localizações no topo de enrolamento de um transformador normal [9]. Desta forma é improvável que apenas os 2 sensores instalados tenham detectado o real ponto mais quente, o que torna mais crítico o resultado apresentado pelos métodos convencionais de determinação do ponto mais quente.

#### 4.3.2 Resultados obtidos – Ensaio de Elevação de temperatura em sobrecarga

Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os resultados do ensaio de elevação de temperatura em sobrecarga, realizado conforme procedimentos previstos na NT 038/2014, obtidos a partir da medição convencional (imagem térmica) para as condições de carregamento em sobrecarga.

Conforme previsto na Nota Técnica 038/2014 [2], o ensaio foi realizado após a estabilização da temperatura do óleo no ensaio de aquecimento normal, seguida de um primeiro período de ensaio de sobrecarga de 1,2 x I por 4 horas e de um período de ensaio de sobrecarga de 1,4 x I por 30 minutos.

Tabela 4 – Resultados– Ensaio Elevação de Temperatura em sobrecarga – Enrolamento AT (série) – Base: 75MVA

Temperatura ambiente	25,5 °C
Temperatura média do enrolamento	84,5 °C
Temperatura óleo médio	54,1 °C
Temperatura óleo topo	66,8 °C
Elevação enrolamento/óleo médio	30,4 °C
Elevação enrolamento/óleo topo	17,7 °C
Elevação óleo médio/ambiente	28,6 °C
Elevação óleo topo/ambiente	41,3 °C
Elevação enrolamento/ambiente	59,0 °C

Dos valores apresentados na Tabela 4 pode-se obter o valor do ponto mais quente conforme resultados apresentados na Tabela 5. Os valores apresentados na Tabela 5 não foram corrigidos conforme previsto nas normas ABNT NBR 5416 e IEC 60076-7 para as condições de sobrecarga.

Tabela 5 – Cálculo da temperatura do ponto mais quente – Enrolamento AT (série) – Base: 75MVA em sobrecarga

	Elevação Temperatura ponto mais quente / ambiente	Observação
ABNT 5416/1997	74,0°C	Elevação óleo topo/ambiente + Elevação enrolamento médio/óleo topo + 15°C (classe 65°C)
IEC 60076-7	80,8° C	Fator do ponto mais quente H (1,3*) x Elevação temperatura enrolamento médio/óleo médio + Elevação óleo topo/ambiente
Fabricante	84,8° C	Fator do ponto mais quente H (1,43**) x Elevação temperatura enrolamento médio/óleo médio + Elevação óleo topo/ambiente

\* A IEC 60076-7 sugere H = 1,3 para transformadores de média potência e transformadores de grande porte

\*\* O valor de H = 1,43 foi indicado pelo fabricante no design review

O valor temperatura medido nas fibras óticas do enrolamento de AT nas condições do ensaio de elevação de temperatura em sobrecarga na base 75MVA com 1,2pu foi de 95,1°C e com 1,4pu foi de 106,9°C. Considerando a temperatura ambiente de 25,5°C temos de elevação de temperatura do ponto mais quente de 69,6°C e 81,4°C respectivamente.

#### 4.3.3 Análise dos resultados obtidos

O gráfico das Figuras 1 e 2 apresentam um comparativo dos resultados de elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento em relação a temperatura ambiente obtidos nos ensaios com carregamento nominal e sobrecarga, através da medição indireta e direta.

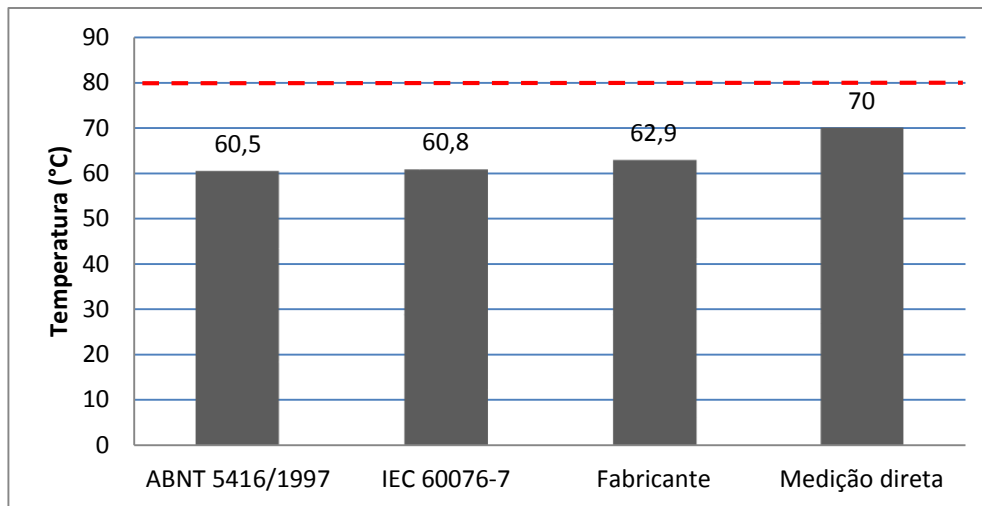


FIGURA 1 – Elevação Temperatura ponto mais quente / ambiente – Ensaio de elevação de temperatura

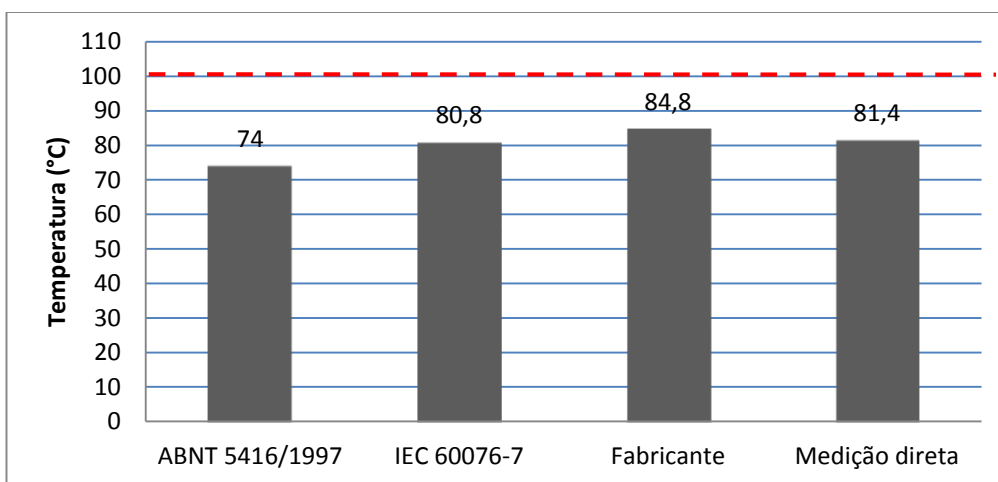


FIGURA 2 – Elevação Temperatura ponto mais quente / ambiente – Ensaio de elevação de temperatura em sobrecarga

Os valores obtidos pela medição direta no ensaio de elevação de temperatura em sobrecarga se aproximaram dos obtidos pela medição indireta, considerando que os cálculos apresentados não consideram as correções previstas nas normas para a condição de operação em sobrecarga.

O gráfico da Figura 3 apresenta os resultados obtidos de elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento de AT para todos os estágios de refrigeração para a medição direta e indireta. Os valores de medição direta apresentados foram os resultados seguindo o fator de ponto mais quente indicado no design review utilizando o critério proposto pela IEC60076-7 [6], o qual foi o maior valor dentre os sugeridos para medição indireta.

Partindo da consideração de que a fibra foi realmente instalada no ponto mais quente do enrolamento, pode-se perceber que para o estágio de refrigeração ONAN (45MVA), os resultados apresentados pela medição indireta indicam uma medição conservadora. Já para os estágios de refrigeração ONAF1 (60MVA) e ONFA2 (75MVA) a temperatura na medição indireta foi subestimada, apresentando valores consideravelmente menores que os valores obtidos na medição direta.

Para o enrolamento de baixa tensão (enrolamento comum) os valores de temperatura do ponto mais quente obtidos através da medição direta foram bem inferiores aos obtidos pela imagem térmica. Destes resultados pode-se sugerir um inadequado posicionamento das fibras neste enrolamento.

Durante o ensaio foi realizada termografia, apresentando 73,4°C de valor máximo de temperatura na condição de temperatura do óleo isolante estabilizada – ONAF2 com 1,4 pu de sobrecarga.

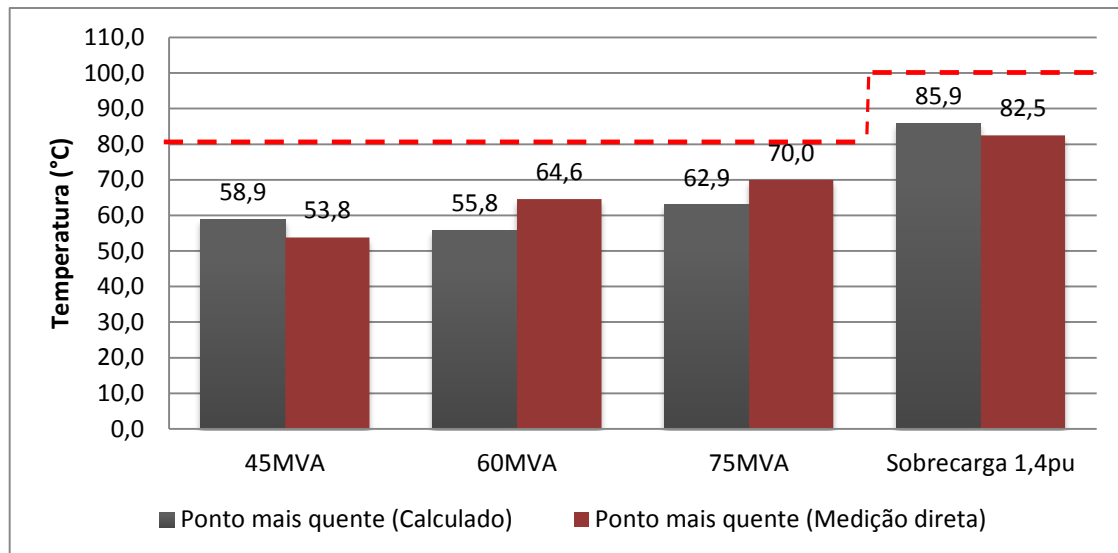


FIGURA 3 – Elevação Temperatura ponto mais quente / ambiente – Estágios de refrigeração

## 5.0 - CONCLUSÃO

Os valores de temperatura medidos de forma direta nos ensaios de elevação de temperatura sugerem que os modelos de estimativa de temperatura do ponto mais quente precisam ser revisados. Particularmente nos estágios de refrigeração ONAF, as medições diretas indicam valores de temperatura superiores aos obtidos na medição indireta. Esta constatação pode levar o enrolamento a assumir valores de temperatura superiores aos máximos suportáveis pelo isolamento sólido, o que implica em uma degradação acima da esperada podendo ser motivador de falhas precoces.

A medição direta apresenta, no mínimo, um ponto de partida para a discussão do fator de ponto mais quente indicado pelos fabricantes, realimentando modelos de cálculo de modelo térmico. Em transformadores de grande porte esta medição, ainda que não utilizada para pautar a operação, pode ser importante para um ajuste mais realístico do controle de temperatura, parâmetro importante para o ciclo operativo do transformador tanto em condições de operação normal como em condições de sobrecarga.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – Procedimento de rede – Submódulo 2.3 Rev. 2016.12 – Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos. Brasil
- (2) OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – Nota técnica 038/2014 – Revisão 0 – Ensaio de Elevação de Temperatura de Transformadores em Sobrecarga. Brasil.
- (3) FRONTIN, SÉRGIO O., Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. 1ª Edição. 2013. Brasil.
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aplicação de cargas em transformadores de potência – Procedimento. ABNT 5416. Julho/1997. Brasil
- (5) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. IEC 60076-7
- (6) INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS – Thermal Performance of Transformers – WG A2.24 Brochura CIGRÉ 393. 2009
- (7) TRETECH - Manual Técnico Monitor de Temperatura TM1/TM2 – MA-006. 2008. Brasil.
- (8) LUMASENSE TECHNOLOGIES – Manual LumaSMART Fiber Optic Winding Hot Spot Temperature Monitor and Controller for Power Transformers. 2010. EUA
- (9) AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE – Standard test procedure for thermal evaluation of insulation systems for liquid-immersed distribution and power transformers. ANSI/IEEE C.57.100.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Janaina Gomes da Costa – janaina.costa@cemig.com.br

Possui mestrado (2003) e graduação (2000) em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC MINAS).

Atua na gerência de Expansão da Transmissão da CEMIG GT, desde 2007, como engenheira de projetos na área de especificação de equipamentos do sistema elétrico. Atua também como professora do curso de Engenharia Elétrica, desde 2005, na PUC MINAS. Participa ativamente de comitês da ABNT (CB-03) e Cigré-Brasil (A2).