

**EFEITO DOS MATERIAIS CONDUTORES NAS PERDAS DE ENROLAMENTO EM
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO****EFFECT OF CONDUCTIVE MATERIALS ON WINDING LOSSES IN DISTRIBUTION
TRANSFORMERS****EFFECTO DE LOS MATERIALES CONDUCTORES EN LAS PÉRDIDAS DE ENROLLAMIENTO EN
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN**

Weverson Cirino¹; Jheneffer T. O. Bentes²; Matheus D. F. Ferreira³; Yasmin S. D. Silva⁴

¹Universidade do Estado do Amazonas; weverson.cirino@gmail.com

²Universidade do Estado do Amazonas; j tob.eng22@uea.edu.br

³Universidade do Estado do Amazonas; mdff.eng22@uea.edu.br

⁴Universidade do Estado do Amazonas; ydsd.eng22@uea.edu.br

Resumo: Transformadores são equipamentos fundamentais na distribuição de energia elétrica, e a escolha adequada dos materiais utilizados em seu projeto é essencial para garantir a eficiência do sistema. Este artigo analisa comparativamente as perdas ôhmicas nos enrolamentos de transformadores de distribuição, utilizando condutores de cobre e alumínio. A pesquisa foi desenvolvida por meio de modelagem matemática e simulações computacionais, considerando a influência da temperatura na resistência elétrica dos materiais. Os resultados mostram que o cobre apresenta menores perdas por efeito Joule em comparação ao alumínio, mesmo quando este possui seção transversal maior para suportar a mesma corrente. No entanto, o alumínio destaca-se por seu menor custo e peso, o que pode torná-lo vantajoso em determinadas aplicações. A escolha do material deve considerar o equilíbrio entre desempenho elétrico, eficiência energética e viabilidade econômica.

Palavras-chave: transformadores, perdas ôhmicas, cobre, alumínio, eficiência energética.

Abstract: Transformers are fundamental equipment in the distribution of electrical energy, and the appropriate choice of materials used in their design is essential to ensure system efficiency. This article comparatively analyzes the ohmic losses in the windings of distribution transformers using copper and aluminum conductors. The research was developed through mathematical modeling and computer simulations, considering the influence of temperature on the electrical resistance of the materials. The results show that copper has lower Joule losses compared to aluminum, even when the latter has a larger cross-section to support the same current. However, aluminum stands out for its lower cost and weight, which can make it advantageous in certain applications. The choice of material should consider the balance between electrical performance, energy efficiency, and economic viability.

Keywords: transformers, ohmic losses, copper, aluminum, energy efficiency.

Resumen: Los transformadores son equipos fundamentales en la distribución de energía eléctrica, y la elección adecuada de los materiales utilizados en su diseño es esencial para garantizar la eficiencia del sistema. Este artículo analiza comparativamente las pérdidas óhmicas en los devanados de los transformadores de distribución, utilizando conductores de cobre y aluminio. La investigación se llevó a cabo mediante modelos matemáticos y simulaciones computacionales, teniendo en cuenta la influencia de la temperatura en la resistencia eléctrica de los materiales. Los resultados muestran que el cobre presenta menores pérdidas por efecto Joule en comparación con el aluminio, incluso cuando este último tiene una sección transversal mayor para soportar la misma corriente. Sin embargo, el aluminio destaca por su menor costo y peso, lo que puede hacerlo ventajoso en determinadas aplicaciones. La elección del material debe considerar el equilibrio entre rendimiento eléctrico, eficiencia energética y viabilidad económica.

Palavras clave: transformadores, pérdidas óhmicas, cobre, alumínio, eficiencia energética.

1. INTRODUÇÃO

Os transformadores de distribuição possuem uma grande importância nos sistemas elétricos de potência, sendo responsáveis por adequar os níveis de tensão para o uso em ambientes residenciais, comerciais e industriais. Dentre seus diversos componentes, os enrolamentos (ou bobinas) destacam-se por sua relevância funcional, já que conduzem a corrente elétrica necessária para a geração do campo magnético que percorre o núcleo do transformador.

No entanto, por serem compostos por materiais condutores, como o cobre e o alumínio, esses enrolamentos estão sujeitos a perdas de energia devido ao efeito Joule, fenômeno resultante da resistência elétrica à passagem de corrente. Essas perdas resistivas contribuem diretamente para a redução da eficiência do equipamento, sendo influenciadas por fatores como a resistividade do material e a temperatura de operação. Controlar essas perdas é essencial para garantir o desempenho, a durabilidade e a confiabilidade do transformador.

Diante disso, a escolha adequada do material condutor torna-se um aspecto crítico no projeto de transformadores, especialmente quando se busca um equilíbrio entre desempenho técnico e viabilidade econômica. Enquanto o cobre oferece excelente condutividade elétrica e resistência mecânica, o alumínio surge como alternativa atrativa devido ao seu menor custo e peso, embora com maior resistividade.

Este artigo tem como objetivo comparar as perdas óhmicas nos enrolamentos de transformadores de distribuição utilizando condutores de cobre e alumínio. Por meio da análise das propriedades elétricas, térmicas e geométricas dos materiais, associada a modelagens matemáticas e simulações computacionais, busca-se avaliar o impacto da temperatura sobre o desempenho de cada material e fornecer subsídios técnicos para decisões mais eficientes no projeto e na manutenção de transformadores.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O cobre é um metal amplamente utilizado devido à sua elevada condutividade elétrica, excelente resistência à corrosão e boa conformabilidade. O cobre puro, especialmente o do tipo OFHC (*Oxygen-Free High Conductivity*), é o condutor metálico mais utilizado em aplicações elétricas, graças à sua baixa resistividade e alta pureza química.

Apesar de ser um metal macio e dúctil, o cobre pode ter suas propriedades mecânicas melhoradas por meio do trabalho a frio ou pela formação de ligas. Entre suas ligas mais comuns estão os latões (cobre-zinco) e os bronzes (cobre-estanho ou cobre com outros elementos como alumínio e silício), que são aplicados em cartuchos, bijuterias, instrumentos

musicais, trocadores de calor, entre outros.

Além disso, ligas como o cobre-berílio apresentam excelente combinação de resistência mecânica, resistência à corrosão e condutividade, sendo utilizadas em aplicações exigentes como trens de pouso e instrumentos cirúrgicos.

No entanto, o alumínio é caracterizado por sua baixa massa específica ($2,7 \text{ g/cm}^3$), alta condutividade térmica e elétrica, e excelente resistência à corrosão em diversos ambientes. Sua estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada) confere alta ductilidade, mesmo em temperaturas muito baixas.

Embora sua condutividade elétrica seja cerca da metade da do cobre, o alumínio é amplamente empregado como condutor elétrico devido à sua leveza e custo reduzido. As ligas de alumínio, tanto fundidas quanto forjadas, são comuns em indústrias aeronáutica, automobilística e de embalagens (como latas de bebidas).

Entretanto, a principal limitação do alumínio é sua baixa temperatura de fusão (660°C), o que restringe sua aplicação em ambientes de alta temperatura.

Dentro de transformadores, tanto o cobre quanto o alumínio são empregados nos enrolamentos condutores (Figura 1). O critério de seleção entre eles envolve um equilíbrio entre condutividade elétrica, densidade, custo e desempenho térmico.



Figura 1 – Enrolamentos em transformadores trifásicos.

Fonte: <https://www.transformadorelectrico.com.br/transformador-de-baixa-tensao>;
<https://www.solucoesindustriais.com.br/lista/transformador-trifasico-de-3-enrolamentos>.

O cobre é geralmente o mais escolhido devido à sua maior condutividade elétrica (reduzindo perdas ôhmicas), maior resistência mecânica (importante para suportar forças eletromagnéticas internas) e menor coeficiente de expansão térmica, o que melhora a confiabilidade sob variações de carga. Já o alumínio, embora apresente menor condutividade, é utilizado em transformadores onde o peso e o custo são fatores limitantes, especialmente em equipamentos de grande porte e menor criticidade técnica.

A escolha entre os dois materiais impacta diretamente no projeto térmico, nas perdas internas (especialmente as joule) e na eficiência global do transformador. Devido à menor densidade, o alumínio permite economia em peso estrutural, mas exige maior seção transversal para compensar a menor condutividade elétrica, o que pode implicar em maiores dimensões dos enrolamentos.

3. METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem teórico-analítica, estruturada em três etapas principais: levantamento bibliográfico, modelagem matemática e simulação computacional.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica com ênfase na norma IEEE Std C57.12.00 (IEEE, 2015) e em publicações especializadas (CHAPMAN, 2007; DEL VECCHIO et al., 2010), para identificar os principais parâmetros técnicos envolvidos nas perdas em enrolamentos de transformadores de distribuição.

Em seguida, elaborou-se a modelagem matemática das perdas ôhmicas nos enrolamentos, com base na expressão clássica:

$$P = I^2 \times R \quad (\text{equação 1})$$

em que P é a potência dissipada (W), I é a corrente (A) e R é a resistência do enrolamento (Ω). A resistência foi calculada por:

$$R = \rho \times \frac{l}{A} \quad (\text{equação 2})$$

sendo ρ a resistividade do material (Ω/m), l o comprimento do fio (m) e A área da seção transversal (m^2). Para garantir condições operacionais equivalentes, considerou-se que o enrolamento de alumínio possuía seção transversal maior do que o de cobre, a fim de suportar a mesma corrente nominal.

Além disso, foi aplicada uma correção térmica à resistividade, com a seguinte relação:

$$\rho_t = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)] \quad (\text{equação 3})$$

onde ρ_0 é a resistividade a 20 °C, α é o coeficiente de temperatura linear ($0,00393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para o cobre e $0,00403 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para o alumínio), T a temperatura de operação e $T_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Na terceira etapa, foi realizada uma simulação computacional no ambiente MATLAB, utilizando dados hipotéticos coerentes com a literatura. A simulação considerou dois cenários:

- Enrolamento de cobre: resistividade de $1,68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$;
- Enrolamento de alumínio: resistividade de $2,82 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$;

Foram variáveis da simulação:

- Temperatura de operação: 20 °C a 80 °C;
- Corrente de carga: 100 A (fixa);
- Dimensões típicas de enrolamento para transformadores de distribuição.

As simulações calcularam as perdas ôhmicas em função da temperatura para ambos os materiais, e os resultados foram apresentados em gráficos comparativos.

Opcionalmente, foi considerado um fator de correção para incorporar perdas adicionais relacionadas aos efeitos de frequência, conforme proposto por Dowell (1966), mas

com foco principal nas perdas por efeito Joule, dada sua maior representatividade nas aplicações em transformadores de distribuição.

4. RESULTADOS

A análise foi realizada com base nas expressões matemáticas descritas na metodologia, considerando variações de temperatura e características físicas dos materiais.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros elétricos utilizados para o cálculo da resistência dos condutores e, consequentemente, das perdas Joule.

Tabela 1. Parâmetros utilizados.

Parâmetros	valor (Cobre)	Valor (Alumínio)	Fonte / Referência
Resistência a 20°C (ρ_0)	$1.68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	$2.82 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$	IEEE Std C57.12.00 (2015); CHAPMAN
Coeficiente de temperatura linear (α)	0,00393 $^{\circ}C^{-1}$	0,00402 $^{\circ}C^{-1}$	CHAPMAN (2007); DEL VECCHIO et al
Temperatura inicial (T_0)	20 $^{\circ}C$	20 $^{\circ}C$	Padrão
Faixa de temperatura analisada	20 a 80 $^{\circ}C$	20 a 80 $^{\circ}C$	Hipótese
Corrente elétrica (I)	100 A	100 A	Estudo simulado
Comprimento do fio (l)	50 m	50 m	Estudo simulado
Área da seção transversal (A)	$80 \times 10^{-6} m^2$	$127 \times 10^{-6} m^2$	Equivalência de capacidade condutiva

Fonte: o(s) autor(es).

Com os dados acima, foi possível calcular a resistência dos condutores em função da temperatura, utilizando a equação de correção térmica:

$$R_t = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20)] \quad (\text{equação 4})$$

A Figura 2 mostra a variação da resistividade dos condutores de cobre e alumínio com a temperatura variando de 20 $^{\circ}C$ a 80 $^{\circ}C$:

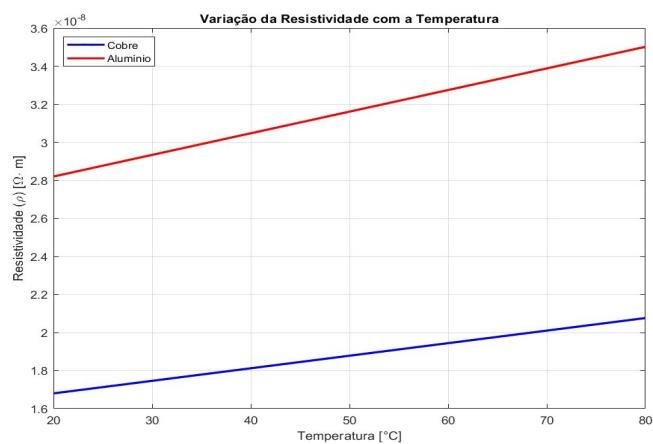


Figura 2 – Gráfico da variação da resistividade com a temperatura.

Fonte: o(s) autor(es).

Como esperado, o condutor de alumínio apresenta resistência superior ao do cobre em todas as faixas de temperatura, mesmo com maior área de seção transversal. A diferença se acentua com o aumento da temperatura devido ao maior coeficiente térmico do alumínio. Utilizando a equação de correção térmica:

$$R_t = R_{20^\circ} [1 + \alpha \cdot (T - 20)]$$

Foi possível realizar os cálculos das perdas por efeito joule:

$$P = I^2 \cdot R_t$$

Os valores médios de perdas para cada material, na faixa de temperatura avaliada, estão de acordo com a Figura 3, onde mostra a variação das perdas nos condutores de cobre e alumínio com a variação da temperatura, de 20 °C a 80 °C:

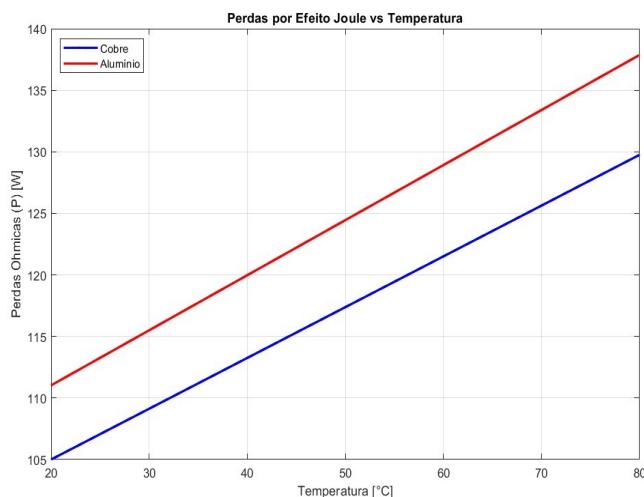


Figura 3 – Gráfico das perdas por efeito joule versus temperatura.

Fonte: o(s) autor(es).

Observa-se que o enrolamento de alumínio apresenta aproximadamente mais perdas ôhmicas que o de cobre nas mesmas condições de corrente. Esse resultado corrobora a literatura técnica (IEEE, 2015; CHAPMAN, 2007), que destaca a superioridade elétrica do cobre em aplicações onde a eficiência energética é prioritária.

Contudo, apesar das maiores perdas, o alumínio apresenta vantagens econômicas e logísticas, como menor custo por kg e menor densidade, o que reduz o peso total do transformador. Tais fatores podem justificar sua aplicação em cenários onde o custo inicial tem maior peso que a eficiência a longo prazo.

5. DISCUSSÕES

Os resultados obtidos por meio da modelagem matemática e simulação computacional evidenciam diferenças significativas no comportamento dos materiais cobre e alumínio quanto às perdas ôhmicas em transformadores de distribuição. A resistência maior apresentada pelo alumínio, mesmo com aumento da seção transversal, implicou em perdas elétricas cerca de 64% superiores às do cobre, para a mesma corrente de operação.

Esse desempenho inferior do alumínio está diretamente relacionado à sua maior resistividade elétrica, além de um coeficiente térmico de resistividade ligeiramente mais elevado, o que acentua a elevação da resistência com o aumento da temperatura. Como os transformadores operam por longos períodos por efeito de carga contínua, mesmo pequenas diferenças de resistência representam grandes impactos cumulativos nas perdas totais e na eficiência energética ao longo da vida útil do equipamento.

Apesar disso, a escolha do material do enrolamento não se limita aos aspectos elétricos. O alumínio possui densidade significativamente menor que o cobre, resultando em transformadores mais leves, o que facilita o transporte e a instalação, especialmente em áreas remotas ou em estruturas de poste. Além disso, o custo por quilograma do alumínio é inferior ao do cobre, o que pode reduzir o custo de fabricação inicial do transformador (CHAPMAN, 2007; IEEE, 2015).

Outro aspecto importante é a durabilidade e confiabilidade mecânica dos terminais e conexões. O cobre, por possuir maior resistência mecânica e menor tendência à oxidação, tende a apresentar melhor desempenho em aplicações de alta confiabilidade ou sob condições ambientais adversas.

Portanto, a escolha entre cobre e alumínio deve considerar o perfil da aplicação, os custos de aquisição e operação, os requisitos de eficiência energética e as condições ambientais. Em sistemas onde a eficiência e a confiabilidade são prioritárias, o cobre se mostra mais vantajoso. Por outro lado, em situações de restrição orçamentária ou exigência de leveza, o alumínio pode ser uma alternativa viável, desde que projetado com as devidas compensações dimensionais.

6. CONCLUSÃO

Diante disso, a análise das perdas em função da temperatura evidenciou que o cobre mantém desempenho superior em toda a faixa de operação simulada, o que implica diretamente em maior eficiência energética, menor aquecimento dos enrolamentos e vida útil mais longa do equipamento. Além disso, as menores perdas se traduzem em menor exigência de sistemas de resfriamento, redução de custos operacionais e menores impactos ambientais, especialmente em aplicações com carga contínua ou flutuante.

Por outro lado, o alumínio, embora economicamente mais acessível e mais leve, demanda cuidados adicionais no projeto, como o aumento da área condutora e maior atenção às conexões mecânicas e térmicas. Seus efeitos indesejados podem se agravar em ambientes com altas temperaturas ou por efeito de operação contínua, o que pode comprometer a confiabilidade do transformador a longo prazo.

As perdas nos enrolamentos dos transformadores representam um aspecto crítico no desempenho elétrico, térmico e econômico desses equipamentos. A escolha do material condutor, seja cobre ou alumínio, desempenha papel importante nesse contexto, pois suas propriedades elétricas e térmicas determinam o nível de dissipação de calor por efeito Joule. O cobre, com sua menor resistividade, tende a gerar menores perdas e suportar correntes mais elevadas com maior segurança térmica. Já o alumínio, apesar de seu custo reduzido e menor peso, requer maiores dimensões de condutores para compensar sua condutividade inferior.

Compreender e controlar essas perdas é essencial não apenas para melhorar a eficiência do transformador em si, mas também para promover sistemas elétricos mais sustentáveis e economicamente viáveis. Reduzir as perdas nos enrolamentos contribui para minimizar o desperdício de energia, reduzir a demanda por sistemas de resfriamento e prolongar a vida útil do equipamento, aspectos que são estratégicos em um cenário energético que exige cada vez mais eficiência e responsabilidade ambiental.

Portanto, a escolha entre cobre e alumínio deve considerar não apenas o custo inicial do material, mas também os aspectos térmicos, elétricos e operacionais do transformador, visando garantir a eficiência e durabilidade do sistema elétrico de distribuição. Em projetos onde o desempenho e a confiabilidade são críticos, o uso do cobre se justifica plenamente. Já o alumínio pode ser viável em aplicações de menor criticidade, desde que compensações construtivas sejam rigorosamente aplicadas.

REFERÊNCIAS

- CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CHAPMAN, Stephen J.. **Máquinas elétricas**. 4. ed. São Paulo: AMGH, 2007.

DEL VECCHIO, Robert M.; SHARMA, Ram S.; PUJARA, Rajendra. Transformer design principles: with applications to core-form power transformers. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.

DOWELL, P. Effects of eddy currents in transformer windings. Proceedings of the IEE, v. 113, n. 8, p. 1387–1394, 1966.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std C57.12.00-2015 – IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. New York: IEEE, 2015.

MEDEIROS, Aldo Vilela de et al.. **Materiais Elétricos**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2006.