



Estudo de Relações entre Perdas e Custo Total de Propriedade em Transformadores no Contexto da Eficiência Energética

Elvio Prado da Silva^{1,2}, Juri Muniz Pepe¹

¹UFBA-Universidade Federal da Bahia - LaPO. e-mail: mpepe@ufba.br

²IFBA-Instituto Federal da Bahia, campus Santo Amaro - LabEletro. e-mail: elvio@ifba.edu.br

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo analítico por software, dos custos totais de propriedade (CTP) de transformadores, no que tange às perdas elétricas. Em funcionamento, um transformador apresenta perdas na forma de aumento da temperatura e ruído acústico, estas perdas são financeiramente relevantes ao longo da vida útil do transformador. A contribuição deste artigo é apresentar uma abordagem desta questão, focando nos custos globais acrescidos pelas perdas, discutindo qual o melhor transformador a ser comprado que normalmente não é o mais barato e sim aquele que possui maior rendimento.

Palavras-chave: custo de compra, perdas com carga, perdas sem carga, rendimento, transformadores

1. INTRODUÇÃO

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).

Na indústria é muito comum que os transformadores sejam modificados em função das demandas de projetos e re-projetos das plantas industriais. O contratante sempre está interessado em um transformador com menor preço de compra. Contudo o engenheiro projetista deve convencer o proprietário a escolher um com menor custo total de propriedade, compilando os vários fatores que impactam no custo de operação. Perdas elétricas, instalação, manutenção, reparo, depreciação, são raramente contabilizados pelo contratante na escolha de compra de qualquer equipamento, inclusive transformadores.

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).

Para as perdas com carga e sem carga de um transformador, o comprador atribui um custo de kW de perdas, este custo é representado por um valor capitalizado das perdas do transformador, assim, estima-se um tempo de vida útil de 10 a 20 anos. Sendo que os transformadores com manutenção periódica geralmente apresentam vida útil superior a 20 anos (ANDRADE, 2008). Este perfil é baseado na expectativa de carga durante a vida do transformador, da média de custo do kWh e da taxa de juros escolhida pelo comprador.

Geralmente os transformadores ficam aproximadamente 100% do tempo conectados à rede. Como a carga varia durante todo o tempo, as perdas também variam, principalmente em horários de pico quando a energia é mais cara (tarifas hora-sazonais), que tornam estas perdas financeiramente relevantes.



Quando as perdas são capitalizadas, transformadores mais eficientes (com menores perdas), mesmo com preços superiores, mostram-se mais atrativos ao longo do tempo.

A eficiência energética tem sido incentivada a cada dia por vários órgãos em todo o mundo. No Brasil a Eletrobrás e o Procel tem feito campanhas e etiquetagem de equipamentos mais eficientes, visando estimular os consumidores a adquirirem equipamentos de maior rendimento e mesmo desempenho.

2. PERDAS EM TRANSFORMADORES

Um transformador de distribuição, normalmente consiste em um par de enrolamentos: primário e secundário, ligados por um circuito magnético ou núcleo magnético. Quando uma corrente alternada é aplicada em um destes enrolamentos, geralmente no enrolamento primário, um fluxo magnético induzido é criado, fazendo aparecer uma corrente nos enrolamentos do secundário (lei de Lenz).

De acordo com as leis do eletromagnetismo a presença do núcleo ferromagnético direciona o fluxo magnético aumentando a eficiência do processo de indução. Como enrolamentos e núcleo são componentes fundamentais no funcionamento do transformador, e susceptíveis a perdas, torna-se importante o estudo do CTP do transformador.

2.1. PERDAS SEM CARGA (PERDAS EM VAZIO)

As perdas sem carga, ou perdas em vazio, são basicamente perdas no núcleo ferromagnético. O fluxo magnético induzido provoca forças alternadas no núcleo gerando perdas na forma de aumento de temperatura e ruído acústico. As perdas no núcleo são:

- PERDAS POR HISTERESE ocorrem devido a interação entre os domínios magnéticos, pela tendência de alinhamento destas estruturas, em função das rápidas alternâncias da corrente alternada. Quanto menor for o ciclo de histerese do material do núcleo, menores serão estas perdas.
- PERDAS POR CORRENTES PARASITAS (Foucault) ocorrem devido à circulação de correntes no núcleo, que está sujeito a um fluxo variável. Elas circulam num plano perpendicular ao da direção do fluxo. Para reduzir estas perdas são construídos núcleos com chapas laminadas de espessuras finas e de alta resistividade.

Para o cálculo das perdas em vazio (P_0), deve-se realizar o ensaio recomendado na norma NBR5380. O ensaio em vazio é mostrado na figura 1 (a), e é realizado no lado de baixa tensão aplicando tensão nominal no transformador. Utiliza-se um voltímetro, dois wattímetros e três amperímetros para aquisição dos dados necessários para os cálculos e laudo.

2.2. PERDAS COM CARGA (PERDAS EM CURTO-CIRCUITO)

As perdas com carga de um transformador são referentes aos enrolamentos, ou seja, são perdas no cobre na forma de calor (efeito Joule).

As perdas resistivas seguem a lei de Ohm e podem ser reduzidas diminuindo o número de espiras dos enrolamentos, nesse sentido deve-se aumentar a capacidade de isolamento do verniz ou do óleo isolante, ou ainda, aumentar a área de seção dos condutores.

Em contrapartida, reduzir o número de espiras requer o aumento no fluxo magnético no núcleo, o que demanda melhores materiais elétricos ou o aumento de área de seção transversal dos condutores. Deve ser feito um projeto minucioso, pois pode-se aumentar as perdas no núcleo ao aumentar o fluxo requerido. O projetista deve balancear as perdas com carga e as sem carga com a finalidade obter o transformador mais eficiente.

A impedância percentual do transformador é uma valiosa informação para que o projetista possa obter o melhor transformador, determinar as falhas e encontrar os limites econômicos da concepção do projeto.

Para o cálculo das perdas com carga (**Pcc**), deve-se realizar o ensaio recomendado na norma NBR5380. O ensaio em curto-circuito é mostrado na figura 1 (b), e é realizado no lado de alta tensão, cortocircuitando o lado de baixa tensão. Com o auxílio de um variac, aumenta-se a tensão até obter a corrente nominal no mesmo, simulando funcionamento com carga máxima. Utiliza-se um voltímetro, dois wattímetros e três amperímetros para aquisição dos dados necessários para os cálculos e laudo.

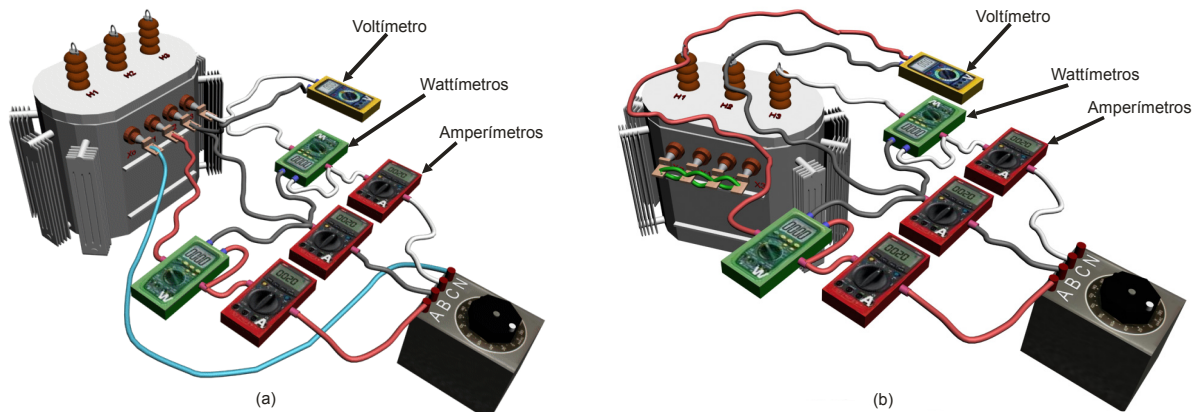


Figura 1 – Em (a) temos o ensaio sem carga (vazio) e em (b) temos o ensaio com carga (curto-circuito)

3. CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE

O Custo Total de Propriedade (CTP) ou no inglês “*Total Cost of Ownership*” (TCO) está relacionado ao preço de compra, perdas e a vida útil típica de um transformador.

De acordo com a norma IEC60354 (transformadores a óleo) e IEC60905 (transformadores a seco), a vida útil típica de um transformador é baseada no ponto de temperatura máxima dos enrolamentos:

- IEC60354 (óleo): “Um incremento no ponto de máxima temperatura de 6K (6 Kelvin) provoca uma redução na vida útil do transformador para 50%”. (IEC60354 é substituição da IEC60076-7)
- IEC60905 (seco): “Um incremento no ponto de máxima temperatura de 10K (10 Kelvin) provoca uma redução na vida útil do transformador para 50%”.

Chega-se a um ponto chave: como avaliar as perdas?

Quando um transformador é fabricado é possível calcular suas perdas sem carga (em vazio) e com carga (em curto-circuito) através dos ensaios de mesmo nome (NBR5380, NBR5356 e NBR5440). A partir dos valores destas perdas o fabricante pode projetar um transformador eficiente com menor CTP.

Para o cálculo do CTP segundo Hulshorst (2002) tem-se:

$$CTP = Prc + A \cdot Po + B \cdot Pcc \quad (1)$$

Prc é o preço de compra do transformador, **Po** são as perdas sem carga (vazio), **A** é um fator referente às perdas sem carga, **Pcc** são as perdas com carga (curto-circuito) e **B** é um fator referente às perdas com carga.

Para o cálculo dos fatores **A** e **B**, segundo Hulshorst (2002), tem-se as equações 2 e 3:

$$A = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \cdot C_{kwh} \cdot 8760 \quad (2)$$

$$B = A \cdot fc^2 \quad (3)$$



Em que i é a taxa de juros percentual, C_{kwh} é o custo da eletricidade em kWh, **8760** é o número de dias em um ano, n é a vida útil do transformador em n anos e fc é o fator de carga do transformador.

4. SOFTWARE PARA CÁLCULO DE CTP

Baseado neste trabalho foi desenvolvido o software para cálculo de CTP mostrado na figura 2, que compara dois transformadores de mesma potência, mas com diferentes perdas. É importante comparar um transformador convencional com outro de alto rendimento, onde se percebe que o transformador de alto rendimento, apesar de mais caro, possui menores perdas e por consequência um menor custo total ao longo de seus anos de utilização, sendo mais viável economicamente.

Um estudo de caso é mostrado na tabela 1, com dois transformadores reais, de mesma potência.

Tabela 1 – Dados de dois transformadores reais de mesma potência para cálculo de CTP

	Transformador 1	Transformador 2
Rendimento	Alto rendimento	Convencional
Preço de compra	R\$14500,00	R\$12475,00
Perdas sem carga	220 W	260 W
Perdas com carga	1171 W	1656 W

A tabela 2 mostra os dados adicionais necessário ao cálculo do CTP:

Tabela 2 – Dados adicionais para cálculo do CTP

Preço do kWh (COELBA)	R\$0,40
Taxa de depreciação ao ano	7,0 %
Tempo de vida útil do transformador	20 anos
Carga média submetida ao transformador (fc)	50 %

A figura 2 mostra a tela do software criado, contendo o estudo de caso com dois transformadores de mesma potência, com os dados das tabelas 1 e 2.

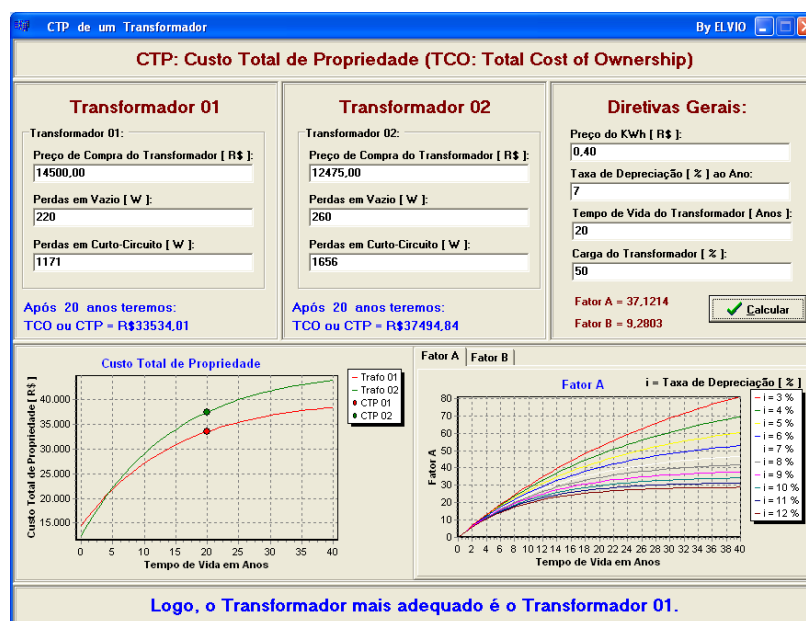


Figura 2 – Tela do software para cálculo de CTP que compara dois transformadores, indicando o mais viável economicamente ao longo dos anos de utilização dos mesmos.

A figura 3 mostra que ao traçar os gráficos da equação 1 com os dados dos transformadores 1 e 2, observa-se que o transformador 1, apesar de seu preço de compra ser mais alto, após aproximadamente cinco anos de utilização este passa a ser economicamente mais vantajoso.

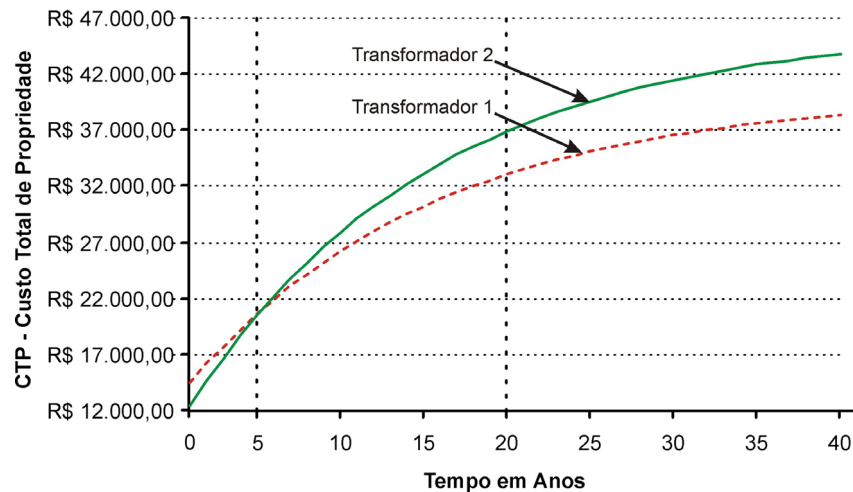


Figura 3 – Gráficos de CTP referentes ao estudo de caso

4. CONCLUSÕES

Desconsiderando as despesas do transformador com manutenção, reparos e desvalorização monetária de mercado, que são inerentes a qualquer equipamento, deve-se levar em consideração as perdas elétricas que são específicas e referentes à qualidade de cada equipamento.

As perdas nos transformadores, sejam elas sem carga, com carga ou perdas extras, devem ser contabilizadas no momento da compra do mesmo, pois estas perdas agregam custos relevantes ao longo da vida útil do transformador.

Pode-se observar, através dos cálculos realizados pelo software mostrado neste trabalho, que o transformador mais barato nem sempre é o que proporcionará o melhor custo benefício ao longo dos anos, devendo ser dada preferência aos transformadores de alto rendimento.

A realidade de cálculo do Custo Total de Propriedade de transformadores deverá ser parte integrante do processo de especificação de transformadores, sejam eles industriais, de distribuição ou de força.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, F. F.; et al., **Gestão e Monitoração remota de Transformadores em Redes de Distribuição de Energia Subterrâneas**, V Workshpot – International Workshop on Power Transformers, Belém-PA, 2008.

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.

FLATEN, D., **Cost of Load Losses in Distribution Transformers by the Method of Average Loading**, IEEE Transactions on Power Delivery, 1987.

IEC60354, **Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers**, International Electrotechnical Commission, 1991.



IEC60905, **Loading Guide for Dry-Type Power Transformers**, International Electrotechnical Commission, 1987

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

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

NBR5356, **Transformador de Potência - Especificação**, 1993.

NBR5380, **Transformador de Potência - Método de ensaios**, 1993.

NBR5440, **Transformadores para redes aéreas de distribuição - Padronização**, 1993.