



Grupo de Estudo de Transformadores, Reatores, Materiais e Tecnologias Emergentes-GTM

Análise da relação perdas em vazio e em carga de autotransformadores e transformadores de potência da Cemig GT

**JANAINA GOMES DA COSTA(1); JUNIO CESAR SOUZA DA SILVA(2); ADINA MARTINS PENA(3);
CEMIG GT(1);TSEA(2);CEMIG GT(3);**

RESUMO

O transformador é uma máquina com considerável eficiência, porém quando consideramos equipamentos de alta potência, tipicamente os aplicados à Rede Básica, suas perdas apresentam valores significativos. Considerando o número de equipamentos instalados, as perdas em transformadores de potência representam uma parcela expressiva das perdas do sistema elétrico de transmissão brasileiro. Por essa razão, a crescente busca por sistemas de melhor desempenho energético demanda especial atenção.

A especificação das perdas são um dos parâmetros mais importantes na definição do projeto de um transformador ou autotransformador, apresentando impacto direto no tamanho e peso da parte ativa, na capacidade do sistema de resfriamento, bem como no custo e eficiência do equipamento. Com a mudança na estrutura institucional do setor elétrico brasileiro no final da década de 90 e o consequente estabelecimento de regras para operação/desempenho das instalações de transmissão da rede básica do Sistema Elétrico Nacional, foram publicados os primeiros Procedimentos de Rede. No que diz respeito às perdas de transformadores e autotransformadores, a primeira revisão do submódulo 2.3 determinava que o valor das perdas totais em sua potência trifásica nominal, e à tensão e frequência nominais fosse inferior a 0,3% de sua potência trifásica nominal (1). As revisões mais recentes deste mesmo submódulo, distinguem autotransformadores de transformadores, determinando um percentual fixo para autotransformadores e percentuais distintos de perdas totais para transformadores segundo faixas de potências nominais trifásicas (2). Entretanto, a relação ótima entre as perdas em vazio e em carga nunca foi abordada por esses procedimentos. Assim, transformadores de mesmas potência, tensões e impedâncias fornecidos às transmissoras por diferentes fabricantes podem apresentar relações entre de perdas em vazio e perdas em carga diferentes.

Antes da vigência dos Procedimentos de Rede no Sistema Elétrico Interligado, algumas concessionárias utilizavam o conceito de “capitalização de perdas” nos processos licitatórios a fim de adquirir equipamentos com relação ótima entre perdas em vazio, e perdas em carga e preço final do equipamento. A capitalização de perdas é uma forma eficaz de minimizar o custo total dos transformadores levando em conta o custo inicial do equipamento e somando-se a ele o custo da eletricidade necessária ao longo de sua vida útil para suprir essas perdas. Assim, é possível obter um preço global mais competitivo do equipamento visando o cálculo do valor da economia na data do investimento inicial com a redução de perdas sobre a vida útil do transformador (3).

Este trabalho tem o objetivo de apresentar a relação entre os valores de perdas em vazio (P_0) e em carga (P_K) dos transformadores e autotransformadores adquiridos pela Cemig GT nos últimos 10 anos em licitações públicas com e sem a avaliação de perdas visando uma análise crítica desta relação.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador, Perdas a vazio, Perdas em carga, Eficiência

1.0 - INTRODUÇÃO

Basicamente as perdas de potência em um transformador correspondem ao montante de energia elétrica dissipada pela parte ativa (enrolamentos e núcleo) e sistema de resfriamento. São compostas basicamente pela soma de três componentes (4):

a) perdas em vazio – dissipação de energia na forma de calor gerado durante laços de histerese (alinhamento dos domínios magnéticos e saturação de crescimento do campo magnético) e circulação de correntes parasitas induzidas em material ferromagnético submetido a aplicação de campo magnético externo variável no tempo.

b) perdas em carga - dissipação de energia na forma de calor diretamente proporcional ao quadrado da corrente elétrica que circula pelas bobinas. Acompanhada das perdas resistivas estão também as perdas por correntes parasitas causadas pelos campos magnéticos variáveis no tempo que incidem perpendicularmente aos condutores das bobinas. Essas correntes provocam uma distribuição não uniforme de corrente na seção reta desses condutores levando a um aumento das perdas.

c) perdas do sistema de resfriamento – consumo dos acessórios associados ao sistema de resfriamento tais como ventiladores e bombas.

As perdas em vazio, estão sempre presentes em um transformador energizado, já as perdas em carga e as perdas do sistema de resfriamento dependem diretamente do carregamento do equipamento.

1.1 Normatização

No âmbito internacional, a parte 20 da IEC 60076 de 2017, preocupada com a necessidade de economia de energia e a redução da emissão de gases de efeito estufa, propõe métodos para a especificação de transformadores com desempenho energético mais elevado, de acordo com a carga e as condições de operação aplicáveis (3). Nesta norma, fórmulas para o cálculo de eficiência são fornecidas de forma a refletir diferentes propostas e práticas regionais. No entanto, ela ainda afirma que a eficiência energética não deve ser a única base de escolha de transformadores de potência. O custo do equipamento, os custos de operação e manutenção e a estimativa do ciclo de vida também são parâmetros significativos para se determinar o transformador mais adequado para a aplicação pretendida sendo o foco oferecer soluções mais econômicas ao longo do ciclo de vida dos transformadores.

No Brasil, a ABNT NBR 5440:2014, norma aplicável a transformadores do sistema de distribuição com tensões máximas de até 36,2 kV e potência igual ou inferior a 300 kVA, apresenta valores referenciais máximos para as perdas em vazio e em carga para diferentes níveis de eficiência. Entretanto, para transformadores de potência de tensão acima de 230 kV, apenas os já mencionados procedimentos de rede estabelecem valores máximos de perdas totais admissíveis. Atualmente, a Comissão de Estudo de Transformadores de Potência (CE-003:014:001) do COBEI - Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-003) conduz o trabalho de elaboração da norma brasileira de eficiência energética de transformadores de potência com base na IEC 60076-20.

1.2 Procedimento de Rede

Com a mudança na estrutura institucional do setor elétrico brasileiro no final da década de 90 e o consequente estabelecimento de regras para operação/desempenho das instalações de transmissão da rede básica do Sistema Elétrico Nacional, foram emitidos pelos órgãos reguladores/operadores do SEP os Procedimentos de Rede.

No que diz respeito às perdas dos transformadores, o submódulo 2.3 (1), em sua primeira revisão (data de vigência após 09/10/2000), exigia que o valor das perdas totais em plena carga fosse inferior a 0,3% da potência nominal das unidades transformadoras de potência.

Da primeira publicação até a revisão vigente deste submódulo, pequenas alterações neste requisito ocorreram. A principal distingue autotransformadores de transformadores e prevê percentuais diferentes de perdas para transformadores segundo faixas de potência trifásica nominal.

Atualmente, está previsto que o valor das perdas totais máximas para autotransformadores monofásicos ou trifásicos de qualquer potência, com tensão nominal do enrolamento de alta tensão igual ou superior a 230 kV, deve ser inferior ou igual a 0,3% da potência nominal, para operação primário/secundário nas condições nominais de potência, frequência, tensões e tapes. No caso de transformadores trifásicos ou monofásicos de potência trifásica nominal superior a 5 MVA, com tensão nominal do enrolamento de alta tensão igual ou superior a 230 kV, as perdas máximas entre o primário e o secundário devem atender à Tabela 1, para operação nas condições nominais de potência, frequência, tensões e tapes (2).

1.3 Capitalização de Perdas

Na ausência de valores normatizados para P_0 e P_K , antes da mudança estrutural do setor elétrico brasileiro, algumas concessionárias utilizavam (algumas ainda utilizam) um processo conhecido como “capitalização de

perdas”, na intenção de adquirir equipamentos com perdas minimizadas de forma técnica e financeiramente viável. Esse processo consiste na atribuição de valores financeiros às perdas garantidas pelos fabricantes, e acréscimo desse valor ao preço do equipamento. Nessa condição, os fabricantes projetam os transformadores e autotransformadores para uma relação ótima entre P_0 e P_K , visando o preço global mais competitivo do equipamento. Esta metodologia se aproxima de alguns critérios atuais propostos pela IEC 60076-20 (3).

Tabela 1 – Perdas para transformadores, em percentagem de sua potência trifásica nominal à tensão e frequência nominais (2).

Potência trifásica nominal no último estágio de refrigeração	Perdas totais máximas
$5 < P_n < 30$ MVA	0,70 %
$30 \leq P_n < 50$ MVA	0,60 %
$50 \leq P_n < 100$ MVA	0,50 %
$100 \leq P_n < 200$ MVA	0,40 %
$P_n \geq 200$ MVA	0,30 %

A capitalização de perdas busca um ponto ótimo de eficiência energética, o qual resulta em uma diminuição das perdas e possível aumento do custo inicial, porém com um retorno econômico no médio ou longo prazo decorrente do menor consumo energético de perdas. A Figura 1 abaixo ilustra qualitativamente que a redução indefinida das perdas implica em um aumento de massa do equipamento, mais especificamente aumento de cobre e aço silício, e conseqüentemente aumento do custo do equipamento. Geralmente, equipamentos projetados somente baseado no critério de capitalização de perdas são maiores e mais pesados que equipamentos projetados somente com base nos Procedimentos de Redes (2).

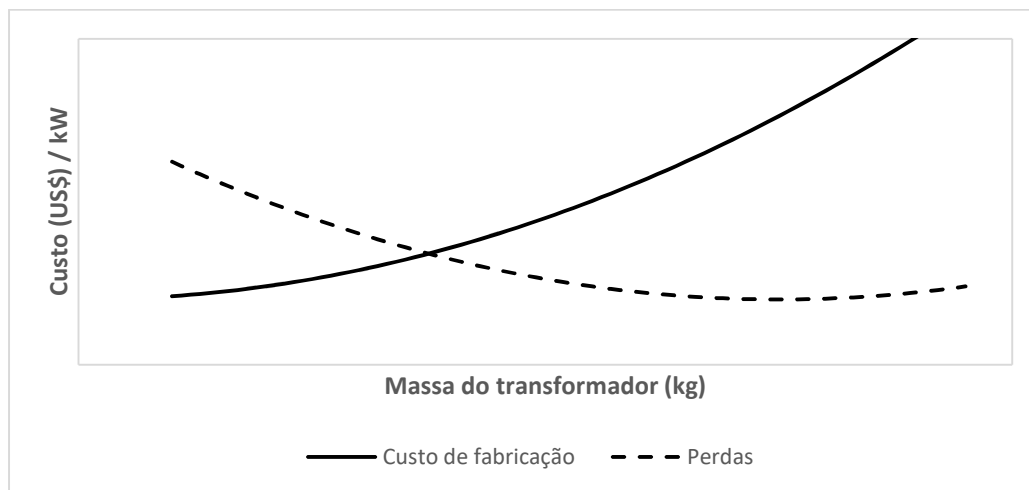


FIGURA 1 – Gráfico qualitativo da relação entre o custo de produção de um transformador e suas perdas

Neste processo é possível estabelecer pesos econômicos diferentes para perdas em vazio e perdas em carga de forma a considerar o regime operativo do equipamento. Desta forma, permite-se estabelecer um peso maior para as perdas em vazio e menor para as perdas em carga em transformadores/autotransformadores que possuem regime operativo que prevê carregamento abaixo do nominal durante horas em um ciclo diário.

2.0 - PERFIL DE CARGA TÍPICO

Os transformadores da CEMIG GT integrantes da rede básica (tensão ≥ 230 kV) possuem um perfil diário típico de carga diferente dos transformadores abaixadores das distribuidoras os quais possuem um fator de carga baixo. Diferem também dos transformadores elevadores das unidades geradoras, os quais possuem fator de carga unitário, como desejável pelos agentes de geração. Como exemplo, a Figura 2 apresenta uma curva típica do perfil de carga médio para o mês de dezembro de 2018 de um autotransformador trifásico 500/345-13,8 kV-400/400-3,33 MVA, fabricado em 2015 e que está em operação no sistema da Cemig.

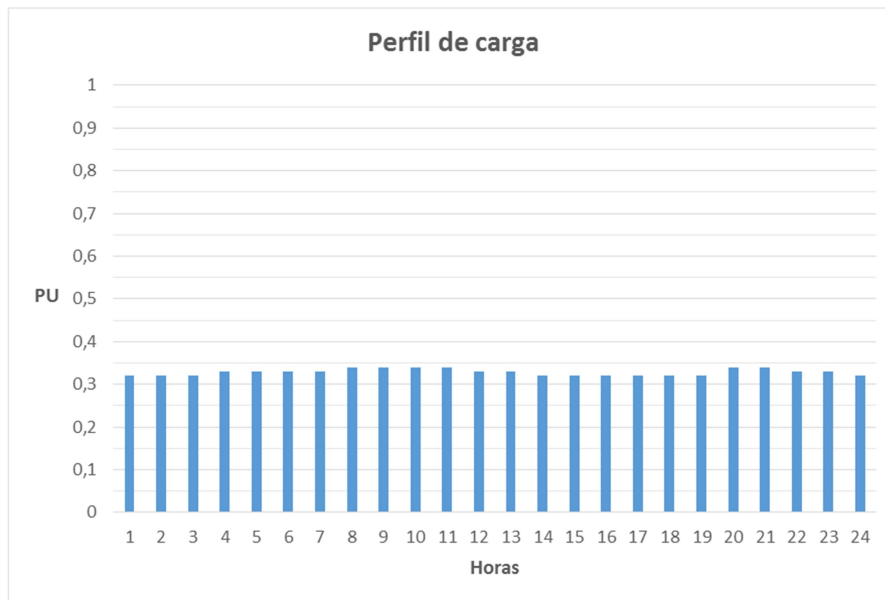


FIGURA 2 – Perfil médio de um autotransformador 500/345-13,8 kV – 400/400-3,33 MVA

3.0 - HISTÓRICO DE FORNECIMENTOS

Nos últimos 10 anos, a Cemig GT adquiriu 12 transformadores e 27 autotransformadores para atendimento aos reforços autorizados ou substituição de equipamentos em fim de vida útil. As Tabela 2 e 3 da seção 3.1 apresentam as principais características técnicas de cada equipamento.

Até 2015, a CEMIG GT solicitou em suas especificações que as perdas em vazio e em carga de seus transformadores e autotransformadores fossem capitalizadas, por entender que esse processo conferia qualidade e maior eficiência a seus equipamentos.

A equação abaixo foi adotada nas especificações que previam a capitalização de perdas de transformadores e autotransformadores monofásicos ou trifásicos:

$$V_T = P_E + (P_{j_{AT/BT}} + P_{aux}) \times A + P_o \times B$$

Em que:

V_T – valor total, em reais, considerado para comparação entre projetos de diferentes fabricantes

P_E – preço do equipamento, em Reais

$P_{j_{AT/BT}}$ – perdas em carga referidas à maior potência nominal dentre os enrolamentos do transformador ou autotransformador, em kW.

P_{aux} – potência auxiliar necessária para alimentar o sistema de refrigeração forçada, em kW

P_o – perdas em vazio, a 100% da tensão nominal, referidas às derivações nominais;

A – custo de avaliação das perdas em carga, em R\$/kW

B – custo de avaliação das perdas em vazio, em R\$/kW

O custo de avaliação das perdas em vazio sempre foi estabelecido como sendo maior que o custo de avaliação das perdas em carga. Nessa época, adotava-se US\$ 6000,00 / kW para as perdas em vazio e US\$ 4000,00 / kW para as perdas em carga.

Considerando que a atual regulação do setor elétrico brasileiro não remunera requisitos superiores aos mínimos estabelecidos pelos órgãos regulatórios, a capitalização de perdas deixou de ser praticada pela Cemig GT nas atuais aquisições.

3.1 Relação perdas em vazio x perdas em carga

Como mencionado anteriormente, dentre os critérios de avaliação do desempenho energético de transformadores e autotransformadores de potência, um é baseado nas perdas totais máximas permitida, que é o método atual estabelecido em (2) e praticado amplamente no Brasil para os transformadores conectados à Rede Básica e o outro é baseado em uma eficiência mínima, que é o método adotado em (3), mas que ainda não é praticado no Brasil pelo fato da NBR 5356-20, que é uma versão de (3), ainda não ter sido publicada oficialmente.

Para avaliar se os equipamentos recentemente adquiridos pela CEMIG GT atendem a ambos os critérios seria interessante representar esses métodos de forma gráfica. As curvas apresentadas nas Figuras 3 e 4 abaixo demonstram a superposição desses dois critérios tanto para transformadores quanto para autotransformadores.

As linhas retas da Figura 3 representam os valores estabelecidos na Tabela 1 para transformadores de potência e a linha reta da Figura 4 representa a perda total máxima de 0,3% para autotransformadores (2). As curvas ilustradas nessas figuras representam os quatro níveis de eficiência energética propostos em (3), em que IEP significa Índice de Eficiência de Pico.

As Tabelas 2 e 3 abaixo relacionam os resultados obtidos nos ensaios de fábrica para as perdas em vazio e em carga dos fornecimentos de transformadores e autotransformadores para a CEMIG GT entre os anos de 2009 a 2016.

Tabela 2 - Relação das perdas em vazio e perdas em carga medidas em fábrica nos transformadores fornecidos à CEMIG GT.

Qte	Qte Fases	Sn (MVA)	AT (kV)	BT (kV)	P ₀ (kW)	P _K (kW)	Relação P ₀ / P _K (%)	Perdas totais (ONS) (kW)	Relação (P ₀ + P _K) / Perdas ONS (%)
2	1	75	345/√3	138/√3	60,30	162,20	37%	300	-26%
1	3	300	500	138	226,36	612,24	37%	900	-7%
1	3	300	500	138	228,15	609,88	37%	900	-7%
1	3	300	500	138	227,73	606,90	38%	900	-7%
1	3	300	525	138	236,60	586,50	40%	900	-9%
1	3	300	500	138	208,50	581,80	36%	900	-12%
4	1	100	500/√3	17,5	50,00	203,32	25%	900	-72%
1	3	66	230	69	44,05	211,09	21%	330	-23%

A especificação técnica de todos os transformadores da Tabela 2, exceto o transformador monofásico de 100 MVA, contava com o requisito de capitalização de perdas em complemento ao estabelecido pelo Procedimento de Rede (2). As reduzidas perdas desse transformador de 100 MVA são justificadas pelo fato desse equipamento ser aplicado a um compensador estático de reativos, o qual na composição sistêmica, é exigido um rigoroso critério de perdas reduzidas pelo ONS.

Tabela 3 - Relação das perdas em vazio e perdas em carga medidas em fábrica nos autotransformadores fornecidos à CEMIG GT.

Qte	Qte Fases	Sn (MVA)	AT (kV)	BT (kV)	P ₀ (kW)	P _K (kW)	Relação P ₀ / P _K (%)	Perdas totais (ONS) (kW)	Relação (P ₀ + P _K) / Perdas ONS (%)
1	1	50	330/√3	144,9/√3	22,12	122,30	18%	250	-42%
1	3	150	345	138	67,35	284,30	24%	600	-41%
1	3	150	345	138	65,99	284,90	23%	600	-42%
4	1	75	230/√3	138/√3	33,30	137,10	24%	675	-75%
4	1	125	345/√3	138/√3	51,36	217,85	24%	1125	-76%
3	1	125	345/√3	138/√3	53,28	208,49	26%	1125	-77%
1	3	400	500	230	173,58	534,00	33%	1200	-41%
3	1	75	345/√3	230/√3	31,80	86,40	37%	675	-82%
2	1	75	345/√3	230/√3	29,50	87,60	34%	900	-87%
1	3	400	500	345	133,00	462,40	29%	1200	-50%
2	3	400	500	345	120,67	461,26	26%	1200	-52%
4	1	150	345/√3	303/√3	18,27	89,55	20%	1350	-92%

A especificação técnica de todos os transformadores da tabela 3, exceto o transformador monofásico 75 MVA, contava com o requisito de capitalização de perdas em complemento ao estabelecido no Procedimento de Rede (2).

Os dados apresentados na Tabelas 2 mostram que os transformadores apresentaram uma redução média de aproximadamente 20% das perdas obtidas em relação às admissíveis pelo Procedimento de Rede (2). As perdas em vazio correspondem em média à aproximadamente 34% das perdas em carga.

Pela Tabela 3, pode-se notar que as perdas dos autotransformadores em relação às admissíveis pelo Procedimento de Rede (2) são bem mais significativas e apresentam redução média de aproximadamente 63%. Já as perdas em vazio correspondem, em média, à aproximadamente 26% das perdas em carga.

Considerando o baixo fator de carga típico dos transformadores e autotransformadores da rede básica, conforme descrito no item 2.0 deste trabalho, as perdas a vazio devem ser as menores possível visando um menor consumo energético efetivo.

As Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8 buscam avaliar se os equipamentos adquiridos pela CEMIG GT atendem simultaneamente aos requisitos de (2) e de (3) ao destacarem a região delimitada pela intercessão entre as retas obtidas pelo critério estabelecido no Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS e as curvas de desempenho energético estabelecidas pela IEC 60076-20/2017. Para a avaliação dos transformadores, optou-se por considerar o critério mais rigoroso de (2), uma vez que a maioria dos equipamentos da Tabela 2 tem potência maior que 200 MVA e as eficiências máximas (IEP Nível A) e mínima (IEP Nível D) exigidas por (3).

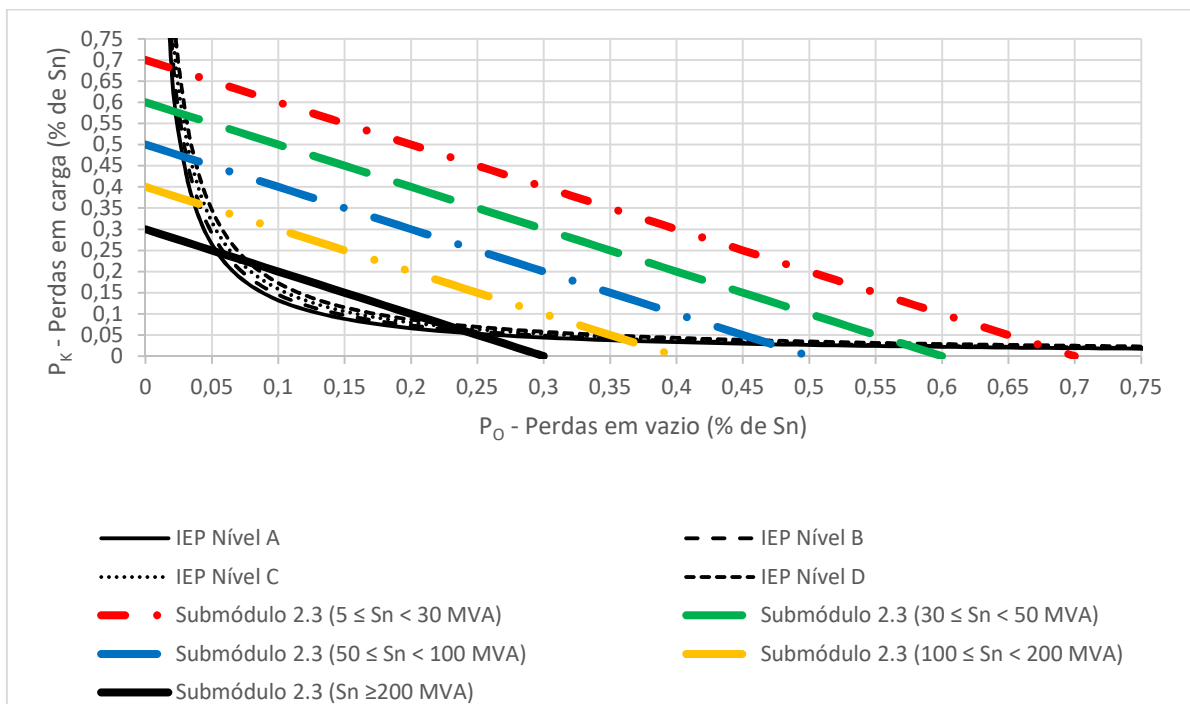


FIGURA 3 – Sobreposição dos critérios para transformadores

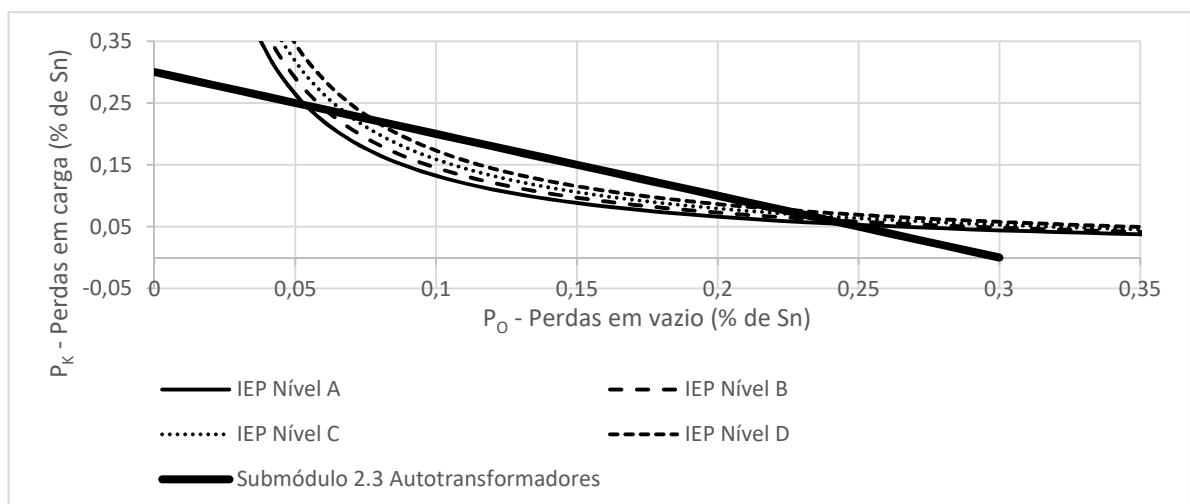


FIGURA 4 – Sobreposição dos critérios para autotransformadores

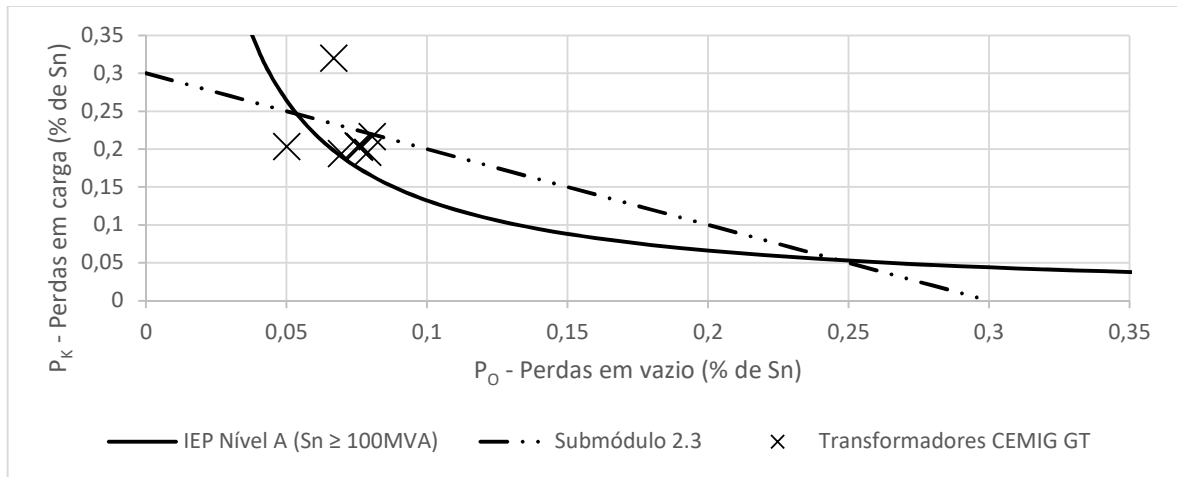


FIGURA 5 – Desempenho energético dos transformadores da CEMIG GT considerando IEP Nível A e ONS

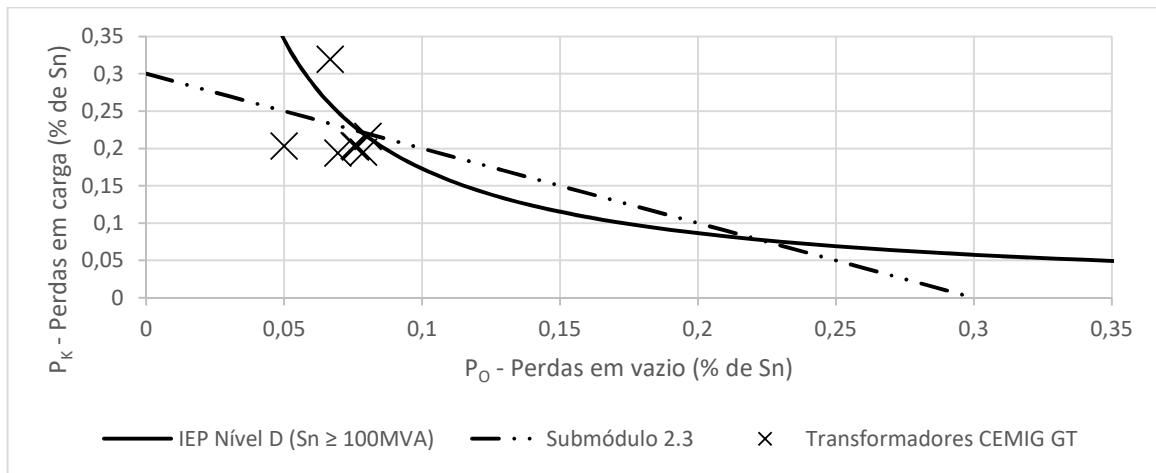


FIGURA 6 - Desempenho energético dos transformadores da CEMIG GT considerando IEP Nível D e ONS

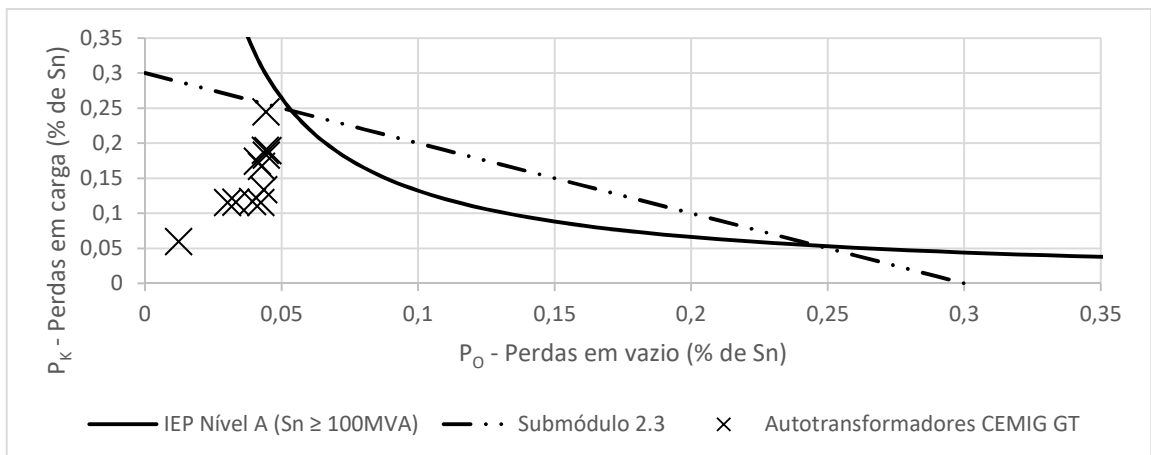


FIGURA 7 – Desempenho energético dos transformadores da CEMIG GT considerando IEP Nível A e ONS

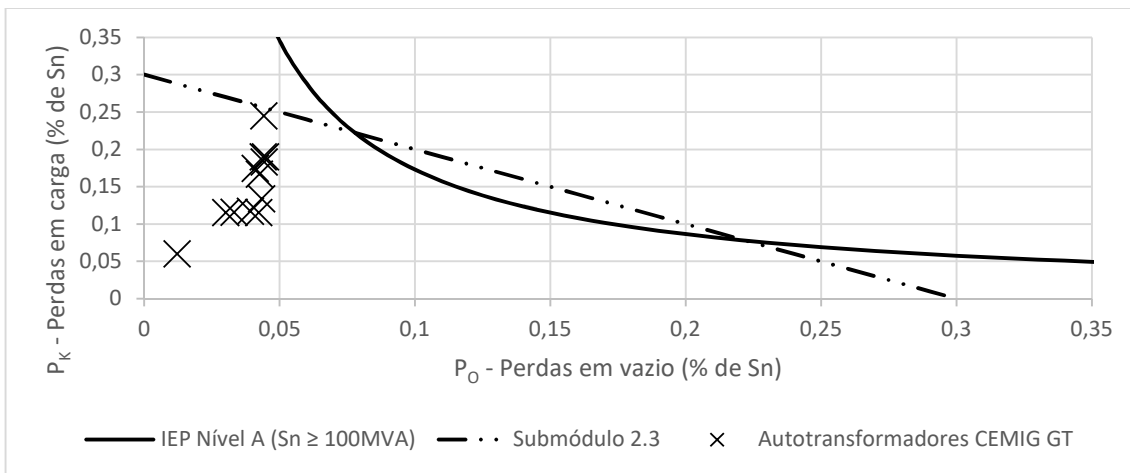


FIGURA 8 - Desempenho energético dos transformadores da CEMIG GT considerando IEP Nível D e ONS

4.0 - CONCLUSÃO

Transformadores são equipamentos cujo projeto e produção são dominados há pelo menos um século. Sendo assim, os atuais esforços para seu desenvolvimento tecnológico visam a melhora de sua eficiência energética, bem como a redução seu peso e dimensões.

As Figura 7 e Figura 8 mostram que felizmente, pelo menos para os autotransformadores, o critério de perda total máxima estabelecido no Submódulo 2.3 do ONS (2) é mais rigoroso que o critério de eficiência mínima da IEC 60076-20/2017 (3) tanto para o IEP Nível A quanto para o IEP Nível D. Por essa razão, se a futura publicação da NBR 5356-20, equivalente brasileira da IEC 60076-20, passar a ser exigida nas especificações técnicas, muito provavelmente esses equipamentos não sofrerão aumento de custo.

O mesmo não pode ser observado nas Figura 5 e Figura 6 para os transformadores, que mostram exatamente o oposto dos autotransformadores. O critério de eficiência mínima da IEC 60076-20 é mais rigoroso que o critério de perdas totais máximas do ONS e dependendo do nível de eficiência exigido na especificação técnica, ações deverão ser tomadas pelos fabricantes para adequar o projeto e muito provavelmente os transformadores terão aumento de custo.

Como mencionado em (5), especificar apenas uma eficiência mínima ou um valor máximo de perdas totais pode ser algo arriscado, uma vez que a relação entre P_0 e P_K pode tanto minimizar o custo do transformador quanto pode otimizar seu desempenho energético durante sua vida útil. Em um cenário em que se deseja o melhor desses dois mundos, esses dois critérios deveriam ser complementares. Isto é, além de uma eficiência mínima para o equipamento, deveriam ser informadas também durante o processo licitatório o custo das perdas em vazio e em carga a fim de permitir o projeto do equipamento com melhor custo global.

Em suma, a tendência de o mercado brasileiro seguir a tendência mundial de desempenho energético de transformadores e autotransformadores de potência e a consequente redução das emissões de CO₂ regulada pela IEC 60076-20/2017 esbarra no fato de que, atualmente no Brasil, não existem incentivos fiscais para que as concessionárias de energia busquem equipamentos mais eficientes em detrimento de equipamentos mais baratos.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ONS - Procedimentos de Rede – Submódulo 2.3 – “Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos” – Operador Nacional do Sistema – Revisão 0.0 – 09/10/2000.
- (2) ONS - Procedimentos de Rede – Submódulo 2.3 – “Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos” – Operador Nacional do Sistema – Revisão 2016.12 – 16/12/2016.
- (3) IEC 60076-20 - “Power transformers – Part 20: Energy efficiency” – International Electrotechnical Commission, 2017.
- (4) ABB – “Transformer Handbook”, 2004.
- (5) BAGGINI, A., BUA, F. “Power transformers energy efficiency programs: a critical review”, IEEE, 2015.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Janaina Gomes da Costa – janaina.costa@cemig.com.br

Possui mestrado (2003) e graduação (2000) em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC MINAS).

Atua na gerência de Estudos de Viabilidade de Expansão de Geração, Transmissão e de Fontes Alternativas da CEMIG GT, desde 2007, como engenheira de projetos na coordenação da equipe de especificação de equipamentos da expansão da transmissão. Atua também como professora do curso de Engenharia Elétrica, desde 2005, na PUC MINAS. Participa ativamente de comitês da ABNT (CB-03) e Cigré-Brasil (A2).



Júnio César Souza da Silva – junio.cesar@tseaenergia.com.br

Possui mestrado (2014) e graduação (2004) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Desenvolveu dissertação na área de Modelagem Caixa Preta de Transformadores de Potência em Amplo Espectro de Frequências. Desde 2005 trabalha na TSEA Energia e divide, atualmente, suas atividades entre projetos elétricos e estudos de sobretensões transitórias em transformadores de potência. Foi responsável, em 2015, pela transferência de tecnologia entre a matriz da TOSHIBA no Japão e sua então subsidiária brasileira do projeto de transformadores isolados a gás SF6, o que permitiu a fabricação do primeiro GIT 100% brasileiro.



Adinã Martins Pena é natural de João Monlevade, MG. Nascido em outubro de 1969, concluiu o curso de graduação em Engenharia Elétrica pela PUCMINAS, de Belo Horizonte, em 1999, e concluiu a pós-graduação na UFSC, de Florianópolis, em 2007. Engenheiro de Planejamento Elétrico, trabalha na Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG Geração e Transmissão, desde julho de 1987 e na Gerência de Planejamento Elétrico, desde de 2004. Atua na área de planejamento da operação do sistema elétrico da geração e transmissão e interação de equipamentos com o sistema elétrico. Possui artigos redigidos e apresentados em congressos e seminários nacionais, em temas relacionados com modelagem e simulação de sistemas de controle e de equipamentos dos Sistemas Elétricos de Potência.