

Assunto: **Sobrecarga em Transformadores de Potência.**

A Agência, após a conclusão dos trabalhos de consultoria de vários especialistas em projeto, fabricação, operação e manutenção de transformadores de potência, identificou um conjunto de procedimentos e diretrizes para situações de operação em sobrecarga com perda de vida útil adicional, norteador das atividades dos agentes detentores destas instalações. Após várias interações e troca de informações com estes especialistas, e com base principalmente na Norma Brasileira NBR 5.416, de julho 1997, foram estabelecidas inúmeras considerações julgadas suficientes para a implementação da resolução que deverá, caso aprovada pela Diretoria Colegiada, ser submetida à consulta e, posteriormente, implementada pelo setor elétrico brasileiro.

2. Os aspectos relevantes desta Nota Técnica têm como foco contemplar, em um intervalo de tempo do ciclo de carga, a relação entre a perda de vida da isolação dos transformadores na condição de carga atual e a perda de vida verificada na condição de carga com temperatura limite do ponto mais quente do enrolamento. As perdas de vida são calculadas conforme a "teoria de Arrhenius", resultando em um "fator Vs" .

3. O outro fator considerado, "Vf", refere-se ao aumento da taxa de falha em transformadores submetidos a sobrecarga pelo que alguns aspectos que justificaram a adoção da elevação da taxa de falha, em sobrecarga, proporcional ao "fator Vs", são a seguir destacados:

- O "fator Vf" está associado ao aumento do risco de falha de um transformador operando em sobrecarga. Nestas condições é assumida que a taxa de falhas dos transformadores aumenta de acordo com uma função exponencial, dependente da temperatura do ponto mais quente do enrolamento do transformador. A variação da temperatura do ponto mais quente do enrolamento é caracterizada por uma função exponencial.

- Deste modo, em sobrecarga, a temperatura do enrolamento aumenta também exponencialmente. Adicionalmente, a probabilidade de um transformador falhar é uma função estatística condicional, isto é, ela reflete a falha de acordo com a condição de operação existente.

- Assim, por exemplo, a taxa de falhas determinada na estatística, correspondente ao valor médio **TXf=1,73%**, conforme Relatório Técnico do GCOI - RT.SCM.CDE.026 "Análise Estatística de Desempenho de Transformadores - 1998", é aquela encontrada para a condição de operação atual do sistema elétrico, refletindo também a característica de sobrecarga dos seus transformadores.

(Fls. 2 da Nota Técnica nº 007/2000-SRT/ANEEL, de 15/03/2000)

- Admitindo-se que as condições de operação anteriores do sistema sejam alteradas, de forma que o transformador passe a ter perda de vida útil adicional por sobrecarga, representada por um fator multiplicador "Vs", é razoável supor-se (de maneira conservativa) que a nova taxa de falhas, sendo uma função condicional, resulte do produto "Vs" vezes TXf.

- Naturalmente esta hipótese admite que o estado dos equipamentos não tenha sido alterado em relação à condição de operação original com falhas TXf e que as falhas estejam associadas puramente à aspectos térmicos, magnéticos e mecânicos (dependentes da corrente). Assim, a resolução proposta é inovadora e visa motivar o conhecimento do estado operacional dos transformadores.

RESUMO

Contando com a contribuição basilar e extremamente importante dos Engenheiros Miguel Carlos Medina Pena, da CHESF, e José Carlos Mendes da ABB, este trabalho apresenta um levantamento do estado-da-arte em sobrecarga de transformadores de potência, visando subsidiar a elaboração da resolução da ANEEL sobre encargos por perda adicional de vida útil e riscos de falhas. Aborda os efeitos, as conseqüências e os respectivos mecanismos de degradação e de falha motivados pelo ciclo de sobrecarga aplicado ao transformador.

1. INTRODUÇÃO

Quando um ciclo de carga é aplicado ao transformador de potência, as temperaturas do topo do óleo mineral isolante e do ponto mais quente do enrolamento crescem e decrescem exponencialmente. O acréscimo e decréscimo exponencial da temperatura do óleo e do enrolamento dependem de vários fatores, tais como:

- Corrente aplicada ao enrolamento;
- Temperatura ambiente;
- Características de projeto:
 - elevação de temperatura do ponto mais quente acima do ambiente;
 - elevação de temperatura do topo do óleo em relação ao ambiente;
 - constante de tempo do topo do óleo;
 - constante de tempo do ponto mais quente;
 - relação entre perda no cobre e perdas no ferro;
 - classe limite de elevação de temperatura (55 ou 65°C);
 - tipo do sistema de resfriamento;
- Sistemática de manutenção no sentido de manter o bom desempenho dos sistemas de resfriamentos e boas características do óleo isolante.

Outros fatores, também muito importantes, que ocorrem quando é aplicado um ciclo de sobrecarga ao transformador, são as temperaturas elevadas dos enrolamentos ou as variações bruscas do ciclo de sobrecarga, que podem provocar a formação de bolhas no óleo aumentando o riscos de falhas do transformador.

Além destes fatores, a elevação da corrente de carga em um transformador provoca o aumento proporcional da intensidade de campo magnético interno a ele associado, acarretando a elevação das correntes induzidas em estruturas metálicas internas. As perdas induzidas são dependentes da intensidade do quadrado da corrente de carga, podendo provocar elevações locais excessivas de temperatura e, conseqüentemente, deteriorar o material isolante de celulose ou o óleo mineral adjacente. Desprezar ou minimizar estes fenômenos e suas conseqüências compromete a vida útil residual da isolação e eleva os riscos de falhas do transformador.

2. FATORES INFLUENTES NA PERDA DE VIDA UTIL

A parte ativa de um transformador de potência que é composta pelo núcleo e enrolamentos, é constituída por materiais metálicos e isolantes.

Em condições normais e quando comparado com os materiais metálicos, os materiais isolantes são os que possuem menor tempo de vida útil. Daí, podemos concluir que, em condições normais de envelhecimento ao longo dos anos, a vida útil do transformador é função dos materiais isolantes. A maioria dos materiais isolantes utilizados em transformadores é fabricada a partir da celulose. Estes materiais, principalmente o papel *Kraft* normal ou *papel termicamente estabilizado*, são degradados ao longo do tempo. O papel é constituído de fibra de celulose, que é extraído de alguma fonte de origem vegetal, normalmente da madeira.

A fibra de celulose consiste de um conjunto de moléculas de celulose de diferentes tamanhos, colocadas lado a lado. Por sua vez a celulose é um polímero linear de moléculas de glicose (ver Figura 1) na qual elas estão conectadas através de uma ligação glicosídica. O tamanho das moléculas de celulose é medido pelo grau de polimerização (GP), ou seja, é a média do número de unidades de glicose pelo de moléculas de celulose [1]. O mecanismo de degradação da celulose depende das condições a que está sujeita. Entretanto existem três principais agentes que promovem e aceleram a degradação, quais sejam: a temperatura elevada, o oxigênio (agentes oxidantes) e a umidade.

Em síntese, se quisermos prolongar a vida útil do material isolante e por conseguinte a do transformador, teremos que buscar meios de minimizar a contribuição desses três agentes (Figura 1-A).

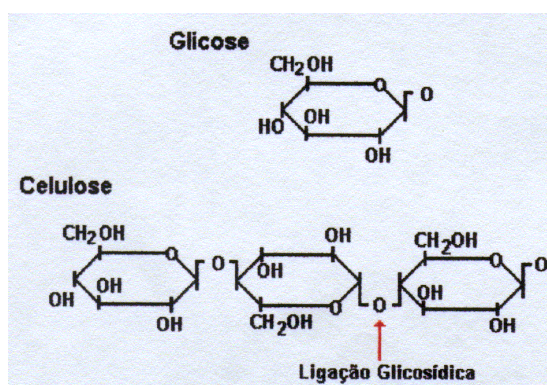


Figura 1 – Fórmula estrutural da glicose e celulose

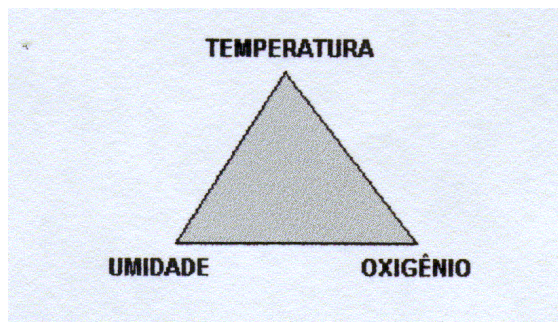


Figura 1 A– Agentes de degradação da Celulose

Em conseqüência, além do aumento da vida útil do transformador, serão reduzidos os riscos de falhas e o tempo de manutenção para secagem e tratamento do óleo mineral isolante, assim minimizando o tempo de indisponibilidade para operação e os custos de manutenção.

Vários fatores e características, que vão desde as fases de projeto, fabricação, ensaios de fábrica, transporte, armazenamento, montagem, operação e manutenção, podem contribuir para acelerar ou minimizar os efeitos da umidade, temperatura e teor de oxigênio na degradação do papel.

A contribuição do teor de umidade e do oxigênio na aceleração do envelhecimento da celulose está fortemente ligada ao projeto do sistema de preservação e às condições de manutenção do equipamento, enquanto o envelhecimento pela elevação da temperatura está diretamente associada ao ciclo de carregamento do transformador.

3. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA VIDA ÚTIL

O aquecimento da celulose, mesmo na ausência de agentes oxidantes e umidade, tende a quebrar a ligação glicosídica e abrir o anel de glicose. Essa reação produz moléculas de glicose livres, umidade, monóxido e dióxido de carbono, além de ácidos orgânicos (ver Figura 2).

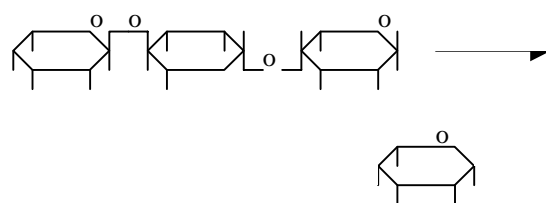


Figura 2 – Degradação térmica

A elevação da temperatura provoca danos irreparáveis no isolamento do transformador, tendo em vista o caráter irreversível das reações químicas ocorridas. Estas reações vão degradar as características físicas do papel isolante, enfraquecendo a rigidez dielétrica e, conseqüentemente, diminuindo o tempo de vida útil do transformador. O efeito pode ser aferido através da medição do grau de polimerização (DP) do papel. Estudos publicados consideram para o papel novo um número da ordem de 1.200 como referência para o grau de polimerização. Quando o grau de polimerização atinge valores da ordem de 150-200 o transformador é considerado em final de vida útil.

(Fls. 5 da Nota Técnica nº 007/2000-SRT/ANEEL, de 15/03/2000)

Os efeitos da temperatura de operação na isolação, ao longo do tempo, pode ser medida de várias maneiras. A Norma Brasileira NBR 5.416, de 1997, segue uma adaptação da "teoria de Arrhenius", segundo a qual o logaritmo da vida da isolação é uma função do inverso da temperatura absoluta, expressa na seguinte fórmula:

$$\text{LOG VIDA(horas)} = A + B / T$$

onde:

T = temperatura absoluta em graus Kelvin ($\theta_e + 273$)

θ_e = temperatura do ponto mais quente dos enrolamentos em °C

A e B = constantes da curva de expectativa de vida

A elevação da temperatura do transformador pode decorrer de vários fatores, por isso é importante manter o sistema de resfriamento (ventiladores, bombas de circulação forçada de óleo, radiadores, aerotermos) sempre em bom estado, com uma sistemática de manutenção adequada.

Quanto ao controle da temperatura do óleo e dos enrolamentos, é fundamental que estes indicadores estejam aferidos e ajustados para fornecer uma indicação precisa e possibilitar o comando correto do sistema de resfriamento, além de evitar o envio indevido de alarme e/ou desligamento, dependendo da filosofia de proteção adotada.

4. FATORES INFLUENTES NA FORMAÇÃO DE BOLHAS

A formação de bolhas em sistemas papel-óleo é extremamente preocupante, tendo em vista a baixa rigidez dielétrica da bolha e os elevados riscos de falha elétrica interna do transformador. Nas últimas três décadas tem sido grande a preocupação da comunidade científica internacional com a formação de bolhas em transformadores, quando os mesmos são submetidos a ciclos de sobrecarga. O crescente interesse pelo assunto tem motivado a realização de encontros técnicos e seminários internacionais, publicações de artigos técnicos [2, 3, 4, 5, 6, 7], normas [8] e pesquisa [9]. A pesquisa realizada pelo Grupo 9 do Sub-comitê 12 da CIGRÉ, envolvendo 15 empresas de 10 países (Áustria, Canadá, Finlândia, França, Alemanha Ocidental, Japão, Polônia, Suécia e Estados Unidos) registra que 60% das empresas consultadas consideram que, durante a sobrecarga, a formação de bolhas é mais preocupante do que a perda de vida útil por degradação da celulose, contra 20% que considera a perda de vida por degradação da celulose mais importante e os outros 20% que consideram de igual importância. Na mesma pesquisa, nove empresas responderam que o ajuste do limite da temperatura do ponto mais quente é prioritariamente baseado no risco de formação de bolhas. Trabalhos experimentais publicados apresentam resultados de formação de bolhas de gás livre em isolamentos relativamente secos (0,5% de umidade ou menos), expostos à temperatura na faixa de 132 °C a 150 °C. Os riscos de formação de bolhas se tornam maiores se a isolação do transformador apresentar teor elevado de umidade interna, podendo evoluir a temperaturas mais baixas (90 °C para 3% de umidade) [10].

(Fls. 6 da Nota Técnica nº 007/2000-SRT/ANEEL, de 15/03/2000)

Desta forma, os riscos de formação de bolhas internas no transformador estão associados a vários fatores que podem ocasionar esta formação durante a sobrecarga, tais como:

- nível de saturação do óleo com gases (quantidade de gases dispersos no óleo);
- sistema de preservação;
- teor de umidade contida na celulose;
- variações bruscas da pressão atmosférica;
- temperatura ambiente;
- curva de sobrecarga.

Em outros casos, o sobrecarregamento de um transformador, cuja isolação apresenta teor elevado de umidade interna, resulta na elevação da concentração de água no óleo através de processo de difusão isolação-óleo, provocando a redução da rigidez dielétrica do óleo e podendo estabelecer condições de falhas elétricas internas [11].

5. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA FORMAÇÃO DE BOLHAS

O princípio de formação térmica de bolhas se desenvolve quando a pressão interna, do gás dentro da bolha, supera a pressão estática deste ponto.

A variação da temperatura do óleo e do ponto mais quente do transformador, durante a aplicação de um ciclo de sobrecarga, pode provocar três mecanismos de suportabilidade dos materiais que o compõem, quais sejam:.

1. Temperatura próxima a 130°C (depende do teor de umidade da isolação);
2. Elevações bruscas de temperaturas
3. Reduções bruscas de temperaturas

6. RISCOS E CONSEQÜÊNCIAS DA SOBRECARGA NOS ACESSÓRIOS

Além dos aspectos e conseqüências já focalizadas, a sobrecarga provocada nos componentes acessórios, tais como: buchas, cabos, terminais, transformadores de corrente, comutadores de derivações sem tensão e comutadores de derivações em carga, também provoca elevação dos riscos de falha, aumento dos custos da manutenção e maior indisponibilidade do transformador.

Nestes acessórios aumenta o risco de falha devido ao aquecimento provocado pela elevação da corrente de carga, que pode atingir temperaturas acima do limite de suportabilidade dos materiais que os compõem. Para o caso específico dos comutadores de derivações em carga, a elevação da corrente acima do nominal provoca, além dos riscos de falhas já citados, o aumento do consumo dos contatos, acelera a degradação do

(Fls. 7 da Nota Técnica nº 007/2000-SRT/ANEEL, de 15/03/2000)

óleo, devido à carbonização e saturação do filtro (quando existente), exigindo um número maior de paradas e, conseqüentemente, aumentando os custos de manutenção e o tempo de indisponibilidade do transformador.

7. CONCLUSÕES

Diante do exposto, torna-se evidente a necessidade da regulamentação de compensação, quando o transformador de potência é submetido à sobrecarga, tendo em vista a perda adicional de vida útil e a elevação dos riscos de falha (perda de confiabilidade).

Considerando-se que a perda adicional de vida útil do transformador, provocada pela elevação de temperatura, conforme a Norma Brasileira NBR-5.416, de 1997, segue uma adaptação da "teoria de Arrhenius", os períodos submetidos à sobrecarga, em condições de emergência, serão transformados em receita adicional, utilizando-se o "fator Vs" apresentado no Anexo 1 da Resolução. Para compensar o aumento dos riscos de falhas de um transformador operando em sobrecarga, será utilizado o fator multiplicador "Vf", apresentado no Anexo 1 da Resolução, definido a partir do valor médio da taxa de falha típica do Sistema Elétrico Brasileiro, medida pela CDE -Comissão de Desempenho de Equipamentos e Instalações e corrigida com o "fator Vs" obtido à partir da "teoria de Arrhenius".

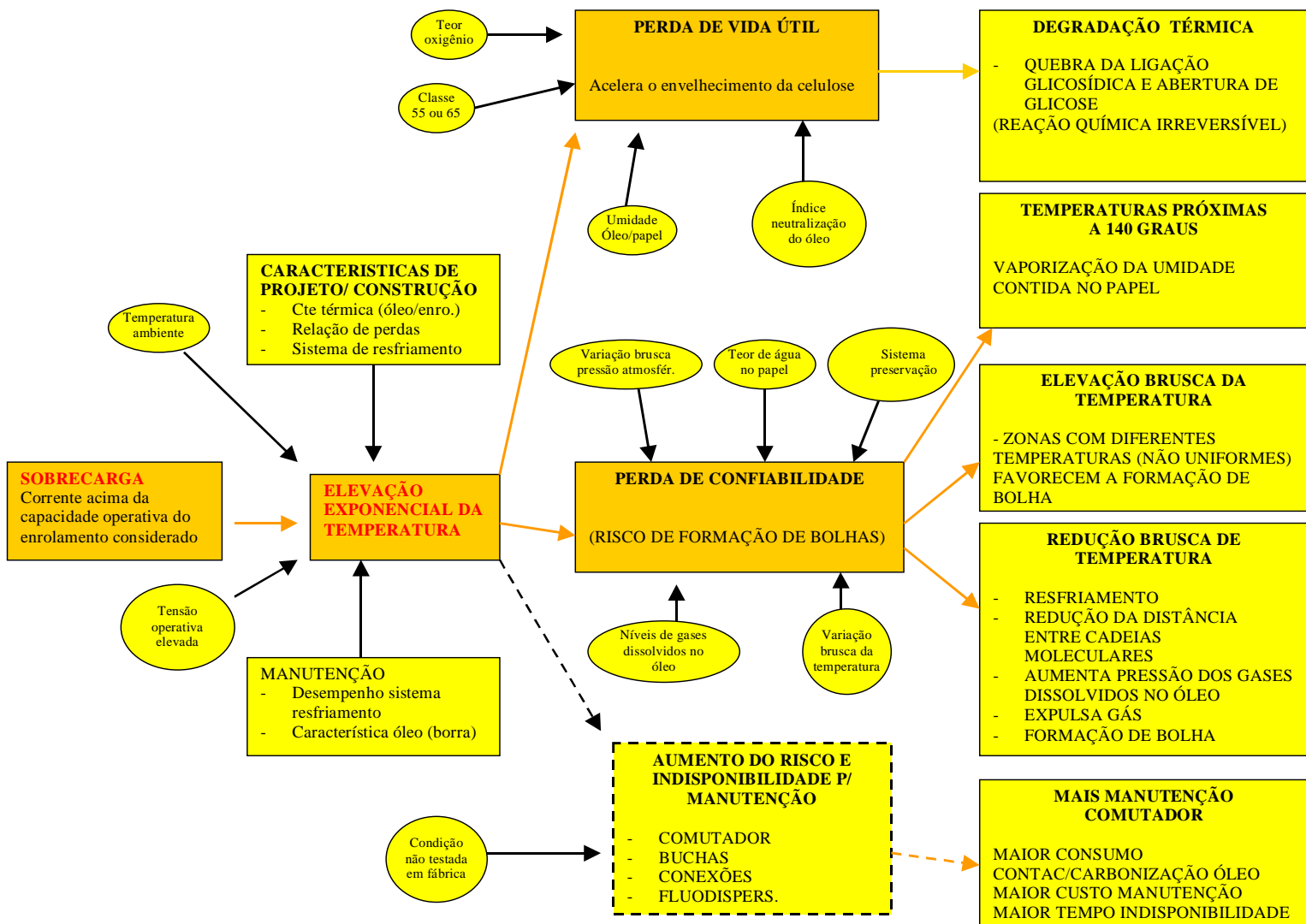
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Unsworth, J. & Mitcheli, F., "Degradation Of Electrical Insulating Paper Monitored With High Performance Liquid Chromatography". IEEE Transactions on Electrical Insulation , vol. 25 NO 4 August 1990.
- [2] Heinrichs,F.W. et alli. "The Effect of Gassing During Overloads on the Impulse Strenght of Transformers Insulation". Paper A79434-2 presented at the 1979 IEEE Summer Power Meeting in Vancouver, B. C. , Canada.
- [3] Heinrichs, F. W. . "Bubble Formation in Power Transformer Windings at Overioad Temperature ". IEEE Transactions , Vol. PAS-98. Sep/Oct-1 979.
- [4] McNutt, W. J. et alli. "Short Time Failure Mode Considerations Associatted Whith PoWer Transformer Overloading". IEEE Transactions , May/Jun-1980.
- [5] McNutt, W. J. "Mathematical Modelling of Bubble Evolution in Transformers". IEEE Transactions , reb-1985.
- [6] General Electric Co. "Bubble Formation in Transformers". EPRI Electric Power esearch Institute . Aug-1987
- [7] McNutt, W. J. "A Refined Mathematical Model for Prediction of Bubble Evolution in Transformers". IEEE Winter Power Meeting in New York. Feb-1988.

(Fls .8 da Nota Técnica nº 007/2000-SRT/ANEEL, de 15/03/2000)

- [8] ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. "Aplicação de Cargas em transformadores de Potência - Procedimento". NBR 5416, Jul-1997.
- [9] CIGRÉ, G- 09, SC 12. "A Survey of Facts and Opinions on The Maximum Safe operating Temperature of Power Transformers under Emergency Conditions". Revista Electra Nº 129.
- [10] Bezerra, Luiz Roberto. "Carregamento em Unidades Transformadoras: Aspectos Teóricos, Metodológicos e Computacionais". Dissertação de Mestrado apresentado à COPPE/UFRJ, abril/1991.
- [11] Mendes, José Carlos. "Transformadores de Potência em Alta Tensão Sobre-carregamento e Aspectos Relevantes em Projeto, Análise de Estado e Monitoração em Tempo Real". Nota Técnica, dezembro/1999.

SOBRECARGA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA



ANEXO

Determinação do encargo por sobrecarga em transformadores

Caso Exemplo

1. Geral

São apresentados, a seguir, os resultados das simulações para o cálculo do fator de compensação por sobrecarga "S" associado aos aspectos de perda de vida útil adicional do transformador e ao aumento do risco de falha.

2. Carregamento do Transformador

O transformador objeto da simulação tem 100 MVA de potência nominal máxima (ONAF1) e os seus enrolamentos são isolados com papel cuja elevação média de temperatura limite é 55°C . A curva de carga, no ciclo de 24h, de interesse da simulação é apresentada na figura 1.

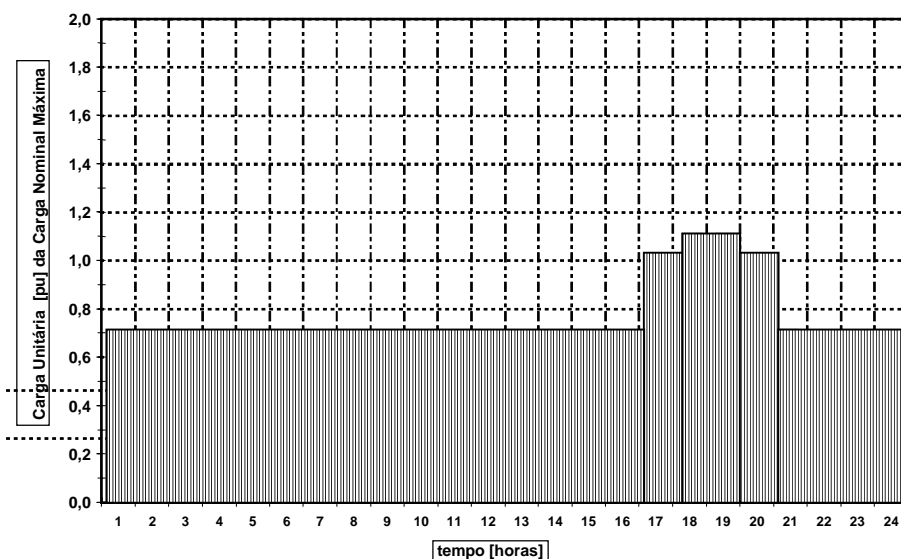


Figura 1 - Ciclo de Carga

A este carregamento corresponde, em cada intervalo de tempo ($\Delta t_i=15$ min) do ciclo de carga, uma Temperatura do Ponto mais Quente Θ_{es} [°C] para transformador com enrolamentos isolados com papel de classe térmica 55°C.

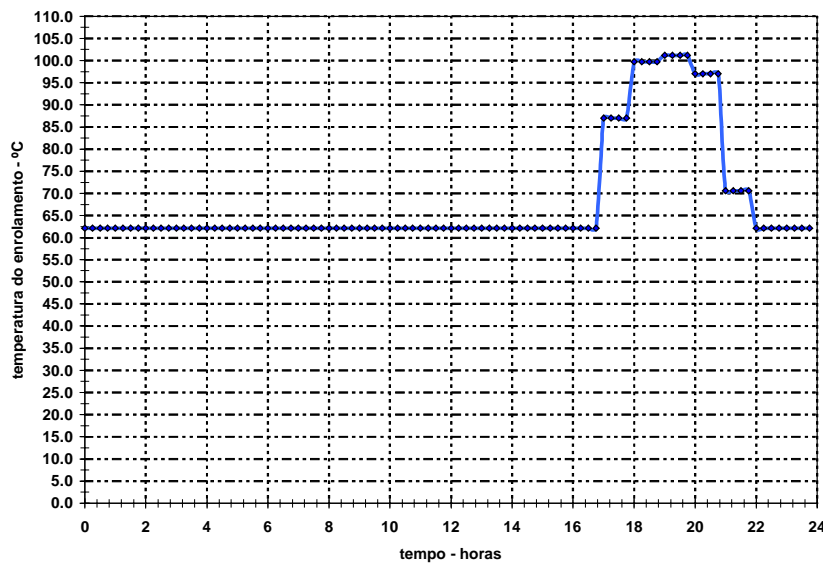


Figura 2 – Θ_{es} no ciclo de carga diário

A temperatura limite do ponto mais quente dos enrolamentos do transformador é estabelecida a partir da soma algébrica da temperatura média ambiente (média anual, 30° C) e da elevação limite máxima de temperatura entre o enrolamento (ponto mais quente) e a temperatura ambiente. Esta temperatura limite reflete, de maneira conservativa ao utilizar a temperatura ambiente média, o estado de operação de referência a partir do qual é considerado o estado de sobrecarregamento do transformador e a consequente valorização do fator multiplicador V_s associado à perda de vida adicional.

3. Ciclo de Carga e Fator de Sobrecarga "S"

A taxa de falha (TXf) de falhas [%/(transf.x ano)] de transformador de potência do sistema Elétrico Brasileiro (GCOI), utilizada no exemplo, é aquela definida no Anexo I da Resolução, cujo valor é **TXf=1,73%**.

O fator multiplicador V_{fs} determinado em um intervalo de tempo do ciclo de carga, pela relação entre a perda de vida da isolação do transformador na condição de carga atual e a perda de vida verificada na condição de carga com temperatura limite do ponto mais quente do enrolamento, será:

$$V_{fs} = 10^{B \cdot \left(\frac{1}{T_{en}} - \frac{1}{T_{es}} \right)} \quad (E6)$$

onde:

- V_{fs}** fator multiplicador associado à perda de vida adicional;
- B:** constante da curva de expectativa de vida da isolação de papel
B=6972.15 °K;
- Θ_{em}** temperatura (°C) limite do ponto mais quente dos enrolamentos do transformador:
para transformador de classe 55°C: **$\Theta_{en} = 30+55+10=95^{\circ}\text{C}$**
para transformador de classe 65°C: **$\Theta_{en} = 30+65+15=110^{\circ}\text{C}$**
- Θ_{es} :** temperatura (°C) do ponto mais quente dos enrolamentos do transformador no intervalo de tempo do ciclo de carga.

Sendo as temperaturas absolutas: $T_{en}=273 + \Theta_{en}$ [°K] limite; $T_{es}=273 + \Theta_{es}$ [°K] em carga

A tabela 1, a seguir mostra o cálculo do “fator Vs” para o ciclo de carga dado.

TClasse	classe térmica do transformador (55 °C ou 65 °C)	°C	55	
NAVida	expectativa de vida útil normal	ano	40	
TXf	probabilidade de falha de transformador obtido do Sistema Elétrico (GCOI, NOS)	% / (transf. x ano)	1.73000	
Pf	fator multiplicador que permite o ajuste para a penalização estabelecida	pu	1.00000	
ΔΘs	elevação adicional de temperatura do ponto mais quente	°C	81.320	
Θen	temperatura limite do ponto mais quente dos enrolamentos do transformador	°C	95.000	
A	constante da curva de expectativa de vida da isolamento do transformador	pu	-14.133	
B	constante da curva de expectativa de vida da isolamento do transformador	pu	6972.15	
PV%n24h	perda de vida útil normal diária	%	0.006849	
Vs	fator multiplicador da perda de vida na sobrecarga	pu	1.0000	Fator Multiplicador Associado à Sobrecarga em um ciclo de Carga S [pu]
Pfc	probabilidade de falha corrigida	% / (transf. x ano)	1.730E+00	
Lamb	taxa de falha	1/hora	1.992E-06	
MTBF	tempo médio entre falhas	ano	57.30	
Pf40a	probabilidade de falhar em 40anos	%	50.24	
				1.73719

Tpi - Hora Inicial Período	TPf - Hora Final do Período	Temperatura do Enrolamento Tenr [grC]	Fator Multiplicador Perda de Vida Adicional, Vs [pu]	Fator Multiplicador Carga no Risco Falha, Vsf [pu]	Fator Multiplicador Aumento Risco Falha, Vf [pu]	Fator Multiplicador para Sobrecarga S [pu]	Numerador Si'DTI [pu*hora]
0.00	0.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
0.25	0.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
0.50	0.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
0.75	1.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
1.00	1.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
1.25	1.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
1.50	1.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
1.75	2.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
2.00	2.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
2.25	2.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
2.50	2.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
2.75	3.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
3.00	3.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
3.25	3.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
3.50	3.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
3.75	4.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
4.00	4.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
4.25	4.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
4.50	4.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
4.75	5.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
5.00	5.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
5.25	5.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
5.50	5.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
5.75	6.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
6.00	6.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
6.25	6.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
6.50	6.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
6.75	7.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
7.00	7.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
7.25	7.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
7.50	7.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
7.75	8.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
8.00	8.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
8.25	8.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
8.50	8.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
8.75	9.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
9.00	9.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
9.25	9.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
9.50	9.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
9.75	10.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
10.00	10.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
10.25	10.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
10.50	10.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
10.75	11.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
11.00	11.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
11.25	11.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
11.50	11.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
11.75	12.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
12.00	12.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
12.25	12.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
12.50	12.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
12.75	13.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
13.00	13.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
13.25	13.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
13.50	13.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
13.75	14.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
14.00	14.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
14.25	14.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
14.50	14.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
14.75	15.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
15.00	15.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
15.25	15.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
15.50	15.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
15.75	16.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
16.00	16.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
16.25	16.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
16.50	16.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859

Tabela 1 - Ciclo de Carga e “S” Equivalente

Tpi - Hora Inicial Período	TPf - Hora Final do Período	Temperatura do Enrolamento Tenr [grC]	Fator Multiplicador Perda de Vida Adicional, Vs [pu]	Fator Multiplicador Carga no Risco Falha, Vsf [pu]	Fator Multiplicador Aumento Risco Falha, Vf [pu]	Fator Multiplicador para Sobrecarga S [pu]	Numerador Si*DTI [pu*hora]
16.75	17.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
17.00	17.25	87.00	2.0439994	0.3792944	1.0000	2.0439994	0.51100
17.25	17.50	87.00	2.0439994	0.3792944	1.0000	2.0439994	0.51100
17.50	17.75	87.00	2.0439994	0.3792944	1.0000	2.0439994	0.51100
17.75	18.00	87.00	2.0439994	0.3792944	1.0000	2.0439994	0.51100
18.00	18.25	99.70	9.3417231	1.7334953	1.4015	13.0920163	3.27300
18.25	18.50	99.70	9.3417231	1.7334953	1.4015	13.0920163	3.27300
18.50	18.75	99.70	9.3417231	1.7334953	1.4015	13.0920163	3.27300
18.75	19.00	99.70	9.3417231	1.7334953	1.4015	13.0920163	3.27300
19.00	19.25	101.20	11.1023653	2.0602086	1.5242	16.9221019	4.23053
19.25	19.50	101.20	11.1023653	2.0602086	1.5242	16.9221019	4.23053
19.50	19.75	101.20	11.1023653	2.0602086	1.5242	16.9221019	4.23053
19.75	20.00	101.20	11.1023653	2.0602086	1.5242	16.9221019	4.23053
20.00	20.25	97.00	6.8220587	1.2659342	1.1695	7.9782184	1.99455
20.25	20.50	97.00	6.8220587	1.2659342	1.1695	7.9782184	1.99455
20.50	20.75	97.00	6.8220587	1.2659342	1.1695	7.9782184	1.99455
20.75	21.00	97.00	6.8220587	1.2659342	1.1695	7.9782184	1.99455
21.00	21.25	70.60	0.2432716	0.0451427	1.0000	0.2432716	0.06082
21.25	21.50	70.60	0.2432716	0.0451427	1.0000	0.2432716	0.06082
21.50	21.75	70.60	0.2432716	0.0451427	1.0000	0.2432716	0.06082
21.75	22.00	70.60	0.2432716	0.0451427	1.0000	0.2432716	0.06082
22.00	22.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
22.25	22.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
22.50	22.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
22.75	23.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
23.00	23.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
23.25	23.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
23.50	23.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
23.75	24.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859

Numerador	41.693
Denominador S	24.000000 1.73719175

Tabela 1 (continuação) - Ciclo de Carga e "S" Equivalente

O "fator Vs" para o ciclo de carga, multiplicado pelo "fator Vf" resulta no "fator S" = 1.737 pu .

4. Cálculo do encargo e Determinação do Fator de Penalização Fp

Pelo exemplo, será examinado o carregamento do transformador ao longo de todo o mês em que ocorreu a sobrecarga.

A receita "Rs" (receita permitida básica mais receita adicional) correspondente ao período em sobrecarga, a ser auferida pelo detentor do transformador, será:

$$"Rs" = "S" \times "PBs"$$

Onde ,

"S" é o fator de sobrecarga, que resulta em $S = 1,737$; e

"PBs" é a receita permitida básica do transformador correspondente a um ciclo diário de carga, no mês de operação.

Considerando-se um determinado mês, e que este ciclo com sobrecarga ocorra por 22 dias úteis, a receita permitida a ser multiplicada por "S", corresponderá a $22 \times 24 \text{ h} = 528 \text{ hs}$ de um total de 730 hs.

Considerando-se 100% a receita permitida básica no ano de operação, a receita "Rs" neste mês, com os ciclos de carga apresentados anteriormente, será:

$$"Rs" = 1,737 \times (528/8760) \times 100 = 10,44 \%$$

Este valor corresponde ao pagamento pelos ciclos de carga que apresentaram sobrecarregamento, e que serão auferidas neste determinado mês, para uma receita permitida básica de 22 dias = $(528/8760) \times 100 = 6,03 \%$. A receita adicional, neste exemplo, para os ciclos em sobrecarga no mês, é de $10,44 - 6,03 = 4,41 \%$.

Para os demais dias do mês, com o equipamento a 70% de carregamento:

TC	Classe	temperatura do transformador (55 °C ou 65 °C)	°C	55			
NA	Vida	expectativa de vida útil normal	ano	40			
TX	f	probabilidade de falha de transformador obtido do Sistema Elétrico (GCOI, NOS)	% / (transf. x ano)	1.73000			
Pf	fator	multiplicador que permite o ajuste para a penalização estabelecida	pu	1.00000			
ΔΘs	elevação	adicional de temperatura do ponto mais quente	°C	81.320			
Θen	temperatura	limite do ponto mais quente dos enrolamentos do transformador	°C	95.000			
A	constante	da curva de expectativa de vida da isolamento do transformador	pu	-14.133			
B	constante	da curva de expectativa de vida da isolamento do transformador	pu	6972.15			
PV%n24h	perda	de vida útil normal diária	%	0.006849			
Vs	fator	multiplicador da perda de vida na sobrecarga	pu	1.0000			
Pfc	probabilidade	de falha corrigida	% / (transf. x ano)	1.730E+00			
Fator Multiplicador Associado à Sobrecarga em um ciclo de Carga S [pu]							
0.07437							
Tpi - Hora Inicial	TPf - Hora Final	Temperatura do Enrolamento Tenr [grC]	Fator Multiplicador Perda de Vida Adicional, Vs [pu]	Fator Multiplicador Carga no Risco Falha, Vsf [pu]	Fator Multiplicador Aumento Risco Falha, Vf [pu]	Fator Multiplicador para Sobrecarga S [pu]	Numerador Si'DTI [pu*hora]
0.00	0.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
0.25	0.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
0.50	0.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
0.75	1.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
1.00	1.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
1.25	1.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
1.50	1.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
1.75	2.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
2.00	2.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
2.25	2.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
2.50	2.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
2.75	3.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
3.00	3.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
3.25	3.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
3.50	3.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
3.75	4.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
4.00	4.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
4.25	4.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
4.50	4.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
4.75	5.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
5.00	5.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
5.25	5.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
5.50	5.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
5.75	6.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
6.00	6.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
6.25	6.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
6.50	6.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
6.75	7.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
7.00	7.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
7.25	7.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
7.50	7.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
7.75	8.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
8.00	8.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
8.25	8.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
8.50	8.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
8.75	9.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
9.00	9.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
9.25	9.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
9.50	9.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
9.75	10.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
10.00	10.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
10.25	10.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
10.50	10.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
10.75	11.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
11.00	11.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
11.25	11.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
11.50	11.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
11.75	12.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
12.00	12.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
12.25	12.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
12.50	12.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
12.75	13.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
13.00	13.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
13.25	13.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
13.50	13.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
13.75	14.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
14.00	14.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
14.25	14.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
14.50	14.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
14.75	15.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
15.00	15.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
15.25	15.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
15.50	15.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
15.75	16.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
16.00	16.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
16.25	16.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
16.50	16.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859

Tabela 2 - Ciclo de Carga com 70% e "S" Equivalente

Tpi - Hora Inicial Período	TPf - Hora Final do Período	Temperatura do Enrolamento Tenr [grC]	Fator Multiplicador Perda de Vida Adicional, Vs [pu]	Fator Multiplicador Carga no Risco Falha, Vsf [pu]	Fator Multiplicador Aumento Risco Falha, Vf [pu]	Fator Multiplicador para Sobrecarga S [pu]	Numerador Si*DTI [pu*hora]
16.75	17.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
17.00	17.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
17.25	17.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
17.50	17.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
17.75	18.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
18.00	18.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
18.25	18.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
18.50	18.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
18.75	19.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
19.00	19.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
19.25	19.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
19.50	19.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
19.75	20.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
20.00	20.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
20.25	20.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
20.50	20.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
20.75	21.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
21.00	21.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
21.25	21.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
21.50	21.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
21.75	22.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
22.00	22.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
22.25	22.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
22.50	22.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
22.75	23.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
23.00	23.25	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
23.25	23.50	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
23.50	23.75	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
23.75	24.00	62.10	0.0743681	0.0138001	1.0000	0.0743681	0.01859
Numerador							1.785
Denominador							24.000000
S							0.07436813

Tabela 2 (continuação) - Ciclo de Carga com 70% e "S" Equivalente

Verifica-se que a receita permitida básica, para as horas restantes do mês do exemplo, será:

$$((730-528) / 8760) \times 100 = 2,30\%, \text{ sendo a receita permitida básica de todo o mês: } 6,03 + 2,30 = 8,33 \%$$

Este mesmo equipamento, operando nos dias restantes do mês, para 202 horas restantes com carregamento diário de 70%, terá uma receita remanescente de:

$$0,074 \times 202 / 8760 \times 100 = 0,17\%$$

A Receita Total neste mês, será : $10,44 + 0,17 = 10,61 \%$, resultando um valor extra adicional total de $10,61 - 8,33 = 2,28\%$ para todos os ciclos diários de carga do mês .

Escolha do Fator F_p

Considerando-se atribuir um determinado grau de arrependimento ao usuário para que este busque rapidamente alternativas ao uso de transformadores em sobrecarga, estabelecemos a utilização de um fator $F_p = 2$.

Em um determinado mês com o carregamento descrito no exemplo, o encargo adicional seria de $2 \times 2,28\% = 4,56\%$ da receita permitida básica anual, passando este usuário a pagar adicionalmente o equivalente a cerca da metade da receita mensal do equipamento em sobrecarga. Este valor extra está limitado ao valor de mais uma receita básica dentro de cada mês (8,33%) e corresponde a uma receita extra equivalente a ter-se uma segunda máquina em paralelo. Em nossa avaliação, ainda não é confortável para a Transmissora que está submetendo o equipamento a riscos crescentes por operar em sobrecarga, e portanto, fora da condição nominal de operação, fazendo com que esta também busque no menor prazo possível, evitar esta condição operacional.