

Ligas Metálicas Magnéticas na Fabricação de Núcleos de Transformadores

Fábio de Oliveira Carvalho* André Nunes de Souza**
 Danilo Sinkiti Gastaldello*** Pedro da Costa Junior****
 Andre Giffalli† Gustavo Vinicius Santana‡

* Dep. de Eng. Elétrica - FEB - Bauru (fabio.o.carvalho@unesp.br).

** Dep. de Eng. Elétrica - FEB - Bauru (andre.souza@unesp.br)

*** Dep. de Eng. Elétrica - FEB - Bauru (danilo.gastaldello@usp.br)

**** Dep. de Eng. Elétrica - FEB - Bauru (costa.jr@unesp.br)

† Dep. de Eng. Elétrica - FEB - Bauru (andregiffalli@gmail.com).

‡ Dep. de Eng. Elétrica - FEB - Bauru (gu.santi@gmail.com).

Abstract:

Brazil has a giant electric power system, requiring only one resource to keep the operation in operation and a large investment for expansion. Numerous researches around the world work towards making renewable energy sources viable, such as those provided by photovoltaic generators, as well as the better integration of these devices into the current power system, seeking to obtain the maximum energy contribution from photovoltaic generators with minimal interference to other electrical system equipment. The electrical transformers are ubiquitous equipment in distribution networks, it is necessary to study and evaluate the effects that interference from non-sinusoidal power supplies may have on them. A known effect of the presence of non-sinusoidal sources is the increase of losses and unwanted heating in the magnetic core of transformers. In this context, this article aims to present an analysis of the potential use of some commercial metal alloys for the construction of magnetic cores of distribution transformers. The article seeks to analyze some commercial metallic alloys observing the mass, the energy losses, and the price, in the case of a possible replacement of the material usually used to build the magnetic cores of the distribution transformers.

Resumo: O Brasil possui um sistema elétrico de potência gigantesco, sendo necessário um alto custo para mantê-lo em operação e um grande investimento para expandi-lo. Inúmeras pesquisas ao redor do mundo trabalham no sentido de viabilizar as fontes de energia renováveis, tais como aquelas proporcionadas por geradores fotovoltaicos, bem como a melhor integração desses dispositivos ao sistema de potência atual, buscando a máxima contribuição energética de geradores fotovoltaicos com um mínimo de interferência aos demais equipamentos do sistema elétrico. Os transformadores elétricos são equipamentos onipresentes em redes de distribuição, se faz necessário estudar e avaliar os efeitos proporcionados por fontes de alimentação não-senoidais sobre eles. Um efeito conhecido da presença de fontes não-senoidais é o aumento das perdas e aquecimentos indesejados no núcleo magnético dos transformadores. Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma análise do potencial de uso de algumas ligas metálicas comerciais para construção de núcleos magnéticos de transformadores de distribuição. Objetiva também avaliar os dados relacionados a massa e as perdas de energia, considerando também o aspecto financeiro do investimento necessário no caso de uma substituição da matéria-prima de manufatura dos núcleos.

Keywords: Distribution Transformer; Core Losses; Magnetics Mettals Alloys.

Palavras-chave: Transformador de Distribuição; Perdas no Núcleo; Ligas Metálicas Magnéticas.

1. INTRODUÇÃO

1.1 As características do Sistema Elétrico de Potência Convencional (SEPC)

O SEPC possui uma topologia desenvolvida para promover o Fluxo de Energia no sentido único - dos geradores para os consumidores (Fig. 1) (U.S Departmenty of Energy, 2019).

No Brasil, o SEPC possui uma capacidade instalada de geração de aproximadamente 165 GW, sendo 99 GW provenientes das usinas hidrelétricas (60%), 40 GW provenientes de usinas termelétricas (24%), e o restante proveniente de fontes renováveis, bem como energia nuclear (ANEEL, 2019a). A extensão atual das linhas de transmissão é de 132.925 km e, até 2022, a expansão desta rede deverá chegar em 161.593 km. A previsão do montante de recursos para realização destas obras, somente para o ano de 2019, era de R\$ 20 bilhões (ONS, 2017).

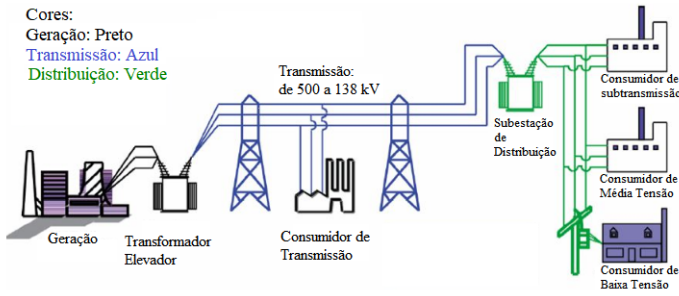


Figura 1. Sistema Elétrico de Potência Convencional. Adaptado de (U.S Department of Energy, 2019).

A Rede de Distribuição de Energia Elétrica (RDEE) do Brasil não possui dados consolidados que demonstrem sua magnitude. Entretanto, é possível analisar algumas informações como o número de clientes que acessam a RDEE que em 2019 era cerca de 84.663.415 de clientes (EPE, 2019). Desse montante 36.684.282 (43,32%) estão ligados na RDEE de 12 das maiores Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica (CDEE), que juntas somam 1.563.864 km de RDEE, e 2.372.566 de transformadores de distribuição (TD) (ANEEL, 2019c).

As perdas energéticas decorrentes da operação destes sistemas são de aproximadamente 4% na Transmissão, e 13,5% na Distribuição. As perdas na distribuição são divididas entre: Perdas Técnicas e Perdas Não Técnicas. As Perdas Técnicas referem-se as perdas inerentes ao transporte da energia através de cabos e transformadores; enquanto que as Perdas Não Técnicas, referem-se a erros de medição, ligações provisórias, furtos de energia, e operação indevida da iluminação pública (ANEEL, 2019b).

1.2 As características dos transformadores de distribuição (TD)

Os TDs são equipamentos que rebaixam níveis de Média Tensão (MT - entre 1 kV e 40 kV) para níveis de Baixa Tensão (BT - abaixo de 1 kV). Há vários modelos disponíveis, fabricados por inúmeras empresas, em conformidade com a topologia da rede elétrica, sendo que na fabricação dos TDs são necessários processos controlados e mão-de-obra qualificada (Heathcote, 1998). Os núcleos dos transformadores trifásicos são fabricados com geometrias padronizadas conhecidas como perfil EI (Mclyman, 2004), a partir de materiais de baixo custo e ótimas propriedades magnéticas. O Aço-Silício com Grão Orientado Convencional, em espessuras que variam de 0,23 a 0,35 mm (AGB, 2019) é um exemplo de matéria prima bastante empregada nos TDs.

1.3 Perdas no núcleo

A *histerese* é um dos principais fenômenos relacionados a perdas de energia nos núcleos, sendo influenciada pela frequência da fonte de alimentação, entre outros fatores. Cada material tem o seu desempenho máximo em espectros de frequências específicas. Quando o núcleo é excitado por uma fonte com frequência fora do espectro de máxima eficiência, as perdas podem aumentar significativamente (Mclyman, 2004) (Fig. 2).

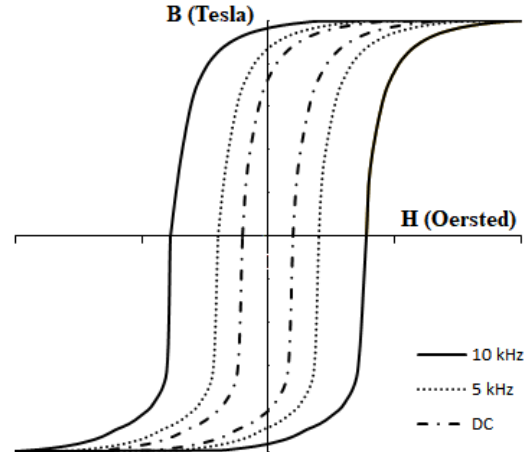


Figura 2. Perdas no núcleo em função da frequência. Adaptado de (Mclyman, 2004).

Outro conceito importante atribuído as perdas nos núcleos são as *correntes parasitas*. Estas correntes elétricas são induzidas no interior dos núcleos dos TDs quando esses sofrem influência de um campo magnético. (Mclyman, 2004) (Fig. 3).

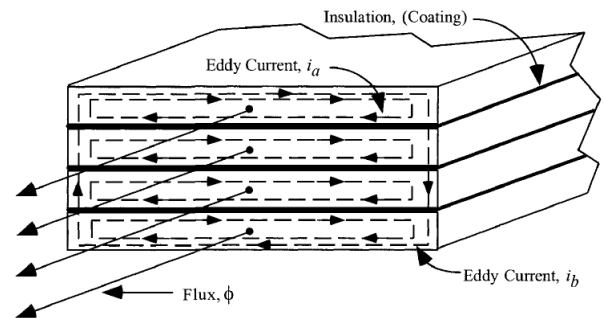


Figura 3. Correntes parasitas (*Eddy Currents*). Adaptado de (Mclyman, 2004).

As perdas de energia no núcleo causadas pelas correntes parasitas P_{cl} se tornam maiores com o aumento da frequência elétrica da fonte de alimentação, conforme podemos constatar na equação 1 (Fish, 1990):

$$P_{cl} = (\pi B_{\text{máx}} f h)^2 / 6\rho \quad (1)$$

Onde; $B_{\text{máx}}$ é o valor de pico do campo magnético aplicado ao núcleo; f é a frequência da fonte de alimentação; h é a espessura da lâmina metálica utilizada da construção do núcleo; e ρ é a resistividade elétrica do material utilizado no núcleo.

As perdas de potência no núcleo por unidade de massa P_{nm} de um transformador são obtidas através da equação 2 (Mclyman, 2004), onde é possível observar a influência da frequência de alimentação. A Tabela 1 apresenta as principais características magnéticas das ligas metálicas mais utilizadas nos núcleos.

$$P_{nm} = k f^{(m)} B^{(n)} [W/kg] \quad (2)$$

Onde: P_{nm} é a perda no núcleo magnético por unidade de massa; k é a constante de perda relativa ao material; f é a frequência de alimentação do transformador; B é o campo magnético aplicável ao material. Os parâmetros k , m e n podem ser obtidos na Tabela 2 (Mclyman, 2004).

O montante das perdas de energia no núcleo do transformador é proporcional a massa do mesmo, conforme a equação 3 (Mclyman, 2004):

$$P_{fe} = P_{nm}m_{n\u00FAcleo} [W] \tag{3}$$

Onde; P_{fe} é a perda total no núcleo magnético; P_{nm} é a perda no núcleo por unidade de área; $m_{n\u00FAcleo}$ é a massa do núcleo magnético.

A eficiência do transformador pode variar de acordo com o conteúdo harmônico (Taci and Domijan, 2004). Alguns dados experimentais são apresentados na Fig. 4 onde os seguintes casos foram pesquisados:

- (a) Fonte senoidal alimentando uma carga linear;
- (b) Fonte senoidal alimentando uma carga não linear;
- (c) Fonte não senoidal alimentando uma carga linear; e
- (d) Fonte não senoidal alimentando uma carga não linear.

Tabela 1. Propriedades magnéticas de algumas ligas metálicas comerciais. Adaptado de (Fish, 1990).

Categoria	B_s (T)	ρ ($\mu\Omega.m$)	$\mu_{m\u00E1x}$	Perda no núcleo (W/kg) $f/B_{m\u00E1x}$ (Hz/T)
A. Aços				
Silício grão conv. orientado	2,0	0,48	5.10^3	0,9 (60/1,5)
B. Fe-Ni-Co				
40-50Ni	1,6	0,48	$1,5.10^5$	110 (50k/0,2)
77-80Ni (Permalloy)	1,1	0,55	$1,5.10^5$	40 (50k/0,2)
79Ni-4Mo (Supermalloy)	0,8	0,58	1.10^6	33 (50k/0,2)

Tabela 2. Fatores de Perda no Núcleo (Mclyman, 2004).

Material	Espessura (mm)	k	m	n
Silício grão conv. orientado	0,0254	0,0593000	0,993	1,740
50-50Ni-Fe	0,0254	0,0028100	1,210	1,380
77-80Ni (Permalloy)	0,0254	0,0000774	1,500	1,800
79Ni-4Mo (Supermalloy)	0,0254	0,0002460	1,350	1,910

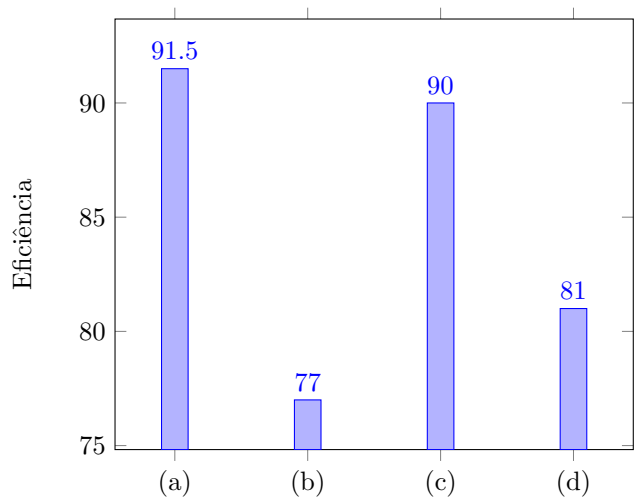


Figura 4. Eficiência do Transformador em função do nível harmônico na fonte e na carga. Adaptado de (Taci and Domijan, 2004).

1.4 O sistema fotovoltaico integrado ao SEP convencional

Os sistemas fotovoltaicos consistem em um conjunto de dispositivos com a finalidade de converter a radiação proveniente do sol em energia elétrica. Para melhor desempenho destes sistemas são necessários: painéis fotovoltaicos que convertam a radiação solar em energia elétrica na forma de corrente contínua (*Low Voltage Direct Current - LVDC*); reguladores de carga para otimizar o aproveitamento da energia elétrica gerada regulando a tensão e a corrente elétrica e inversores que convertem a LVDC em corrente alternada (*Low Voltage Alterned Current - LVAC*) (Fig. 5) (Carneiro, 2009).

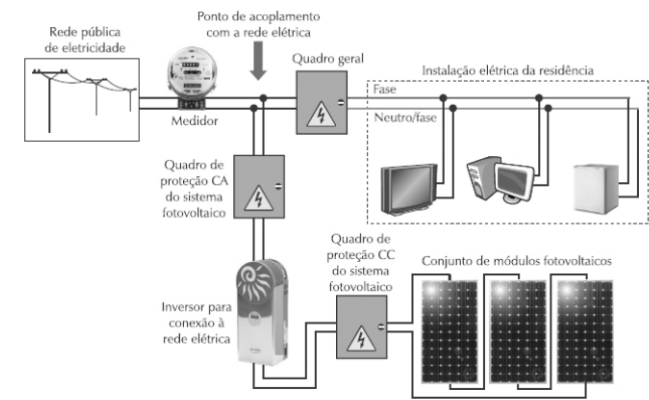


Figura 5. Integração dos painéis fotovoltaicos a rede elétrica. Adaptado de (Villalva, 2015).

A capacidade de conversão da radiação solar em energia elétrica dos painéis fotovoltaicos varia de acordo com o nível instantâneo de radiação solar (W/m^2) incidente sobre as placas, uma vez que a presença de nuvens diminui o nível de radiação (Figura 6). Outro fator que influencia a eficiência de painéis fotovoltaicos é a sua temperatura. O aumento da temperatura, causado justamente pela exposição ao sol, reduz a eficiência dos painéis (CANADIAN

SOLAR INC., 2019) (Figura 7). Considerando os fatores: radiação solar e temperatura, busca-se o ponto de maior eficiência do conversor, denominado "rastreamento do ponto de máxima potência" (*Maximum Power Point Tracking - MPPT*) (Figura 8) (Villalva, 2015).

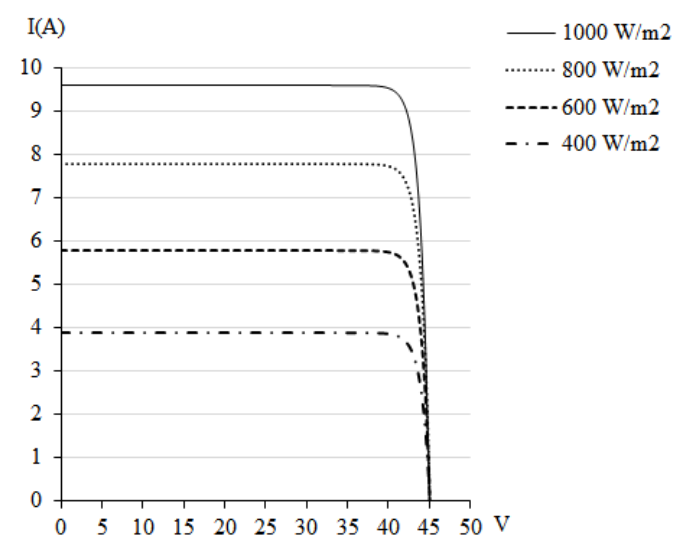


Figura 6. Eficiência dos painéis fotovoltaicos em função da radiação solar. Adaptado de (CANADIAN SOLAR INC., 2019).

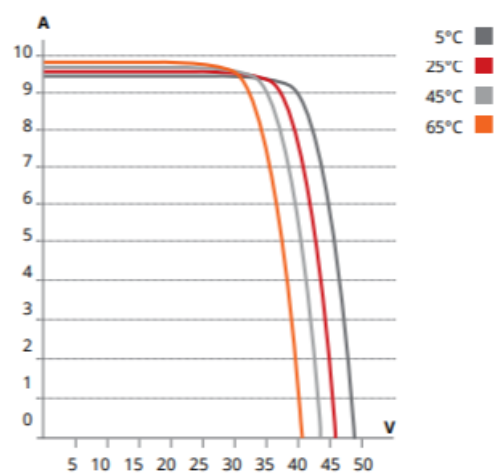


Figura 7. Eficiência dos painéis fotovoltaicos em função da temperatura. Adaptado de (CANADIAN SOLAR INC., 2019)

Sabendo-se que o nível de tensão da Corrente Contínua (CC) fornecido pelos painéis fotovoltaicos oscila com a radiação solar e temperatura, utiliza-se circuitos conversores CC abaixador-elevador para controle da tensão obtida (Figura 9) (Mohan, 2014) (Rashid, 2014).

Os conversores CC-CA, também conhecidos como inversores, são dispositivos eletrônicos que convertem a energia elétrica de LVDC em LVAC (Figura 10), sendo que o controle da amplitude da tensão de saída é realizado através do chaveamento dos dispositivos eletrônicos utilizando a técnica de Modulação de Largura de Pulso, também

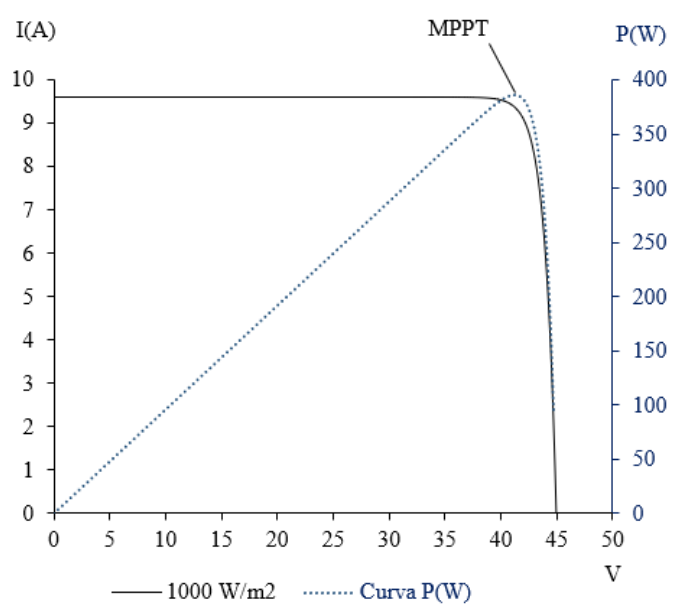


Figura 8. Rastreamento do ponto de máxima potência MPPT. Adaptado de (Villalva, 2015).

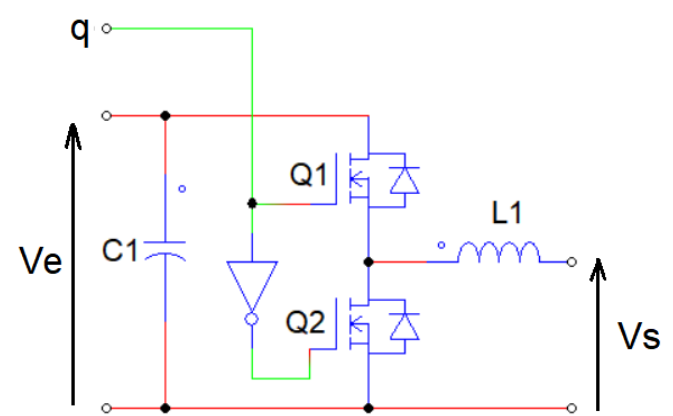


Figura 9. Conversor CC-CC abaixador/elevador. Adaptado de (Mohan, 2014).

conhecida como PWM (*Pulse Width Modulation*) (Figura 11) (Rashid, 2014).

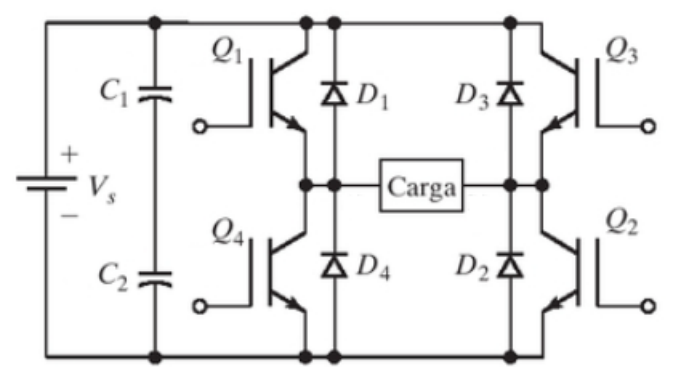


Figura 10. Conversor CC-CA. Adaptado de (Rashid, 2014).

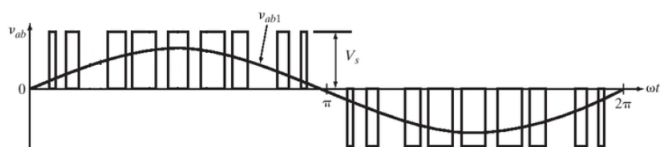


Figura 11. Forma de onda na saída do Conversor CC-CA. Adaptado de (Rashid, 2014).

2. METODOLOGIA

O objetivo deste artigo é avaliar algumas ligas metálicas comerciais com características magnéticas interessantes do ponto de vista das perdas de energia, quando estas são usadas na fabricação de transformadores de distribuição. Considerando o aumento da inserção de geradores fotovoltaicos na RDEE, com suas características já explicitadas, espera-se um aumento do nível harmônico na RDEE e consequentemente um aumento nas perdas de energia no núcleo dos transformadores.

O aço-silício é o material utilizado atualmente no núcleo dos TDs, tem eficiência reduzida quando opera em frequências maiores que a fundamental, portanto espera-se que a aplicação de materiais, com características magnéticas superiores ao aço-silício, ao núcleo dos transformadores de distribuição tenha custo competitivo e possa melhorar a eficiência do TD mesmo operando com fontes não-senoidais. Como critério de comparação, definiu-se um transformador de distribuição bastante encontrado na RDEE, no caso, um transformador de distribuição com tensão nominal primária de 13,8 kV e 220 V de tensão nominal secundária, e potência nominal de 112,5 kVA.

Utilizando-se a equação 2 calcula-se as perdas por unidade de massa para os materiais analisados, sendo necessário a observação dos parâmetros contidos na Tabela 2.

A massa do núcleo demonstrada na Tabela 3 foi calculada utilizando-se a equação 3, sendo que os valores na Tabela 4 foram obtidos relacionando o volume calculado e as densidades dos materiais analisados. Os valores de perdas a vazio foram calculados comparando as características magnéticas e mantendo a mesma geometria. Foi realizada a comparação da variação na massa do núcleo em função da densidade de cada liga, e o custo em função do preço de mercado de cada material.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 mostra o valor da perda a vazio de um transformador de distribuição 112,5 kVA utilizado na RDEE, o valor calculado da massa do núcleo (kg), e o valor calculado do volume do núcleo considerando-se a densidade do material (g/cm³).

A Tabela 4 mostra os valores calculados de perda a vazio para três ligas metálicas que podem substituir tecnicamente o aço silício. Nota-se que, para os materiais inclusos nesta tabela as perdas são menores se comparados ao aço-silício, sem que a massa do núcleo se altere significativamente.

O preço da matéria-prima foi consultado na internet com o objetivo de verificar a influência da escolha do material no custo do transformador. Nota-se, através da Tab. 5,

Tabela 3. Perda do transformador de 112,5 kVA e características do núcleo magnético.

Material	Perdas a Vazio (W)	Massa do Núcleo (kg)	Densidade (g/cm ³)	Volume calculado (cm ³)
Silício grão conv. orientado	390,00	325,00	7,65	4,25.10 ⁴

que ocorre um aumento expressivo no custo do material, desproporcional a redução das perdas no núcleo.

Observa-se na Tab. 6 o investimento na construção do núcleo magnético para os três materiais estudados e a economia anualizada (considerando uma cotação de R\$ 4,178/US\$).

4. CONCLUSÃO

O aumento dos níveis de harmônicos provocado pelo irreversível crescimento da utilização de geradores fotovoltaicos, equipados com conversores CC-CA, deve ser, cada vez mais, considerado nas análises dos efeitos destas distorções harmônicas nos demais equipamentos presentes nas RDEEs. Os transformadores de distribuição são elementos amplamente utilizados nas RDEEs e devem ser projetados para obter altos índices de eficiência energética, mesmo quando sujeitos a distorções harmônicas. Assim, para manter a competitividade das CDEEs, pesquisas devem ser realizadas buscando alternativas factíveis para aprimorar as tecnologias existentes.

Este artigo apresentou resultados que evidenciam a existência de materiais que operam com menores perdas às condições de distorção harmônica e que, tecnicamente, se mostram uma alternativa para manufatura de núcleos dos transformadores em termos de perdas de energia; verificou ainda, que a liga ferro-níquel apresenta perdas inferiores e um custo/benefício competitivo.

Com relação ao restante dos materiais analisados, observou-se que apresentam um aumento significativo na eficiência, porém constatou-se uma falta de competitividade financeira quando comparados aos materiais já consagrados na indústria de manufatura de transformadores de distribuição.

Tabela 4. Perda a vazio de um transformador de 112,5 kVA em função do material usado no núcleo.

Material	Perdas a Vazio (W)	Perda por massa (W/kg)	Massa do Núcleo (kg)	Densidade (g/cm ³)
50-50Ni-Fe	283,51	0,82849	342,20	8,05
77-80Ni (Permalloy)	33,17	0,09349	354,74	8,35
79Ni-4Mo (Supermalloy)	77,02	0,21079	365,36	8,60

Tabela 5. Preço dos materiais magnéticos comerciais.

Material	Preços (\$/kg)	Preço do núcleo (\$)
Silício grão conv. orient.	0,70	227,50
50-50Ni-Fe	1,00	342,20
77-80Ni (Permalloy)	12,00	4.256,86
79Ni-4Mo (Supermalloy)	19,00	6.941,83

Tabela 6. Economia na mudança de material.

Material	Investimento (\$)	Economia (\$/ano)
50-50Ni-Fe	114,7	20,26
77-80Ni (Permalloy)	4.029,36	67,89
79Ni-4Mo (Supermalloy)	6.714,33	59,55

Novas análises poderão ser realizadas para seleção de materiais para a manufatura dos núcleos magnéticos de TDs com o objetivo de minimização das perdas de energia, que considere o processo produtivo existente, o custo do material e a integração das fontes renováveis ao SEPC.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos aos Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), ao Programa de Pós-Graduação e ao da Faculdade de Engenharia Elétrica de Bauru (FEB-UNESP), e ao ao Laboratório de Sistemas de Potências e Técnicas Inteligentes (LSISPOTI).

REFERÊNCIAS

- AGB (2019). Aço Silício GO e GNO. URL <http://agddobrasil.com.br/portfolio/acos-silicios-go-e-gno/>.
- ANEEL (2019a). BIG - Banco de Informações de Geração. URL <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>.
- ANEEL (2019b). Perdas de Energia. URL <http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801&idPerfil=4>.
- ANEEL (2019c). Resultado dos Processos Tarifários de Distribuição - ANEEL. URL <http://www.aneel.gov.br/>.
- CANADIAN SOLAR INC. (2019). DYMOND CS6x-340|345|350|355p-FG HIGH EFFICIENCY POLY MODULE. URL <https://www.canadiansolar.com/upload/682d14cbd22f0031/9bd67d0b888a7dee.pdf>.
- Carneiro, J.A.O. (2009). Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. workingPaper. URL <https://repositorium.sdum.uminho.pt/>.
- EPE (2019). Consumo Mensal de Energia Elétrica por Classe (regiões e subsistemas). URL <http://www.epe.gov.br/>.
- Fish, G.E. (1990). Soft magnetic materials. *Proceedings of the IEEE*, 78(6), 947–972. doi:10.1109/5.56909.
- Heathcote, M.J. (1998). *The J P transformer book : a practical technology of the power transformer*. Newnes, Oxford ; Boston, 12. ed. - edition.
- Mclyman, C.W. (2004). *Transformer and Inductor Design Handbook*. CRC Press. doi:10.1201/9780203913598. URL <https://www.taylorfrancis.com/books/9780203913598>.
- Mohan (2014). *Eletrônica de potência: curso introdutório*. LTC, Rio de Janeiro, 1ª edition.
- ONS (2017). Plano de Ampliações e Reforço nas Instalações de Transmissão do SIN. URL http://ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/PAR2017-2019_sumario_executivo.pdf.
- Rashid (2014). *Eletrônica de potência*. São Paulo, 4 edition.
- Taci, M. and Domijan, A. (2004). The effects of linear and nonlinear operation modes in transformers. In *2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No.04EX951)*, 244–249. doi:10.1109/ICHQP.2004.1409361. ISSN: null.
- U.S Departamenty of Energy (2019). The Smart Grid: An Estimation of the Energy and CO2 Benefits. URL <https://erranet.org/download/smart-grid-estimation-energy-co2-benefits/>.
- Villalva (2015). *Energia solar fotovoltaica*. Érica, São Paulo, 2 edition.