

Análise de Desempenho da Melhoria do Estatismo de Reguladores de Tensão à Base de Reatores Saturados via Capacitores Série

1

Camilla de Sousa Chaves
Instituto Federal do Triângulo Mineiro - IFTM
camillachaves@iftm.edu.br

José Carlos de Oliveira
Marcelo Lynce Ribeiro Chaves
Raquel Cristina Filiagi Gregory
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
jcoliveira@ufu.br
lynce@ufu.br
raquel.filiagi@gmail.com

Resumo — Este artigo contempla uma metodologia para o aprimoramento do estatismo da curva de magnetização do material dos núcleos de Reatores a Núcleo Saturados (RNS), o qual é componente integrante dos Compensadores Estáticos a Núcleo Saturado (CERNS). Tais reguladores se apresentam, para situações específicas, como alternativas para o enquadramento dos níveis de tensão de um dado sistema, visto o domínio desta tecnologia. Considerando o estatismo intrínseco ao material magnético, é analisado o emprego de capacitores em série com o reator, de forma a oferecer expressivas melhorias nas características de regulação originalmente oferecidas pelo RNS. Diante disso, este artigo descreve os fundamentos teóricos, estabelece modelos computacionais e realiza estudos computacionais de desempenho na plataforma ATP, tomando por base o arranjo *Twin-Tripler*.

Palavras-chave — Reator a Núcleo Saturado, Regulação de Tensão, Qualidade da Energia Elétrica, Estatismo, Modelagem.

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, da compensação indireta [2], [3]. Nesta última categoria estão os dispositivos baseados no controle do fluxo de potência reativa. Este é o caso dos clássicos reguladores à base dos Reatores a Núcleo Saturado (RNS), cujas vantagens e desvantagens já são amplamente conhecidas [2], [4]. Este dispositivo, de cunho totalmente eletromagnético e dispensando qualquer meio para medições

ou controles adicionais além da sua própria característica de operação, quando associado paralelamente a um banco de capacitores fixo, forma o denominado Compensador Estático de Reativos a Núcleo Saturado (CERNS), que foi amplamente difundido há cerca de meia década.

O princípio de funcionamento do RNS é bastante peculiar, pois tem por fundamento a curva característica de operação tensão aplicada (V) versus corrente de suprimento (I), a qual é diretamente relacionada com o tipo de material magnético utilizado no núcleo. 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. 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. 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. 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 [3], [4].

Apesar dos atrativos oferecidos pelos RNS, podendo-se destacar sua grande robustez, boa eficiência na regulação de tensão, rapidez de resposta, baixos custos de aquisição e manutenção, esta tecnologia tornou-se praticamente inerte a partir de meados da década de 70. Isso se justifica pela evolução e popularização dos reguladores de tensão fundamentados na eletrônica de potência [5], além do limitado estatismo devido à característica de magnetização do material magnético convencionalmente utilizado.

Neste cenário, este trabalho possui o objetivo de analisar uma metodologia para a melhoria do estatismo dos RNS, a fim de promover uma melhor performance no processo de regulação de tensão. O método consiste na utilização de

¹ Agradecemos à CAPES e FAPEMIG pelo auxílio financeiro concedidos por meio da bolsa de doutorado e o apoio à participação em eventos científicos.

capacitores em série com o reator, de modo a acentuar a saturação do núcleo e proporcionar um aumento da potência reativa do equipamento para pequenos incrementos de tensão. A pesquisa está embasada em modelos computacionais validados em trabalhos anteriores [4], [6] os quais adotam o arranjo *Twin-Tripler* para o reator devido aos atrativos que esta configuração oferece frente às demais existentes [3]. O programa ATP é utilizado para a realização dos estudos de caso, o qual descreve, para um sistema hipotético, o desempenho do complexo elétrico, sem e com a presença do discutido regulador, e ainda, a eficácia do dispositivo quando da inserção de um capacitor série junto ao arranjo físico do mesmo. Ao final, são tecidas conclusões diante dos resultados obtidos para as formas de onda das tensões e correntes analisadas, bem como as perdas totais apresentadas pelo equipamento e distorções harmônicas de tensão.

II. COMPENSADORES ESTÁTICOS A NÚCLEO SATURADO: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A estrutura básica de um CERNS pode ser visualizada na Fig.1. Dado o sistema elétrico representado pela fonte supridora de energia, impedância de curto-circuito (Z_{cc}) e transformador de tensão (T_1), observa-se que o CERNS compreende uma composição física definida por um RNS e dois bancos de capacitores, um em paralelo (C_p) e outro em série (C_s) com o reator. Diante da estrutura estabelecida, o dispositivo proporciona a injeção ou absorção de potência reativa do sistema, em consonância com as condições impostas pela tensão do barramento (V) ao qual o equipamento encontra-se conectado.

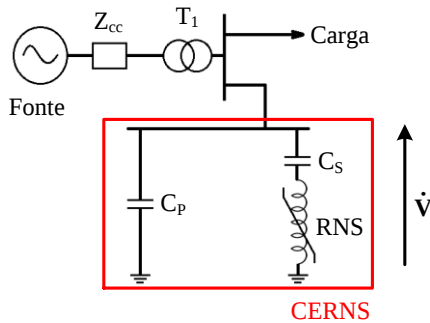


Fig. 1. Estrutura física de um Compensador Estático a Núcleo Saturado – CERNS.

Na Fig. 2 estão ilustradas com maiores detalhes as curvas características ($V \times I$) de operação dos componentes integrantes do CERNS, esclarecendo o princípio de funcionamento do regulador. As figuras são autoexplicativas no que tange as correlações entre as tensões e correntes, motivo pelo qual o assunto não é aqui explorado em maiores detalhes.

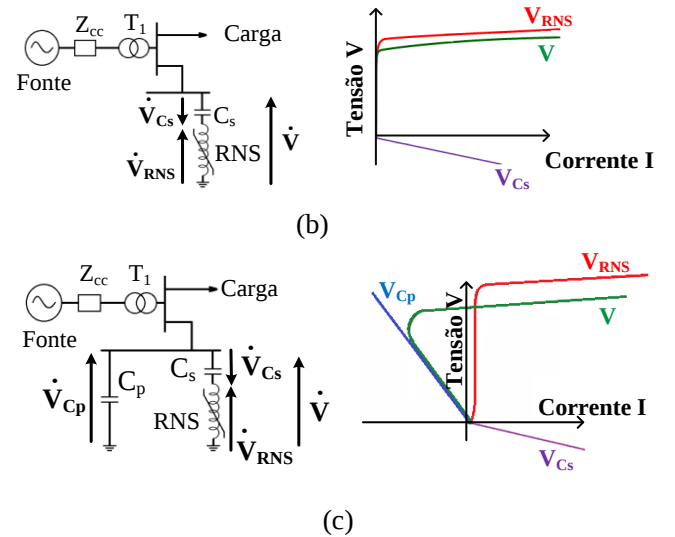
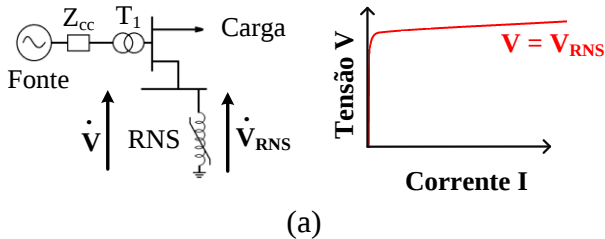


Fig. 2. Curvas características de operação dos componentes integrantes do CERNS: (a) RNS; (b) RNS e capacitor série; (c) RNS, capacitor série e capacitor paralelo.

À esquerda do eixo da ordenada, pode-se verificar que o equipamento produz potência reativa de caráter capacitivo ao sistema, enquanto que à direita o RNS domina o processo, absorvendo potência reativa. Em se tratando deste último, seu modo de operação é regido pela não-linearidade da curva (indução $B \times$ intensidade de campo magnético H) do material magnético empregado na construção de seu núcleo.

Outra importante característica que pode ser ressaltada e advinda da Fig. 2 (b) é a presença do capacitor conectado em série com o reator, destacando-se a finalidade deste componente para a correção do estatismo ou inclinação da região de saturação da curva e operação do compensador [3]. À medida que a tensão $\hat{V}$ tende a aumentar de valor, há um crescimento na saturação do RNS, ocasionando um consequente aumento da corrente drenada pelo reator. A impedância do capacitor C_s proporciona uma queda de tensão $\hat{V}_{C_s}$ contrária à diferença de potencial $\hat{V}_{RNS}$, visto que a corrente que percorre por este componente, sendo igual a corrente do RNS, possui característica indutiva. Isso permite com que o capacitor C_s contribua para uma limitação ainda maior da tensão $\hat{V}$, pois tendo em vista a acentuação da saturação do RNS, a tensão $\hat{V}$ será inferior à tensão $\hat{V}_{RNS}$.

Numa situação inversa, ou seja, quando a tensão $\hat{V}$ decresce, em consonância com eventuais aumentos dos carregamentos impostos ao sistema elétrico, a saturação do RNS diminui e a corrente consumida por este elemento decai drasticamente. A tensão $\hat{V}_{C_p}$ auxilia na sustentação do valor de $\hat{V}$, a qual tende a permanecer, portanto, mais estável independentemente das impedâncias do sistema.

A lógica operacional supra posta se encontra respaldada em princípios operacionais aplicáveis a circuitos elétricos, motivo pelo qual não é considerada em maiores detalhes neste estágio do trabalho.

Tendo em mente que o componente mais complexo do arranjo consiste no reator saturado, este é considerado em maiores detalhes na sequência, à exceção do componente magnético propriamente dito.

O regulador *Twin-Tripler*, ou reator saturado de 12 pulsos, designação esta atribuída a sua propriedade da geração de harmônicos de correntes de forma similar aos sistemas de retificação correspondentes, consiste em um equipamento que

possui uma topologia construtiva sintetizada na Fig. 3 [4]. 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.

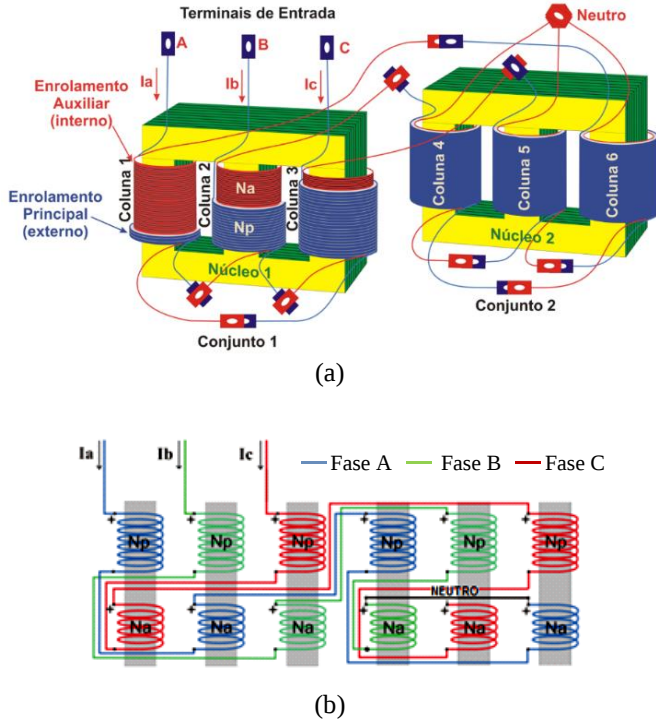


Fig. 3. Reator a núcleo saturado Twin-Tripler: (a) concepção física; (b) disposição dos enrolamentos por fase e conexões elétricas.

De acordo com a Fig. 3, os dois enrolamentos existentes em cada coluna são denominados principal (N_p) e auxiliar (N_a), os quais estão, elétrica e magneticamente, interligados entre si e com as bobinas das colunas vizinhas. O reator *Twin-Tripler* pode ser compreendido, portanto, como sendo dois transformadores de três colunas em que os enrolamentos de cada fase estão interligados em série, na formação zig-zague e estrela com neutro flutuante.

Como a própria nomenclatura “12 pulsos” sugere e considerando as condições ideais de alimentação e operação, os reatores do tipo *Twin-Tripler* produzem harmônicas da ordem $12k \pm 1$, isto é, a partir da 11ª ordem. O fator determinante que proporciona o cancelamento das harmônicas de ordem inferior é a relação N_a/N_p , devendo ser igual a 0,366 para assegurar um conjunto de seis ondas de *fmm*'s deslocadas entre si de 30° [3]. Quanto à definição da potência reativa a ser absorvida pelo reator (Q_L) diante das condições impostas pelo sistema elétrico, este valor é determinado em função do nível de regulação de tensão almejado [2].

III. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO REATOR *TWIN-TRIPLER* E DO COMPENSADOR A NÚCLEO SATURADO NO PROGRAMA ATP

Baseado na topologia apresentada na Fig. 3 e em modelos computacionais desenvolvidos em trabalhos anteriores [4], foi concebido no programa ATP o modelo do reator *Twin-Tripler* que contemplasse as interligações elétricas entre os enrolamentos, acoplamento magnético entre as colunas de cada núcleo e perdas no ferro estimadas de acordo com o material magnético utilizado [6]. A Fig. 4 mostra uma síntese

do modelo criado na plataforma ATP, tendo sido adotado uma das colunas do reator para a ilustração do circuito elétrico equivalente, sendo as demais colunas correspondentes à esta topologia [6].

A Fig. 4 (a) esclarece que foi elaborado um circuito elétrico equivalente para a representação dos núcleos e a dinâmica do fluxo magnético entre as colunas. O núcleo foi subdividido em colunas e culatras e, a partir do princípio da dualidade, foi feito os respectivos circuitos elétricos equivalentes. Por meio de indutores lineares e variáveis entre os elementos representativos das colunas, o modelo é embasado na distribuição de fluxo magnético em um núcleo trifásico de três colunas, em que os enrolamentos correspondem às fontes de *fmm* e o material magnético às relutâncias existentes nas diferentes regiões do núcleo.

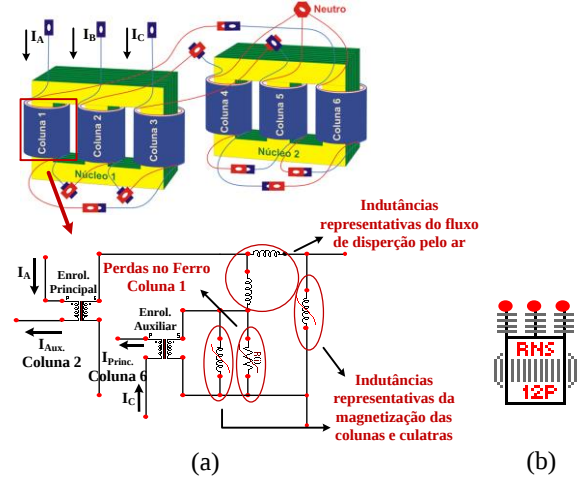


Fig. 4. Reator *Twin-Tripler* no ATP: (a) Representação de uma das colunas do reator; (b) ícone criado para a síntetização do circuito elétrico equivalente.

Seguindo nesta direção, cada enrolamento é representado por um transformador de dois enrolamentos, sendo o enrolamento secundário utilizado para representar o acoplamento magnético. As relutâncias são representadas por indutores com propriedades distintas de acordo com o tipo de fluxo considerado, sendo lineares para os fluxos dispersos pelo ar (indutâncias de dispersão e de sequência zero), ou variáveis para os fluxos confinados nas colunas e culatras do núcleo. No que tange à assimetria dos comprimentos magnéticos dada pela topologia de núcleos de três colunas, esta característica é atribuída aos indutores variáveis e representativos das culatras por meio da diferenciação das curvas de magnetização nestas regiões em relação às colunas. Por ser relacionada a um comprimento magnético menor e considerando uma certa quantidade de fluxo concatenado, a corrente correspondente é inferior à parcela devido ao comprimento das colunas, na proporção regida pela relação entre os volumes de material magnético das respectivas regiões.

Nesta modelagem, a resistência não linear possui o propósito de representar as perdas no ferro, sendo igualmente importante para a redução de possíveis oscilações numéricas inerentes ao método de integração trapezoidal utilizado pelo ATP. Considerando as perdas observadas na prática e as informações provenientes de catálogos do fabricante, com o auxílio do programa MATLAB foi elaborada uma equação representativa das perdas no ferro para o aço silício de grãos orientados. Esta função é especificada em (1), a qual oferece a relação entre a máxima densidade de fluxo magnético e as

perdas no ferro correspondente para um dos núcleos do reator [6].

$$P_{\text{ferro}} = 2,136 \cdot 10^{-16} \cdot e^{18,02 \cdot B} + 0,06401 \cdot e^{1,973 \cdot B} \quad (1)$$

Adotando, pois, o comportamento descrito em (1) para as perdas no ferro, foram determinados pontos para a resistência não linear de forma a descrever a referida função, os quais especificam a relação entre a queda de tensão e o respectivo valor de pico da corrente no componente.

A potência reativa e tensão de operação necessária à especificação do banco de capacitores paralelo foi feita por meio do aplicativo desenvolvido em [2]. A partir destas definições, tendo em mente que as harmônicas de corrente produzidas pelo reator são predominantemente caracterizadas pelas ordens 11 e 13, foram então estabelecidos os filtros harmônicos de 12ª ordem, contando, para tanto, com os equacionamentos clássicos para tais fins, como em [7]. Quanto à especificação do banco de capacitores série, levou-se em consideração o valor eficaz da tensão no barramento sob regulação. Dessa forma, foi observado o comportamento do CERNs sem a presença dos capacitores série e, em seguida, determinado o valor da capacitância correspondente para este elemento de forma a melhorar o estatismo do reator.

IV. SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADOS PARA OS ESTUDOS DE DESEMPENHO

A Fig. 5 ilustra o diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico implementado no ATP, juntamente com o reator *Twin-Tripler*, banco de capacitores paralelo e banco de capacitores série para a composição do CERNs. Neste particular, ressalta-se que é considerada a existência de um filtro harmônico de 12ª ordem para a atenuação das distorções harmônicas provocadas pelo próprio RNS.

O sistema elétrico adotado se apresenta com uma topologia para a qual é possível identificar: a fonte geradora, a impedância de curto-circuito, os transformadores, as linhas de transmissão e cargas. Cada um destes componentes presentes na rede elétrica possui modelos prontamente disponibilizados na biblioteca de recursos do programa ATP, dispensando, portanto, maiores detalhes.

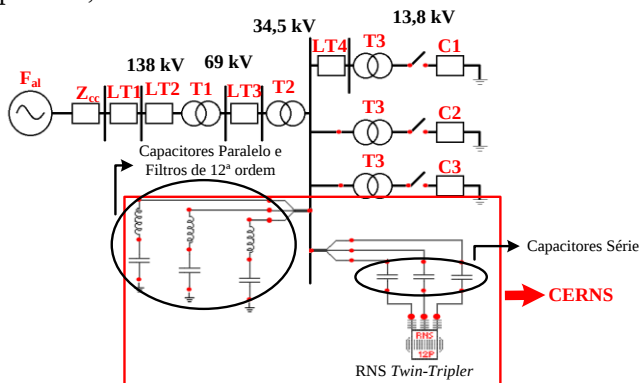


Fig. 5. Sistema elétrico implementado.

Os parâmetros representativos dos componentes se apresentam como: fonte com nível de tensão de 138 kV, potência de curto-circuito de 200 MVA, transformador T1 de 20 MVA e impedância de 10%, transformador T2 de 10 MVA e impedância de 10%, transformador T3 de 4 MVA e impedância de 0,34%, linha de transmissão LT1 com 1000 km

- resistência de 1,7 mΩ/km - indutância de 0,152 mH/km e capacitância de 1,1 pF/km, linhas LT2, LT3 e LT4 com comprimentos iguais a 100 km cada, porém, respectivamente com: resistência de 25,1 mΩ/km, indutância de 0,223 mH/km e capacitância de 1,67 pF/km, linha LT3 com resistência de 99 mΩ/km - indutância de 0,6034 mH/km e capacitância de 4,8 pF/km, e, linha LT4 com resistência de 83,9 mΩ/km - indutância de 0,2732 mH/km e capacitância de 3,1 pF/km.

A Tabela I é indicativa dos parâmetros das cargas e dos componentes que perfazem o regulador a núcleo saturado.

TABELA I. PARÂMETROS DAS CARGAS E DO CERNs.

Parâmetros das Cargas		
Carga – C1	Potência [MVA]	6,45
	Fator de Potência	0,82
Carga – C2	Potência [MVA]	1,26
	Fator de Potência	0,41
Carga – C3	Potência [MVA]	0,45
	Fator de Potência	0,92
Parâmetros do CERNs		
Capacitores Paralelo	Capacitância por fase [μF]	10
Capacitores Série	Capacitância por fase [μF]	220
Filtros Passivos de 12ª Ordem	Indutância por fase [mH]	4,89
Reator Twin-Tripler	Potência Nominal [MVA]	5,5
	Tensão Nominal [kV]	36,2

Para fins da análise de desempenho, os estudos aqui apresentados e discutidos compreendem as situações abaixo caracterizadas, cada qual atrelada com um processo sequencial de mudança brusca do carregamento, sem e com a inserção do compensador, e ainda, considerando a presença e ausência dos capacitores série:

- Caso 1 – Operação do sistema sem dispositivo regulador de tensão;
- Caso 2 – Operação do sistema com o compensador à base de um RNS *TwinTripler* e capacitores paralelo;
- Caso 3 – Operação do sistema com o compensador à base de um RNS *Twin-Tripler*, capacitores paralelo e capacitores série.

Para todos os casos analisados, as simulações foram efetuadas à luz de três particularidades operacionais, a saber:

- Estágio 1 – sistema com carregamento pesado (todas as cargas conectadas);
- Estágio 2 – sistema com carregamento médio (cargas C2 e C3 conectadas e carga C1 desligada);
- Estágio 3 – sistema com carregamento leve (cargas C1 e C2 desligadas e carga C3 conectada).

Em consonância com o exposto, o estágio 1 é compreendido entre o intervalo $t=0$ até 0,8 segundos. No instante de 0,8 segundos, a carga C1 é desligada e as restantes permanecem conectadas, caracterizando o estágio 2. Por fim, durante o estágio 3, concernente aos instantes compreendidos entre 1,5 e 2 segundos, ocorre o desligamento da carga C2, permanecendo, desta forma, apenas a carga C3 conectado à rede. O período total admitido para a realização das simulações foi, portanto, de 2 segundos.

O barramento adotado para a realização das análises e observação dos níveis de tensão e corrente foi o de 34,5 kV, visto ser este o local onde o compensador é inserido. Dentro das condições postas, as formas de onda das tensões e correntes são indicadas, assim como também os seus

correspondentes valores eficazes e níveis de distorções harmônicas.

V. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

A. Caso 1: sistema sem regulador

A Fig. 6 mostra as formas de onda das tensões no barramento de 34,5 kV para cada estágio de carregamento do sistema, enquanto que a Fig. 7 ilustra as respectivas correntes no alimentador sob análise. Os valores eficazes e os níveis de DTT% e DHT₁% encontrados para o sistema na ausência do compensador são também indicados nas legendas das figuras. Os valores percentuais das distorções harmônicas de corrente, assim como as distorções harmônicas de tensão, foram determinados tomando por base seu valor nominal. Ainda, observa-se no Caso 1 que os pequenos valores encontrados para os indicadores de distorção de corrente estão vinculados tão apenas com a inclusão das não-linearidades dos circuitos magnéticos dos transformadores.

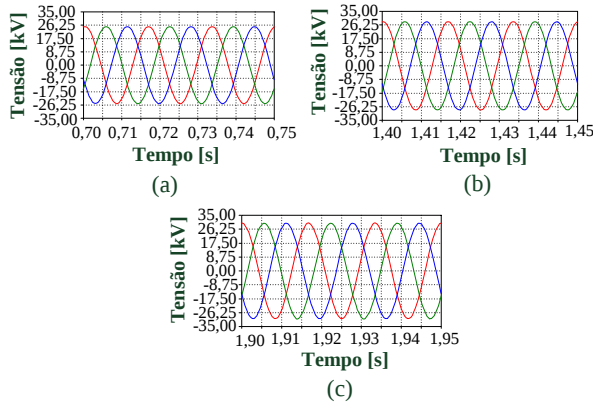


Fig. 6. Detalhes das formas de onda das tensões para o Caso 1: (a) Estágio 1 – $V = 31,75$ kV (0,92 pu), DTT% = 0,7; (b) Estágio 2 – $V = 34,9$ kV (1,03 pu), DTT% = 0,78; (c) Estágio 3 – $V = 36,72$ kV (1,064 pu), DTT% = 0,81.

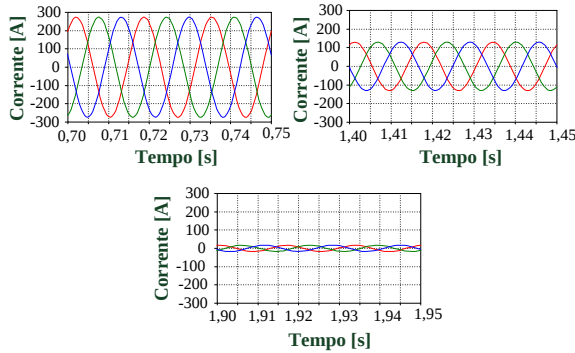


Fig. 7. Detalhes das formas de onda das correntes para o Caso 1: (a) Estágio 1 – $I = 168,16$ A (1,0 pu), DHT₁% = 0,018; (b) Estágio 2 – $I = 42,46$ A (0,25 pu), DHT₁% = 0,048; (c) Estágio 3 – $I = 13,46$ A (0,08 pu), DHT₁% = 0,066.

B. Caso 2: sistema com o compensador constituído por um RNS Twin-Tripler e capacitores em paralelo

Analisando primeiramente o desempenho do compensador constituído por um reator *Twin-Tripler* e banco de capacitores paralelo, as figuras a seguir mostram os resultados encontrados para as formas de onda das tensões e correntes no alimentador analisado, bem como as respectivas distorções harmônicas e correntes nos terminais do compensador.

Observa-se pelas Figs. 8 e 10 que, para o estágio 3, o reator opera próximo de sua potência nominal e o nível de

tensão estabelecido no barramento de 34,5 kV é de 1,052 pu, sendo um pouco mais que o limite máximo permitido (1,05 pu). O banco de capacitores em paralelo fez com que, nos estágios 1 e 2, a tensão fosse para 0,97 pu e 1,04 pu, respectivamente, mostrando que, nestas condições, os níveis de tensão estão enquadrados dentro dos limites aceitáveis.

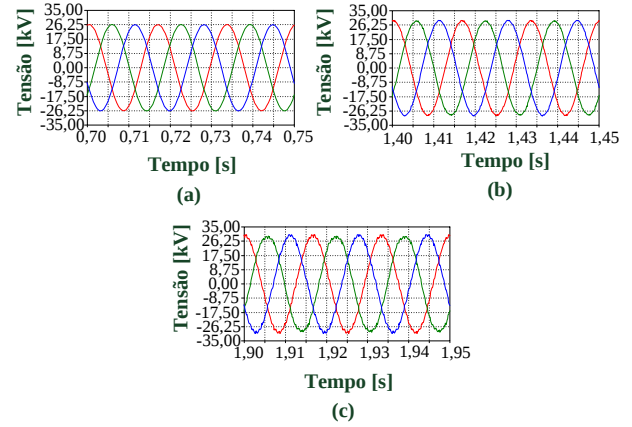


Fig. 8. Detalhes das formas de onda das tensões para o Caso 2: (a) Estágio 1 – $V = 33,5$ kV (0,98 pu), DTT% = 1,03; (b) Estágio 2 – $V = 35,8$ kV (1,04 pu), DTT% = 1,93; (c) Estágio 3 – $V = 36,3$ kV (1,05 pu), DTT% = 2,5.

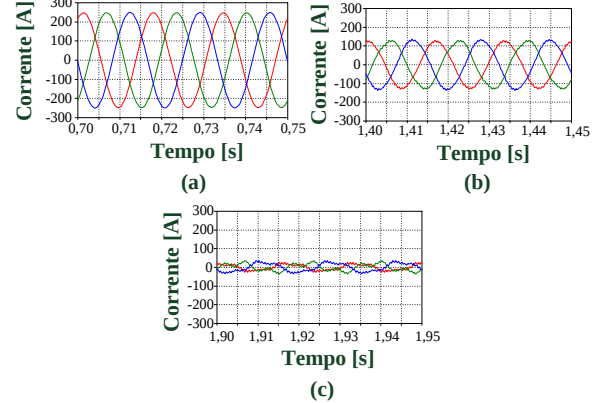


Fig. 9. Detalhes das formas de onda das correntes para o Caso 2: (a) Estágio 1 – $I = 136,35$ A (0,71 pu), DHT₁% = 0,76; (b) Estágio 2 – $I = 33,11$ A (0,46 pu), DHT₁% = 0,47; (c) Estágio 3 – $I = 17,2$ A (0,09 pu), DHT₁% = 0,31.

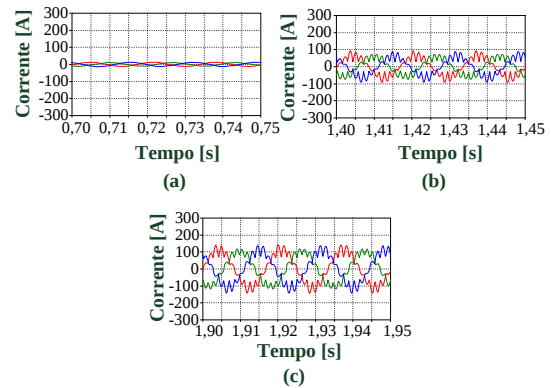


Fig. 10. Formas de onda das correntes nos terminais do regulador considerando o Caso 2: (a) Estágio 1 – $I_{RNS} = 10,63$ A; (b) Estágio 2 – $I_{RNS} = 67,4$ A; (c) Estágio 3 – $I_{RNS} = 89,05$ A.

Em se tratando das perdas observadas no reator, pode-se destacar àquelas observadas no estágio 3, a qual foi cerca de 385 kW. Esta potência representa 7% da potência nominal do RNS, sendo a maior parte proveniente das perdas no ferro devido ao alto nível de saturação imposto no núcleo magnético. As distorções harmônicas de tensão foram nos três

estágios inferiores a 6% da tensão nominal, o que reflete uma performance satisfatória do CERNs.

C. Caso 3: sistema com o compensador constituído por um RNS Twin-Tripler, capacitores em paralelo e em série

Considerando neste momento a adição dos capacitores em série com a unidade indutiva do CERNs, as figuras seguintes ilustram os resultados correspondentes a esta nova situação do compensador.

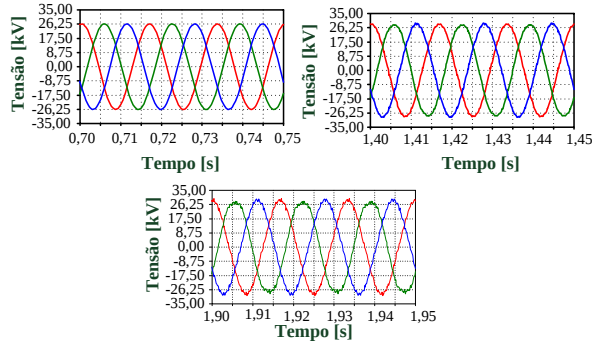


Fig. 11. Detalhes das formas de onda das tensões para o Caso 3: (a) Estágio 1 – $V = 33,52$ kV (0,97 pu), $DTT\% = 1,01$; (b) Estágio 2 – $V=34,55$ kV (1,00 pu), $DTT\% = 2,86$; (c) Estágio 3 – $V= 34,56$ kV (1,00 pu), $DTT\% = 3,62$.

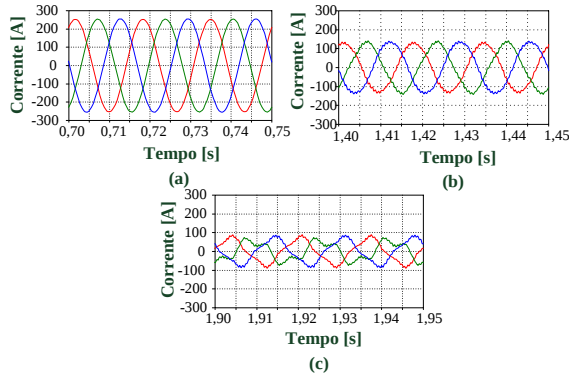


Fig. 12. Detalhes das formas de onda das correntes para o Caso 3: (a) Estágio 1 – $I = 136,23$ A (0,90 pu), $DHT_1\% = 1,07$; (b) Estágio 2 – $I = 60,89$ A (0,46 pu), $DHT_1\% = 1,32$; (c) Estágio 3 – $I = 60,53$ A (0,077 pu), $DHT_1\% = 1,75$.

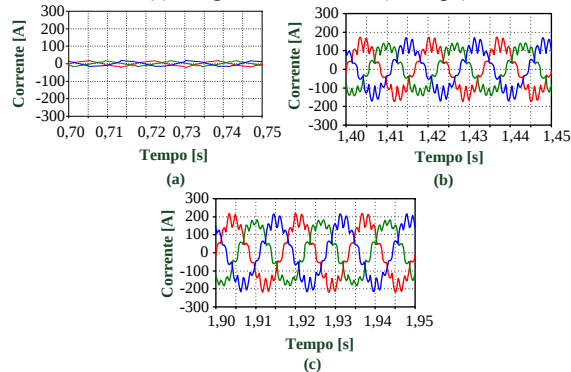


Fig. 13. Formas de onda das correntes nos terminais do regulador durante cada estágio de desligamento de carga: (a) Estágio 1 – 11,34 A; (b) Estágio 2 – 102,11 A; (c) Estágio 3 – 135,06 A.

Nesta nova configuração, o compensador a núcleo saturado tem uma melhor performance quanto a capacidade de regulação de tensão, mantendo este nível próximo de 1 pu em todos os estágios de carregamento. As distorções harmônicas observadas nas formas de onda das tensões do barramento de 34,5 kV, apesar de serem superiores aos respectivos valores encontrados para o Caso 2, também estiveram abaixo do limite máximo permitido por lei de 6% [1]. Isto significa que a maior saturação do núcleo provocada pelos capacitores em série, ao

invés de comprometer a performance do CERNs, melhorou sua performance quanto à capacidade de regulação de tensão. Por outro lado, em relação às perdas observadas nos três estágios de carregamento, como era esperado devido à maior saturação do núcleo e consequente aumento da potência do equipamento, foram superiores àquelas encontradas para o Caso 2, atingido o valor de 561 kW no Estágio 3 (10,2% da potência nominal).

VI. CONCLUSÕES

Diante dos resultados encontrados para a configuração do CERNs constituído por um RNS, banco de capacitores série e paralelo, conclui-se que esta alternativa foi eficiente quanto à melhoria da capacidade de regulação de tensão pelo compensador, sem que isto prejudicasse as formas de onda das tensões no barramento sob regulação. Todavia, tanto a configuração do CERNs sem o banco de capacitores série quanto com os respectivos capacitores mostraram que o RNS é um equipamento que opera em condições extremas de saturação e, por isso, apresenta perdas elevadas, tornando-o pouco competitivo diante das demais soluções para regulação de tensão. Diante desta constatação, tem-se como proposta para trabalhos futuros a investigação de novas ligas magnéticas para a concepção dos núcleos magnéticos do RNS, de forma a reduzir as perdas no ferro e aprimorar a capacidade de regulação de tensão.

As análises mostraram as implicações da configuração proposta no desempenho do CERNs, tendo sido identificado uma melhoria do estatismo natural do material magnético e aprimoramento da capacidade de regulação de tensão. No entanto, ainda devem ser desenvolvidos estudos no sentido de avaliar a topologia aqui contemplada em condições transitórias de operação, tais como rejeições súbitas de carga, energizações e outros fenômenos que influenciam momentaneamente nas tensões e correntes do sistema.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] C. S. Chaves, J. C. Oliveira, M. L. R. Chaves E A. C. Santos, “Saturated Core Voltage Regulators: Parametrization, Computational Models and Performance Studie,” *European Transactions on Electrical Power*, pp. 1-12, 2016.
- [7] M. F. Mcgranagham et al., *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 2002.