



Estado da Arte Sobre o Uso de Condutores em Cobre e Alumínio na Fabricação de Transformadores de Distribuição

R. Salustiano* M. L. B. Martínez*
Universidade Federal de Itajubá – Lat-Efei
Email: salustiano@lat-efei.org.br

1. Introdução

Este artigo apresenta o estado da arte sobre a utilização do cobre e do alumínio como materiais condutores aplicados nos enrolamentos de transformadores, sendo realizado e baseado principalmente no artigo de Olivares-Galván, e Georgilakis [1], assim como nos livros de Kulkarni [2] e Rires [3]. Este estudo se torna importante visto que a utilização do alumínio em substituição ao cobre a se empregar na manufatura dos enrolamentos transformadores de distribuição vem se tornando cada vez mais frequente.

2. Características

A escolha do material certo a se empregar na fabricação dos enrolamentos de um transformador deve considerar quais das suas características são afetadas por esta escolha e não somente o custo de manufatura da unidade com cada material. Assim sendo, é necessário verificar como estes materiais se comportam durante os ensaios exigidos para a aprovação do transformador, bem como durante a vida útil deste equipamento. Como por exemplo, o fato do fio esmaltado de alumínio possuir mais falhas por metro que o fio de cobre isto pode levar a um maior índice de falhas devido às descargas atmosféricas. Este fato pode ser comprovado através de ensaios de impulso de tensão, desde que se tenha um shunt bem dimensionado, entre 2 a 25 ohms, para medir as distorções de corrente causadas pelas falhas.

Tabela 1 – Características físicas dos materiais

| Propriedades | Unidade | Cobre | Alumínio |
|---|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Resistividade a 75 °C | Ωm | 2,09x10 ⁻⁸ | 3,47x10 ⁻⁸ |
| Tensão de Ruptura a 20°C | kgf/mm ² | 23 | 4,9 |
| Limite de Escoamento ($\sigma=0,2\%$) | kgf/mm ² | 7,0 | 1,3 |
| Módulo de Elasticidade | kgf/mm ² | 12.032 | 7.030 |
| Densidade de massa | kg/dm ³ | 8,89 | 2,7 |
| Coefficiente de expansão | °C ⁻¹ | 16,7x10 ⁻⁶ | 23,86x10 ⁻⁶ |
| Condutividade térmica | W/m °C | 398 | 210 |
| Calor específico | J/kg °C | 384,6 | 904 |

Como mostra a Tabela 1, a resistividade do cobre é 39% menor que a do alumínio podendo chegar até 41% dependendo do grau de pureza do material condutor. Em contrapartida o cobre é 3,3 vezes mais pesado que o alumínio e 4,7 vezes mais resistente à

ruptura que o alumínio. Por fim, outra vantagem do cobre frente ao alumínio é a condução de calor 90% maior.

As ligas metálicas do cobre e do alumínio são produzidas objetivando a melhora de propriedades específicas destes materiais condutores. Por exemplo, a liga feita entre cobre e prata melhora significativamente a condutividade térmica. Porém, pequenas quantidades de impurezas misturadas ao cobre podem degradar a condutividade do condutor. Já o alumínio é mais sensível às impurezas, uma porcentagem menor que 0,5% de impurezas de alguns materiais podem reduzir a condutividade em mais de 10%. Desta forma, condutores de alumínio devem ter um alto grau de pureza para evitar esta degradação da condutividade.

3. Custo da Matéria Prima

Tanto o cobre quanto o alumínio são considerados commodities. A literatura caracteriza como commodities as mercadorias, em geral homogêneas, cuja oferta e demanda são praticamente inelásticas no curto prazo e cujas transações são efetuadas nas principais bolsas de mercadoria internacionais sendo realizadas com base nas cotações vigentes nesses mercados [4].

Em economia, quando se diz que a demanda é inelástica, isto indica que a variação percentual na quantidade demandada é menor que a variação percentual no preço. Em outras palavras, elevação no preço provoca uma redução na quantidade demandada relativamente menor que a elevação no preço. Interpreta-se como a sensibilidade relativamente baixa da demanda em relação ao preço [5].

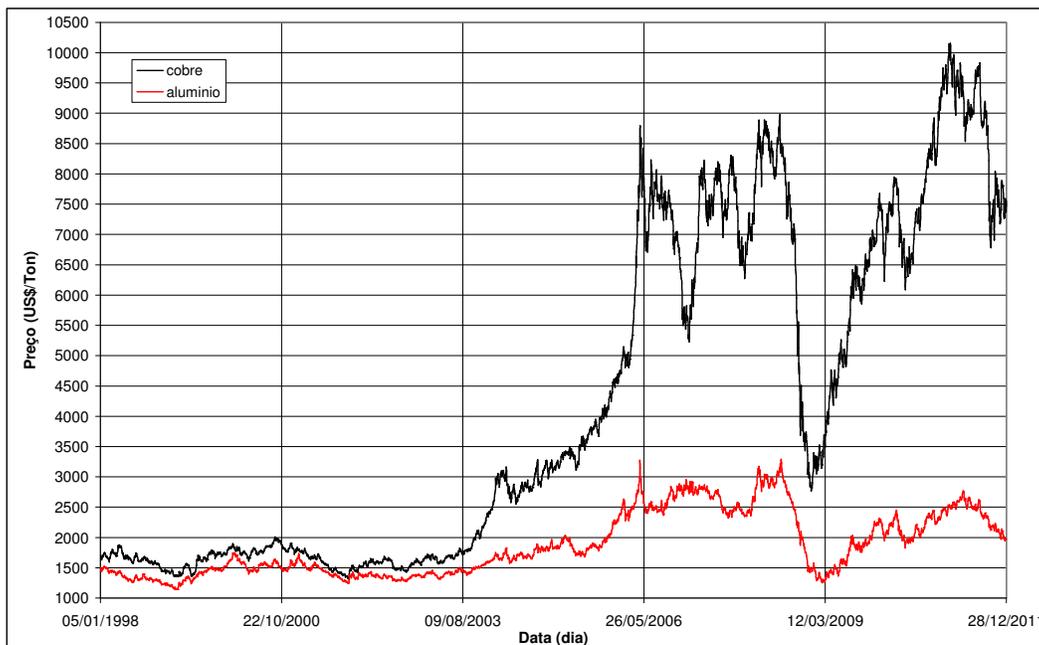


Figura 1 – Histórico de cotação de 1998 a 2011 para cobre e alumínio [6]

A partir de 2003, como se pode observar no gráfico com dados retirados da London Metal Exchange na Figura 1 o preço do cobre que vinha ao longo do tempo muito próximo ao preço do alumínio se distanciou a partir de 2003. Isto chamou a atenção para a possível aplicação de condutores em alumínio para a manufatura de transformadores, em específico para médias tensões.

4. Custo Devido à Resistividade dos Materiais

Considerando que ambos os enrolamentos tenham a mesma resistência ôhmica e desprezando as alterações no comprimento do condutor, ou seja, analisando somente variações na seção do condutor é obtida a expressão (1).

$$\rho_{Cu} \cdot \frac{L_{Cu}}{S_{Cu}} = \rho_{Al} \cdot \frac{L_{Al}}{S_{Al}} \Rightarrow S_{Al} = 1,66 \cdot S_{Cu} \quad (1)$$

Sendo, ρ_{Cu} , ρ_{Al} as resistividades em ohms (Ω) do cobre e do alumínio respectivamente, L_{Cu} , L_{Al} os comprimentos em metros do condutor em cobre e em alumínio respectivamente e S_{Cu} e S_{Al} as seções transversais em m^2 do condutor em cobre e em alumínio respectivamente. Considerando parâmetros médios observa-se que seção transversal do condutor de alumínio deve ser 1,66 vezes maior que a seção do cobre para a mesma resistência. Porém, o custo do condutor não está atrelado à seção do condutor e sim à sua massa.

$$S_{Al} = 1,66 \cdot S_{Cu} \Rightarrow m_{Cu} = 1,96 \cdot m_{Al} \Rightarrow c_{Cu} = 0,51 \cdot c_{Al} \quad (2)$$

Sendo, m_{Cu} , m_{Al} as massas em kg do condutor em cobre e em alumínio e c_{Cu} , c_{Al} o custo de aquisição em R\$/kg do condutor em cobre e em alumínio respectivamente. Conclui-se que é necessário um volume de alumínio 1,66 vezes maior que o volume utilizado de cobre. No entanto a massa de cobre é 1,96 vezes maior que a do alumínio. Assim o custo de aquisição unitário do condutor de cobre deve ser correspondente a 51% do custo de aquisição unitário do condutor de alumínio. Esta relação não deve ser utilizada na tomada de decisão para escolha do material, uma vez que a substituição do cobre pelo alumínio implica em muitas outras alterações no equipamento que podem aumentar seu custo final. Por exemplo, por se ter uma seção do condutor, 1,66 vezes maior, a área da janela do núcleo, desprezando os espaços vagos, deve ser também 1,66 vezes maior para o transformador com alumínio se comparado ao cobre.

Considerando o formato quadrado de janela para o núcleo tem-se:

$$Área_{janela} = l_{núcleo}^2 \quad (3)$$

$$Área_{Janela-Alumínio} = 1,66 \cdot Área_{Janela-Cobre} \Rightarrow l_{núcleo-Alumínio} = 1,29 \cdot l_{núcleo-Cobre} \quad (4)$$

Sendo, $\text{Área}_{\text{janela}}$ a área da janela do núcleo em mm^2 , $l_{\text{núcleo}}$ o comprimento médio do lado da janela do núcleo em mm. Desta forma, o núcleo para um transformador manufaturado com enrolamentos de alumínio tem um aumento mínimo de 29% em seu comprimento da linha média e conseqüente aumento de 29% da massa do núcleo e de seu custo final, incluindo o aumento das perdas em vazio. Isto também representa um aumento de 29% do volume ocupado pelo núcleo. Porém para se reduzir os efeitos no aumento das perdas em vazio deve-se buscar trabalhar com uma densidade de fluxo menor. Para isto é necessário o aumento da seção do núcleo o que implica em um novo aumento do custo final do transformador fabricado com alumínio.

A mesma relação obtida para o comprimento do núcleo em (4), também é obtida para a largura dos condutores tanto retangulares quanto circulares, como mostrado em (5), para condutores circulares:

$$S_{Al} = 1,66.S_{Cu} \Rightarrow \frac{\pi.D_{Al}^2}{4} = 1,66.\frac{\pi.D_{Cu}^2}{4} \Rightarrow D_{Al} = 1,29.D_{Cu} \quad (5)$$

Este acréscimo de 29% no diâmetro do condutor será sentido na espessura das bobinas do transformador como mostra a figura 2.

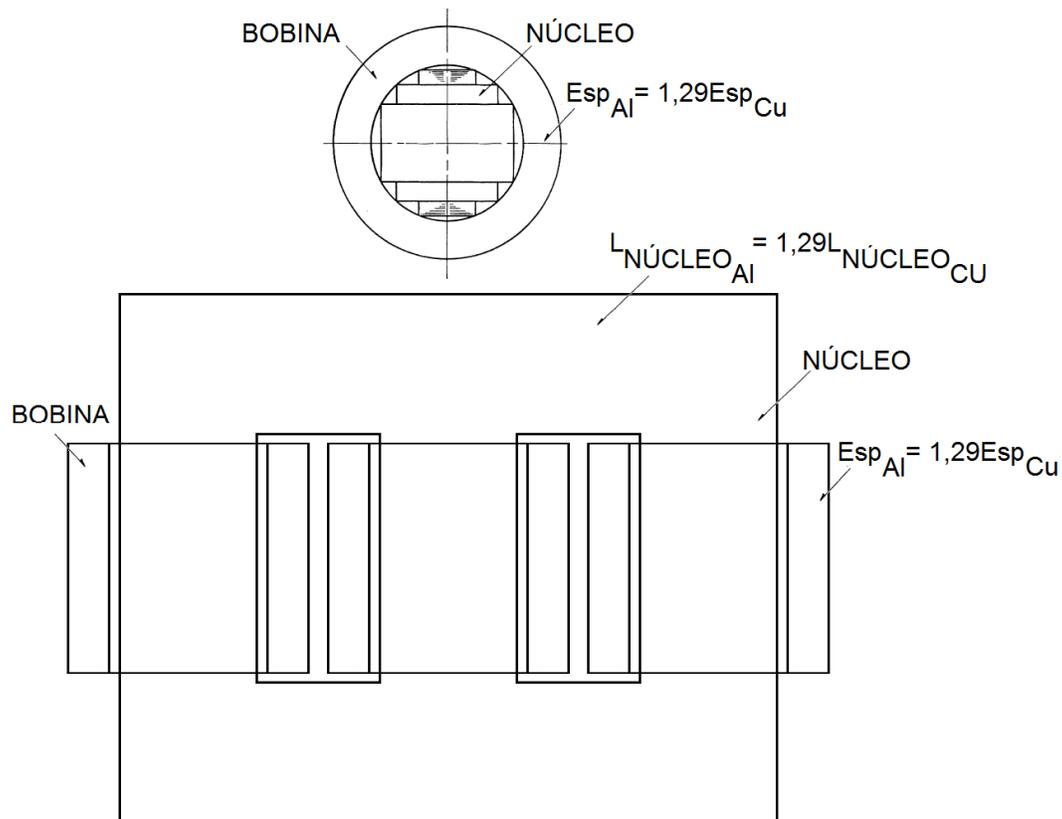


Figura 2 – Aumentos de núcleo e enrolamentos devido à utilização do alumínio



Assim, o volume ocupado, de forma simplificada, pela parte ativa é dado por (6):

$$Vol = (L_{Núcleo} + 2.Esp_{Enrolamento}) \times H_{Núcleo} \times (D_{Núcleo} + 2.Esp_{Enrolamento}) \quad (6)$$

Nesta comparação tanto os efeitos do aumento do diâmetro do núcleo quanto os feitos do aumento da espessura do enrolamento na largura do núcleo são desprezados para a simplificação da comparação. Porém, estes influenciam aumentando também o volume total do núcleo, sendo dependentes do material ferromagnético utilizado e forma construtiva do núcleo, variando de acordo com cada projeto, podendo o resultado final chegar a um volume próximo a duas vezes maior para a utilização do alumínio.

$$Vol = (L_{Núcleo} + 2.Esp_{Enrolamento}) \times H_{Núcleo} \times (D_{NúcleoCu} + 2.Esp_{EnrCu}) \quad (7)$$

$$\frac{Vol_{Al}}{Vol_{Cu}} = \frac{(1,29.L_{NCu} + 2(1,29.Esp_{EnrCu})) \times 1,29.H_{NCu} \times (D_{NCu} + 2.Esp_{EnrCu})}{(L_{NCu} + 2.Esp_{EnrCu}) \times H_{NCu} \times (D_{NCu} + 2.Esp_{EnrCu})} \quad (8)$$

$$Vol_{Al} = 1,66 Vol_{Cu} \quad (9)$$

Assim, conclui-se que o volume da parte ativa, e conseqüentemente do tanque, a ser ocupado pelo projeto com alumínio é no mínimo 66% maior que o volume a ser ocupado pelo projeto com cobre. Ou seja, a utilização do alumínio trás consigo a necessidade de se utilizar um tanque significativamente maior quando comparado com o cobre, sendo prudente a contabilização deste custo adicional devido à maior utilização do aço carbono e conseqüente maior volume de óleo à comparação dos custos.

5. Curto circuito

5.1. Comportamento Térmico Durante Curto circuito

O aumento brusco da corrente faz com que a temperatura do transformador e principalmente de seus enrolamentos suba rapidamente podendo chegar a limites prejudiciais a sua vida útil. O material mais afetado com este aumento da temperatura é o material isolante do enrolamento sendo este o responsável por definir a vida útil de um transformador.

Um ponto importante para a análise dos efeitos do curto circuito sobre os enrolamentos é a velocidade com que a temperatura aumenta durante o curto circuito. As curvas levantadas para um curto circuito com tempo de duração de 4 segundos da figura 3 foram obtidas através da expressão (10) para o cobre e (11) para o alumínio [3].

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2.(\theta_0 + 235)}{(101.000/d^2.t) - 1} \quad (10)$$

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2.(\theta_0 + 225)}{(43.600/d^2.t) - 1} \quad (11)$$

Sendo, θ_0 e θ_1 as temperaturas em $^{\circ}\text{C}$ inicial e final respectivamente, d a densidade de corrente em A/mm^2 e t o tempo de duração do curto circuito em s. O valor da densidade de corrente de curto circuito, com duração de 4 segundos, capaz de fazer com que o enrolamento de cobre atinja sua temperatura máxima é de aproximadamente $66,6 \text{ A}/\text{mm}^2$. Já para o alumínio, este limite é atingido mais cedo por volta de $37 \text{ A}/\text{mm}^2$, para uma classe de temperatura de 105°C .

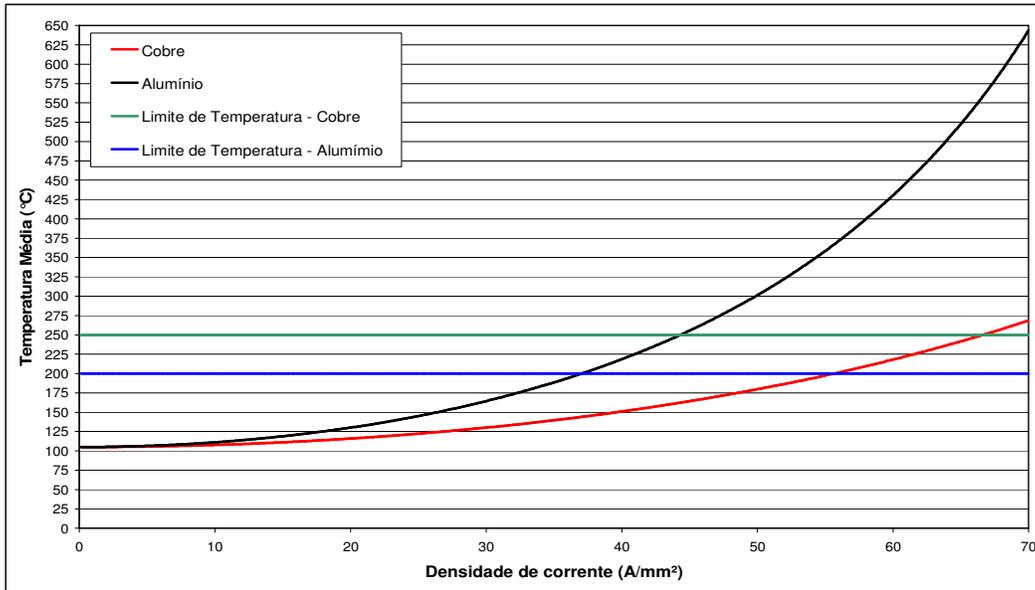


Figura 3 – Temperatura do enrolamento para curto circuito de 4 segundos

Assim, a seção do condutor de alumínio deve ser 80% maior que a seção do condutor de cobre para se ter desempenhos equivalentes frente ao curto circuito.

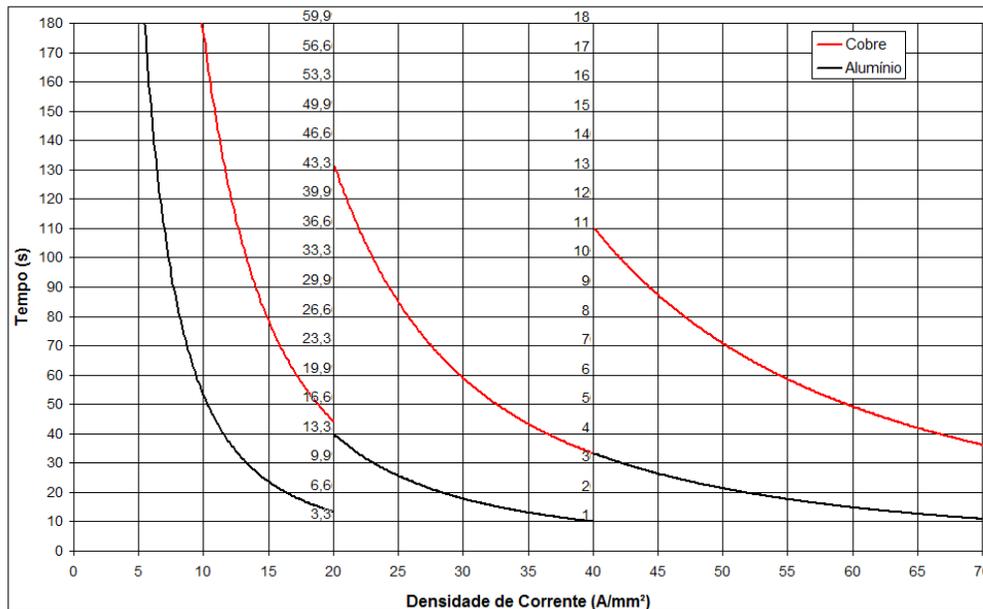


Figura 4 – Tempo suportável de curto circuito

O gráfico apresentado na figura 4 traz a comparação entre o tempo que o transformador é capaz de resistir ao curto circuito para cada valor de densidade de corrente possível. A vantagem do cobre como material a ser utilizado no enrolamento para esta condição é visível. Por estes motivos o cobre tende a ser utilizado em transformadores de potência mais elevada, pois este material mostra-se mais adequado para esta aplicação.

5.2. Comportamento Frente a Esforços Radiais no Curto circuito

Os esforços radiais nas bobinas podem ser calculados de acordo com (13) e (14) para o cobre e alumínio respectivamente [2].

$$\sigma_{avg} = 0,48 \times 10^{-4} \cdot (k \cdot \sqrt{2})^2 \cdot \frac{Wc}{H_{janela} \cdot Z_{pu}^2} \quad (kg / cm^2) \quad (12)$$

$$\sigma_{avg} = 0,29 \times 10^{-4} \cdot (k \cdot \sqrt{2})^2 \cdot \frac{Wc}{H_{janela} \cdot Z_{pu}^2} \quad (kg / cm^2) \quad (13)$$

Sendo, σ_{med} o esforço médio em kg/cm², k é o fator de assimetria do curto circuito, Wc a perda no enrolamento por fase em W, H_{janela} a altura da janela do núcleo em m e Z_{pu} a impedância em pu do transformador. O gráfico mostrado na figura 5 mostra as curvas traçadas pelas expressões (13) e (14). Novamente nota-se a superioridade do cobre frente ao alumínio.

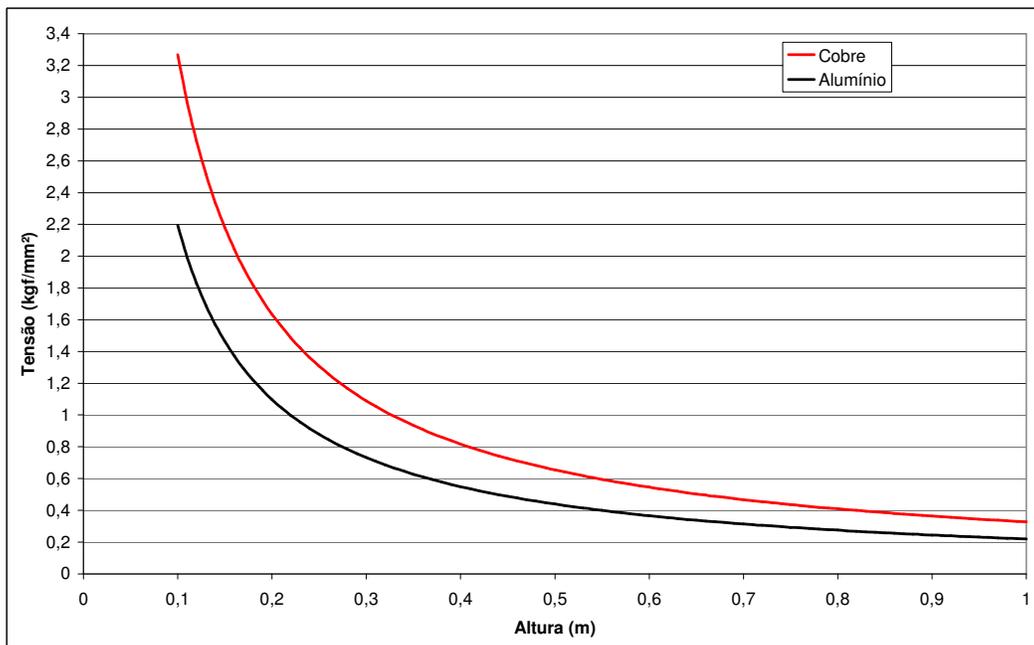


Figura 5 – Esforço radial sobre o enrolamento

6. Conclusões

Para uma melhor comparação entre o cobre e o alumínio o equacionamento apresentado tem de ser expandido para contemplar o cálculo térmico do transformador. Estudos mais aprofundados através do acompanhamento destes equipamentos em campo para verificar como se comportam durante a vida útil são necessários. Pois, o resultado da substituição do cobre pelo alumínio pode implicar no aumento do número de falhas de transformadores em campo devido às características que conferem ao alumínio um aspecto aparentemente mais frágil como condutor se tratando do fio esmaltado principalmente.

O cobre apresenta características elétricas mais favoráveis a sua utilização, assim como uma resistividade 39% menor e resistência à ruptura 4,7 vezes maior. Isto torna o cobre um bom material para aplicação em grandes transformadores que necessitam de um material capaz de resistir aos transitórios eletromagnéticos existentes no sistema.

A utilização indiscriminada do alumínio no lugar do cobre ainda gera dúvidas e com isto a necessidade de se investigar melhor quais características do transformador que serão diretamente afetadas pela troca do material condutor, caso não sejam observadas características mínimas de qualidade, a exemplo das condições do isolamento dos condutores. As características que devem ser mais bem analisadas são o comportamento frente a curto circuito e o comportamento térmico, principalmente, do ponto mais quente do enrolamento.

A utilização do alumínio ainda é capaz de gerar problemas futuros afetando sua eficiência em campo, além de poder resultar em falhas de operação devido ao possível problema de conexão do alumínio com outros metais. A eficiência pode ser perdida caso as conexões sejam afetadas pelas perdas Joule.

7. Referências

- [1]. Galván , J.C.O., León F., Georgilakis, P.S., Pérez, R. E., Selection of copper against aluminum windings for distribution transformers, IET. 2009 IEEE.
- [2]. Kulkarni, S.V.; Khaparde, S.A. Transformer Engineering Design and Practice. 1ed. CRC Press, 2004.
- [3]. Ries, W. Transformadores Fundamentos para o Projeto e Cálculo. 1ed. EDIPUCRS, 2007.
- [4]. Williamson, J. Economia Aberta e a Economia Mundial. Rio de Janeiro Campus, 1989.
- [5]. Cotta, J. L., Elasticidade - Demanda e Preço. 2005. Monografia (Especialização em Matemática) - Departamento de Matemática – Universidade federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2005
- [6]. London Metal Exchange. Cotações Cobre e Alumínio Disponível na internet via URL: <http://www.lme.com>. Dados capturados em Janeiro de 2012.