



**ABNT- Associação
Brasileira de
Normas Técnicas**

Sede:
Rio de Janeiro
Av. Treze de Maio, 13/28^o
andar
CEP 20003-900- Caixa Postal
1680
Rio de Janeiro - RJ
Tel.: PABX (021) 210-3122
telex: (021) 34333 ABNT-BR
Endereço Telegráfico:
NORMA TÉCNICA

Copyright © 1997
ABNT - Associação Brasileira
de Normas Técnicas
Printed in Brazil /
Impresso no Brasil
Todos os direitos reservados

	JUL 1997	NBR 5416
Aplicação de cargas em transformadores de potência - Procedimento		
CB - 03 - Comitê Brasileiro de Eletricidade CE - 03:014.10 - Comissão de Estudo de Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência NBR 5416 - Load application on power transformer - Procedure Descriptors: Loading, transformer, power transformer Esta Norma substitui a NBR 5416/1981		
Palavras-chave: carregamento, transformador, transformador de potência		91 páginas

SUMÁRIO

Prefácio

- 1 Objetivo
- 2 Referências normativas
- 3 Definições
- 4 Bases desta Norma
- 5 Procedimento 1 - Usuários que não dispõem de controle das condições operacionais
- 6 Procedimento 2 - Usuários que dispõem de controle das condições operacionais
- 7 Transformadores elevadores de usina

ANEXOS

- A** - Tabelas de características dos transformadores
- B** - Tabelas de carregamento e exemplos de utilização
- C** - Exemplo de cálculo da temperatura para transformadores de 2 enrolamentos (Seção 5)
- D** - Exemplo de cálculo da temperatura para transformadores (Seção 6)
- E** - Formação de bolhas nos transformadores em operação
- F** - Bibliografia

Prefácio

A ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - é o Fórum Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (CB) e Organismos de Normalização Setorial (ONS), são elaborados por Comissões de Estudo (CE), formadas por representantes dos setores envolvidos, delas fazendo parte: produtores, consumidores e neutros (universidades, laboratórios e outros).

Os Projetos de Norma Brasileira, elaborados no âmbito dos CB e ONS, circulam para Votação Nacional entre os associados da ABNT e demais interessados.

Esta revisão da Norma NBR 5416/81 foi elaborada pela CE - 03:014.10 - Comissão de Estudo de Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência, do CB - 03 - Comitê Brasileiro de Eletricidade. Incorpora o Procedimento 2, descrito na seção 6, que não tem limitação de potência na sua aplicação, enquanto que a edição anterior da Norma abrangia somente transformadores com potência até 100 MVA. O Procedimento 1 corresponde basicamente ao estabelecido na edição anterior (1981) da Norma, com alterações nos limites de temperatura e de cargas máximas.

Os anexos A,B,C,D e E (normativos) são parte integrante desta Norma. O anexo F é informativo.

1 Objetivo

1.1 Esta Norma fornece os procedimentos para a aplicação de cargas em transformadores e autotransformadores de potência, fabricados e ensaiados de acordo com a NBR 5356, e imersos em líquido isolante, com dois ou mais enrolamentos, trifásicos ou bancos com unidades monofásicas. Os procedimentos a serem seguidos dependem do controle, disponível ao usuário, das condições operacionais e se baseiam no envelhecimento da isolação dos enrolamentos. Para isto, a Norma estabelece dois procedimentos. Caso não sejam disponíveis dados de manutenção e operativos, deve-se utilizar o Procedimento 1, descrito na seção 5 desta Norma, que contempla transformadores com potência até 100 MVA. Caso estes dados sejam disponíveis, deve-se utilizar o Procedimento 2, descrito na seção 6, que não tem limitação de potência.

1.2 Esta Norma se aplica a transformadores e autotransformadores de:

- a) classe 55^oC: são aqueles cuja elevação da temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 55^oC e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 65^oC;
- b) classe 65^oC: são aqueles cuja elevação da temperatura média dos enrolamentos, acima da ambiente, não excede 65^oC e cuja elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento, acima da ambiente, não excede 80^oC.

1.3 Esta Norma não se aplica a transformadores de distribuição nem a transformadores subterrâneos.

1.4 Para transformadores e autotransformadores fabricados antes da vigência desta Norma, com até 100 MVA de potência trifásica, devem-se estabelecer limites específicos de cargas máximas admissíveis, compatíveis com o Procedimento 1 desta Norma.

2 Referências normativas

As normas relacionadas a seguir contêm disposições que, ao serem citadas neste texto, constituem prescrições para esta Norma Brasileira. As edições indicadas estavam em vigor no momento desta publicação. Como toda norma está sujeita a revisão, recomenda-se àqueles que realizam acordos com base nesta que verifiquem a conveniência de se usarem as edições mais recentes das normas citadas a seguir. A ABNT possui a informação das Normas Nacionais em vigor em um dado momento.

NBR 5356/1993 - Transformadores de potência - Especificação

NBR 5456/1987 - Eletricidade geral - Terminologia

NBR 5458/1986 - Transformadores-Terminologia

NBR 5460/1992 - Sistemas elétricos de potência - Terminologia

ASTM D 974/1995 - Standard test method for acid and base number by color-indicator titration

ASTM D 1348/1994 - Standard test methods for moisture in cellulose

3 Definições

Para os efeitos desta Norma, aplicam-se as definições de 3.1 a 3.4, complementadas pelas contidas nas NBR 5356, NBR 5456, NBR 5458 e NBR 5460.

3.1 Carga: Corrente fornecida pelo transformador através do enrolamento considerado.

3.2 Carga nominal: Corrente nominal do enrolamento considerado.

3.3 Carregamento admissível: Capacidade de corrente admissível do transformador, em amperes, podendo ser, inclusive, superior à corrente nominal, desde que respeitados os limites estabelecidos nesta Norma.

3.4 Sobrecarga: Carregamento no qual são excedidos os limites estabelecidos nesta Norma.

4 Bases desta Norma

4.1 Expectativa de vida.

4.1.1 O sistema papel isolante é submetido a um processo contínuo de degradação por ação da água, oxigênio e ácidos presentes no óleo isolante. Mantendo-se sob controle a ação desses contaminantes, o envelhecimento da celulose é predominantemente térmico e cumulativo. Para os objetivos desta Norma, o envelhecimento está baseado na vida esperada do transformador, sob efeito da temperatura de operação da isolação ao longo do tempo.

4.1.2 A deterioração da isolação em função do tempo e da temperatura é fundamentada na teoria de Arrhenius, que estabelece que o logaritmo da vida da isolação é uma função do inverso da temperatura absoluta (ver Figura 1):

$$\text{Log Vida (horas)} = A + B/T \quad (\text{equação 1})$$

onde:

T = temperatura absoluta em graus Kelvin ($\theta_e + 273^\circ\text{C}$)

θ_e = temperatura do ponto mais quente dos enrolamentos em $^\circ\text{C}$

A e B = constantes da curva de expectativa de vida.

4.1.3 Não há um critério único para a avaliação do fim da vida do transformador. Entretanto, é possível fazer-se uma avaliação da velocidade do envelhecimento adicional a que está sendo submetido o equipamento, comparando a perda de vida com uma taxa de perda de vida média de referência.

Calcula-se a perda de vida, ao longo de um período de tempo Δt (horas), em que a temperatura do ponto mais quente do enrolamento (θ_e) permanece constante, pela equação:

$$\text{PV}\% = 10 \left[\frac{B}{273 + \theta_e} + A \right] \cdot 100 \Delta t \quad (\text{equação 2})$$

onde:

$A = -14,133$ (transformador de 55°C)

$A = -13,391$ (transformador de 65°C)

$B = 6\,972,15$

O valor obtido representa a taxa de envelhecimento global a que é submetida a isolação sólida, no intervalo de tempo Δt .

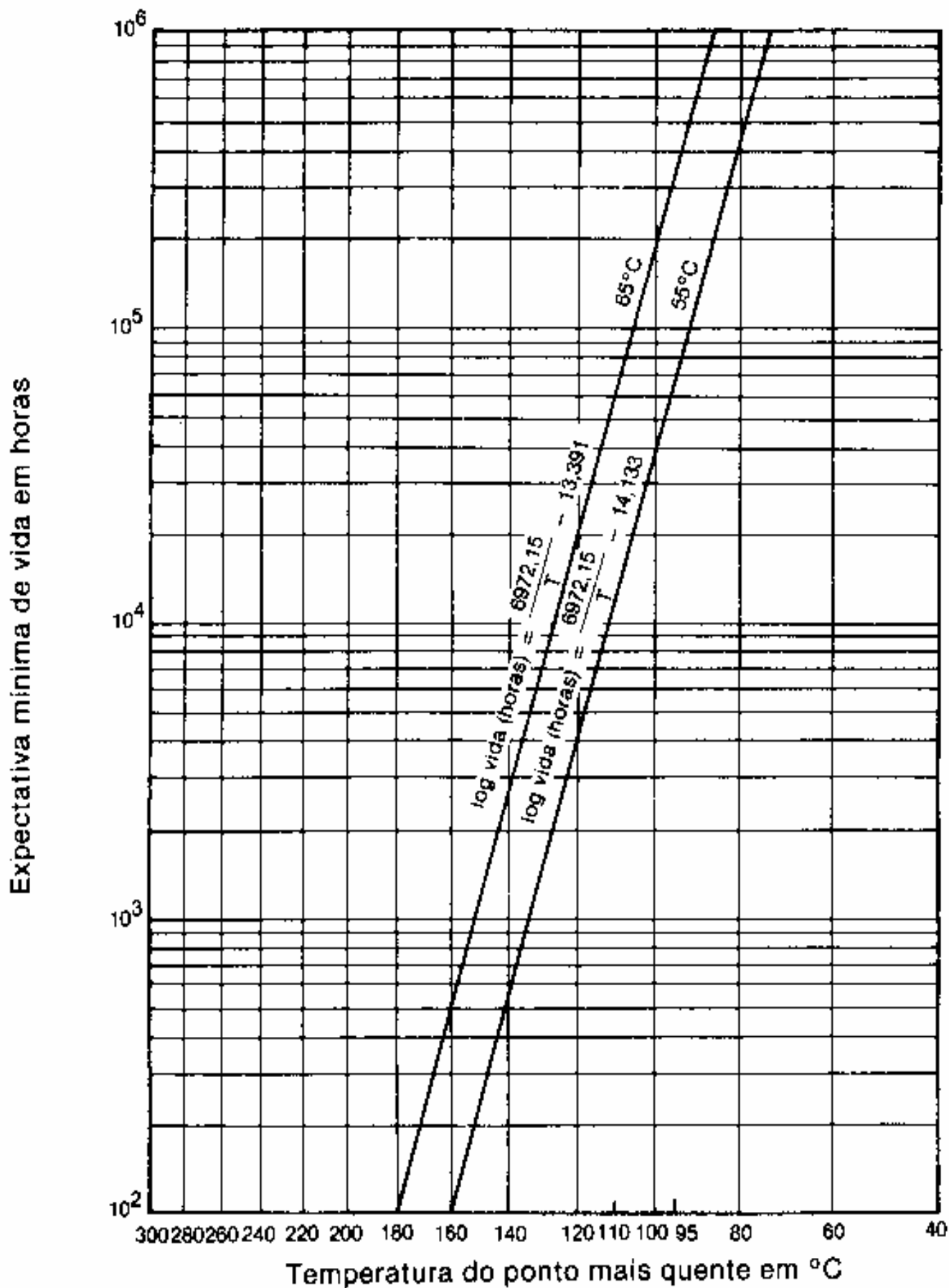


Figura 1 - Curva de expectativa de vida

4.2 Temperatura ambiente

A temperatura ambiente é um fator importante para a determinação da capacidade de carga do transformador, uma vez que a elevação de temperatura para qualquer carga deve ser acrescida à ambiente para se obter a temperatura de operação.

Preferencialmente, utiliza-se a medição da temperatura ambiente real para se determinar a temperatura do ponto mais quente do enrolamento e a capacidade de carga do transformador.

Entretanto, quando a temperatura real não estiver disponível, utiliza-se o histórico da temperatura ambiente, para determinado mês, obtido dos relatórios do serviço de meteorologia do Ministério da Agricultura, os quais fornecem a temperatura média mensal e a média das máximas temperaturas diárias para as várias regiões do país:

- a) temperatura média: usa-se a média, para o mês em questão, das temperaturas médias mensais obtidas no decorrer de vários anos;
- b) média das temperaturas máximas diárias: usa-se a média, para o mês em questão, das médias mensais das temperaturas máximas diárias obtidas no decorrer de vários anos.

Esses resultados devem ser usados como segue:

- para análise de carregamento em condição normal de operação, qualquer que seja o horizonte de análise, deve-se utilizar a alínea (a) como temperatura ambiente para o mês em questão;
- para análise de carregamento em outras condições de operação, deve-se utilizar a alínea (b) como temperatura ambiente para o mês em questão.

Para a determinação da temperatura provável (futura), onde as temperaturas média e/ou máxima possam ser superiores às definidas em (a) e (b), essas temperaturas devem ser acrescidas de 5°C, uma vez que o envelhecimento em temperaturas mais altas que a média nem sempre é compensado pelo menor envelhecimento em temperaturas mais baixas que a média. Com essa margem, a temperatura obtida poderá ser excedida apenas em uns poucos dias por mês e, quando for excedida, a perda de vida adicional não será significativa.

4.3 Curto-circuito

O fator determinante no envelhecimento térmico do transformador é a corrente de carga, não se levando em consideração as correntes de curto-circuito, às quais o transformador pode ser submetido.

4.4 Tensão

Para os efeitos desta Norma, a tensão nos terminais do transformador não afeta os cálculos de elevação de temperatura nem os de expectativa de vida do equipamento, desde que respeitados os limites estabelecidos pela NBR 5356.

4.5 Ciclo de carga

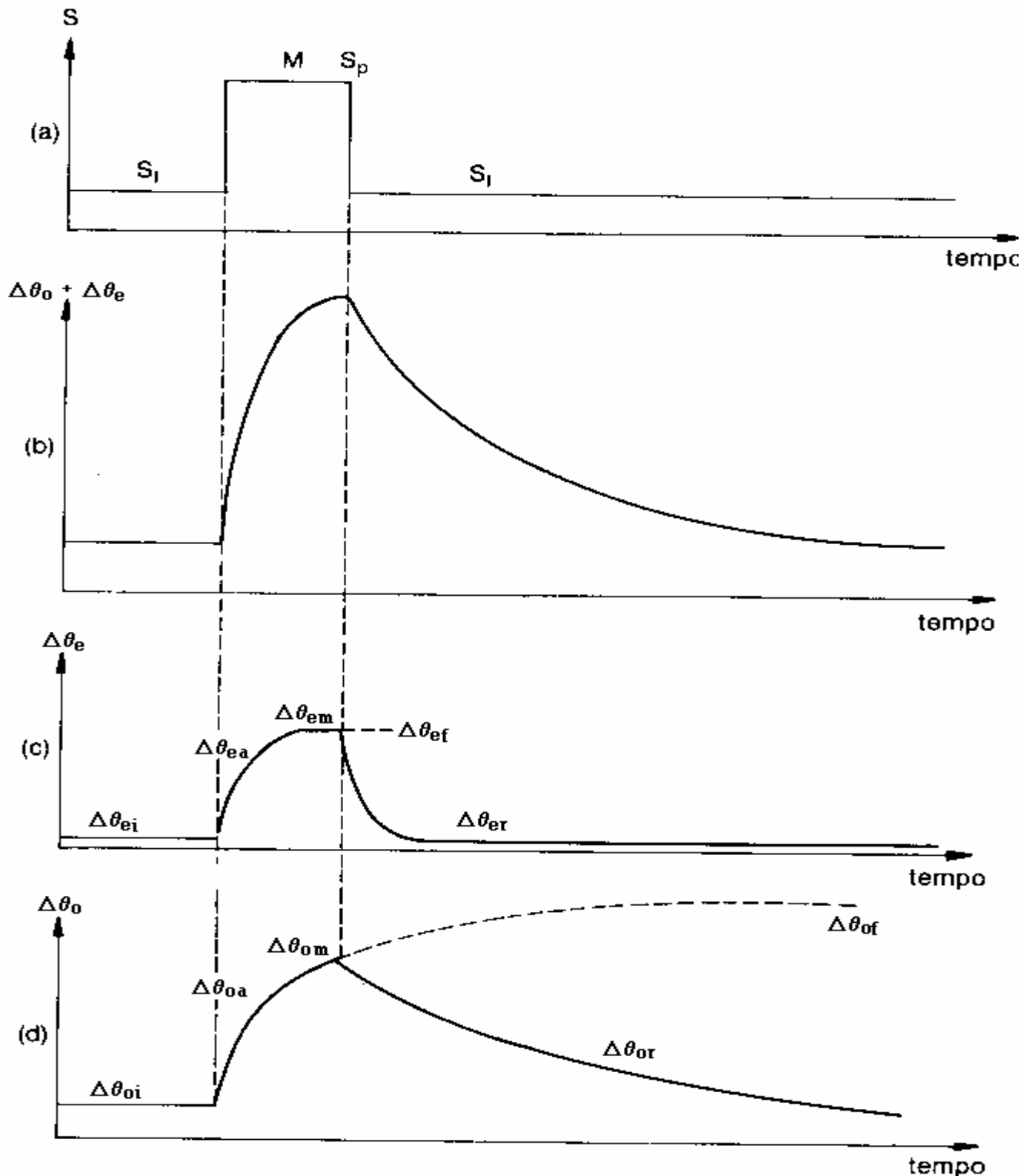
Os transformadores, usualmente, operam em um ciclo de carga que se repete a cada 24 horas. Este ciclo de carga pode ser constante ou pode ter um ou mais picos durante o período de 24 horas. O ciclo de carga real pode ser convertido para um ciclo de carga equivalente, de formato retangular, pelo método dado em 5.6, para usuários do Procedimento 1, ou manter-se inalterado, para usuários do Procedimento 2.

4.6 Elevações de temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento

Quando aplicado um ciclo de carga ao transformador, as temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente do enrolamento crescem e decrescem exponencialmente, conforme mostrado na Figura 2.

4.7 Limitações ao carregamento

Nesta Norma, são admitidas cargas limites para as quais não devem existir quaisquer outras limitações, além das capacidades térmicas dos enrolamentos e do sistema de resfriamento.



- (a) ciclo genérico com dois níveis de carga;
 (b) elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre o ambiente;
 (c) elevação de temperatura do ponto mais quente do enrolamento sobre a temperatura do topo do óleo;
 (d) elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente

Figura 2 - Ciclo genérico com dois níveis de carga e temperaturas resultantes

5 Procedimento 1 - Usuários que não dispõem de controle das condições operacionais

5.1 Objetivo

Fornecer, aos usuários com mínimas informações operacionais sobre o transformador, as condições para aplicação de cargas em transformadores com 2 ou mais enrolamentos e com potências nominais trifásicas de até 100 MVA.

Para os casos de transformadores com mais de dois enrolamentos, o usuário deve utilizar a mesma formulação dos transformadores de 2 enrolamentos. Entretanto, deve ser considerada, como potência nominal, aquela do enrolamento que estiver submetido ao maior percentual de carga, considerando-se os demais a vazio.

5.2 Características dos transformadores

Com as características constantes do anexo A, determina-se a carga admissível para as condições do usuário, levando-se em conta a temperatura ambiente, a carga inicial e a duração da ponta de carga. Estas características foram utilizadas no cálculo dos carregamentos indicados nas tabelas do anexo B, resultando em carregamentos admissíveis conservadores.

Se as características específicas de um transformador são conhecidas e se for desejável maior precisão nos resultados, o usuário pode utilizar as equações de 5.7, conforme exemplo no anexo C.

5.3 Temperaturas limites

Tabela 1 - Temperaturas limites

Transformador	55°C	65°C
Máxima temperatura do topo do óleo	95°C	105°C
Máxima temperatura do ponto mais quente	105°C	120°C

NOTA - Cumpre notar que aplicações de carga superiores às de operação contínua do ponto mais quente a 95°C, no caso de transformador de 55°C e 110°C, no caso de transformador de 65°C, causam envelhecimento acelerado da celulose.

5.4 Cargas limites

Tabela 2 - Cargas limites

Carregamento nos transformadores	55°C	65°C
Em condições normais de operação	150%	150%
Em emergência	150%	150%

NOTA - Como nesta Norma não são consideradas variações nas tensões, os valores percentuais das cargas são iguais aos valores percentuais das correntes nos enrolamentos considerados.

5.5 Condições especiais

5.5.1 Operação com parte ou todo sistema de resfriamento fora de serviço

Em transformadores providos de equipamentos auxiliares no sistema de resfriamento, tais como bombas, ventiladores ou ambos, pode ser necessário operá-los por algum tempo com esses equipamentos fora de serviço. O procedimento para aplicação de carga nesses casos é dado nas subseções a seguir, utilizando-se a simbologia dos tipos de resfriamento da NBR 5356.

5.5.1.1 Transformadores com sistema de resfriamento ONAN/ONAF

Nestes casos, quando os ventiladores estiverem inoperantes, tomam-se os dados indicados na placa de identificação para o sistema de resfriamento ONAN e aplicam-se cargas como se o transformador tivesse somente este sistema de resfriamento.

5.5.1.2 Transformadores com sistema de resfriamento ONAN/ONAF/OFAF

Dependendo de serem as bombas, ou os ventiladores, ou ambos, que estiverem fora de serviço, tomam-se, na placa de identificação, os dados correspondentes ao sistema de resfriamento que permanece em funcionamento e aplicam-se cargas como se o transformador tivesse somente este sistema de resfriamento.

5.5.1.3 Transformadores com sistema de resfriamento com trocador de calor OFAF ou OFWF

Considerando-se que, nestes casos, a operação do transformador com todas as bombas ou todos os ventiladores, ou ambos, fora de serviço, raramente acontece, se essa operação for necessária, as seguintes condições devem ser observadas, a fim de se evitar danos ao transformador:

- a) a carga nominal pode ser mantida durante, aproximadamente, meia hora após operação contínua com carga nominal, sob uma temperatura ambiente de 30°C, e com todos os equipamentos do sistema de resfriamento em serviço;
- b) a carga nominal pode ser aplicada durante aproximadamente uma hora e meia, se a operação for iniciada com os enrolamentos e o óleo sob a temperatura de 30°C;
- c) a tensão nominal pode ser mantida durante 6 horas, em vazio, após operação contínua com carga nominal, sob uma temperatura ambiente de 30°C, e com todos os equipamentos do sistema de resfriamento em serviço;
- d) a tensão nominal pode ser mantida durante 12 horas, em vazio, se a operação for iniciada com os enrolamentos e o óleo sob a temperatura de 30°C.

Estando somente parte do sistema de resfriamento em funcionamento, as seguintes cargas são permissíveis, produzindo aproximadamente a mesma elevação de temperatura que o funcionamento sob carga nominal, com todo o sistema de resfriamento em serviço:

Tabela 3 - Carga permitida em percentagem da carga nominal x percentagem do sistema de resfriamento em serviço

Percentagem do sistema de resfriamento em serviço	Carga permitida em percentagem da carga nominal
80	90
60	78
50	70
40	60
33	50

5.6 Método de conversão do ciclo de carga real para o ciclo de carga equivalente

5.6.1 O carregamento admissível, obtido das Tabelas 11 a 50 (anexo B), é uma função da carga inicial, da ponta de carga e de sua duração. Cada combinação de cargas nas tabelas deve ser considerada como um ciclo retangular de carga inicial, essencialmente constante, de 50, 70, 90 ou 100% da capacidade nominal, seguida por uma ponta de carga retangular de grandeza e duração dadas nas tabelas. O carregamento considerado para os cálculos das tabelas é ilustrado na Figura 3.

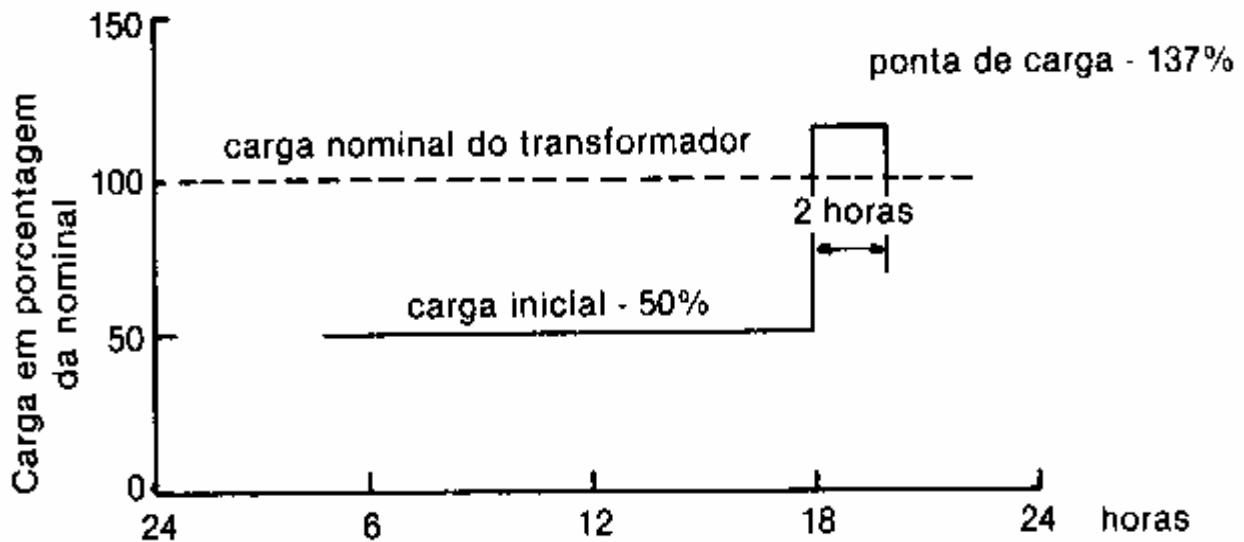


FIGURA 3 — Ciclo de carga considerado

5.6.2 Normalmente, o ciclo de carga real diário é irregular, conforme mostrado pela linha contínua da Figura 4, existindo, geralmente, um período em que a carga alcança um valor consideravelmente maior do que qualquer outro no resto do dia. Na maioria das vezes, a carga se aproxima e se afasta do valor máximo, ou ponta de carga, gradualmente e não bruscamente.

5.6.3 Para se usarem as recomendações de carregamento, o ciclo de carga real precisa ser convertido para um ciclo de carga retangular simples, termicamente equivalente, tal como é representado pela linha pontilhada da Figura 4. Um transformador alimentando uma carga variável sofre uma perda variável, cujo efeito é aproximadamente o mesmo que o de uma carga intermediária mantida constante pelo mesmo período de tempo. Tal fato deve-se às características de armazenamento de calor dos materiais do transformador. Uma carga, que gera as mesmas perdas que as causadas pela carga variável, é uma carga equivalente do ponto de vista de temperatura. A carga equivalente para qualquer parte de um ciclo de carga diário pode ser expressa pela equação:

$$\text{Carga equivalente ou valor médio quadrático} = \sqrt{\frac{S_1^2 \cdot t_1 + S_2^2 \cdot t_2 + S_3^2 \cdot t_3 + \dots + S_n^2 \cdot t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n}} \quad (\text{equação 3})$$

onde:

$S_1, S_2, S_3, \text{ etc}$ = vários degraus de carga em porcentagem, p.u., kVA ou corrente real;

$t_1, t_2, t_3, \text{ etc}$ = durações respectivas dessas cargas.

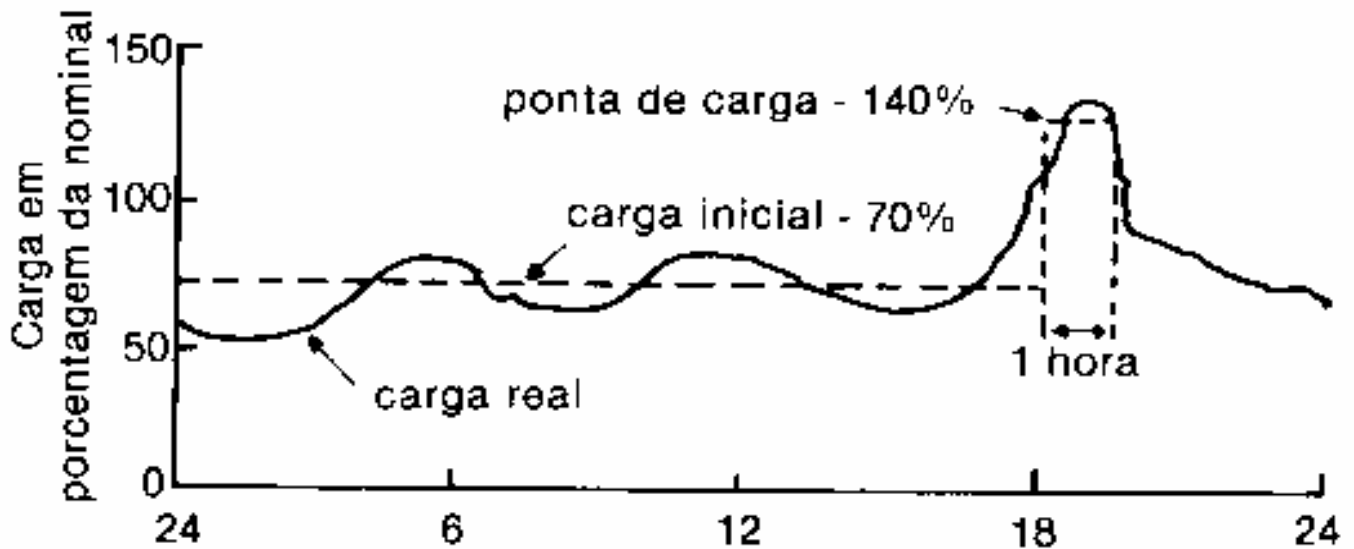


FIGURA 4 — Ciclo de carga real

5.6.4 A **carga básica equivalente** é o valor médio quadrático de carga, obtido pela equação 3, ao longo dos períodos anterior e posterior ao pico de carga. Embora para fins de cálculo de perda de vida, considerem-se períodos de 24 horas, com início no instante do início do pico de carga, recomenda-se que o cálculo da carga básica equivalente inclua o período de carga básica compreendido entre as 12 horas anteriores e as 12 horas posteriores ao ponto médio do pico de carga (ponto M da Figura 2). Sugerem-se intervalos de uma hora, para a aplicação da equação 3.

5.6.5 A **carga equivalente da ponta**, para um ciclo de carga, é o valor médio quadrático obtido pela equação 3, para o período limitado sobre o qual a maior parte da ponta irregular real parece existir. A duração estimada da ponta de carga tem considerável influência sobre o cálculo da carga equivalente. Se a duração for superestimada, o valor médio quadrático de ponta poderá ficar consideravelmente abaixo da ponta de demanda máxima. Como precaução contra superaquecimento devido a carregamentos acima do nominal, de curta duração e de grande magnitude, durante o período de ponta, o valor médio quadrático não deve ser menor do que 90% da demanda máxima integrada no período de 1/2 hora.

5.6.6 Este método pode ser usado para converter um ciclo de carga irregular como o mostrado na Figura 4, para um ciclo de carga retangular. Neste caso, a carga básica é de 70% e a da ponta, de 140% da potência nominal.

5.6.7 A Tabela 12 (anexo B) mostra que a carga admissível, após um carregamento contínuo de 70%, com a temperatura ambiente a 30°C, é de 136% durante uma hora, sem que sejam ultrapassados os valores limites de temperatura prescritos nesta Norma.

5.7 Cálculo da temperatura de transformadores sob a aplicação de cargas

5.7.1 Geral

As tabelas de carregamento desta Norma são baseadas em características médias de uma larga faixa de transformadores. As Tabelas 9 e 10 (anexo A) dão as características utilizadas no cálculo dos carregamentos das Tabelas 11 a 50 (anexo B). Quando as características de um transformador determinado variarem apreciavelmente em relação àquelas das tabelas, ou quando capacidades de carga mais precisas forem desejadas, podem ser utilizadas as equações básicas deste capítulo.

5.7.2 Lista de símbolos

Salvo indicação diferente, todas as temperaturas são em graus Celsius e todos os tempos expressos em horas.

a	=	temperatura ambiente
θ	=	temperatura do topo do óleo
e	=	temperatura do ponto mais quente do enrolamento
e	=	elevação de temperatura do ponto mais quente sobre a temperatura do topo do óleo
ea	=	e durante o aquecimento
er	=	e durante o resfriamento
en	=	elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento, sob carga nominal, sobre a temperatura do topo do óleo, obtida a partir da elevação da temperatura média do enrolamento sob carga nominal, em relação à do topo do óleo acrescida de 10°C (15°C) para transformadores de 55°C (65°C)
θ	=	elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente
oa	=	θ durante o aquecimento
or	=	θ durante o resfriamento
on	=	elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente sob carga nominal
oi	=	elevação inicial de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente, para $t = 0$
of	=	elevação final de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente para a carga de ponta S_p
ei	=	elevação inicial do ponto mais quente sobre o topo do óleo para $t = 0$
ef	=	elevação final do ponto mais quente sobre o topo do óleo para a carga de ponta S_p
om	=	máxima elevação do topo do óleo sobre o ambiente durante o carregamento
em	=	máxima elevação do ponto mais quente sobre o topo do óleo durante o carregamento
K_i	=	razão entre a carga inicial S_i e a carga nominal S_n
K_p	=	razão entre a carga de ponta S_p e a carga nominal S_n
S_i	=	carga inicial ou carga básica
S_n	=	carga nominal
S_p	=	carga da ponta
R	=	relação entre as perdas em carga sob carga nominal e a perda em vazio
e	=	2,71828 (base do logaritmo natural)
t	=	tempo
t_p	=	tempo de duração da ponta
t	=	intervalo de tempo genérico

- P_n = perda total sob carga nominal
 P = variação da perda total devido à variação da carga
 T_0 = constante de tempo térmica do transformador, para qualquer carga e para qualquer diferença de temperatura, entre a elevação final e a inicial do topo do óleo:

$$T_0 = C \left(\frac{\Delta\theta_{of} - \Delta\theta_{oi}}{\Delta P} \right)$$

 T_e = constante de tempo térmica do ponto mais quente
 T_n = constante de tempo térmica para a carga nominal, começando com a elevação inicial do topo do óleo de 0°C sobre o ambiente
 PV = perda de vida
 C = capacidade térmica do transformador (watt-horas por graus Celsius)
 n = expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do topo do óleo, que depende do método de resfriamento em funcionamento (ver Tabelas 9 e 10 - anexo A)
 m = expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do ponto mais quente, que depende do método de resfriamento em funcionamento (vide Tabelas 9 e 10 - ANEXO A)

5.7.3 Método de cálculo

As considerações e formulário, a seguir, pressupõem a existência de um ciclo simples, formado por uma carga básica e um pico de carga, constantes ao longo de sua duração.

Geralmente, o ciclo de carga diário não é tão simples, e os cálculos devem ser precedidos pela determinação de um ciclo equivalente, o que pode ser feito pelo processo apresentado em 5.6. Ciclos de operação, que não possam ser adequadamente representados por dois únicos níveis de carga, também são passíveis de estudo por processo semelhante ao que será visto a seguir, exigindo apenas algumas adaptações.

O método exige a divisão do período em exame (24 horas a contar do início do pico de carga) em intervalos de pequena duração e o cálculo da temperatura do ponto mais quente, ao fim de cada um desses intervalos. A temperatura do ponto mais quente do enrolamento é suposta constante, ao longo de cada intervalo, e igual ao seu valor final.

Quanto maior for o número de intervalos em que o ciclo de carga for dividido, mais preciso será o cálculo da temperatura do ponto mais quente. Intervalos mais longos acarretam, normalmente, resultados mais conservadores.

5.7.3.1 Transformadores de 2 enrolamentos e autotransformadores sem terciário

Equações para determinação da temperatura

- Elevação de temperatura durante o aquecimento:

$$\text{óleo} \rightarrow \Delta\theta_{oa} = \left(\Delta\theta_{of} - \Delta\theta_{oi} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_0}} \right) + \Delta\theta_{oi} \quad (\text{equação 4})$$

$$\text{enrolamento} \rightarrow \Delta\theta_{ea} = (\Delta\theta_{ef} - \Delta\theta_{ei}) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_e}} \right) + \Delta\theta_{ei} \quad (\text{equação 5})$$

- Elevação de temperatura durante o resfriamento:

$$\text{óleo} \rightarrow \Delta\theta_{or} = (\Delta\theta_{om} - \Delta\theta_{oi}) e^{-\frac{t'}{T_o}} + \Delta\theta_{oi} \quad (\text{equação 6})$$

$$\text{enrolamento} \rightarrow \Delta\theta_{er} = (\Delta\theta_{em} - \Delta\theta_{ei}) e^{-\frac{t'}{T_e}} + \Delta\theta_{ei} \quad (\text{equação 7})$$

onde: $t' = t - t_p$

$$\Delta\theta_{of} = \Delta\theta_{on} \left[\frac{k_p^2 R + 1}{R + 1} \right]^n \quad (\text{equação 8})$$

$$\Delta\theta_{ef} = \Delta\theta_{en} \left(k_p^2 \right)^m \quad (\text{equação 9})$$

$$\Delta\theta_{oi} = \Delta\theta_{on} \left[\frac{k_i^2 R + 1}{R + 1} \right]^n \quad (\text{equação 10})$$

$$\Delta\theta_{ei} = \Delta\theta_{en} \left(k_i^2 \right)^m \quad (\text{equação 11})$$

$$\Delta\theta_{om} = \Delta\theta_{oa} \quad \text{para } t = t_p \quad (\text{equação 12})$$

$$\Delta\theta_{em} = \Delta\theta_{ea} \quad \text{para } t = t_p \quad (\text{equação 13})$$

$$k_p = \frac{S_p}{S_n} \quad (\text{equação 14})$$

$$k_i = \frac{S_i}{S_n} \quad (\text{equação 15})$$

e, a menos das correções definidas em 5.7.3.2:

$$T_o = T_n$$

onde:

$$T_n = C \frac{\Delta\theta_{on}}{P_n} \quad (\text{equação 16})$$

e, para transformadores com fluxo de óleo não dirigido:

$$C = 0,132 \text{ (massa do núcleo e das bobinas, em kg)} + 0,088 \text{ (massa do tanque e dos acessórios, em kg)} + 0,351 \text{ (litros de óleo);}$$

e para transformadores com fluxo de óleo dirigido:

$$C = 0,132 \text{ (massa do núcleo e das bobinas, em kg)} + 0,132 \text{ (massa do tanque e dos acessórios, em kg)} + 0,510 \text{ (litros de óleo).}$$

As temperaturas do topo do óleo e do ponto mais quente são calculadas, respectivamente, por:

$$\begin{aligned} \theta_o &= \Delta\theta_o + \theta_a \\ \theta_e &= \Delta\theta_e + \theta_o \end{aligned}$$

5.7.3.2 Correção das equações

Teoricamente, diversas correções poderiam ser feitas quando são usadas as equações acima para o cálculo das elevações de temperatura, tais como as correções para as variações:

- da constante de tempo térmica do transformador, para cargas acima da nominal;
- do valor da resistência elétrica do condutor;
- da viscosidade do óleo;

Para fins práticos, entretanto, se essas correções forem omitidas, serão obtidos resultados suficientemente precisos. Com a elevação da temperatura, a resistência elétrica do condutor, para as condições de carregamento acima da nominal, é maior do que para a condição nominal. Poder-se-ia, assim, aplicar um fator de correção no cálculo das perdas, se tal refinamento fosse justificável. Contudo, com esse acréscimo de temperatura, há uma diminuição da viscosidade do óleo que, permitindo uma maior circulação deste, melhora a dissipação do calor. Dessa forma, este efeito tende a compensar o efeito do aumento da resistência.

5.8 Utilização das tabelas de capacidade de carga

As Tabelas 11 a 50 (anexo B), que indicam a ponta de carga a ser imposta a um transformador de potência, para uma determinada duração, foram obtidas com a utilização das equações de 5.7.3.1.

Aplicações de cargas que causam envelhecimento acelerado do transformador aparecem indicadas nas tabelas. O fluxograma adotado para os cálculos é mostrado na Figura 5.

5.8.1 Dados necessários

Para a utilização das tabelas, o usuário deve dispor dos seguintes dados:

- temperatura ambiente. (θ_a);
- carga contínua inicial (S_i);

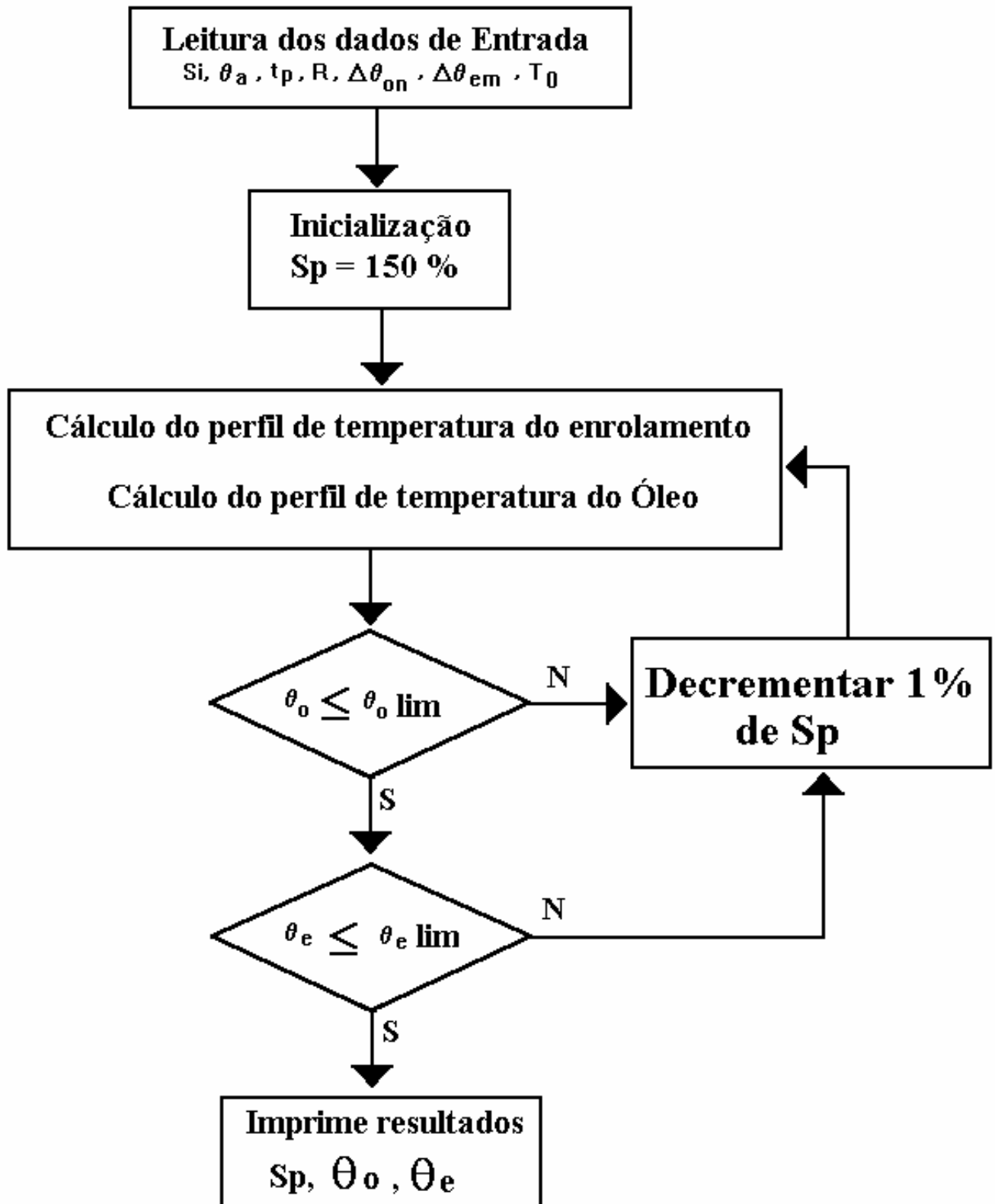


Figura 5 - Fluxograma

- c) duração da. ponta. de carga (t_p);
- d) método de resfriamento (ONAN, ONAF, etc);
- e) limite de elevação da temperatura média dos enrolamentos (55°C ou 65°C).

6 Procedimento 2 - Usuários que dispõem de controle das condições operacionais

6.1 Objetivo

Fornecer, aos usuários que dispõem de controle das condições operacionais das unidades transformadoras, procedimentos na aplicação de cargas em transformadores, com 2 ou mais enrolamentos e sem limitação de potência. Tais controles permitirão otimizar a utilização destes equipamentos quanto à forma de carregamento.

6.2 Controle das condições operacionais

6.2.1 Ensaios por gás - cromatografia

Devem ser levados em consideração, como limitantes nos procedimentos de carregamento, os casos em que existem suspeitas de falhas incipientes, detetadas a partir dos diagnósticos de gás-cromatografia e que, apesar disso, o transformador é mantido em operação. Nestas condições, não se deve exceder a corrente nominal. A quantidade de oxigênio não limita o carregamento. No entanto, no sentido de se atender à expectativa de vida (ver 6.4), no que diz respeito à aceleração do processo de envelhecimento da celulose, sua concentração no óleo isolante não deve ultrapassar o valor de 3000 p.p.m.

6.2.2 Ensaios físico-químicos

Para a aplicação, de maneira confiável, dos níveis de carregamento desta seção da Norma, é necessário que os valores de teor de água e índice de neutralização do óleo isolante do transformador estejam conforme a Tabela 4. Todavia, no sentido de garantir que o envelhecimento da isolação seja predominantemente térmico, deve ser observado o estabelecido em 6.4.

Tabela 4 - Valores físico-químicos limites do óleo isolante

Ensaio	Norma de ensaio	Óleo em operação	Óleo em operação
		< 242 kV	242 kV
Teor de água (ppm) a 60°C	NBR 5755	35	25
Índice de neutralização (mg KOH/g)	ASTM-D974	<0,20	< 0,15

NOTAS

1 Os valores da tabela foram obtidos da recomendação SCM-019/ELETOBRÁS.

2 Caso o óleo esteja a uma temperatura diferente de 60°C, o teor de água deve ser relacionado de acordo com a Figura 6.

6.2.3 Características do transformador

Os transformadores possuem características que determinam a capacidade de seu carregamento.

6.2.3.1 Características básicas

- Classe do transformador (55°C ou 65°C),
- corrente nominal,
- tensão nominal,
- peso da parte ativa,

- peso do tanque e acessórios,
- volume do óleo,
- perdas em carga (perdas binárias para transformadores com mais de 2 enrolamentos),
- perdas em vazio,
- elevação da temperatura no topo do óleo sob carga nominal em relação à ambiente,
- elevação da temperatura média do enrolamento sob carga nominal em relação à do topo do óleo,
- constante de tempo térmica do transformador,
- método de resfriamento,
- tipo do sistema de preservação do óleo.

6.2.3.2 Características específicas

Para que o usuário possa aplicar carga com confiabilidade em seu transformador, deve-se ter conhecimento do histórico do equipamento com registros das manutenções, ocorrências que influenciam na confiabilidade e/ou desgaste prematuro, acessórios etc..

6.2.3.3 Influência das características

Transformadores do mesmo tipo/tensão/potência, e submetidos a ciclos de carga semelhantes, podem apresentar diferentes envelhecimentos devido às suas características.

As principais características que mais influenciam no cálculo da perda de vida do equipamento por envelhecimento térmico são, por ordem de prioridade, as seguintes:

e_n = elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento, sob carga nominal, sobre a temperatura do topo do óleo, obtida a partir da elevação da temperatura média do enrolamento, sob carga nominal em relação à do topo do óleo, acrescida de 10°C (15°C) para transformadores de 55°C (65°C)

NOTA - As temperaturas de acréscimo podem ser menores, dependendo do projeto do transformador

e_o = elevação da temperatura no topo do óleo sob carga nominal em relação à ambiente

T_o = constante de tempo térmica do transformador, para qualquer carga e para qualquer diferença de temperatura entre a elevação final e a inicial do topo do óleo

R = relação entre as perdas em carga, sob carga nominal, e a perda em vazio

n = expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do topo do óleo, que depende do método de resfriamento em funcionamento (vide Tabelas 9 e 10 do anexo A)

m = expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do ponto mais quente, que depende do método de resfriamento em funcionamento (vide Tabelas 9 e 10 do anexo A)

T_e = constante de tempo térmica do ponto mais quente

6.2.4 Determinação das curvas de carga e de temperatura ambiente

Os dados de corrente e temperatura ambiente, a serem utilizados nos cálculos de carregamento, devem ser coletados ao longo do mês, pelo menos uma vez por semana, no dia mais representativo. Estes dados devem ser coletados em intervalos de tempo regulares de, no máximo, uma hora.

Deve-se adotar o seguinte procedimento:

- a curva de carga a ser utilizada será dada pela média dos valores medidos;
- para transformadores de dois enrolamentos, a curva de carga média, em ampères, deve ser medida, preferencialmente, no lado secundário;
- para transformadores de três enrolamentos, deve-se considerar a curva de carga média, em ampères, do enrolamento secundário e do terciário (se houver carga);
- nos sistemas de aquisição de dados automatizados, os dados recebem pré-tratamento de validação e posterior armazenamento; neste caso, o cálculo do carregamento admissível do transformador será feito a qualquer instante, e de acordo com o grau de precisão desejado.

6.2.5 Teor de água nos enrolamentos

A umidade, além de reduzir a resistência de isolamento, é um fator limitante ao carregamento devido à possibilidade de formação de bolhas no transformador.

Tabela 5 - Limites de teor de água no papel isolante (% em massa)

Norma de Ensaio	< 242 kV	242 kV
ASTM D1348	2	1,5

O teor de água deve ser verificado através de amostras de papelão, retiradas da parte ativa, usando métodos de laboratório, como o da ASTM D 1348. Nesse procedimento, é necessário o desligamento do transformador e a drenagem do óleo.

Na impossibilidade de se desligar o transformador, devem ser utilizadas curvas, como as da Figura 6, que fornecem um valor orientativo do teor de água nos enrolamentos, a partir da umidade do óleo.

6.2.6 Formação de bolhas

Temperaturas elevadas do enrolamento, ou variações abruptas da carga ou da pressão atmosférica, combinadas com valores superiores aos limites estabelecidos nesta Norma, podem ocasionar a formação de bolhas, aumentando o risco de falha no equipamento (ver anexo E).

6.3 Tipos de carregamentos admissíveis

Os carregamentos de transformadores são considerados em termos de ciclo de carga, com duração de 24 horas cada ciclo. Os ciclos de carga podem ser classificados como de carregamento em condição normal de operação, em condição de emergência de longa duração e em condição de emergência de curta duração, conforme os limites de 6.5.

6.3.1 Ciclo de carregamento em condição normal de operação

É aquele no qual, em nenhum momento, é excedida a temperatura do topo do óleo ou a do ponto mais quente do enrolamento para a condição normal, mesmo que, em parte do ciclo, seja ultrapassada a potência nominal.

6.3.2 Ciclo de carregamento em condição de emergência de longa duração

Tal carregamento permite que sejam ultrapassados os limites de temperatura do ciclo de carregamento em condição normal de operação, uma vez que são consideradas saídas prolongadas de unidades transformadoras, por desligamento de algum elemento de sistema.

NOTA - O carregamento das unidades transformadoras se situa acima dos valores nominais, porém decorre de desligamentos prolongados de um elemento do sistema. Uma vez ocorrida a contingência, o carregamento pode se repetir periodicamente, até o restabelecimento das condições anteriores ao desligamento.

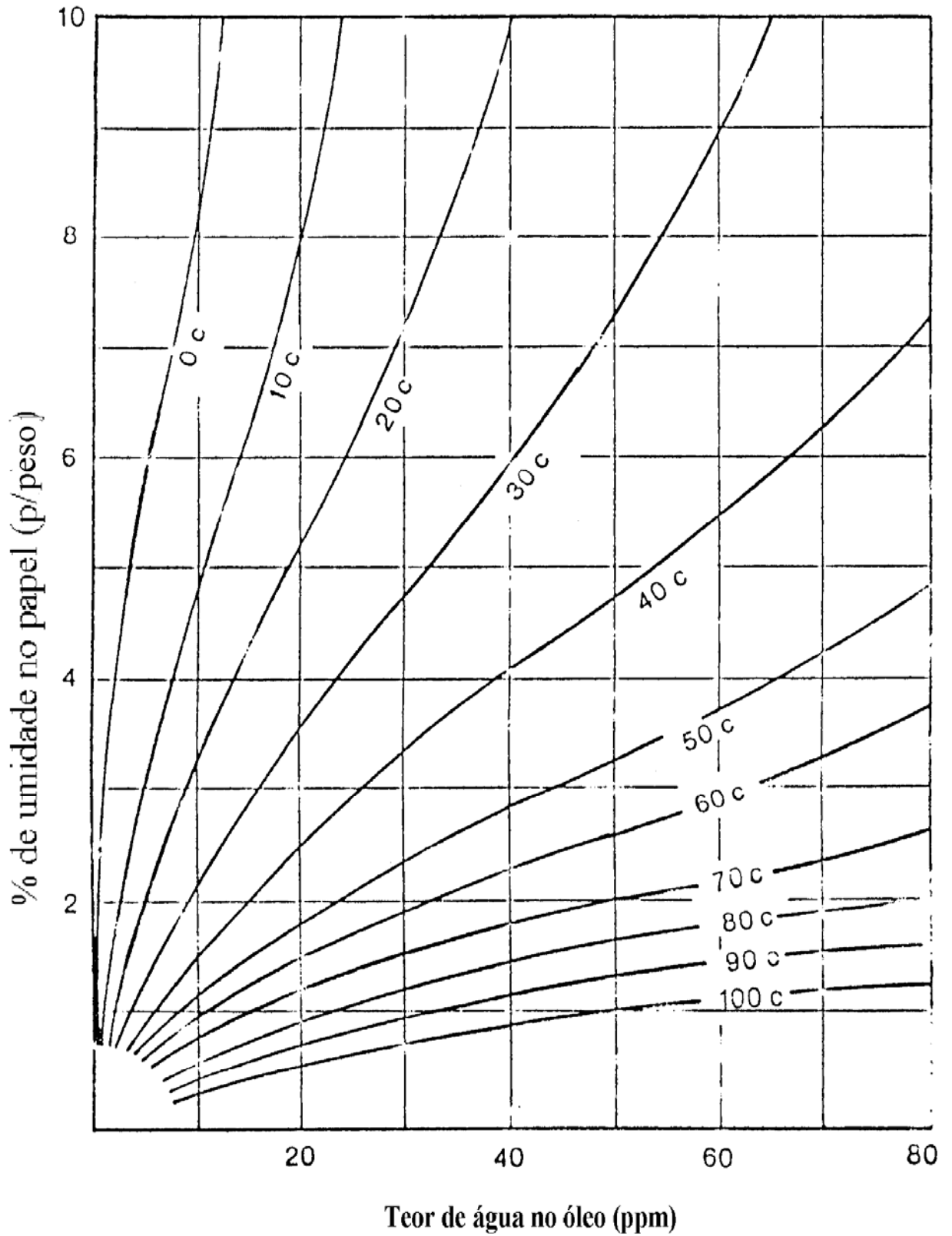


FIGURA 6 - Relação entre H₂O no Óleo (ppm) e H₂O no Papel (%) em função da temperatura da amostra do óleo para transformadores higroscopicamente estabilizados

Ref: Fabre & Pichon - CIGRÉ paper 137- 1960

6.3.3 Ciclo de carregamento em condição de emergência de curta duração

Este tipo de carregamento envolve condições de maior risco, devendo, portanto, ser utilizado apenas em raras ocasiões.

O tempo de operação, nessa condição, deve ser menor do que a constante de tempo térmica do transformador e depende da temperatura em operação antes da contingência, não devendo ser maior que 30 minutos.

Durante esse intervalo de tempo, deve-se retornar à condição de carregamento de longa duração; caso contrário, o transformador deve ser desligado, para se evitar o risco de falha.

6.4 Expectativa de vida

A expectativa de vida de um transformador, cujo óleo esteja dentro das características de óleo novo em contato com o equipamento, segundo a NBR 5356, é dada exclusivamente pela lei de Arrhenius (envelhecimento térmico), ou seja:

$$\log \text{vida(horas)} = A + B/T$$

onde:

$$T = \text{temperatura absoluta em graus Kelvin} = e + 273^{\circ}\text{C}$$

$$e = \text{temperatura do ponto mais quente dos enrolamentos em } ^{\circ}\text{C}$$

A e B = constantes da curva de expectativa de vida

Os transformadores em operação, devido à filosofia no projeto da conservação do óleo isolante ou má manutenção do óleo, possibilitam a penetração de contaminantes, como o oxigênio e a água, acelerando o processo de envelhecimento.

À medida que os valores de teor de água e índice de neutralização do óleo isolante de um transformador se afastam das do óleo novo em contato com o equipamento, conforme a NBR 5356, aumenta-se o desvio em relação à lei de Arrhenius, uma vez que o envelhecimento da isolação passa a ser influenciado, também, pela ação dos agentes contaminantes.

Tabela 6 - Valores do óleo isolante e do papel em operação para cálculo de expectativa de vida

Ensaio	Limites
Umidade no papel (% em massa)	< 1
Índice de neutralização (mg KOH/g)	< 0,1
Teor de O ₂ (ppm)	< 3000

Caso os referidos limites não sejam respeitados, a expectativa de vida calculada através da lei de Arrhenius servirá, apenas, para uma análise relativa da influência de um determinado carregamento, pois o grau de envelhecimento assim obtido não corresponde à idade cronológica do transformador.

6.5 Limites

6.5.1 Cargas limites

As cargas máximas admissíveis, em percentual da corrente nominal, são as dadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Cargas máximas admissíveis

Tipo de carregamento	Transformador até 100 MVA	Transformador > 100 MVA
Normal	150%	130%
Emerg. longa duração	150%	130%
Emerg. curta duração	150%	140%

NOTA - Para carregamentos superiores aos da tabela, devem-se conhecer as limitações de projeto.

6.5.2 Temperaturas limites

Para fins de aplicação desta Norma, são adotadas as limitações de temperatura dadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Temperaturas limites

Tipo de Carregamento	Classe			
	55°C		65°C	
	Temperatura (°C)			
	Óleo	Pto. mais quente	Óleo	Pto. mais quente
Normal	95	105	105	120
Emerg. longa duração	105	120	110	130
Emerg. curta duração	105	130	110	140

6.6 Procedimentos adicionais

Procedimentos que devem ser desenvolvidos para utilização na orientação da política de carregamento e expectativa de vida útil.

6.6.1 Influência dos níveis de CO e CO₂

Os níveis de CO e CO₂ dissolvidos no óleo isolante, bem como a razão entre eles e a taxa de crescimento das concentrações, constituem indicadores da degradação térmica do papel isolante.

6.6.2 Análise da concentração de compostos de furano em óleo isolante

Os níveis de concentração de compostos de furano em óleo isolante constituem indicadores da degradação do papel isolante e de detecção de falhas incipientes, durante o ensaio de recepção do equipamento.

6.6.3 Análise do grau de polimerização do papel isolante

O resultado do ensaio de análise do grau de polimerização do papel mostra o estado de degradação mecânica do papel isolante. O fabricante do equipamento deve fornecer os valores de grau de polimerização do papel novo e do papel após a secagem em fábrica. Papéis novos possuem grau de polimerização em torno de 1000. Após os ensaios de liberação do equipamento em fábrica, o papel deve atingir um valor de grau de polimerização de, no mínimo, 800. O acompanhamento do grau de polimerização pode ser feito a partir de amostras retiradas de local próximo à entrada dos terminais de alta tensão. Na impossibilidade de acesso a esse ponto, o grau de polimerização pode ser avaliado a partir de amostras retiradas dos terminais das buchas. Papel acessível para amostragem deve ser previsto na especificação e construção dos transformadores, para permitir a avaliação do equipamento. O grau de polimerização em torno de 150 indica que o equipamento está sujeito a falha, dependendo dos níveis dos esforços mecânicos resultantes de curto-circuitos externos.

6.6.4 Monitoração da temperatura em tempo real

O conhecimento das temperaturas dos enrolamentos e do óleo, em tempo real, permite a otimização do carregamento, acarretando maior flexibilidade operativa. Para isto, são necessários:

- controle da carga em tempo real,
- comando da carga à distância,
- leitura remota da temperatura,
- sistema de medição de temperatura de alta precisão.

6.7: Cálculo da temperatura de transformadores sob aplicação de cargas

6.7.1 Geral

Para o cálculo das capacidades de carga dos transformadores devem ser utilizadas as equações básicas deste capítulo.

6.7.2 Lista de símbolos

Salvo indicação diferente, todas as temperaturas são em graus Celsius e todos os tempos expressos em horas.

a	=	temperatura ambiente
	=	temperatura do topo do óleo
e _{1, 2, 3}	=	temperatura do ponto mais quente do enrolamento de alta, média e baixa tensão
e ₁	=	elevação de temperatura do ponto mais quente sobre a temperatura do topo do óleo do enrolamento de alta tensão
e _{1a}	=	e ₁ durante o aquecimento
e _{1r}	=	e ₁ durante o resfriamento
e ₂	=	elevação de temperatura do ponto mais quente sobre a temperatura do topo do óleo do enrolamento de média tensão
e _{2a}	=	e ₂ durante o aquecimento
e _{2r}	=	e ₂ durante o resfriamento
e ₃	=	elevação de temperatura do ponto mais quente sobre a temperatura do topo do óleo do enrolamento de baixa tensão
e _{3a}	=	e ₃ durante o aquecimento
e _{3r}	=	e ₃ durante o resfriamento
e _{n1,2,3}	=	elevação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento, sob carga nominal, sobre a temperatura do topo do óleo, obtida a partir da elevação da temperatura média do enrolamento sob carga nominal, em relação à do topo do óleo acrescida de 10°C (15°C) para transformadores de 55°C (65°C) do enrolamento de alta, média e baixa tensão
o	=	elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente
o _a	=	o durante o aquecimento
o _r	=	o durante o resfriamento
o _n	=	elevação de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente sob carga nominal

o_i	=	elevação inicial de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente para $t = 0$
o_f	=	elevação final de temperatura do topo do óleo sobre a temperatura ambiente para a carga de ponta S_p
ei_1	=	elevação inicial do ponto mais quente sobre o topo do óleo para $t = 0$, do enrolamento de alta tensão
ei_2	=	elevação inicial do ponto mais quente sobre o topo do óleo para $t = 0$, do enrolamento de média tensão
ei_3	=	elevação inicial do ponto mais quente sobre o topo do óleo para $t = 0$, do enrolamento de baixa tensão
ef_1	=	elevação final do ponto mais quente sobre o topo do óleo para a carga de ponta S_p , do enrolamento de alta tensão
ef_2	=	elevação final do ponto mais quente sobre o topo do óleo para a carga de ponta S_p , do enrolamento de média tensão
ef_3	=	elevação final do ponto mais quente sobre o topo do óleo para a carga de ponta S_p , do enrolamento de baixa tensão
om	=	máxima elevação do topo do óleo sobre o ambiente durante o carregamento acima do nominal
em_1	=	máxima elevação do ponto mais quente sobre o topo do óleo durante o carregamento acima do nominal, do enrolamento de alta tensão
em_2	=	máxima elevação do ponto mais quente sobre o topo do óleo durante o carregamento acima do nominal, do enrolamento de média tensão
em_3	=	máxima elevação do ponto mais quente sobre o topo do óleo durante o carregamento acima do nominal, do enrolamento de baixa tensão
K_{iT}	=	razão entre as perdas totais correspondentes à carga inicial S_i e a carga nominal S_n
K_{i1}	=	razão entre as perdas no enrolamento de alta tensão correspondentes à carga inicial S_i e a carga nominal S_n
K_{i2}	=	razão entre as perdas no enrolamento de média tensão correspondentes à carga inicial S_i e a carga nominal S_n
K_{i3}	=	razão entre as perdas no enrolamento de baixa tensão correspondentes à carga inicial S_i e a carga nominal S_n
K_{pT}	=	razão entre as perdas totais correspondentes à carga de ponta S_p e a carga nominal S_n
K_{p1}	=	razão entre as perdas no enrolamento de alta tensão correspondentes à carga de ponta S_p e a carga nominal S_n
K_{p2}	=	razão entre as perdas no enrolamento de média tensão correspondentes à carga de ponta S_p e a carga nominal S_n
K_{p3}	=	razão entre as perdas no enrolamento de baixa tensão correspondentes à carga de ponta S_p e a carga nominal S_n
S_i	=	carga inicial ou carga básica
S_n	=	carga nominal
S_p	=	carga da ponta
R	=	relação entre as perdas em carga sob carga nominal e a perda em vazio
e	=	2,71828 (base do logaritmo natural)
t	=	tempo
t_p	=	tempo de duração da ponta
t	=	intervalo de tempo genérico
P_n	=	perda total sob carga nominal

P	=	variação da perda total devido à variação da carga
T_0	=	constante de tempo térmica do transformador para qualquer carga e para qualquer diferença de temperatura entre a elevação final e a inicial do topo do óleo:
		$T_0 = C \left(\frac{\Delta\theta_{of} - \Delta\theta_{oi}}{\Delta P} \right)$
T_e	=	constante de tempo térmica do ponto mais quente
T_n	=	constante de tempo térmica para a carga nominal começando com a elevação inicial do topo do óleo de 0°C sobre o ambiente
PV	=	perda de vida
C	=	Capacidade térmica do transformador (watt-horas por grau Celsius)
n	=	expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do topo do óleo, que depende do tipo do resfriamento em funcionamento (ver Tabelas 9 e 10 - anexo A)
m	=	expoente usado no cálculo da elevação de temperatura do ponto mais quente, que depende do tipo do resfriamento em funcionamento (ver Tabelas 9 e 10 - anexo A)
P_p	=	Perda total devido à carga S_p
P_i	=	Perda total devido à carga S_i
P_{i1}	=	Perdas no enrolamento de alta tensão devido à carga S_{i1}
P_{i2}	=	Perdas no enrolamento de média tensão devido à carga S_{i2}
P_{i3}	=	Perdas no enrolamento de baixa tensão devido à carga S_{i3}
P_1	=	Perdas no enrolamento de alta tensão devido à carga S_{n1}
P_2	=	Perdas no enrolamento de média tensão devido à carga S_{n2}
P_3	=	Perdas no enrolamento de baixa tensão devido à carga S_{n3}
P_{fe}	=	Perdas a vazio medidas com tensão nominal na derivação principal

6.7.3 Método para o cálculo

Ver 5.7.3.

6.7.4 Equações para a determinação da temperatura

6.7.4.1 Transformadores de 2 enrolamentos e autotransformadores sem terciário

Ver 5.7.3.1.

6.7.4.2 Transformadores de 3 enrolamentos

- Elevação de temperatura durante o aquecimento:

$$\text{- óleo} \rightarrow \Delta\theta_{oa} = \left(\Delta\theta_{of} - \Delta\theta_{oi} \right) \left(1 - e^{\frac{-t}{T_0}} \right) + \Delta\theta_{oi} \quad (\text{equação 17})$$

$$\text{- enrolamento} \rightarrow \Delta\theta_{e1a} = \left(\Delta\theta_{ef1} - \Delta\theta_{ei1} \right) \left(1 - e^{-\frac{-t}{T_e}} \right) + \Delta\theta_{ei1} \quad (\text{equação 18a})$$

$$\rightarrow \Delta\theta_{e2a} = \left(\Delta\theta_{ef2} - \Delta\theta_{ei2} \right) \left(1 - e^{-\frac{-t}{T_e}} \right) + \Delta\theta_{ei2} \quad (\text{equação 18b})$$

$$\rightarrow \Delta\theta_{e3a} = \left(\Delta\theta_{ef3} - \Delta\theta_{ei3} \right) \left(1 - e^{-\frac{-t}{T_e}} \right) + \Delta\theta_{ei3} \quad (\text{equação 18c})$$

- Elevação de temperatura durante o resfriamento:

$$\text{- óleo} \rightarrow \Delta\theta_{or} = \left(\Delta\theta_{om} - \Delta\theta_{oi} \right) e^{-\frac{-t'}{T_o}} + \Delta\theta_{oi} \quad (\text{equação 19})$$

- enrolamento:

$$\rightarrow \Delta\theta_{e1r} = \left(\Delta\theta_{em1} - \Delta\theta_{ei1} \right) e^{-\frac{-t'}{T_e}} + \Delta\theta_{ei1} \quad (\text{equação 20a})$$

$$\rightarrow \Delta\theta_{e2r} = \left(\Delta\theta_{em2} - \Delta\theta_{ei2} \right) e^{-\frac{-t'}{T_e}} + \Delta\theta_{ei2} \quad (\text{equação 20b})$$

$$\rightarrow \Delta\theta_{e3r} = \left(\Delta\theta_{em3} - \Delta\theta_{ei3} \right) e^{-\frac{-t'}{T_e}} + \Delta\theta_{ei3} \quad (\text{equação 20c})$$

onde: $t' = t - t_p$

$$\Delta\theta_{oi} = \Delta\theta_{on} \left[K_{it} \right]^n \quad (\text{equação 21})$$

$$K_{it} = \frac{P_i}{P_n}$$

$$P_i = P_{i1} + P_{i2} + P_{i3} + P_{fe}$$

$$P_{i1} = P_1 \left(\frac{S_{i1}}{S_{n1}} \right)^2$$

$$P_{i2} = P_2 \left(\frac{S_{i2}}{S_{n2}} \right)^2$$

$$P_{i3} = P_3 \left(\frac{S_{i3}}{S_{n3}} \right)^2$$

$$\Delta\theta_{of} = \Delta\theta_{on} \left[K_{pt} \right]^n \quad (\text{equação 22})$$

$$K_{pt} = \frac{P_p}{P_n}$$

$$P_p = P_{p1} + P_{p2} + P_{p3} + P_{fe}$$

$$P_{p1} = P_1 \left(\frac{S_{p1}}{S_{n1}} \right)^2$$

$$P_{p2} = P_2 \left(\frac{S_{p2}}{S_{n2}} \right)^2$$

$$P_{p3} = P_3 \left(\frac{S_{p3}}{S_{n3}} \right)^2$$

$$P_1 = W_1$$

$$P_2 = W_2$$

$$P_3 = W_3$$

$$\Delta\theta_{ei1} = \Delta\theta_{en1} \left(k_{i1}^2 \right)^m \quad (\text{equação 23a})$$

$$\Delta\theta_{ei2} = \Delta\theta_{en2} \left(k_{i2}^2 \right)^m \quad (\text{equação 23b})$$

$$\Delta\theta_{ei3} = \Delta\theta_{en3} \left(k_{i3}^2 \right)^m \quad (\text{equação 23c})$$

$$\Delta\theta_{ef1} = \Delta\theta_{en1} \left(k_{p1}^2 \right)^m \quad (\text{equação 24a})$$

$$\Delta\theta_{ef2} = \Delta\theta_{en2} \left(k_{p2}^2 \right)^m \quad (\text{equação 24b})$$

$$\Delta\theta_{ef3} = \Delta\theta_{en3} \left(k_{p3}^2 \right)^m \quad (\text{equação 24c})$$

$$\Delta\theta_{om} = \Delta\theta_{oa} \quad \text{para } t = t_p \quad (\text{equação 25})$$

$$\Delta\theta_{em1} = \Delta\theta_{e1a} \quad \text{para } t = t_p \quad (\text{equação 26a})$$

$$\Delta\theta_{em2} = \Delta\theta_{e2a} \quad \text{para } t = t_p \quad (\text{equação 26b})$$

$$\Delta\theta_{em3} = \Delta\theta_{e3a} \quad \text{para } t = t_p \quad (\text{equação 26c})$$

$$K_i = \frac{S_i}{S_n} \quad (\text{equação 27})$$

$$K_p = \frac{S_p}{S_n} \quad (\text{equação 28})$$

$$T_o = T_n \quad \text{onde} \quad T_n = C \frac{\Delta\theta_{on}}{P_n} \quad (\text{equação 29})$$

onde, para transformadores com fluxo de óleo não dirigido:

$$C = 0,132 \text{ (peso do núcleo e das bobinas, em kg)} + 0,088 \text{ (peso do tanque e dos acessórios, em kg)} + 0,351 \text{ (litros de óleo);}$$

e para transformadores com fluxo de óleo dirigido:

$$C = 0,132 \text{ (peso do núcleo e das bobinas, em kg)} + 0,132 \text{ (peso do tanque e dos acessórios, em kg)} + 0,510 \text{ (litros de óleo).}$$

A temperatura do ponto mais quente é calculada por:

$$\theta_{e1} = \Delta\theta_o + \Delta\theta_{e1} + \theta_a$$

$$\theta_{e2} = \Delta\theta_o + \Delta\theta_{e2} + \theta_a$$

$$\theta_{e3} = \Delta\theta_o + \Delta\theta_{e3} + \theta_a$$

NOTA: A perda em carga para transformador de três enrolamentos é, aproximadamente, a soma das perdas de cada enrolamento. As perdas em cada enrolamento são calculadas através das fórmulas:

$$W_1 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^2 W_{12} - \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{23} + \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{13} \right]$$

$$W_2 = \frac{1}{2 \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^2 W_{12} + \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{23} - \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{13} \right]$$

$$W_3 = \frac{1}{2 \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2} \left[- \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^2 W_{12} + \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{23} + \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^2 W_{13} \right]$$

onde:

P_1 , P_2 e P_3 = potências de referência dos enrolamentos para determinada condição de carregamento, especificadas pelo comprador ($P_1 > P_2 > P_3$), em VA. Se esta condição não for especificada, devem ser adotadas as respectivas potências nominais dos enrolamentos.

W_{12} = perda nos enrolamentos 1 e 2, referidas à potência P_2 , na temperatura de referência, em W.

W_{13} = perda nos enrolamentos 1 e 3, referidas à potência P_3 , na temperatura de referência, em W.

W_{23} = perda nos enrolamentos 2 e 3, referidas à potência P_3 , na temperatura de referência, em W.

W_1 , W_2 , W_3 = perdas nos enrolamentos 1, 2 e 3, referidas às potências P_1 , P_2 e P_3 , respectivamente, na temperatura de referência, em W.

Quando da operação sem carga no terciário, este equipamento, por se comportar como um transformador de 2 enrolamentos, já está contemplado em 6.7.4.1.

6.7.4.3 Autotransformadores com enrolamento terciário

A formulação de 6.7.4.2 pode ser aplicada a autotransformadores com enrolamento terciário.

Entretanto, devido às simplificações adotadas, os resultados apresentarão os seguintes desvios em relação às temperaturas observadas no equipamento:

- a) autotransformadores abaixadores : as temperaturas dos enrolamentos calculadas são maiores do que as observadas no equipamento.

Num autotransformador com terciário, as perdas W_1 , W_2 e W_3 não possuem significado individualmente, podendo assumir valores negativos. Mesmo neste caso, a sua soma corresponde, aproximadamente, à perda em carga do transformador.

- b) autotransformadores elevadores : as temperaturas dos enrolamentos calculadas são menores que as observadas no equipamento.

Quando da operação sem carga no terciário, este equipamento, por se comportar como um transformador de 2 enrolamentos, já está contemplado em 6.7.4.1.

6.7.5 Correção das equações

Ver 5.7.3.2.

6.7.6 Método utilizado para o cálculo da capacidade de carga

6.7.6.1 Método

O método de cálculo apresentado neste sub-ítem fornece o carregamento admissível do transformador, segundo condições pré- estabelecidas, através do cálculo de um ciclo de carga máxima admissível que pode ser imposta a um transformador de potência a partir do conhecimento dos seguintes dados:

- a) características do transformador;
- b) o ciclo de carga hora a hora na instalação;
- c) temperatura ambiente na instalação (conforme 4.2);
- d) limites para carga, temperaturas óleo/enrolamento e perda de vida (ver 4.1 e 6.5).

Esse método utiliza a teoria de Arrhenius (ver 4.1.2 desta Norma), exigindo a divisão do ciclo de carga em intervalos de pequena duração (normalmente 24 intervalos de 1 hora cada um), e o cálculo da temperatura do ponto mais quente dos enrolamentos, ao fim de cada um desses intervalos.

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento é suposta constante ao longo de cada intervalo e igual ao seu valor final no intervalo, podendo-se calcular a perda de vida percentual ocorrida ao longo de cada intervalo t (em horas) pela equação 3. A perda de vida será a soma das perdas de vida dos diversos intervalos de tempo. Quanto maior o número de intervalos em que o ciclo de carga for dividido, mais preciso será o resultado.

A partir do ciclo de carga dado e das informações contidas em a), c) e d), o método utiliza um processo iterativo para definir o perfil de carga máximo admissível. Este perfil pode ser alterado para cima ou para baixo em função da violação de alguns dos limites definidos em d). Neste caso, o processo é repetido até que o novo perfil esteja dentro dos limites de d).

6.7.6.2 Fluxograma

Para melhor visualização do processo de cálculo, a Figura 7 apresenta um fluxograma simplificado do processo.

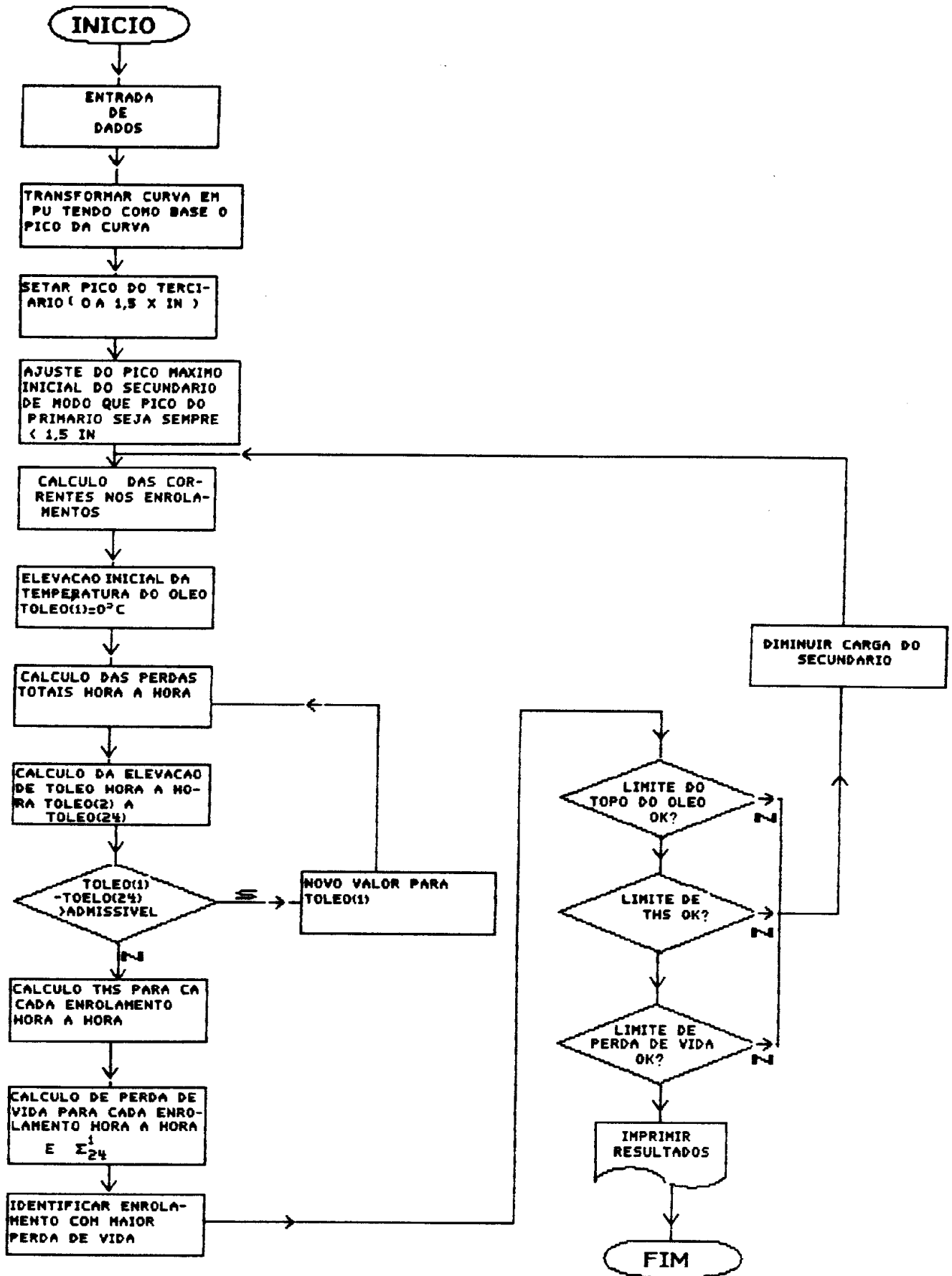


Figura 7 - Fluxograma simplificado do processo de cálculo

6.8 Condições Especiais

6.8.1 Operação com parte ou todo sistema de resfriamento fora de serviço

Em transformadores providos de equipamentos auxiliares no sistema de resfriamento, tais como: bombas, ventiladores ou ambos, pode ser necessário operá-los por algum tempo com esses equipamentos fora de serviço. O procedimento para aplicação de carga nesses casos é dado nas subseções a seguir, utilizando-se a simbologia dos tipos de resfriamento da NBR 5356.

6.8.1.1 Transformadores com sistema de resfriamento ONAN/ONAF

Nestes casos, quando os ventiladores estiverem inoperantes, tomam-se os dados indicados na placa de identificação para o sistema de resfriamento ONAN e aplicam-se cargas como se o transformador tivesse somente este sistema de resfriamento.

6.8.1.2 Transformadores com sistema de resfriamento ONAN/ONAF/OFAF

Dependendo de serem as bombas ou os ventiladores ou ambos que estiverem fora de serviço, tomam-se, na placa de identificação os dados correspondentes ao sistema de resfriamento que permanece em funcionamento e aplicam-se cargas como se o transformador tivesse somente este sistema de resfriamento.

6.8.1.3 Transformadores com sistema de resfriamento OFAF ou OFWF (com trocador de calor)

Os trocadores de calor utilizados em transformadores com o sistema de resfriamento OFAF ou OFWF, em geral, dissipam uma quantidade insignificante de calor, quando a circulação forçada do óleo ou o meio refrigerante forçado (ar ou água) estiver inoperante. Se somente parte do sistema de resfriamento estiver em funcionamento, são admissíveis cargas permissíveis e sua duração podem ser calculadas conforme 6.8.1.4.

As cargas, a duração da carga, a condição prévia ao carregamento, a temperatura ambiente e os parâmetros físicos do transformador determinam a temperatura do ponto mais quente e a perda de vida ocorrida durante o período da perda de todo o sistema de resfriamento.

Durante o período da perda do sistema de resfriamento, o calor dissipado pelo transformador dependerá da radiação do tanque e das características de convecção que, por sua vez, dependem das dimensões do tanque.

As características de dissipação de calor podem ser calculadas através das medições obtidas de ensaios, ou estimadas com base nas dimensões externas.

6.8.1.4 Efeito do carregamento e do tempo sobre a temperatura do óleo e do ponto mais quente

O efeito do carregamento e do tempo sobre a temperatura do óleo e do ponto mais quente pode ser determinado de uma forma aproximada através das equações a seguir.

Lista de Símbolos:

A	=	soma da superfície livre das paredes do tanque e tampa em m^2
C	=	capacidade térmica do transformador para fluxo de óleo não dirigido.
K_p	=	razão entre a carga a ser mantida e a carga nominal
P	=	perda total na condição de carga a ser mantida, menos as perdas dissipadas pelas paredes do tanque a a_{o} , em watts
F	=	2, para fluxo de óleo dirigido e 1, para fluxo de óleo não dirigido
TL	=	perda total na condição de carga a ser mantida, em watts
af_1	=	elevação de temperatura do óleo à máxima potência de placa, obtida do relatório de ensaio de fábrica
au	=	elevação de temperatura final do óleo médio, em $^{\circ}C$

- a_o = elevação de temperatura do óleo médio no instante da perda de todo o sistema de resfriamento, em $^{\circ}\text{C}$
 a_t = elevação de temperatura do óleo médio no instante t
 e_g = elevação de temperatura do ponto mais quente sobre o topo do óleo na condição de carga a ser mantida
 m = expoente do enrolamento, conforme tabelas 9 e 10 do anexo A
 e_n = elevação de temperatura do ponto mais quente sobre o topo do óleo na condição de carga nominal
 a = temperatura ambiente
 e = elevação de temperatura do topo do óleo, em $^{\circ}\text{C}$
 e = temperatura do ponto mais quente, em $^{\circ}\text{C}$

- (1) Estimativa de perdas em watts, que será dissipada pelo tanque à temperatura do óleo à máxima potência OFAF, após a perda de todo o sistema de resfriamento.

$$LD = 5,659 (af_1)^{1,21} \text{ watts}$$

- (2) Estimativa da elevação de temperatura final do óleo médio na condição de carga a ser mantida.

$$a_u = (TL/LD)^{0,8} af_1$$

- (3) Constante de tempo térmico correspondente a esta condição de carga.

$$\tau_L = \frac{C(\Delta\theta_{au} - \Delta\theta_{af1})}{P}$$

- (4) A elevação de temperatura do óleo médio num instante t qualquer, para o transformador nesta condição de operação, pode ser estimada através da seguinte equação:

$$\Delta\theta_{at} = (\Delta\theta_{au} - \Delta\theta_{af1}) \left(1 - e^{-t/\tau L}\right) + \Delta\theta_{af1}$$

- (5) Durante o intervalo de tempo $t/\tau_L = 0$ a $0,15$, a diferença entre a temperatura do topo do óleo e o óleo médio pode ser estimada conforme segue:

$$\theta_1 = 7t + 6 \text{ (t em horas)}$$

A elevação de temperatura estimada do topo do óleo pode ser determinada conforme segue:

$$\theta = \theta_1 + at$$

É recomendado que $\theta + a$ não exceda 110°C .

NOTA - Estimativas para a elevação de temperatura do topo do óleo para $t/\tau_L > 0,15$ devem ser obtidas do fabricante.

6.8.1.5 Para transformadores com fluxo de óleo dirigido, a elevação de temperatura do ponto mais quente sobre o topo do óleo aumenta substancialmente, quando cessa o fluxo de óleo forçado. Uma estimativa desse valor pode ser obtida do fabricante. Com a premissa de que um fluxo razoável de óleo continua circulando por convecção natural, uma estimativa aproximada pode ser calculada conforme segue:

$$e_n = (\text{elevação média do enrolamento} - af_1) F + 5$$

$$e_g = e_n K^{2m} \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Nota - A elevação de temperatura média do enrolamento e do óleo pode ser obtido do relatório de ensaio para a máxima potência de placa.

6.8.1.6 A temperatura do ponto mais quente, para a carga a ser mantida, pode ser estimada como a seguir:

$$e = a + o + eg$$

É recomendado que e não exceda 140°C.

NOTA - Ao utilizar o procedimento acima, os seguintes fatores devem ser levados em consideração, durante a situação da perda do sistema de resfriamento:

- (1) A maioria das proteções contra sobrecorrente, instaladas no transformador são inadequadas para esta condição de operação;
- (2) O relé do ponto mais quente (para alarme e, em muitos casos, desligamento), utilizando dois parâmetros de entrada (corrente de fase e a temperatura do topo do óleo), é calibrado para a elevação do ponto mais quente sobre o óleo, considerando o fluxo de óleo forçado circulando através dos enrolamentos. Sem este fluxo de óleo forçado, o aparelho irá indicar uma temperatura muitos graus abaixo da temperatura real do ponto mais quente;
- (3) Um transformador projetado para o fluxo de óleo dirigido, ao se perderem as bombas, tem reduzido drasticamente o fluxo de óleo através dos enrolamentos, aumentando sensivelmente o gradiente do ponto mais quente. Consequentemente, a temperatura do topo do óleo deve ser reduzida a um valor bem abaixo da normal, para assegurar que a temperatura do ponto mais quente fique dentro dos limites do projeto.

7 Transformador elevador de usina

Os transformadores elevadores de usina não são, geralmente, submetidos a carregamentos acima da potência nominal, por serem de potências superiores às dos geradores. Em casos em que haja necessidade de operação dos transformadores em condições de carregamentos acima da potência nominal, estas condições operativas devem ser avaliadas de acordo com os limites de projeto.

Anexo A (normativo)**Tabelas de características dos transformadores****TABELA 9 - Características dos transformadores de 65°C sob carga nominal**

Método de Resfriamento	ONAN	ONAF ≤ 133%	ONAF 133%	OFAF ou OFWF	ODAF ou ODWF
Elevação de temperatura do ponto mais quente acima do ambiente, em °C	80	80	80	80	80
Elevação de temperatura do topo do óleo acima do ambiente, em °C	55	60	45	45	45
Constante de tempo do topo do óleo, em horas (Tn)	3,0	2,0	1,25	1,25	1,25
Constante de tempo do ponto mais quente, em horas (Te)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Relação entre perda no cobre e perdas no ferro (R)	3,2	4,5	6,5	6,5	6,5
m(expoente do enrolamento) ¹⁾	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0
n(expoente do óleo) ²⁾	0,8	0,90	0,90	1,0	1,0
¹⁾ m = expoente da elevação de temperatura do enrolamento em função das perdas no cobre. ²⁾ n = expoente da elevação de temperatura do topo do óleo em função das perdas totais.					

TABELA 10 - Características dos transformadores de 55 °C sob carga nominal

Método de Resfriamento	ONAN	ONAF ≤ 133%	ONAF 133%	OFAF ou OFWF	ODAF ou ODWF
Elevação de temperatura do ponto mais quente acima do ambiente, em °C	65	65	65	65	65
Elevação de temperatura do topo do óleo acima do ambiente, em °C	40	40	37	37	37
Constante de tempo do topo do óleo, em horas (Tn)	2,7	1,7	1,25	1,25	1,25
Constante de tempo do ponto mais quente, em horas (Te)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Relação entre perda no cobre e perdas no ferro (R)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
m(expoente do enrolamento) ¹⁾	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0
n(expoente do óleo) ²⁾	0,8	0,90	0,90	1,0	1,0
¹⁾ m = expoente da elevação de temperatura do enrolamento em função das perdas no cobre. ²⁾ n = expoente da elevação de temperatura do topo do óleo em função das perdas totais.					

Anexo B (normativo)

Tabelas de carregamento e exemplos de utilização

As tabelas 11 a 50 fornecem o carregamento admissível, para cada ciclo de 24 horas, de acordo com as características do transformador, a carga inicial, a temperatura ambiente e a duração da ponta de carga. Quando as cargas iniciais diferirem das tabeladas, poderá ser obtida suficiente precisão por meio de interpolação.

B-1 Exemplos de aplicação das Tabelas 11 a 50

B-1.1 Para um transformador de 65°C ONAN, com a potência nominal trifásica de 80 MVA, calcular o carregamento máximo admissível para a seguinte condição:

- temperatura ambiente 30°C
- carga inicial 40 MVA
- duração da ponta de carga 4 h

Consultando-se a Tabela 11, para DP = 4 horas e Ta = 30°C, lê-se:

- ponta de carga 118%
- temperatura do ponto mais quente 120°C
- temperatura do óleo 87°C

O carregamento de 118% atende às limitações desta Norma, podendo então, ser aplicado. Se o carregamento desejado fosse de 145%, para Ta = 30°C, verifica-se, na Tabela 11, que o período máximo de duração da ponta de carga seria de 1 hora.

B-1.2 Seja especificar um transformador de 55°C ONAF, que suporte o seguinte ciclo de carga:

- carga inicial 60 MVA
- ponta de carga 100 MVA
- duração da ponta de carga 2 h
- temperatura ambiente 30°C

Considere-se:

$$K_i = \frac{S_i}{S_n} \quad \text{e} \quad K_p = \frac{S_p}{S_n}$$

Onde:

S_i = carga inicial

S_n = carga nominal

S_p = carga da ponta

a) consultando-se as Tabelas 35, 36, 37 e 38, para as condições especificadas (Tp = 2, Ta = 30), obtém-se os seguintes valores:

Tabela	K_i	K_p
35	0,5	1,2
36	0,7	1,17
37	0,9	1,14
38	1	1,12

b) nas condições do ciclo de carga dado, tem-se:

$$K_i = \frac{60}{S_n} \text{ e } K_p = \frac{100}{S_n}; \quad \text{logo, } K_i = 0,6 K_p$$

Traçando-se a curva K_p em função de K_i , com os valores obtidos em (a) e traçando-se a reta obtida em (b), obtém-se um ponto de interseção ($K_{ix} = 0,71$, $K_{px} = 1,18$) que é a solução do problema (vide Figura B-1).

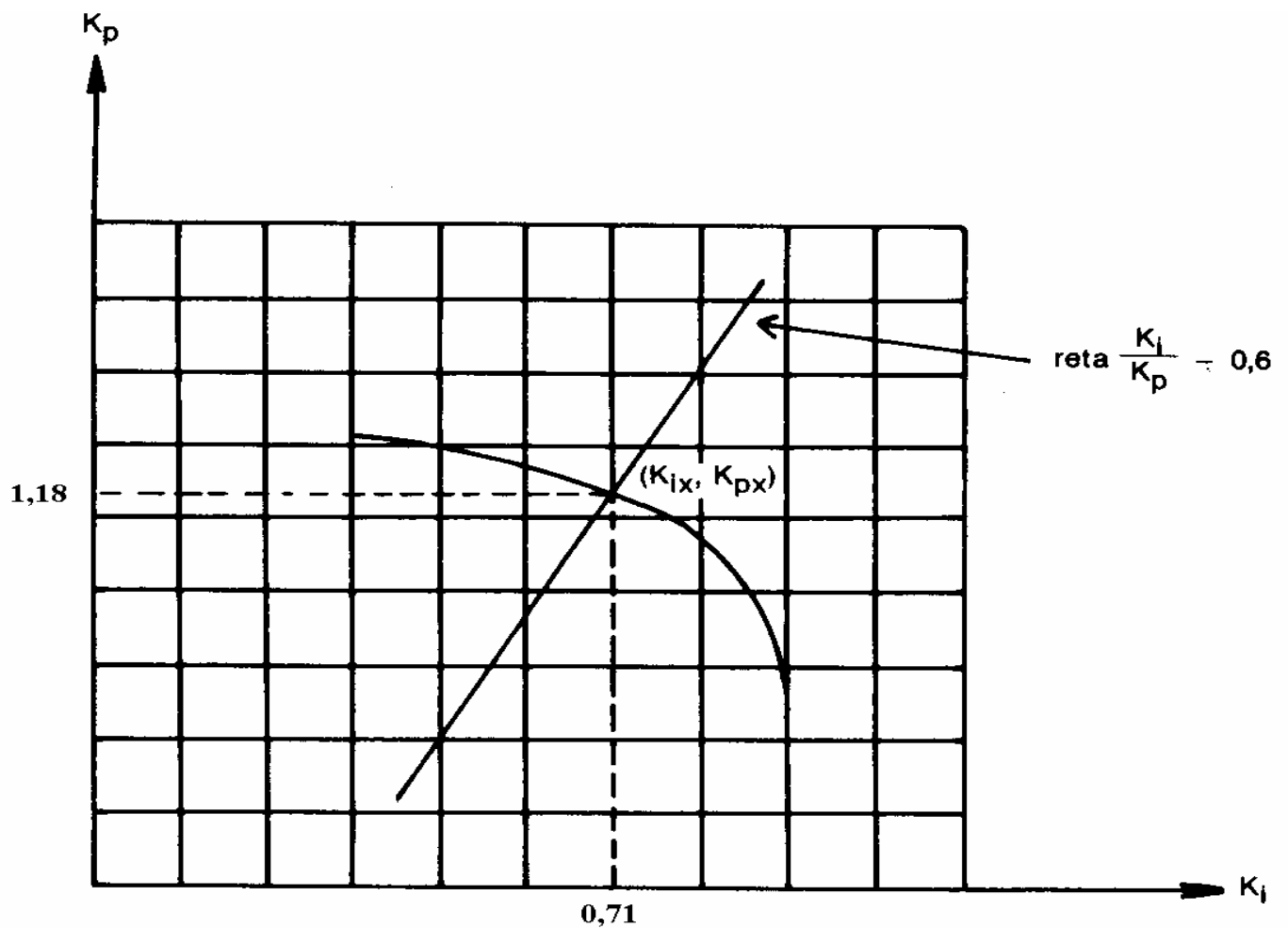


Figura B-1 - Resolução do exemplo B-1

A potência nominal do transformador será:

$$S_n = \frac{S_i}{K_{ix}} = \frac{60}{0,71} = 85 \text{ MVA}$$

$$\text{ou } S_n = \frac{S_p}{K_{px}} = \frac{100}{1,18} = 85 \text{ MVA}$$

Tabela 11 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN
Carga inicial = 50%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	47	95	
	15	150	52	100	
	20	150	57	105	
	25	150	62	110	
	30	150	67	115	
	35	150	72	120	
	40	143	76	120	
1,0	10	150	56	104	
	15	150	61	109	
	20	150	66	114	
	25	150	71	119	
	30	145	75	120	
	35	138	78	120	
	40	131	81	120	
2,0	10	150	70	118	
	15	147	74	120	
	20	142	77	120	
	25	136	79	120	
	30	130	82	120	
	35	124	85	120	
	40	118	87	120	
4,0	10	137	78	120	
	15	133	81	120	
	20	128	83	120	
	25	123	85	120	
	30	118	87	120	
	35	113	90	120	
	40	108	92	120	
8,0	10	129	83	120	
	15	124	84	120	
	20	120	86	120	
	25	116	89	120	
	30	111	90	120	
	35	107	93	120	
	40	102	94	120	
24,0	10	126	84	120	X
	15	122	86	120	X
	20	118	88	120	X
	25	113	89	119	X
	30	109	91	120	X
	35	105	93	120	X
	40	100	95	120	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 12 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN
Carga inicial = 70%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	55	103	
	15	150	60	108	
	20	150	65	113	
	25	150	70	118	
	30	146	75	120	
	35	138	79	120	
	40	129	83	120	
1,0	10	150	63	110	
	15	150	68	115	
	20	150	73	120	
	25	143	76	120	
	30	136	79	120	
	35	129	83	120	
	40	121	86	120	
2,0	10	147	73	120	
	15	142	76	120	
	20	136	79	120	
	25	131	82	120	
	30	125	85	120	
	35	119	87	120	
	40	112	90	120	
4,0	10	135	80	120	
	15	130	82	120	
	20	126	84	120	
	25	121	86	120	
	30	116	89	120	
	35	111	91	120	
	40	105	93	120	
8,0	10	128	83	120	
	15	124	85	120	
	20	119	86	119	
	25	115	89	120	
	30	111	91	120	
	35	106	93	120	
	40	101	94	120	
24,0	10	126	84	120	X
	15	122	86	120	X
	20	118	88	120	X
	25	113	89	119	X
	30	109	91	120	X
	35	105	93	120	X
	40	100	95	120	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 13 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN
Carga inicial = 90%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	65	113	
	15	150	70	118	
	20	146	74	120	
	25	138	78	120	
	30	130	83	120	
	35	121	87	120	
	40	111	90	120	X
1,0	10	150	71	119	
	15	145	75	120	
	20	138	78	120	
	25	131	82	120	
	30	124	85	120	
	35	116	88	120	
	40	108	92	120	X
2,0	10	141	77	120	
	15	135	79	120	
	20	130	82	120	
	25	124	85	120	
	30	118	88	120	
	35	111	90	120	
	40	105	93	120	X
4,0	10	132	81	120	
	15	127	83	119	
	20	123	86	120	
	25	118	88	120	
	30	113	90	120	
	35	107	92	120	
	40	102	94	120	X
8,0	10	127	83	120	
	15	123	85	120	
	20	119	87	120	
	25	114	89	120	
	30	110	91	120	
	35	105	93	120	X
	40	100	95	120	X
24,0	10	126	84	120	X
	15	122	86	120	X
	20	118	88	120	X
	25	113	89	119	X
	30	109	91	120	X
	35	105	93	120	X
	40	100	95	120	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 14 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN
Carga inicial = 100%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	70	118	
	15	145	75	120	
	20	137	79	120	
	25	129	83	120	
	30	120	87	120	X
	35	110	91	120	X
	40	101	95	120	X
1,0	10	146	75	120	
	15	139	78	120	
	20	132	81	120	
	25	124	85	120	
	30	117	88	120	X
	35	109	92	120	X
	40	100	95	120	X
2,0	10	137	79	120	
	15	131	81	120	
	20	126	84	120	
	25	120	87	120	
	30	113	89	120	X
	35	107	92	120	X
	40	100	95	120	X
4,0	10	131	82	120	
	15	126	84	120	
	20	121	86	120	
	25	116	88	120	
	30	111	91	120	X
	35	106	93	120	X
	40	100	95	120	X
8,0	10	127	83	120	
	15	123	85	120	
	20	118	87	119	
	25	114	89	120	X
	30	109	91	119	X
	35	105	93	120	X
	40	100	95	120	X
24,0	10	126	84	120	X
	15	122	86	120	X
	20	118	88	120	X
	25	113	89	119	X
	30	109	91	120	X
	35	105	93	120	X
	40	100	95	120	X

NOTAS

1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante

2 DP = Duração do tempo de ponta de carga

Ta = Temperatura ambiente

CP = Carga durante o tempo de ponta

TO = Temperatura do topo do óleo

TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 15 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF □ 133%
Carga inicial = 50%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	46	103	
	15	150	51	108	
	20	150	56	113	
	25	150	61	118	
	30	146	65	120	
	35	140	69	120	
	40	133	73	120	
1,0	10	150	59	116	
	15	149	63	120	
	20	144	67	120	
	25	138	69	120	
	30	133	73	120	
	35	128	76	120	
	40	122	79	120	
2,0	10	138	70	120	
	15	134	72	120	
	20	129	75	120	
	25	125	77	120	
	30	120	79	120	
	35	116	82	120	
	40	111	85	120	
4,0	10	127	75	119	
	15	124	78	120	
	20	120	80	120	
	25	116	82	120	
	30	112	84	120	
	35	108	86	120	
	40	103	88	119	
8,0	10	123	78	119	
	15	120	80	120	
	20	116	82	120	
	25	112	84	120	
	30	108	85	119	
	35	104	87	119	
	40	100	89	119	
24,0	10	123	79	120	X
	15	119	80	120	X
	20	115	82	119	X
	25	112	84	120	X
	30	108	86	120	X
	35	104	88	120	X
	40	100	90	120	X

NOTAS

1 ^(x) Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante

2 DP = Duração do tempo de ponta de carga

Ta = Temperatura ambiente

CP = Carga durante o tempo de ponta

TO = Temperatura do topo do óleo

TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

TABELA 16 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF □ 133%
Carga inicial = 70%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	54	111	
	15	150	59	116	
	20	149	63	120	
	25	143	67	120	
	30	137	71	120	
	35	130	75	120	
	40	123	78	120	
1,0	10	148	64	120	
	15	143	67	120	
	20	138	70	120	
	25	132	73	120	
	30	127	76	120	
	35	121	79	120	
	40	115	82	120	
2,0	10	135	72	120	
	15	131	74	120	
	20	126	76	120	
	25	122	79	120	
	30	117	81	120	
	35	112	84	120	
	40	107	86	120	
4,0	10	127	76	120	
	15	123	78	120	
	20	119	80	120	
	25	115	83	120	
	30	111	85	120	
	35	107	87	120	
	40	102	89	120	
8,0	10	123	78	120	
	15	120	80	120	
	20	116	82	120	
	25	112	84	120	
	30	108	86	120	
	35	104	88	120	
	40	100	90	120	
24,0	10	123	79	120	X
	15	119	80	120	X
	20	115	82	119	X
	25	112	84	120	X
	30	108	86	120	X
	35	104	88	120	X
	40	100	90	120	X
NOTAS 1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante 2 DP = Duração do tempo de ponta de carga Ta = Temperatura ambiente CP = Carga durante o tempo de ponta TO = Temperatura do topo do óleo TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento					

Tabela 17 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF □ 133%
Carga inicial = 90%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	149	63	120	
	15	143	67	120	
	20	137	71	120	
	25	130	74	120	
	30	123	78	120	
	35	116	82	120	
	40	109	86	120	
1,0	10	140	69	120	
	15	135	72	120	
	20	129	75	120	
	25	124	78	120	
	30	118	81	120	
	35	112	84	120	
	40	106	87	120	
2,0	10	131	74	120	
	15	127	76	120	
	20	122	79	120	
	25	117	81	119	
	30	113	84	120	
	35	108	86	120	
	40	103	89	120	X
4,0	10	125	77	119	
	15	121	79	119	
	20	118	81	120	
	25	114	83	120	
	30	109	85	119	
	35	105	87	120	
	40	101	90	120	X
8,0	10	123	78	120	
	15	119	80	119	
	20	116	82	120	
	25	112	84	120	
	30	108	86	120	
	35	104	88	120	X
	40	100	90	120	X
24,0	10	123	79	120	X
	15	119	80	120	X
	20	115	82	119	X
	25	112	84	120	X
	30	108	86	120	X
	35	104	88	120	X
	40	100	90	120	X

NOTAS

1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante

2 DP = Duração do tempo de ponta de carga

Ta = Temperatura ambiente

CP = Carga durante o tempo de ponta

TO = Temperatura do topo do óleo

TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 18 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF □ 133%
Carga inicial = 100%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	142	67	120	
	15	136	71	120	
	20	129	75	120	
	25	123	79	120	
	30	115	82	120	X
	35	108	86	120	X
	40	100	90	120	X
1,0	10	135	71	120	
	15	130	74	120	
	20	124	77	120	
	25	119	81	120	
	30	113	84	120	X
	35	107	87	120	X
	40	100	90	120	X
2,0	10	129	75	120	
	15	124	77	120	
	20	120	80	120	
	25	115	82	120	
	30	110	85	120	X
	35	105	87	120	X
	40	100	90	120	X
4,0	10	125	78	120	
	15	121	80	120	
	20	117	82	120	
	25	113	84	120	
	30	109	86	120	X
	35	104	88	120	X
	40	100	90	120	X
8,0	10	123	78	120	
	15	119	80	119	
	20	116	82	120	X
	25	112	84	120	X
	30	108	86	120	X
	35	104	88	120	X
	40	100	90	120	X
24,0	10	123	79	120	X
	15	119	80	120	X
	20	115	82	119	X
	25	112	84	120	X
	30	108	86	120	X
	35	104	88	120	X
	40	100	90	120	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 19 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF/ONAF > 133%
Carga inicial = 50%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	49	115	
	15	150	54	120	
	20	145	57	120	
	25	140	61	120	
	30	134	64	120	
	35	129	68	120	
	40	123	71	120	
1,0	10	140	59	119	
	15	136	63	120	
	20	132	66	120	
	25	127	68	120	
	30	123	72	120	
	35	118	74	120	
	40	113	77	120	
2,0	10	129	68	120	
	15	125	70	120	
	20	121	72	120	
	25	117	75	120	
	30	113	77	120	
	35	109	80	120	
	40	105	82	120	
4,0	10	123	71	120	
	15	120	73	120	
	20	116	75	120	
	25	112	77	119	
	30	109	80	120	
	35	105	82	120	
	40	101	85	120	
8,0	10	122	72	120	
	15	118	73	119	
	20	115	76	120	
	25	111	78	119	
	30	108	81	120	
	35	104	83	120	
	40	100	85	120	
24,0	10	122	72	120	X
	15	118	74	119	X
	20	115	76	120	X
	25	111	78	119	X
	30	108	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 20 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF/ONAF > 133%
Carga inicial = 70%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	148	54	120	
	15	143	58	120	
	20	138	61	120	
	25	133	65	120	
	30	127	69	120	
	35	122	72	120	
	40	116	76	120	
1,0	10	137	62	120	
	15	132	65	119	
	20	128	68	120	
	25	123	71	120	
	30	119	74	120	
	35	114	77	120	
	40	109	80	120	
2,0	10	127	68	119	
	15	124	71	120	
	20	120	73	120	
	25	116	76	120	
	30	112	78	120	
	35	107	80	119	
	40	103	83	120	
4,0	10	123	71	120	
	15	119	73	119	
	20	116	76	120	
	25	112	78	120	
	30	108	80	119	
	35	104	82	119	
	40	101	85	120	
8,0	10	122	72	120	
	15	118	74	119	
	20	115	76	120	
	25	111	78	119	
	30	108	81	120	
	35	104	83	120	
	40	100	85	120	
24,0	10	122	72	120	X
	15	118	74	119	X
	20	115	76	120	X
	25	111	78	119	X
	30	108	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 21 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF/ONAF > 133%
Carga inicial = 90%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	140	60	120	
	15	135	64	120	
	20	129	67	120	
	25	124	71	120	
	30	118	74	120	
	35	112	78	120	
	40	106	82	120	
1,0	10	132	65	120	
	15	128	69	120	
	20	123	71	120	
	25	118	74	120	
	30	113	77	120	
	35	108	80	120	
	40	103	83	120	
2,0	10	126	70	120	
	15	122	72	120	
	20	118	74	120	
	25	114	77	120	
	30	110	79	120	
	35	105	82	119	
	40	101	84	120	
4,0	10	123	72	120	
	15	119	74	120	
	20	115	75	119	
	25	112	78	120	
	30	108	80	120	
	35	104	82	120	
	40	100	85	120	X
8,0	10	122	72	120	
	15	118	74	119	
	20	115	76	120	
	25	111	78	119	
	30	108	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X
24,0	10	122	72	120	X
	15	118	74	119	X
	20	115	76	120	X
	25	111	78	119	X
	30	108	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 22 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF/ONAF > 133%
Carga inicial = 100%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	135	63	120	
	15	130	67	120	
	20	124	71	120	
	25	118	74	120	
	30	113	78	120	X
	35	106	81	120	X
	40	100	85	120	X
1,0	10	129	67	120	
	15	125	70	120	
	20	120	73	120	
	25	115	76	120	
	30	110	79	120	X
	35	105	82	120	X
	40	100	85	120	X
2,0	10	125	70	120	
	15	121	73	120	
	20	117	75	120	
	25	113	78	120	
	30	109	80	120	X
	35	104	82	120	X
	40	100	85	120	X
4,0	10	122	71	119	
	15	119	74	120	
	20	115	76	119	
	25	112	78	120	
	30	108	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X
8,0	10	122	72	120	
	15	118	74	119	
	20	115	76	120	X
	25	111	78	119	X
	30	108	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X
24,0	10	122	72	120	X
	15	118	74	119	X
	20	115	76	120	X
	25	111	78	119	X
	30	108	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X

NOTAS

1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante

2 DP = Duração do tempo de ponta de carga

Ta = Temperatura ambiente

CP = Carga durante o tempo de ponta

TO = Temperatura do topo do óleo

TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 23 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: OFAF, OFWF, ONAN/OFAF/OFAF
Carga inicial = 50%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	49	116	
	15	149	54	120	
	20	144	57	120	
	25	139	61	120	
	30	134	64	120	
	35	129	67	120	
	40	124	71	120	
1,0	10	139	61	120	
	15	135	63	120	
	20	131	66	120	
	25	127	69	120	
	30	122	71	120	
	35	118	74	120	
	40	113	77	120	
2,0	10	127	68	119	
	15	124	71	120	
	20	120	73	120	
	25	116	75	119	
	30	113	78	120	
	35	109	80	120	
	40	105	82	120	
4,0	10	122	72	120	
	15	118	73	119	
	20	115	76	120	
	25	112	78	120	
	30	108	80	120	
	35	105	83	120	
	40	101	85	120	
8,0	10	121	73	120	
	15	117	74	119	
	20	114	77	120	
	25	111	79	120	
	30	107	81	120	
	35	104	83	120	
	40	100	85	120	
24,0	10	120	72	119	X
	15	117	74	119	X
	20	114	77	120	X
	25	111	79	120	X
	30	107	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X
<p>NOTAS 1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante 2 DP = Duração do tempo de ponta de carga Ta = Temperatura ambiente CP = Carga durante o tempo de ponta TO = Temperatura do topo do óleo TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento</p>					

Tabela 24 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: OFAF, OFWF, ONAN/OFAF/OFAF
Carga inicial = 70%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	147	55	119	
	15	143	58	120	
	20	138	62	120	
	25	133	65	120	
	30	128	69	120	
	35	122	72	120	
	40	117	75	120	
1,0	10	135	63	119	
	15	131	66	119	
	20	127	68	120	
	25	123	71	120	
	30	118	74	119	
	35	114	77	120	
	40	109	80	120	
2,0	10	126	69	120	
	15	122	71	119	
	20	119	74	120	
	25	115	76	120	
	30	111	78	120	
	35	107	80	119	
	40	103	83	120	
4,0	10	121	72	119	
	15	118	74	119	
	20	115	76	120	
	25	111	78	119	
	30	108	80	120	
	35	104	82	120	
	40	100	84	119	
8,0	10	120	72	119	
	15	117	74	119	
	20	114	77	120	
	25	111	79	120	
	30	107	81	120	
	35	104	83	120	
	40	100	85	120	
24,0	10	120	72	119	X
	15	117	74	119	X
	20	114	77	120	X
	25	111	79	120	X
	30	107	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 25 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: OFAF, OFWF, ONAN/OFAF/OFAF
Carga inicial = 90%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	139	61	120	
	15	134	64	120	
	20	129	68	120	
	25	124	71	120	
	30	118	74	120	
	35	112	78	120	
	40	106	81	120	
1,0	10	131	66	120	
	15	126	69	119	
	20	122	72	120	
	25	118	75	120	
	30	113	77	120	
	35	108	80	120	
	40	104	83	120	
2,0	10	124	70	120	
	15	121	73	120	
	20	117	75	120	
	25	113	77	120	
	30	109	79	120	
	35	105	82	120	
	40	101	84	120	
4,0	10	121	72	120	
	15	118	74	120	
	20	114	76	119	
	25	111	78	120	
	30	107	80	119	
	35	104	83	120	
	40	100	85	120	X
8,0	10	120	72	119	
	15	117	74	119	
	20	114	77	120	
	25	111	79	120	
	30	107	81	120	
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X
24,0	10	120	72	119	X
	15	117	74	119	X
	20	114	77	120	X
	25	111	79	120	X
	30	107	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 26 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: OFAF, OFWF, ONAN/OFAF/OFAF
Carga inicial = 100%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	134	64	120	
	15	129	68	120	
	20	123	71	120	
	25	118	75	120	
	30	112	78	120	X
	35	106	81	120	X
	40	100	85	120	X
1,0	10	128	68	120	
	15	123	71	119	
	20	119	74	120	
	25	115	77	120	
	30	110	79	120	X
	35	105	82	120	X
	40	100	85	120	X
2,0	10	123	71	120	
	15	119	73	119	
	20	116	76	120	
	25	112	78	120	
	30	108	80	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X
4,0	10	121	72	120	
	15	118	75	120	
	20	114	76	119	
	25	111	79	120	
	30	107	80	119	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X
8,0	10	120	72	119	
	15	117	74	119	
	20	114	77	120	X
	25	111	79	120	X
	30	107	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X
24,0	10	120	72	119	X
	15	117	74	119	X
	20	114	77	120	X
	25	111	79	120	X
	30	107	81	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X

NOTAS

1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante

2 DP = Duração do tempo de ponta de carga

Ta = Temperatura ambiente

CP = Carga durante o tempo de ponta

TO = Temperatura do topo do óleo

TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 27 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ODAF, ODWF, ONAN/ODAF/ODAF
Carga inicial = 50%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	144	47	120	
	15	140	51	119	
	20	137	55	120	
	25	133	59	120	
	30	129	62	120	
	35	124	66	120	
	40	120	70	120	
1,0	10	133	57	119	
	15	130	61	120	
	20	127	64	120	
	25	123	67	120	
	30	119	70	120	
	35	115	73	119	
	40	111	76	119	
2,0	10	124	66	120	
	15	121	69	120	
	20	118	71	120	
	25	115	74	120	
	30	111	76	119	
	35	108	79	120	
	40	104	82	119	
4,0	10	119	69	119	
	15	116	72	119	
	20	113	74	119	
	25	110	77	119	
	30	107	79	119	
	35	104	82	120	
	40	101	85	120	
8,0	10	118	70	119	
	15	115	73	119	
	20	113	76	120	
	25	110	78	120	
	30	106	80	119	
	35	103	82	119	
	40	100	85	120	
24,0	10	118	70	119	X
	15	115	73	119	X
	20	113	76	120	X
	25	109	77	119	X
	30	106	80	119	X
	35	103	82	120	X
	40	100	85	120	X
<p>NOTAS</p> <p>1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante</p> <p>2 DP = Duração do tempo de ponta de carga</p> <p>Ta = Temperatura ambiente</p> <p>CP = Carga durante o tempo de ponta</p> <p>TO = Temperatura do topo do óleo</p> <p>TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento</p>					

Tabela 28 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ODAF, ODWF, ONAN/ODAF/ODAF
Carga inicial = 70%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	139	52	120	
	15	135	56	119	
	20	131	60	119	
	25	127	63	120	
	30	123	67	120	
	35	119	71	120	
	40	114	75	120	
1,0	10	130	60	119	
	15	127	63	120	
	20	123	66	119	
	25	120	70	120	
	30	116	73	120	
	35	112	76	120	
	40	108	79	120	
2,0	10	123	67	120	
	15	120	70	120	
	20	117	72	120	
	25	113	75	119	
	30	110	78	120	
	35	106	80	119	
	40	103	83	120	
4,0	10	119	70	119	
	15	116	72	119	
	20	113	75	119	
	25	110	77	119	
	30	107	80	120	
	35	104	82	120	
	40	100	84	119	
8,0	10	118	70	119	
	15	115	73	119	
	20	113	76	120	
	25	110	78	120	
	30	106	80	119	
	35	103	82	119	
	40	100	85	120	
24,0	10	118	70	119	X
	15	115	73	119	X
	20	113	76	120	X
	25	109	77	119	X
	30	106	80	119	X
	35	103	82	120	X
	40	100	85	120	X
<p>NOTAS</p> <p>1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante</p> <p>2 DP = Duração do tempo de ponta de carga</p> <p>Ta = Temperatura ambiente</p> <p>CP = Carga durante o tempo de ponta</p> <p>TO = Temperatura do topo do óleo</p> <p>TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento</p>					

Tabela 29 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ODAF, ODWF, ONAN/ODAF/ODAF
Carga inicial = 90%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	132	59	119	
	15	128	62	120	
	20	124	66	120	
	25	120	70	120	
	30	115	74	120	
	35	110	77	120	
	40	105	81	120	
1,0	10	126	64	119	
	15	123	67	120	
	20	119	70	120	
	25	115	73	120	
	30	111	76	119	
	35	107	80	120	
	40	103	83	120	
2,0	10	121	68	119	
	15	118	71	119	
	20	115	74	120	
	25	112	76	120	
	30	108	79	120	
	35	105	82	120	
	40	101	84	120	
4,0	10	119	70	120	
	15	116	73	120	
	20	113	75	120	
	25	110	78	120	
	30	107	80	120	
	35	103	82	119	
	40	100	85	120	
8,0	10	118	70	119	
	15	115	73	119	
	20	113	76	120	
	25	109	77	119	
	30	106	80	119	
	35	103	82	119	X
	40	100	85	120	X
24,0	10	118	70	119	X
	15	115	73	119	X
	20	113	76	120	X
	25	109	77	119	X
	30	106	80	119	X
	35	103	82	120	X
	40	100	85	120	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 30 - Carregamento de transformadores de 65°C
Sistema de resfriamento: ODAF, ODWF, ONAN/ODAF/ODAF
Carga inicial = 100%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	128	63	120	
	15	124	66	120	
	20	119	70	119	
	25	115	74	120	
	30	110	77	120	X
	35	105	81	120	X
	40	100	85	120	X
1,0	10	124	66	120	
	15	120	69	120	
	20	116	72	119	
	25	113	76	120	
	30	109	79	120	X
	35	104	82	120	X
	40	100	85	120	X
2,0	10	120	69	119	
	15	117	71	119	
	20	114	74	120	
	25	111	77	120	
	30	107	80	120	X
	35	104	83	120	X
	40	100	85	120	X
4,0	10	119	71	120	
	15	116	73	120	
	20	113	75	120	
	25	110	78	120	
	30	107	80	120	X
	35	103	82	119	X
	40	100	85	120	X
8,0	10	118	70	119	
	15	115	73	119	
	20	113	76	120	X
	25	109	77	119	X
	30	106	80	119	X
	35	103	82	120	X
	40	100	85	120	X
24,0	10	118	70	119	X
	15	115	73	119	X
	20	113	76	120	X
	25	109	77	119	X
	30	106	80	119	X
	35	103	82	120	X
	40	100	85	120	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 31 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ONAN
Carga inicial = 50%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	36	84	
	15	150	41	89	
	20	150	46	94	
	25	150	51	99	
	30	150	56	104	
	35	144	61	105	
	40	135	65	105	
1,0	10	150	44	92	
	15	150	49	97	
	20	150	54	102	
	25	148	58	105	
	30	141	62	105	
	35	133	65	105	
	40	126	69	105	
2,0	10	150	56	104	
	15	146	59	105	
	20	140	62	105	
	25	134	65	105	
	30	128	68	105	
	35	121	71	105	
	40	115	74	105	
4,0	10	139	63	105	
	15	133	65	105	
	20	128	68	105	
	25	123	70	105	
	30	118	73	105	
	35	112	75	105	
	40	106	78	105	
8,0	10	131	66	105	
	15	127	69	105	
	20	122	71	105	
	25	117	73	105	
	30	112	75	105	
	35	107	77	105	
	40	101	79	105	
24,0	10	129	67	104	X
	15	125	69	105	X
	20	120	71	105	X
	25	115	73	105	X
	30	110	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 32 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ONAN
Carga inicial = 70%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	43	90	
	15	150	48	95	
	20	150	53	100	
	25	150	58	105	
	30	142	62	105	
	35	133	66	105	
	40	124	70	105	
1,0	10	150	49	97	
	15	150	54	102	
	20	148	59	105	
	25	140	62	105	
	30	133	66	105	
	35	125	69	105	
	40	117	73	105	
2,0	10	148	59	105	
	15	142	61	105	
	20	136	64	105	
	25	130	67	105	
	30	123	70	105	
	35	117	73	105	
	40	110	76	105	
4,0	10	137	64	105	
	15	132	66	105	
	20	127	69	105	
	25	121	71	105	
	30	116	74	105	
	35	110	76	105	
	40	104	78	105	
8,0	10	131	66	105	
	15	126	68	105	
	20	121	71	104	
	25	117	73	105	
	30	111	75	105	
	35	106	77	105	
	40	101	80	105	
24,0	10	129	67	104	X
	15	125	69	105	X
	20	120	71	105	X
	25	115	73	105	X
	30	110	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X

NOTAS
1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 33 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ONAN
Carga inicial = 90%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	50	98	
	15	150	55	103	
	20	145	60	105	
	25	137	64	105	
	30	128	68	105	
	35	119	72	105	
	40	109	76	105	X
1,0	10	150	56	103	
	15	145	59	105	
	20	138	63	105	
	25	131	67	105	
	30	123	70	105	
	35	115	74	105	
	40	107	78	105	X
2,0	10	143	61	105	
	15	137	64	105	
	20	130	67	105	
	25	124	70	105	
	30	118	73	105	
	35	111	76	105	
	40	104	79	105	X
4,0	10	135	65	105	
	15	130	67	105	
	20	124	69	105	
	25	119	72	105	
	30	113	74	105	
	35	108	77	105	X
	40	102	80	105	X
8,0	10	131	67	105	
	15	126	69	105	
	20	121	71	105	
	25	116	73	105	
	30	111	75	105	X
	35	106	78	105	X
	40	100	80	105	X
24,0	10	129	67	104	X
	15	125	69	105	X
	20	120	71	105	X
	25	115	73	105	X
	30	110	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 34 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ONAN
Carga inicial = 100%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	55	102	
	15	146	59	105	
	20	138	63	105	
	25	129	68	105	
	30	120	72	105	X
	35	111	76	105	X
	40	101	80	105	X
1,0	10	147	59	105	
	15	140	62	105	
	20	133	66	105	
	25	125	69	105	
	30	117	73	105	X
	35	109	76	105	X
	40	100	80	105	X
2,0	10	140	63	105	
	15	134	66	105	
	20	127	68	105	
	25	121	71	105	
	30	114	74	105	X
	35	107	77	105	X
	40	100	80	105	X
4,0	10	134	66	105	
	15	128	68	105	
	20	123	70	105	
	25	118	73	105	
	30	112	75	105	X
	35	106	78	105	X
	40	100	80	105	X
8,0	10	130	67	105	
	15	126	69	105	
	20	121	71	105	X
	25	116	74	105	X
	30	111	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X
24,0	10	129	67	104	X
	15	125	69	105	X
	20	120	71	105	X
	25	115	73	105	X
	30	110	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X

NOTAS
1 X - Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 35 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de Resfriamento: ONAN/ONAF □ 133%
Carga inicial = 50%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	40	88	
	15	150	45	93	
	20	150	50	98	
	25	150	55	103	
	30	146	60	105	
	35	138	63	105	
	40	131	67	105	
1,0	10	150	52	100	
	15	150	57	105	
	20	144	60	105	
	25	138	63	105	
	30	132	66	105	
	35	126	69	105	
	40	119	72	105	
2,0	10	140	62	105	
	15	135	64	105	
	20	130	67	105	
	25	125	69	105	
	30	120	72	105	
	35	114	74	105	
	40	109	77	105	
4,0	10	131	67	105	
	15	126	68	105	
	20	122	71	105	
	25	117	73	105	
	30	112	75	105	
	35	107	77	105	
	40	102	79	105	
8,0	10	128	68	105	
	15	123	70	105	
	20	119	72	105	
	25	114	74	104	
	30	110	76	105	
	35	105	78	105	
	40	100	80	105	
24,0	10	127	68	105	X
	15	123	70	105	X
	20	119	72	105	X
	25	114	74	105	X
	30	110	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X
NOTAS 1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante 2 DP = Duração do tempo de ponta de carga Ta = Temperatura ambiente CP = Carga durante o tempo de ponta TO = Temperatura do topo do óleo TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento					

Tabela 36 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF □ 133%
Carga inicial = 70%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	46	94	
	15	150	51	99	
	20	150	56	104	
	25	144	60	105	
	30	137	64	105	
	35	129	67	105	
	40	121	71	105	
1,0	10	150	56	104	
	15	145	60	105	
	20	139	63	105	
	25	133	66	105	
	30	127	69	105	
	35	120	72	105	
	40	113	75	105	
2,0	10	138	63	105	
	15	133	66	105	
	20	128	68	105	
	25	123	71	105	
	30	117	73	105	
	35	112	75	105	
	40	106	78	105	
4,0	10	130	67	105	
	15	126	69	105	
	20	121	71	105	
	25	116	73	104	
	30	112	75	105	
	35	107	77	105	
	40	102	80	105	
8,0	10	127	68	104	
	15	123	70	105	
	20	119	72	105	
	25	114	74	104	
	30	110	76	105	
	35	105	78	105	
	40	100	80	105	
24,0	10	127	68	105	X
	15	123	70	105	X
	20	119	72	105	X
	25	114	74	105	X
	30	110	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X
NOTAS 1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante 2 DP = Duração do tempo de ponta de carga Ta = Temperatura ambiente CP = Carga durante o tempo de ponta TO = Temperatura do topo do óleo TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento					

Tabela 37 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF □ 133%
Carga inicial = 90%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	54	102	
	15	148	59	105	
	20	140	62	105	
	25	133	66	105	
	30	125	69	105	
	35	117	73	105	
	40	108	77	105	X
1,0	10	144	60	105	
	15	138	63	105	
	20	132	66	105	
	25	126	69	105	
	30	119	72	105	
	35	112	75	105	
	40	105	78	105	X
2,0	10	135	65	105	
	15	130	67	105	
	20	125	70	105	
	25	119	72	105	
	30	114	74	105	
	35	108	77	105	
	40	102	79	105	X
4,0	10	129	67	105	
	15	125	69	105	
	20	120	71	105	
	25	116	74	105	
	30	111	76	105	
	35	106	78	105	
	40	101	80	105	X
8,0	10	127	68	104	
	15	123	70	105	
	20	119	72	105	
	25	114	74	105	
	30	110	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X
24,0	10	127	68	105	X
	15	123	70	105	X
	20	119	72	105	X
	25	114	74	105	X
	30	110	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X

NOTAS
1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 38 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF □ 133%
Carga inicial = 100%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	149	58	105	
	15	141	62	105	
	20	134	65	105	
	25	126	69	105	
	30	118	73	105	X
	35	109	76	105	X
	40	100	80	105	X
1,0	10	140	62	105	
	15	134	65	105	
	20	128	68	105	
	25	121	71	105	
	30	115	74	105	X
	35	108	77	105	X
	40	100	80	105	X
2,0	10	133	66	105	
	15	128	68	105	
	20	123	70	105	
	25	117	73	105	
	30	112	75	105	X
	35	106	78	105	X
	40	100	80	105	X
4,0	10	129	68	105	
	15	124	69	105	
	20	120	72	105	
	25	115	74	105	
	30	110	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X
8,0	10	127	68	104	
	15	123	70	105	
	20	119	72	105	X
	25	114	74	105	X
	30	110	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X
24,0	10	127	68	105	X
	15	123	70	105	X
	20	119	72	105	X
	25	114	74	105	X
	30	110	76	105	X
	35	105	78	105	X
	40	100	80	105	X
<p>NOTAS</p> <p>1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante</p> <p>2 DP = Duração do tempo de ponta de carga</p> <p>Ta = Temperatura ambiente</p> <p>CP = Carga durante o tempo de ponta</p> <p>TO = Temperatura do topo do óleo</p> <p>TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento</p>					

Tabela 39 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF/ONAF > 133%
Carga inicial = 50%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	42	95	
	15	150	47	100	
	20	150	52	105	
	25	143	55	105	
	30	137	59	105	
	35	130	63	105	
	40	123	66	105	
1,0	10	147	53	105	
	15	142	56	105	
	20	136	59	105	
	25	131	62	105	
	30	125	65	105	
	35	119	68	105	
	40	113	71	105	
2,0	10	134	60	104	
	15	130	63	105	
	20	125	65	105	
	25	120	67	105	
	30	115	70	105	
	35	110	72	105	
	40	105	75	105	
4,0	10	129	63	105	
	15	124	65	105	
	20	120	68	105	
	25	115	70	105	
	30	111	72	105	
	35	106	74	105	
	40	101	77	105	
8,0	10	127	64	105	
	15	123	66	105	
	20	119	68	105	
	25	114	70	105	
	30	110	73	105	
	35	105	75	105	
	40	100	77	105	
24,0	10	127	64	105	X
	15	123	66	105	X
	20	119	68	105	X
	25	114	70	105	X
	30	110	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
<p>NOTAS</p> <p>1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante</p> <p>2 DP = Duração do tempo de ponta de carga</p> <p>Ta = Temperatura ambiente</p> <p>CP = Carga durante o tempo de ponta</p> <p>TO = Temperatura do topo do óleo</p> <p>TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento</p>					

Tabela 40 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF/ONAF > 133%
Carga inicial = 70%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	47	100	
	15	150	52	105	
	20	143	55	105	
	25	137	59	105	
	30	130	63	105	
	35	123	66	105	
	40	116	70	105	
1,0	10	143	55	105	
	15	138	58	105	
	20	133	61	105	
	25	127	64	105	
	30	121	67	105	
	35	115	70	105	
	40	109	73	105	
2,0	10	133	61	105	
	15	128	63	104	
	20	124	66	105	
	25	119	68	105	
	30	114	71	105	
	35	109	73	105	
	40	103	75	105	
4,0	10	128	63	105	
	15	124	65	105	
	20	120	68	105	
	25	115	70	105	
	30	110	72	105	
	35	106	75	105	
	40	101	77	105	
8,0	10	127	64	105	
	15	123	66	105	
	20	119	68	105	
	25	114	70	105	
	30	110	73	105	
	35	105	75	105	
	40	100	77	105	
24,0	10	127	64	105	X
	15	123	66	105	X
	20	119	68	105	X
	25	114	70	105	X
	30	110	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
NOTAS 1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante 2 DP = Duração do tempo de ponta de carga Ta = Temperatura ambiente CP = Carga durante o tempo de ponta TO = Temperatura do topo do óleo TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento					

Tabela 41 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF/ONAF > 133%
Carga inicial = 90%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	148	53	105	
	15	141	56	105	
	20	135	60	105	
	25	128	64	105	
	30	121	67	105	
	35	114	71	105	
	40	106	74	105	X
1,0	10	139	58	105	
	15	133	61	105	
	20	128	64	105	
	25	122	67	105	
	30	116	70	105	
	35	110	73	105	
	40	103	75	105	X
2,0	10	131	61	105	
	15	127	64	105	
	20	122	67	105	
	25	117	69	105	
	30	112	72	105	
	35	107	74	105	
	40	101	76	105	X
4,0	10	128	63	105	
	15	124	66	105	
	20	119	68	105	
	25	115	70	105	
	30	110	72	105	
	35	105	75	105	
	40	100	77	105	X
8,0	10	127	64	105	
	15	123	66	105	
	20	119	68	105	
	25	114	70	105	
	30	110	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
24,0	10	127	64	105	X
	15	123	66	105	X
	20	119	68	105	X
	25	114	70	105	X
	30	110	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
NOTAS 1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante 2 DP = Duração do tempo de ponta de carga Ta = Temperatura ambiente CP = Carga durante o tempo de ponta TO = Temperatura do topo do óleo TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento					

Tabela 42 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ONAN/ONAF/ONAF > 133%
Carga inicial = 100%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	143	55	105	
	15	137	59	105	
	20	130	63	105	
	25	123	66	105	
	30	116	70	105	X
	35	108	73	105	X
	40	100	77	105	X
1,0	10	136	59	105	
	15	131	62	105	
	20	125	65	105	
	25	119	68	105	
	30	113	71	105	X
	35	107	74	105	X
	40	100	77	105	X
2,0	10	130	62	105	
	15	126	65	105	
	20	121	67	105	
	25	116	70	105	
	30	111	72	105	X
	35	106	75	105	X
	40	100	77	105	X
4,0	10	128	64	105	
	15	123	65	104	
	20	119	68	105	
	25	115	70	105	
	30	110	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
8,0	10	127	64	105	
	15	123	66	105	
	20	119	68	105	X
	25	114	70	105	X
	30	110	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
24,0	10	127	64	105	X
	15	123	66	105	X
	20	119	68	105	X
	25	114	70	105	X
	30	110	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
<p>NOTAS</p> <p>1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante</p> <p>2 DP = Duração do tempo de ponta de carga</p> <p>Ta = Temperatura ambiente</p> <p>CP = Carga durante o tempo de ponta</p> <p>TO = Temperatura do topo do óleo</p> <p>TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento</p>					

Tabela 43 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: OFAF, OFWF, ONAN/OFAF/OFAF
Carga inicial = 50%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	43	96	
	15	150	48	101	
	20	149	52	105	
	25	143	56	105	
	30	137	59	105	
	35	130	62	105	
	40	124	66	105	
1,0	10	145	54	105	
	15	140	57	105	
	20	135	60	105	
	25	130	63	105	
	30	125	65	105	
	35	119	68	105	
	40	113	71	105	
2,0	10	133	61	105	
	15	128	63	105	
	20	124	66	105	
	25	119	68	105	
	30	115	70	105	
	35	110	72	105	
	40	105	75	105	
4,0	10	127	64	105	
	15	123	66	105	
	20	119	68	105	
	25	114	70	104	
	30	110	72	105	
	35	106	75	105	
	40	101	77	105	
8,0	10	125	64	104	
	15	122	67	105	
	20	117	68	104	
	25	113	70	105	
	30	109	73	105	
	35	105	75	105	
	40	100	77	105	
24,0	10	125	64	104	X
	15	121	66	104	X
	20	117	68	104	X
	25	113	71	105	X
	30	109	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
<p>NOTAS</p> <p>1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante</p> <p>2 DP = Duração do tempo de ponta de carga</p> <p>Ta = Temperatura ambiente</p> <p>CP = Carga durante o tempo de ponta</p> <p>TO = Temperatura do topo do óleo</p> <p>TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento</p>					

Tabela 44 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: OFAF, OFWF, ONAN/OFAF/OFAF
Carga inicial = 70%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	48	101	
	15	149	52	105	
	20	143	56	105	
	25	137	59	105	
	30	130	62	105	
	35	124	66	105	
	40	117	69	105	
1,0	10	142	56	105	
	15	137	59	105	
	20	132	62	105	
	25	126	64	105	
	30	121	67	105	
	35	115	70	105	
	40	109	73	105	
2,0	10	131	61	105	
	15	127	64	105	
	20	123	66	105	
	25	118	68	105	
	30	113	71	105	
	35	108	73	105	
	40	103	75	105	
4,0	10	126	64	104	
	15	122	66	104	
	20	118	68	104	
	25	114	70	105	
	30	110	73	105	
	35	105	74	105	
	40	101	77	105	
8,0	10	125	64	104	
	15	122	67	105	
	20	117	68	104	
	25	113	70	105	
	30	109	73	105	
	35	105	75	105	
	40	100	77	105	
24,0	10	125	64	104	X
	15	121	66	104	X
	20	117	68	104	X
	25	113	71	105	X
	30	109	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
NOTAS 1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante 2 DP = Duração do tempo de ponta de carga Ta = Temperatura ambiente CP = Carga durante o tempo de ponta TO = Temperatura do topo do óleo TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento					

Tabela 45 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: OFAF, OFWF, ONAN/OFAF/OFAF
Carga inicial = 90%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	147	54	105	
	15	140	57	105	
	20	134	60	105	
	25	128	64	105	
	30	121	67	105	
	35	114	71	105	
	40	107	74	105	X
1,0	10	137	59	105	
	15	132	61	105	
	20	127	64	105	
	25	121	67	105	
	30	116	70	105	
	35	110	73	105	
	40	104	76	105	X
2,0	10	130	63	105	
	15	125	65	105	
	20	121	67	105	
	25	116	69	105	
	30	111	72	105	
	35	106	74	105	
	40	101	76	105	X
4,0	10	126	64	105	
	15	122	66	105	
	20	118	68	105	
	25	114	71	105	
	30	109	72	104	
	35	105	75	105	
	40	100	77	105	X
8,0	10	125	64	104	
	15	121	66	104	
	20	117	68	104	
	25	113	71	105	
	30	109	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
24,0	10	125	64	104	X
	15	121	66	104	X
	20	117	68	104	X
	25	113	71	105	X
	30	109	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X

NOTAS
1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Tabela 46 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: OFAF, OFWF, ONAN/OFAF/OFAF
Carga inicial = 100%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	142	56	105	
	15	135	60	105	
	20	129	63	105	
	25	122	67	105	
	30	115	70	105	X
	35	108	74	105	X
	40	100	77	105	X
1,0	10	134	60	105	
	15	129	63	105	
	20	124	66	105	
	25	118	68	105	
	30	112	71	105	X
	35	106	74	105	X
	40	100	77	105	X
2,0	10	129	63	105	
	15	124	65	105	
	20	120	68	105	
	25	115	70	105	
	30	110	72	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
4,0	10	126	64	105	
	15	122	66	105	
	20	118	69	105	
	25	114	71	105	
	30	109	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
8,0	10	125	64	104	
	15	121	66	104	
	20	117	68	104	X
	25	113	71	105	X
	30	109	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
24,0	10	125	64	104	X
	15	121	66	104	X
	20	117	68	104	X
	25	113	71	105	X
	30	109	73	105	X
	35	105	75	105	X
	40	100	77	105	X
<p>NOTAS</p> <p>1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante</p> <p>2 DP = Duração do tempo de ponta de carga</p> <p>Ta = Temperatura ambiente</p> <p>CP = Carga durante o tempo de ponta</p> <p>TO = Temperatura do topo do óleo</p> <p>TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento</p>					

Tabela 47 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ODAF, ODWF, ONAN/ODAF/ODAF
Carga inicial = 50%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	150	43	105	
	15	145	46	105	
	20	140	50	105	
	25	136	54	105	
	30	131	58	105	
	35	125	61	105	
	40	120	65	105	
1,0	10	138	51	104	
	15	134	54	105	
	20	130	58	105	
	25	126	61	105	
	30	121	64	105	
	35	116	67	105	
	40	112	70	105	
2,0	10	129	59	105	
	15	125	61	105	
	20	121	64	105	
	25	117	66	105	
	30	113	69	105	
	35	109	72	105	
	40	104	74	105	
4,0	10	124	62	105	
	15	120	64	104	
	20	117	67	105	
	25	113	69	105	
	30	109	72	105	
	35	105	74	105	
	40	101	77	105	
8,0	10	123	63	105	
	15	119	65	104	
	20	116	68	105	
	25	112	70	105	
	30	108	72	105	
	35	104	74	105	
	40	100	77	105	
24,0	10	123	63	105	X
	15	119	65	104	X
	20	116	68	105	X
	25	112	70	105	X
	30	108	72	105	X
	35	104	75	105	X
	40	100	77	105	X
<p>NOTAS</p> <p>1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante</p> <p>2 DP = Duração do tempo de ponta de carga</p> <p>Ta = Temperatura ambiente</p> <p>CP = Carga durante o tempo de ponta</p> <p>TO = Temperatura do topo do óleo</p> <p>TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento</p>					

Tabela 48 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ODAF, ODWF, ONAN/ODAF/ODAF
Carga inicial = 70%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	145	46	105	
	15	140	50	105	
	20	135	54	105	
	25	130	57	105	
	30	125	61	105	
	35	120	65	105	
	40	114	69	105	
1,0	10	136	54	105	
	15	131	56	104	
	20	127	60	105	
	25	123	63	105	
	30	118	66	105	
	35	113	69	105	
	40	108	72	105	
2,0	10	128	60	105	
	15	124	62	105	
	20	120	65	105	
	25	116	67	105	
	30	112	70	105	
	35	107	72	104	
	40	103	75	105	
4,0	10	124	62	105	
	15	120	64	105	
	20	116	67	104	
	25	113	70	105	
	30	109	72	105	
	35	105	74	105	
	40	100	76	104	
8,0	10	123	63	105	
	15	119	65	104	
	20	116	68	105	
	25	112	70	105	
	30	108	72	105	
	35	104	74	105	
	40	100	77	105	
24,0	10	123	63	105	X
	15	119	65	104	X
	20	116	68	105	X
	25	112	70	105	X
	30	108	72	105	X
	35	104	75	105	X
	40	100	77	105	X
<p>NOTAS</p> <p>1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante</p> <p>2 DP = Duração do tempo de ponta de carga</p> <p>Ta = Temperatura ambiente</p> <p>CP = Carga durante o tempo de ponta</p> <p>TO = Temperatura do topo do óleo</p> <p>TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento</p>					

Tabela 49 - Carregamento de transformadores de 55°C
Sistema de resfriamento: ODAF, ODWF, ONAN/ODAF/ODAF
Carga inicial = 90%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	138	51	105	
	15	133	55	105	
	20	128	59	105	
	25	123	63	105	
	30	118	67	105	
	35	112	70	105	
	40	106	74	105	
1,0	10	132	56	105	
	15	127	59	104	
	20	123	63	105	
	25	118	66	105	
	30	113	69	105	
	35	108	72	105	
	40	103	75	105	
2,0	10	126	60	105	
	15	122	63	105	
	20	118	65	104	
	25	114	68	105	
	30	110	71	105	
	35	106	74	105	
	40	101	76	105	X
4,0	10	123	62	104	
	15	120	65	105	
	20	116	67	105	
	25	112	69	104	
	30	108	72	104	
	35	104	74	104	
	40	100	77	105	X
8,0	10	123	63	105	
	15	119	65	104	
	20	116	68	105	
	25	112	70	105	
	30	108	72	105	X
	35	104	75	105	X
	40	100	77	105	X
24,0	10	123	63	105	X
	15	119	65	104	X
	20	116	68	105	X
	25	112	70	105	X
	30	108	72	105	X
	35	104	75	105	X
	40	100	77	105	X
NOTAS 1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante 2 DP = Duração do tempo de ponta de carga Ta = Temperatura ambiente CP = Carga durante o tempo de ponta TO = Temperatura do topo do óleo TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento					

Tabela 50 - Carregamento de transformadores de 55°C

Sistema de resfriamento: ODAF, ODWF, ONAN/ODAF/ODAF
Carga inicial = 100%

DP (h)	Ta (°C)	CP(%)	TO (°C)	TE (°C)	OBS.
0,5	10	134	54	105	
	15	129	58	105	
	20	124	62	105	
	25	119	66	105	
	30	113	70	105	x
	35	107	73	105	x
	40	100	77	105	x
1,0	10	129	58	104	
	15	125	61	105	
	20	120	64	105	
	25	116	68	105	
	30	111	71	105	x
	35	106	74	105	x
	40	100	77	105	x
2,0	10	125	61	105	
	15	121	63	104	
	20	117	66	104	
	25	113	69	105	
	30	109	72	105	x
	35	105	75	105	x
	40	100	77	105	x
4,0	10	123	62	105	
	15	120	65	105	
	20	116	67	105	
	25	112	70	105	
	30	108	72	105	x
	35	104	74	105	x
	40	100	77	105	x
8,0	10	123	63	105	
	15	119	65	104	
	20	116	68	105	x
	25	112	70	105	x
	30	108	72	105	x
	35	104	75	105	x
	40	100	77	105	x
24,0	10	123	63	105	x
	15	119	65	104	x
	20	116	68	105	x
	25	112	70	105	x
	30	108	72	105	x
	35	104	75	105	x
	40	100	77	105	x

NOTAS
1 X Os carregamentos assinalados provocam envelhecimento acelerado do papel isolante
2 DP = Duração do tempo de ponta de carga
Ta = Temperatura ambiente
CP = Carga durante o tempo de ponta
TO = Temperatura do topo do óleo
TE = Temperatura do ponto mais quente do enrolamento

Anexo C (normativo)

Exemplo de cálculo da temperatura para transformadores de 2 enrolamentos (Procedimento 1)

C-1 Dados gerais

- resfriamento: ONAN
- elevação média: 65°C
- carga inicial (K_i) = 0,70
- carga durante a ponta (K_p) = 1,64
- duração da ponta: 2 horas
- temperatura ambiente: 40°C

C-2 Dados característicos (Tabela 9 - anexo A):

$$\Delta\theta_{en} + \Delta\theta_{on} = 80^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{on} = 55^\circ\text{C}$$

$$T_o = 3,0$$

$$T_e = 0,08$$

$$R = 3,2$$

$$m = 0,8$$

$$n = 0,8$$

$$\Delta\theta_{en} = 80 - 55 = 25^\circ\text{C}$$

Obs: Estes dados, preferencialmente, devem ser obtidos a partir do relatório de ensaio fornecido pelo fabricante.

C-3 Cálculo

$$\Delta\theta_{en} = \Delta\theta_{on} \left(\frac{K_p^2 R + 1}{R + 1} \right)^n = 55 \left(\frac{1,64^2 \times 3,2 + 1}{3,2 + 1} \right)^{0,8} = 106,62^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{ef} = \Delta\theta_{en} (K_p)^{2m} = 25 \times 1,64^{1,6} = 55,17^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{oi} = \Delta\theta_{on} \left(\frac{K_i^2 R + 1}{R + 1} \right)^n = 55 \left(\frac{0,7^2 \times 3,2 + 1}{3,2 + 1} \right)^{0,8} = 37,11^\circ\text{C}$$

$$\Delta\theta_{ei} = \Delta\theta_{en} (K_i)^{2m} = 25 \times 0,7^{1,6} = 14,13^\circ\text{C}$$

Substituindo esses valores nas equações de elevação, teremos:

1) durante o aquecimento (ponta)

1.1) óleo:

$$\Delta\theta_{oa} = (\Delta\theta_{of} - \Delta\theta_{oi}) \left(1 - e^{\frac{-t}{T_0}}\right) + \Delta\theta_{oi} = (106,62 - 37,11) \left(1 - e^{\frac{-t}{3}}\right) + 37,11 = 69,51 \left(1 - e^{\frac{-t}{3}}\right) + 37,11$$

1.2) enrolamento:

$$\Delta\theta_{ea} = (\Delta\theta_{ef} - \Delta\theta_{ei}) \left(1 - e^{\frac{-t}{T_e}}\right) + \Delta\theta_{ei} = (55,17 - 14,13) \left(1 - e^{\frac{-t}{0,08}}\right) + 14,13 = 41,04 \left(1 - e^{\frac{-t}{0,08}}\right) + 14,13$$

2) durante o resfriamento (após a ponta)

2.1) óleo:

$$\Delta\theta_{or} = (\Delta\theta_{om} - \Delta\theta_{oi}) e^{\frac{-t}{T_0}} + \Delta\theta_{oi}$$

$$\Delta\theta_{om} = \Delta\theta_{oa} \text{ para } t = 2 \text{ horas}$$

$$\Delta\theta_{om} = 69,51 \left(1 - e^{\frac{-2}{3}}\right) + 37,11 = 70,93 \text{ °C}$$

$$\Delta\theta_{or} = (70,93 - 37,11) e^{\frac{-2}{3}} + 37,11 = 33,82 e^{\frac{-2}{3}} + 37,11$$

2.2) enrolamento:

$$\Delta\theta_{er} = (\Delta\theta_{em} - \Delta\theta_{ei}) e^{\frac{-t}{T_e}} + \Delta\theta_{ei}$$

$$\Delta\theta_{em} = \Delta\theta_{ea} \text{ para } t = 2 \text{ horas}$$

$$\Delta\theta_{em} = 41,04 \left(1 - e^{\frac{-2}{0,08}}\right) + 14,13 = 55,17 \text{ °C}$$

$$\Delta\theta_{er} = (55,17 - 14,13) e^{\frac{-2}{0,08}} + 14,13 = 41,04 e^{\frac{-2}{0,08}} + 14,13$$

Durante a ponta, o intervalo será de 30 min (quanto menor, maior será a precisão da curva) e após a ponta, o intervalo será inicialmente de 30 min, depois aumentado para 2 horas e posteriormente para 4 horas, como mostrado na tabela e figura seguir.

Ponto n°	t (h)	t' (h)	Elevação da temperatura do óleo sobre a do ambiente (°C)	Elevação da temperatura do enrolamento sobre a do óleo (°C)	Temperatura do ponto mais quente (°C)
0	0		37,11	14,13	91,24
1	0,5		47,78	55,09	142,87
2	1,0		56,81	55,17	151,98
3	1,5		64,46	55,17	159,63
4	2,0	0	70,93	55,17	166,10
5	2,5	0,5	65,74	14,21	119,95
6	3,0	1,0	61,34	14,13	115,47
7	3,5	1,5	57,62	14,13	111,75
8	4,0	2,0	54,47	14,13	108,60
9	6,0	4,0	46,02	14,13	100,15
10	8,0	6,0	41,69	14,13	95,82
11	10,0	8,0	39,46	14,13	93,59
12	12,0	10,0	38,32	14,13	92,45
13	16,0	14,0	37,43	14,13	91,56
14	20,0	18,0	37,19	14,13	91,32
15	24,0	22,0	37,13	14,13	91,26

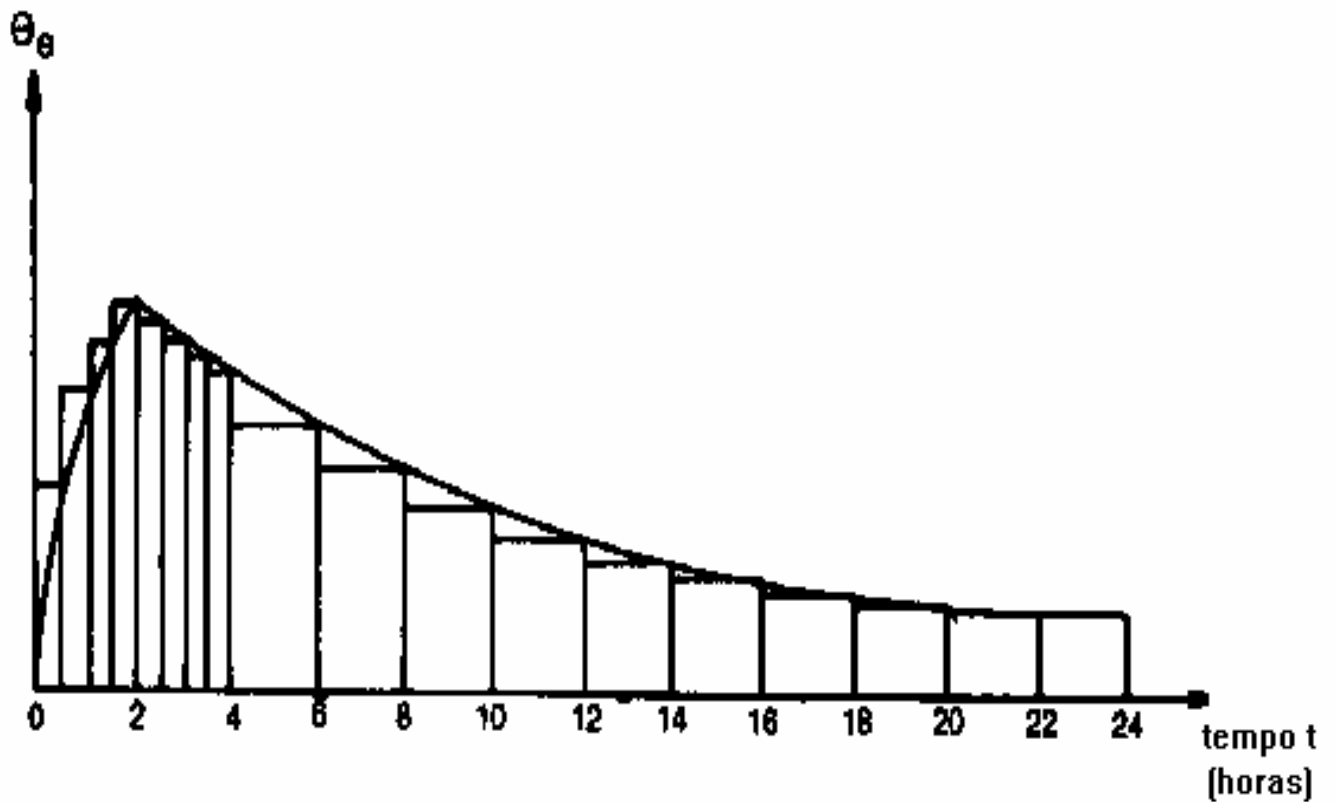


Figura C.1 - Histograma dos pontos da Tabela

Anexo D (normativo)

Exemplo de cálculo da temperatura para transformadores (Procedimento 2)

D-1 Transformadores com Dois Enrolamentos

Ver anexo C.

D-2 Transformadores com Três Enrolamentos

D-2.1 Dados gerais: transformador 500/138/13,8 kV

Resfriamento:	ONAN/ONAF
Elevação Média:	65 °C
Potência Nominal Primário:	300 MVA
Potência Nominal Secundário:	300 MVA
Potência Nominal Terciário:	100 MVA

Elevação de Temperatura:

Topo do óleo/ambiente:	45,3 °C
Ponto mais quente primário/óleo:	26,5 °C
Ponto mais quente secundário/óleo:	32,1 °C
Ponto mais quente terciário/óleo:	27,6 °C

Peso do tanque de óleo e acessórios:	98000 kg
Peso do núcleo e bobinas:	117000 kg
Volume de óleo:	93000 l
Peso total:	298700 kg
Perdas totais à plena carga:	965515 W
Perdas em vazio:	204975 W

Perdas Binárias:

$W_{12} =$	760540 W
$W_{13} =$	255356 W
$W_{23} =$	197118 W

Constante de tempo do óleo:	2,60 h
Constante de tempo do enrolamento:	0,08 h

Expoentes:

$m =$	0,8
$n =$	0,8

Condições de carregamento:

Temperatura ambiente:	30 °C
Carga da ponta (Kp):	1,2 p.u.
Carga inicial (Ki):	0,5 p.u.
Duração da ponta:	2 horas
Carga do terciário:	0,5 p.u.

Limites de temperatura:

Enrolamento:	130 °C
Óleo:	110 °C

D-2.2 De posse destes dados efetuou-se uma simulação para obtenção das temperaturas de operação do óleo e do ponto mais quente dos enrolamentos. Os resultados estão apresentados nas figuras a seguir:

D-2.3 Resultados:

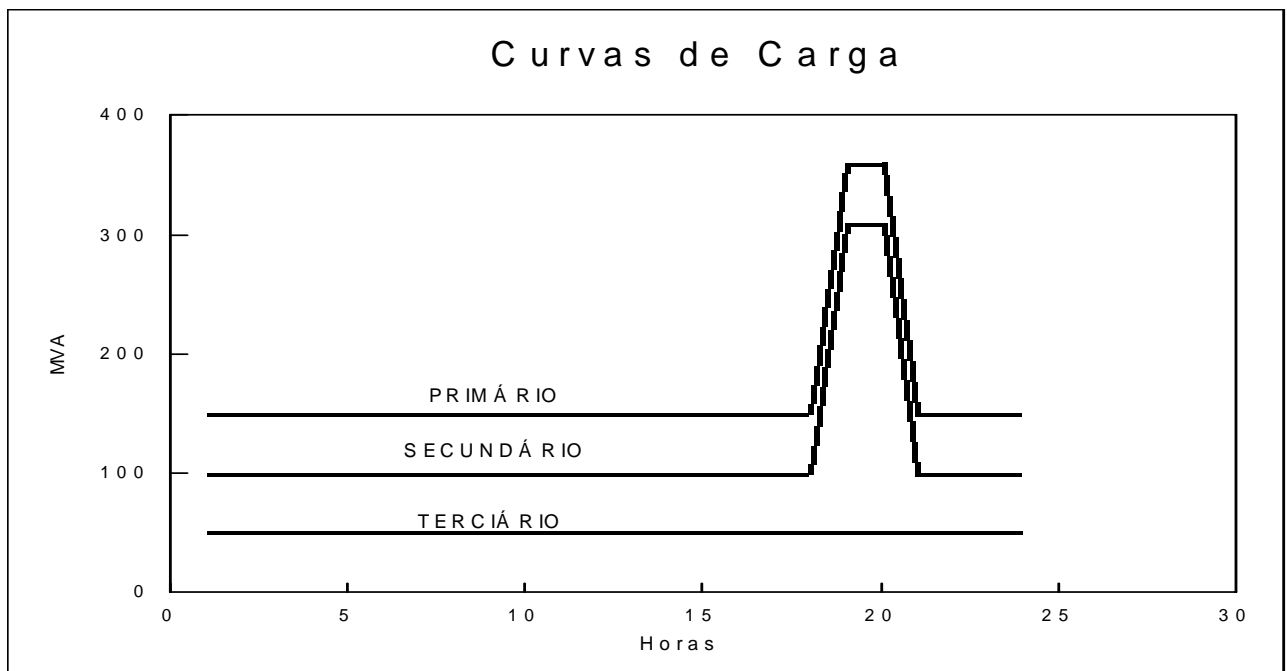


Figura D.2.1 - Curvas de carga

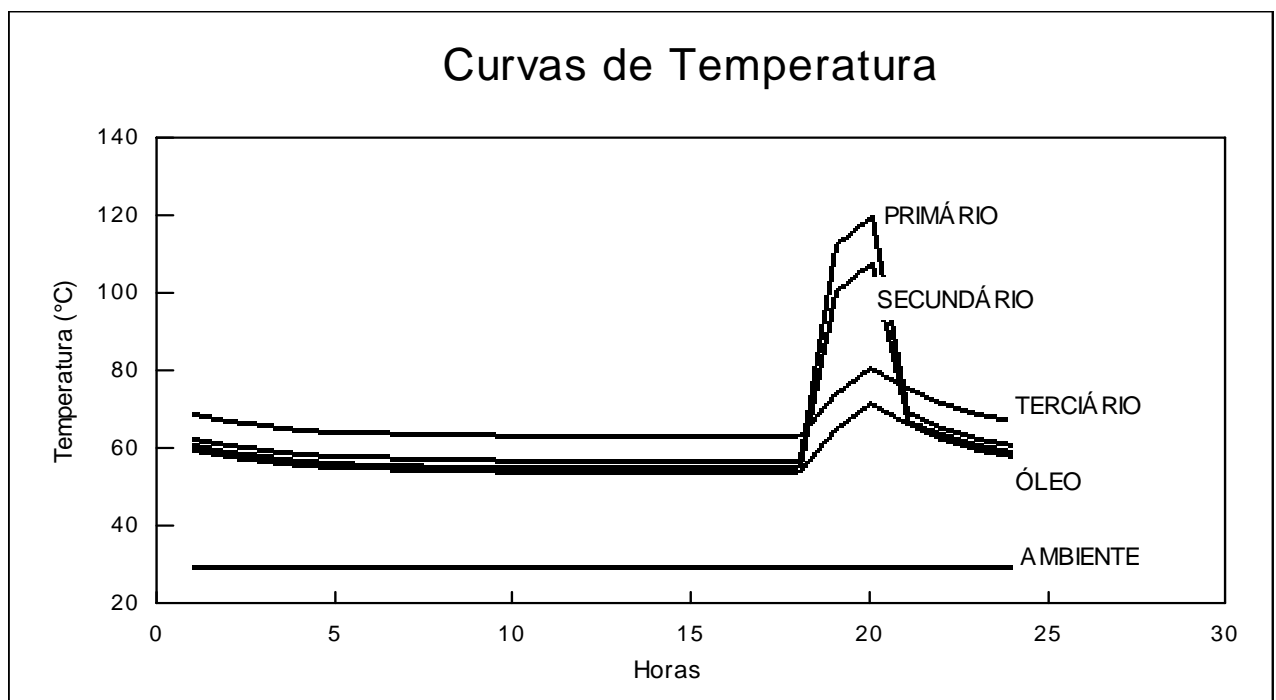


Figura D.2.2 - Curvas de temperatura

Conforme pode ser observado, os limites de temperatura estabelecidos para o exemplo foram respeitados.

Anexo E (normativo)

Formação de bolhas nos transformadores em operação

E-1 Fatores que podem ocasionar a formação de bolhas internas no transformador, durante o carregamento:

- supersaturação do óleo com gases (transformadores com colchão de N₂, quantidade de gases dissolvidos no óleo etc).
- vaporização da umidade adsorvida pela celulose.
- decomposição térmica da celulose.

E-2 No processo de formação de bolhas devem ser considerados:

- tipo de preservação do óleo isolante (selado ou aberto)
- teor de água na isolação.
- presença de gases dissolvidos no óleo isolante.
- condições de carregamento (perfil de carga).

E-3 Equilíbrio de forças

Para que a bolha se forme é necessário que a sua pressão interna seja superior à:

- tensão interfacial do óleo (0,2mmHg)
- pressão da coluna do óleo (0,67mmHg/cm de coluna de óleo).
- pressão na superfície de óleo (760 mmHg ao nível do mar, ou maior, dependendo do tipo da selagem).

Para efeito de cálculo, considera-se somente a força da pressão na superfície do óleo.

E-4 Lei de Henry

E-4.1 A concentração (C_i) de um gás " i " dissolvido no líquido é proporcional à pressão parcial daquele gás (P_i) sobre o líquido:

$$C_i = K P_i$$

onde:

$$K = e^{\frac{A_i}{T}}$$

Sendo:

T = temperatura em grau Kelvin

A_i = Constante que depende da combinação gás x líquido e pode ser positiva ou negativa.

C_i = em ppm/volume

P_i = em atm

K = Constante de Henry (Figura E-1)

E-4.2 Se, para uma temperatura constante, a pressão parcial do gás sobre o óleo é por alguma razão aumentada, haverá uma formação adicional de gases dissolvidos no líquido, para que uma nova condição de equilíbrio seja estabelecida. O mesmo ocorrerá, se a pressão do gás sobre o líquido for mantida constante e a temperatura se modificar de tal forma que a constante **K** aumente.

Por outro lado, para uma temperatura constante, se a pressão parcial do gás sobre o óleo é reduzida rapidamente, tal que o gás dissolvido não tenha tempo para se difundir (dispersar) para a superfície, poderá haver uma formação acelerada de gases livres e, conseqüente, "caminhos" de baixa rigidez dentro do transformador.

Em geral, os transformadores em operação contém vários gases dissolvidos no óleo. Eles se comportam independentemente e contribuem na formação de bolhas. O equilíbrio, se houver " n " gases no óleo, será alcançado se:

$$\sum_{i=1,n} c_i / k_i = \sum_{i=1,n} P_i$$

E-5 A pressão do vapor de água pode ser correlacionada com a concentração de umidade no papel-isolante, em função da temperatura, através do abaco de Piper (Figura E-2) ou pela seguinte equação:

$$T = 6\,996,7 / [22,454 + 1,4495 \ln W - \ln P]$$

onde,

T é a temperatura em Kelvin

W - perdas em porcentagem

P é a pressão em Torr

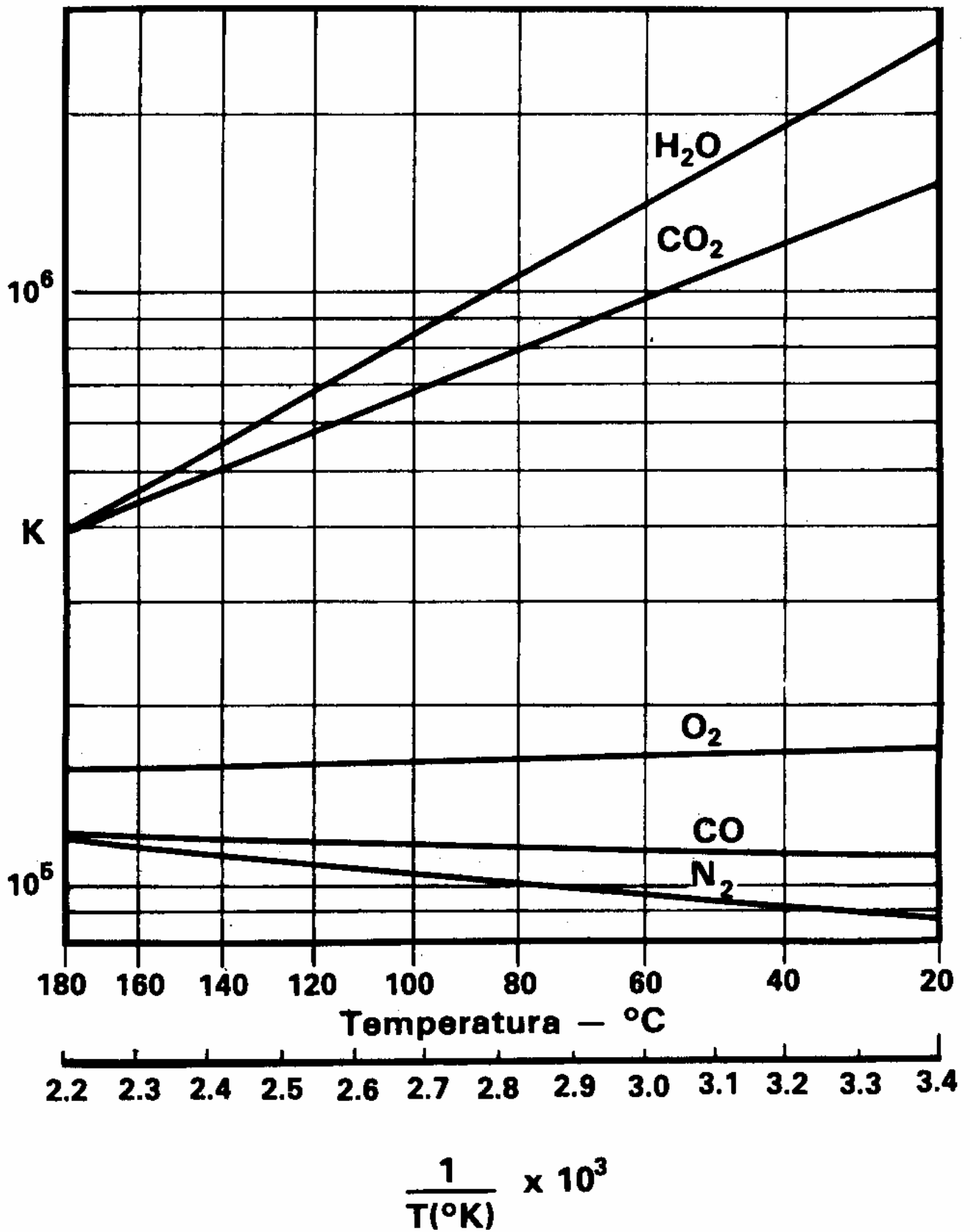


Figura E.1: Constante de Henry (K) para gases dissolvidos no óleo de transformadores em operação

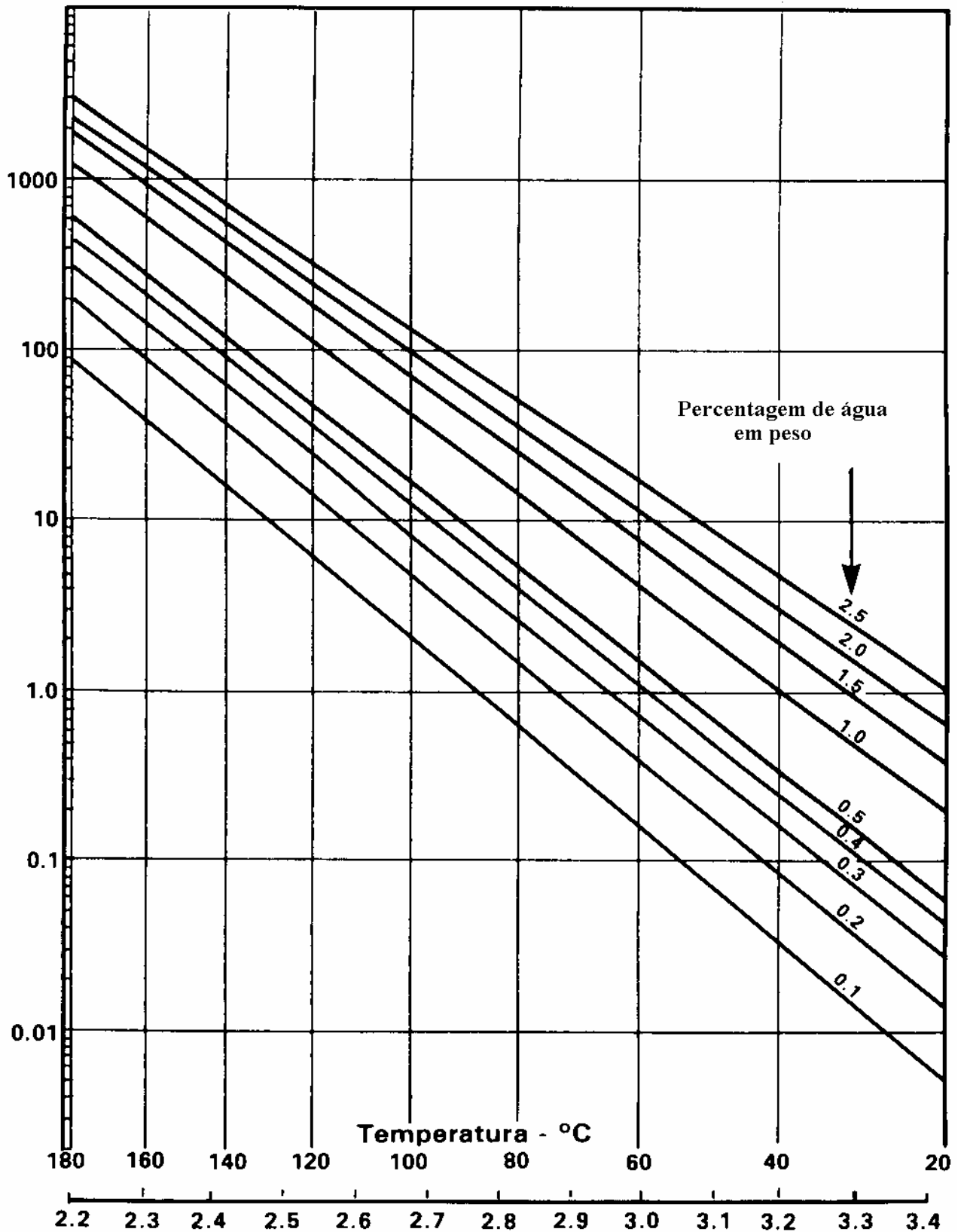


Figura E.2: Gráfico do equilíbrio entre a pressão do vapor de H₂O e a temperatura em função da umidade do papel Kraft.

E.6 Exemplo para rejeição de carga

E.6.1 Dados:

- Transformador selado com N₂
- Relação entre perdas de curto-circuito e a vazio = 4
- t_a = Temperatura ambiente = 25°C
- $\Delta\theta_a$ = Elevação do óleo sobre a ambiente = 4 °C
- $\Delta\theta_{e_0}$ = Elevação do enrolamento sobre o óleo = 30°C
- N₂ ocupa 8% do volume de óleo a 25 °C
- A pressão de N₂ sobre o óleo é de 1,5 atm
- A umidade do papel é 0,5% por peso

E.6.2 Após a rejeição de carga:

$$t_a = 25 \text{ °C}$$

$$\Delta\theta_a = 37 \text{ °C}$$

$$\Delta\theta_{e_0} = 0 \text{ °C}$$

A concentração de 0,5% de água no isolamento desenvolve uma pressão de 14,75 mm Hg.

$$p_{H_2O} = 14,75 \text{ Hg}$$

$$p_{N_2} = p - p_{H_2O}$$

$$p_{N_2} = 1\,140 - 14,75 = 1\,125,25 \text{ mm Hg ou } 1,48 \text{ atm}$$

Pela Lei de Henry,

$$K_{N_2} (100 \text{ °C}) = 96\,288 \text{ ppm/vol/atm}$$

$$C_{N_2} = K_{N_2} \cdot P_{N_2}$$

$$C_{N_2} = 96288 \times 1,48 = 141\,543 \text{ ppm/vol}$$

e, no equilíbrio temos:

$$pE_{N_2} + pE_{H_2O} = p_{N_2} + p_{H_2O}$$

Após o desligamento da carga, a dissipação do transformador é de somente 25%, e a temperatura do enrolamento estará em equilíbrio térmico com a temperatura do óleo, devido a sua constante térmica de 5 minutos.

Supondo que as concentrações de água e nitrogênio sejam constantes no óleo, temos:

- redução de 8 °C na temperatura do óleo acarreta uma variação de 0,64% no volume e um acréscimo de 7,36% no volume de gás.

Supondo o comportamento de um gás ideal, o novo equilíbrio ocorrerá a uma pressão de 1,25 atm ou 953,65 mm Hg.

A pressão de água para a concentração de 0,5% na temperatura de 62 °C é de:

$$P_{\text{H}_2\text{O} (62\text{ }^\circ\text{C})} = 1,76 \text{ mm Hg}$$

e, pela Lei de Henry,

$$K_{\text{N}_2 (62\text{ }^\circ\text{C})} = 91\,639 \text{ ppm/vol/atm}$$

$$P_{\text{EN}_2} = C_{\text{N}_2} / K_{\text{N}_2 (62\text{ }^\circ\text{C})} = 1,544 \text{ atm} = 1\,172,9 \text{ mm Hg}$$

$$P_E = P_{\text{EN}_2} + P_{\text{EH}_2\text{O}} = 1\,175,7 \text{ mm Hg}$$

Esta pressão supera a pressão de equilíbrio de 953,65 mm Hg, ocorrendo a formação de bolhas.

(Ref.: McNutt, W. J.; Rouse, T. O.; Kaufmann, G. H. - "Mathematical Modelling of Bubble Evolution in Transformers" - IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol PAS-104, nº 2, 02/1985.)

Anexo F (informativo)

Bibliografia

GCOI-SCM-019 - Procedimento, Técnicas e Critérios de Recepção e Manutenção de Transformadores de Potência

GCPS - CTST - GTCP 01/89 - Critérios e Procedimentos para Determinação de Limites de Carregamento de Unidades Transformadoras de 2 Enrolamentos

McNutt, W. J.; Rouse, T. O., Kaufmann, G. H. - "Mathematical Modelling of Bubble Evolution in Transformers"
- IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol PAS-104, nº 2, 02/1985
