

SENDI – 2004

XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Regras de Escalamento de Perdas para Transformadores de Distribuição Imersos em Óleo Mineral Isolante

A. P. Marques
andre.pm@celg.com.br

A. J. Batista
batista@eee.ufg.br

E. G. Marra
enes@eee.ufg.br

Companhia Energética de Goiás – CELG
Centro Fed. de Educação Tecnológica de
Goiás – CEFET-GO
Universidade Federal de Goiás - UFG

Escola de Engenharia Elétrica e de
Computação – EEEEC
Universidade Federal de Goiás – UFG
Caixa Postal 131 – CEP 74001-970
Goiânia - GO

Palavras-chave – Perdas em vazio, Perdas no cobre, Regras de escalamento

Resumo – Este trabalho busca oferecer ferramentas que facilitem investigações na área de eficiência energética, apresentando um estudo comparativo de perdas de transformadores de distribuição imersos em óleo mineral isolante de diversas potências, sendo propostas regras de escalamento de perdas, ou seja, regras que possibilitem estimar perdas de um dado transformador, do qual apenas a potência nominal é conhecida, a partir de outro transformador, de projeto semelhante, para o qual são conhecidas as perdas e a potência nominal. Estas mesmas regras também podem ser utilizadas para simplificar cálculos de estudos extensos envolvendo perdas, carregamento e vida útil de transformadores, reduzindo o número de simulações necessárias para a realização do estudo, tomando-se um determinado transformador como piloto e fazendo-se extrapolações dos resultados para os demais. Os equipamentos estudados são semelhantes aos tipicamente empregados em concessionárias de distribuição de energia elétrica, e caracterizam bem aqueles encontrados em operação atualmente no setor elétrico brasileiro. Os dados utilizados para obtenção das regras de escalamento, bem como os resultados obtidos, são apresentados no trabalho na forma de tabelas e gráficos. Os resultados apresentados neste trabalho foram validados a partir de dados obtidos dos relatórios de ensaio de mais de 2600 transformadores de distribuição da Companhia Energética de Goiás (CELG), fabricado entre os anos de 1984 e 2002, por diferentes fabricantes. A validade da regra de escalamento foi confirmada para este banco de dados.

Abstract — This work proposes an expression, which is able to support the realization of comparative loss-analyses in distribution transformers immersed in mineral insulating-oil. Loss scaling rules are presented in order to allow for the assessment of no-load losses, copper losses, and

total losses of a non-tested transformer from the knowledge of these losses for another transformer rated at a different power. Once data are known for a standard transformer, it is possible to assess no-load, copper and total losses for another transformers, within a range of rated powers varying from 30 kVA to 500 kVA. The proposed scaling rules were obtained by means of the analysis of test-reports data of around about 2600 distribution transformers, manufactured from 1984 to 2002, owned by Companhia Energética de Goiás (CELG). The data, which yielded the scaling rules, are presented in tables and figures. The scaling rules presented satisfactory agreement when used for distribution transformers immersed in mineral oil, rated at 13.8 kV.

1. INTRODUÇÃO

Quando se realizam trabalhos envolvendo eficiência energética e conservação de energia, uma das barreiras com que os especialistas se deparam, é a dificuldade de obtenção de dados relativos aos equipamentos em estudo. O estudo de perdas que ocorrem na transformação da energia é um destes casos. Objetivando oferecer ferramentas que facilitassem investigações nesta área de eficiência energética, realizou-se um estudo comparativo de perdas de transformadores de distribuição de diversas potências. Este estudo fundamentou-se em levantamentos de relatórios de ensaios elétricos de recebimento em fábrica, de 2658 transformadores de distribuição trifásicos, adquiridos pela Companhia Energética de Goiás (CELG), com tensões nominais de 13,8 kV/380 V, provenientes de oito (8) fabricantes diferentes, com potências nominais de 30 kVA a 500 kVA, imersos em óleo mineral isolante, fabricados no período de 1984 a 2002. Estes equipamentos são semelhantes aos atualmente empregados em concessionárias brasileiras de distribuição de energia elétrica. Na seqüência são apresentados os dados utilizados para obtenção das regras de escalamento e os resultados obtidos³.

2. ESTABELECIMENTO DE REGRAS DE ESCALAMENTO EM FUNÇÃO DAS POTÊNCIAS DOS TRANSFORMADORES

Para se estabelecerem regras de escalamento, primeiramente foram colocadas em uma planilha as médias das perdas dos transformadores escalonados por potência nominal, separando os equipamentos por norma técnica de fabricação. Em seguida, os dados foram reunidos em uma única planilha, calculando-se os valores médios ponderados das perdas para os transformadores escalonados por potência. Adotando-se uma das potências nominais dos transformadores, e respectivos dados de perdas, como base, normalizaram-se os valores das perdas e das potências dos demais transformadores. Tomou-se o cuidado de adotar como base, uma potência nominal que estivesse mais no meio da faixa das potências estudadas e cujos transformadores contivessem dados em todo o período em estudo. E, ainda mais, que estes representassem uma percentagem significativa do universo de transformadores cujos dados estavam disponíveis. Pode-se observar na Tabelas I o quantitativo de todos os transformadores do universo estudado.

Os mesmos estão escalonados na Tabela I por potência nominal, sendo apresentadas as médias ponderadas das perdas no ferro, perdas no cobre e perdas totais dos equipamentos.

Os valores da Tabela I são rerepresentados na Fig. 1 na forma de um gráfico. Pode-se observar pela mesma tabela, que os transformadores de 75 kVA são os que mais atendem às condições estabelecidas para serem tomados como base.

Tabela I

RELAÇÃO GERAL DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS DE 13,8 kV/380 V, UTILIZADOS NO ESTUDO, E VALORES MÉDIOS PONDERADOS DE PERDAS CONSIDERANDO TODO O PERÍODO DE 1984 A 2002.

Tensão de Linha	Potência do transformador (kVA)	Quantidade de amostras	Número de fases	Perda no ferro média (W)	Perda no cobre média (W)	Perda total média (W)
13,8 kV / 380 V	30	516	3	172,37	557,19	729,56
	45	554	3	215,48	798,92	1.014,40
	75	769	3	314,08	1.152,89	1.466,97
	112,5	751	3	434,77	1.521,20	1.955,98
	150	38	3	450,97	1.937,21	2.388,18
	225	11	3	655,00	2.744,91	3.399,91
	300	16	3	826,13	3.919,04	4.745,17
	500	3	3	1.029,33	6.172,00	7.201,33
TOTAL	2 658					

Trabalhando-se com os valores médios ponderados apresentados na Tabela I, que contemplam todo o período de 1984 a 2002 (19 anos), e normalizando os valores de potência e de perdas de todos os transformadores, adotando como base os transformadores de 75 kVA, obtém-se os valores apresentados na Tabela II. Assim, observando a Tabela II, o valor 0,4 da coluna de potências corresponde à potência de 30 kVA da Tabela 1. Da mesma forma, o valor 0,6 desta tabela corresponde a 45 kVA da Tabela 1, o valor 1 a 75 kVA e assim sucessivamente.

TABELA II

TOTAL DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS, DE 13,8 kV/380 V, IMERSOS EM ÓLEO MINERAL ISOLANTE, UTILIZADOS NO ESTUDO, NORMALIZADOS COM BASE NOS TRANSFORMADORES DE 75 kVA.

Tensão de Linha	Potência do transformador (kVA/kVA)	Quantidade de amostras	Número de fases	Perda no ferro média (W/W)	Perda no cobre média (W/W)	Perda total média (W/W)
13,8 kV / 380 V	0,4	516	3	0,549	0,483	0,493
	0,6	554	3	0,686	0,693	0,691
	1	769	3	1,000	1,000	1,000
	1,5	751	3	1,384	1,319	1,355
	2	38	3	1,435	1,680	1,627
	3	11	3	2,085	2,381	2,318
	4	16	3	2,630	3,399	3,244
	6,667	3	3	3,276	5,353	4,895
TOTAL	2.658					

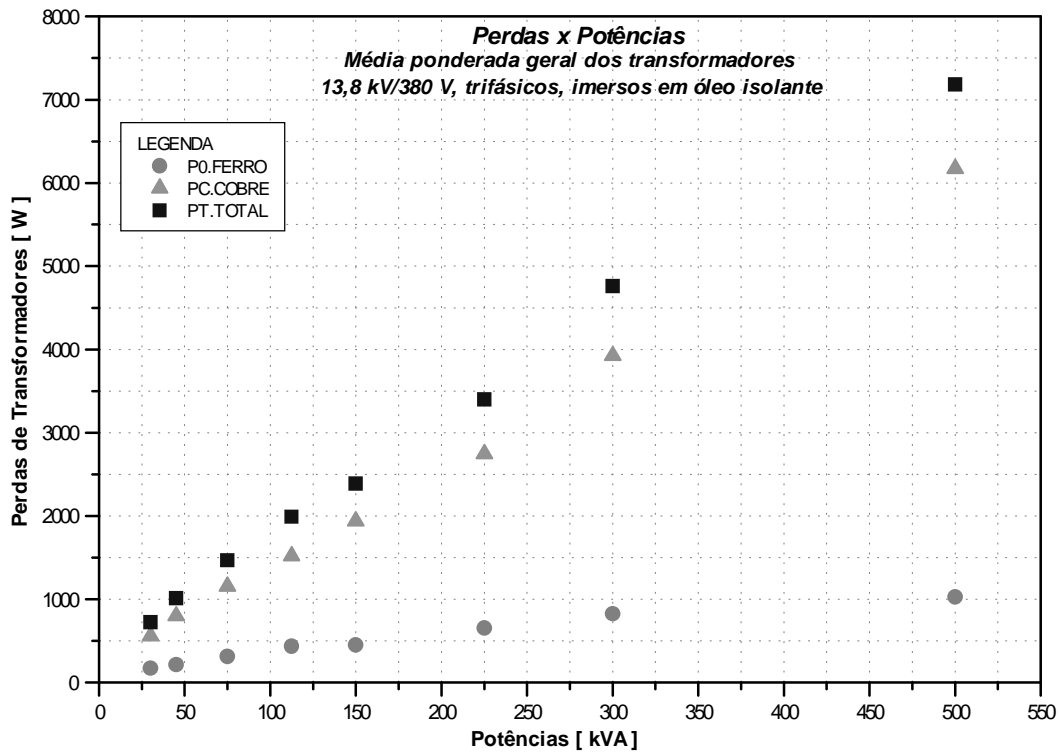


Fig. 1. Perdas médias ponderadas versus potências nominais de 2.658 transformadores de 13,8 kV/380 V, imersos em óleo mineral isolante.

As regras de escalamento obtidas para as perdas dos transformadores em função suas potências, são da forma apresentada em (1).

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^K \quad (1)$$

Sendo:

P_2 : perdas do transformador 2, em Watts

P_1 : perdas do transformador 1, tomado como base, em Watts

S_2 : potência do transformador 2, em kVA

S_1 : potência do transformador 1, tomado como base, em kVA

K : fator de escalamento.

De forma a se obter uma linearização dos pontos que representam as perdas, facilitando a obtenção de regras de escalamento, montou-se, como os dados apresentados na Tabela II, o gráfico log x log conforme se pode observar na Fig. 2. Pode-se perceber por meio desta mesma figura, que a curva com fator de escalamento, K , igual a 0,65 é a que melhor se ajusta aos pontos que representam as perdas no ferro (P0). A curva com K igual 0,85 ajusta-se melhor às perdas no cobre (PC) e às perdas totais (PT). A curva com K igual a 0,75 é uma tentativa de se atender, com uma só curva, a todos as perdas: no cobre (PC), no ferro

(P0) e totais (PT). Uma vez encontrados estes três fatores de escalamento, novas equações podem ser escritas a partir de (1), conforme segue.

a) Para as perdas no ferro (P0):

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{0,65} \quad (2)$$

b) Para as perdas no cobre e perdas totais (PC e PT):

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{0,85} \quad (3)$$

c) Para as perdas em geral (PC, P0 e PT):

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^{0,75} \quad (4)$$

Para se observar a correlação existente entre as perdas medidas e as perdas calculadas pelas regras de escalamento, utilizando as equações 2, 3 e 4, calcularam-se os coeficientes de correlação R quadrado (R^2) para as perdas no ferro, perdas no cobre e perdas totais, observando-se resultados maiores do que 0,92 pu para todas elas.

3. VERIFICAÇÃO DE DIFERENÇAS DE VALORES DE PERDAS MEDIDAS E PERDAS CALCULADAS UTILIANDO REGRAS DE ESCALAMENTO

Para se verificar os erros cometidos ao se utilizarem as regras de escalamento obtidas, foram recalculadas as perdas no cobre, no ferro e as perdas totais para todos os transformadores, utilizando (2), (3) e (4), com base nas perdas do transformador de 75 kVA. Em seguida estas perdas calculadas foram comparadas com as perdas originais que constam da Tabela II.

Os resultados dos cálculos e as diferenças relativas percentuais de perdas são apresentados na Tabela III, bem como os maiores erros percentuais negativos e positivos. Vale observar que, para evitarem-se distorções, as perdas totais foram calculadas pela soma das perdas no cobre e das perdas no ferro.

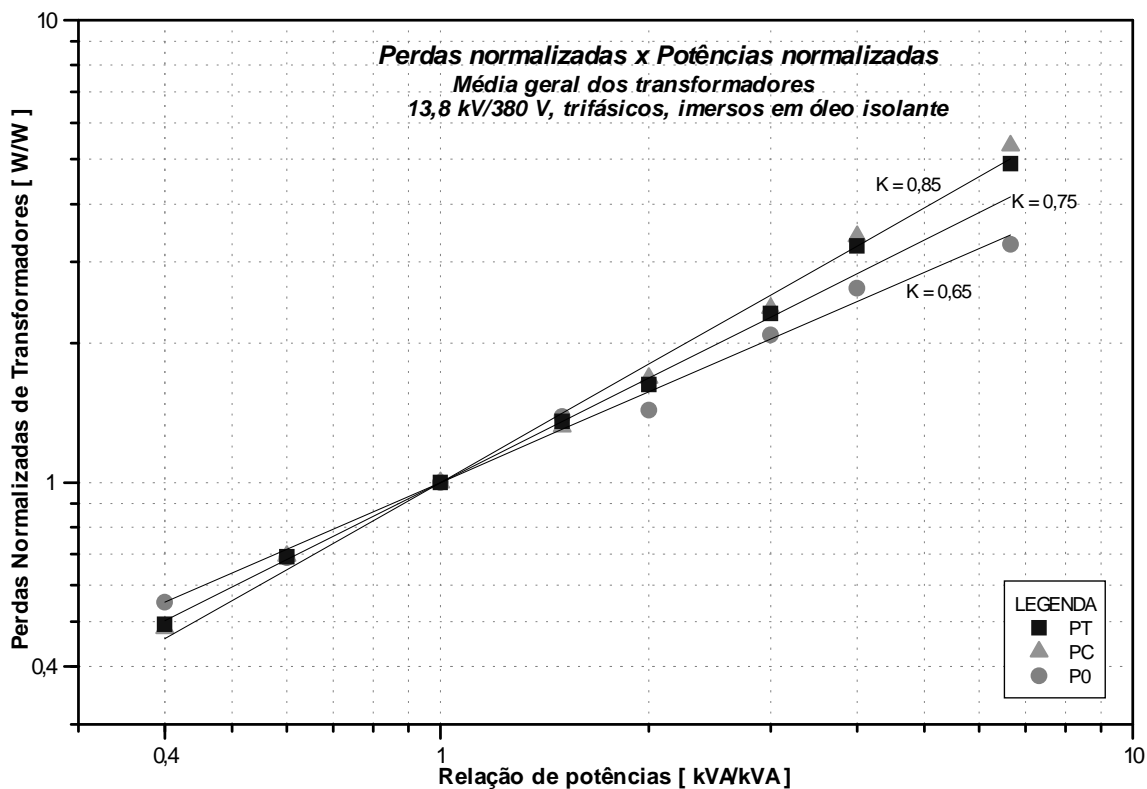


Fig. 2. Perdas normalizadas versus potências normalizadas de transformadores de 13,8 kV/380 V, imersos em óleo mineral isolante, gráfico log versus log.

TABELA III

DIFERENÇAS RELATIVAS PERCENTUAIS OBTIDAS NOS CÁLCULOS DE PERDAS, UTILIZANDO REGRAS DE ESCALAMENTO.

Tensão de Linha	Potência do transf. (kVA)	Perdas no ferro (P0)			Perdas no cobre (PC)			Perdas totais (P0 + PC)			
		Média (W)	Difer. Relat. k=0,65 (%)	Difer. Relat. k=0,75 (%)	Média (W)	Difer. Relat. k=0,85 (%)	Difer. Relat. k=0,75 (%)	Média (W)	Difer. Relat. k=0,85 (%)	Difer. Relat. k=0,75 (%)	
13,8 kV / 380 V	30	172,37	0,470	-8,327	557,19	-5,039	4,074	729,56	-2,961	1,960	
	45	215,48	4,605	-0,604	798,92	-6,519	-1,620	1.014,40	-4,156	-1,404	
	75	314,08	0,026	0,026	1.152,89	0,002	0,002	1.466,97	-0,034	-0,034	
	112,5	434,77	-5,953	-2,061	1.521,20	6,977	2,726	1.955,98	2,355	-0,045	
	150	450,97	9,312	17,158	1.937,21	7,275	0,091	2.388,18	7,664	3,318	
	225	655,00	-2,042	9,333	2.744,91	6,862	-4,256	3.399,91	5,091	-1,691	
	300	826,13	-6,364	7,560	3.919,04	-4,419	-16,792	4.745,17	-5,071	-12,840	
	500	1.029,33	4,746	26,627	6.172,00	-6,310	-22,499	7.201,33	-4,508	-15,281	
	Maiores erros negativos			-6,364	-8,327		-6,519	-22,499		-5,071	-15,281
	Maiores erros positivos			9,312	26,627		7,275	4,074		7,664	3,318

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Comparando-se os resultados apresentados na Tabela III, e observando os gráficos apresentados na Fig. 3, pode-se perceber que:

- a) As diferenças relativas percentuais de valores medidos para valores calculados foram menores para os resultados das equações (2) e (3) ($K=0,65$ e $K=0,85$) do que para os resultados da equação (4) ($K=0,75$). Enquanto aquelas apresentaram diferenças que variaram de $-6,5\%$ a $+9,3\%$, estas apresentaram diferenças de $-22,49\%$ a $+26,6\%$;
- b) A curva para perdas no ferro definida por (2) ($K=0,65$), a curva para perdas no cobre definida por (3) ($K=0,85$) e a curva para perdas totais, também por (3) ($K=0,85$), representam melhor o comportamento das perdas dos transformadores em função do escalamento do que a curva geral para perdas no ferro, perdas no cobre e perdas totais definidas por (4) ($K=0,75$).

Em um relatório apresentado ao U.S. Department of Energy (US DOE), e respectivo anexo, associados à utilização de regra de escalamento em transformadores de distribuição, é indicada para cálculos de perdas, equação semelhante à (4) deste trabalho, com fator de escalamento, K , igual a $0,75^{1,2}$. Consta deste relatório, que o mesmo foi preparado visando relacionar custos e rendimentos de transformadores de distribuição. E, de fato, são apresentados no mesmo, diversas planilhas de custo de componentes de transformadores e gráficos de preços versus rendimentos destes equipamentos, levando em conta diversos tipos de projeto de fabricantes. A mesma equação de escalamento citada em anexo do relatório, com fator $K=0,75$, é indicada para cálculos de pesos, custos, perdas totais, perdas no ferro e correntes de excitação, assumindo que, para transformadores com mesmo número de fases, mesma filosofia de construção e mesmas tensões:

- a) a proporção física dos equipamentos é constante;
- b) a densidade de fluxo e o tipo de material do núcleo são constantes;
- c) a densidade de corrente no condutor e o material condutor são constantes;
- d) a proporção de perdas circulantes (eddy) é constante e
- e) o fator de espaçamento da isolação é constante (nível de isolação).

Tais requisitos dificilmente ocorrem simultaneamente na prática. Assim, o próprio relatório recomenda a utilização da regra de escalamento para estabelecer “estimativas razoáveis de desempenho” para as grandezas citadas. Entende-se que, para uma estimativa geral de desempenho, quanto a custos, dimensões e rendimento, as regras de escalamento que constam do relatório enviado ao US DOE, são regras práticas e devem atender satisfatoriamente à tarefa a que foram destinadas. Entretanto, para estudos específicos de perdas, acredita-se que os resultados poderiam ser aprimorados.

1. As regras de escalamento estabelecidas especificamente para perdas, no presente trabalho, foram desenvolvidas com base em valores medidos de perdas obtidos em relatórios de ensaios elétricos de recebimento em fábrica, de 2 658 transformadores de distribuição trifásicos, de 13,8 kV/380 V, de oito (8) fabricantes diferentes, com potências de 30 kVA a 500 kVA, imersos em óleo mineral isolante, fabricados no período de 1984 a 2002. Assim, intrinsecamente, constituem uma amostragem significativa destes equipamentos, considerando projetos de diferentes fabricantes, em uma larga faixa de potências, contemplando mudanças tecnológicas que ocorreram no decorrer de dezenove (19) anos de fabricação.

5. CONCLUSÕES

Após análise dos resultados obtidos, concluiu-se que, para estudos envolvendo perdas, as regras de escalamento (2) e (3), proposta neste trabalho, apresentaram melhores resultados.

Como, na maioria das concessionárias brasileiras, o processo de aquisição de transformadores de distribuição tem sido muito semelhante nos últimos vinte anos, é razoável supor que resultados semelhantes aos apresentados neste artigo, cuja base foram os relatórios de ensaios de recebimento de transformadores adquiridos pela CELG – Companhia Energética de Goiás, sejam obtidos pelas demais concessionárias. Logo, seria também razoável supor que as regras de escalamento apresentadas possam ser também utilizadas por outras concessionárias de energia, cujos transformadores de distribuição apresentem características semelhantes às consideradas neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. D. LITTLE, “Distribution Transformer Rulemaking, Engineering Analysis Update, Draft for Review”. Report to U.S. Department of Energy Office of Building Technology, State, and Community Programs, December 2001.
- [2] B. McCONNELL, “Scaling or Size-Performance Relations in Transformers”, Oak Ridge National Laboratory, June 2001.
- [3] A. P. Marques, “Eficiência Energética e Vida Útil de Transformadores de Distribuição Imersos em Óleo Mineral Isolante”, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Federal de Goiás, junho de 2004.