

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE O EMPREGO DE LIGAS AMORFAS EM RELAÇÃO AO AÇO SILÍCIO NA CONSTRUÇÃO DE REATORES SATURADOS

Camilla S. Chaves¹, José C. de Oliveira¹, Rafael Ariza², Lucas E. Vasconcelos¹, João A. F. Barbosa Jr¹

¹Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica – NQEE – Faculdade de Engenharia Elétrica – FEELT

²Laboratório de Tribologia e Materiais – LTM – Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC

Universidade Federal de Uberlândia – UFU – Uberlândia, Minas Gerais (Brazil)

kmillachaves@yahoo.com.br, jcoliveira@ufu.br, rariza@mecanica.ufu.br, lucasevasconcelos@gmail.com,

johnareis@gmail.com

Resumo – Este artigo tem por meta estabelecer termos comparativos entre o emprego de ligas amorfas e o tradicional aço silício de grãos orientados na construção de reguladores de tensão constituídos por reatores a núcleo saturado (RNS). Dentro deste contexto, são explorados conceitos relacionados com as propriedades eletromagnéticas atreladas com a utilização destes tipos de materiais, somados à avaliação computacional do desempenho de dois compensadores, ambos do tipo *twin-tripler* ou de 12 pulsos, um constituído por aço silício e outro por ligas amorfas. Os trabalhos se apresentam alicerçados em resultados de desempenho advindos de modelos implementados no simulador ATP.

Palavras-Chave – ligas magnéticas, qualidade da energia elétrica, reativos, reator a núcleo saturado, regulação de tensão.

COMPARISON BETWEEN THE EMPLOYMENT OF AMORPHOUS ALLOYS AND SILICON STEEL ON SATURATED REACTORS CONSTRUCTION

Abstract – This article aims to establish comparative terms between the employment of amorphous alloys and the traditional oriented grain silicon steel in the construction of voltage regulators designed with saturated core reactors (SCR). In this context, it is explored concepts related to the electromagnetic properties of these sorts of materials, added to the computational evaluation of the performance of two kinds of reactors, both type *twin-tripler* or 12 pulses. One is made up of silicon steel and the other is constituted by amorphous alloys. The work is grounded in performance results arising from models implemented in the ATP simulator.

Keywords – electrical energy quality, magnetic alloys, reactives, saturated core reactors, voltage regulation.

I. INTRODUÇÃO

As preocupações com a manutenção da qualidade da energia elétrica dentro dos padrões considerados aceitáveis é um dos temas mais abordados atualmente. Isso se dá principalmente devido aos níveis de tensão de suprimento serem delimitados pelas agências reguladoras [1] e, na eventualidade de desvios em proporções superiores aos limites estabelecidos, isto pode acarretar, além de eventuais danos em equipamentos de consumidores, também em penalizações para as concessionárias de energia elétrica.

Em se tratando dos dispositivos reguladores de tensão, reconhece-se, comercialmente, diferentes tipos de produtos, os quais, de um modo geral, podem ser englobados no princípios da compensação direta, e outros, embasados na compensação indireta [2]. Nesta última categoria estão os dispositivos cuja atuação baseia-se no controle da potência reativa. Este é o caso do regulador focado neste artigo, o qual se apresenta na forma dos clássicos reatores a núcleo saturado, cujas vantagens e desvantagens são amplamente conhecidas [2,3]. Estes dispositivos surgiram nos anos 60 e, recentemente, voltou a ser explorado por grupos de pesquisa nacionais [3,4,5]. Os resultados até então obtidos se mostram promissores, porém, em consonância com o emprego de ligas de aço silício, já se fizeram reconhecer algumas características desvantajosas como: alto valor para sua corrente sob baixa saturação, perdas proporcionalmente elevadas, estatismo limitado, etc. À luz destas constatações, surge a possibilidade de concepções construtivas com novos materiais, a exemplo das ligas amorfas, fato este que se apresenta como cerne do presente trabalho.

Em se tratando das ligas amorfas, vários documentos e pesquisas a respeito da construção de transformadores com tais tipos de núcleos indicam expressivas melhorias na eficiência do equipamento. Este é, por exemplo, a questão das perdas no ferro, as quais têm sido reportadas [6] que chegam a ser reduzidas em até 80%.

Do exposto, segue que, através de modelos de reatores saturados *twin-tripler* já desenvolvidos para a plataforma ATP [3,7], este artigo se apresenta com o objetivo de adequar o modelo ao novo tipo de material e realizar estudos computacionais de desempenho, visando a restauração de



XI CEEL – ISSN 2178-8308
25 a 29 de novembro de 2013
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

tensões para um alimentador radial sujeito a fenômenos de variações de carregamento.

Os desempenhos obtidos, na forma de: eficácia do processo de regulação, valores de corrente exigidos pelo regulador, formas de onda e espectros de frequência, perdas ativas, dentre outras, são então apresentados e discutidos para o estabelecimento de uma base comparativa entre as duas tecnologias no que se refere ao tipo de material empregado para a composição dos núcleos magnéticos dos reguladores ora focado.

II. ALGUMAS PROPRIEDADES DO AÇO SILÍCIO E DAS LIGAS AMORFAS

Visando oferecer uma base para a compreensão dos materiais magnéticos aqui pautados, é apresentada, na sequência, uma síntese de alguns aspectos e propriedades relevantes ao processo de construção de núcleos magnéticos.

Iniciando com a relação entre a indução e o campo magnético, sabe-se que, com o aumento do campo magnético para um valor H_{sat} , a indução magnética B_{sat} será tal que atingirá os níveis de saturação do material. Em se tratando das ligas amorfas, o valor de B_{sat} é reduzido ao se comparar com os materiais cristalinos, como por exemplo, a liga de ferro amorfo possui B_{sat} 20% inferior ao se comparar com o ferro puro [8]. Isso significa que o material necessita de uma densidade de fluxo magnético menor para atingir a condição de saturação, correspondendo também a um campo H inferior e, consequentemente, uma corrente de excitação mais baixa.

Também, os materiais cristalinos ferromagnéticos utilizados para a concepção de núcleos de RNS, como o aço silício GO, possuem uma direção preferencial em que a sua magnetização é facilitada pela orientação dos grãos. Com isso, a magnetização é direcionada ao longo do caminho preferencial quando um campo magnético externo é aplicado. A energia magnética associada a este fenômeno é chamada de energia anisotrópica (K). Quando o material ferromagnético é excitado por um campo externo, sua magnetização reage de forma que a energia total, incluindo o valor de K , seja mínima. Esta grandeza afeta diretamente a magnetização do material ferromagnético, visto que o mesmo está intimamente relacionado com a permeabilidade magnética, coercividade e a configuração dos domínios magnéticos, influenciando essencialmente em seu desempenho.

Outro aspecto de grande relevância no campo dos materiais magnéticos está no fato de que o fenômeno da magnetização não é reversível, pois a diminuição do campo H não proporciona também uma diminuição de B de acordo com a curva de magnetização. Isso gera a curva de histerese, cuja área interna do laço criado devido à magnetização e desmagnetização do material é entendida como a energia perdida durante o processo. Somado a isto, as variações do fluxo magnético geram correntes elétricas no núcleo que também se dissipam na forma de calor, sendo conhecidas por correntes de Foucault. Portanto, entende-se como perdas no núcleo a somatória das perdas devido ao ciclo de histerese e das perdas devido às correntes de Foucault.

Com o advento de ligas amorfas, houve uma grande diminuição das perdas por histerese e, consequentemente, das perdas no núcleo. Para ilustrar essas diferenças, as metades superiores do laço de histerese $B - H$ do aço silício AK Steel

Oriented M-6 CARLITE® 0,35 mm e da liga amorfa METGLAS 2605SA1 são comparadas na Fig. 1.

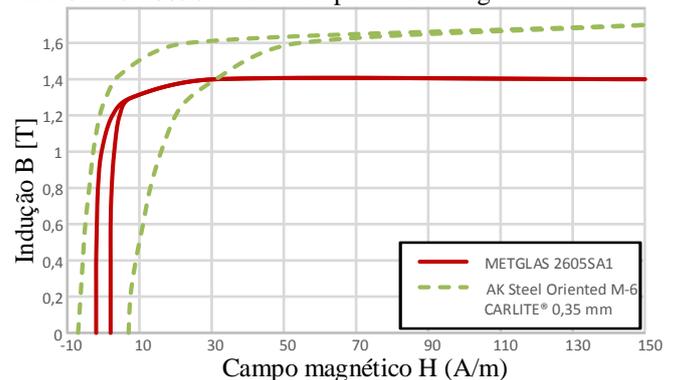


Fig. 1. Comparação entre os laços de histerese das ligas amorfas e do aço silício.

A Tabela I fornece informações sobre as perdas no núcleo em relação à indução B , sendo possível, nesse sentido, comparar o aço silício com a liga amorfa.

Tabela I – Perdas no núcleo em relação à indução B para as ligas amorfas e o aço silício

B (T)	AK Steel Oriented M-6 CARLITE® 0,35 mm	METGLAS 2605SA1
	Perdas (W/kg)	Perdas (W/kg)
0,1	0,00762	0,00841
0,2	0,0288	0,011
0,3	0,0619	0,013
0,4	0,106	0,017
0,5	0,161	0,021
0,6	0,225	0,027
0,7	0,299	0,034
0,8	0,383	0,043
0,9	0,478	0,058
1,0	0,584	0,070
1,1	0,702	0,088
1,2	0,834	0,100
1,3	0,982	0,130
1,4	1,151	0,170
1,5	1,349	0,230
1,6	1,584	0,279
1,7	1,900	0,353
1,8	2,350	0,446
1,9	2,820	0,563

III. REPRESENTAÇÃO DO REATOR SATURADO NO SIMULADOR ATP

As simulações computacionais, como já mencionado, foram embasadas nos recursos da plataforma ATP, junto ao qual já se encontrava disponibilizado o modelo do arranjo *twin-tripler* [3,7]. Este consiste em um dispositivo que possui os mesmos princípios de funcionamento do transformador saturável, sendo o núcleo do RNS representado por um banco com três unidades monofásicas e curvas de magnetização idênticas. A Fig. 2 ilustra a topologia física do reator saturado *twin-tripler*, a qual indica que o dispositivo é constituído, basicamente, por dois núcleos magnéticos idênticos, sendo cada núcleo formado por três colunas magnéticas e apresentando dois enrolamentos concêntricos por coluna.

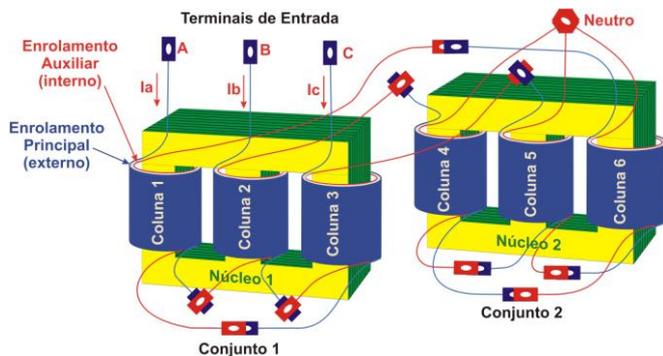


Fig. 2. Reator a núcleo saturado – Arranjo construtivo *twin-tripler*.

Em atenção aos desenvolvimentos detalhados em [3], foi estabelecida a estratégia que culminou pelo modelo inserido na plataforma ATP nos termos indicados pela Fig. 3.

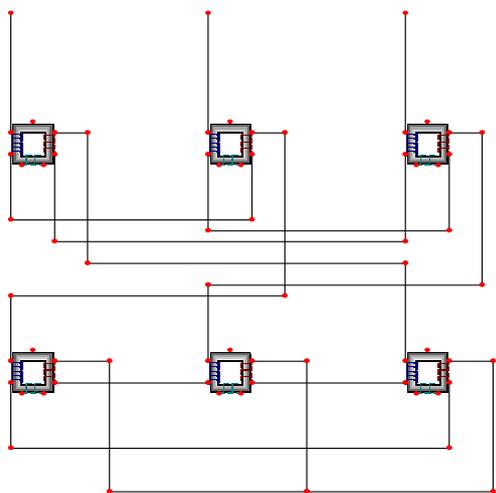


Fig. 3. Arranjo *twin-tripler* no simulador ATP.

Os três elementos superiores correspondem as colunas magnéticas do primeiro núcleo do RNS *twin-tripler*, enquanto os três inferiores estão relacionados as três colunas magnéticas do segundo núcleo do RNS. Ressalta-se que, apesar de o modelo dar acesso ao ramo de magnetização do circuito elétrico equivalente (de forma a ser possível implementar laços de histerese ou outras características adicionais do material magnético), neste primeiro instante foram contempladas apenas as curvas de magnetização, como indicado na Fig. 4.

Em se tratando das características de saturação dos materiais analisados, percebe-se que o joelho da curva referente ao aço silício corresponde a um valor de indução magnética maior do que a liga amorfa. Isso significa que, nas condições de não saturação para ambos os materiais, o núcleo constituído por ligas amorfas terá uma demanda de fmm inferior ao aço silício, enquanto que, na região de saturação, a liga amorfa requisitará uma fmm bem maior.

Diante das propriedades ilustradas fica evidente que, nas condições de tensão nominal do sistema no qual os reatores estarão inseridos, o arranjo terá um consumo menor de corrente em relação ao aço silício. Por outro lado, sob condições de sobretensões acima dos patamares admissíveis

pela ANEEL, o mesmo fará uma regulação de tensão igual ou superior à do equipamento com núcleo de aço silício.

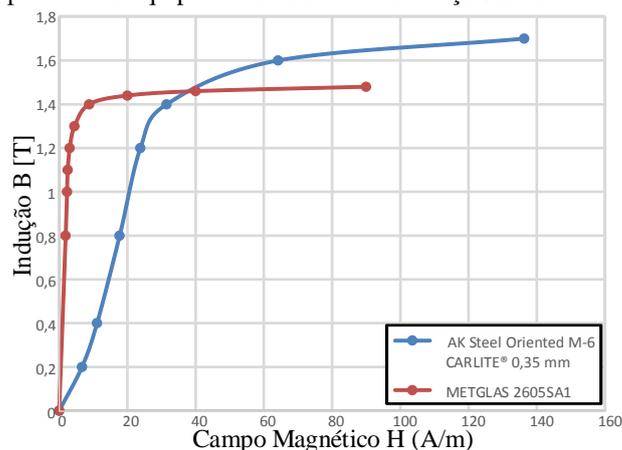


Fig. 4. Curvas de magnetização da liga amorfa METGLAS 2605SA1 e do aço silício AK Steel Oriented M-6.

Através de uma sistemática detalhada em [7], é possível determinar a curva fluxo concatenado λ versus corrente de pico I , tendo como dados de entrada as características construtivas do reator e valores nominais de tensão e corrente. Partindo destes conceitos e outras considerações, pode ser dimensionado um reator para o ajuste da tensão dentro dos níveis admissíveis.

IV. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA PARA O ESTUDO DE CASO

Com a intenção de se avaliar o desempenho operativo de um e outro regulador, adotou-se o sistema elétrico radial indicado na Fig. 5 para a realização dos estudos.

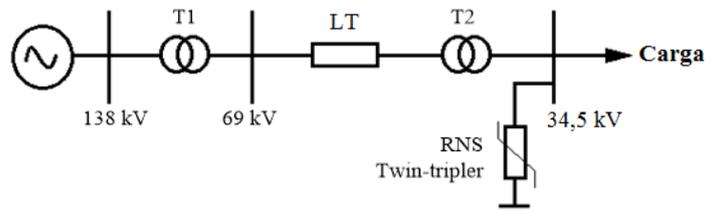


Fig. 5. Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico modelado na plataforma ATP.

Neste sistema, o nível de curto-circuito é igual a 200 MVA e a potência consumida pela carga, nas condições nominais, é de 6,43 MVA. O transformador T1 possui uma impedância percentual de 10,36%, fornecendo, nesta mesma situação, 20 MVA. Já o transformador T2, tem uma impedância de 10,26% e fornece a potência consumida pela carga, ou seja, 10 MVA. A linha de transmissão LT foi modelada a partir do circuito PI equivalente, possuindo uma resistência de 0,0998 Ω /km, indutância de 0,6034 mH/km e capacitância de 4,847 η F/km.

Para as condições postas, a situação inicial definida para a tensão do barramento da carga é de 0,97 pu, e na situação de rejeição de carga, esta mesma tensão aumenta para 1,075 pu. Sendo a tensão base igual a 34,5 kV, isso significa que, na condição de sobretensão, o sistema ultrapassa os limites admissíveis [1], sendo então necessário inserir um regulador dinâmico de tensão, como os reatores saturados *twin-tripler*.

Uma vez dimensionados os reatores saturados para fins da compatibilização dos padrões de tensão, os dispositivos a aço silício e ligas amorfas se apresentam com as características magnéticas indicadas na Tabela II, valores estes utilizados para a simulação no ATP.

Tabela II – Relação $\lambda \times I_{pk}$ para reatores simulados no ATP

Aço Silício		Liga Amorfa	
I_{pk} (A)	λ (weber – espira)	I_{pk} (A)	λ (weber – espira)
0,058	5,146	0,0120	15,578
0,092	10,292	0,0130	17,136
0,124	15,438	0,0160	18,693
0,164	18,012	0,0230	20,251
0,333	20,585	0,0460	21,809
0,708	21,871	0,1040	22,432
4,916	23,801	0,2080	22,744
38,518	25,731	1,0000	23,670
155,747	27,017	23,910	24,828

Os resultados de simulações, utilizando os valores da Tabela II, confirmam a constatação realizada anteriormente em relação ao comportamento da liga amorfa frente ao aço silício. No projeto do reator com núcleo de aço silício, foi determinado que o arranjo *twin-tripler* deve possuir 1,5 MVar, tensão nominal de 36,2 kV e corrente de 23,91 A. Dessa forma, na condição de 7% de sobretensão, o reator absorve de 23,91 A do sistema e reduz a tensão para o valor nominal do reator, que é 5% maior que a tensão nominal do sistema e, assim, enquadra a tensão no barramento para os limites aceitáveis pela ANEEL. Ao fazer a correspondência da regulação desejada por reatores de ligas amorfas, a curva $\lambda \times I_{pk}$ é ajustada de forma que a redução de sobretensão, juntamente com a corrente absorvida, sejam iguais à condição imposta ao reator de aço silício. Por outro lado, o mesmo consumirá uma corrente bem menor nas condições nominais do sistema. Isso se justifica pelo fato de que, para esta condição de redução de densidade de fluxo, a redução da fmm correspondente é muito maior.

V. ESTUDOS COMPUTACIONAIS DE DESEMPENHO DOS REATORES SATURADOS

As situações selecionadas para apresentação e discussão neste artigo são:

- Caso 1 – funcionamento do sistema sem regulador;
- Caso 2 – operação com regulador a núcleo saturado *twin-tripler* constituído por aço silício;
- Caso 3 – operação com regulador a núcleo saturado *twin-tripler* constituído por ligas amorfas.

A. Resultados para o Caso 1 – sem reator

De acordo com o gráfico indicado na Fig. 6, que representa o perfil da tensão instantânea e eficaz do barramento ao qual se encontra conectada a carga, cujo valor nominal é de 34,5 kV, fica evidenciado que, com o carregamento pleno, a tensão eficaz é de 33,6 kV (equivalente a 0,974 pu do valor nominal). Uma vez manifestada a perda da carga, esta grandeza é alterada para 37,09 kV (ou 1,075 pu). Este último valor indica que houve violação dos valores considerados admissíveis pela legislação, fato este decorrente da não utilização de qualquer meio de regulação.

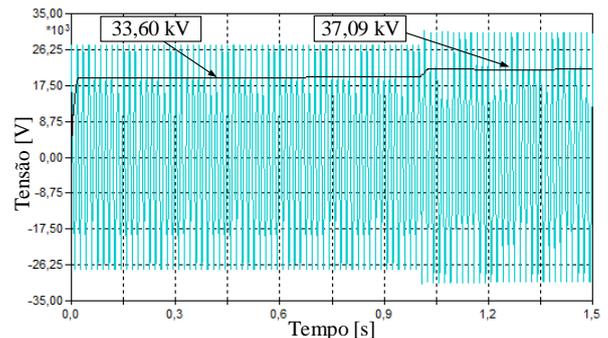


Fig. 6. Tensão no barramento de 34,5 kV sem reguladores: valores instantâneos (curva turquesa) e eficazes (curva preta).

B. Resultados para o Caso 2 – com reator saturado aço silício

Como explicitado, as avaliações feitas sob a designação Caso 2 implicam no mesmo estudo computacional supra contemplado, exceto pelo fato que, agora, há a inserção do reator saturado de 1,5 MVar, com núcleos magnéticos constituídos pelo material aço silício comercial já ressaltado.

Nestas circunstâncias, o processo inicial e o subsequente, após a perda da carga, resultam na tensão instantânea e eficaz mostrada na Fig. 7. Isto evidencia que, na região do gráfico anterior à perda de carga e com a presença do reator saturado, a tensão se mostra em torno de 0,97 pu e, após a rejeição do carregamento, esta grandeza atingiu 1,05 pu. Portanto, o dispositivo regulador a aço silício proporcionou a adequação do nível de tensão em seu valor limite.

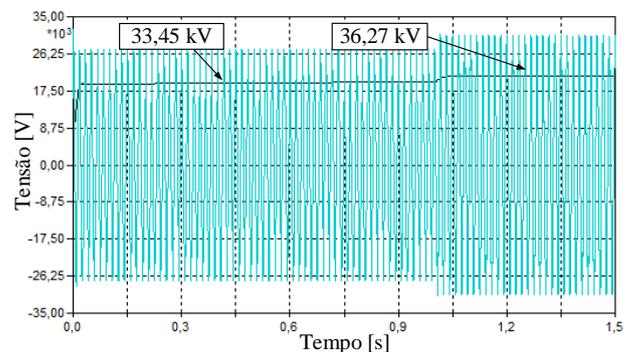


Fig. 7. Tensão no barramento de 34,5 kV com o reator *twin-tripler* com aço silício: valores instantâneos e eficazes.

Quanto à corrente absorvida pelo reator saturado, o seu comportamento no decorrer do período de estudo se apresenta ilustrado na Fig. 8.

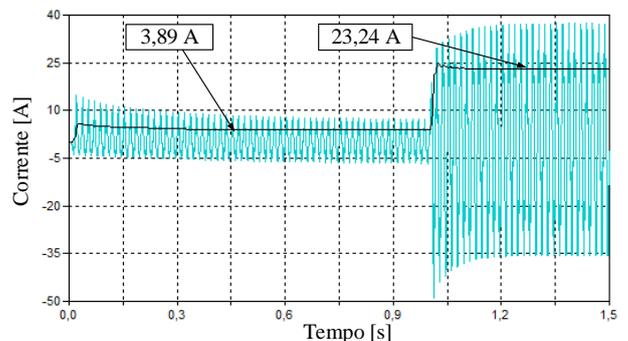


Fig. 8. Corrente absorvida pelo reator de aço silício: valores instantâneos e eficazes.

O desempenho para a corrente do reator mostra uma região transitória associada com a energização deste componente, a qual é seguida por um período pré-rejeição de carga. Nesta a corrente do reator é de 3,89 A (cerca de 16% do valor nominal da corrente do reator). Após o alívio de carga tal grandeza atinge 23,24 A (aproximadamente igual ao valor nominal do regulador). Esta corrente, de acordo com [2], se apresenta com forma de onda não-senoidal, a qual, como se sabe, produz componentes harmônicas características. Destas, para a situação de operação plena do reator (quando da rejeição da carga) constata-se que além da componente reativa fundamental, surgem, concomitantemente, as seguintes ordens harmônicas dominantes: $I_{11} = 3,67$ A, $I_{13} = 0,20$ A, $I_{23} = 1,06$ A. Estas, como conhecido, são injetadas na rede de suprimento e resultam em distorções harmônicas das tensões, como constatado nas Figs. 9 (a) e (b), evidenciando as formas de onda das tensões no barramento da carga para as duas condições supra descritas, isto é, para a situação de menor saturação (carga presente) e saturação plena (sem carga). Para esta situação tem-se, complementarmente, o espectro harmônico da corrente indicado na Fig. 10.

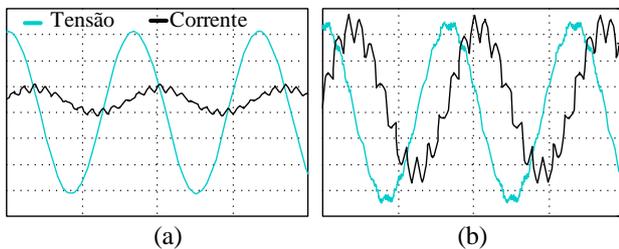


Fig. 9. Zooms da tensão e corrente para as duas condições operativas – reator com aço silício: menor saturação (a) e saturação plena (b).

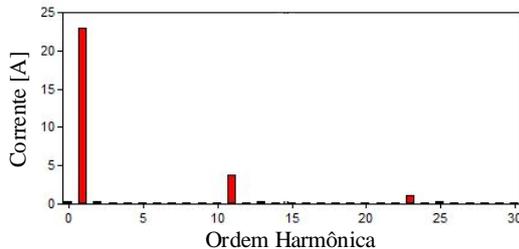


Fig. 10. Espectro harmônico da corrente durante a perda de carga – aço silício.

Em correspondência com as injeções de correntes harmônicas, constata-se que a distorção harmônica de tensão, sob condições de carregamento normal, se mostra bastante baixa, enquanto que, sob a ação do regulador, a mesma apresenta um THD_v de 4,16% ($V_{11} = 4,09\%$, $V_{13} = 0,38\%$ e $V_{23} = 0,29\%$).

Outra informação relevante refere-se ao nível da densidade de fluxo existente no reator saturado. Na condição pré-rejeição de carga este se mostra em torno de 1,85 T e, após a rejeição, este valor atinge 1,96 T. Tal constatação tem por origem a correlação entre o fluxo e a corrente do reator.

No que tange as perdas no ferro, para o reator a aço silício, na condição de menor saturação e de saturação plena, em atenção aos valores constantes na Tabela I, estas são, respectivamente, da ordem de 2,35 W/kg e 2,82 W/kg.

C. Resultados para o Caso 3 – com reator saturado ligas amorfas

Esta avaliação corresponde a um estudo de desempenho sob as mesmas condições já postas, exceto pelo fato que o reator saturado de 1,5 MVA_r passa a ser constituído por um núcleo magnético a base de ligas amorfas.

Dentro da mesma lógica utilizada anteriormente para a apresentação e discussão dos resultados, a Fig. 11 mostra o perfil da tensão instantânea e seu correspondente valor eficaz. Os valores ilustrados evidenciam que, anteriormente à perda de carga, a tensão se mostra, similarmente à utilização do aço silício, em torno de 0,97 pu e, após a rejeição do carregamento, nas imediações de 1,05 pu. Nestes termos, o dispositivo regulador a ligas amorfas indica uma performance similar a do aço silício. Também, o comportamento da corrente absorvida pelo reator é ilustrado na Fig. 12.

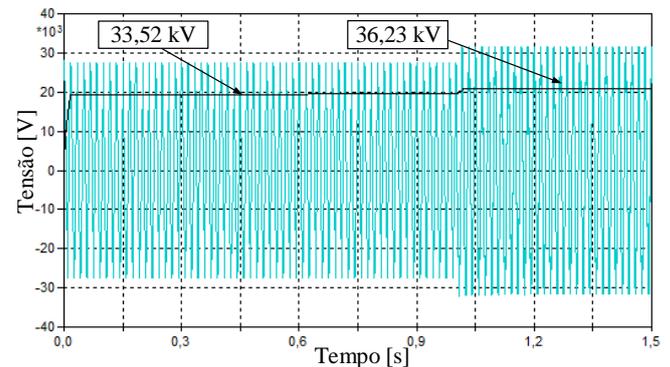


Fig. 11. Tensão no barramento de 34,5 kV com o reator *twin-tripler* com ligas amorfas: valores instantâneos e eficazes.

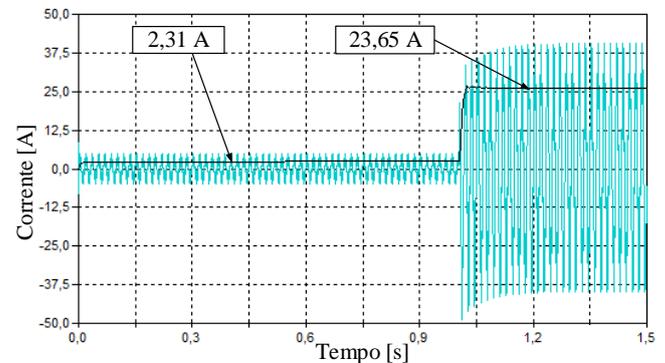


Fig. 12. Corrente absorvida pelo reator de ligas amorfas: valores instantâneos e eficazes.

Como visto na Fig. 12, sob condições de menor saturação, o reator a ligas amorfas consome uma corrente em torno de 42,42% inferior àquela do dispositivo com aço silício, fato este importante como primeiro elemento impactante sobre a redução das perdas joule. Tendo em vista que o valor da indução magnética situa-se em torno de 1,51 T e que, em consonância com valores fornecidos na Tabela I, as perdas no ferro se mostram da ordem de 0,23 W/kg por núcleo, ficando evidenciada uma expressiva redução das perdas, desta feita no ferro. Quanto da operação de saturação plena, o valor da indução magnética se apresenta em torno de 1,59 T, o que conduz a perdas no ferro aproximadamente 10 vezes inferiores a do aço silício.

Visando mostrar os desempenhos mais detalhados para as condições de menor saturação e operação plena, na Fig. 13 são apresentadas as formas de onda de tensão e corrente correspondentes. Complementarmente, na Fig. 14 tem-se o espectro harmônico da corrente absorvida pelo reator durante a rejeição de carga.

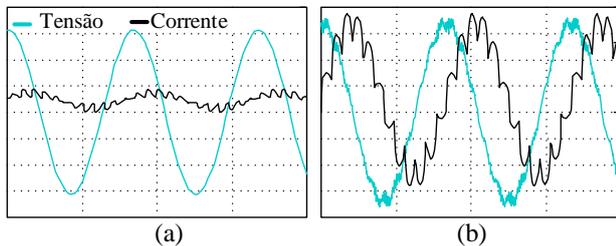


Fig. 13. Zooms da tensão e corrente para as duas condições operativas – reator com ligas amorfas: menor saturação (a) e saturação plena (b).

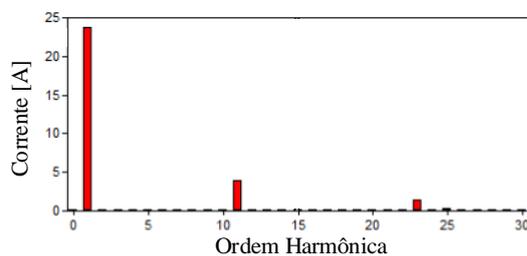


Fig. 14. Espectro harmônico da corrente durante a perda de carga – material amorfo (durante a rejeição: $I_{11} = 3,78$ A; $I_{13} = 0,08$ A; $I_{23} = 1,33$ A).

O THD_v resultante após a rejeição de carga foi de 4,28%, sendo as componentes harmônicas de maior magnitude a de ordem 11, cujo valor é em torno de 4,24% da fundamental, a de ordem 13 (0,3% da fundamental) e de ordem 23 (0,35% da fundamental). Tais valores se apresentam nas imediações das distorções anteriormente obtidas para as tensões do barramento de 34,5 kV quando do emprego do aço silício.

VI. CONCLUSÕES

Em sintonia com os resultados aqui relatados fica evidenciado, de imediato, que o emprego de ligas amorfas em substituição ao aço silício se mostra bastante atrativo no que tange a eficiência energética do regulador a núcleo saturado. De fato, as previsões feitas ao se avaliar comparativamente as relações fluxo versus corrente para estes dois tipos de materiais comercialmente disponíveis para a construção de estruturas magnéticas, se mostraram consistentes com os desempenhos computacionais obtidos. Quanto a eficácia do processo de regulação de tensão, os estudos feitos deixaram evidente que a construção de reatores saturados com aço silício ou materiais amorfos se mostraram igualmente apropriados aos fins almejados. Todavia, ao se observar questões relacionadas com perdas joule e perdas no ferro, então o emprego de ligas amorfas se mostra bastante atrativo. Vale ressaltar que as reduções atreladas com as perdas nos enrolamentos se devem, sobretudo, a redução da denominada corrente sob menor saturação. Quanto a questão das perdas no ferro, aquelas associadas por quilo de ligas amorfas se apresentam em torno de 10% das manifestadas em aços silício. Não obstante o fato que os dispositivos

construídos com ligas amorfas se apresentam cerca de 20% mais volumosos que os a aço silício, ainda assim a vantagem é evidente. Por fim, vale ressaltar que os trabalhos de investigação feitos são ainda embrionários e uma série de pesquisas adicionais se fazem ainda necessárias para a consolidação do processo.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos a CAPES, CNPq e a FAPEMIG, pelas bolsas de mestrado e doutorado destinadas ao programa de pós-graduação da FEELT-UFU, e outros apoios financeiros que viabilizaram a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Modulo 8 – 2012.
- [2] F. P. Santilio et al. “Restaurador Eletromagnético de Tensão: Uma Estratégia de Controle e Avaliação Experimental de Desempenho”. *10th Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica – X CBQEE*, Araxá, MG, 2013.
- [3] J. A. F. Barbosa Jr. et al. “Proposta e Validação de Modelagem de Reatores a Núcleo Saturado no Simulador ATP”, *9th IEEE/IAS International Conference on Industry – IX-INDUSCON*, São Paulo, Nov. 2010.
- [4] A. B. Vasconcellos, “Modelagem, Projeto e Construção de Compensadores Estáticos tipo Reator a Núcleo Saturado para Melhoria da Qualidade da Energia: Análise Computacional e Validação Experimental”, *Tese de Doutorado*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Setembro 2004.
- [5] L. A. M. da Fonte et al, “Reator com saturação natural: alguns aspectos de projeto e aplicação”. *Symposium of Specialists In Electric Operational and Expansion Planning – VI SEPOPE*, Salvador, BA, 1998.
- [6] W. B. Castro, B. A. Luciano. “Vidros Metálicos: uma nova classe de materiais”. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, ISSN 1809-8797, vol.4.2, 2009, pp. 20-25.
- [7] J. A. F. Barbosa Jr. et al. “Estabelecimento e Validação de uma Sistemática para a Obtenção das Curvas de Magnetização de Reatores Saturados para Simulação no ATP”. *9th Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica – IX CBQEE*, Cuiabá, MT, 2011.
- [8] NG, W. Harry et al. Amorphous alloy core distribution transformer. *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no.11, 1991, pp. 1608-1623.
- [9] E. L. Boyd, J. D. Borst. “Design concepts for an amorphous metal distribution transformers”. *IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems*, vol. PAS-103, no. 11, 1984, pp. 3365-72.
- [10] B. A. Luciano et al. “Transformadores monofásicos com núcleo de liga amorfa em sistemas de distribuição de energia elétrica rurais”. In: *XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, São Paulo, 2010, pp.1-6.