



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Transformadores com núcleo de metal amorfo – Uma solução viável para redução de perdas técnicas da distribuição

| | | |
|-------------------------------|--|---|
| Erivaldo Costa Couto | Adieliton Galvão de Freitas | Prof. Edwin Auza Vilegas, Ph.D |
| Cemig Distribuição S.A | Cemig Geração e Transmissão S.A | UFMG – Depto de Engenharia Metalúrgica |
| erivaldo@cemig.com.br | adieliton.freitas@cemig.com.br | auza@demet.ufmg.br |
| Pablo Senna Oliveira | | |
| Cemig Distribuição S.A | | |
| pablosen@cemig.com.br | | |

PALAVRAS CHAVE:

Metal amorfo
Perdas em vazio
Rendimento
Sustentabilidade
Transformadores de distribuição

RESUMO

Nas últimas décadas, o valor relativo de energia elétrica aumentou consideravelmente e seu uso racional tornou-se estratégia básica para conter os custos. As perdas associadas a distribuição de energia elétrica são de particular interesse para as concessionárias, e o uso de transformadores eficientes é uma das alternativas encontradas para a melhoria da eficiência operacional. Transformadores com núcleo de metal amorfo permitem reduzir em até 80% as perdas em vazio quando comparados com os valores estabelecidos pela norma ABNT NBR 5440.

No Brasil havia um mito de que o metal amorfo não era reutilizável o que a CEMIG Distribuição em conjunto com a Universidade Federal de Minas Gerais demonstraram não ser verdade.

Em função disto, a CEMIG Distribuição realizou um estudo com a finalidade de verificar a viabilidade técnica-econômica da utilização de transformadores eficientes, em especial, os transformadores com núcleo de metal amorfo.

Para isto foi feita uma comparação entre o rendimento e o custo das perdas em vazio, entre os transformadores fabricados de acordo com o padrão ABNT, transformadores com núcleo de metal amorfo e normas de organização internacionais.

O artigo mostra, ainda, os ganhos possíveis de serem obtidos com a redução da emissão de gases do efeito estufa.

1. INTRODUÇÃO

Na atualidade, as concessionárias de distribuição de energia elétrica, assim como empresas de todos os setores da atividade humana, estão cada vez mais preocupadas em inovar para manter sua competitividade em um mercado cada vez mais agressivo e globalizado. No entanto, a inovação está cada vez mais centrada nos pilares da sustentabilidade, com foco nos aspectos econômico, social e ambiental.

Pensando desta forma, a CEMIG Distribuição (CEMIG D), buscando reduzir perdas em seu sistema elétrico, iniciou em 2006 o estudo de aplicação de transformadores de distribuição fabricados com núcleo de metal amorfo. Esta tecnologia permite redução das perdas em vazio dos transformadores de distribuição em valores médios da ordem de 80%, quando comparados aos limites máximos estabelecidos na NBR -5440 - Transformadores para redes aéreas de distribuição – Padronização, melhorando consideravelmente seu rendimento.

No caso da CEMIG D, esta preocupação torna-se premente devido ao grande número de transformadores de baixa potência operando em condições de baixo carregamento. Existem situações em que a energia consumida pelo transformador, quando fabricado de acordo com os limites estabelecidos pela norma brasileira, é maior do que a consumida pelo cliente. Portanto, a aplicação de transformadores de alto rendimento traz vantagens econômicas para a empresa reduzindo a necessidade de aquisição de energia para atender seu mercado.

A redução das perdas pode ter, ainda, impactos positivos sobre as tarifas cobradas dos consumidores e levar ao adiamento de investimentos em geração e transmissão, reduzindo os impactos ambientais decorrentes da produção e transporte de energia.

2. VISÃO GERAL DO PROBLEMA DAS PERDAS DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

As perdas de energia no sistema elétrico em todo o mundo são estimadas, pela organização Leonardo Energy, em 1225 TWh por ano, ou cerca de 8,8% do total de energia elétrica produzida em todo o mundo. Do total de perdas, os transformadores de distribuição instalados em seis grandes economias do mundo (EUA, União Européia, Austrália, Japão, Índia e China), respondem por cerca de 295TWh por ano.

No Brasil as perdas dos transformadores de distribuição podem ser estimadas em 3TWh/ano, para um total aproximado de 2.650.000 transformadores instalados em 2007, conforme dados da ABRADDEE. Apenas as perdas em vazio podem ser estimadas em 2,4TWh/ano.

As novas tecnologias de material para o núcleo de transformadores tais como aços HiB e o metal amorfo podem reduzir sensivelmente os valores de perdas em vazio com impactos favoráveis ao meio ambiente.

Entretanto, a introdução do metal amorfo no Brasil tem sido bastante lenta, provavelmente influenciada pelo custo mais elevado dos transformadores, pela falta de interesse das concessionárias em realizar a capitalização de perdas em suas aquisições e pela acomodação dos fabricantes que, perante esta situação, não investem em novas tecnologias a fim de reduzir as perdas em vazio.

Além disso, a imagem do metal amorfo no Brasil foi prejudicada pelo mito de que ele não é reutilizável e poderia criar problemas ambientais. Para esclarecer este fato, a CEMIG D realizou em conjunto com o Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, um trabalho com foco nos possíveis danos ambientais que o metal amorfo poderia gerar. Os resultados são comentados a seguir.

3. INTERAÇÃO AMBIENTAL E REUTILIZAÇÃO DO METAL AMORFO

Uma das principais preocupações de empresas que empregam materiais, peças ou equipamentos cujas partes ou componentes podem sofrer degradação diante do uso prolongado, inadequado ou exposição acidental ao meio ambiente, está nos subprodutos ou resíduos gerados, que podem provocar danos ambientais.

Em relação aos transformadores com núcleo de material amorfo existe a preocupação do que fazer com os resíduos, quais são os possíveis subprodutos gerados e quais impactos ambientais esse material pode causar ao final de sua vida útil.

3.1. Interações com o meio ambiente

Um metal amorfo é um material metálico que possui uma estrutura atômica desordenada, contrariamente aos metais cristalinos nos quais os átomos obedecem a ordenamentos estruturais perfeitos. Daí o fato dos metais e ligas amorfos serem conhecidos como materiais não-cristalinos.

Os materiais amorfos (metais, ligas, núcleos, etc.) possuem um comportamento similar aos materiais vítreos diante de possíveis reações com o meio ambiente. Isso significa que estes materiais são inertes a agressões de elementos comuns tais como a umidade, os gases oxidantes, a água e soluções, que estão presentes em ambientes urbanos, rurais e industriais. Isso ameniza a preocupação do ponto de vista dos impactos ambientais.

O fato da estrutura amorfa não apresentar contornos de grão faz com que o comportamento de resistência a corrosão localizada seja totalmente diferente dos materiais cristalinos. Devido a isso, os materiais amorfos são protegidos contra algumas formas de corrosão muito graves como a corrosão intergranular, por pites, cavitação, etc.

É importante ressaltar que a gama de informações na literatura internacional, quanto às propriedades de proteção e resistência à corrosão dos materiais amorfos, é imensa. Esses resultados oferecem sustento para amenizar as preocupações em relação aos impactos ambientais em decorrência da implantação de transformadores de núcleo amorfo.

3.2. Reciclagem de materiais amorfos degradados

Resíduos de processo, por exemplo lascas de laminação e também sucatas de núcleos degradados ou oxidados, podem ser reciclados para serem re-processados junto com a matéria-prima nova. Logo, ao final da vida útil do transformador as sucatas e os materiais descartados poderiam ser coletados e reaproveitados pelas empresas que fabricam as ligas amorfas.

A reciclagem de sucatas de materiais amorfos para fornos elétricos de produção de aço não é possível em virtude da estrutura amorfa do material. Porém, essas sucatas podem ser recondicionadas para uso em forno elétrico ou alto-forno através da re-fusão dos materiais e o resfriamento em taxas lentas o que produziria um material com estrutura cristalizada, adequado para uso como reciclado de fornos de produção de aço.

Outra opção é a re-fusão de materiais amorfos para a fabricação de novos materiais amorfos. De fato, a alternativa de refundir os núcleos amorfos usados ou descartados, para regenerar tiras amorfas, é ambientalmente sustentável em virtude das temperaturas relativamente baixas que são necessárias para sua produção. Desta forma, comparada com a produção siderúrgica de aço-Si, o ganho ambiental seria devido a reduções consideráveis do uso de energia.

4. A NORMALIZAÇÃO BRASILEIRA E O RENDIMENTO DOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

Considerando o exposto anteriormente, fruto do trabalho conjunto com a UFMG, a CEMIG D decidiu estudar a possibilidade de padronização de transformadores de distribuição utilizando a tecnologia de transformadores eficientes, entre eles os de núcleo de metal amorfo. Para isto, realizou as avaliações que são comentadas a seguir.

A fim de comparar a norma brasileira com as de outras organizações no que diz respeito ao rendimento dos transformadores de distribuição foram geradas as Figuras 1 e 2.

Foram utilizados na comparação os documentos 10 CFR Part 431 – “Energy Conservation Program for Commercial Equipment: Distribution Transformers Energy Conservation Standards; Final Rule” emitida em 12 de Outubro de 2007 pelo Departamento de Energia (DOE) dos EUA, a norma NEMA TP1 – 2002 – Guide for Determining Energy Efficiency for Distribution Transformers e a norma de harmonização da Comunidade Européia HD 428 da CENELEC.

O DOE deixa claro que os valores de eficiência indicados em seu documento são considerados tecnologicamente praticáveis e economicamente justificáveis e passam a ser obrigatórios nos EUA para transformadores fabricados no país ou importados, após 1 de janeiro de 2010.

Para cálculo do rendimento dos transformadores fabricados de acordo com a ABNT foram considerados os valores de perdas em vazio e totais estabelecidas na NBR 5440. Para os transformadores de núcleo amorfo foram consideradas perdas em vazio fornecidas por um grande fabricante internacional de transformadores com núcleo de metal amorfo. As perdas em carga foram calculadas com base na diferença entre as perdas totais e em vazio estabelecidas pela NBR 5440.

O rendimento foi calculado para um carregamento médio de 50% da potência nominal do transformador.

Figura 1 – Rendimento de Transformadores de Distribuição Monofásicos

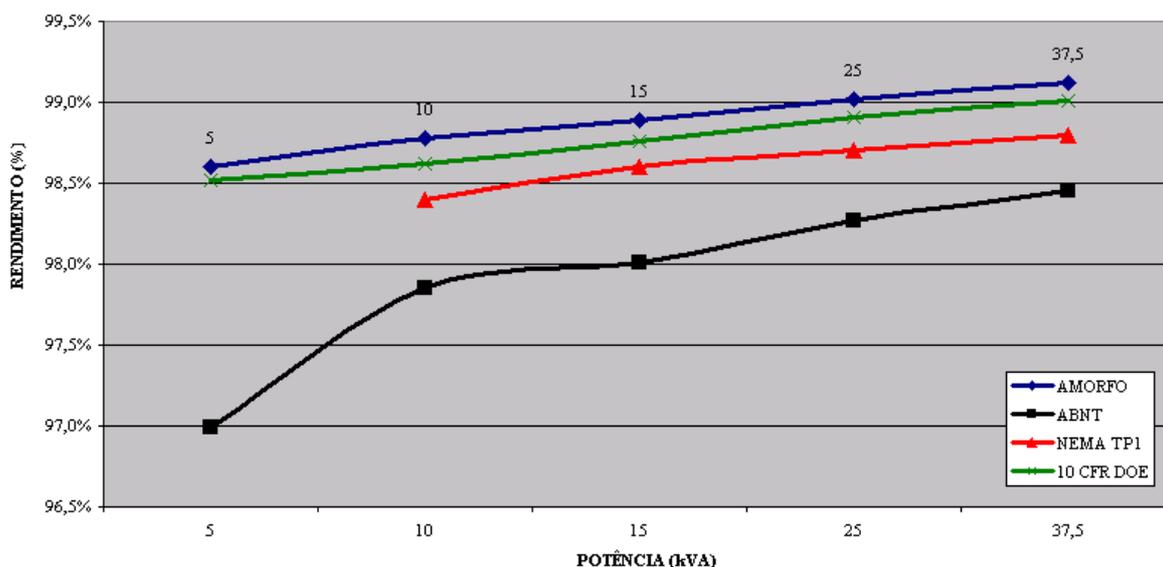
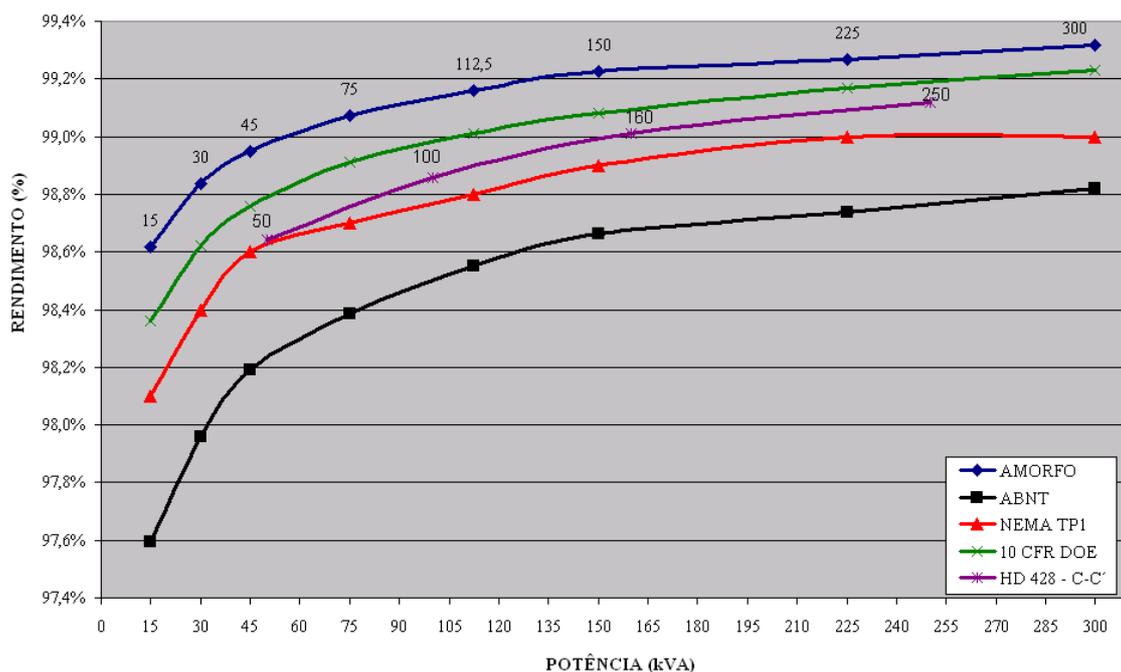


Figura 2 – Rendimento de Transformadores de Distribuição Trifásicos

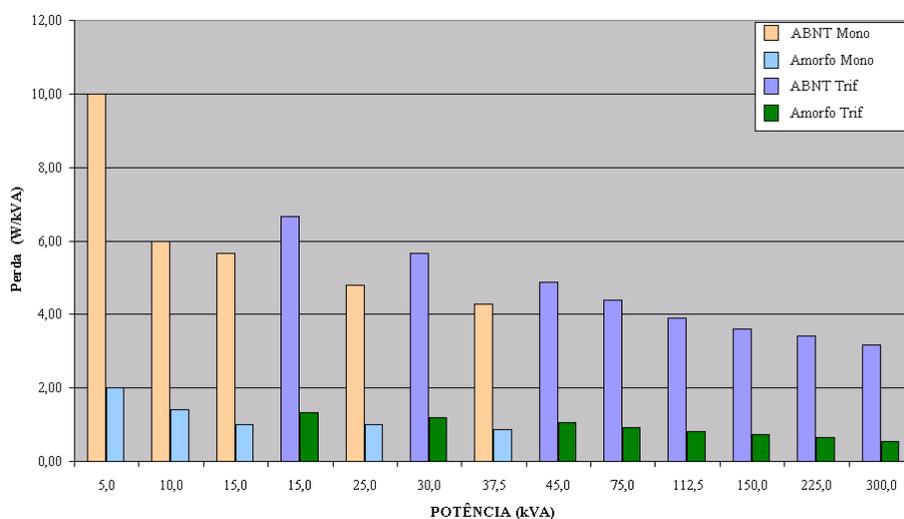


Nas Figuras 1 e 2 estão demonstrados que os transformadores de distribuição fabricados de acordo com a norma ABNT NBR 5440 são os que apresentam pior rendimento, impondo ao sistema de distribuição altas perdas e baixa eficiência energética.

5. PERDAS EM VAZIO E RENDIMENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

As perdas em vazio têm forte influência sobre o rendimento de transformadores de distribuição, especialmente, os de pequena potência (5 e 10kVA - mono), que são os mais utilizados pela CEMIG D na eletrificação de áreas rurais.

Figura 3 – Relação perdas em W/kVA

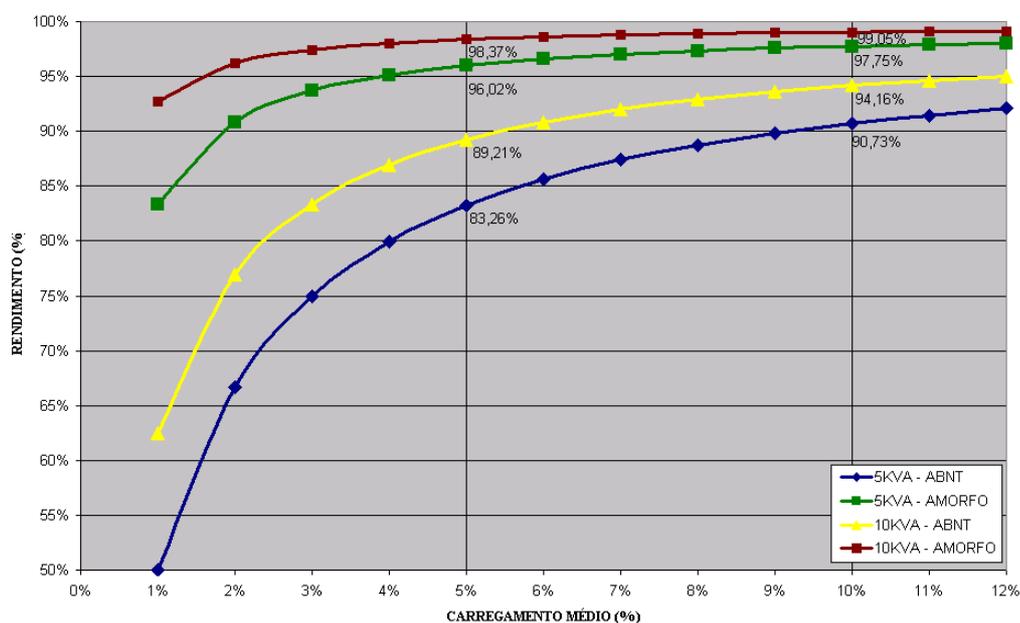


Na Figura 3 está apresentada a relação de perdas (W) por kVA de transformadores monofásicos e trifásicos de 15kV, considerando os valores padronizados pela NBR-5440 e as perdas em vazio de transformadores com núcleo de metal amorfo.

Os transformadores de distribuição em função de suas características de aplicação trabalham, de forma geral, com fatores de carga bastante baixos, mesmo aqueles que operam em redes urbanas. No caso de transformadores que operam em redes rurais o carregamento médio é da ordem de 5 a 10%, pois eles são utilizados em uma relação próxima a um transformador por consumidor.

Está demonstrado na Figura 4 que nas condições de carregamento de 5 e 10% há um aumento acentuado no rendimento dos transformadores quando a tecnologia do núcleo é alterada de aço-silício para metal amorfo, devido à acentuada redução das perdas em vazio.

Figura 4 – Rendimento de Transformadores de 5 e 10kVA



Conforme pode ser visto na Figura 4, considerando as perdas em carga iguais aos valores especificados pela NBR-5440, na condição de carregamento médio de 5%, há um aumento do rendimento dos transformadores entre 13 pontos percentuais para o transformador de 5kVA e 18 pontos percentuais para os transformadores de 10kVA. Isto indica claramente a necessidade de redução das perdas em vazio de transformadores de distribuição. O impacto das perdas em vazio sobre o sistema elétrico será mostrado no próximo item.

6. IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES EFICIENTES NAS PERDAS DE ENERGIA

A melhoria do rendimento dos transformadores de distribuição permitirá uma redução acentuada das perdas de energia no sistema elétrico brasileiro. No entanto, devido ao fato da maioria dos transformadores instalados no Brasil trabalharem com baixo carregamento, especialmente os que operam em redes rurais, a redução da perda em vazio é o fator primordial.

Para avaliação do impacto da redução das perdas em vazio sobre o sistema elétrico da CEMIG D, foi realizada uma análise tomando por base os valores de perdas em vazio estabelecidos pela norma ABNT NBR 5440.

Os valores das perdas de energia, causadas pelas perdas em vazio, para transformadores fabricados de acordo com a norma ABNT foram comparados com os de transformadores com núcleo de metal amorfo e com valores calculados para a Norma NEMA TP-1 e DOE 10CFR. Na Tabela 1, estão indicados os valores de perdas em vazio para transformadores fabricados de acordo com cada uma das situações citadas.

Tabela 1–Perdas Energia Anual em Transformadores de Distribuição na Cemig D

| POTÊNCIA (kVA) | TRANSFORMADORES INSTALADOS | | | PERDAS EM VAZIO (W) | | | | PERDAS DE ENERGIA (MWh/ANO) | | | |
|---|----------------------------|--------|---------|---------------------|--------|-------|--------|-----------------------------|-------------|-------------|-----------|
| | RDR | RDU | TOTAL | ABNT | AMORFO | TP-1 | 10 CFR | ABNT | AMORFO | TP-1 | 10 CFR |
| MONOFÁSICOS | | | | | | | | | | | |
| 5 | 211.742 | 1.700 | 213.442 | 50,0 | 10,0 | 15,7 | 10,0 | 93.487,6 | 18.697,5 | 29.355,1 | 18.697,5 |
| 10 | 156.522 | 4.956 | 161.478 | 60,0 | 14,0 | 31,5 | 20,0 | 84.872,8 | 19.803,7 | 44.558,2 | 28.290,9 |
| 15 | 86.079 | 13.207 | 99.286 | 85,0 | 15,0 | 38,9 | 27,0 | 73.928,4 | 13.046,2 | 33.871,6 | 23.483,1 |
| 25 | 11.551 | 7.635 | 19.186 | 120,0 | 25,0 | 65,0 | 38,0 | 20.168,3 | 4.201,7 | 10.924,5 | 6.386,6 |
| 37,5 | 12.057 | 8.050 | 20.107 | 160,0 | 33,0 | 92,0 | 53,0 | 28.182,0 | 5.812,5 | 16.204,6 | 9.335,3 |
| TRIFÁSICOS | | | | | | | | | | | |
| 15 | 7.515 | 2.460 | 9.975 | 100,0 | 20,0 | 60,0 | 40,0 | 8.738,1 | 1.747,6 | 5.242,9 | 3.495,2 |
| 30 | 8.684 | 22.242 | 30.926 | 170,0 | 36,0 | 102,0 | 68,0 | 46.055,0 | 9.752,8 | 27.633,0 | 18.422,0 |
| 45 | 7.011 | 40.577 | 47.588 | 220,0 | 47,0 | 125,0 | 87,0 | 91.711,6 | 19.592,9 | 52.108,9 | 36.267,8 |
| 75 | 5.483 | 33.191 | 38.674 | 330,0 | 70,0 | 210,0 | 130,0 | 111.798,8 | 23.714,9 | 71.144,7 | 44.042,0 |
| 112,5 | 139 | 7.849 | 7.988 | 440,0 | 90,0 | 295,0 | 175,0 | 30.788,9 | 6.297,7 | 20.642,6 | 12.245,6 |
| 150 | 88 | 3.345 | 3.433 | 540,0 | 108,0 | 355,0 | 220,0 | 16.239,5 | 3.247,9 | 10.675,9 | 6.616,1 |
| 225 | 2 | 331 | 333 | 765,0 | 145,0 | 460,0 | 270,0 | 2.231,6 | 423,0 | 1.341,9 | 787,6 |
| 300 | 4 | 203 | 207 | 950,0 | 165,0 | 670,0 | 330,0 | 1.722,7 | 299,2 | 1.214,9 | 598,4 |
| PERDAS DE ENERGIA (MWh) | | | | | | | | 609.925,2 | 126.637,7 | 324.918,8 | 208.668,1 |
| DIFERENÇA NAS PERDAS DE ENERGIA (MWh/ANO) | | | | | | | | (483.287,5) | (285.006,4) | (401.257,1) | |

Conforme pode ser visto na Tabela 1, a redução de perdas ficaria entre 483.287 MWh/ano para os transformadores com núcleo de metal amorfo e 285.000 MWh/ano para os transformadores fabricados de acordo com a norma NEMA TP-1.

Considerando o custo médio da energia de R\$ 138,00 por MWh, valor considerado pela EPE para expansão da rede básica, a redução de perdas teria um impacto entre R\$ 39.000.000,00 e R\$ 67.000.000,00 no valor anual desembolsado pela CEMIG D para aquisição de energia no mercado, dependendo da referência.

Além disso, é importante notar que a utilização de transformadores mais eficientes permitiria uma redução entre 32MW e 55MW na demanda no sistema da CEMIG D. Considerando que o número de transformadores instalados no Brasil em 2007 é da ordem 2.650.000 segundo a ABRADDEE, pode-se inferir que o impacto da redução das perdas no sistema elétrico brasileiro reduziria a demanda entre 130 MW e 220MW.

Com relação ao custo de aquisição de energia, a redução em todo Brasil ficaria entre R\$ 158.000.000,00 e R\$ 272.000.000,00 por ano, para as concessionárias de distribuição.

7. IMPACTO DA UTILIZAÇÃO DE TRANSFORMADORES EFICIENTES NAS PERDAS DE ENERGIA

Tomando por base a fórmula de capitalização de perdas de transformadores utilizada quando da aquisição destes pela CEMIG D, e considerando somente a parcela referente às perdas em vazio, foi feita uma comparação entre os diversos tipos de tecnologia ou normas consideradas neste estudo, que está mostrada nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Comparativo de Preços ABNT X Outras organizações – 10kVA

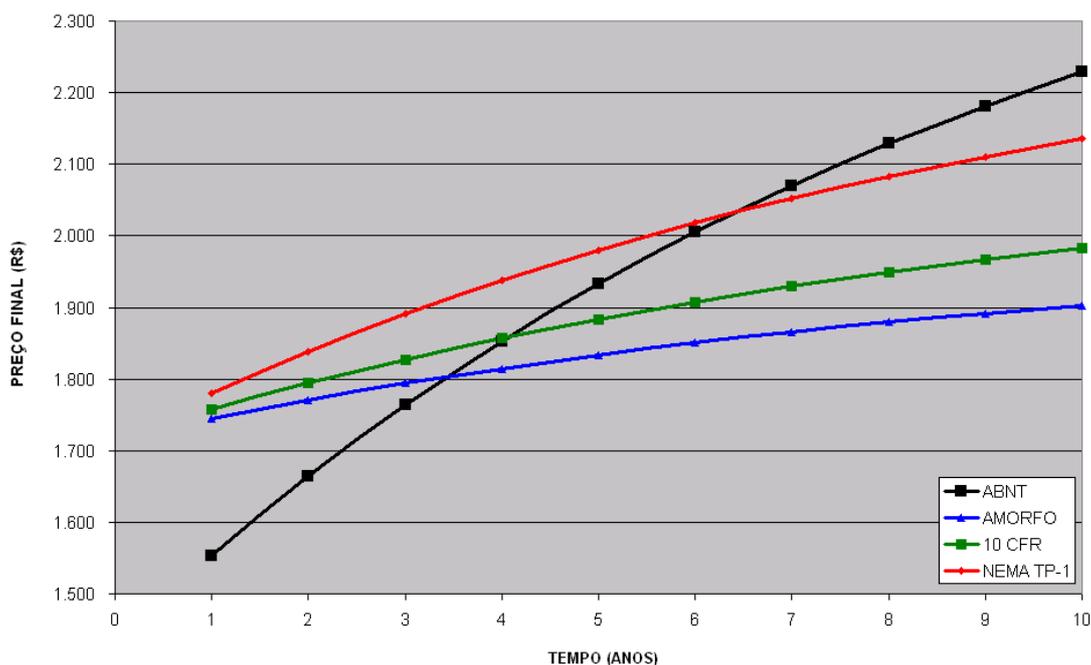
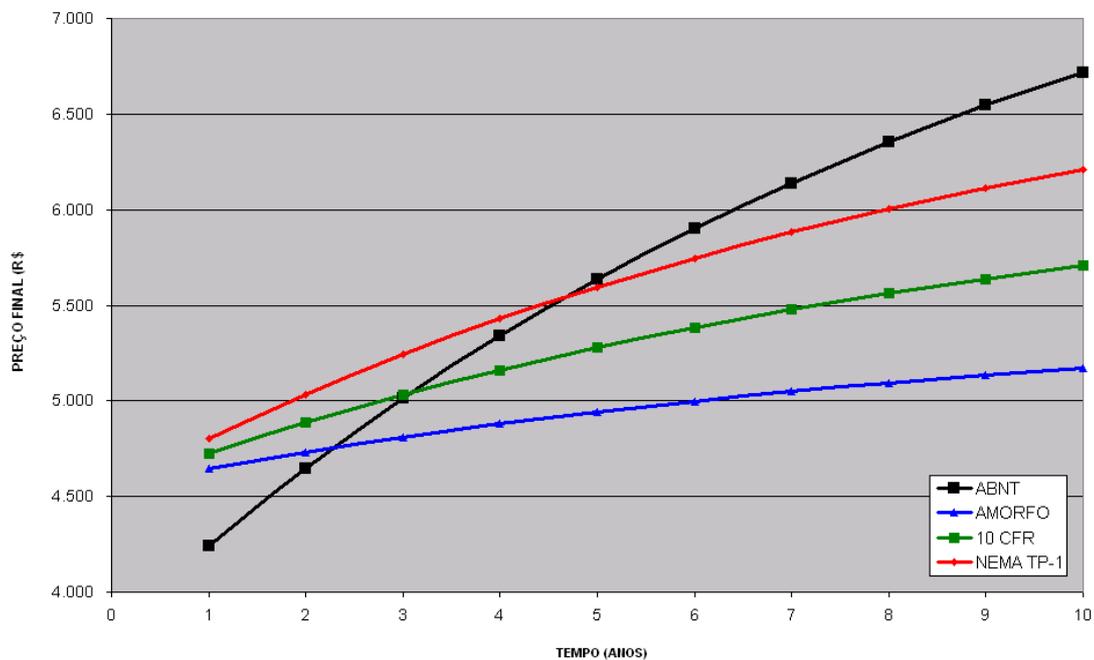


Figura 6-Comparativo de Preços ABNT X Outras organizações – 45kVA



Os cálculos foram realizados utilizando-se uma taxa de capital de 11,26% a.a. e tarifa horosazonal A4. Os valores constantes nas Figuras 5 e 6 foram calculados tomando-se por base o preço de transformadores fabricados segundo a norma ABNT NBR 5440 e um diferencial de preço, a maior, de 20% para os demais tipos ou normas.

Assim, foi possível verificar que os transformadores com núcleo de metal amorfo tornam-se mais vantajosos economicamente do que os transformadores ABNT num intervalo entre 2,3 e 2,9 anos, dependendo da potência. Para a norma DOE 10 CFR 431, este tempo fica entre 2,9 e 3,5 anos.

A norma NEMA TP-1 é a que apresenta maior tempo de retorno. Mesmo assim, o transformador ao longo de sua vida útil é mais vantajoso do que aqueles fabricados de acordo com norma ABNT.

8. IMPACTO AMBIENTAL DO USO DE TRANSFORMADORES EFICIENTES

A melhoria da eficiência energética através da introdução de transformadores eficientes no sistema de distribuição da Cemig pode se constituir em uma ferramenta poderosa para o desenvolvimento sustentável, uma vez que além de proporcionar economia de energia reduz as emissões de gases de efeito estufa que são causadores do aquecimento global.

O aquecimento global é um problema latente nos últimos anos e em 1997, 186 países assinaram o Protocolo de Kyoto. Esse acordo internacional instituiu uma série de ações para minimizar os impactos do aquecimento global em função do aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Dentre elas está o MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, que tem como um dos principais objetivos permitir aos países desenvolvidos compensarem suas emissões de gases causadores do efeito estufa em países em desenvolvimento, na forma de sumidouros, investimentos em tecnologias mais limpas, eficiência energética e fontes alternativas de energia. Sendo assim, as empresas dos países industrializados podem fazer investimentos para a redução de emissões por meio da compra de créditos de carbono dos países que não estão no Anexo I do protocolo, como é o caso do Brasil.

Nessa linha, a substituição de todos transformadores ABNT por transformadores com núcleo de metal amorfo proporcionaria uma redução de perdas de 483.287 MWh/ano, conforme mostrado no item 6. Considerando o fator de emissão para a Região Sudeste e Centro Oeste de 0,1043 t CO₂/MWh (Ministério de Ciência e Tecnologia, 2007) poderiam deixar de ser emitidas anualmente 50.406 toneladas de CO₂, o que representaria uma importante contribuição para minimização dos efeitos do aquecimento global

Se essas emissões evitadas forem comercializadas através da venda de créditos de carbono e considerando o preço de venda da tonelada de carbono de €15,00 e taxa de conversão euro/real de 2,60 poderia ser ter uma receita anual de aproximadamente R\$ 2.000.000,00, aumentando, assim, a taxa de retorno do projeto.

Extrapolando esta análise para o sistema elétrico brasileiro e considerando o exposto no item 2 o potencial de redução de emissões de CO₂ é da ordem de 205.000 t CO₂ com uma receita anual de R\$ 8.000.000,00.

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Do exposto no trabalho conclui-se:

- a. o metal amorfo é plenamente reutilizável, o que torna sua aplicação viável sob o aspecto ambiental;
- b. a redução das perdas elétricas dos transformadores de distribuição reduz os custos das distribuidoras com possíveis impactos favoráveis na tarifa;
- c. com a redução das perdas de transformadores de distribuição é possível adiar investimentos em geração e transmissão e seus impactos ambientais;
- d. a norma brasileira de transformadores de distribuição leva à construção de transformadores de baixa eficiência quando comparados com transformadores fabricados de acordo com normas de outras organizações;

- e. mesmo com o custo maior, os transformadores eficientes são economicamente viáveis igualando os custos em cerca de 3 anos, caso a diferença seja de 20%;
- f. a redução de emissões de CO2 pode contribuir significativamente para um projeto de substituição dos transformadores existentes por outros mais eficientes, principalmente, os que utilizam a tecnologia de núcleo de metal amorfo;
- g. que a tecnologia de transformadores eficientes pode ser considerada sustentável por permitir ganhos sociais (otimização da tarifa), ambientais (o metal amorfo é reutilizável) e econômicos (os transformadores são economicamente viáveis), estando, portanto totalmente alinhado com o conceito de sustentabilidade.

Considerando-se os itens anteriores, recomenda-se:

- a. revisão da norma brasileira com a finalidade de aumentar a eficiência de transformadores fabricados no país;
- b. que as concessionárias passem a utilizar a sistemática da capitalização de perdas nas aquisições de transformadores de distribuição;
- c. que seja formatado um programa nacional com uso de recursos da eficientização energética para substituição de transformadores antigos por transformadores eficientes, reduzindo as perdas do sistema elétrico e incentivando a indústria nacional a dar um salto tecnológico.

Em função da análise mostrada no trabalho a CEMIG D introduzirá na próxima revisão de sua especificação técnica de transformadores a possibilidade de receber transformadores com núcleo de metal amorfo. É importante notar que a CEMIG D utiliza, há cerca de 25 anos, a sistemática de aquisição com capitalização de perdas.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. NBR-5440 - Transformadores para Redes Aéreas de Distribuição – Padronização, 1999
2. CENELEC. NEMA TP1. Guide for Determining Energy Efficiency for Distribution Transformers, 2002
3. Ministério de Ciência e Tecnologia. Fatores de Emissão de CO2 pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil - Ano Base 2006. <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/50862.html> .Acessado em 15/12/2007
4. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. 10 CFR Part 431. Energy Conservation Program for Commercial Equipment: Distribution Transformers Energy Conservation Standards; Final Rule. (2007)
5. LEONARDO ENERGY. Global energy savings potential from high efficiency distribution transformers – October 2007