



ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



EVENTO
ON-LINE

02 a 04
de dezembro 2020

Benefícios Econômicos e Ambientais da utilização de Transformadores de Distribuição de Metal Amorfo no Sistema Brasileiro de Energia Elétrica

Gabriel da Penha Vieira

Faculdade MULTIVIX

Geraldo David Campos Pereira

Faculdade MULTIVIX

Guilherme Augusto Lima Cesar

Faculdade MULTIVIX

Adan Lucio Pereira

Docente das Engenharias - Faculdade MULTIVIX

Resumo: Os transformadores são equipamentos primordiais nos sistemas de distribuição de energia elétrica, entretanto, são os principais responsáveis por perdas elétricas na rede, aproximadamente 1/3 de todas as perdas técnicas contabilizadas. As perdas de energia durante o funcionamento de um transformador definem seu rendimento. Nesse sentido os materiais utilizados na etapa de fabricação dos núcleos de transformadores são grandes responsáveis pela performance e eficiência do equipamento. Assim sendo, as características físico-químicas dos materiais empregados nos núcleos dos transformadores surgem como ponto chave na melhoria dos níveis de rendimento. Destacam-se dois tipos de transformadores, os com núcleo de Ferro Silício de Grão Orientado (TDGO), mais empregados no sistema brasileiro de distribuição de energia elétrica, e os Transformadores de Distribuição com núcleo de Metal Amorfo (TDMA), que apresentam maior eficiência energética. Em relação as perdas a vazio, os TDMA's apresentam reduções de até 80%, isto se deve ao aumento da permeabilidade magnética que facilita o estabelecimento do fluxo no núcleo, estreitamento do laço de histerese e redução de correntes parasitas em seu interior. Essa redução de perdas a vazio se reverte em significativos ganhos econômicos, como postergação em investimento de infraestrutura e redução de custos de energia, e ambientais, como a redução de emissão de CO₂ e aumento de expectativa de vida útil do equipamento. Desta forma, o uso de TDMA mostra-se como uma alternativa inovadora, econômica e sustentável para o setor elétrico brasileiro.

Palavras-chave: Economia, Metal Amorfo, Sustentabilidade, Transformador.

Economic and Environmental Benefits of using Amorphous Metal Distribution Transformers in the Brazilian Electricity System

Abstract: Transformers are essential equipment in electricity distribution systems however, they are the main responsible for electrical losses in the network, approximately 1/3 of all technical losses accounted for. Energy losses during the operation of a transformer define its performance. In this sense, the materials used in the manufacturing stage of the transformer cores are the largely responsible of the performance and efficiency of the equipment. Therefore, the physical and

chemical characteristics of the materials used in the cores of the transformers appear as a key point in the improvement performance levels. Two types of transformers stand out, those with an Oriented Grain Silicon Iron core (TDGO), that are the most used in the Brazilian electricity distribution system, and the Distribution Transformers with an Amorphous Metal core (TDMA), which are more efficient energy. In relation to empty losses, TDMA's show reductions of up to 80%, this is due to the increase in magnetic permeability that facilitates the establishment of the flow in the nucleus, narrowing of the hysteresis loop and reduction of eddy currents within it. This reduction in empty losses is reflected in significant economic gains, such as the postponement of infrastructure investments and the reduction of energy costs, and environmental ones, such as the reduction of CO2 emissions and increased life expectancy of the equipment. Thus, the use of TDMA shows up as an innovative, economical and sustainable alternative for the Brazilian electricity sector.

Keywords: Economy, Amorphous Metal, Sustainability, Transformer.

1. Introdução

Diante da crescente necessidade da humanidade em conciliar consumo e preservação ambiental, a produção de equipamentos mais eficientes constituem estratégia essencial ao desenvolvimento sustentável (SILVA, 2015). Para o setor elétrico a busca por equipamentos pautados por essa perspectiva e alinhado à redução de perdas energéticas é um desafio.

No Brasil, estima-se que 15% de toda energia elétrica gerada é perdida, sendo que o setor de distribuição corresponde a cerca de 70% dessas perdas (MEDEIROS *et al.*, 2016). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) relata que no ano de 2018 as perdas técnicas na distribuição tenham alcançado cerca de 38,3 TWh (ANEEL, 2019). Como a demanda de energia está em crescimento, conforme descrito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), e sabendo-se que as perdas elétricas impactam diretamente em custos financeiros, surge então a discussão a respeito das possíveis reduções de perdas elétricas no sistema de distribuição (EPE, 2020).

Os principais equipamentos do sistema de distribuição são os transformadores, empregados em grande número ao longo de toda cadeia de distribuição. Estima-se que existam aproximadamente 2,5 milhões de transformadores instalados no sistema elétrico brasileiro (GOMES; MARTINS, 2017). Dessa forma, os transformadores são responsáveis pela maior parcela das perdas técnicas contabilizadas, tornando-se ponto chave e oportunidade de otimização sustentável.

Diante de tal situação, uma alternativa para se alcançar redução das perdas elétricas nos transformadores de potência, e conseqüentemente reduzir gastos financeiros, foi a utilização de metal amorfo, em substituição ao aço silício, para construção do núcleo ferromagnético. Segundo a literatura, esse transformador reduz as perdas a vazio (quando o transformador está operando sem cargas) em até 80% quando comparado com o transformador mais utilizado no sistema elétrico brasileiro de distribuição, o de aço silício de grãos orientados (HASEGAWA, 2004; SALUSTIANO, 2012; CHAVES *et al.*, 2013; SILVA, 2015; FINOCCHIO *et al.*, 2015).

Portanto, o presente estudo busca explorar os aspectos econômicos e ambientais que contribuem para a adoção de transformadores de metal amorfo em redes elétricas de distribuição. Para tanto, será caracterizado o transformador de metal amorfo, destacando a influência econômica da redução de perdas, geradas por sua utilização, elencando paralelamente os âmbitos ambientais que favorecem seu emprego no sistema de distribuição.

2. Revisão Teórica

2.1. Conceitos básicos sobre Transformadores

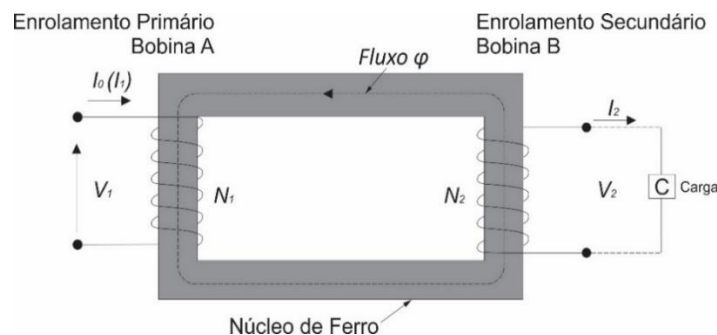
Os transformadores são equipamentos auxiliares extremamente importantes para diversos tipos de circuitos elétricos em corrente alternada (CA), desde suporte às adaptações de tensões para circuitos eletrônicos à sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Possibilitando que seja realizado o transporte de energia em níveis de tensões mais seguras e também mais viáveis tanto tecnicamente quanto financeiramente (SIMONE, 2010; CHAPMAN, 2013).

Mamede Filho (2019) os define como equipamentos que convertem a energia elétrica CA, de uma determinada frequência e nível de tensão, em energia elétrica CA com a mesma frequência, porém com outro nível de tensão, utilizando para isso um campo magnético. Segundo Simone (2010) seu funcionamento é regido pelo princípio da indução eletromagnética fundamentado pela lei de Faraday - Neumann ou lei de Lenz.

Dadas suas funções, os transformadores possuem os seguintes elementos essenciais: enrolamento primário, enrolamento secundário e núcleo. O núcleo na maioria das vezes é constituído de material ferromagnético de forma a intensificar o acoplamento magnético (JORDÃO, 2002).

A Figura 1 ilustra um transformador monofásico com ênfase em seus elementos essenciais. Observa-se a importância do núcleo para o estabelecimento do fluxo ϕ .

Figura 1- Esquema de um transformador monofásico



Fonte: Adaptado de Mamede Filho (2015)

2.2. Transformadores segundo o Núcleo

O núcleo é um importante elemento que auxilia no desempenho do transformador. Sua existência é justificada pelo fato de o material ferromagnético confinar o fluxo em um caminho de alta permeabilidade, o que potencializa a indução eletromagnética de tensão no secundário (UMANS, 2014).

Campos (2006) e Luciano e Castro (2011) destacam dois tipos de transformadores, classificados com base na estrutura cristalina do metal empregado em seu núcleo:

- TDGO: Transformador de Distribuição de Grão Orientado;
- TDMA: Transformador de Distribuição de Metal Amorfo.

A depender do tipo de material e da estrutura atômica dos metais laminados, empregados no núcleo, o transformador pode ter sua eficiência aumentada, no que diz respeito a suportabilidade de efeitos elétricos/magnéticos e redução de perdas, graças à atuação direta na permeabilidade magnética (CAMPOS, 2006; SILVA, 2015).

Os materiais empregados no núcleo de transformadores são em sua maioria de ferro silício de grão orientado. Entretanto, estudos indicam que a utilização de metal amorfo, em núcleos de transformadores, possibilitam a otimização na eficiência do equipamento, com

redução de perdas no ferro que podem alcançar a ordem de 70% a 80%, quando comparados com os de ferro silício de grão orientado (HASEGAWA, 2004; SALUSTIANO, 2012; CHAVES *et al.*, 2013; SILVA, 2015; FINOCCHIO *et al.*, 2015).

2.2.1. Liga de ferro silício de grão orientado

A liga de ferro silício ($Fe-Si$), em forma de chapa, tem em sua composição aproximadamente 5% de silício, cuja finalidade é gerar melhorias no desempenho dos transformadores. Como por exemplo, a redução das perdas por histerese e conseqüente redução das correntes parasitas, também conhecidas como correntes de Foucault, definição dada a corrente induzida no interior de um material condutor submetido a campo eletromagnético (CHAPMAN, 2013; UMANS, 2014; MAMEDE FILHO, 2019).

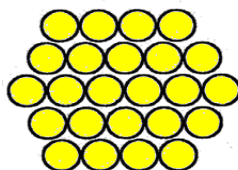
Segundo Toledo (2007) e Silva (2015), existem dois tipos de núcleo de ferro silício, os de Grãos Não Orientados, conhecidos como GNO, e os de Grãos Orientados (GO). Os dois tipos serão apresentados abaixo respectivamente:

a) Os núcleos de ferro silício inicialmente foram desenvolvidos empregando-se GNO. Esses materiais podem ser obtidos por meio da técnica de laminação a quente, onde os grãos são orientados de maneira desordenada, de forma que as propriedades magnéticas independem da laminação. Desse modo a circulação do fluxo magnético é facilitada;

b) Por volta de 1934 inicia-se a produção de ferro silício de grão orientado (GO), que diferentemente da chapa de silício GNO, apresenta estrutura cristalina com direção preferencial de magnetização. A contabilização das perdas das chapas GO em comparação com aços GNO, são inferiores quando medidas na direção paralela de laminação, tal fato popularizou o emprego dos aços GO em núcleos de transformadores.

A Figura 2 apresenta a estrutura atômica cristalina do ferro silício de grão orientado, nela pode-se verificar que os átomos possuem organização/orientação definida.

Figura 2 - Estrutura atômica cristalina do ferro silício (GO)



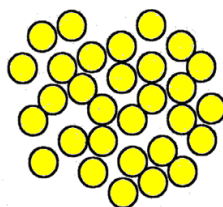
Fonte: Adaptado de Finocchio *et al.* (2015)

2.2.2. Ligas Amorfas

Segundo Raskin e Davis (1981) e Finocchio *et al.* (2015) a produção do primeiro transformador de distribuição com núcleo de metal amorfo ocorreu em 1976 no laboratório Lincoln do Instituto Tecnológico de Massachusetts.

As ligas amorfas, diferentemente das ligas cristalinas, apresentam uma estrutura atômica desordenada, gerada pela solidificação abrupta do metal, em seu estado fundido, a partir da aplicação de altas taxas de resfriamento de forma a inibir a cristalização e o tempo para que haja mudanças microestruturais, durante o processo de fabricação (LUCIANO, 1995). Os efeitos na organização atômica, gerados pelo rápido resfriamento da liga fundida, são representados pela Figura 3.

Figura 3 - Estrutura atômica amorfa



Fonte: Adaptado de Finocchio et al. (2015)

A composição das ligas normalmente é à base de *Fe*, *Co*, *FeNi*, *FeCo*, entre outras, que possibilitam alta indução magnética com alta permeabilidade associada. As composições mais citadas na literatura são a FINEMET (*FeSiNbCu*) e a Metglas (*Fe₇₈B₁₃Si₉*). Em ambos os casos a prerrogativa de resfriamento ultrarrápido das ligas fundidas é obedecida gerando a organização atômica mencionada (LUCIANO; CASTRO, 2011; LOYOLA, 2011).

A união da composição química e da estrutura atômica dos metais amorfos lhe conferem características magnéticas favoráveis ao estabelecimento de indução magnética. A indução de saturação pode ser até 20% menor quando comparada com outros metais (CASTRO; LUCIANO, 2009).

Silva et al. (2001) e Campos (2006) citam ainda o processo de recozimento na presença de um campo magnético longitudinal pelo qual o metal amorfo pode melhorar ainda mais suas propriedades magnéticas. Segundo eles, este processo possui importância, já que o metal passa por intenso estresse elástico durante o processo de fabricação e o processo de recozimento leva-o a relaxação estrutural.

3. Metodologia

O presente trabalho é classificado como uma pesquisa de natureza básica, com objetivos exploratórios, utilizando como procedimento pesquisas bibliográficas numa abordagem quali quantitativa.

Foram empregados como fontes de coleta de dados a *Scielo (Scientific Electronic Library Online)*, *Elsevier*, *IEEE Xplore®*, *Google acadêmico*, portais de instituições e organizações públicas e privadas, como ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), EPE (Empresa de Pesquisa Energética), CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica), CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica), MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações), UFPA (Universidade Federal da Paraíba), UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), USP (Universidade de São Paulo), e CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) entre outras. Realizou-se uma análise descritiva nesses matérias, comparando e enumerando os principais pontos de forma imparcial.

Os dados selecionados estão compreendidos entre os anos 1981 e 2020, onde buscou-se referências relacionadas ao tema: conceitos de máquinas elétricas; transformadores com núcleo de metal amorfo; transformadores com núcleo de ferro silício de grão orientado; perdas em transformadores; comparativo entre TDGO's versus TDMA's; viabilidade econômico-financeira de TDMA's; eficiência energética em transformadores de distribuição; sustentabilidade versus transformadores; benefícios ambientais.

4. Resultados e Discussão

4.1. Análise das Perdas

A ANEEL (2019) define perdas de energia elétrica como a energia produzida que passa pelo processo de transmissão e distribuição do Sistema Elétrico de Potência, porém que não é comercializada, seja por questões técnicas ou não técnicas. Na distribuição essas perdas podem ser estabelecidas como a divergência da energia elétrica obtida pelos distribuidores e a fornecida aos seus consumidores.

Diante disso, a redução das perdas energéticas é um dos maiores desafios das concessionárias de energia elétrica, pois elas proporcionam um custo econômico desnecessário aos consumidores e as empresas, por conta da energia “desperdiçada” (BERNARDON *et al.*, 2007).

Um transformador ideal seria um transformador com 100% de rendimento, portanto, sem perdas elétricas, todavia na prática esse modelo não existe. As perdas de energia durante o funcionamento de um transformador definem seu rendimento, ou seja, sua eficiência energética. Quanto menos perdas houver, mais eficiente é o transformador. Buscar um aumento na eficiência de transformadores, significa uma considerável economia de energia (JORDÃO, 2002; SALUSTIANO, 2012; CHAPMAN, 2013; UMANS, 2014).

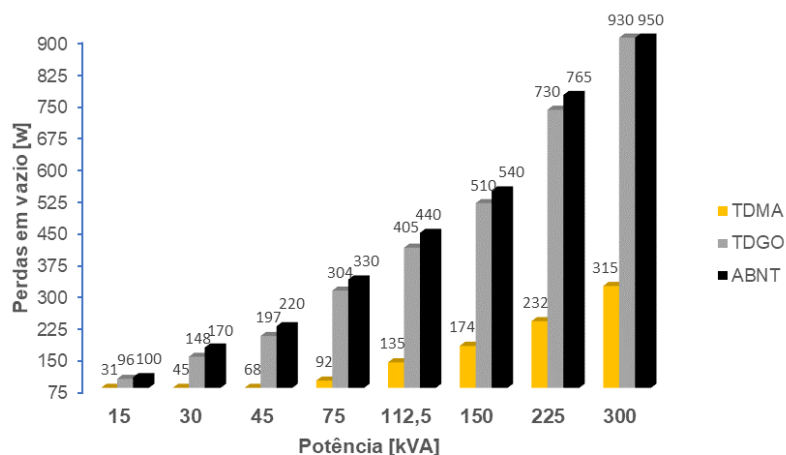
Nesse sentido os materiais que são utilizados na etapa de fabricação dos núcleos de transformadores são grandes responsáveis pela performance e eficiência do equipamento. As melhorias dos níveis de rendimento dos transformadores são decorrentes dos novos métodos e materiais utilizados na fabricação dos núcleos (SILVA, 2015).

Em síntese, os transformadores são produzidos com a finalidade de ter um alto rendimento. Os equipamentos com maior eficácia costumam ser mais caros do que os menos eficientes. Entretanto, os transformadores com maior rendimento podem trazer um retorno financeiro maior, quando analisada a economia decorrente da diminuição das perdas resultantes dele (SALUSTIANO, 2012).

Diante dos transformadores de distribuição, as perdas são divididas em dois tipos: perdas no cobre e perdas no núcleo. O primeiro tipo acontece quando as perdas dependem da carga, já o segundo não está relacionado a carga, ou seja, perdas a vazio (MÉFFE, 2001; CHAPMAN, 2013).

Finocchio, Mendonça e Vitor (2012) realizaram um comparativo de perdas a vazio de transformadores trifásicos da classe de 15kV e os resultados são apresentado no gráfico da Figura 4.

Figura 4 – Perdas a vazio por transformadores até 300kVA.



Fonte: Finocchio, Mendonça e Vitor (2012).

Ao analisar a Figura 4 percebe-se que o TDMA apresenta melhor desempenho em relação ao TDGO. Tal fato se dá principalmente pelo aumento da permeabilidade magnética do núcleo, estreitamento do laço de histerese e redução de correntes parasitas em seu interior.

4.2. Benefícios Econômicos da utilização de TDMA's em redes de distribuição de energia elétrica

Um estudo realizado por Couto *et al.* (2010) no XIX Seminário Nacional de Energia Elétrica, por meio de uma parceria entre a CEMIG e a UFMG, demonstrou que em 2007 as perdas dos transformadores de distribuição no sistema elétrico brasileiro alcançaram, em montantes de energia, cerca de 4,7 TWh/ano. Ainda segundo o estudo, desse montante, 3,6 TWh/ano corresponderam às perdas a vazio, o que equivale a aproximadamente 76,6% do total de perdas referentes aos transformadores de distribuição.

Considerando o último relatório de perdas de energia elétrica na distribuição, da ANEEL (2019), estima-se que as perdas técnicas no sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro, em 2018, tenham alcançado 38,3 TWh/ano. Sendo que aproximadamente um terço do total de tais perdas, são ocasionadas pelos transformadores de distribuição de média tensão conforme descrito pelo Instituto Brasileiro do Cobre - Procobre (SANGUEDO *et al.*, 2008; PROCOBRE, 2009; SILVA, 2015).

Com base nas informações da Procobre (2009), pode-se estimar então que aproximadamente 12,76 TWh/ano, do montante de perdas técnicas do ano de 2018, referem-se aos transformadores. Considerando 76,6% desse valor, conforme realizado por Couto *et al.* (2010), pode-se aferir que aproximadamente 9,77 TWh/ano corresponderam às perdas a vazio.

Supondo um cenário em que todos os transformadores empregados no sistema de distribuição de energia elétrica brasileiro fossem TDMA's (hipoteticamente uniformes nas grandezas definidas pelos diversos fabricantes e nas características regionais de cada subsistema, o que não ocorre na prática), e levando em consideração que a redução de perdas a vazio nesse tipo de transformador pode alcançar valores entre 70% a 80%, estima-se que a economia gerada estaria compreendida entre 6,84 TWh/ano e 7,82 TWh/ano.

Segundo a CCEE (2020) o custo médio da energia elétrica, comercializada no mercado livre brasileiro, para o ano de 2018, foi de aproximadamente R\$ 270,86 por MWh conforme demonstra a Tabela 1.

Tabela 1 - Preço Médio da CCEE (R\$/MWh)

mês/ano	Submercado				Média Mensal
	SE/CO	S	NE	N	
dez-18	78,96	78,96	71,13	51,61	70,17
nov-18	123,92	123,92	123,92	123,92	123,92
out-18	271,83	271,83	271,83	271,83	271,83
set-18	472,75	472,75	472,75	473,58	472,96
ago-18	505,18	505,18	505,18	505,18	505,18
jul-18	505,18	505,18	505,18	505,18	505,18
jun-18	472,87	472,87	441,96	441,96	457,42
mai-18	325,46	325,46	211,57	159,47	255,49
abr-18	109,71	109,71	108,64	51,13	94,80
mar-18	219,23	219,23	218,14	40,16	174,19
fev-18	188,79	188,54	178,54	42,91	149,70
jan-18	180,07	177,82	178,01	142,23	169,53
Média Anual:					270,86

Fonte: Adaptado de CCEE (2020)

De posse das estimativas do custo médio da energia elétrica e do montante (TWh/ano) das perdas a vazio, dos transformadores, no sistema de distribuição de energia elétrica

brasileiro, com base no ano de 2018, é possível destacar o seguinte cálculo conforme Equação 1:

$$C.T.P = C.M * M.P \quad (1)$$

Em que:

- C.T.P é o custo total das perdas anual dado em R\$;
- C.M é o custo médio da energia elétrica dado em R\$/MWh;
- M.P é o montante das perdas a vazio em MWh/ano.

Substituindo os dados de Custo Médio (R\$ 270,86 por MWh) e o Montante das Perdas a vazio em uma redução de 70% (6,84 TWh/ano), na Equação 1 obtém-se o valor estimado de pelo menos R\$ 1.852.682.400,00 por ano que poderia ser economizado caso o sistema elétrico de distribuição brasileiro empregasse TDMA's em sua totalidade.

4.3. Benefícios Ambientais da utilização de TDMA's em redes de distribuição de energia elétrica

A inserção de transformadores mais eficientes no sistema elétrico de distribuição torna-se uma excelente ferramenta ao desenvolvimento sustentável, já que além de proporcionar economia de energia/custos, reduz as emissões de gases nocivos ao meio ambiente como o Dióxido de Carbono (CO_2), Óxidos de Nitrogênio (NO_x) e o Dióxido de Enxofre (SO_2) (DECRISTOFARO, 1998; PROCOBRE, 2009; COUTO *et al.*, 2010).

O MCTI realiza anualmente estudos relacionando a emissão de CO_2 à geração de energia elétrica pelas usinas, criando um fator de emissão médio em tCO_2/MWh (Toneladas de CO_2 por Megawatt Hora) (MCTI, 2020).

Para o ano de 2018, o MCTI apresentou um fator de emissão médio de 0,0740 tCO_2/MWh , ou seja, cada Megawatt Hora de energia gerada, equivale a emissão de 0,074 toneladas de CO_2 (MCTI, 2020). De posse desse dado e com o valor estimado de economia de energia, para o mesmo período, com a utilização dos TDMA's, a redução de emissão de CO_2 poderia ser calculada fazendo-se a multiplicação do valor economizado em MWh/ano pelo Fator de Emissão Médio, conforme demonstrado pela Equação 2.

$$Emissão = F.E.M * M.P \quad (2)$$

Em que:

- F.E.M é o fator de emissão médio;
- M.P é o montante das perdas a vazio em MWh/ano.

Portanto, considerando o valor que foi estimado de 6,84 TWh/ano de economia de energia, pela implantação de TDMA's no sistema elétrico brasileiro, esse representaria para o ano de 2018 uma redução de emissão de CO_2 de aproximadamente 506.160,00 toneladas.

Outro aspecto ambiental positivo, diz respeito ao tempo de vida útil dos TDMA's. Estudos demonstram que por possuir uma menor condutibilidade térmica no núcleo em comparação com os núcleos de TDGO's, há reduções de temperatura na faixa de 52,54%, o que leva o equipamento a um menor stress térmico ao longo do tempo, permitindo assim um acréscimo de vida útil (HASEGAWA, 2004; SCARDAZZI, 2007; FINOCCHIO *et al.*, 2015).

Com uma maior vida útil, o descarte de sucatas de TDMA's será postergado e menor. Além disso, os materiais empregados neste equipamento podem ser reciclados e, ou reprocessados, tais vantagens contribuem com o meio ambiente (COUTO *et al.*, 2010).

5. Considerações finais

Diante das abordagens realizadas pelo presente estudo, fica evidente que melhorar o rendimento dos transformadores de distribuição no sistema elétrico brasileiro possibilitaria reduções significativas nas perdas de energia elétrica.

Nesse sentido, o transformador com núcleo de metal amorfo mostra-se como uma alternativa interessante, possibilitando uma redução expressiva de perdas a vazio. Tais perdas ocupam um “espaço” importante nas redes elétricas, reduzi-las permite a postergação de investimentos em infraestrutura por meio da otimização de redes existentes, além de “liberar espaço” para inserção de novas cargas.

No âmbito financeiro, além da otimização em investimento de infraestrutura, destaca-se também a redução de custo com energia dissipada. Já no aspecto ambiental, tem-se a redução de emissão de gases nocivos ao meio ambiente e o aumento de vida útil do equipamento, o que contribui diretamente com o desenvolvimento sustentável. Como trabalhos futuros pretende-se fazer a investigação do aproveitamento desses materiais para utilização na logística reversa.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatório: Perdas de Energia Elétrica na Distribuição**. 2019. Disponível em:< https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia_+Edi%C3%A7%C3%A3o+1-2019-02-07.pdf/d7cc619e-0f85-2556-17ff-f84ad74f1c8d>. Acesso em 20 mai 2020.

BERNARDON, D. P. *et al.* Perdas técnicas e comerciais de energia elétrica em sistemas de distribuição. **VII Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica**. Santa Maria: AGEPOC, 2007.

CAMPOS, M. L. B. **Estudos de aplicação experimental e viabilidade de utilização de transformadores de distribuição com núcleo amorfo**. 2006. 137 f. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (EP/FEA/IEE/IF), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CASTRO, W. B.; LUCIANO, B. A. Vidros Metálicos: uma nova classe de materiais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 20-25, 2009.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Preços Médios**. 2020. Disponível em:< https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afzLoop=360886807387892&_adf.ctrl-state=fql4vvhrv_63#!%40%40%3F_afzLoop%3D360886807387892%26_adf.ctrl-state%3Dfql4vvhrv_67>. Acesso em 03 out 2020.

CHAPMAN, J., S. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: Editora AMGH, 2013.

CHAVES, C. S. *et al.* Estudo comparativo entre o emprego de ligas amorfas em relação ao aço silício na construção de reatores saturados. In: CONFERÊNCIA DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA (CEEL) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 11, 2013, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: CEEL - UFU, 2013.

COUTO, E. C. *et al.* Transformadores Com Núcleo De Metal Amorfo Uma Solução Viável Para Redução De Perdas Técnicas Da Distribuição. In: Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica SENDI, 19, 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SENDI, 2010.

DECRISTOFARO, N. Amorphous Metals in Electric-Power Distribution Applications. **MRS Bulletin**, v. 23, n. 5, p. 50-56, 1998.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético de 2019**. Brasília: 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>>. Acesso em 14 abr. 2020.

FINOCCHIO, M. A. F. *et al.* Análise da eficiência Energética do Transformador de Distribuição com Metal Amorfo. **Revista Técnico-Científica do CREA - PR**, Curitiba, 3 ed., 2015.

FINOCCHIO, M. A. F.; MENDONÇA, M.; VITOR, A. L. O. Comparação das perdas a vazio de transformadores trifásicos da classe 15kV dotados de núcleo amorfo e ferro silício. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 17, Curitiba, 2012. **Anais...** Curitiba: SICITE, 2012.

GOMES, T. L. C.; MARTINS, C. C. C. Eficiência energética aplicado em núcleos de transformadores. In: SIMPÓSIO DE ESTUDOS EM ENGENHARIA ELÉTRICA DO TOCANTINS, 01, Palmas, 2017. **Anais...** Palmas: SEEET, 2017.p. 20-27.

HASEGAWA, R. Energy efficiency of amorphous metal based transformers. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE TEAMT'2004, 2004, Carolina do Sul. **Anais...** South Carolina: TEAMT'2004, 2004. p. 219-223.

JORDÃO, R. G. **Transformadores**. São Paulo: Editora Blucher, 2002.

LOYOLA, G. V. **Efeitos de deformações controladas em fitas amorfas magnetostrictivas estudados por Espectroscopia Mössbauer do ⁵⁷Fe**. 2015. 98 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física do Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

LUCIANO, B. A. **Estudo de aplicações da liga Fe78B13Si9 amorfa em núcleos de transformadores de baixa potência**. 1995. 136 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1995.

LUCIANO, B. A.; CASTRO, W. B. Transformadores de distribuição de energia elétrica com núcleo de metal amorfo. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 01-05, 2011. Disponível em:< <http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/download/187/180>>. Acesso em: 22 mar. 2020.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed., 1 reimpr. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

MCTI – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNONOLIGA E INOVAÇÕES. **Fator médio - Inventários corporativos**. 2020. Disponível em: <http://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html?searchRef=Fatores%20de%20Emiss%C3%A3o%20de%20CO2%20pela%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20el%C3%A9trica%20no%20Sistema%20Interligado%20Nacional%20do%20Brasil&tipoBusca=expressaoExata>. Acesso em: 04 out. 2020.

MEDEIROS, L. H. *et al.*, Desenvolvimento de transformadores de distribuição de elevada eficiência empregando núcleo amorfo e óleo vegetal isolante. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga v. 3, n. 6, p.125-139, 2016.

MÉFFE, A. **Metodologia para cálculo de perdas técnicas por segmento do sistema de distribuição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Pulo, 2001.

PROCOBRE. **Eficiência energética em transformadores de distribuição**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Cobre, 2009. Disponível em:<
<http://www.abcobre.org.br/conteudo/eficiencia-energetica-em-transformadores-de-distribuicao-xyy2cl.html> >. Acesso em: 06 out. 2020.

RASKIN, D.; DAVIS, L. A. Materials: Metallic glasses: Researchers are grappling with novel production techniques that would revolutionize transformer manufacturing. **IEEE Spectrum**, v. 18, n. 11, p. 28-33, 1981.

SALUSTIANO, R. **Análise técnica de transformadores para redes de média tensão**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

SANGUEDO, C. A. *et al.*, **Determinação das perdas técnicas dos transformadores de distribuição, com dielétrico líquido, instalados nas empresas concessionárias de energia no Brasil**: Relatório Técnico DIE-6454/08. Rio de Janeiro: CEPEL, 2008.

SCARDAZZI, A. **Ferramentas para o Monitoramento da Vida Útil de Transformadores**. São Paulo: FIEE Elétrica, 2007. Disponível em: <
<http://www.tec.abinee.org.br/2007/arquivos/s1002.pdf> >. Acesso em: 15 mai. 2020.

SILVA, P. R. **Otimização de projetos de transformadores de distribuição que empregam núcleo amorfo e óleo vegetal isolante**. 2015. 82 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SILVA, S. R. *et al.* Caracterização de transformadores com núcleo de metal amorfo para aplicação em redes monofásicas de distribuição de energia elétrica. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 1, 2001, Brasília. **Anais...** Brasília: CITENEL, 2001.

SIMONE, A. G. **Transformadores - Teoria e Exercícios**. São Paulo: Editora Érica, 2010.

TOLEDO, T. F. **Siliciação de aço silício**. 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto - Rede Temática em Engenharia de Materiais - CETEC, Belo Horizonte, 2007.

UMANS, D. S. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. Porto Alegre: Editora AMGH, 2014.