

Transformadores de distribuição de energia elétrica com núcleo de metal amorfo

B. A. Luciano^{1*}, W. B. de Castro²

¹Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, Caixa Postal 10105, CEP 58429-970, Campina Grande – Paraíba

²Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882, CEP 58429-970, Campina Grande – Paraíba

(Recebido em 21/07/2010; revisado em 25/11/2010; aceito em 13/12/2010)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Neste artigo é apresentada, em ordem cronológica, uma breve revisão sobre o desenvolvimento e as aplicações de transformadores com núcleo de metal amorfo nos sistemas de distribuição de energia elétrica, de 1980 aos dias atuais.

Palavras-chave: Eficiência energética; liga amorfa; transformadores.

Abstract:

In this article is presented, in chronological order, a brief history of the development and applications of amorphous metal-based transformers used in power distribution system, from 1980 to present.

Keywords: Amorphous alloys; energy efficiency, transformers.

1. Introdução

O desenvolvimento de ligas amorfas potencialmente aplicáveis em núcleos de transformadores teve início em 1975. Porém, a introdução no mercado destes materiais, para esse tipo de aplicação, só veio a ocorrer em 1976, quando o primeiro transformador de distribuição com núcleo de material amorfo (TDMA) foi construído no Laboratório Lincoln, do Instituto Tecnológico de Massachusetts (USA) [1].

Naquela oportunidade, o desempenho de um protótipo de transformador de 30 kVA, confeccionado com núcleo de material amorfo, foi comparado com um transformador comercial com núcleo de aço-silício de igual potência nominal. Realizados os ensaios, a eficiência do TDMA foi superior, particularmente no tocante à redução das perdas em vazio e da corrente de excitação: redução de 87,5% nas perdas do núcleo e a corrente de excitação foi reduzida de 2,5 A para 0,12 A.

O interesse inicial pelo emprego dos TDMA nos sistemas de distribuição de energia elétrica foi uma decorrência da primeira crise do petróleo, em 1973, e esse interesse se manteve, até meados dos anos noventa, quando a desregulamentação do setor elétrico começou a ser adotado nos Estados Unidos e os custos com a energia começaram a decrescer. O motivo maior para essa diminuição de interesse era o preço de aquisição mais elevado do TDMA quando

comparado com outra unidade, de igual capacidade, porém confeccionada com núcleo de aço ao silício convencional de grãos orientados (TDGO). Deve-se ressaltar que na oportunidade, o valor da indução de saturação (B_s) das ligas amorfas era inferior ao das chapas de aço ao silício convencional, o que tornavam os TDMA mais largos, pesados e mais caros que os TDGO.

Como a redução de perdas e a eliminação de desperdícios estão diretamente relacionadas com o aumento da eficiência energética nos sistemas de distribuição de energia elétrica, estratégias para o desenvolvimento e a difusão de TDMA continuaram sendo postas em prática nos Estados Unidos e no Japão [2], fundamentalmente pelas seguintes razões: primeiro, o recente aumento no preço da energia oriunda de fontes não renováveis, como o petróleo; segundo, o aumento do custo das matérias primas dos núcleos e condutores que constituem o TDGO; terceiro, com o aumento do valor da indução de saturação (B_s) para 1,65 T e a redução da força coerciva (H_c) das ligas amorfas para cerca de 1 A/m, houve redução no tamanho dos TDMA, reduzindo custos e tornando-os competitivos com relação aos TDGO [3].

Atualmente, na Europa, as perdas de energia elétrica nos transformadores são responsáveis por aproximadamente um terço das perdas totais nos sistemas de transmissão e distribuição. Estima-se que se todos os cerca de 950 mil transformadores de distribuição instalados nas indústrias e

*Email: benedito@dee.ufcg.edu.br (B. A. Luciano)

empresas comerciais fossem substituídos por outros com maior eficiência energética, 51,9 % das perdas (que chegam a 11,4 TWh/ano) poderiam ser reduzidas [4]. Nesse contexto, vários projetos têm-se desenvolvido com vistas à aquisição e instalação de transformadores mais eficientes [5]. Dentre eles destacam-se os projetos: Thermie (1999, co-financiado pela Comissão Européia), Prophet (2004) e SEEDT – “Strategies for development and diffusion of energy-efficient distribution transformers” (2006, também co-financiado pela Comissão Européia). Apesar dessas iniciativas, a adoção de TDMA na Europa tem ocorrido de forma lenta.

Na Ásia, o Japão foi o primeiro país a instalar TDMA em seu sistema elétrico e atualmente conta com pelo menos quatro fabricantes desse tipo de transformador e com um fábrica de metal amorfo, construída a partir da parceria entre a Hitachi Metals e a Metglas. Outros países como a Índia, China, Taiwan, Bangladesh, Coréia, Filipinas, Tailândia e Austrália também possuem fábricas de TDMA.

Em 2010, a capacidade da parceria Hitachi Metals/Metglas atingiu 140 mil unidades de TDMA trifásicos de 400 kVA, o que corresponde ao mercado europeu. A Hitachi Metals/Metglas é o maior fabricante mundial de núcleos de metal amorfo para TDMA.

No Brasil, os primeiros estudos e ensaios experimentais sobre a aplicação de ligas amorfas em núcleos de transformadores tiveram origem no ambiente acadêmico [6], passando, em seguida, para a montagem em unidades industriais em fábrica de transformadores [7] e instalações em sistemas de distribuição de energia elétrica [8].

Atualmente, no Brasil há pelo menos cinco fábricas que produzem e comercializam TDMA a preços equivalentes aos TDGO [9].

Neste artigo é apresentada, em ordem cronológica, uma breve revisão sobre algumas publicações relativas ao emprego de ligas amorfas em núcleos de transformadores de distribuição de energia elétrica, de 1980 aos dias atuais.

2. TDMA: estudos de caso

Estudos de casos sobre a instalação e o acompanhamento do desempenho de TDMA instalados em sistemas de distribuição de energia elétrica, urbanos e rurais, foram relatados por diversos autores. Na Tabela 1 são apresentados, em ordem cronológica, alguns desses estudos publicados nos últimos trinta anos.

No dia 30 de março de 2010, a Confederação Nacional da Indústria - CNI e a Eletrobras firmaram um acordo de cooperação técnica que envolve, entre outros objetivos, a criação de um programa de capacitação e qualificação para eficiência energética no setor industrial, no âmbito do Programa de Conservação de Energia Elétrica na Indústria. Um dos tópicos desse programa trata especificamente da etiquetagem de transformadores industriais, o que envolve o estabelecimento de índices mínimos de eficiência energética para esses equipamentos com vistas à redução das perdas nas redes de distribuição de energia elétrica. Neste contexto, podem ser enquadrados os TDMA.

Tabela 1: Estudos de casos sobre transformadores com núcleo de liga amorfa

Ano	Autores	Ref.
1980	Mas, J. A.	[10]
1981	Boll, R. and Warlimont, H.	[11]
1982	Johnson, L. A., Cornell, E. P., Bailey, D. J. and Hegyi, S. M.	[12]
1983	Luborsky, F. E.	[13]
1984	Boyd, E. L. and Borst, J. D.	[14]
1985	Güntherrodt, H.-J.	[15]
1986	Bailey, D. J., Lowdermilk, L. A. and Lee, A. C.	[16]
1987	Lowdermilk, L. A. e Lee, A. C.	[17]
1988	Schulz, R., Chretien, N., Alexandrov, N., Aubin, J. and Roberge, R.	[18]
1989	Magherbi, M. L. and Basak, A.	[19]
1990	Matsuura, T., Nagayama, K., Hagiwara, S. and Higaki, M.	[20]
1991	H. W. Ng, R. Hasegawa, A. C., Lee, e L. A. Lowdermilk	[21]
1992	Pfützner, H.	[22]
1993	Luciano, B. A. e Alencar, E. F.	[23]
1994	Masumoto, T.	[24]
1995	Luciano, B. A.	[6]
1996	Luciano, B. A., Morais, M. E. e Kiminami, C. S.	[25]
1997	Luciano, B. A. and Kiminami, C. S.	[26]
1998	Luciano, B. A. e Rocha, P. M. C.	[27]
1999	Luciano, B. A., Morais, M. E. and Kiminami, C. S.	[28]
2000	Tang, L. and Wang, K.	[29]
2001	Hasegawa, R. e Pruess, D. C.	[30]
2002	Cavalcanti, L. F. e Luciano, B. A.	[31]
2003	Pinto, M. F., Silva, S. R. e Vasconcelos, F. H.	[32]
2004	Hasegawa, R.	[33]
2005	Targosz, R.	[34]
2006	Campos, M. L. B.	[35]
2007	Frau, J. and Gutierrez, J.	[5]
2008	Hasegawa, R. and Azuma, D.	[3]
2009	Hsu, C-H. and Chang, Y-H.	[36]
2010	Luciano, B. A., Freire, R. C. S., Bezerra R. B. e Inácio, R. C.	[9]

3. TDMA: eficiência energética e conservação do meio ambiente

No Brasil, as decisões acerca do emprego de TDMA em sistemas de distribuição de energia elétrica, urbanos e rurais, como substitutos dos TDGO se deram, inicialmente, de forma muito conservadora, a despeito da inequívoca eficiência energética associada aos TDMA; eficiência esta confirmada mediante estudos analíticos, experimentais e de campo. Dentre as alegações que serviam de justificativa para esse comportamento conservador, podem ser destacadas duas: o preço relativamente elevado dos núcleos de liga amorfa e o mito de que o metal amorfo causaria impactos ambientais.

Atualmente, os preços dos núcleos de liga amorfa são competitivos face aos núcleos de ferro-silício e os supostos

impactos ambientais causados pelo descarte do metal amorfo no meio ambiente não foram confirmados, conforme ficou evidenciado nos estudos realizados pela CEMIG Distribuição em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais [37].

Superados os mitos e constatadas as viabilidades técnicas, econômicas e ambientais, o que se verifica atualmente é o emprego crescente de TDMA no Brasil, em particular nos sistemas de distribuição de energia elétrica rurais, onde os transformadores monofásicos de baixa potência nominal (5, 10 e 15 kVA) operam na maior parte do tempo em baixa carga. Nessas condições, a redução das perdas no núcleo se torna figura de mérito preponderante.

Na Figura 1 são apresentadas, em forma de gráficos, os resultados de ensaios comparativos entre dezessete unidades de transformadores com núcleo de ligas amorfa e dezessete transformadores com núcleo de FeSi GO, de igual potência nominal (5 kVA).

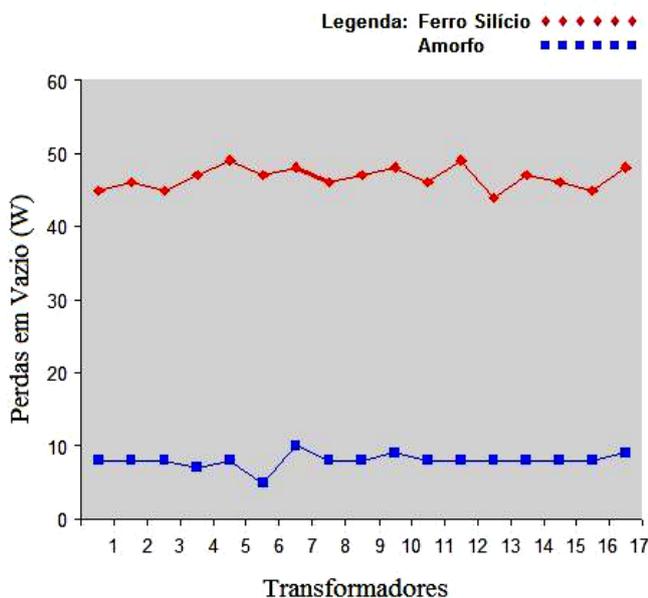


Figura 1. Perdas no núcleo de transformadores com núcleo de liga amorfa e de transformadores com núcleo de FeSi GO convencional [38].

Os ensaios experimentais sobre o desempenho desses transformadores de 5 kVA com núcleo de liga amorfa ($\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$) foram realizados no laboratório da indústria brasileira ITB, em janeiro de 2009.

Cada transformador submetido aos ensaios possui as seguintes características:

- Potência nominal: 5 kVA;
- Fases: 1;
- Tipo aéreo convencional;
- Frequência: 60 Hz;
- Tensões no lado de Alta Tensão (kV): 20,90 a 18,19;
- Tensões no lado de Baixa Tensão (V): 440/220;

- Derivações: 5; Alta Tensão ligada em 9,92 kV e Baixa Tensão ligada em 440 V;
- Corrente nominal de Alta Tensão: 0,25 A;
- Corrente nominal de Baixa Tensão: 11,36 A;
- Polaridade subtrativa.

Todos os ensaios foram realizados de acordo com as normas da ABNT: NBR 5356 [39] e NBR 5440 [40].

Conforme fica evidenciado no gráfico da Figura 1, as perdas no núcleo de liga amorfa se situam em torno de 8 W, enquanto as perdas no núcleo de ferro-silício convencional se situam em torno de 48 W.

Na Tabela 2 são apresentados os valores experimentais comparativos referentes às correntes de excitação nesses transformadores monofásicos de 5 kVA, tomando como base a NBR 5440.

Tabela 2: Valores comparativos, obtidos experimentalmente, para corrente de excitação em transformadores monofásicos com tensões máximas de 24,2 kV e 36,2 kV.

Ensaio	Núcleo amorfo	Núcleo de FeSi GO	Valores NBR 5440
Corrente de excitação (%)	1,12	3,17	4,8

Fisicamente, o porquê de a corrente de excitação ser pequena, em comparação com a corrente nominal do enrolamento, deve-se ao fato de o transformador em vazio poder ser representado por uma carga de alta impedância com relação à fonte de alimentação. Essa impedância é tão maior quanto maiores forem a permeabilidade magnética e a resistividade elétrica do material do núcleo.

No caso específico da liga amorfa $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ utilizada nos núcleos dos transformadores, esses valores são superiores àqueles apresentados pelas ligas de FeSi GO utilizadas em transformadores convencionais. Pois, o valor máximo da permeabilidade magnética relativa da liga amorfa $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$, a 60 Hz, se situa em torno de 70 000, enquanto o valor dessa grandeza para o FeSi GO, a 60 Hz, se situa em torno de 40 000. Já o valor da resistividade elétrica da liga amorfa $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ se situa entre 130 e 135 $\mu\Omega\cdot\text{m}$, enquanto o valor dessa grandeza para o FeSi GO se situa entre 10 e 47 $\mu\Omega\cdot\text{m}$.

O elevado valor da permeabilidade relativa propicia um melhor acoplamento magnético e o elevado valor da resistividade elétrica resulta em menores perdas por correntes parasitas no núcleo

4. Conclusões

Considerando-se que atualmente existem no Brasil cerca de 2,5 milhões de transformadores instalados nas redes de distribuição de energia elétrica e que as indústrias do setor colocam aproximadamente 130 mil novas unidades no mercado, percebe-se uma grande oportunidade para a adoção de uma política voltada para a eficiência energética nesse setor.

Como o conceito de eficiência energética está relacionado com a redução de perdas e a eliminação de desperdícios, o emprego extensivo de TDMA, por apresentarem menores perdas nos núcleos que os transformadores convencionais, pode desempenhar um papel importante, não apenas para a conservação de energia, como também para a conservação do meio ambiente.

Referências

- [1] Raskin, D.; Davis, A. L. Metallic glasses: a magnetic alternative. *IEEE Spectrum*, vol. 18, No. 11, pp. 28-33, Nov. 1981.
- [2] Hasegawa, R. Application of rapidly solidified metals in the USA and Japan. Bern: *Technische Rundschau*, 1991, 8 p.
- [3] Hasegawa, R.; Azuma, D. Impact of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, No. 320, pp. 2451-2456, 2008.
- [4] Irrek, W.; Targosz, R.; Topalis, F. V. Uso de transformadores mais eficientes na indústria e no comércio”. *Revista Eletricidade Moderna*, Aranda Editora, Ano 38, No. 435, pp. 114-131, Junho 2010.
- [5] Frau, J.; Gutierrez, J. Energy efficient distribution transformers in Spain: new trends. In: *19th International Conference on Electricity Distribution*, pp.1-4, 2007.
- [6] Luciano, B. A. Estudo de aplicações da liga Fe₇₈B₁₃Si₉ amorfa em núcleos de transformadores de baixa potência, (Tese de Doutorado), Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, 1995.
- [7] Luciano, B. A.; Rocha, P. M. C. Transformador com núcleo de material amorfo: uma experiência conjunta universidade-empresas. In: *Anais do III Congresso Latino-Americano de Distribuição de Energia Elétrica*, pp. 349-353, 1998.
- [8] Cavalcanti, L. F.; Luciano, B. A. Análise da viabilidade técnica/econômica da utilização de transformadores com núcleo amorfo em redes rurais de distribuição de energia, classe 15 kV. In: *Anais do I Congresso de Inovação Tecnológica em Energia - CITENEL*, pp. 214-218, 2001.
- [9] Luciano, B. A.; Freire, R. C. S.; Bezerra R. B.; Inácio, R. C. Transformadores com núcleo de liga amorfa em sistemas de distribuição, *Eletricidade Moderna*, Vol. 430, pp. 88-99, 2010.
- [10] Mas, J. A. Design and performance of power transformers with metallic glasses cores, paper presented at the IEEE Power Electronic Specialists Conference, June, 1980.
- [11] Boll, R.; Warlimont, H. Applications of amorphous magnetic materials in electronics. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. MAG-17, No. 6, pp. 3053-3058, 1981.
- [12] Johnson, L. A.; Cornell, E. P.; Bailey, D. J.; Hegyi, S. M. Application of low loss amorphous metals in motor and transformers. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 7, pp. 2109-2114, 1982.
- [13] Luborsky, F. E. Amorphous metallic alloys. Butterworths Monographs in Materials, Butterworths & Co (Publishers) Ltd., pp. 1- 8, 1983.
- [14] Boyd, E. L.; Borst, J. D. Design concepts for an amorphous metal distribution transformer. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 11, pp. 3365-3372, 1984.
- [15] Güntherrodt, H. J. Introduction to rapidly solidified materials. *Rapidly Quenched Metals*, S. Steeb and H. Warlimont (eds.), Elsevier Science Publishers B. V., pp. 1591-1598, 1985.
- [16] Bailey, D. J.; Lowdermilk, L. A.; Lee, A. C. Field performance of amorphous metal core distribution transformers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 54-57, pp. 1618-1620, 1986.
- [17] Lowdermilk, L. A.; Lee, A. C. Five years operating experience with amorphous transformers. *Hard and Soft Magnetic Materials Symposium*, ASM, pp. 131-136, 1987.
- [18] Schulz, R.; Chretien, N.; Alexandrov, N.; Aubin, J.; Roberge, R. A new design for amorphous core distribution transformer. *Material Science and Engineering*, No. 99, pp. 19-21, 1988.
- [19] Magherbi, M. L.; Basak, A. Magnetic characteristics of sandwich-transformer cores built with Si-Fe and amorphous materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25, No. 5, pp. 3336-3338, September 1989.
- [20] Matsuura, T.; Nagayama, K.; Hagiwara, S.; Higaki, M. Long-term reliability of iron-based amorphous alloy cores for oil-immersed transformers. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 26, No. 5, pp. 1993-1995, September 1990.
- [21] Hasegawa, H. W.; Lee, R. A. C.; Lowdermilk, L. A. Amorphous alloy core distribution transformer, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 79, No. 11, pp. 1608-1623, 1991.
- [22] Pfützner, H. Performance of new materials in transformer cores. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 112, pp.399-405, 1992.
- [23] Luciano, B. A.; Alencar, E. F. Ligas amorfas: material alternativo para uso em núcleo de transformadores. *Revista Eletrobrasil*, Vol. 14, pp. 35-37, 1993.
- [24] Masumoto, T. Recent progress in amorphous metallic materials in Japan. *Materials Science and Engineering A179/A180*, pp. 8-16, 1994.
- [25] Luciano, B. A.; Morais, M. E.; Kiminami, C. S. Novas alternativas de materiais para medidores de energia e

- transformadores. *Revista Eletricidade Moderna*, Vol. XXIV, No. 264, pp. 50-62, 1996.
- [26] Luciano, B. A.; Kiminami, C. S. An amorphous core transformer: design and experimental performance. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 226-228, No. 15, pp. 1079-1082, 1997.
- [27] Luciano, B. A.; Rocha, P. M. C. Transformador com núcleo de material amorfo: uma experiência conjunta universidade-empresas. In: *Anais do III Congresso Latino-Americano de Distribuição de Energia Elétrica*, pp. 349-353, 1998.
- [28] Luciano, B. A.; Moraes, M. E.; Kiminami, C. S. Single Phase 1-kVA Amorphous Core Transformers: Design, Experimental Tests, and Performance After Annealing. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No. 4, pp. 2152-2154, July 1999.
- [29] Tang, L.; Wang, K. Economic Rural Network Renovation, *Transmission & Distribution World*, pp.46-50, August 2000.
- [30] Hasegawa, R.; Pruess, D. C. Impact of amorphous metal based transformers on efficiency and quality of electric power distribution. *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver*, Vol. 3, pp. 1820-1823, 2001.
- [31] Cavalcanti, L. F.; Luciano, B. A. Estudo sobre transformadores monofásicos com núcleo de liga amorfa no sistema de distribuição rural da CELB. In: *Anais do XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica- SENDI 2002*, pp.1-5, 2002.
- [32] Pinto, M. F.; Silva, S. R.; Vasconcelos, F. H. Transformadores com núcleo de metal amorfo para redes monofásicas de distribuição. *Revista Eletricidade Moderna*, pp. 167-175, Junho 2003.
- [33] Hasegawa, R. Applications of amorphous magnetic alloys. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 375-377, No. 1-3, pp. 90-97, 2004.
- [34] Targosz, R. The potential for global saving from high efficiency distribution transformers, Leonard Energy, European Copper Institute, February 2005.
- [35] Campos, M. L. B. Estudos de aplicação experimental e viabilidade de utilização de transformadores de distribuição com núcleo amorfo. São Paulo, 137p. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (EP/FEA/IEE/IF), Universidade de São Paulo, 2006.
- [36] Luciano, B. A.; Freire, R. C. S.; Inacio, R. C., Batista, T. C.; Camacho, M. A. G. Eficiência energética associada aos transformadores com núcleo de liga amorfa. In: *III Congresso Brasileiro de Eficiência Energética - CBEE2009*, Belém. Anais do CBEE 2009, pp. 1-6, 2009.
- [37] Couto, E. C.; Freitas, A. G.; Vilegas, E. A.; Oliveira, P. S. Transformadores com núcleo de metal amorfo: uma solução viável para redução de perdas técnicas da distribuição. In: *XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, 2010, São Paulo. Anais do SENDI 2010, pp.1-10, 2010.
- [38] Luciano, B. A.; Inácio, R. C.; Lira, J. G. A.; Freire, R. C. S.; Camacho, M. A. G.; Guerra, F. C. F. Transformadores monofásicos com núcleo de liga amorfa em sistemas de distribuição de energia elétrica rurais. In: *XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, 2010, São Paulo. Anais do SENDI 2010, pp.1-6, 2010.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356-1 – Transformadores de potência. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- [40] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5440 – Transformadores para redes aéreas de distribuição/Padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.