

## REGULADORES DE TENSÃO A NÚCLEO SATURADO: PARAMETRIZAÇÃO, MODELOS COMPUTACIONAIS E ESTUDOS DE DESEMPENHO

*SATURATED CORE VOLTAGE REGULATORS: PARAMETERIZATION, COMPUTATIONAL MODELS AND PERFORMANCE STUDIES*

**Camilla de Sousa Chaves<sup>1</sup>, José Carlos de Oliveira<sup>2</sup>, Marcelo Lynce Ribeiro Chaves<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia, MG e professora do Instituto Federal do Triângulo Mineiro em Patrocínio, MG. E-mail: kmillachaves@yahoo.com.br.

<sup>2</sup>Doutor pelo Instituto de Ciência e Tecnologia de Manchester, Inglaterra e professor na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, MG. E-mail: jcoliveira@ufu.br.

<sup>3</sup>Doutor pela Universidade de Campinas, SP e professor na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, MG. E-mail: lynce@ufu.br.

### RESUMO

Apesar do reconhecimento do grande número de publicações contemplando estudos de desempenho dos denominados reguladores de tensão a núcleo saturado, o tema, diante dos atrativos oferecidos pelas novas tecnologias de materiais e perspectivas de aplicação, ainda se apresenta com tópicos desafiadores. De fato, investigações sobre os princípios físicos que regem o seu dimensionamento construtivo, a obtenção de parâmetros elétricos e magnéticos representativos, o desenvolvimento de modelos computacionais, viabilização de meios para a avaliação da eficácia nos processos da restauração das tensões dos barramentos, ainda são merecedores de pesquisas, desenvolvimentos e modelagens. Diante deste contexto, este artigo contempla aspectos que norteiam os projetos físicos e parametrização destes dispositivos, estratégias de modelagem e avaliação computacional destes dispositivos na regulação da tensão e outros fenômenos correlacionados. Resultados teóricos são comparados com correspondentes desempenhos experimentais com objetivo de constatar o grau de aderência dos modelos estabelecidos.

**Palavras-Chave:** Reatores a Núcleo Saturado, Projeto e Modelagem, Simulador ATP, Simulador FEMM, Reguladores de Tensão.

### ABSTRACT

Despite recognition from a vast number of publications that contemplate performance studies of so called saturated core voltage regulators, the subject, when weighed against the benefits, such as new material based technologies and application perspectives, still presents various challenging topics. In fact, investigations concerning the physical principles governing its constructive design, the retrieval of representative electric and magnetic parameters, the development of computational models, enabling means for evaluating the effectiveness of the processes for restoring the busbar voltage are still deserving of research, development and modelling. Given this setting, the present paper cogitates aspects that guide the physical design concepts and parameterization of these devices, strategies aimed at the computational modelling and evaluation of these devices performance at regulating voltages and other correlated phenomena. Theoretical results are compared to corresponding experimental performances intent on defining the established models' degree of adhesion.

**Keywords:** Saturated Core Reactors, Design and Modeling, ATP Simulator, FEMM Simulator, Voltage Regulators.

### 1 – INTRODUÇÃO

A regulação da tensão nos barramentos dos sistemas elétricos se apresenta como tema que oferece contínuos desafios para a engenharia elétrica. De fato, fatores como: comprimento das linhas de transmissão, dinamicidade do consumo dos centros de cargas, padrões de desempenho requeridos, exigências dos consumidores a nível da rede básica e distribuição, aspectos econômicos, requisitos de manutenção, dentre outros; determinam a necessidade de aplicar medidas corretivas nos termos previstos pelas legislações (IEEE STANDARD, 2002), (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, 2015).

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 (CHUNG *et al.*, 2007), (VEDAM; SARMA, 2009) ou na compensação indireta (VASCONCELLOS *et al.*, 2009), (FRIEDLANDER, 1966), (BRYANTSEV, 2012). Nesta última categoria estão os equipamentos cujo processo de regulação encontra sustentação no controle da potência reativa, princípio este utilizado pelo regulador focado neste artigo, cujo cerne está no emprego dos clássicos reatores a núcleo saturado (RNS), cujas vantagens e desvantagens são amplamente conhecidas e sintetizadas em (VASCONCELLOS *et al.*, 2009), (BARBOSA JR. *et al.*, 2011a). Este produto, de cunho totalmente eletromagnético e dispensando qualquer meio para medições, tomadas de decisão e controle outro que não sua própria característica intrínseca de operação, uma vez associado em paralelo com um banco de capacitores fixo, compõe o denominado Compensador Estático de Reativos a Núcleo Saturado

(CERNS), produto amplamente difundido entre os anos de 1960 e 1970.

Apesar dos inúmeros atrativos oferecidos por esta estratégia de regulação, em que pese atributos como: 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 se justifica, principalmente, pela evolução e popularização dos reguladores de tensão fundamentados na eletrônica de potência (CHUNG *et al.*, 2007).

Não obstante este reconhecimento histórico, diante dos atrativos oferecidos pela destacada tecnologia, a partir de meados dos anos 90, com o advento de novos materiais magnéticos, a exemplo das ligas amorfas, hoje comercialmente disponíveis e com custos mais atrativos, aliados à busca por alternativas economicamente vantajosas, respeitadas as particularidades da aplicação, estes fatores motivaram novos interesses sobre a compensação da tensão via reguladores saturados. Isto pode ser constatado em esforços relatados em (BARBOSA JR. *et al.*, 2011a), (CARVALHO JR.; FONTE, 2002), (VASCONCELLOS, 2004), (BRYANTSEV, 2012), (MANDACHE; AL-HADDAD, 2006).

O princípio de funcionamento do RNS é bastante peculiar, pois tem por fundamento a curva característica de operação ( $V \cdot I$ ), que está diretamente relacionada com o tipo de material magnético utilizado no núcleo. Vale lembrar que a tensão  $V$  corresponde àquela do barramento junto ao qual o reator encontra-se conectado e  $I$  é a corrente indutiva requerida pela mencionada unidade magnética. Esta última é fortemente dependente no nível de tensão e, por conseguinte, da saturação imposta ao núcleo magnético. 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. Assim, 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 diferentes de zero, porém reduzidos, para a corrente indutiva, quando comparada com seu respectivo valor nominal. Por outro lado, quando da ocorrência de situações operacionais para a rede elétrica sob baixos carregamentos impostos, fato este comum na transmissão e na distribuição, isto pode ocasionar elevações das tensões e, por conseguinte, o dispositivo ora referido passa a experimentar estados de saturação mais elevados. Este efeito é determinante e implicará num maior valor para sua corrente e potência reativa consumida. Tal comportamento se apresenta como o principal fundamento do processo da regulação contínua da tensão viabilizando, assim, seu enquadramento nos padrões almejados (VASCONCELLOS *et al.*, 2009), (BARBOSA JR. *et al.*, 2011b), (VASCONCELLOS, 2004).

Muito embora a simplicidade do princípio físico

sintetizado, vale lembrar que a característica não linear de operação do equipamento introduz indesejáveis níveis de distorções harmônicas de corrente 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) (CARVALHO JR.; FONTE, 2002), se apresentam como estratégias classicamente utilizadas para a minimização destes efeitos.

Diante do contexto da tecnologia ora discutida, este trabalho se apresenta imbuído do propósito de estabelecer diretrizes para estudos computacionais para a realização de análises de desempenho dos reguladores de tensão a núcleo saturado, contribuindo nos seguintes aspectos: estabelecimento de meios para o pré-dimensionamento físico destes produtos; obtenção dos parâmetros elétricos e magnéticos equivalentes; implementação computacional em *softwares* disponíveis no mercado e, por fim, a realização de estudos de desempenho de sistemas de transmissão sob a ação desta estratégia de compensação, com destaque a estrutura física denominada por *twin-tripler*.

Com tais objetivos em foco, inicialmente são apresentadas as bases para o dimensionamento físico dos reatores. Empregando-se princípios tradicionais utilizados para projetos de transformadores (ENGINEERING, 1965), (KULKARNI; KHAPARDE, 2004) são feitas adequações visando o emprego de formulações para o dimensionamento de reatores saturados. Visando uma análise da consistência das formulações apresentadas, estas são aplicadas para o dimensionamento de um reator em escala real existente (BARBOSA JR. *et al.*, 2011a), para o qual todas as suas características físicas construtivas são conhecidas. Isto permitirá a verificação do grau de aderência do método teórico com critérios utilizados pelo fabricante do equipamento.

A segunda vertente do trabalho encontra-se direcionada à questão da modelagem computacional do equipamento. Para tanto, são consideradas duas metodologias de análise, cada qual fundamentada em aplicativos disponibilizados no mercado e de livre acesso. Uma delas se apoia em modelos no domínio do tempo por meio do *software* ATP, recurso este já empregado no passado para os fins aqui postos (BARBOSA JR. *et al.*, 2010), (BARBOSA JR. *et al.*, 2011b). Outra, utilizando a técnica dos elementos finitos, nos termos oferecidos pelo simulador FEMM. Naturalmente, cada *software* possui atributos e aplicações específicos, os quais serão devidamente esclarecidos ao longo do trabalho. Uma vez desenvolvidos e implementados os modelos dos reatores nestes programas, surge a necessidade do suprimento de dados relativos aos seus circuitos equivalentes, assunto este também tratado neste trabalho.

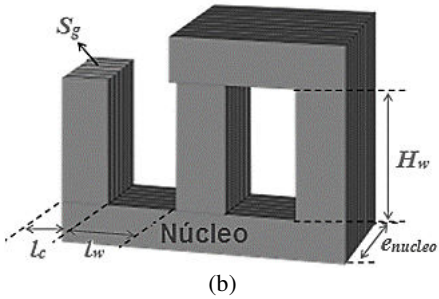
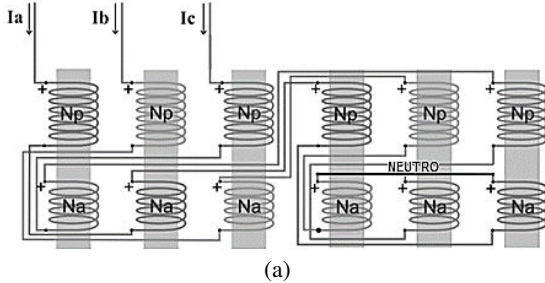
Por fim, com objetivo da validação dos modelos computacionais, estudos de cunho teórico são realizados computacionalmente e seus resultados são prontamente correlacionados com desempenhos correspondentes obtidos em campo por meio do protótipo de reator saturado utilizado nos estudos.

## 2 – 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 a topologia construtiva sintetizada na Figura 1.

Figura 1-a – Arranjo construtivo *twin-tripler*

Figura 1-b – Principais dimensões do núcleo



Constata-se que o reator se apresenta constituído, basicamente, por dois núcleos magnéticos trifásicos idênticos, cada qual formado por três colunas magnéticas, sobre as quais são montados dois enrolamentos concêntricos. Os enrolamentos de cada coluna se apresentam identificados por bobina principal e bobina auxiliar, as quais são, elétrica e magneticamente, interligadas entre si e com as bobinas das colunas vizinhas, como indicado na Figura 1-a.

A grandeza inicial a ser determinada para o dimensionamento físico do reator refere-se à potência reativa ( $Q_L$ ) a ser consumida diante das condições impostas pelo sistema elétrico para a maior tensão provocada pelo alívio de carga (PACHECO, 2008). A metodologia para tal encontra sustentação nos princípios utilizados para o projeto de transformadores, como descrito em (KULKARNI; KHAPARDE, 2004). Estes passos encontram-se sintetizados a seguir.

### 2.1 Núcleos magnéticos

A estrutura física do núcleo magnético deverá possuir uma seção magnética ( $S_{mag}$ ) e sua correspondente seção geométrica ( $S_g$ ) dadas por:

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

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

Em que:

$k_1$  = constante de projeto (0,4 ou 0,5);

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

$f$  = frequência;

$f_{emp}$  = fator de empilhamento (percentual de entreferro e material magnético do núcleo).

Em (1), a unidade de  $Q_L$  deverá ser em kVA e de  $B_{op}$  em Tesla para que a seção magnética seja em  $cm^2$ .

A largura ( $l_c$ ) e espessura ( $e_{nucleo}$ ) da coluna são determinadas por meio de:

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

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

Em que:

$D_{nucleo}$  = 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;

### 2.2 Bobinas

A primeira grandeza a ser definida refere-se a corrente nominal do reator. Assim:

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

Em que:

$V_{barra}$  = tensão de linha do barramento sob regulação.

A partir da corrente, determina-se a seção transversal mínima do condutor a ser utilizado.

Por meio de valores tabelados da densidade de corrente ( $J$ ), em função da potência de transformadores, a seção transversal do fio deverá ser, no mínimo:

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

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 (BARBOSA JR. *et al.*, 2011a), (PACHECO, 2008) e  $B_{ov}$  uma especificação definida pelo projetista (valores superiores aos da indução típica de transformadores, visto a filosofia operacional do equipamento), tem-se que:

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

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 são dadas por:

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

$$\frac{l_c}{2 \cdot k_2} > 2 \cdot (S_{bobina} + d_{isolante}) \cdot N_{camadas} \quad (10)$$

$$H_{cabeçab} = 1,3 \cdot V_{barra} \quad (11)$$

$$H_w \geq H_{bobina(p)} \cdot 2 \cdot H_{cabeçab} \quad (12)$$

Em que:

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

$H_{bobina(p)}$  = altura da bobina principal;

$H_{cabeçab}$  = distância entre o núcleo e o enrolamento nas extremidades (cabeça de bobina).

A equação (11) permite uma estimativa da distância entre o enrolamento e o núcleo, na região da cabeça de bobina. Com  $V_{barra}$  em kV, o resultado final será em milímetros. Ressalta-se que as inequações apontadas em (10) e (12) 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:

$$\frac{S_{cu}}{S_w} > f_{cu} \quad (13)$$

Em que:

$f_{cu}$  = fator de enchimento (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 do calor produzido no reator, o que não deve ser ignorado neste procedimento.

O comprimento dos enrolamentos pode ser estimado a partir da equação (14), um parâmetro de projeto importante para o cálculo posterior da resistência elétrica dos condutores.

$$c_{bobina} = k_4 \cdot \pi \cdot N_{bobina} \cdot (k_2 \cdot \sqrt{S_g}) \quad (14)$$

Em que:

$c_{bobina}$  – comprimento do enrolamento;

$k_4$  – constante de projeto (1,05 para o enrolamento mais interno e 1,10 para o enrolamento mais externo).

Quanto ao peso dos dois núcleos magnéticos ( $M_{nucleo}$ ), este é determinado por meio da relação entre o volume e a densidade do material deste componente, como a seguir:

$$l_{nucleo} = 3 \cdot l_c + 2 \cdot l_w \quad (15)$$

$$h_{nucleo} = 2 \cdot l_c + H_w \quad (16)$$

$$M_{nucleo} = 2 \cdot d_{nucleo} \cdot [l_{nucleo} \cdot h_{nucleo} \cdot e_{nucleo} - 2 \cdot (l_w \cdot H_w \cdot e_{nucleo})] \cdot f_{emp} \quad (17)$$

Em que:

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

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

$h_{nucleo}$  = altura total do núcleo.

### 2.3 Exemplo de aplicação e validação da metodologia

Barbosa Jr. *et al.* (2011a) e Vasconcellos (2004) contemplam detalhes do projeto, construção e testes de desempenho de um protótipo de reator saturado em escala comercial, de 34,5 kV e 3 MVar, o conhecimento das grandezas física de projeto e desempenho experimental constituíram os fundamentos para os estudos comparativos e de validação da metodologia de cálculo e desempenho em campo utilizadas neste trabalho.

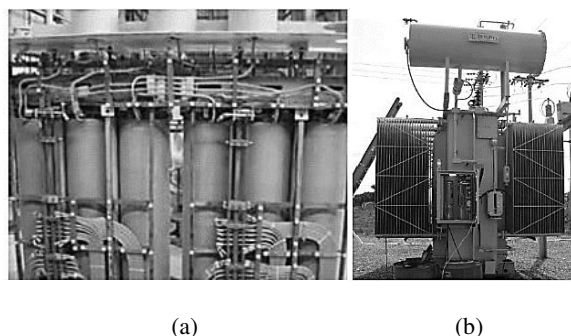
Utilizando-se das formulações apresentadas, a Tabela 1 permite que se faça uma pronta correlação entre as grandezas obtidas pela proposta de pré-projeto e aquelas efetivamente utilizadas para a construção do protótipo. Os resultados evidenciam, para a maioria das grandezas, uma boa aderência entre a metodologia descrita e o reator construído. O maior desvio apresentado na Tabela 1 está na diferença entre as seções transversais dos enrolamentos que perfazem as bobinas auxiliares. Esta divergência, todavia, não deveria existir, visto que a corrente que se estabelece tanto na bobina principal como na auxiliar são as mesmas, portanto, a opção feita pelo fabricante sugere procedimentos aplicáveis a transformadores com enrolamentos primário e secundário com distintos números de espiras ou reguladores de tensão com tapes e ligações convencionais.

Tabela 1 – 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                 |
|                   |                    |                       | 29,0                    | +0,93                 |
| $S_{bobina}$      | [mm <sup>2</sup> ] | 29,27                 | (principal)<br>2 · 24,9 | (principal)<br>-41,22 |
|                   |                    |                       | (auxiliar)              | (auxiliar)            |
|                   |                    | 308,36                | 333,40                  | -7,51                 |
| $c_{bobina}$      | [m]                | (Principal)<br>103,93 | (Principal)<br>110      | (Principal)<br>-5,51  |
|                   |                    | (Auxiliar)            | (Auxiliar)              | (Auxiliar)            |
| $N_{bobina}$      | Principal          | 241                   | 241                     | 0                     |
|                   | Auxiliar           | 88                    | 88                      | 0                     |
| $l_w$             | [mm]               | 157                   | 160                     | -1,9                  |
| $H_w$             | [mm]               | ≥1491                 | 1982                    | -                     |

O protótipo de reator saturado em pauta referido encontra-se ilustrado na Figura 2.

Figura 2-a – Protótipo do reator *twin-tripler* em escala real: estágio construtivo (núcleo e enrolamentos). Figura 2-b – Produto final



### 3 – ESTRATÉGIAS PARA A MODELAGEM COMPUTACIONAL DO REATOR *TWIN-TRIPLER*

Como mencionado, para fins deste trabalho foram empregados dois recursos computacionais para a implementação dos modelos dos reatores saturados. Um baseado em técnicas de modelagem no domínio do tempo, e outro, fundamentado nos recursos associados à modelagem por elementos finitos.

No que tange a representação do reator *twin-tripler* na plataforma ATP destacam-se que trabalhos iniciais (BARBOSA JR. *et al.*, 2010), (BARBOSA JR. *et al.*, 2011b) ofereceram as primeiras bases para os fins postos. Dentre as grandezas necessárias a este modelo computacional, destacam-se: as resistências e indutâncias de dispersão dos enrolamentos; a relação entre o número de espiras do enrolamento principal e auxiliar; e a caracterização do material magnético por meio da relação entre fluxo concatenado  $\lambda$  e a corrente de pico  $I_{pk}$  do reator. Um aspecto meritório de destaque é que, em sua concepção original, os recursos disponibilizados não contemplavam propriedades como: acoplamento magnético entre as fases de cada núcleo, laço de histerese do material magnético, perdas e informações sobre os fluxos magnéticos manifestados. Estas características foram objeto de trabalhos complementares realizados pelos autores deste artigo, fato este que conduziu a uma nova versão de modelo, cujas particularidades serão exploradas posteriormente.

Outra estratégia para a representação do reator se apoia no emprego do programa FEMM (MEEKER, 2010). Este, como se sabe, destina-se a modelar a estrutura física que compõe o equipamento, utilizando para tanto, suas dimensões geométricas, número de espiras e materiais empregados. Utilizando este recurso, foi desenvolvido e implementado um modelo para a representação do arranjo *twin-tripler* no mencionado programa, a qual se fundamenta em grandezas físicas como: geometria do reator (corte transversal), características eletromagnéticas dos materiais empregados e, em consonância com os princípios que regem o funcionamento do *software*, os valores instantâneos das correntes que se estabelecem nos condutores. A partir destas informações o programa permite determinar grandezas eletromagnéticas relevantes sobre as condições magnéticas impostas aos seus componentes.

Na sequência procede-se a descrição das melhorias introduzidas e detalhes sobre a utilização destes aplicativos para estudos avaliativos do reator saturado explorado neste trabalho.

#### 3.1 Representação no software FEMM

Na Figura 3 é ilustrado o reator *twin-tripler* no FEMM representado pelo seu corte transversal. Muito embora não sejam explicitadas as dimensões físicas construtivas do reator, estas se encontram inseridas no modelo em consonância com informações anteriormente determinadas.

Quanto ao material magnético, este foi parametrizado na forma de um aço silício comercial, como reportado em Grain Oriented Electrical Steels (2009). Para tanto, utilizou-se por base informações advindas de medições do protótipo para a tensão de 26 kV. Para este nível de tensão, foram extraídos os valores da indução B e intensidade de campo H. Outros pontos importantes para a caracterização da relação B·H podem ser vistos na Tabela 2, também oriundos dos ensaios em campo. Assim, os pontos que perfazem a curva B·H seguem a mesma relação obtida nos testes experimentais e refletem com maior consistência as características magnéticas do núcleo. Outras informações foram disponibilizadas pela biblioteca de recursos do programa. Adicionalmente, na Tabela 2 também são apresentadas as perdas ativas medidas para cada situação operativa imposta.

Figura 3 – Reator *twin-tripler* no programa FEMM

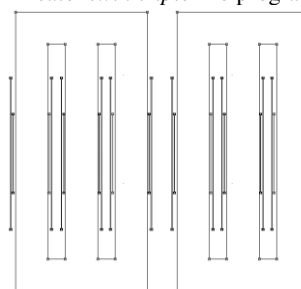


Tabela 2 – Grandezas obtidas por meio de medições efetuadas no protótipo e curva BxH implementada no programa FEMM

| Tensão de linha [kV] | Corrente de pico [A] | Indução B [T] | Intensidade de campo H [A/m] | Perdas ativas [kW] |
|----------------------|----------------------|---------------|------------------------------|--------------------|
| 24                   | 0,69                 | 1,41          | 38,32                        | 9,22               |
| <b>26</b>            | <b>1,10</b>          | <b>1,53</b>   | <b>61,25</b>                 | <b>11,42</b>       |
| 28                   | 2,15                 | 1,65          | 118,87                       | 14,73              |
| 30                   | 6,32                 | 1,77          | 349,58                       | 20,27              |
| 34,5                 | 27,15                | 2,04          | 1.235,39                     | 82,1               |
| <b>36,6</b>          | <b>70,85</b>         | <b>2,15</b>   | <b>3.918,08</b>              | <b>199,6</b>       |

Uma vez implementado o modelo do dispositivo, em consonância com procedimentos tradicionais, são injetados valores específicos de correntes e, à luz da metodologia de cálculo utilizada pelo programa, informações de carácter magnético são prontamente obtidas nas mais diversas partes físicas da estrutura construtiva dos núcleos. Contando com estes dados, diversas outras grandezas podem ser obtidas, a exemplo dos parâmetros elétricos (indutância de dispersão e resistência dos enrolamentos), como se faz necessário para outros aplicativos

computacionais. Para tanto, os cálculos são embasados nos procedimentos relatados em Nogueira (2013) e Nogueira (2014), resultando nas seguintes expressões:

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

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

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

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

Em que:

$R_{bobina}$  = resistência do enrolamento;

$\rho_c$  = resistividade do cobre;

$L_x$  = 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.

As equações acima evidenciam que os parâmetros requeridos se apresentam diretamente dependentes das correntes, grandezas magnéticas e propriedades intrínsecas ao material empregado para o núcleo e das bobinas que perfazem o dispositivo.

Como ressaltado ao longo das discussões, algumas destas variáveis são definidas na fase de projeto físico do reator, e outras, são advindas do programa aqui referido.

### 3.2 Representação no software ATP

Diferentemente da estrutura do FEMM, o software ATP se baseia em modelos elétricos para os mais diversos componentes constituintes do aplicativo, e ainda, permite a elaboração e implementação de outros por meio de seus recursos de programação. Uma vez feita a inserção do complexo elétrico sob análise e definidas as condições operacionais, impostas ou calculadas, o aplicativo fornece as mais distintas grandezas instantâneas que expressam o desempenho do sistema ou do equipamento sob análise. Nestes termos, a partir das formas de onda das tensões e correntes, por fase, torna-se possível obter os valores das potências, das perdas, as distorções harmônicas, dentre outras grandezas.

Ao buscar meios para a inserção das perdas no ferro do reator, este trabalho baseia-se em que os conhecidos efeitos Histerese e Foucault podem ser contemplados a partir dos fundamentos dados em Batistela *et al.* (2002). Em consonância com esta referência:

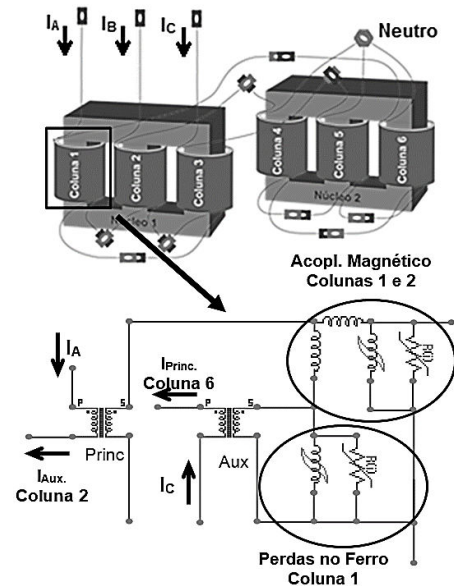
$$P_{Histerese} = \frac{1}{d_{nucleo}} \cdot \int_{B_{l0}}^{B_{lT}} H(t) \cdot dB(t) \quad [J/kg] \quad (22)$$

$$P_{Foucault} = \frac{e^2}{12 \cdot f \cdot \rho_n \cdot d_{nucleo}} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt \quad [J/kg] \quad (23)$$

Em que  $e$  expressa a espessura das lâminas do núcleo,

$\rho_n$  a resistividade do material magnético (aço silício), grandezas magnéticas e período sob análise. As equações evidenciam a complexidade dos cálculos. Por isso, algumas aproximações são frequentemente empregadas visando substituir os cálculos por formulações mais simplificadas. Dentro deste escopo, para fins deste trabalho, as perdas por Foucault são representadas por meio de uma composição de resistências não lineares e indutores variáveis (SARAIVA; CHAVES; BRONZEADO, 2005), (FANDI, 2003), (THEOCHARIS, MILIAS-ARGITIS, ZACHARIAS, 2009). Sintetizando, na Figura 4 é indicado tal procedimento, e ainda, inclui a estratégia para a inserção dos acoplamentos magnéticos desconsiderados na representação originalmente desenvolvida.

Figura 4 – Representação do reator twin-tripler no programa ATP



## 4 – ESTUDOS DE DESEMPENHO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Os estudos operativos considerados para fins deste trabalho foram selecionados para duas condições de funcionamento do reator, cada qual com suas particularidades quanto ao nível de saturação imposto, que foram:

- Caso 1 – Operação com 34,5 kV;
- Caso 2 – Operação com 36,6 kV.

Para ambas as situações são obtidos resultados computacionais que são prontamente confrontados com as correspondentes grandezas advindas das medições em campo utilizando o protótipo de reator aqui explorado. As variáveis escolhidas para tal propósito, para cada nível de tensão, são: as tensões de linha do barramento de conexão do reator e respectivas correntes, as potências reativas e correspondentes perdas totais, as distorções harmônicas e as densidades de fluxo magnético.

### 4.1 Resultados do FEMM

Ao lembrar que o FEMM contempla estudos associados com valores específicos de corrente, os cálculos das induções magnéticas estão em consonância com este princípio. Portanto, sua estrutura encontra-se totalmente alicerçada pela lei de Ampère para valores específicos de corrente (ENGINEERING, 1965).

Dentro destes princípios, nas Figuras 5 e 6 são ilustradas as distribuições das densidades de fluxo magnético nos núcleos e as linhas de fluxo para os dois casos estudados. O ponto selecionado para os estudos corresponde às condições de máximo fluxo para cada situação, conforme dado pelo programa ATP.

Figura 5 – Densidade de fluxo magnético e orientação das linhas de fluxo no reator *twin-tripler* – condição de fluxo máximo nas colunas 2 e 5 – tensão de 34,5 kV

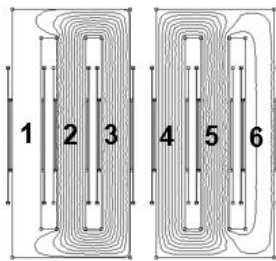
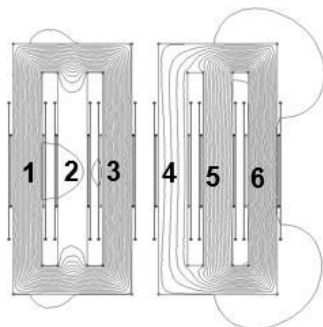


Figura 6 – Densidade de fluxo magnético e orientação das linhas de fluxo no reator *twin-tripler* – condição de fluxo máximo nas colunas 3 e 6 – tensão de 36,6 kV



Na Tabela 3 são resumidos os valores correspondentes aos fluxos concatenados, por coluna, obtidos do FEMM. Ressalta-se que as condições analisadas são equivalentes à situação operacional com as correntes de pico esperadas para os dois pontos operacionais contemplados nos estudos. Para as demais fases são utilizadas as correntes correspondentes e atrelada com o desempenho trifásico instantâneo. As grandezas numéricas revelam os resultados obtidos pelo programa.

Tabela 3 – Resultados do FEMM para tensões de 34,5 kV e 36,6 kV

| Grandeza  | Núcleo 1 |  | 34,5 kV | 36,6 kV |
|---|----------|--|---------|---------|
|   | Coluna   |  |         |         |
| Valor de pico do fluxo concatenado [weber.esp.] | 1        |  | 29,84   | 33,25   |
|   | 2        |  | 29,47   | 30,30   |
|   | 3        |  | 29,68   | 30,96   |
|   | Núcleo 2 |  |         |         |

| Valor de pico do fluxo concatenado [weber.esp.] | 4 | 30,42 | 30,47 |
|---|---|-------|-------|
|   | 5 | 30,29 | 31,81 |
|   | 6 | 30,36 | 32,66 |

Para o reator ora considerado, embasados das formulações explicitadas e dados fornecidos pelo programa FEMM, chega-se aos resultados indicados na Tabela 4. Estes são os parâmetros elétricos necessários à representação do dispositivo na plataforma ATP.

Tabela 4 – Indutâncias de dispersão e resistências dos enrolamentos do reator saturado

| Enrolamento | Indutância de dispersão [mH] | Resistência[Ω] |
|-------------|------------------------------|----------------|
| Principal   | 23,62                        | 0,201          |
| Auxiliar    | 3,181                        | 0,0777         |

#### 4.2 Resultados do ATP

Nas Figuras 7 e 8 são mostradas as formas de onda das correntes trifásicas para as situações correspondentes a aplicação das duas tensões (34,5 e 36,6 kV). Os resultados experimentais e computacionais são indicados lado a lado.

Figura 7-a – Formas de onda das correntes do RNS, para a tensão de 34,5 kV: dados experimentais. Figura 7-b – Resultados computacionais

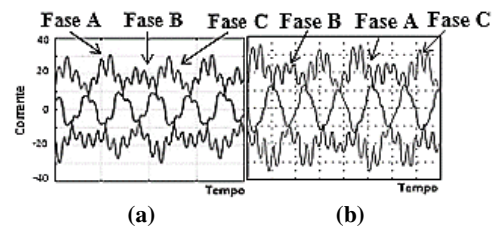
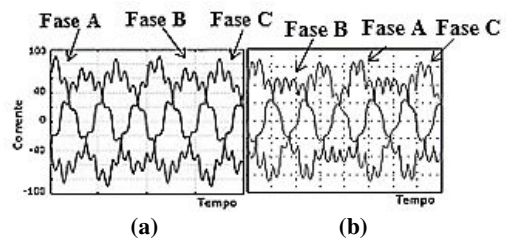


Figura 8-a – Formas de onda das correntes do RNS para a tensão de 36,6 kV: dados experimentais. Figura 8-b – Dados computacionais



Na Tabela 5 são sintetizadas as principais grandezas associadas com os resultados fornecidos e evidencia a boa correlação do modelo computacional com os desempenhos de campo. Ressalta-se que as grandezas trifásicas foram representadas pela média aritmética das três fases.

Tabela 5 – Síntese dos resultados das simulações e dos ensaios em campo para tensão de 34,5 kV e 36,6 kV

| Grandeza             | Tensão de 34,5 kV |       | Tensão de 36,6 kV |       |
|----------------------|-------------------|-------|-------------------|-------|
|                      | Medição           | ATP   | Medição           | ATP   |
| Tensão de linha [kV] | 34,5              | 34,5  | 36,6              | 36,6  |
| Corrente [A]         | 15,8              | 16,2  | 50,7              | 47,8  |
| Potência [kVA]       | 944               | 968   | 3.179             | 2.997 |
| Perdas totais [kW]   | 82,1              | 78,04 | 199,6             | 201,1 |
| THD <sub>i</sub> [%] | 21,18             | 22,6  | 16,7              | 17,9  |

Em se tratando das correspondentes grandezas magnéticas, admitindo a boa conformidade entre o modelo

computacional e o protótipo construído, foi constatado também que os resultados finais estão em sintonia com a representação elaborada no programa FEMM. Na Tabela 6 são retratadas as grandezas obtidas no ATP e os respectivos desvios em relação ao programa FEMM, este último tomado como referência para as análises comparativas.

Tabela 6 – Comparação entre as grandezas magnéticas obtidas pelos programas ATP e FEMM

| Núcleo 1     |        |         |            |         |            |
|--------------|--------|---------|------------|---------|------------|
| Grandeza     | Coluna | 34,5 kV |            | 36,6 kV |            |
|              |        | ATP     | Desvio (%) | ATP     | Desvio (%) |
| Máx. fluxo   | 1      | 28,50   | 4,491      | 30,36   | 8,692      |
| concatenado  | 2      | 28,41   | 3,597      | 29,82   | 1,584      |
| [weber.esp.] | 3      | 28,46   | 4,111      | 29,77   | 3,843      |
| Núcleo 2     |        |         |            |         |            |
| Fluxo        | 4      | 28,95   | 4,832      | 29,3    | 3,840      |
| concatenado  | 5      | 29,28   | 3,334      | 30,44   | 4,307      |
| [weber.esp.] | 6      | 29,39   | 3,195      | 31,47   | 3,644      |

Como indicado, quando da aplicação de 34,5 kV, as perdas ativas totais foram de 82,1 kW (deste valor 0,53 kW encontra-se vinculado com o efeito Joule e 81,6 kW ocorrem no ferro). De modo similar, para a operação com 36,6 kV, as grandezas correspondentes foram de 199,6 kW, 3,4 kW e 196,2 kW. Esses valores revelam que as perdas no ferro se mostram expressivamente influenciadas pelo nível de saturação imposto.

## CONCLUSÕES

O trabalho se revestiu do objetivo de estabelecer as diretrizes para o pré-dimensionamento físico e o estabelecimento de meios para a modelagem computacional dos reatores a núcleo saturado tipo *twin-tripler*. Como ressaltado no texto, o equipamento, no que tange ao seu princípio operacional e aplicativo, se apresenta consonante com experiências bem sucedidas no passado. Todavia, perspectivas específicas para a regulação da tensão têm suscitado interesses pela tecnologia ora referida. Isto, somado à grande escassez bibliográfica e fundamentos para projetos e estudos de desempenho dos reatores, motivou os desenvolvimentos aqui contemplados.

Com base em procedimentos clássicos aplicáveis a transformadores, foi então apresentada uma sistemática para a definição dos parâmetros construtivos destes equipamentos. Utilizando como referência as informações atreladas com um protótipo construído em escala comercial, o processo foi avaliado e demonstrou suficiente

coerência aos propósitos estabelecidos.

Num outro aspecto complementar, o artigo voltou suas atenções a duas estratégias para a modelagem computacional dos reatores saturados, visando, sobretudo, a avaliação de desempenho do dispositivo quanto a sua eficácia no processo da regulação da tensão e condições operativas internas do reator. Neste particular, duas vertentes foram selecionadas e aplicadas: Uma voltada para a representação utilizando técnicas de elementos finitos (FEMM); e outra baseada em modelagem no domínio do tempo (ATP). Quanto as particularidades e atributos destas metodologias, o assunto foi devidamente explorado no texto.

Ressalta-se que, quanto ao FEMM, além do fornecimento de dados de carácter eletromagnético do funcionamento do regulador, este também se mostrou de grande utilidade para fins da obtenção de parâmetros equivalentes necessários ao ATP. Quanto ao ATP, melhorias consideráveis foram implementadas numa versão original, a exemplo da inserção de acoplamentos magnéticos e cálculo das perdas ativas.

Novamente, baseado no equipamento existente e cujos resultados experimentais de desempenho se encontravam disponíveis, foram realizados estudos para duas condições particulares de operação. Uma sob tensão nominal, que impõe ao regulador um menor nível de saturação, e outra, que implica numa condição de saturação plena. Os resultados obtidos e correlacionados evidenciaram, com clareza, uma boa conformidade entre os desempenhos computacionais e os experimentais, validando, assim, as estratégias computacionais.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST – Módulo 8**. Disponível em: <[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)>. Acesso em: 20 maio 2015.
- BARBOSA JR., J. A. F.; OLIVEIRA, J. C.; SANTILIO, F. P.; GONDIM, I. N.; VASCONCELLOS, A. B.; PACHECO, J. M. Proposta e validação de modelagem de reatores a núcleo saturado no simulador ATP. **9<sup>th</sup> IEEE/IAS International Conference on Industry – IX INDUSCON**. São Paulo, 2010.
- BARBOSA JR., J. A. F.; OLIVEIRA, J. C.; GONDIM, I. N.; SILVA, T. V.; SANTILIO, F. P.; VASCONCELLOS, A.; PACHECO, J. Performance analysis and computational model validation of a real scale saturated core reactor. **11<sup>th</sup> International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation – EPQU**. Lisboa, Portugal, 2011a. <http://dx.doi.org/10.1109/EPQU.2011.6128952>.
- BARBOSA JR., J. A. F.; OLIVEIRA, J. C.; GONDIM, I. N.; SANTILIO, F. P.; SILVA, T. V.; VASCONCELLOS, A.; PACHECO, J. Estabelecimento e validação de uma sistemática para a obtenção das curvas de magnetização de reatores saturados para simulação no ATP. **9<sup>th</sup> Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (IX CBQEE)**, Cuiabá, MT, 2011b.



- BATISTELA, N. J.; CARLSON, R.; SADOWSKI, N.; LEITE, J. V. Caracterização magnética de lâminas de aço silício e avaliação das perdas no ferro sob vários regimes de indução. **Revista Controle & Automação**, p. 156-164. 2002.
- BRYANTSEV, A. M. **Magnetically controlled electrical reactors**. Collection of articles. 2ª edição estendida, Moscou, Rússia: Znack, 2012.
- CARVALHO JR., M. A., FONTE, L. A. M. Increasing the capacity of long ehv transmission lines by saturated reactors. **14<sup>th</sup> Power Systems Computation Conference**. Sevilla, Espanha, 2002.
- CHUNG, Y. H.; KIM, H. J.; KWON, G. H.; PARK, T. B.; KIM, S. H.; KIM, K. S.; CHOE, J. W. Neural network controlled voltage disturbance detector and output voltage regulator for dynamic voltage restorer. **European Conference on Power Electronics and Applications**. Aalborg, Dinamarca, 2007.  
<http://dx.doi.org/10.1109/epe.2007.4417587>.
- ENGINEERING, M. D. **Magnetic circuits and transformers: A first course of power and communication engineers**. Cambridge, Massachusetts, EUA: M.I.T. Press, 1965.
- FANDI, J. C. **Modelagem de transformadores de três colunas para estudos de corrente de energização**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2003.
- FRIEDLANDER, E. Static network stabilization; recent progress in reactive power control. **GEC Journal**, p. 58-65, 1966.
- GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEELS. **Oriented M-3 Carlite, Oriented M-4 Carlite, Oriented M-5 Carlite, Oriented M-6 Carlite**. Holanda: Preliminary Product Data Bulletin, 2009. Disponível em: [http://www.aksteel.com/pdf/markets\\_products/electrical/AK%20CARLITE%20Lite%20042413.pdf](http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/electrical/AK%20CARLITE%20Lite%20042413.pdf). Acesso em: 20 maio 2015.
- IEEE STANDARD. **IEC 60038**, ed. 6.2, 2002. Disponível em: [http://www.teias.gov.tr/IEC/iec60038%7Bed6.2%7Den\\_d.pdf](http://www.teias.gov.tr/IEC/iec60038%7Bed6.2%7Den_d.pdf). Acesso em: 20 maio 2015.
- KULKARNI, S. V.; KHAPARDE, S. A. **Transformer engineering – design and practice**. Nova Iorque, EUA: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- MANDACHE, L.; AL-HADDAD, K. High precision modeling of saturable transformers used as voltage regulators. **IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)**, 9-13 julho, p. 2695-2699, 2006. <http://dx.doi.org/10.1109/isie.2006.296038>.
- MEEKER, D. **Finite element method magnetics – version 4.2 – user's manual**, 2010. Disponível em: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>. Acesso em: 20 maio 2015.
- NOGUEIRA, A. F. Calculation of power transformers equivalent circuit parameters using numerical field solutions. **International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences**, 2013.
- NOGUEIRA, A. F. Obtenção dos parâmetros elétricos do transformador monofásico usando a curva de histerese. **XXVI Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia**. Alegrete, RS, Brasil, 2014.
- PACHECO, J. M. **Determinação dos parâmetros de compensadores estáticos de reativos para o projeto otimizado de reatores saturados**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2008.
- SARAIVA, E.; CHAVES, M. L. R.; BRONZEADO, H. S. Proposta de metodologia para implementação do ciclo de histerese no modelo de transformadores trifásicos no programa ATP. **XVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XVIII SNPTEE**. Curitiba, PR, Brasil, 2005.
- THEOCHARIS, A. D.; MILIAS-ARGITIS, J.; ZACHARIAS, T. Three-phase transformer model including magnetic hysteresis and Eddy currents effects. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 3, p. 1284-1294, 2009.  
<http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2022671>.
- VASCONCELLOS, A. B. **Modelagem, projeto e construção de compensadores estáticos tipo reator a núcleo saturado para melhoria da qualidade da energia: análise computacional e validação experimental**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2004.
- VASCONCELLOS, A. B.; SANTILIO, F. P.; KAWAPHARA, M. K.; PACHECO, J. M.; APOLÔNIO, R. Análise técnica comparativa sobre o emprego de reatores saturados e lineares para a regulação da tensão em sistemas de transmissão radiais. **VIII Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica**. Blumenau, SC, Brasil, 2009.
- VEDAM, R. S.; SARMA, M. S. **Power quality – VAR compensation in power systems**. USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Estados Unidos, 2009.