

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELÉTRICA

CARLOS HENRIQUE FRANCO CAPRERA

**COMPARATIVO ENTRE ENROLAMENTOS DE COBRE E ALUMÍNIO
PARA TRANSFORMADORES ELÉTRICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

CARLOS HENRIQUE FRANCO CAPRERA

**COMPARATIVO ENTRE ENROLAMENTOS DE COBRE E ALUMÍNIO
PARA TRANSFORMADORES ELÉTRICOS**

Proposta para Trabalho de Conclusão do
Curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Tecnológica Federal do
Paraná – UTFPR, como requisito parcial
para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Me. Marco Antonio
Ferreira Finocchio

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018



FOLHA DE APROVAÇÃO

Carlos Henrique Franco Caprera

Comparativo entre enrolamentos de cobre e alumínio para transformadores elétricos

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:00hs do dia 13/06/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Wagner Fontes Godoy - (Membro)

Prof(a). Esp. Carlos Alberto Paschoalino - (Membro)

RESUMO

CAPRERA, Carlos Henrique Franco. **Comparativo entre enrolamentos de cobre e alumínio para transformadores elétricos**: 2018. 35f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

Este trabalho faz um comparativo entre transformadores de enrolamento de cobre e enrolamento de alumínio, abordando as vantagens e desvantagens dos dois materiais, embasado na condutividade, densidade de massa, custo, conectividade, oxidação, usinabilidade e comportamento em curto-circuito. Além de discorrer sobre o custo total de propriedade (TCO) dos transformadores, apontando até que ponto economicamente é mais viável a utilização de cada um dos enrolamentos nos transformadores.

Palavras-chave: Enrolamento. Cobre. Alumínio. Custo total de propriedade. Transformadores.

ABSTRACT

CAPRERA, Carlos Henrique Franco. **Comparison between copper and aluminum windings for electric transformers**: 2018. 35 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018

This paper presents a comparison between copper windings and aluminum windings in electric transformers, showing the advantages and disadvantages of the both materials, based on conductivity, mass density, connectivity, oxidation, machinability and short-circuit behavior. In addition to discussing the Total cost of ownership (TCO) of the transformers, pointing out to what extent it is economically more feasible to use each of the windings in the transformers.

Keywords: Winding. Copper. Aluminum. Total cost of ownership. Transformers.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 Justificativa	8
1.2 Objetivos	9
1.2.1 Objetivo Geral	9
1.2.2 Objetivos Específicos	9
1.2 Método da Pesquisa	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 Transformadores Elétricos	10
2.2 Custo Total de Propriedade – TCO	11
2.3 Materiais Utilizados nos Enrolamentos	12
2.3.1 Alumínio	13
2.3.2 Cobre	14
3 DESENVOLVIMENTO	17
3.1 Condutores Utilizados nos Enrolamentos	17
3.1.1 Formato dos condutores	17
3.1.2 Material dos condutores	19
3.2 Propriedades Físicas e Custos dos Enrolamentos de Cobre a Alumínio .	19
3.3 Evolução dos Preços dos Materiais ao Longo do Tempo	23
3.4 Conectividade e Oxidação	24
3.5 Usinabilidade	25
3.6 Comportamento Durante o Curto Circuito	26
3.7 Comparação do Custo Total de Propriedade (TCO) dos Transformadores de Cobre e Alumínio	28
4 CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

O transformador é um equipamento de extrema importância para o sistema elétrico, surgiu basicamente para elevar a tensão nas redes de transmissão, e posteriormente reduzir nos centros de distribuição. No ano de 1880, quando não existiam transformadores, a transmissão era feita em baixa tensão e elevada corrente, esse sistema apresentava altas perdas por efeito joule, como também as instalações de geração eram limitadas próximas ao consumidor (CHAPMAN, 2012).

Em um sistema elétrico, os transformadores são utilizados desde as usinas de produção, em que a tensão gerada é elevada até níveis adequados para possibilitar a transmissão econômica de potência, até os grandes pontos de consumo, em que a tensão é abaixada a nível de subtransmissão e de distribuição, alimentando as redes urbanas e rurais, onde novamente é reduzida para, enfim, ser utilizada com segurança pelos usuários do sistemas (MAMEDE, 2005).

O custo de fabricação do transformador esta relacionado diretamente com o desenvolvimento do seu projeto, que envolve uma série de variáveis, como diferentes tipos de materiais, métodos e processos de fabricação. Entre essas variáveis, o tipo de material é um dos pontos mais importantes, uma vez que o preço da matéria prima encontra-se em constante oscilação.

O transformador é constituído basicamente por dois enrolamentos, que são componentes que armazenam energia na forma de campo magnético. Nos enrolamentos, o fluxo magnético, variável, produzido em um enrolamento age sobre o outro. No geral, transformadores elétricos podem utilizar enrolamentos de cobre ou alumínio. Nos transformadores de potência, enrolamentos de cobre são preferíveis, devido a algumas propriedades do cobre, exemplo disso é a utilização de uma liga de cobre correta para garantir alta capacidade de curtos-circuitos em transformadores de potência, isso deve-se às propriedades mecânicas do cobre, como limite de elasticidade e o módulo de elasticidade (LEONARDO ENERGY BRASIL, 2016). Para os transformadores de distribuição, se bem projetado, os enrolamentos de alumínio são preferíveis e podem ser bem mais acessíveis comercialmente.

A escolha correta do material a ser utilizado em um transformador é de extrema relevância, porque esta diretamente relacionada ao custo e o desempenho do equipamento. Esse assunto não é somente discutido na parte de transformadores, as vantagens e desvantagens da escolha do material são de interesse de toda indústria de equipamentos elétricos. Quando o cobre e alumínio são comparados com ênfase na aplicação em equipamentos elétricos, são considerados alguns parâmetros como: capacidade de transporte de corrente, condutividade, peso, resistência a tração, expansão, conexões e terminais, chapeamento e sua questão ambiental, oferta de produto, comparação de custos impacto em várias peças e equipamentos (PRYOR, et al., **sem data**).

1.1 Justificativa

Segundo OLIVARES, et al. (2003), o custo do enrolamento do transformador equivale de 16% à 28% do custo total de fabricação do transformador, ou seja um valor muito significativo para o custo final.

A escolha do material correto a ser utilizado na fabricação dos enrolamentos de um transformador deve considerar quais de suas características são afetadas por esta escolha não somente o custo de manufatura da unidade com cada material. Logo, é preciso analisar como estes materiais se comportam durante os ensaios exigidos para a aprovação do transformador, além da vida útil do equipamento. Um exemplo disso é o fato do fio esmaltado de alumínio possuir mais falhas por metro que o fio de cobre, tal fato pode ocasionar em um maior índice de falha devido às descargas elétricas (SALUSTIANO; MARTÍNEZ, 2012).

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), as reservas mundiais de cobre são estimadas em 480.10^6 toneladas métricas. Considerando o consumo de 2006 de $15,3.10^6$ toneladas levará 31 anos para atingir o esgotamento total. Já as reservas mundiais de alumínio são de 29.10^9 toneladas, no atual consumo de 177.10^6 toneladas anuais, rendem 164 anos antes de chegar ao esgotamento. Tendo isso em vista, o estudo comparativo entre os dois materiais se torna muito válido, visando uma futura escassez das reservas de cobre.

1.2 Objetivos

Esta seção dispõe apresentar o objetivo geral, os objetivos específicos e esclarecer o escopo deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é realizar um comparativo entre os enrolamentos de cobre e alumínio para transformadores elétricos, que são os materiais mais utilizados nos enrolamentos, levando em consideração a condutividade elétrica do material, sua densidade, seu custo, entre outros parâmetros, com intuito de analisar qual material é mais benéfico e econômico para a construção do enrolamento.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar os dois materiais a serem comparados;
- Levantar uma estimativa da variação do preço desses materiais ao longo dos anos e plotar um gráfico que ilustre essa variação;
- Construir uma tabela que ilustre o custo total dos transformadores de núcleo de cobre e de alumínio para diversas potências de transformadores;

1.2 Método da Pesquisa

O trabalho tem por base pesquisas em livros, normas, artigos, estatísticas e referências relacionadas aos materiais cobre e alumínio e, transformadores elétricos.

Os dados coletados serão comparados e analisados de acordo com a teoria, para que possa ser feito o comparativo entre enrolamentos de cobre e alumínio para transformadores elétricos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção aborda as bases teóricas referente ao equipamento, materiais e ao método de análise, para o bom desenvolvimento monografia.

2.1 Transformadores Elétricos

Um transformador é um dispositivo que converte, por meio da ação de um campo magnético, a energia elétrica CA de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica CA de mesma frequência, mas outro nível de tensão. Ele consiste em duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo ferromagnético comum. Essas bobinas (usualmente) não estão conectadas diretamente entre si. A única conexão entre as bobinas é o fluxo magnético comum presente dentro do núcleo (CHAPMAN, 2013).

Os transformadores são importantes à vida moderna. Em 1882, Thomas A. Edison, implantou sua primeira geração de energia elétrica em Nova York, infelizmente seu sistema gerava e transmitia energia elétrica em níveis de tensões muito baixas, dessa forma era necessário correntes muito elevadas, o que ocasionava em quedas de tensões muito grandes e perdas energéticas significativas, tanto que na década de 1880, as usinas geradoras se localizavam muito próximas uma as outras para evitar esse problema. Com a invenção do transformador e o desenvolvimento de estações geradoras em CA, eliminou a necessidade das usinas serem muito próximas uma das outras para evitar a perdas de energia. Se um transformador elevar o nível de tensão de um circuito, ele deve diminuir a corrente, para manter a potência constante. Assim, a energia elétrica CA pode ser gerada em um local, em seguida o nível de tensão é elevado para que seja transmitida, com baixos níveis de perdas, e em seguida é abaixada novamente para seu uso final. Em um sistema de energia elétrica, as perdas de transmissão são proporcionais ao quadrado da corrente que circula nas linhas. Desse modo, usando transformadores, uma elevação da tensão de transmissão por um fator de 10 permitirá reduzir as perdas de transmissão elétrica em 100 vezes devido a redução das correntes de transmissão pelo mesmo fator (CHAPMAN, 2013).

Nos dias atuais, nos sistemas mais modernos de energia elétrica, a energia é gerada com níveis de tensão de 12 a 25kV. Os transformadores elevam esse nível de tensão para uma faixa entre 110 V a aproximadamente 1.000V, para que possa ser transmitida em grandes distâncias com menores perdas. Após a transmissão, os transformadores abaixam essa tensão para uma faixa de 12 a 34,5 kV para fazer a distribuição local e finalmente ela é abaixada novamente para ser usada nas casas, escritórios e fábricas em um nível de tensão de 127V. A figura 1 apresenta um transformador de potência.

Figura 1 - Transformador de potência a óleo



Fonte: Comtrafo (2017).

2.2 Custo Total de Propriedade – TCO

O custo total de propriedade (TCO), em inglês, *Total Cost of Ownership*, é uma análise significativa para descobrir todos os custos ao longo da vida para se manter certos tipos de ativos.

A aquisição de um equipamento traz custos (diretos) de compra, mas também pode trazer custos indiretos e substanciais para processos de operação, implantação, instalação, e manutenção do equipamento. Para muitas situações e tipos de aquisições, a análise do TCO pode apontar uma discrepância muito grande entre o preço de compra e os custos do ciclo de vida, especialmente quando vistos ao longo do período de propriedade, ou seja, o fluxo de caixa (gastos) para manter aquele equipamento.

Figura 2 - Total Cost of Ownership (TCO).



Fonte: Desmonta & CIA (2017).

Atualmente a análise do TCO é usada para apoiar decisões de aquisição e de planejamento para uma larga variedade de ativos que agregam custos significativos de manutenção e operação durante toda sua vida útil. Desta forma, o TCO é o centro das atenções quando são necessárias decisões para a aquisição de TI (*hardware/software*), máquinas, equipamentos, etc.

A análise do TCO para esse tipo de equipamento é de fato uma preocupação central, considerando:

- Orçamento e planejamento;
- Gestão de ativos;
- Ciclo de vida;
- Priorizando as propostas de aquisição do capital;
- Seleção de fornecedores;
- Decisão de locar ou comprar.

2.3 Materiais Utilizados nos Enrolamentos

Quando observa-se alguns objetos, sejam eles aplicados em qualquer área, logo faz-se uma análise que envolve dimensões, peso, desempenho, custo, possibilidade de satisfazer a necessidade da compra, durabilidade, desenho, acabamento e outras características que julgamos importantes (WLADIKA, 2008).

2.3.1 Alumínio

É um metal condutor ou para outras aplicações (mecânica e térmica) que tem muita utilização em todas as áreas. O alumínio é obtido de um minério chamado bauxita cuja a fórmula é $[AlO(OH) \cdot Al(OH)_3]$. Para a eletrotécnica, é possível dizer que o alumínio é o metal mais versátil entre todos os usados. Geralmente é associado a outros elementos por meio de ligas para melhorar suas propriedades mecânicas.

Densidade: 2,70gf/cm³.

Temperatura de fusão: 660°C.

Cor: Metálica clara.

Número atômico: 13.

Comportamento físico:

- Resistência à tração: 1800kgf/cm² (ruptura);
- Resistência à compressão: 1800kgf/cm² (ruptura);
- Não é tão maleável quanto o cobre, mas é bom;
- Boa condutividade elétrica e térmica;
- A soldagem é complicada;
- Baixo peso específico o credencia para muitas aplicações;
- O custo é mais baixo do que o do cobre.

Comportamento químico:

- Oxida-se, porém a camada é protetora;
- Permite a formação de ligas para aumentar a resistência mecânica (Si, Mn, Mg);
- Sofre corrosão galvânica quando em contato com o cobre;
- Pode receber um isolamento superficial (oxidação anódica) por meio de um processo eletrolítico chamado de anodização.

Aplicações em eletrotécnica:

- Linhas de transmissão e redes de distribuição (podendo ser com alma de aço);
- Conectores para redes; Barras rotatórias; Cabo AT isolado;
- Dissipadores térmicos; Caixa para fontes de alimentação;
- Barramentos de subestação; Quadros de medição;
- Enrolamento de transformadores;
- Disco medidores de energia;
- Outras.

2.3.2 Cobre

É um metal condutor que tem o uso mais difundido na eletrotécnica devido as propriedades elétricas, térmicas e mecânicas favoráveis. O cobre é obtido de vários minérios que podem se chamar: cuprita (Cu_2O), calcopirita (FeCuS_2), calcosina (Cu_2S), etc. Tem grande aplicação na indústria mecânica em destiladores, evaporadores, alambiques, bombas, entre outros.

Densidade: 8,96gf/cm³.

Temperatura de fusão: 1083°C.

Cor: Alaranjado;

Símbolo químico: Cu.

Número atômico: 29.

Comportamento físico:

- Resistência à tração: 2250kgf/cm³;
- Resistência à compressão: 2250kgf/cm³;
- Apresenta elevada maleabilidade;
- Pode ser trabalhado a frio e a quente; É facilmente soldável;
- Excelente condutibilidade elétrica, sendo inferior somente à da prata;
- Excelente condutividade térmica;
- Tem peso específico (densidade) elevado, semelhante ao ferro (aço), o que inviabiliza algumas aplicações;
- O custo é mais elevado que o do alumínio.

Comportamento químico:

- Permite formação de ligas
- Aceita revestimento por diversos tipos de vernizes;
- Oxida-se facilmente quando exposto ao ar, porém, o óxido não é progressivo e forma uma camada passivadora. O óxido é uma película esverdeada chamada de azinhavre (zinabre, no popular);
- Resiste bem a ácidos, aldeídos, álcoois, resinas, álcalis (soda cáustica), etc.

Aplicações em eletrotécnica:

- Condutores em geral: fios, cabos, barramentos chatos e tubulares;
- Lâminas coletoras. Cintas de blindagem;
- Cordoalhas circulares (rabicho) e chatas;
- Contatos seccionadores (chave faca);
- Filetes de placas de circuito impresso (trilhas);
- Revestimento de hastes de terra; Cabo mensageiro (cobre duro);
- Outras.

2.3.2.1 Cobre Esmaltado

O cobre, durante o processo de trefilação, sofre encruamento, o que aumenta a sua rigidez mecânica e diminui a sua condutividade. Para converter o cobre encruado (duro) em cobre eletrolítico (mole), é necessário fazer o seu recozimento, que consiste em aquecer o condutor com intuito de que sua estrutura cristalina se reorganize. Aproveitando o aquecimento da parte interna do condutor, e o externo de secadores, o fio passa por vários banhos de verniz isolante – 5, 6, 7, 8, 9 dependendo da aplicação do fio e do tipo do esmalte – até que uma fina camada de esmalte se consolide sobre o condutor para garantir isolamento entre futuras espiras. Como sempre há muitas espiras nas bobinas e o espaço para as mesmas é reduzido, devido às dimensões compactas da máquina/aparelho/equipamento, a isolamento não pode ser volumosa, e por isso é feita por meio de uma película de verniz eletroisolante.

Aplicações Eletrotécnicas:

- Fios para enrolamentos: bobinas de transformadores, motores, relés, solenoides, etc.

Os fios de cobre esmaltado, para terem bom desempenho como constituintes de enrolamento elétricos, são avaliados em vários aspectos, dos quais podemos citar:

- Avaliação dimensional; Alongamento; Grau de recuo;
- Aderência; Flexibilidade; Colagem; Cura; Resistência à brasão;
- Choque térmico; Termoplasticidade; Soldabilidade;
- Solubilidade; Continuidade da película isolante; Extração;
- Resistência ao óleo de transformador e a fluidos refrigerantes;
- Outras.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Condutores Utilizados nos Enrolamentos

3.1.1 Formato dos condutores

Um transformador trifásico é constituído por pelo menos por 6 enrolamentos, três enrolamento no primário e três enrolamentos no secundário, os quais podem ser conectados em delta (Δ), estrela (Y) ou estrela aterrado. Assim sendo, têm-se nove tipos de conexões, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tabela de conexões de transformadores.

Primário	Secundário
Y	Y
Y	Δ
Y	Y aterrado
Δ	Y
Δ	Δ
Δ	Y aterrado
Y aterrado	Y
Y aterrado	Δ
Y aterrado	Y aterrado

Fonte: Autoria própria.

O tipo de conexão vai determinar as tensões e correntes nas bobinas, geralmente, essas conexões são descritas na placa do transformador, conforme a Figura 3.

Com base nas tensões e correntes pré-estabelecidas, é feita a escolha do formato dos condutores dos enrolamentos. Para condutores do tipo tiras (espessura $\geq 0,2032\text{mm}$), são utilizados condutores redondos ou elípticos. Já para condutores do tipo folha (espessura $< 0,2032\text{mm}$), são utilizados condutores retangulares (SHUGG, 1986).

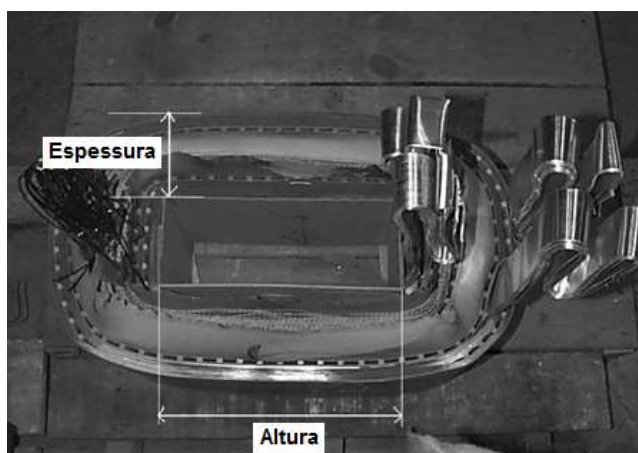
Figura 3 - Dados de placa do transformador conectado em Y-Y aterrado.



Fonte: JM Construções Elétricas Ltda.

Condutores de seção transversal circular são utilizados em casos em que a corrente é baixa, como no caso dos enrolamentos de alta tensão dos transformadores de distribuição. Em contrapartida, os condutores de seção retangular são utilizados em uma larga faixa de corrente, que varia de 40 à 500A, como por exemplo nos enrolamentos de baixa tensão dos transformadores de distribuição. A Figura 4 representa uma bobina com condutor redondo de cobre no enrolamento de alta tensão e, condutor de alumínio do tipo folha no enrolamento de baixa tensão.

Figura 4: Bobina com condutor circular de cobre no enrolamento de alta tensão e folha de alumínio no enrolamento de baixa tensão. Este enrolamento é chamado baixo-alto-baixo (LHL).



Fonte: IET Electr. Power Appl. (2010)

3.1.2 Material dos condutores

Segundo Heatchote (1998), as ligas de cobre e alumínio são feitas com o objetivo de aperfeiçoar algumas das propriedades dos condutores. O cobre é tradicionalmente utilizado nos transformadores, por ser o segundo (atrás da prata) melhor condutor de eletricidade e calor. A principal liga de cobre utilizada é a liga de cobre com prata, em que ao adicionar uma pequena parcela de prata (0,01%) no cobre tem-se um aumento muito significativo na condutividade térmica, com um efeito mínimo na condutividade elétrica. Esta liga também aumenta a força mecânica. Dentro dessa liga, o teor de cobre deve ser de no mínimo 99,9%. Quando a quantidade de estanho, alumínio, manganês, cromo, silício, cobalto, aço, ou fósforo são iguais ou o superior a 0,1%, ocorre a deterioração da condutividade elétrica em mais de 10%. Os enrolamentos dos transformadores geralmente são feitos com uma liga eletrolítica de cobre, C11000. O código de identificação dessa liga se refere a um sistema unificado de numeração, em que se usam cinco dígitos numéricos após a letra “C” para identificar precisamente a liga. Na liga C11000 é utilizado 99,95% Cu, 0,04%O₂ e menos que 50ppm de impurezas metálicas.

Existe também uma variedade de ligas de alumínio. O alumínio é altamente sensível a impurezas, tanto que uma queda de 10% da sua condutividade elétrica pode ser causada por 0,4% de magnésio, 0,1% de titânio ou 0,02 de manganês ou cromo (KARABAY, 2006). A liga de alumínio utilizada para condutores de energia é a liga 1350, com uma pureza de 99,5% e condutividade mínima de 61%. Essa liga é composta de 99,50Al_{min}, 0,10Si_{max}, 0,40Fe_{max}, 0,05Cu_{max}, 0,01Mn_{max}, 0,01Cr_{max}, 0,05Zn_{max}, 0,03Ga_{max}, 0,02V_{max} + Ti, 0,05B_{max}, 0,03 máx outros (cada), 0,10 máx outros (total).

3.2 Propriedades Físicas e Custos dos Enrolamentos de Cobre a Alumínio

Neste capítulo será comparado as principais propriedades físicas dos dois materiais, como pode ser observado na Tabela 2.

É importante notar que embora resistividade do cobre seja menor que a do alumínio, a sua densidade é bem maior que a do alumínio. Já o coeficiente de expansão do cobre é menor que o do alumínio, enquanto a sua condutividade é

maior que a do alumínio. Nota-se também que a resistência a tração do cobre é superior.

Tabela 2 – Propriedades físicas do cobre e do alumínio

Propriedades Físicas	Cobre	Alumínio
Resistividade [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]	0,016642	0,03
Densidade de massa [kg/dm^3]	8,89	2,7
Coefficiente de expansão [$\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$]	16,7	23,36
Condutividade térmica [W/mK]	398	210
Resistência a tração [MPa]	124	46,5
Ponto de fusão [$^\circ\text{C}$]	1084,88	660,4
Calor específico [J/kgK]	384,6	904

Fonte: Konrad (2001) e Totten, Mackenzie (2003)

É interessante comparar os custos dos materiais para a mesma resistência, para isso, o custo do enrolamento de cobre será expresso em função do custo do enrolamento do alumínio para uma mesma resistência. O comprimento do enrolamento do alumínio será um pouco maior que o comprimento do enrolamento de cobre para uma potência equivalente. Como o efeito do tamanho é pequeno comparado com os efeitos da área, preço e densidade, será assumido que o tamanho dos enrolamentos sejam iguais. Partindo do ponto que as resistências devem ser iguais, tem-se a seguinte Equação 1:

$$\rho_{cu} \cdot \frac{L}{S_{cu}} = \rho_{Al} \cdot \frac{L}{S_{Al}} \quad (1)$$

Em que ρ_{cu} ($\Omega \cdot \text{m}$), L_{cu} (m) e S_{cu} (m^2) são a resistividade, comprimento e área da seção transversal do condutor de cobre, respectivamente. E em que ρ_{al} ($\Omega \cdot \text{m}$), L_{al} (m) e S_{al} (m^2) são a resistividade, comprimento e área da seção transversal do condutor de alumínio, respectivamente. Usando a Equação 1, a equação da área da

seção transversal do condutor de alumínio pode ser dada em função da área do condutor de cobre:

$$S_{Al} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{cu}} \cdot S_{cu} \quad (2)$$

E ao substituir os valores das resistividades com os valores da Tabela 2, chegasse a seguinte relação:

$$S_{Al} \cong 1,80266 \cdot S_{cu} \quad (3)$$

A equação 3 mostra que para o enrolamento de alumínio ter a mesma resistência do enrolamento de cobre, a área da seção transversal do seu condutor, tem que ser 1,80266 vezes maior que a área do condutor de cobre. No entanto, para que possam serem comparado os preços dos materiais, é necessário saber a relação de preço ao invés da relação de área, para isso será feita a mesma comparação, só que agora com a relação de densidade de cada material. Assim chegasse nas Equações 4 e 5:

$$d_{cu} = \frac{m_{cu}}{v_{cu}} = \frac{m_{cu}}{L \cdot S_{cu}} \quad (4)$$

$$d_{Al} = \frac{m_{Al}}{v_{Al}} = \frac{m_{Al}}{L \cdot S_{Al}} \quad (5)$$

Em que m_{cu} (kg), m_{Al} (kg), v_{Al} (m³) e v_{cu} (m³) são a massa do cobre, massa do alumínio, volume do alumínio e volume do cobre respectivamente.

Ao combinar aa Equações 3, 4 e 5, obtêm-se a equação 6:

$$m_{cu} = \frac{1}{1,80266} \cdot \frac{d_{cu}}{d_{Al}} \cdot m_{Al} \quad (6)$$

Substituindo os valores da Tabela 2, tem-se a massa cobre em relação a massa do alumínio.

$$m_{cu} = 1,8265 \cdot m_{Al} \quad (7)$$

Como o alumínio é menos denso que o cobre, precisa-se de uma massa de cobre 1,8265 vezes maior que a massa do alumínio para ter-se a mesma resistência e o mesmo comprimento dos enrolamentos. Ou seja, notasse que para ter a mesma resistência e mesmo comprimento, é necessário um volume maior de alumínio, enquanto em termos de massa, é necessário mais cobre.

O custo total do enrolamento de alumínio e cobre P_{Al} (\$), P_{Cu} (\$) são dados pela Equação 8:

$$P_{Al} = m_{Al} \cdot c_{Al}, \quad P_{Cu} = m_{Cu} \cdot c_{Cu} \quad (8)$$

Em que c_{Al} (\$/kg) e c_{Cu} (\$/kg) são os custos unitários do alumínio e do cobre respectivamente. Combinando a Equações 7 e 8:

$$w = 1,8265 \cdot r \quad (9)$$

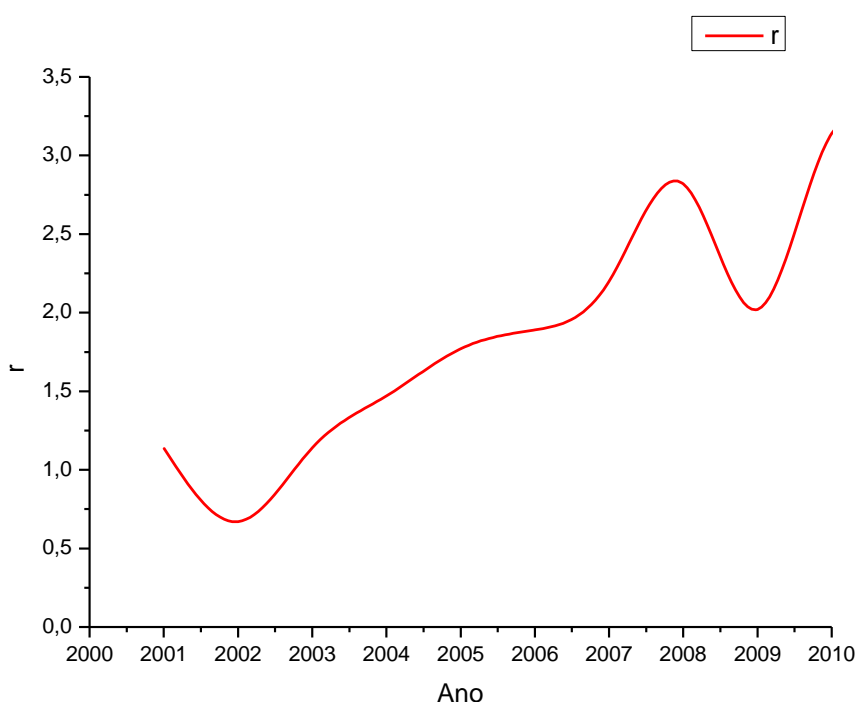
Em que:

$$w = \frac{P_{Cu}}{P_{Al}}, \quad r = \frac{c_{Cu}}{c_{Al}} \quad (10)$$

w é a razão do preço do enrolamento do cobre pelo enrolamento de alumínio e r é a razão do custo unitário do cobre pelo custo unitário do alumínio.

Se o custo unitário do cobre for o dobro do custo unitário do alumínio, ou seja, $r = 2$, significa que o enrolamento do cobre é 3,653 vezes mais caro que o enrolamento de alumínio para a mesma resistência e mesmo comprimento. O custo unitário do cobre é o dobro ou mais que o custo unitário do alumínio desde 2007, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5 - Razão do custo unitário do cobre pelo custo unitário do alumínio



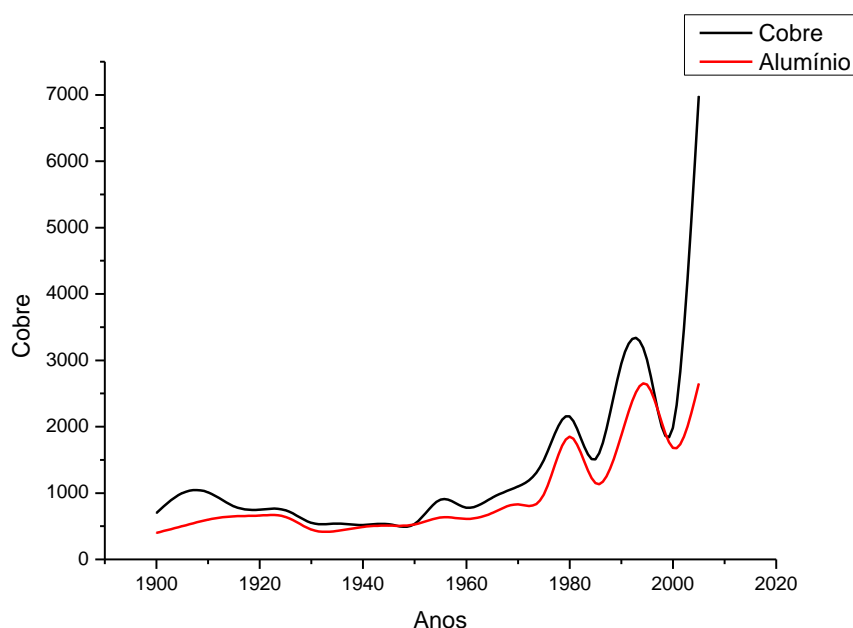
Fonte: MetalPrice (2017).

3.3 Evolução dos Preços dos Materiais ao Longo do Tempo

O preço dos materiais depende muito de sua disponibilidade, e isso varia de região para região. Se o país não produz determinado material, é necessário importar esse material, com isso, o preço desse material sobe conseqüentemente. O preço também está relacionado com as reservas e energia necessária durante o processo. Esses fatores se tornam mais importantes quando o material é escasso, ou quando é necessário processos custosos para realizar a sua extração.

O cobre apresenta diferentes cotações ao longo dos anos, se comportando de maneira extremamente instável. Esse tem sido um dos principais motivos do porque os transformadores de alumínio têm sido manufaturados. Ao observar a Figura 6, de 1990 à 2006, tanto o preço do alumínio, quanto o do cobre variaram bastante. Segundo Milton (2002) e Fraser (2005), os principais fatores que contribuíram para isso foram: Segunda Guerra Mundial, em que a indústria de cobre descobriu e desenvolveu uma grande quantidade de depósitos de cobre (particularmente no Chile), o dólar americano estava desvalorizado em relação ao peso chileno, produtores de cobre estavam aumentando com sucesso a sua produtividade e reduzindo seus preços com a introdução de um série de inovações e novas tecnologias, recordes de produção de alumínio, escassez de alumínio e colapso da União Soviética.

Figura 6: Preço do cobre e do alumínio em dólares americanos no tempo.



Fonte: MetalPrice (2017).

O preço do alumínio é mais baixo que o preço do cobre, e sua variação é menor que a variação de preço do cobre. Assim com o preço do cobre, o preço do alumínio também tem aumentado devido ao aumento de sua demanda. Alumínio não é encontrado na forma metálica, ele é encontrado na forma mineral. Portanto, o preço do alumínio depende muito do custo da energia, pois ele é obtido através da eletrólise, assim como o cobre.

3.4 Conectividade e Oxidação

O termo conectividade se refere ao quão fácil ou difícil é para fazer conexões elétricas. Isso é muito importante em um transformador, tendo em vista que a alta eficiência de um transformador pode ser perdida caso suas conexões sejam ruins.

Oxidação é a reação do metal com o oxigênio do ar formando os óxidos. Tanto o alumínio, quanto o cobre se oxidam quando estão expostos ao tempo. O alumínio é mais propenso a se oxidar, porque sua camada de valência é +3, enquanto a camada de valência do cobre é de +1. Isto explica porque o alumínio não existe como um metal na natureza.

O alumínio oxida quando exposto ao ar, formando uma camada de Al_2O_3 . Tal camada protege a parte mais interna do alumínio, funcionando como uma camada isolante, que faz com que a parte mais interna do alumínio não reaja com o ar. Isso significa que fazer uma conexão satisfatória com o alumínio é mais difícil do que fazer com o cobre.

Alguns métodos de emenda de fios de alumínio incluem soldagem ou crimpagem com crimps que penetram o esmalte, oxidam o revestimento e selam o oxigênio nas áreas de contato. A tira de alumínio ou condutor da tira podem ser gás inerte de tungstênio soldado. A tira de alumínio também pode ser soldada a frio ou crimpada a outro conector de cobre ou alumínio. Conexões parafusadas podem ser feitas em alumínio macio se a área de junção for propriamente limpa. Problemas de junções de alumínio são às vezes mitigados através do uso de guia de ligas duras com chapeamento de lata para fazer juntas aparafusadas usando o *hardware* padrão.

Quando dois pedaços de alumínio vão se unir por meio de solda de fusão, é necessária devida preparação. As pontas a serem unidas devem ser cortadas em formato quadrado, desengorduradas e limpas com um processo de escovagem. A fonte de calor deve ser proveniente de chamas de oxiacetileno, ou arco elétrico. Os fatores que afetam a soldagem do alumínio incluem o revestimento de oxido de alumínio, condutividade térmica, o coeficiente de expansão térmica, as características de soldagem, e condutividade elétrica (DAVIS, 1993).

3.5 Usinabilidade

Para Mills e Redford (1987), a usinabilidade é medida em unidade de potência. É a potência (HP) gasta por polegada cubica durante o processo do material. Para o alumínio, a usinabilidade é de 0,4HP/pol³/min, enquanto para o cobre é de 0,8HP/pol³/min. Nesse ponto, o alumínio possui vantagem com relação ao cobre, uma vez que a energia gasta durante o seu processo é a metade da energia gasta durante o processo do cobre. Um alto fator de usinabilidade reflete diretamente no custo, quanto maior for esse fator, maior será o desgastes das ferramentas utilizadas e maior será o tempo de trabalho.

A facilidade com que o material pode ser usinado é um dos fatores principais que afetam a utilidade do produto, sua qualidade e, custo. A utilidade de um meio para prever a usinabilidade é obvia. Infelizmente, a usinabilidade é um assunto tão complexo que não pode ser definida sem ambiguidade. Dependendo da aplicação, usinabilidade pode ser vista em termos de taxa de desgaste da ferramenta, potência total consumida, acabamento superficial atingível, além de vários outros pontos de referência.

A usinabilidade é fortemente dependente das propriedades físicas e mecânicas da peça a ser processada, os metais duros e frágeis são mais difíceis de serem usinados do que materiais dúcteis e macios. A usinabilidade é também fortemente dependente do tipo de geometria da ferramenta a ser utilizada, da operação de corte, da máquina ferramenta, da estrutura metalúrgica da ferramenta, e da peça de trabalho, do fluido de resfriamento e do maquinista, sua habilidade e experiência.

A principal causa de problemas na usinabilidade é o excesso de calor, isso surge através de aquecimento por fricção, ou insuficiência de resfriamento. Todas as ferramentas devem estar devidamente afiadas e em boas condições de trabalho. A geometria das ferramentas deve estar dentro dos requisitos exigidos pelas ligas de alumínio. O cortador deve possuir o número ideal de flautas e as melhores configurações de espiral para cada aplicação. A velocidade de corte deve ser tão alta e prática, com intuito de economizar tempo e minimizar em partes o aumento da temperatura. Quando a velocidade de corte aumenta acima de 30-60 m/min, a probabilidade de formar uma borda construída no cortador de borda é reduzida, o cavaco quebra mais facilmente, e o acabamento é melhorado. Em particular, uma velocidade de alimentação lenta, e altas velocidades de fuso são especialmente problemáticas. O fluxo adequado e contínuo de do fluido de corte aplicado nas arestas do corte são essenciais, nesse sentido, o fluido de corte deve ser aplicado antes de cortar e deve continuar até o cortador for removido da peça.

3.6 Comportamento Durante o Curto Circuito

Durante o curto circuito, a corrente aumenta drasticamente nos enrolamentos do transformador, e o aumento da corrente gera o aumento da temperatura. Quando a corrente é muito alta, a temperatura aumenta rapidamente. O ponto de fusão do alumínio é de 660,2°C, enquanto o do cobre é de 1084.88°C. No entanto, é mais importante considerar a velocidade de aumento da temperatura do que o ponto de fusão em si. Na Figura 7 é possível observar na curva a velocidade com que cada material eleva a sua temperatura com o aumento da corrente em um curto circuito de 4 segundos.

Segundo o IEC 60076-1, a curva de temperatura do cobre é dada por:

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 235)}{\frac{101000}{J^2 \cdot t} - 1} \quad (11a)$$

Enquanto que para alumínio:

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2(\theta_0 + 225)}{\frac{43600}{J^2 \cdot t} - 1} \quad (11b)$$

Em que:

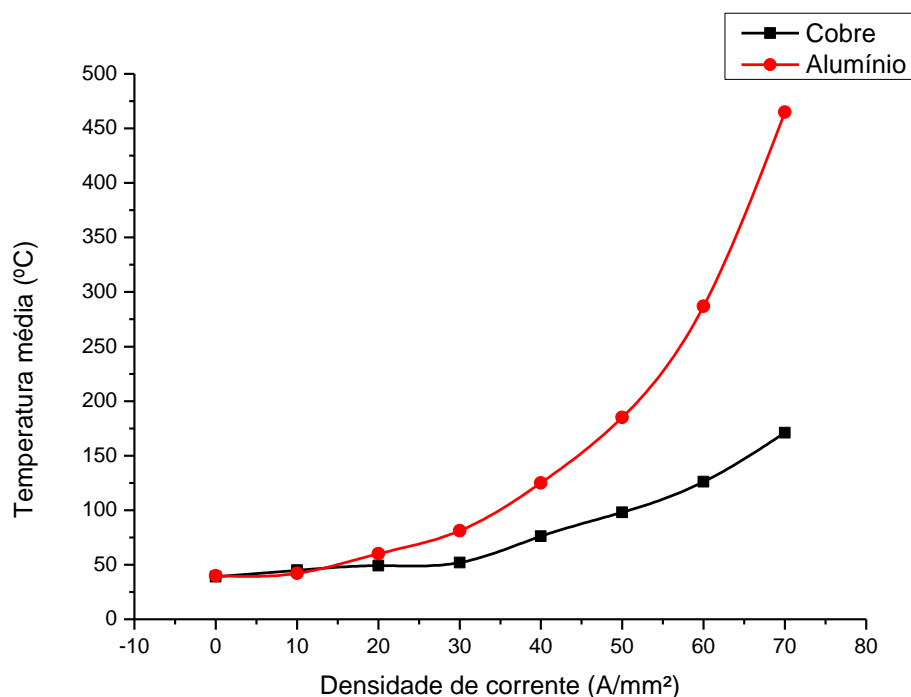
θ_0 : temperatura inicial [$^{\circ}\text{C}$];

θ_1 : temperatura final [$^{\circ}\text{C}$];

J : densidade de corrente de curto-circuito [A/mm^2];

t : tempo de duração [s] do curto-circuito.

Figura 7 – Temperatura média versus Densidade de corrente no cobre e no alumínio.



Fonte: IET Electric Power (2009)

As Equações 11a e 11b foram obtidas assumindo que todo o calor desenvolvido durante o curto circuito é retido no enrolamento, aumentando assim a sua temperatura, devido a curta duração do curto circuito ($<10\text{s}$). A corrente de curto circuito depende da porcentagem de impedância entre o transformador e o ponto de falta. Se a falta ocorrer nos terminais do transformador, apenas o percentual de impedância do transformador será considerado para o cálculo da corrente de falta.

Na Figura 7 é observada uma curva de aumento de temperatura em relação à densidade de corrente para cobre e alumínio, para uma duração de curto-circuito de 4s. Considerando um curto-circuito de 4s com uma densidade de corrente de $30\text{A}/\text{mm}^2$, a temperatura em um enrolamento de alumínio é $81,8^{\circ}\text{C}$, enquanto no cobre é de $54,95^{\circ}\text{C}$. O máximo para transformadores imersos em óleo com a temperatura do sistema de isolamento de 105°C (classe térmica A) é de 250°C para

o condutor de cobre, enquanto a temperatura máximas, nas mesmas condições, para o alumínio é de 200°C, sem levar em consideração às propriedades mecânicas.

É permitida uma temperatura máxima de 250°C para as ligas de alumínio que tenham resistência às propriedades de recozimento a 250°C equivalente ao condutor elétrico (CE) de alumínio a 200°C ou para as aplicações de CE de alumínio em que as características do material totalmente recozido satisfaçam os requisitos mecânicos (IEEE STANDART C57.12.00 – 2000, 2000). Esta temperatura limite é especificada principalmente para limitar o envelhecimento do isolamento do papel em contato com o condutor.

Foi demonstrado que o cobre de alta condutividade não seria amolecido durante a vida útil de um transformador por excursões ocasionais até 250°C mesmo se o cobre for deliberadamente trabalhado a frio para aumentar a sua resistência. O mesmo se aplica às usuais 99,5% de ligas de alumínio utilizadas como condutores (WATERS, 1966). O isolamento do transformador é queimado muito antes do alumínio ou cobre ser derretido. A expansão térmica dos condutores pode quebrar o isolamento ocasionando em uma falha no transformador.

Cobre e alumínio são os principais materiais utilizados nos enrolamentos dos transformadores. Se por um lado o alumínio é mais leve e geralmente mais barato que o cobre, por outro, é necessário uma seção transversal maior que a do cobre que haja o mesmo fluxo de corrente. O cobre possui maior força mecânica e é usado, quase exclusivamente, em grandes transformadores de potência, em que há a presença de forças extremas e, material como cobre de prata pode ser utilizado para dar ainda mais força. Em suma, os enrolamentos devem ser fortes o suficiente para suportarem as forças do curto circuito.

3.7 Comparação do Custo Total de Propriedade (TCO) dos Transformadores de Cobre e Alumínio

Projetistas de transformadores utilizam o TCO como uma função objetiva a fim de aperfeiçoar o projeto de transformador. Sua utilização é fundamental quando novos materiais são introduzidos nos projetos dos transformadores.

O custo total de um transformador é composto por diversos fatores que devem ser levados em consideração: o preço de compra, o preço das perdas de

energia, custo de manutenção e reparos durante sua vida útil, preço pago pela energia elétrica e sua desvalorização monetária de mercado (LEISINGER, 2009).

Quando comparamos dois transformadores de mesma potência com diferentes preços e diferentes perdas, temos que levar em consideração que o preço de compra será liquidado no momento da aquisição propriamente dita, enquanto os custos das perdas serão liquidados durante toda vida útil do transformador (CARLEN, 2010).

Normalmente os custos de compra são avaliados levando em consideração o preço do equipamento. Quando os transformadores são comparados com suas respectivas perdas de energia, o processo é chamado de avaliação de perdas. Em um processo de avaliação básica de transformadores, três aspectos devem ser contabilizados: Preço de compra, perdas com carga (ou perdas em curto-circuito) e perdas sem carga (ou perdas em vazio) (SILVA, PEPE, 2012).

Segundo Hulshorts (2002), o TCO para transformadores pode ser calculado pela Equação 12:

$$TCO = Prc + A \times Po + B \times Pcc \quad (12)$$

Em que:

Prc = Preço de compra do transformador;

Po = Perdas sem carga (vazio);

A = Fator referente as perdas sem cargas;

Pcc = Perdas com cargas (curto-circuito);

B = Fator referente as perdas com cargas.

Ainda segundo Hulshorts (2002), os fatores A e B são dados pelas Equações 13 e 14:

$$A = \frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} \times C_{KWh} \times 8760 \quad (13)$$

$$B = A \times fc^2 \quad (14)$$

Em que:

i = Taxa de juros percentuais;

C_{KWh} = Custo da eletricidade em KWh;

8760 = Número de horas em um ano;

n = Vida útil de um transformador em anos;

fc = Fator de carga do transformador.

Os cálculos dos fatores A e B será levada considerada as seguintes condições: taxa de juros percentuais = 7%, custo da energia em R\$0,40KWh que equivalem à aproximadamente \$0,11/KWh, com tempo de vida útil do transformador de 25 anos, e fator de carga do transformador de 50%, com isso têm-se $A = 11,23\$/W$ e $B = 2,80\$/W$.

O Preço de compra do transformador (Prc) é dado por:

$$Prc = \frac{CM + CMO}{1 - MV} = \frac{CF}{1 - MV} \quad (15)$$

Em que:

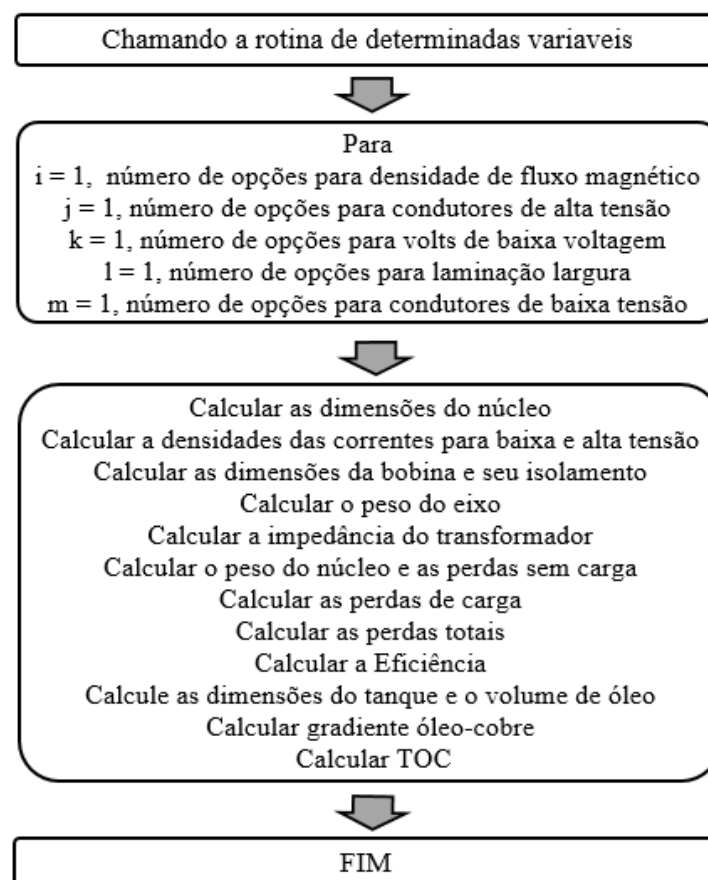
CM = Custo de materiais;

CMO = Custo de mão de obra;

MV = Margem de Vendas;

CF = Custo de fabricação.

Figura 8 - Fluxograma simplificado para *TDO* usando *TCO* como a função objetivo



Fonte: IET Electric Power Applications (2009).

Segundo Georgilakis (2009), objetivo da otimização de projeto de transformador (*TDO*) é projetar o transformador de modo a minimizar o *TCO* sujeito a várias restrições: (a) restrições de construção e (b) as seguintes restrições de operação: perdas máximas sem carga, perdas totais máximas, valor de impedância máxima e mínima e limite máximo na corrente de magnetização. A metodologia de otimização é baseada em um método de design múltiplo que atribui muitos valores alternativos aos parâmetros de projeto. Os resultados *TDO* deste trabalho foram obtidos com um programa de computador *TDO* validado em campo que tem sido usado há alguns anos em uma fábrica de transformadores de tamanho médio. A Figura 8 mostra o fluxograma para minimizar *TCO*.

Tabela 3 - Resultados do *TCO* para transformadores de cobre (custo de cobre = 6,473\$/kg, fonte: MetalPrices.com).

Parâmetros	Potência nominal do transformador [kVA]							
	5	10	15	30	45	75	112,5	150
Perda sem carga [W]	26,7	39,8	52,65	82,57	112,16	161,22	216,05	259,71
Perda com carga [W]	56,7	107,3	130,55	241,64	331,98	487,16	654,75	807,33
Custo do enrolamento AT (\$)	59,8	86,8	126,33	200,11	269,94	344,36	443,52	569,28
Custo do enrolamento BT (\$)	128,4	93,7	158,02	219,77	258,85	314,28	467,35	721,68
Custo do núcleo (\$)	97,3	147,6	195,47	309,53	411,44	643,43	892,68	1032,25
Volume de óleo, l	25,2	36,9	44,06	53,48	73,22	90,81	102,78	109,31
Outros custos de materiais (\$)	48,2	55,6	63,85	83,22	92,22	113,45	137,34	149,83
Custo total do material (\$)	333,7	383,7	543,67	812,63	1032,45	1415,52	1940,89	2473,04
Custo de mão-de-obra	33,37	38,37	54,37	81,26	103,25	141,55	194,09	247,30
Custo de fabricação (\$)	367,07	422,07	598,04	893,89	1135,70	1557,07	2134,98	2720,34
Preço de compra do transformador (\$)	564,72	649,34	920,06	1375,22	1747,22	2395,50	3284,58	4185,14
Custo de perda sem carga (\$)	299,84	446,95	591,26	927,26	1259,56	1810,50	2426,24	2916,54
Custo de perda com carga (\$)	158,76	300,44	365,54	676,59	929,54	1364,05	1833,30	2260,52
<i>TCO</i> (\$)	1023,32	1396,73	1876,86	2979,07	3936,32	5570,04	7544,12	9362,21

$A = \$ 11,23/W$, $B = \$ 2,80/W$, são valores baseados nos dados da COPEL de junho de 2017, a margem de vendas é de 35% e o custo de mão-de-obra é de 10% do custo total do material.

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4 - Resultados do TCO para transformadores de alumínio (custo de alumínio = 1,869\$/kg, fonte: MetalPrices.com)

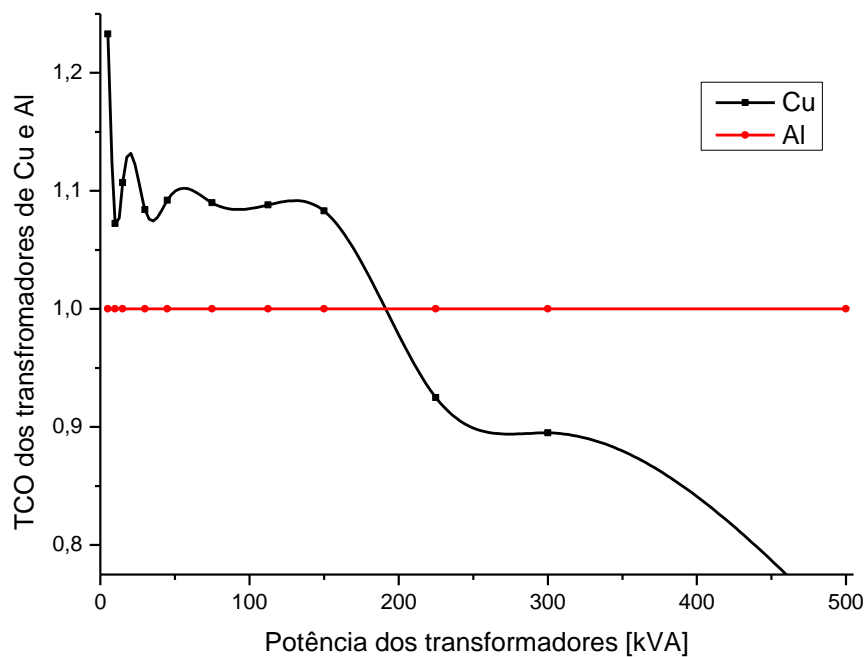
Parâmetros	Potência nominal do transformador [kVA]							
	5	10	15	30	45	75	112,5	150
Perda sem carga [W]	28,98	46,84	59,69	96,17	126,31	176,20	235,17	287,89
Perda de carga [W]	68,08	99,21	150,90	244,13	340,99	493,62	697,66	962,87
Custo do enrolamento AT (\$)	8,19	18,69	25,43	47,50	59,09	76,39	87,97	74,67
Custo do enrolamento BT (\$)	11,04	24,57	21,21	59,71	65,07	78,22	97,74	103,52
Custo do núcleo (\$)	109,60	173,91	225,71	357,07	468,96	714,89	1004,37	1229,53
Volume de óleo [l]	33,47	50,53	56,89	82,68	96,68	128,83	161,36	170,71
Outros custos de materiais (\$)	56,62	77,48	83,51	116,39	135,25	162,85	191,80	198,92
Custo total do material (\$)	185,45	294,65	355,86	580,67	728,37	1032,35	1381,88	1606,64
Custo de mão-de-obra	18,55	29,47	35,59	58,07	72,84	103,24	138,19	160,66
Custo de fabricação (\$)	204,00	324,12	391,45	638,74	801,21	1135,59	1520,07	1767,30
Preço de compra do transformador (\$)	313,84	498,64	602,22	982,67	1232,63	1747,05	2338,57	2718,93
Custo de perda sem carga (\$)	325,45	526,01	670,32	1079,99	1418,46	1978,73	2640,96	3233,00
Custo de perda com carga (\$)	190,62	277,79	422,52	683,56	954,77	1382,14	1953,45	2696,04
TCO (\$)	829,91	1302,44	1695,06	2746,23	3605,86	5107,92	6932,97	8647,97

A = \$ 11,23/W, B = \$ 2,80/W, são valores baseados nos dados da COPEL de junho de 2017, a margem de vendas é de 35% e o custo de mão-de-obra é de 10% do custo total do material.

Fonte: Autoria Própria.

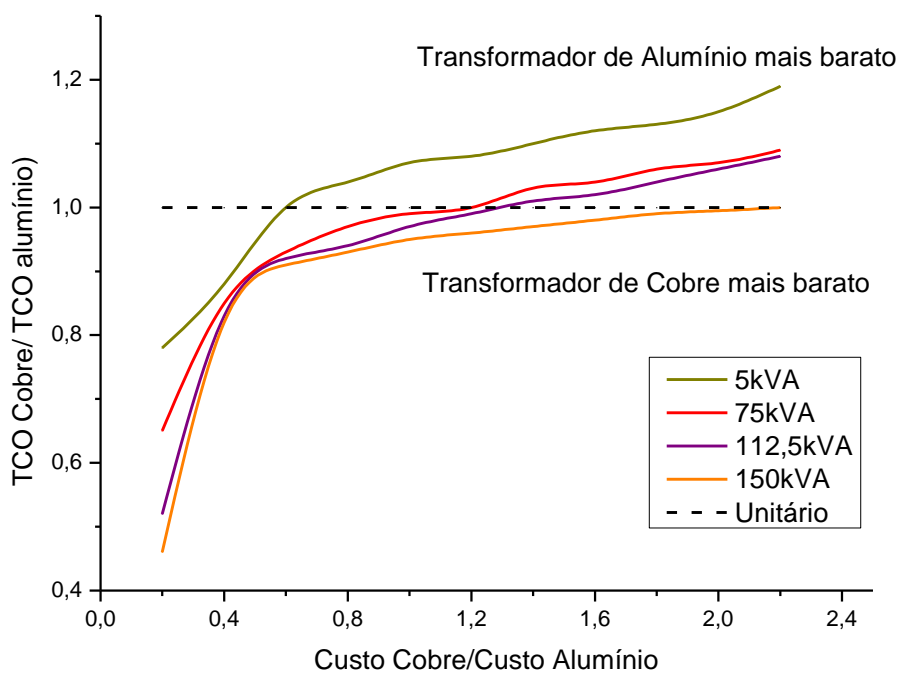
Compara-se o uso de enrolamentos de alumínio em uma gama mais ampla de transformadores de distribuição até 200kVA com os seguintes preços: condutor de cobre 6,473\$/kg e; condutor de alumínio 1.869\$/kg (junho de 2017). Observa-se que os transformadores de alumínio possuem um menor custo para transformadores de menor porte, mas à medida que o valor do transformador aumenta, a vantagem do alumínio é reduzida (Figura 9). Os resultados da Figura 9 mostram que para transformadores de 190kVA e superiores, o cobre é melhor do que o alumínio porque TCO de transformadores de cobre é menor (devido ao fato do cobre necessitar menos material de núcleo, menos isolamento, menos aço estrutural para o tanque de óleo e menos óleo).

Figura 9 - Relação do TCO (\$) entre transformadores de cobre e alumínio em função da classe do transformador [kVA]



Fonte: Autoria Própria.

Figura 10 - Proporção de TCO (\$) entre transformadores de cobre e alumínio em função da relação custo unitário de cobre (\$/kg) sobre o custo de alumínio (\$/kg) para 5, 75, 112,5 e 150kVA, transformadores de fase.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 10 mostra uma comparação paramétrica de custos de quatro transformadores, sendo um deles monofásico (5kVA) e três trifásicos (75, 112,5 e 150kVA) em função da relação custo/alumínio com perdas totais equivalentes. A relação de custos cobre / alumínio varia de 0,2 a 2,2. Com a figura 10, observa-se que para cada classe, há um ponto diferente onde o *TCO* do transformador de alumínio é menor que o *TCO* do transformador de cobre.

O ponto de ruptura é quando o *TCO* do transformador de cobre é igual ao *TCO* do transformador de alumínio. Correspondendo à intersecção das curvas da Figura 10 com a linha pontilhada (Unitário).

Portanto, os pontos com *TCO* cobre/*TCO* alumínio abaixo de 1 correspondem aos casos em que os transformadores de cobre são menos dispendiosos, enquanto os pontos acima de 1 correspondem aos casos em que os transformadores de alumínio são menos dispendiosos. Por exemplo, a curva correspondente aos transformadores de 5kVA. Se a relação custo unitário de cobre (\$/kg) dividido pelo custo unitário de alumínio (\$/kg) é de até 0,6, ou seja, quando o alumínio custa 1,67 vezes a mais que o cobre (\$/kg), é menos oneroso a utilização de cobre para os enrolamentos. Comparando isso com o transformador de 112,5kVA, neste caso, transformadores de cobre são mais baratos do que os transformadores de alumínio para uma relação de cobre sobre o custo unitário de alumínio de até aproximadamente 1,3. Para o transformador de 150kVA, é melhor construir transformadores com enrolamento de cobre até quando o custo unitário de cobre / custo de unidade de alumínio é de 2,2, como mostrado na Figura 10.

É importante salientar que pode haver ocasiões em que não é conveniente fabricar transformadores de distribuição com enrolamentos de alumínio, como por exemplo, quando tais transformadores excederem as dimensões máximas para o transporte e/ou as dimensões máximas especificadas nas normas.

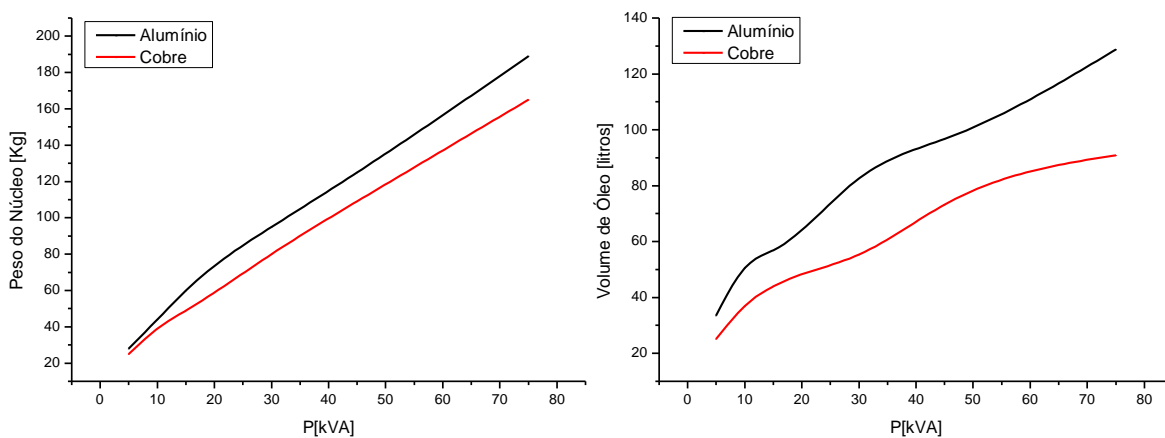
Além dos resultados já apresentados, têm-se as seguintes conclusões interessantes:

- O comprimento de um enrolamento de alumínio é em média 15% maior do que o comprimento de um enrolamento de cobre para a mesma potência.
- Um transformador de alumínio requer em média 20% mais peso do núcleo (Figura 11);
- O peso dos enrolamentos de alumínio é, em média, 25% menor do que o peso dos enrolamentos de cobre. Para determinar esta média, é utilizada a seguinte

expressão para cada classificação de transformador: (peso dos enrolamentos de Cu - peso dos enrolamentos de Al)/peso dos enrolamentos de Cu.

Um transformador de alumínio requer 45% mais óleo do que um transformador de cobre. Esta conclusão permitiu a utilização de alumínio no enrolamento para transformadores de potência de tipo seco.

Figura 11 – Relação do peso do núcleo e quantidade de óleo para transformadores com enrolamento de cobre e alumínio.



Fonte: Autoria Própria.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma comparação de transformadores de distribuição com enrolamentos construídos de cobre e alumínio. As vantagens e desvantagens dos dois materiais são avaliadas com base na condutividade, densidade de massa, custo, conectividade, oxidação, usinabilidade e comportamento em curto-circuito. A seleção entre o uso de cobre ou alumínio não é uma tarefa fácil, uma vez que muitos fatores podem ser considerados. Foi apresentada uma análise paramétrica de projetos de transformadores em função do custo do cobre contra o alumínio.

O trabalho estabelece a faixa de custo do material do enrolamento para diferentes classes de potências de transformadores, indicando quando é mais econômico construir os enrolamentos do transformador com cobre ou alumínio. Com base na ferramenta TCO, que permite avaliar o custo do transformador a partir do preço de compra, perdas, custo de mão de obra e vida útil típica. A análise mostra que usando os preços de junho 2017, de custo unitário, o alumínio é a melhor escolha para enrolamento do transformador para transformadores com potência nominal inferior a 190kVA. Por outro lado, para transformadores com potência maior ou igual à 190kVA, o cobre é melhor do que o alumínio, em que o TCO dos transformadores de cobre é menor, uma vez que o cobre permite o uso de menos material de núcleo, isolamento, aço estrutural para o tanque de óleo e menos óleo.

REFERÊNCIAS

CARLEN, M.; XU, D.; CLAUSEN, J.; NUNN, T.; TAMANAN, V. R.; GETSON, D., **Ultra High Efficiency Distribution Transformers**, IEEE-PES T&D, New Orleans, 2010.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2012.

DAVIS J.R. **Aluminum and aluminum alloys, ASM specialty handbook**. ASM International Handbook Co,mmittee, 1993.
Disponível em: <www.matelprice.com>. Acesso:<23-abr-2018>.

EQUIPE LINCE. **O que é o TCO (Custo Total de Propriedade)?**. Disponível em: <<http://www.linceservicos.com.br/o-que-e-custo-total-de-propriedade-tco/>>. Acesso em: 06. Out. 2017.

FRASER M., **Aluminium prices: what should we expect?**. Proc. 72nd Ann. Meeting of the Aluminium Association, Naples, Florida, October 2005.
GEORGILAKIS P.S., **Spotlight on modern transformer design**, (Springer, London, 2009)

HEATCHOTE M.J. **The J & P transformer book**. Newnes, 1998, pp. 55–59

HULSHORST, W. T. J.; GROEMAN, J. F., **Energy Saving in Industrial Distribution Transformer**, Kema Nederland B.V. Arnhem, Leonardo da Vinci Energy. 2002.

IEC Standard 60076–5., **Power transformers: Part 5 – Ability to withstand short-circuit**, 3rd edn., Reference number IEC 60076–5:2006(E).

IEEE Standard C57.12.00 –2000., **General requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers**. Transformers Committee of the IEEE Power Engineering Society, 2000.

KARABAY S. **Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for allaluminium alloy conductors**. Mater. Des., 27, 2006, pp. 821–832

KONRAD J.A. (ED.). **Copper: its trade, manufacture, use and environmental status**. International Copper Association, 2001.

LEISINGER, T. P. W., **Calculating a Teal cost of Ownership for Transformers**. CSE – Consulting Specifying Engineer, Pure Power, 2009.

LEONARDO ENERGY BRASIL. **Por que usar o cobre em vez de alumínio em transformadores de potência ?**. Disponível em: <<http://leonardo-energy.org.br/wp-content/uploads/download-manager-files/9%20-%20Por%20Que%20usar%20Cobre%20em%20vez%20de%20Aluminio%20em%20Transformadores%20de%20Potencia.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2017.

MAMEDE FILHO, João. **Manual de equipamentos elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005

MILLS B., REDFORD A.H. **Machinability of engineering materials**. Applied Science Publishers, London/New York, 1987.

MILTON J.E., **Long-term trends in copper prices**. Mining Eng., 2002, 54, (7), pp. 25–32.

OLIVARES J.C., LIU Y., CANEDO J.M., ESCALERA-PE´ REZ R., DRIESEN J., MORENO P.: **‘Reducing losses in distribution transformers’**, IEEE Trans. Power Deliv., 2003, 18, (3), pp. 821–826.

PRYOR, L.; SCHLOBOHM, R.; BROWNELL, B. **A COMPARISON OF ALUMINUM VS. COPPER USED IN ELETRICAL EQUIPAMENT**. GE Consumer & Industrial.

SALUSTIANO, R; MARTÍNEZ, M. L. B. **Estado da Arte Sobre o Uso de Condutores em Cobre e Alumínio na Fabricação de Transformadores de Distribuição**. 8f. Artigo – Universidade Federal de Itajubá, 2012.

SHUGG W.T. **Handbook of electrical and electronic insulations materials**. Van Nostrand Reinhold Company, 1986, p. 179

SILVA, E. P.; PEPE, I. M. **Estudo de Relações entre Perdas e Custo Total de Propriedade em Transformadores no Contexto da Eficiência Energética**. VII CONNEPI, Tocantins 2012.

TOTTEN G.E., MACKENZIE D.S. (EDS.), **Handbook of aluminium Physical Metallurgy and Processes**, Marcel Dekker, NY, 2003, vol. 1

WATERS M. **The short-circuit strength of power transformers**. (Macdonald & Co., London, 1966)

WLADIKA, Walmir Eros. **Curso técnico em eletrotécnica, módulo 2, livro 9: especificações e aplicação de materiais**. Curitiba: Base Didáticos, 2008.