

# UMA ESTRATÉGIA PARA O DIMENSIONAMENTO FÍSICO E PARAMETRIZAÇÃO DE REGULADORES DE TENSÃO A NÚCLEO SATURADO

<sup>1</sup>Camilla S. Chaves, <sup>2</sup>José C. Oliveira, <sup>2</sup>José R. Camacho, <sup>2</sup>João A. F. Barbosa Jr., <sup>2</sup>Andreia C. dos Santos

<sup>1</sup>Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM), Patrocínio – MG, camillachaves@iftm.edu.br

<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG  
jcoliveira@ufu.br, johnareis@gmail.com, andreia.crico@gmail.com

**Resumo** – Não obstante o grande número de publicações contemplando estudos de desempenho dos denominados reatores saturados destinados à regulação de tensão, o tema, diante dos atrativos oferecidos e perspectivas de emprego, ainda se apresenta com tópicos desafiadores. De fato, investigações sobre os princípios físicos que regem o seu dimensionamento construtivo e a obtenção de parâmetros elétricos/magnéticos representativos ainda são merecedoras de atenção. Diante deste contexto, o presente artigo contempla estes dois aspectos, objetivando a obtenção de informações necessárias à modelagem computacional e estudos de desempenho destes dispositivos. A presente proposta está fundamentada nos equacionamentos adotados para o projeto de transformadores e na determinação dos parâmetros equivalente via representação dos equipamentos através da técnica dos elementos finitos.

**Palavras-Chave** – reator a núcleo saturado, qualidade da energia, regulador de tensão, projeto físico, parâmetros equivalentes.

## A STRATEGY TO PHYSICAL DESIGN AND PARAMETERS DETERMINATION OF SATURATED CORE VOLTAGE REGULATORS

**Abstract** - Despite the large number of publications covering performance studies of the so-called saturated reactors for voltage regulation, the subject, besides offering attractive and usage prospects, still offers challenges to research. In fact, investigations on the physical principles that rule their constructive design and obtaining representative electric and magnetic parameters are still worthy of study. Given this context, this paper covers both aspects with the aim of providing data towards the modelling and computational performance studies of such devices. The proposal is based on traditional transformer design equations and the determination of the equivalent parameters is carried out based on finite element representation.

**Keywords** – saturated core reactor, power quality, voltage regulators, physical design, equivalent parameters.

## I. INTRODUÇÃO

A regulação da tensão nos barramentos do sistema elétrico, se apresenta como tema que oferece contínuos desafios para a engenharia elétrica. De fato, a junção de fatores como: comprimento das linhas de transmissão, dinamicidade do consumo dos centros de cargas, padrões de desempenho requeridos, exigências dos consumidores no âmbito das redes básica e de distribuição, dentre outros; determinam a necessidade, para muitas aplicações, de medidas mitigatórias, nos termos previstos pelas legislações definidas pelos órgãos reguladores (ONS e ANEEL) [1].

Em se tratando dos dispositivos reguladores de tensão, reconhece-se, comercialmente, diferentes tipos de produtos, os quais, de um modo geral, podem ser englobados nos princípios da compensação direta, e outros, embasados na compensação indireta [2], [3], [4]. Nesta última categoria estão os dispositivos cuja atuação baseia-se no controle do fluxo de potência reativa. Este é o caso do regulador focado neste artigo, o qual se apresenta na forma dos clássicos reatores a núcleo saturado (RNS), cujas vantagens e desvantagens são amplamente conhecidas [2], [5]. Este dispositivo, de cunho totalmente eletromagnético e dispensando qualquer meio para medições, tomadas de decisão e controle outro que não sua característica intrínseca de operação, quando associado paralelamente a um banco de capacitores fixo, forma o denominado Compensador Estático de Reativos a Núcleo Saturado (CERNS), equipamento este amplamente difundido na década 60 do século XX.

Apesar dos inúmeros atrativos oferecidos pelos reatores saturados, podendo-se destacar sua grande robustez, manutenção reduzida, boa eficiência na regulação de tensão, rapidez de resposta, baixos custos de aquisição e manutenção; o desenvolvimento e utilização desta tecnologia tornou-se praticamente inerte a partir de meados da década de 70. Este fato pode ser justificado principalmente pela evolução e popularização dos reguladores de tensão fundamentados na eletrônica de potência [6].

Todavia, diante dos atrativos oferecidos pela antiga tecnologia, a partir de meados dos anos 90, com o advento das aprimoradas ligas de aço silício e de materiais amorfos disponíveis comercialmente, adicionadas à busca por alternativas de reguladores de tensão mais competitivos, estes fatores motivaram novos interesses sobre esta estratégia de



XIII CEEL - ISSN 2178-8308  
12 a 16 de Outubro de 2015  
Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

regulação da tensão. Isto pode ser constatado através dos esforços relatados em [5], [7] e [8].

O princípio de funcionamento do RNS é bastante peculiar, pois tem por fundamento a curva característica de operação ( $V \times I$ ), a qual é diretamente relacionada com o tipo de material magnético utilizado no núcleo. Vale lembrar que a tensão  $V$  está presente no barramento junto ao qual o reator encontra-se conectado e  $I$  corresponde a corrente indutiva de suprimento desta unidade. Isto confere ao equipamento um comportamento de impedância variável de acordo com o nível de tensão do barramento ao qual o mesmo encontra-se inserido. Desta forma, sob tensões inferiores a um valor pré-definido em projeto, o dispositivo eletromagnético opera numa região de menor saturação, demandando assim, uma pequena potência reativa do sistema. Idealmente, esta deveria ser nula, todavia, as características reais dos arranjos não viabilizam tal hipótese e, nestas circunstâncias, é de se esperar níveis reduzidos de corrente indutiva. Em contrapartida, em situações de baixos carregamentos impostos à rede de transmissão ou de distribuição, isto pode ocasionar elevações das tensões e, por conseguinte, o dispositivo ora referido é levado a estados de saturação mais elevados, fato este que implicará num maior valor para sua corrente e potência reativa consumida. Tal comportamento, em consonância com princípios conhecidos da engenharia elétrica, possuem uma pronta correlação com as tensões e promovem um controle contínuo destas grandezas visando, sobretudo, seu enquadramento nos padrões almejados [2], [5], [8].

Muito embora a simplicidade do princípio físico acima sintetizado, vale lembrar que a característica não linear de operação do equipamento, que se apresenta como fundamento maior para o processo da regulação, introduz indesejáveis níveis de distorções harmônicas na rede elétrica. Diante desta realidade, a utilização de topologias para a disposição de núcleos e conexão de enrolamentos, conforme demonstrado pelos arranjos *twin-tripler* (12 pulsos) e *treble-tripler* (18 pulsos) [7], conduzem a uma expressiva redução destes efeitos negativos.

Neste cenário, este trabalho se apresenta imbuído do propósito de apresentar as premissas para o estabelecimento do pré-projeto de reatores saturados. A premissa está na definição do consumo de reativos para o enquadramento das tensões aos padrões requeridos pela legislação através dos denominados dispositivos a núcleo saturado do tipo *twin-tripler*. Para tanto, empregando-se princípios tradicionais e utilizados para projetos de transformadores [9], [10] são feitas adaptações e proposições para a determinação das características físicas construtivas dos núcleos magnéticos e enrolamentos elétricos dos denominados reatores saturados. Os fundamentos apresentados são então aplicados ao dimensionamento de um reator em escala real construído [5], objetivando, sobretudo, uma avaliação do grau de aderência da metodologia apresentada. Adicionalmente, o presente artigo também se destina à proposição de uma estratégia para a determinação das indutâncias de dispersão dos enrolamentos através dos recursos disponibilizados pelo método dos elementos finitos, nos termos oferecidos pelo simulador FEMM.

## II. O REATOR *TWIN-TRIPLER*: ARRANJO FÍSICO E DIMENSIONAMENTO BÁSICO

O regulador *twin-tripler*, ou reator saturado de 12 pulsos, consiste em um equipamento que possui uma topologia construtiva sintetizada na Figura 1. Constata-se que o equipamento se apresenta constituído, basicamente, por dois núcleos magnéticos trifásicos idênticos, cada qual formado por três colunas magnéticas, sobre os quais são montados dois enrolamentos concêntricos por coluna.

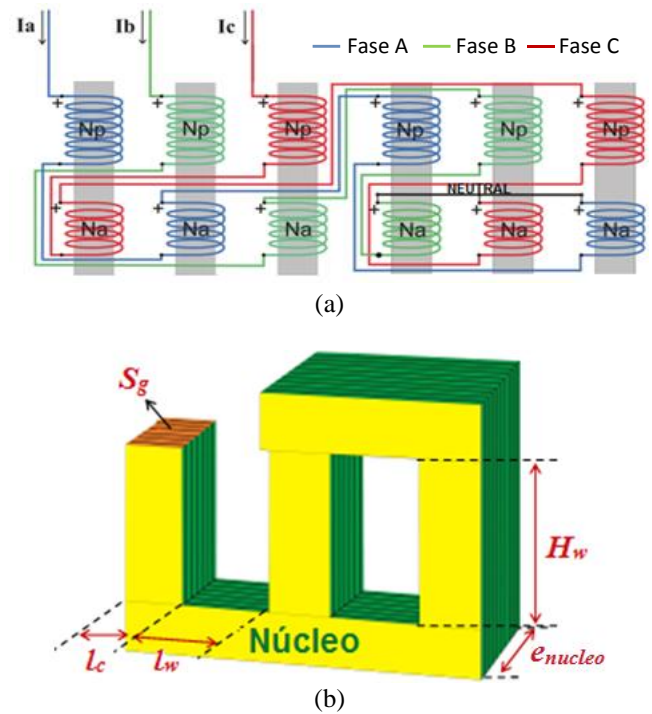


Fig. 1. Reator a núcleo saturado: (a) arranjo construtivo *twin-tripler*; (b) principais dimensões do núcleo.

Os dois enrolamentos existentes em cada coluna, são denominados respectivamente de principal ( $N_p$ ) e de auxiliar ( $N_a$ ), estão, elétrica e magneticamente, interligados entre si e com as bobinas das colunas vizinhas, conforme mostrado na Figura 1.a.

Quanto à definição da potência reativa a ser absorvida pelo equipamento diante das condições impostas pelo sistema elétrico, o valor desejado para esta grandeza ( $Q_L$ ), é determinado em função do nível de regulação de tensão requerida [11]. Tomando por base este parâmetro, procede-se, na sequência, ao dimensionamento físico das principais características que perfazem o reator saturado, nos termos aqui previstos e em função de experiências aplicáveis a construção de transformadores [10]. Os significados das variáveis indicadas nas expressões podem ser prontamente identificados na Figura 1(b) ou nas descrições ao final de cada equação.

### A. Núcleos magnéticos:

No que tange a estrutura física do núcleo magnético este deverá possuir a seção magnética ( $S_{mag}$ ) e seção geométrica ( $S_g$ ) a seguir:

$$S_{mag} = \frac{k_1 \cdot \sqrt{Q_L \cdot 10^3} \cdot 10^4}{4,44 \cdot B_{op} \cdot f} \quad (1)$$

$$S_g = \frac{S_{mag}}{f_{emp}} \quad (2)$$

Sendo:

$k_1$  – fator de multiplicação (0,4 ou 0,5);

$B_{op}$  – densidade de fluxo magnético no núcleo;

$f$  – frequência;

$f_{emp}$  – fator de empilhamento, que determina o percentual de entreferro e material magnético do núcleo.

Em (1), a unidade de  $B_{op}$  deverá ser Tesla para a aplicabilidade da equação, obtendo assim a seção magnética em  $cm^2$ .

Quanto a largura ( $l_c$ ) e espessura ( $e_{nucleo}$ ) da coluna, estas são determinadas através de:

$$l_c = k_2 \cdot D_{nucleo} = k_2 \cdot k_3 \cdot \sqrt{\frac{S_g}{f_{uo}}} \quad (3)$$

$$e_{nucleo} = l_c = k_2 \cdot k_3 \cdot \sqrt{\frac{S_g}{f_{uo}}} \quad (4)$$

Onde:

$D_{nucleo}$  – Diâmetro do círculo que circunscreve a seção geométrica do núcleo;

$k_2$ ,  $f_{uo}$  e  $k_3$  – constantes que dependem do número de dentes do núcleo;

### B. Bobinas:

A definição destes componentes físicos baseia-se, inicialmente, na correlação entre a corrente nominal do reator. Assim:

$$I_{twin-tripler} = \frac{Q_L}{\sqrt{3} \cdot V_{barra}} \quad (5)$$

Onde:

$V_{barra}$  – tensão de linha do barramento sob regulação;

A partir da corrente calculada em (5), pode-se determinar a seção transversal mínima do condutor a ser utilizado. Através de valores tabelados da densidade de corrente ( $J$ ), em função da potência de transformadores, a seção transversal do fio é:

$$S_p = S_a = S_{bobina} \geq \frac{I_{twin-tripler}}{J} \quad (6)$$

O número de espiras de cada enrolamento dependerá da queda de tensão na bobina ( $V_{bobina}$ ), frequência da rede ( $f$ ), seção magnética do núcleo ( $S_{mag}$ ) e densidade de fluxo magnético no momento da regulação ( $B_{ov}$ ). Sendo  $V_{bobina}$  uma grandeza calculada a partir da tensão de fase do barramento [5], [11] e  $B_{ov}$  uma especificação definida pelo projetista (normalmente adota-se valores muito acima da indução típica de transformadores, visto a filosofia operacional do equipamento), tem-se:

$$N_{bobina} = \frac{V_{bobina}}{4,44 \cdot f \cdot B_{ov} \cdot S_{mag}} \quad (7)$$

Uma vez conhecida a seção transversal do condutor, o número de espiras de cada enrolamento e o número de

camadas de cada enrolamento ( $N_{camadas}$ ), obtém-se a altura do enrolamento pela equação (8).

$$H_{bobina} = \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{S_{bobina}}{\pi}} \cdot N_{bobina}}{N_{camadas}} \quad (8)$$

A formulação (8) é válida para condutores de seção circular, visto que o termo  $2 \cdot \sqrt{\frac{S_{bobina}}{\pi}}$  corresponde ao seu diâmetro. Para condutores de seção retangular, deve-se substituir o respectivo termo pela maior dimensão da seção transversal.

Quanto a largura e altura da janela:

$$l_w = \frac{D_{nucleo}}{2} = \frac{l_c}{2 \cdot k_2} \quad (9)$$

$$\frac{l_c}{2 \cdot k_2} > 2 \cdot (S_{bobina} + d_{isolante}) \cdot N_{camadas}$$

$$H_{cabeçab} = 1,3 \cdot V_{barra} \quad (10)$$

$$H_w \geq H_{bobina(p)} \cdot 2 \cdot H_{cabeçab} \quad (11)$$

Sendo:

$d_{isolante}$  – largura do isolante entre enrolamentos;

$H_{bobina(p)}$  – altura da maior bobina, o que corresponde normalmente à altura da bobina principal;

$H_{cabeçab}$  – distância entre o núcleo e o enrolamento, nas extremidades (cabeça de bobina);

A equação (10) oferece uma estimativa da distância entre o enrolamento e o núcleo, na região da cabeça de bobina, sendo  $V_{barra}$  em kV, o resultado final será em milímetros. Ressalta-se que as inequações apontadas em (9) e (11) representam apenas as condições mínimas que as dimensões deverão possuir. Deve-se também verificar uma relação entre a área total da seção de cobre em uma janela ( $S_{cu}$ ) e a área da janela ( $S_w$ ), para que seja obtida uma proporção de ampères-espiras conveniente. Isto resulta em:

$$\frac{S_{cu}}{S_w} > f_{cu} \quad (12)$$

Onde:

$f_{cu}$  – fator de enchimento (valor tabelado de acordo com a potência do equipamento).

Visando otimizar a altura dos enrolamentos e obter uma relação  $S_{cu}/S_w$  mais adequada, pode-se aumentar o número de camadas  $N_{camadas}$ , fato este que implicará num incremento de  $S_{cu}$ . Por outro lado, esta medida implica na redução da capacidade de troca de calor produzido no reator, o que não deve ser ignorado neste procedimento.

O comprimento dos enrolamentos pode ser estimado a partir da equação (13), sendo um parâmetro de projeto importante para o cálculo posterior da resistência dos enrolamentos e estimativa de custo.

$$c_{bobina} = k_4 \cdot \pi \cdot N_{bobina} \cdot (k_2 \cdot \sqrt{S_g}) \quad (13)$$

Onde:

$c_{bobina}$  – comprimento do enrolamento;

$k_4$  – fator de multiplicação (1,05 para o enrolamento mais interno e 1,1 para o enrolamento mais externo).

Quanto ao peso dos dois núcleos magnéticos ( $M_{nucleo}$ ), esta grandeza poderá ser determinada através da relação entre o volume e a densidade do material deste componente, como a seguir:

$$l_{nucleo} = 3 \cdot l_c + 2 \cdot l_w \quad (14)$$

$$h_{nucleo} = 2 \cdot l_c + H_w \quad (15)$$

$$M_{nucleo} = 2 \cdot d_{nucleo} \cdot [l_{nucleo} \cdot h_{nucleo} \cdot e_{nucleo} - 2 \cdot (l_w \cdot H_w \cdot e_{nucleo})] \cdot f_{emp} \quad (16)$$

Onde:

$d_{nucleo}$  – densidade do material magnético do núcleo;

$l_{nucleo}$  – largura total do núcleo;

$h_{nucleo}$  – altura total do núcleo;

### III. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO

Visando elucidar a utilização dos procedimentos de cálculo supra apresentados, é feito, na sequência, a aplicação para o dimensionamento de um reator destinado a adequar os níveis de tensão associados com o sistema indicado no diagrama unifilar da Figura 2.

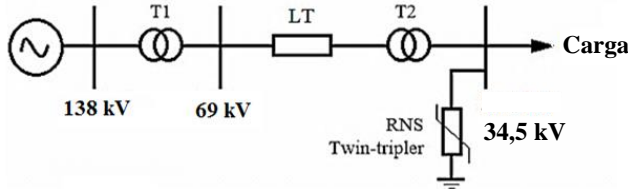


Fig. 2: Diagrama unifilar do sistema elétrico utilizado.

Neste sistema, o nível de curto-circuito é igual a 200 MVA e a potência consumida pela carga, nas condições nominais, é de 5 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  $\Omega$ /km, indutância de 0,6034 mH/km e capacitância de 4,847 nF/km. Nas condições de 80% de rejeição de carga, o nível de tensão ultrapassa os limites admissíveis por lei, que é de 1,05 pu nesta condição. Diante destas circunstâncias, deseja-se alocar um regulador de tensão de 3 MVar para que a sobretensão seja limitada em 36,2 kV na frequência de 60 Hz.

Em consonância com a metodologia descrita, o reator saturado que proporcionará um consumo de potência reativa especificado, para a tensão definida, possuirá os parâmetros físicos sintetizados na Tabela I, os quais foram obtidos a partir dos equacionamentos dados. Também, para fins comparativos e estabelecimento das bases para a validação da metodologia descrita, ressalta-se que as grandezas obtidas são correlacionadas com aquelas associadas com um dispositivo de potência e tensão similares, o qual foi construído e testado em [5]. O projeto deste reator experimental, todavia, foi realizado à luz de orientações e experiências de um fabricante, e não no contexto aqui fornecido. O protótipo de reator saturado aqui referido encontra-se ilustrado na Figura 3.

Tabela I – Características físicas do reator de 3 MVar – valores teóricos e experimentais

Dimensões	Unid.	Pré-Projeto	Protótipo	Desvio (%)
$S_g$	[cm <sup>2</sup> ]	601,2	604,8	-0,60
$L_c, e_{bobina}$	[mm]	290	300	-3,33
$S_{bobina}$	[mm <sup>2</sup> ]	29,27	29,0	+0,93
			(principal) 2 x 24,9 (auxiliar)	(principal) -41,22 (auxiliar)
$C_{bobina}$	[m]	308,36 (Principal) 103,93 (Auxiliar)	333,40	-7,51
			(Principal) 110 (Auxiliar)	(Principal) -5,51 (Auxiliar)
$N_{bobina}$	Principal	241	241	0
	Auxiliar	88	88	0
$l_w$	[mm]	157	160	-1,9
$H_w$	[mm]	$\geq 1491$	1982	-

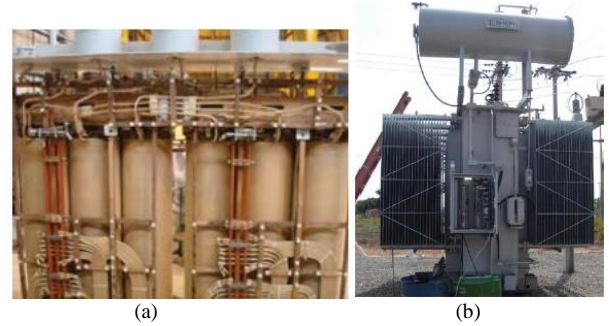


Fig. 3. Protótipo do reator *twin-tripler* em escala real: (a) Estágio construtivo (núcleo e enrolamentos); (b) Produto final.

### IV. DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS E INDUTÂNCIAS DE DISPERSÃO EQUIVALENTES

Com o intuito de atribuir maior embasamento a determinação da indutância de dispersão e resistência dos enrolamentos, optou-se por empregar uma metodologia para obtenção dessas grandezas a partir da técnica de elementos finitos. Nesse sentido, foi utilizado o software FEMM (*Finite Elements Method Magnetics*), que é uma ferramenta de uso livre, destinada principalmente à resolução de problemas magnetostáticos e eletrostáticos de baixa frequência, em planos bidimensionais com simetria axial.

Após representação do *twin-tripler* no software, respeitando as características construtivas e dimensões físicas do protótipo construído, procedeu-se à aplicação de um procedimento, o qual foi desenvolvido com base nos trabalhos [12], [13] e [14], para determinação das indutâncias próprias, mútuas e de dispersão dos enrolamentos das três colunas constituintes de cada núcleo. Para implementação do referido procedimento, foi usado o *script* LUA, uma ferramenta de programação leve e integrada ao FEMM. As equações (18) a (21) apresentam as formulações empregadas para os cálculos das indutâncias ora referidas.

$$R_{bobina} = \rho \frac{C_{bobina}}{S_{bobina}} \quad (18)$$

$$L_x = \frac{\lambda_x}{I_x} = \int \frac{A \cdot J}{I_x^2} dV \quad (19)$$

$$M_{xy} = \frac{\lambda_y}{I_x} \quad (20)$$

$$l_x = L_x + M_{xy} \quad (21)$$

Onde:

$R_{bobina}$  – resistência do enrolamento;  
 $\rho$  – resistividade do material condutor;  
 $L_x$  – indutância própria do enrolamento x;  
 $\lambda_x$  – fluxo concatenado pelo enrolamento x;  
 $I_x$  – corrente no enrolamento x;  
 $A$  – vetor potencial magnético [T];  
 $J$  – vetor densidade de corrente [A/m<sup>2</sup>];  
 $V$  – volume [m<sup>3</sup>];  
 $M_{xy}$  = indutância mútua entre os enrolamentos x e y;  
 $l_x$  = indutância de dispersão do enrolamento x.

A equação (21) constitui-se de uma soma entre as indutâncias calculadas, visto que o sentido de  $\lambda_y$  é contrário ao sentido de  $\lambda_x$ , o que faz com que  $M_{xy}$  tenha sinal contrário ao sinal de  $L_x$ .

Destaca-se que a obtenção dos parâmetros relacionados a cada um dos enrolamentos deve ser realizada através de simulações distintas, com a energização do enrolamento sob análise e os restantes permanecendo desligados. Para o caso ora estudado, a opção feita foi pela energização do enrolamento principal da fase A de um dos núcleos, permanecendo todos os demais abertos.

Tendo por base essa estratégia são obtidos os dados necessários para os cálculos das indutâncias supra referidas.

Iniciando pela indutância de dispersão e considerando-a atrelada com cada um dos enrolamentos, este parâmetro será variável ao longo do ciclo em 60 Hz. Isto se deve, sobretudo, ao fato que, para cada instante de tempo, haverá distintos níveis para a saturação imposta pela tensão de suprimento do reator. A exemplo disto tem-se que, para uma corrente com valor de pico igual a 0,7 A, a Figura 4 ilustra as densidades e linhas de fluxo magnético obtidas no programa FEMM para esta condição específica de operação.

Realizando o mesmo procedimento para outros níveis de corrente, a Figura 5 exibe o comportamento da indutância de dispersão referente a um dos enrolamentos principais da fase A do *twin-tripler* para um conjunto de níveis de corrente ao longo de um ciclo completo de operação.

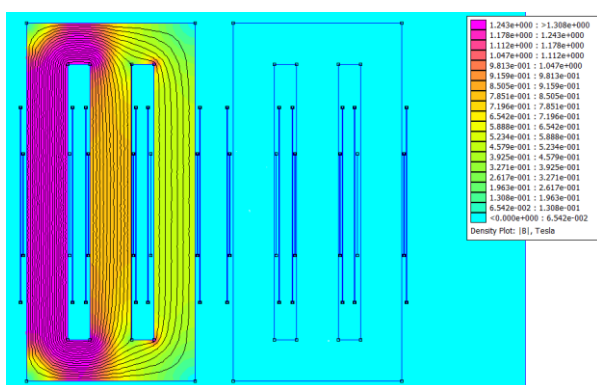


Fig. 4. Densidade de fluxo magnético em um dos núcleos do reator *twin-tripler*, para a situação em que a bobina principal da fase A do respectivo núcleo está energizada e as restantes desligadas.

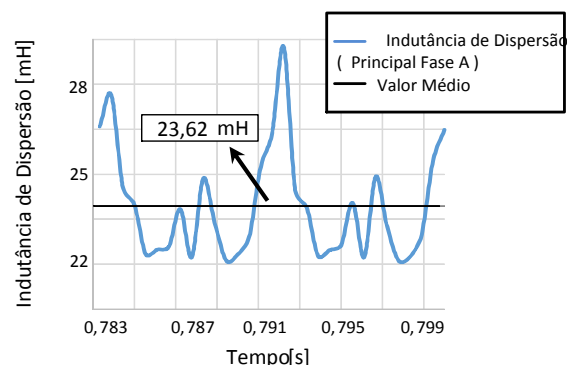


Fig. 5. Indutância de dispersão do conjunto de enrolamentos da fase A ao longo do período de análise.

A curva ilustrada na Figura 5 mostra que a variação da indutância de dispersão ao longo do ciclo em 60 Hz é pequena. Isto permite a adoção de um valor constante para esta grandeza, a qual é definido pelo valor médio do comportamento indicado. Lembrando que os estudos aqui descritos compreendem os resultados para uma única bobina, deve-se repetir os procedimentos para todas as demais. Assim procedendo, torna-se possível a obtenção de um valor único e representativo para as bobinas de cada fase do reator *twin-tripler*. Este corresponde à média dos valores individuais, os quais se encontram sintetizados na Tabela III, a qual mostra as resistências e indutâncias de dispersão encontradas, nos termos acima descritos.

Tabela III – Indutâncias de dispersão obtidas a partir da técnica de elementos finitos

Enrolamento	Indutância de dispersão [mH]	Resistência [ $\Omega$ ]
Principal	23,62	0,201
Auxiliar	3,181	0,0777

Baseado nos mesmos princípios acima estabelecidos para a determinação da indutância de dispersão, procedimentos similares conduzirão aos demais parâmetros necessários à representação computacional dos reatores saturados. Este é o caso das indutâncias próprias e mútuas, as quais encontram-se indicadas na Tabela IV.

Tabela IV – Indutâncias própria e mútua

Enrolamento	Indutância própria [H]	Indutância mútua [H]
Principal	7,901	-7,876
Auxiliar	1,053	-1,050

A partir dos resultados sintetizados nas Tabelas III e IV e, em consonância com as necessidades dos modelos computacionais, torna-se então possível a realização de estudos de desempenho do reator sob distintas condições de operação. De fato, baseados em modelos criados em simuladores, a exemplo do ATP, torna-se possível, para cada condição de funcionamento imposta pela rede elétrica, que sejam obtidas as tensões, correntes, potências, níveis de distorções e outras informações próprias ao funcionamento do reator saturado, como reportado em [15].

## V. CONCLUSÕES

Muito embora os direcionamentos dados para o pré-projeto dos reatores tenha sido embasado em experiências aplicáveis a transformadores, os resultados obtidos no trabalho evidenciaram a eficácia das diretrizes estabelecidas para fins da obtenção das principais características construtivas de reguladores de tensão a núcleo saturado.

Por outro lado, tendo em foco o segundo objetivo do artigo, qual seja, a obtenção de parâmetros equivalentes, como se faz necessário aos estudos computacionais de desempenho através de aplicativos computacionais como o ATP e outros, procedeu-se a uma proposta de estratégia para a obtenção das indutâncias de dispersão dos enrolamentos que perfazem o equipamento. Muito embora os resultados obtidos e indicados não tenham sido alvo de validações, fato este decorrente da ausência de meios para testes experimentais num protótipo com a escala de potência e tensão utilizado, as grandezas se mostram consistentes e compatíveis com as expectativas físicas. De fato, os valores obtidos para as bobinas principais e auxiliares guardam, entre si, uma proporção consonante com suas características construtivas. Quanto a resistência, esta sim, pode ser medida diretamente.

Por fim, vale observar que, somado ao estabelecimento das diretrizes para o dimensionamento dos reatores, uma das contribuições mais relevantes do trabalho foi a utilização do software FEMM como meio para a obtenção das indutâncias de dispersão, nos termos indicados no texto.

## 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 - Módulo 8," 20 Maio 2015. [Online]. Available: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo8\\_revisao\\_1\\_retificacao\\_1.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo8_revisao_1_retificacao_1.pdf).
- [2] A. B. Vasconcellos, "Análise Técnica Comparativa sobre o Emprego de Reatores Saturados e Lineares para a Regulação da Tensão em Sistemas de Transmissão Radiais," em *VIII Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica*, Blumenau - SC, 2009.
- [3] E. Friedlander, "Static Network Stabilization; Recent Progress in Reactive Power Control," *GEC Journal*, vol. 33, n° 2, pp. 58-65, 1966.
- [4] A. M. Bryantsev, *Magnetically Controlled Electrical Reactors*, Moscou, Rússia: Znack, 2012.
- [5] J. A. F. B. Jr., "Performance Analysis and Computational Model Validation of a Real Scale Saturated Core Reactor," em *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*, Lisboa, Portugal, 2011.
- [6] Y. H. Chung, "Neural Network Controlled Voltage Disturbance Detector and Output Voltage Regulator for Dynamic Voltage Restorer," em *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, Dinamarca, 2007.
- [7] M. A. C. Jr. e L. A. M. Fonte, "Increasing the Capacity of Long EHV Transmission Lines by Saturated Reactors," em *14th Power Systems Computation Conference*, Sevilla, Espanha, 2002.
- [8] 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*, Uberlândia: Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.
- [9] M. D. o. E. Engineering, *Magnetic Circuits and Transformers: A First Course of Power and Communication Engineers*, Cambridge, Massachusetts, EUA: M.I.T. Press, 1965.
- [10] S. V. Kulkarni e S. A. Khaparde, *Transformer Engineering - Design and Practice*, Nova Iorque, EUA: Marcel Dekker Inc., 2004.
- [11] J. M. Pacheco, *Determinação dos Parâmetros de Compensadores Estáticos de Reativos para o Projeto Otimizado de Reatores Saturados*, Uberlândia: Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- [12] A. F. L. Nogueira, "Calculation of Power Transformers Equivalent Circuit Parameters Using Numerical Field Solutions," *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, vol. 17, n° 1, 2013.
- [13] A. F. L. Nogueira, "Finite Element Analysis of a Welding Transformer," *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, vol. 18, n° 3, 2014.
- [14] A. F. L. Nogueira, "Obtenção dos Parâmetros Elétricos do Transformador Monofásico Usando a Curva de Histerese," em *XXVI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia*, Alegrete - RS - Brasil, 2014.
- [15] J. A. F. B. Jr., "Proposta e Validação de Modelagem de Reatores a Núcleo Saturado no Simulador ATP," em *9th IEEE/IAS International Conference on Industry (IX INDUSCON)*, São Paulo, 2010.