



**XXII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GTM/04
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO -XIII

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

**“CICLO DE SOBRECARGA DIÁRIO EM TRANSFORMADORES E SUA EXPECTATIVA DE VIDA ÚTIL –
EXPERIÊNCIA E SUGESTÕES PARA ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA PARA VERIFICAÇÃO AO
ATENDIMENTO DA ANEEL 191”.**

**André Vita(*)
Paulo Patrocínio
Angelo Gomes
FURNAS**

**João Baldauf
Ito Capinos
ALSTOM**

RESUMO

Com a publicação da Resolução Normativa nº 191 de 12 de dezembro de 2005 da ANEEL, sem uma prévia discussão com toda a comunidade de transformadores, e a adoção das condições de operação com a adição dos dois ciclos de carregamento nos recentes Editais de Transmissão da ANEEL e no Sub Módulo 2.3 Requisitos Mínimos para Transformadores e para Subestações e seus Equipamentos, dos Procedimentos de Rede do ONS, levou a uma grande variedade de práticas nas especificações técnicas de transformadores e na realização de diversificados ensaios de elevação de temperatura para sua comprovação.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador, Carregamento, Vida Útil, Ciclo de Sobrecarga Diário, NBR 5416, IEC 60076-7, NBR 5356/7, ANEEL 191, Design Review, Grau de Polimerização, Sistema de Monitoramento.

1.0 - INTRODUÇÃO

Muito embora a Resolução Normativa nº 191 de 12 de dezembro de 2005 da ANEEL e a revisão 3 do Submódulo 2.3 do ONS definiram os novos ciclos diários de sobrecarga, esta nova forma de carregamento, por falta de um suporte normativo da ABNT/NBR que seja fruto de um fórum de discussões da sociedade de transformadores, respaldado por usuários e fabricantes, é objeto de muita discussão técnica, conflito de posturas na sua verificação em ensaios de fábrica e tem levado a projetos mais caros na fabricação de Transformadores.

Em decorrência da necessidade de atender a estes ciclos diários de sobrecarga para transformadores de potências mais elevadas, onde há necessidade de se ter intercambiabilidade com as demais unidades de Bancos de transformadores existentes, alguns projetos já têm de usar materiais especiais mais caros e utilizar em seu projeto e cálculo, técnicas diferentes das que usualmente se usariam para simplesmente atender as sobrecargas já previstas na NBR 5416-1997.

2.0 - VIDA ÚTIL DE TRANSFORMADORES

Não há um critério único e consagrado para avaliação do fim da vida de um transformador.

Entretanto, é possível fazer uma avaliação da velocidade do envelhecimento adicional a que está sendo submetido o transformador, comparando a perda de vida com uma taxa de perda de vida média de referência.

O grande objetivo de um bom projeto térmico de um transformador é permitir que este atendesse a expectativa de vida útil de 40 anos sem falhas por defeitos térmicos, isto é, que seu projeto atenda a curva universal de falhas reconhecida por toda a sociedade mundial não só para transformadores.

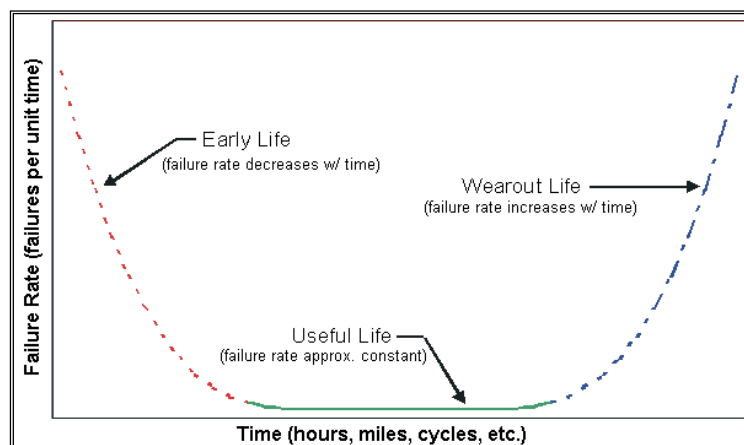


FIGURA 1 – Falhas nos transformadores na sua vida útil - Curva da Banheira.

Analisando a curva da banheira mostrada na Figura 1, vemos que é esperado que transformador tivessem falhas quando são novos e/ou velhos e que dentro de sua vida útil as falhas não ultrapassem os índices mundiais de estatísticas bem definidas em documentos internacionais do CIGRÉ. O ideal segundo a curva da banheira é que se tenha o trecho da vida útil cobrindo quase que a totalidade da expectativa de vida do Transformador.

3.0 - COMENTÁRIOS A ABNT/NBR 5356 E ABNT/NBR 5416

A condição de operação de transformadores conforme estabelecido na ABNT/NBR 5356-2 4:2007 para condições normais de funcionamento em relação à temperatura ambiente são as seguintes:

- Temperatura do ar não inferior a 25°C negativos e não superior a 40°C, e
- temperatura média, em qualquer período de 24 horas não superior a 30°C.

Para efeito da ABNT/NBR 5416-1997 o envelhecimento de um transformador está baseado na vida esperada, sob efeito da temperatura de operação da isolamento ao longo do tempo.

A ABNT/NBR 5416: 1997 item 4.1.2, ainda em vigor, determina que a expectativa de vida pode ser determinada por:

$$vidadai_{solação} = A \times e^{\frac{B}{273+Thot}}$$

Onde: A e B = constantes da curva de expectativa de vida, Thot = temperatura de *hotspot* ou ponto mais quente.

Esta expectativa de vida é baseada na curva de Arrhenius mostrada abaixo:

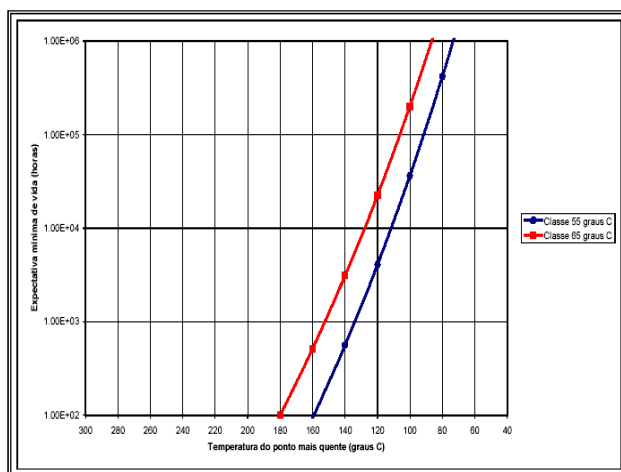


FIGURA 2 - A Curva de Arrhenius

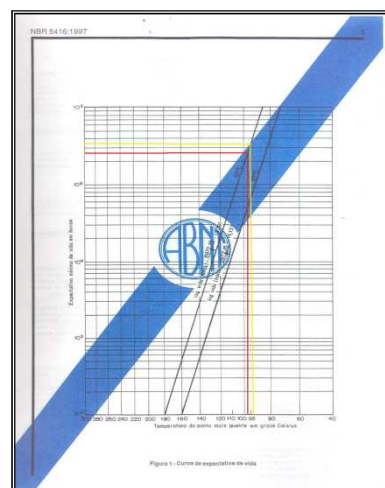


FIGURA 3 - Curva de Arrhenius – Temperaturas de operação para Expectativa de vida útil para 30 (linha vermelha) e 40 anos (linha amarela).

A deterioração da isolamento em função do tempo e da temperatura é fundamentada na teoria de Arrhenius, que estabelece que o logaritmo da vida da isolamento é uma função do inverso da temperatura absoluta.

Transformadores que atendam a NBR 5416:1997, ou seja, para transformadores que sejam projetados para uma expectativa de vida útil de 30 anos, segundo a curva de Arrhenius, termos:

- 30 anos = 30 anos x 365 dias x 24 horas = 262.800 horas = $2,6 \times 10^5$ horas, o que na curva de Arrhenius indica no eixo das abscissas, uma temperatura de hotspot de 97,65°C.

De acordo com a Resolução Normativa nº 513 de 16 de setembro de 2002 da ANEEL – Adicional Financeiro – sobrecargas – Perda Adicional – vida útil, em vigência, a qual define 40 anos como sendo a vida útil esperada para transformadores, nos leva a uma temperatura do ponto mais quente (hotspot) de:

- 40 anos = 40 anos x 365 dias x 24 horas = 350.400 horas = $3,5 \times 10^5$ horas, o que na curva de Arrhenius indica no eixo das abscissas, uma temperatura de hotspot de 95°C.

Isto mostra que se um transformador é calculado segundo Arrhenius, para que ele dure 40 anos conforme a Resolução normativa nº 513 da ANEEL, este terá que operar com temperaturas do ponto mais quente (hotspot) menores de 95°C, ou seja com uma elevação de temperatura de 65°C, para mesma temperatura ambiente de 30°C.

Ao analisarmos a Curva de Arrhenius, podemos notar que para transformadores de classe E (65°C) de elevação o média de temperatura, que atendam a Resolução Normativa nº 513 da ANEEL, as seguintes temperaturas de hotspot, em comparação com a NBR 5416.

Tabela 1 – Expectativa de Vida Segundo Arrhenius.

Expectativa de Vida segundo a Curva de Arrhenius		
Expectativa de Vida	Expectativa de vida em horas	HotSpot
NBR 5416:1997 (30 anos) 30°C ambiente	30 anos (30X365X24) 262.800 horas	Hotspot = 97.65°C
Resolução 513 da ANEEL (40 anos) 30°C ambiente	40 anos (40X365X24) 350.400 horas	Hotspot = 95°C

Por outro lado a expectativa de vida para um Transformador da classe E de temperatura (65°C), segundo Arrhenius, que atenda ao hotspot de 110°C (65°C+30°C+15°C=110°C), e que opere constantemente em sua potência nominal no período de 24 horas, é dada por:

$$expectativadevida = 10^{\frac{6972,15}{273+T_{hot}} + (-13,391)}$$

Expectativadevida = 65.020 horas ou 65020/(365x24) = 7,42 anos

Onde: $\Theta_e = 80+30 = 110^\circ\text{C}$, 80°C = elevação máxima de temperatura permitida do ponto mais quente dos enrolamentos e 30°C = temperatura ambiente média, em qualquer período de 24 horas.

Logo, pode-se concluir que se carregarmos permanentemente um transformador com sua potência nominal, a uma temperatura ambiente de 30°C, este terá uma vida útil de apenas 7,42 anos, por esta razão a NBR 5416:1997 define que não só para atender a períodos de sobrecarga, mas também cumprir sua vida útil, o transformador deve ter em sua operação, períodos de subcarregamento e pré-carregamento.

Pela Tabela 1 - comparativa “Expectativa de Vida Segundo Arrhenius” podemos notar que a expectativa de vida calculada conforme ABNT/NBR 5356:1997 é conservativa no sentido de preservar a utilização o que leva a se ter transformadores termicamente mais robustos na medida em que a temperatura do ponto mais quente não deve ultrapassar os 95 °C.

A Perda de Vida definida no item 4.1.3 da norma ABNT/NBR 5416:1997, tem o seguinte cálculo:

$$PV = 10^{-\left(\frac{B}{273+\theta_e} + A\right)} \times 100 \times \Delta t$$

Onde:

- A = -13,391 (para Transformadores de classe E, 65°C),
- B = 6972,15,
- Δt = período de tempo em horas.

A perda de vida no período de 24 horas de um transformador com elevação de 65°C pode ser determinada conforme a seguir:

$$PV = 10^{-\left(\frac{6972,15}{273+110} + 13,391\right)} \times 100 \times 24$$

$$PV = 0,03691\%$$

Este valor (0,03691%) representa a taxa de envelhecimento global a qual é submetida a isolamento sólida no intervalo de 24 horas.

Para o período de um ano teremos a perda de vida de $365 \times 0,03691 = 13,4722\%$ de perda de vida útil, o que bastante significativo e mais uma vez ratifica a necessidade de se ter períodos de compensação de sub-carregamento para compensar a perda de vida útil.

4.0 ANÁLISE COMPARATIVA DAS NORMAS IEEE C57.91, IEC 60076-7 E NBR 5416 COM A RESOLUÇÃO ANEEL 191 E SUB MÓDULO 2.3.

4.1 NORMA IEEE C57.91

De acordo com a última revisão da IEEE C57.91, todos os transformadores devem ser capazes de suportar sobrecargas acima da condição nominal.

Segundo o IEEE, todos os transformadores devem ser capazes de atender às sobrecargas, mas sempre partindo de uma pré-carga de 90% da potência nominal do transformador com equilíbrio térmico, com a temperatura do ponto mais quente (hotspot) sem exceder 140°C e com a temperatura do topo do óleo (top oil) sem exceder 110°C.

Tabela 2 - IEEE C57.91, Short Time Minimum Acceptance Loading Capability P.U. of Nameplate MVA Rating.

Ambient Temperature °C	Load in Per Unit of Nameplate Rating (Load Duration in Hours)				
	0.5	1.0	2.0	4.0	8.0
10	1.50	1.45	1.39	1.34	1.31
40	1.26	1.23	1.19	1.15	1.13

Podemos observar que a IEEE C57.91 muito embora utilize a temperatura ambiente de 40°C, define uma sobrecarga de 115% (1,15 p.u. da potência nominal) por um período de 4 horas e uma sobrecarga de 126% (1,26 p.u. da potência nominal) por um período de 0,5 hora, ambas com perda de vida limitada a 2 meses por ciclo de sobrecarga.

Tabela 3 - Comparação IEEE x Sub modulo 2.3

IEEE C57.91	Sub modulo 2.3
115% por 4 horas	120% por 4 horas
126% por 0,5 hora	140% por 0,5 hora
Pré-carga de 90% com estabilização térmica.	Pré-carga de 100% com estabilização térmica.
Admite perda de vida limitada a 2 meses por ciclo de sobrecarga.	Sem perda de vida adicional.
Ciclos de sobrecarga diários não geminados.	Ciclos de sobrecargas diários geminados.
Ponto mais quente de 140°C.	Ponto mais quente de 110° C

Na tabela acima, podemos ver a severidade maior do critério definido pela Sub modulo 2.3 para o ciclo diário de sobrecarga em relação ao critério da norma IEEE C57.91.

4.2 NORMA IEC 60076-7:2005

A norma IEC 60076-7:2005, como a norma brasileira de carregamento NBR 5416, em sua revisão atual, leva em consideração a diminuição da resistência mecânica do papel na vida útil do transformador.

A NBR 5416 e a NBR 5356 levam em conta para definição da vida útil dos transformadores a temperatura, a umidade (água) e a acidez (ácidos presentes no óleo isolante) no óleo. Mantendo sob controle a ação desses contaminantes, o envelhecimento da celulose é predominantemente térmico e cumulativo.

Ao observarmos o item 6.4 e da tabela 3 da norma IEC 60076-7:2005; poderemos ver que a isolação envelhece segundo a rigidez mecânica do papel conforme mostrado na tabela a seguir:

Tabela 4 - IEC 60076-7 (tabela 3)

Table 3 – Normal insulation life of a well-dried, oxygen-free thermally upgraded insulation system at the reference temperature of 110°C.		
Basis	Normal Insulation Life	
	Hours	Years
50% retained tensile strength of insulation	65.000	7,42
25% retained tensile strength of insulation	135.000	15,41
200 retained degree of polymization in insulation	150.000	17,12
Interpretation of distribution transformer functional life test data	180.000	20,55

Pode-se observar que na IEC 60076-7 tem 4 critérios de avaliação da vida útil do papel em função da resistência mecânica, do GP e um critério para TD.

4.3 NORMA ABNT/NBR 5416

A NBR 5416 é essencialmente um guia de carregamento baseado na curva de Arrhenius onde o carregamento é feito com base nos principais elementos que influenciam a temperatura do ponto mais quente, como a temperatura ambiente, a carga a ser aplicadas, tempo de aplicação do carregamento, condições de resfriamento, etc.

4.4 RESOLUÇÃO NORMATIVA nº 191 da ANEEL

A Resolução Normativa nº 513 de 16 de setembro de 2002 da ANEEL que estabelece os procedimentos para recebimento de adicional financeiro devido à sobrecarga que ocasionem perda adicional de vida útil em instalações de transmissão do sistema elétrico cita em seu artigo 2º, uma expectativa de vida útil de 40 anos e também considera que há perda de vida útil adicional em transformador, devido à sobrecarga, no período em que a temperatura do ponto mais quente do seu enrolamento for superior àquela que acarreta perda de vida útil equivalente a uma expectativa referencial de quarenta anos, tem como base a "Teoria de Arrhenius".

Nesta resolução também são definidas as equações para perda de vida útil com expectativa de vida de 40 anos e a equação para cálculo da perda de vida útil em um intervalo de ciclo de carga, conforme:

- Perda de vida útil (40 anos)
$$PV_n\% = \frac{\Delta t_i}{24 \times 365 \times 40} \times 100 \text{ (\%)}$$

 Δt_i = Intervalo de tempo considerado.
- Perda de vida útil em um intervalo de ciclo de carga :
$$PV_s\% = 10^{-\left(\frac{B}{273+\theta_{es}} + A\right)} \times \Delta t_i \times 100 \text{ (\%)}$$

Dividindo as duas últimas equações PVs/PVn encontramos o fator associado a perda de vida Vs.

$$V_s = 10^{-\left(\frac{B}{273+\theta_{es}} + A\right)} \times 350.400 \text{ (pu)}$$

Onde: Vs = fator multiplicador associado à perda de vida,

A = constante da curva de expectativa de vida da isolação de papel.

- Para transformador de classe 55°C: A= - 14,133 pu e,
- para transformador de classe 65°C: A= - 13,391 pu,

B = constante da curva de expectativa de vida da isolação de papel B=6972.15,

θ_{es} = temperatura (°C) do ponto mais quente do enrolamento no intervalo de tempo do ciclo de carga.

Uma vez que a Resolução normativa da ANEEL 191 define um ciclo de sobrecarga diário, para algumas das possibilidades de interpretação desta resolução, podemos calcular a perda de vida equivalente para um transformador e compará-la a sua equivalente segundo a IEC 60076-7, e também com a perda de vida segundo a NBR 5416, desta forma pode observar como agem as sobrecargas diárias definidas nestes documentos na perda de vida e na expectativa de vida útil.

4.5 SUB MÓDULO 2.3 DO PROCEDIMENTO DE REDE DO ONS

A o Sub Módulo 2.3 do Procedimento de Rede do ONS - Pré-carregamento e pós-carregamento de 100% durante 19,5 horas / sobrecarga de 120% durante 4 horas seguido de 140% durante 0,5 horas.

A revisão 3 do Sub Módulo 2.3 do Procedimento de Rede do ONS que está em *homologação pela ANEEL* já contempla com bastante clareza os dois ciclos de carregamento com as condições de pre-carregamento e os intervalos sendo a temperatura estabilizada do óleo.

Quando considerarmos para efeito de análise e comentários comparativos de interpretação, para esta condição, pode-se considerar que o tempo entre os picos de sobrecargas diária da ANEEL 191 seja o tempo para atingir as condições de 100%, ou seja, para que a temperatura do enrolamento e do óleo atinjam os mesmos valores da estabilização de temperatura de norma para o ensaio. Em média este intervalo de tempo é pequeno para o óleo, pois ao se baixar a corrente de carga, podendo-se considerar para efeito de cálculo 5 minutos ou 0,083 hora, mas é considerável para o enrolamento que demora muito mais para baixar, dependendo do volume de óleo pode se chegar entre 6 a 8 horas.

$$c_{arg\text{ equivalente}} = \sqrt{\frac{(1)^2 \times 19,417 + (1,2)^2 \times 4 + (1)^2 \times 0,083 + (1,4)^2 \times 0,5}{24}}$$

Carga equivalente = 1,0456 ou **104,56%** num ciclo de sobrecarga diário conforme ANEEL 191.

Isto significa que este perfil de sobrecarga diária é equivalente a uma carga média constante de 104,56% da nominal. Conforme mostrado no item 2 deste trabalho, um transformador que opere permanentemente com carregamento de 100%

de sua potência nominal tem uma expectativa de vida útil de apenas 7,42 anos, logo um transformador que esteja operando submetido uma sobrecarga diária conforme considerado pela ANEEL 191, deverá durar menos de 7 anos.

5 EXPERIENCIA E PRÁTICA DE FURNAS NA ESPECIFICAÇÃO E ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA PARA VERIFICAÇÃO DO SUB MÓDULO 2.3 E DA RESOLUÇÃO 191.

A prática é a de considerar o carregamento máximo simultâneo para calcular e dimensionar a potência a ser usada no ensaio de elevação de temperatura.

Ao longo dos anos Furnas tem indicado em suas especificações técnicas o requisito e exigência de projeto de transformadores de transmissão que atendam ao carregamento máximo simultâneo com as seguintes características técnicas: no lado de Alta Tensão (AT) e BT com fator potência de 0,8 capacitivo e/ou 0,8 indutivo e no lado de Terciário com 0 indutivo e/ou 0 capacitivo, na pior condição como elevador ou abaixador e com subexcitação de até 90%.

O valor resultante da composição vetorial entre AT e BT para o pior caso obtido das condições especificadas para o carregamento máximo simultâneo, define a potência a ser utilizada no ensaio de elevação de temperatura do transformador, sem que por isto, não sejam atendidas as condições de temperaturas especificadas e de norma para classe de temperatura E (65°C).

Sob esta condição, por exemplo, para um transformador de 200 MVA, chega-se a potência de ensaio de 256 MVA para um transformador de 75 MVA uma potência de ensaio 92 MVA, e assim por diante.

Exemplo 1: Transformador 200 MVA, 525/138-13,8 kV, monofásico, potência do Terciário de 67 MVA:

Considerando a composição vetorial para o carregamento máximo simultâneo, teremos as potências para o ensaio de elevação de temperatura são, $IP1=246,1$ MVA, $IP2=200$ MVA e $IP3=67$ MVA e resultante da potência de ensaio de 256MVA.

Exemplo 2: Transformador 75 MVA, 525/145-13,8 kV, monofásico, potência Terciário de 25 MVA:

Da mesma forma, a potência para ensaio de elevação de temperatura, para um transformador de 75 MVA, passa a ser 92 MVA no primário, 75 no secundário e 25 MVA no terciário, considerando a composição vetorial para o carregamento máximo simultâneo.

Com isto o sistema de resfriamento está dimensionado para atender com margem a expectativa de vida útil de 40 anos considerando que os valores de temperatura são calculados para a potência nominal de 75MVA e 200MVA nas condições nominais de tensão, bem acima dos 75MVA ou 200MVA (sem sub-excitação e sem o carregamento simultâneo dos três enrolamentos).

6.0. CÁLCULO, PROJETO E ENSAIO DE VERIFICAÇÃO DO ATENDIMENTO A RESOLUÇÃO ANEEL 191, A UTILIZAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO PARA VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO CARREGAMENTO, DAS TEMPERATURAS E DA VIDA ÚTIL DO TRANSFORMADOR.

O cálculo, projeto e ensaio de verificação do atendimento a resolução ANEEL 191 os transformadores previstos para atender a resolução 191 em função do apresentado até aqui, tem um dimensionamento diferente daqueles projetados para as condições de operação estabelecidos nas normas ABNT, IEC OU IEEE.

O primeiro passo é prever a carga equivalente de 104,56% para compensar a perda de vida das sobrecargas. Isto equivale a dimensionar o transformador para uma potencia aproximadamente 5% superior a especifica potencia nominal.

O segundo passo é o de dimensionar o sistema de resfriamento de modo a obter as temperaturas que permitem que a vida útil seja de 40 anos, conforme os requisitos dos sub módulo 2.3 dos procedimentos de rede, para tanto a temperatura do topo do óleo e do ponto mais quente é calculada para garantir a perda de vida seja de 40 anos conforme a NBR 5416.

Vale aqui salientar que esta verificação é feita para as condições nominais do transformador para tensão nominal e temperatura ambiente média diária de 30°C. Então os valores de temperatura do ensaio de elevação de temperatura, que são feitos nas condições de perdas e correntes máximas, devem ser recalculadas para as condições nominais.

As verificações conforme a atual 5416/1997 são considerando o critério de fim da vida com sendo o 50 % da resistência mecânica do papel, que implica em muitos casos a um custo elevadíssimo do transformador levando a um exagerado sistema de resfriamento em casos em que se encontra dificuldades em instalar radiadores e ventiladores nas laterais dos transformadores.

As normas IEEE e IEC 60076-7 apresentam a tabela 4 como os 4 critérios de avaliação da vida útil. A norma IEEE enfatiza em seus anexos que o critério de avaliação da vida util de 50% da resistência mecânica é extremamente irreal e recomenda a utilização do terceiro critério para o fim de vida o do limitante do GP 200.

Da mesma forma o Norma IEC, bastante objetiva recomenda enfaticamente o terceiro critério para avaliação do fim de vida o do limitante do GP 200.

Na Comissão de Estudo CE 14.1 Transformadores de Potência do COBEE ABNT que está atualmente fazendo a revisão da ABNT/NBR5416/1997, na redação do texto de avaliação da vida útil foi consenso entre os membros representantes em escrever no texto de que "O critério a ser adotado para avaliação da vida útil dos equipamentos regidos por esta norma deverá ser o do valor do grau de polimerização remanescente da isolamento igual a 200 (150 000 h).

Este critério já tem sido constante, a sua aplicação, nos acordos entre compradores e fabricantes nos cálculos de avaliação da vida útil de 40 anos ao longo de 2012 e 2013.

7. ENSAIO DE SOBRECARGA

O atendimento ao Sub Módulo 2.3 do Procedimento de Rede do ONS pode ser verificado por cálculo ou por ensaio. Por cálculo podem ser verificadas as temperaturas atingidas nas condições de potência máxima, 20% de sobrecarga por 04 horas e 40% sobrecarga por meia hora, e em função destas temperaturas a vida útil do transformador.

Para fazer um ensaio representativo das condições especificadas pela ANEEL não existe uma normativa da ABNT e cada empresa define critérios de acordo com sua interpretação da resolução. Este problema tem originado discussões entre concessionárias e fabricantes até definir em comum acordo as condições de ensaio.

Até que exista uma norma brasileira de como fazer o ensaio nas condições de sobrecarga, o procedimento da Norma IEEE poderá ser utilizado. Ou então o procedimento deverá ser claramente indicado na especificação.

Podemos observar aqui que o ponto fundamental para avaliação dos limites da condição de carregamento é a temperatura do ponto mais quente, seja para verificar o limite de temperatura máxima acima da temperatura máxima ambiente de 40°C para os limites de formação de bolhas no óleo, ou seja para avaliação da temperatura para fins de avaliação da temperatura média do ponto mais quente acima da média ambiente de 30°C para calcular a vida útil, e, e sta temperatura do ponto mais quente ou pelo método de cálculo ou por ensaio é um valor calculado a partir do “fator de hotspot”, logo o que podemos concluir que não é tão importante o ensaio e que por cálculo pode ser avaliado com segurança o atendimento dos requisitos. Assim se elimina o custo adicional da execução do ensaio.

Adicionalmente um ensaio com “ciclo de carga equivalente acordado” e somente com o controle da evolução dos gases durante o ensaio de elevação de temperatura é uma alternativa que deve ser estudada e que já é opção adotada no mercado americano de verificar o atendimento as condições de sobrecarga.

8.0 MONITORAMENTO

Nos modernos sistemas de monitoramento para transformadores de potência, é possível através de uma ferramenta de simulação, verificar o comportamento do transformador diante de possíveis situações de sobrecarga, bem como eventuais consequências.

Pode-se inclusive, importar dados “on-line” ou simplesmente inserir dados a partir dos resultados dos ensaios finais do transformador, o sistema de monitoramento calcula inicialmente o fator de carga, a potência e a temperatura do topo do óleo, tendo com dados de entrada “inputs” a tensão, a corrente e a duração da sobrecarga a qual o equipamento será submetido.

Combinando a temperatura do topo do óleo simulada, o fator de carga e o status das unidades de resfriamento o sistema passa então para o cálculo da temperatura do ponto mais quente “Hot Spot” que será utilizada posteriormente na simulação da taxa de envelhecimento do transformador, baseado na IEC 60076-7 que define que dobra-se o envelhecimento do transformador a cada incremento de 6K na temperatura do óleo.

Ainda na parte de envelhecimento, pode-se a partir da quantidade de umidade no óleo e com a temperatura do topo do óleo simular a umidade no papel, visto que a umidade é também um dos principais catalisadores do envelhecimento de transformadores de potência.

Logo, com a ferramenta “simulador” incorporada no sistema de monitoramento é possível o acompanhamento “online” da sobrecarga e a projeção da perda de vida. Como complemento calcula-se ainda as perdas atuais do transformador, baseando-se principalmente na corrente de carga e na temperatura do topo do óleo.

Como exemplo da aplicação de um simulador no sistema de monitoramento da ALSTOM instalado no sistema de FURNAS na SE Ouro Preto, temos as telas das figuras 4 e 5 abaixo.

FURNAS Centrais Elétricas S.A. **MONITORING SYSTEM MS 2000** **Ouro Preto** **ALSTOM**

Status Geral Diagn. Diagnósticos Ações Recomendadas **Simulador** Transformador 1 Parte Ativa

ONLINE

Módulo Temperatura Hot Spot e Fator de Carga

Entrada

fator de potencia 1.0

temperatura topo do óleo 80.0 °C

corrente de carga H1 462 A

posição comutador 0

Cálculo

temperatura Hot Spot 73.7 °C

Avaliação / Diagnóstico

sem diagnóstico

SIMULADOR

Módulo Temperatura Hot Spot e Fator de Carga

Carregar dados on-line

Entrada

fator de potencia 1.5

temperatura topo do óleo 111.5 °C

corrente de carga H1 462 A

posição comutador 1

Simular

Cálculo

temperatura Hot Spot 124.7 °C

Avaliação / Diagnóstico

há diagnóstico diagnóstico

Status Geral
 Status Diagnóstico
 Status Tendência
 Transformador 1
 Transformador 2
 Transformador 3
 Transformador 4
 Avisos
 Dados Históricos
 Dados do Sistema

Figura 4 – Simulação da taxa de envelhecimento do transformador – cálculo da temperatura de hotspot.

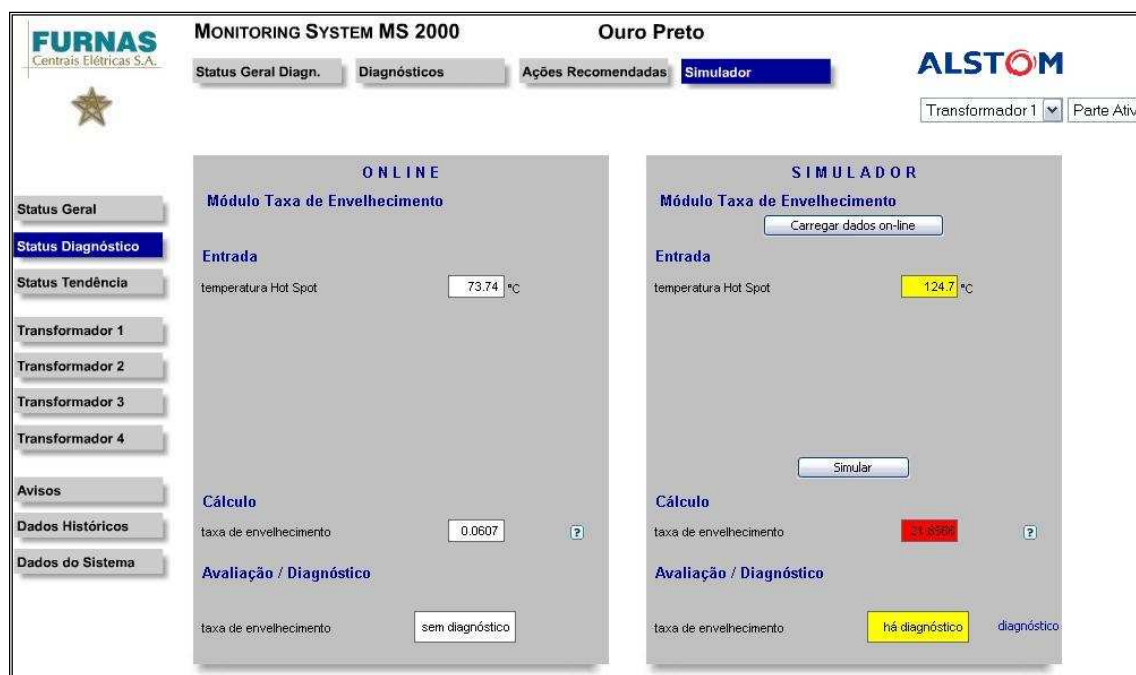


Figura 5 – Simulação com cálculo da taxa de envelhecimento do transformador.

9. CONCLUSÃO

Com as recentes revisões do Sub Módulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS, por estarem em vias de serem homologadas pela ANEEL, ainda persistem dúvidas de como interpretar estes ciclos de operação indicados.

É necessário que todas as empresas do setor tenham a mesma postura com relação as sobrecargas para que os fabricantes possam ofertar equipamento correto.

É necessário normatizar a maneira de ensaiar o equipamento para verificar o atendimento dos requisitos do Sub Módulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS.

Para um correto dimensionamento uma avaliação precisa pelo fabricante da verificação da capacidade de suportar as sobrecargas, é importante que o fabricante saiba de maneira clara já no período da oferta qual o ciclo de carga a que o transformador estará submetido.

Hoje em dia, modernos sistemas de monitoramento para transformadores de potência já possuem ferramentas capazes de simular situações de sobrecarga, avaliando então a possível taxa de envelhecimento do equipamento diante da possível situação de carregamento de emergência.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NBR 5416:1997 – Transformadores de Potência. – Guia de Carregamento
- (2) NBR 5356-2:2007 – Transformadores de Potência. – Aquecimento
- (3) Resolução Normativa nº 191 da ANEEL
- (4) Resolução Normativa nº 513 da ANEEL
- (5) Editais de leilões da ANEEL
- (6) Procedimentos de Rede do ONS

11. DADOS BIOGRÁFICOS



Engº Andre Vita
 Universidade Gama Filho
 FURNAS Centrais Elétricas S.A. - desde 1988
 Departamento de Engenharia Elétrica - DEL.E
 Autor de mais de 36 trabalhos nacionais e internacionais.
 Membro Individual CIGRE - Brasil