

Avaliação Computacional do Desempenho de Reatores Saturados sob Tensões de Suprimento Não-Ideais na Rede de Conexão

Camilla de Sousa Chaves
Instituto Federal do Triângulo Mineiro
– Campus Uberlândia
Uberlândia – MG, Brasil
camillachaves@iftm.edu.br

João Areis Ferreira Barbosa Junior
Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde
Rio Verde – GO, Brasil
joao.areis@ifgoiano.edu.br

José Carlos de Oliveira
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG, Brasil
jcoliveira@ufu.br

Paulo Henrique Oliveira Rezende
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG, Brasil
paulohenrique.rezende@ufu.br

Fabício Parra Santilio
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Mato Grosso
Cuiabá – MT, Brasil
fabricao.santilio@ufmt.br

Gustavo Travassos Aguiar da Silva
Neoenergia – Coelba
Salvador – BA
gtravassos@neoenergia.com

Abstract— Os compensadores de reativos fundamentados no princípio do reator saturado se apresentam como uma solução atrativa para aplicações específicas associadas com a regulação de tensão em redes elétricas. Seus atributos, em termos de simplicidade, custo e robustez são notórios, todavia, a exemplo de outros dispositivos, os mesmos são responsáveis pela geração de correntes harmônicas e seus impactos junto às redes de conexão. Para minimizar tais efeitos, arranjos eletromagnéticos especiais são empregados, os quais, sob condições de suprimento de tensões ideais, reduzem significativamente as distorções harmônicas produzidas. Entretanto, quando a tensão de alimentação apresenta desvios em relação ao padrão ideal, a eficiência do mecanismo intrínseco de compensação harmônica do reator saturado é comprometida, resultando na presença de componentes harmônicas não previstas. Este artigo encontra-se focado na correlação entre a operação do compensador em pauta diante de fenômenos associados com desequilíbrios de tensão, pré-distorções de tensão junto ao ponto de conexão e, ainda, ocorrências de Variação de Tensão de Curta Duração. Sob a ação destes fenômenos são analisados seus efeitos sobre o espectro de frequências gerado pelo dispositivo.

Keywords—Reator a núcleo saturado, desequilíbrio de tensão, distorções harmônicas, VTCD, regulação da tensão.

I. INTRODUÇÃO

A regulação da tensão nos barramentos dos sistemas elétricos se apresenta como tema que oferece contínuos desafios no ramo da 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 [1], [2].

Em se tratando dos dispositivos reguladores de tensão, reconhece-se, comercialmente, diferentes tipos de produtos, dentre os quais tem-se como foco central deste estudo os Reatores a Núcleo Saturado (RNS). Este tipo de equipamento se baseia no princípio da compensação indireta, cujo processo de regulação encontra sustentação no controle da potência reativa e seus atributos são amplamente conhecidos em [3], [4]. Este dispositivo, de cunho totalmente

eletromagnético, não requer qualquer meio para aferir os parâmetros de controle, atuar ou mecanismos adicionais além de sua própria característica de operação. Uma vez associado em paralelo com um banco de capacitores fixo, tem-se o denominado Compensador Estático de Reativos a Núcleo Saturado (CERNs), o qual foi amplamente difundido entre os anos de 1960 e 1970.

Apesar dos inúmeros atrativos oferecidos por esta estratégia de regulação, em que pese seus 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 [5].

Não obstante este reconhecimento histórico, diante dos atrativos oferecidos pela tecnologia dos reatores saturados, a partir de meados dos anos 90, com o aprimoramento das ligas de aço silício e disponibilização comercial dos materiais amorfos, adicionadas à busca por alternativas economicamente vantajosas e respeitadas as particularidades da aplicação, estes fatores motivaram novos interesses sobre a compensação da tensão via reguladores saturados, como relatado em [4], [6], [7], [8], [9].

Diante do reconhecimento que o princípio físico do compensador em pauta se baseia na não linearidade da região de operação do equipamento, este introduz indesejáveis níveis de distorções harmônicas de corrente na rede de conexão. Assim, 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], se apresentam com estratégias classicamente utilizadas para a minimização destes efeitos.

Diante deste contexto, este trabalho se apresenta imbuído do propósito de estabelecer estudos computacionais para a análise de desempenho de um RNS sob condições operativas não-ideais impostas pela rede elétrica. Para tanto, baseado em trabalhos anteriores [4], [10], que adotaram o arranjo *Twin-tripler* como estratégia para a redução das injeções de harmônicos pelo reator, seu modelo foi implementado no programa ATP [8] e este recurso se apresenta como base para

as investigações aqui realizadas. Isto feito e, estabelecido um sistema teste, são realizados os estudos contemplados no trabalho.

Num primeiro momento é feita a análise do comportamento do reator saturado sob condições ideais para a rede elétrica e obtidos os espectros de frequência das correntes injetadas pelo equipamento. Na sequência, é imposto um desequilíbrio de tensão de 5%, e numa outra situação, distorções harmônicas de tensão. Estas avaliações permitem, pois, correlacionar a operação do compensador quanto a produção de harmônicos sob condições ideais e sob a ação de distúrbios presentes na rede elétrica. Ainda, visando a identificação do comportamento dinâmico do equipamento, uma investigação adicional é realizada através da imposição de uma variação de tensão de curta duração (VTCD) na rede. Ao final do artigo, são tecidas considerações sobre a correlação dos efeitos contemplados como foco do trabalho.

Por fim, destaca-se que os desenvolvimentos contemplados neste trabalho encontram-se alinhados com ações em desenvolvimento no projeto de P&D PD-00047-0095/2023, intitulado “Alocação Otimizada de Reatores Saturados Cabeça de Série em Redes de Distribuição Multirramais para Regulação da Tensão”, firmado entre a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia e a Universidade Federal de Uberlândia, visando a aplicação do compensador dinâmico de reativos em pauta, às instalações da COELBA/Neenergia.

II. REATORES A NÚCLEO SATURADO: PRINCÍPIO OPERATIVO

Os reatores saturados possuem características operacionais amplamente conhecidas pela literatura e com bastante similaridade aos princípios que regem o funcionamento dos transformadores e reatores convencionais, porém com a diferença relacionada à região de operação na curva característica do material magnético empregado no núcleo, conforme mostra a Fig. 1. A partir da região linear, em consonância com o aumento da tensão, haverá uma correspondente elevação do nível de saturação, o qual, como indicado, poderá conduzir o dispositivo para elevados níveis de densidade magnética. Nestas últimas condições, certamente, o equipamento implicará em consumos elevados de potência reativa, ressaltando que a passagem dos pontos de funcionamento de baixa saturação até os mais elevados ocorre de forma gradual e contínua, com tempo de resposta compatíveis com os fenômenos eletromagnéticos. Devido à operação na região saturada, os RNS geram correntes não senoidais, injetando distorções harmônicas na rede. Para mitigar esses efeitos, utilizam-se arranjos elétricos especiais e, em específico, este estudo foca no arranjo *Twin-tripler*.

O regulador *Twin-tripler*, ou reator saturado de 12 pulsos, possui uma topologia construtiva indicada nas Fig. 2 (a) e (b) [11]. Constata-se que o equipamento 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 e interconectados em série. Os dois enrolamentos existentes em cada coluna são denominados, respectivamente, de principal (N_p) e auxiliar (N_a), os quais estão elétrica e magneticamente interligados entre si e com as bobinas das colunas vizinhas, conforme mostra a Fig. 2 (b). A montagem dos enrolamentos conduz a um comportamento, sob o ponto de vista da geração de harmônicos, de modo similar aos conversores eletrônicos de

“12 pulsos”, ressaltando-se, entretanto, que tal propriedade só é conferida sob condições ideais da rede de suprimento. Assim, os reatores do tipo *Twin-tripler* produzem harmônicos da ordem $(12k \pm 1)$ e informações mais detalhadas sob a estratégia do cancelamento de uma expressiva parte das componentes harmônicas produzidas podem ser encontradas em [12]. As Fig.3 (a) e (b) ilustram as formas de onda das correntes de alimentação do reator e suas componentes harmônicas características, quando o mesmo se encontra suprido por uma fonte ideal de tensões trifásicas.

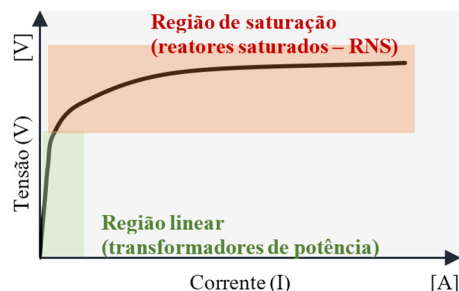


Fig. 1. Região de operação de um RNS de acordo com a característica dada pela relação $V \times I$ do equipamento.

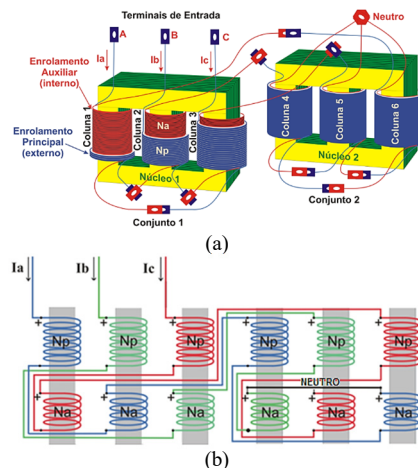


Fig. 2. Reator a núcleo saturado: (a) arranjo construtivo *Twin-tripler*; (b) conexão entre as bobinas.

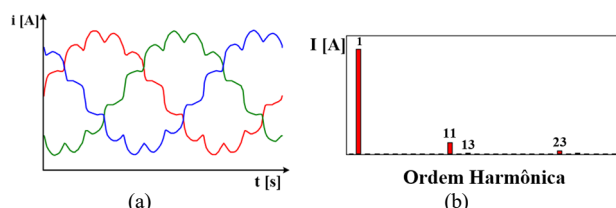


Fig. 3. (a) Formas de onda das correntes nas três fases de um reator *Twin-tripler*; (b) espectro harmônico de uma das fases.

III. SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO PARA OS ESTUDOS DE DESEMPENHO

Os estudos de desempenho do reator a núcleo saturado, como já mencionado, foram conduzidos com base em modelo já implementado no programa ATPDraw. Neste foi estabelecido, como sistema teste, o arranjo elétrico indicado na Fig. 4, a qual compreende 18 barramentos com tensões de 138 kV, 69 kV, 34,5 kV e 13,8 kV, com um tronco radial longo e ramais secundários. No barramento 7 constata-se a presença de uma carga com comportamento dinâmico quando ao seu consumo e, junto a esta, encontra-se inserido o reator saturado focado no trabalho.

As principais informações elétricas relativas aos diversos componentes que perfazem o sistema em pauta, nos termos necessários à modelagem estabelecida no simulador ATP, são fornecidas nas Tabelas I a V.

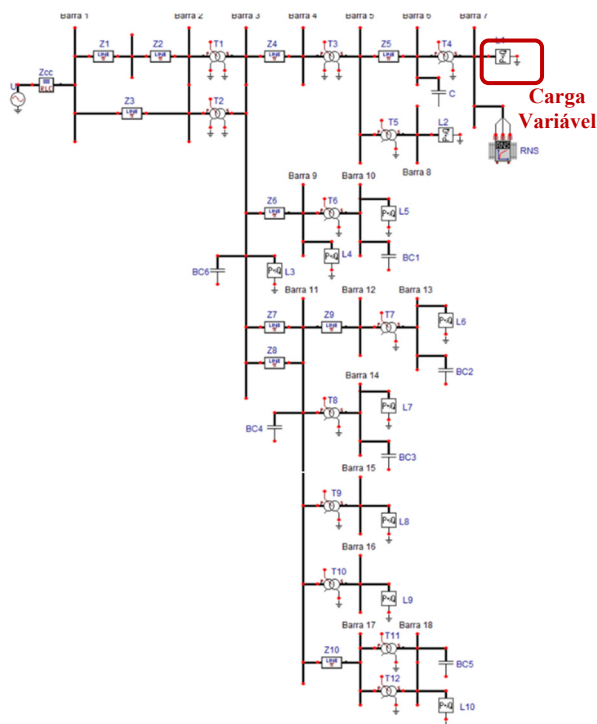


Fig. 4. Diagrama unifilar do sistema elétrico adotado e implementado no programa ATPDraw para os estudos de desempenho do RNS.

TABELA I. NÍVEL DE CURTO-CIRCUITO

Barra 1	
Tensão	138 kV
Corrente de curto-circuito	2,84 kA
Ângulo	$\angle -83,55^\circ$

TABELA II. PARÂMETROS EQUIVALENTES DOS ALIMENTADORES

Condutores	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Capacitância (μF)
Z1	17,05	152,55	1,14
Z2	2,51	22,43	0,167
Z3	16,72	172,51	1,33
Z4	9,88	60,34	0,48
Z5	16,79	54,64	2,82
Z6	0,06	0,36	0,003
Z7	2,37	14,48	0,11
Z8	2,09	18,19	0,14
Z9	13,05	54,52	0,37
Z10	0,70	6,06	0,05

TABELA III. PARÂMETROS EQUIVALENTES DOS TRANSFORMADORES

Transformadores	Potência Nominal (MVA)	Relação de Tensão (V ₁ /V ₂)
T1; T2	60	138 kV / 69 kV
T3	12	69 kV / 34,5 kV
T4; T5	6; 1	34,5 kV / 13,8 kV
T6; T7; T8; T9 – T12	12; 5; 20; 12	69 kV / 13,8 kV

TABELA IV. POTÊNCIAS DAS CARGAS

Condições de Carregamento	Transformadores	Potência Ativa (MW)	Potência Reativa (MVAR)
Carga 1	T4	3,4	2,1
Carga 2	T5	0,24	0,18
Carga 3	T2	6,3	3,6
Carga 4	T2	1,8	0,8
Carga 5	T6	2,3	2,0
Carga 6	T7	1,8	1,0
Carga 7	T8	5,0	3,1
Carga 8	T9	0,8	0,6
Carga 9	T10	1,8	1,1

Carga 10	T12	3,9	2,0
----------	-----	-----	-----

TABELA V – PARÂMETROS DOS CAPACITORES

Banco de Capacitores	Potência (MVAR)
C	0,5
BC 1	1,0
BC 2	1,2
BC 3	4,8
BC 4 – BC 6	6,0

IV. ESTUDOS DE CASOS – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os estudos computacionais feitos encontram-se agrupados nas seguintes avaliações:

- Desempenho do sistema elétrico sob regime permanente sem reator saturado;*
- Desempenho do sistema elétrico sob regime permanente com reator saturado e tensões ideais;*
- Desempenho do sistema elétrico com reator saturado sob a ação dos seguintes fenômenos:*

- Presença de 5% de desequilíbrio de tensão na rede elétrica;
- Presença de Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) de 10%;
- Ocorrência de uma Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD) provocada por um afundamento de tensão nas três fases devido a um curto-circuito trifásico para a terra.

A. Desempenho do Sistema Elétrico Sem Reator Saturado

Para a avaliação das condições operativas do sistema sem a presença do reator saturado, foram impostas situações operativas tais a representar variações de consumo da carga 1, de potência nominal 4 MVA, instalada no barramento 7, enquanto as demais cargas do sistema permaneceram constantes. As variações de carregamento para a carga da barra 7 foram estabelecidas por meio de duas condições de demanda:

- Carregamento leve: 20% da potência nominal;
- Carregamento pleno: 100% da potência nominal.

Os resultados computacionais, obtidos através do programa ATP, para as amplitudes das tensões eficazes de cada barramento do sistema elétrico analisado, frente às situações de carregamento experimentadas pela barra 7, bem como os respectivos desvios destes em relação às tensões nominais das barras, encontram-se sintetizadas na Tabela VI. Conforme pode-se constatar, as tensões assim obtidas indicam claras violações dos limites considerados adequados segundo as recomendações do PRODIST, os quais, para conexões em tensão superior a 1 kV e inferior a 69 kV, se situam entre -7% e +5%. À luz do ocorrido, ou seja, da maior violação do padrão requerido para o barramento 7, foi então estabelecido este o ponto para a instalação do reator saturado.

Objetivando o enquadramento da tensão da barra 7, foi então dimensionado um reator saturado, que culminou como sendo de 4,37 MVAR, na tensão máxima a ser compensada. Os demais parâmetros do equipamento estão na Tabela VII. Maiores informações sobre o procedimento de dimensionamento e especificação do pré-projeto do reator saturado podem ser encontradas em [12].

Almejando oferecer bases para a comparação dos desempenhos do sistema elétrico analisado, antes e após a inserção do RNS na barra 7, as Fig. 5 (a) e (b) fornecem as formas de onda das tensões (fase-terra) verificadas na

referida barra para as condições de carregamento consideradas - leve e pleno. Também, para maior clareza, na figura são indicados pelas setas os valores eficazes das respectivas tensões fase-fase. Este mesmo procedimento é aplicado para todos os demais resultados apresentados.

TABELA VI. TENSÕES NOS BARRAMENTOS DO SISTEMA – SEM REATOR SATURADO

Barras	Tensão Nominal (kV)	Tensões para os carregamentos da Barra 7			
		Leve		Pleno	
		Tensão Linha (kV)	Desvio (%)	Tensão Linha (kV)	Desvio (%)
1	138	142,6	3,4	141,9	2,8
2	138	145,0	5,1	143,4	3,9
3	69	73,2	6,1	72,2	4,6
4	69	73,8	7,0	71,5	3,6
5	34,5	38,1	10,4	36,4	5,4
6	34,5	38,6	11,8	34,1	-1,3
7	13,8	17,0	22,8	14,7	6,4
8	13,8	15,2	10,4	14,6	5,4
9	69	73,2	6,1	72,1	4,6
10	13,8	14,5	5,2	14,3	3,6
11	69	73,3	6,3	72,2	4,7
12	69	73,1	5,9	72,0	4,4
13	13,8	14,6	6,1	14,4	4,6
14	13,8	14,6	5,6	14,4	4,0
15	13,8	14,6	5,8	14,4	4,2
16	13,8	14,5	5,4	14,3	3,9
17	69	73,3	6,2	72,2	4,7
18	13,8	14,7	6,8	14,5	5,3

TABELA VII. PARÂMETROS DO REATOR A NÚCLEO SATURADO

Principais Características	
Potência Reativa de Operação	4,37 MVAR
Classe de Tensão	13,8 kV
Tensão de Operação (fase-fase)	14,3 kV
Corrente de Operação	177,2 A
Frequência de Operação	60 Hz
Resistência do enrolamento principal (Rp)	0,0147 Ω
Resistência do enrolamento auxiliar (Ra)	0,0020 Ω
Indutância do enrolamento principal (Lp)	1,3473 mH
Indutância do enrolamento auxiliar (La)	0,1805 mH
Tensão na bobina principal	3,65 kV
Tensão na bobina auxiliar	1,34 kV

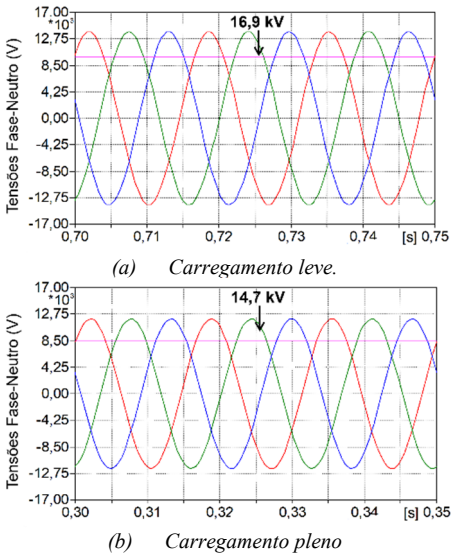


Fig. 5. Formas de onda das tensões de fase do barramento 7 de 13,8 kV – sem RNS.

B. Desempenho do Sistema Elétrico com o Reator Saturado – rede de conexão sob condições ideais

Uma vez inserido o reator junto ao barramento 7, a Tabela VIII apresenta as grandezas de operação do

equipamento. Os resultados evidenciam que, para a condição de carregamento leve, sua saturação o levou a um consumo de 98% de sua potência nominal, funcionando num estado mais elevado de saturação. Por outro lado, para a condição de carregamento pleno, o equipamento absorve da rede cerca de 45% de sua potência nominal.

Com a conexão do compensador, as novas condições operativas assim obtidas para as tensões dos barramentos encontram-se indicadas na Tabela IX. Como pode ser constatado, as tensões que antes violavam os limites estipulados pela legislação, passaram a apresentar valores enquadrados dentro do padrão considerado adequado. Tais resultados demonstram a eficiência do reator saturado para a regulação das tensões de todo o sistema, e não somente da barra 7.

A Fig. 6 apresenta as formas de onda das tensões de fase verificadas na barra 7, bem como os respectivos valores de linha para as condições de carregamento leve e pleno.

Os resultados obtidos demonstram que, muito embora os estudos tenham sido realizados em condições ideais de suprimento, a presença do elemento indutivo não linear do compensador causou distorções harmônicas das tensões do barramento. Isto se deve, como já informado, ao fato que o reator saturado em pauta é capaz de produzir componentes harmônicas de corrente de ordem $12k \pm 1$, as quais, injetadas na rede, promovem as distorções de tensão identificadas.

As Fig. 7 (a) e (b) apresentam as distorções harmônicas individuais de tensão para o barramento de conexão do reator. Nestas, pode-se verificar que os maiores níveis de distorções harmônicas foram verificados para a situação de carregamento leve, na qual o reator encontra-se operando em plena saturação, resultando em um DTT de aproximadamente 4,9%. As componentes harmônicas encontram-se em consonância com a operação de um reator saturado *Twin-tripler* sob condições normais de funcionamento. Para situação de carregamento pleno, a distorção harmônica verificada nas tensões do barramento 7 foram menores, com um DTT de aproximadamente 2,7%, devido a operação do RNS em condição de menor nível de saturação.

No que se refere às correntes solicitadas pelo reator saturado, a Fig. 8 apresenta o desempenho do equipamento frente as variações de carregamento experimentadas, as quais conduzem, respectivamente, a operação do reator sob condições de baixa e elevada saturação.

Os respectivos espectros harmônicos das correntes de linha solicitadas pelo RNS, para as duas condições de carregamento, podem ser observados nas Fig. 9 (a) e (b). Novamente, as ordens harmônicas presentes encontram-se consonantes com as expectativas teóricas. Para a condição de carregamento leve a DTI verificada foi de 16,2%, enquanto na condição de carregamento pleno, 20,9%.

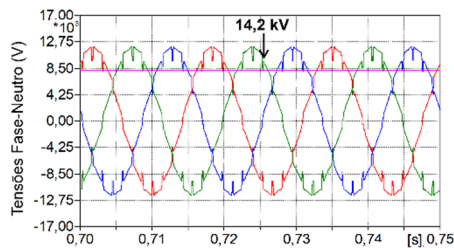
TABELA VIII. CORRENTES E POTÊNCIAS NO RNS

Condições de carregamento	Corrente [A]	Potência Reativa [MVAR]
Leve	173,4	4,9
Pleno	80,7	1,9

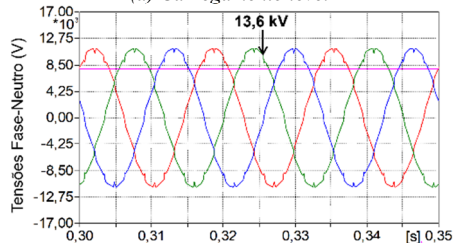
TABELA IX. TENSÕES NOS BARRAMENTOS DO SISTEMA – COM REATOR SATURADO

Barra	Tensão Nominal (kV)	Nível de Carregamento na Barra 7			
		Leve		Pleno	
		Tensão Linha (kV)	Desvio (%)	Tensão Linha(kV)	Desvio (%)

1	138	141,7	2,7	141,5	2,6
2	138	143,1	3,7	142,7	3,4
3	69	71,8	4,1	71,6	3,8
4	69	70,9	2,8	70,4	2,0
5	34,5	35,8	3,8	35,5	2,9
6	34,5	33,6	-2,7	32,2	-6,7
7	13,8	14,2	3,2	13,6	-1,2
8	13,8	14,3	3,8	14,2	2,9
9	69	71,8	4,1	71,6	3,8
10	13,8	14,2	3,2	14,2	2,9
11	69	71,9	4,2	71,7	3,9
12	69	71,7	3,9	71,5	3,6
13	13,8	14,4	4,1	14,3	3,8
14	13,8	14,3	3,5	14,2	3,3
15	13,8	14,3	3,8	14,3	3,5
16	13,8	14,3	3,4	14,2	3,1
17	69	71,9	4,2	71,7	3,9
18	13,8	14,5	4,8	14,4	4,5

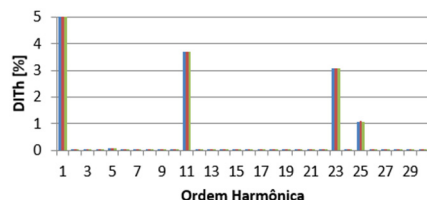


(a) Carregamento leve.

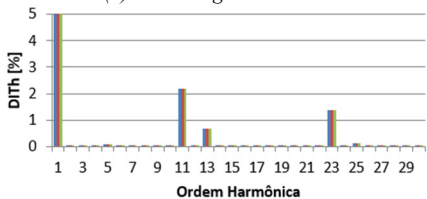


(b) Carregamento pleno.

Fig. 6. Formas de onda das tensões no barramento 7 de 13,8 kV - com reator saturado.

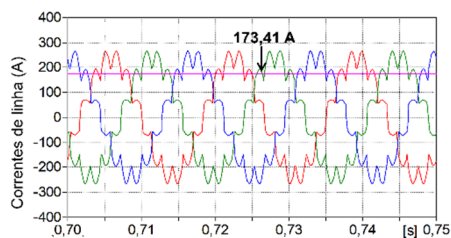


(a) Carregamento leve.

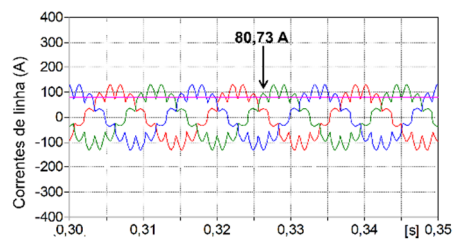


(b) Carregamento pleno.

Fig. 7. Espectro harmônico das tensões aplicadas nos terminais do compensador.

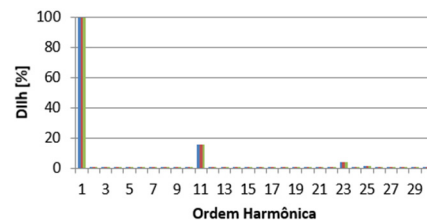


(a) Carregamento leve.

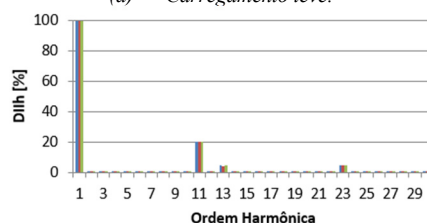


(b) Carregamento pleno.

Fig. 8. Formas de onda das correntes no RNS.



(a) Carregamento leve.



(a) Carregamento pleno.

Fig. 9. Espectro harmônico das correntes no RNS.

C. Desempenho do Sistema Elétrico em Regime com Reator Saturado – Rede de conexão não ideal.

Como estabelecido na formulação dos casos de estudo sob condições não ideais de operação para a rede elétrica, apresenta-se, na sequência, as condições operacionais do reator saturado quando da presença de: desequilíbrios das tensões, distorções harmônicas pré-existent e variações de tensão de curta-duração.

C.1 - Rede com desequilíbrio de tensão de 5%.

Objetivando o atendimento ao nível de desequilíbrio supra estabelecido, o suprimento em 138 kV foi representado pelas tensões com amplitudes e ângulos de fase indicados na Tabela X.

Uma vez imposto o desequilíbrio para o sistema, o funcionamento do reator quanto às suas correntes e potências reativas consumidas, encontram-se na Tabela XI.

TABELA X. TENSÕES DE ALIMENTAÇÃO NA BARRA DE 138 kV – DESEQUILÍBRIO 5%

Fonte	Amplitude [kV]	Ângulo de defasagem [graus]
Fase A	144,9	0
Fase B	134,683	-122,543
Fase C	134,683	122,543

TABELA XI. CORRENTES E POTÊNCIAS SOLICITADAS PELO RNS – DESEQUILÍBRIO 5%.

Condições de carregamento	Corrente Fundamental			Potência Reativa [MVAR]
	Ia1 [A]	Ib1 [A]	Ic1 [A]	
Pleno	85,571	96,421	63,144	2
Leve	177,4	188,52	149,97	4,32

A Tabela XII apresenta os valores das tensões obtidas para o caso em estudo, mostrando a efetividade do regulador. Vale destacar que o desequilíbrio de 5% foi imposto na barra de 138 kV, implicando em 3,2% na barra 7.

Nas condições estabelecidas pela compensação requerida, as Fig. 10 (a) e (b) mostram as formas de onda das tensões do barramento 7, sob condições de carregamento leve e pleno, respectivamente.

Tomando por base apenas a situação de carregamento leve, visto ser a situação mais crítica sob o ponto de vista de saturação e geração de harmônicos, a Fig. 11 evidencia o espectro harmônico da tensão, com uma DTT de aproximadamente 7,2%. As componentes harmônicas mais significativas foram aquelas compatíveis com o arranjo de 12 pulsos, somadas com componentes de ordem 3 e seus múltiplos, fato este atribuído ao desequilíbrio da tensão de suprimento. Para a situação de carregamento pleno, a DTT verificada foi de aproximadamente 5%, devido, naturalmente, à operação do RNS em condição de menor saturação. Em termos das correntes associadas com a operação do reator, estas são apresentadas nas Fig. 12 (a) e (b).

Novamente, a corrente do reator, para a condição operacional com carregamento leve, se apresenta com o espectro apresentado na Fig. 13. Suas componentes harmônicas de ordem 11, 13, 23 e 25 são as mais significativas, além das múltiplas da ordem 3, advindas do desequilíbrio de tensão introduzido ao sistema elétrico. Para a condição de carregamento leve, o valor médio verificado para a DTI foi de 18,5%, enquanto na condição de carregamento pleno, o valor foi de 30%.

TABELA XII. TENSÕES NA BARRA 7 - 13,8 kV - COM REATOR SATURADO - DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES DE 5%

Barramento - Fases	Tensão Nominal (kV)	Nível de Carregamento na Barra 7					
		Leve			Pleno		
		Tensão Linha Eficaz (kV)	Desvio (%)	Deseq. (%)	Tensão Linha Eficaz (kV)	Desvio (%)	Deseq. (%)
7 - A	13,8	14,5	5,0	3,1	13,8	0,2	3,2
7 - B	13,8	14,5	5,0		13,9	0,5	
7 - C	13,8	13,8	0,2		13,2	-4,4	

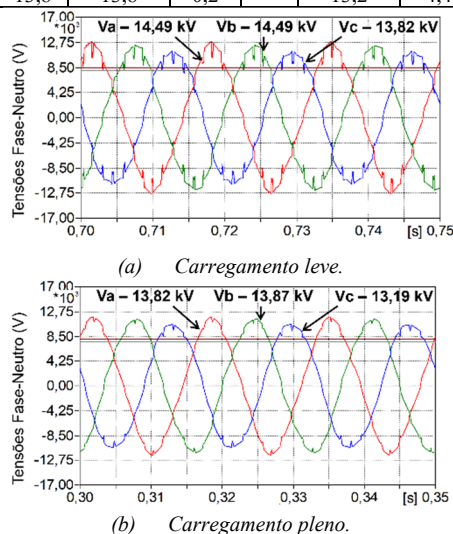


Fig. 10. Formas de onda das tensões da barra 7 - 13,8 kV - com reator saturado - desequilíbrio de 5%.

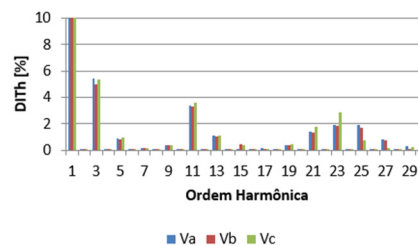


Fig. 11. Espectro harmônico das tensões nos terminais do reator saturado - carregamento leve.

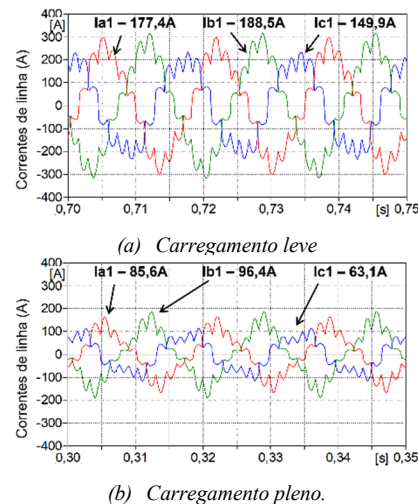


Fig. 12. Formas de onda das correntes no RNS - desequilíbrio 5%.

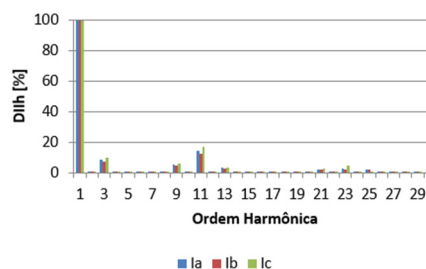


Fig. 13. Espectro harmônico das correntes do RNS - desequilíbrio de 5% - carregamento leve

C-2 - Rede com 10% de Distorção Harmônica Total de Tensão

Para o atendimento ao requisito imposto pela condição operacional estabelecida, a tensão trifásica ideal de 138 kV foi alterada nos termos indicados na Tabela XIII.

Os resultados sobre a efetividade da regulação oferecida pelo reator saturado, não obstante as distorções impostas pela rede elétrica, se mostram consistentes com as expectativas, como apresentado na Tabela XIV. A Tabela XV indica as correntes e potências associadas com a operação do reator.

Nas condições postas, as formas de onda para as tensões, na condição operacional leve e plena, são ilustradas nas Fig. 14 (a) e (b). A Fig. 15 apresenta as distorções harmônicas individuais de tensão para a condição de carregamento leve, ou seja, com o reator na condição mais saturada, o que resultou em uma DTT de 16,5%. As componentes harmônicas mais significativas são aquelas compatíveis com a operação ideal do equipamento, somada às ordens impostas pela distorção pré-existente na rede elétrica. Para situação de carregamento pleno, devido ao menor nível de saturação ocorrido, a DTT foi de 9,7%.

Já as respectivas correntes no reator são destacadas nas Fig. 16 (a) e (b). Complementarmente, o respectivo espectro

de frequência para a situação de carregamento leve é mostrado na Fig. 17.

TABELA XIII. TENSÕES DE ALIMENTAÇÃO NA BARRA DE 138 kV – DTT 10%

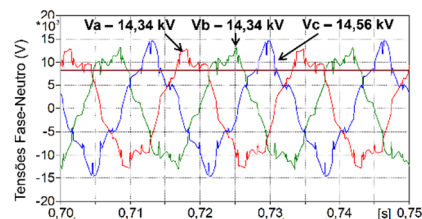
Ordem harmônica	Frequência [Hz]	Va		Vb		Vc	
		Amplitude [kV]	Ângulo [graus]	Amplitude [kV]	Ângulo [graus]	Amplitude [kV]	Ângulo [graus]
1	60	112,68	0	112,68	-120	112,68	120
3	180	5,6338	-180	5,6338	-120	5,6338	-300
5	300	6,7606	-60	6,7606	-120	6,7606	-180
7	420	4,5071	60	4,5071	-120	4,5071	-60
9	540	2,2535	180	2,2535	-120	2,2535	60
11	660	3,9437	300	3,9437	-120	3,9437	180
13	780	3,3803	420	3,3803	-120	3,3803	300

TABELA XIV. TENSÕES NA BARRA 7 - 13,8 kV – COM REATOR SATURADO – DTT 10%

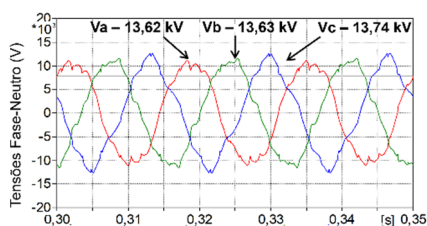
Barramento - Fases	Tensão Nominal (kV)	Nível de Carregamento na Barra 7					
		Leve			Pleno		
		Tensão Linha Eficaz (kV)	Desvio (%)	DTT (%)	Tensão Linha Eficaz (kV)	Desvio (%)	DTT [%]
7 - A	13,8	14,3	3,9	15,89	13,6	-1,3	9,72
7 - B	13,8	14,3	3,9	14,58	13,6	-1,2	7,81
7 - C	13,8	14,6	5,5	19,1	13,7	-0,4	11,6

TABELA XV. CORRENTES E POTÊNCIAS DO RNS – DTT 10%

Condições de carregamento	Corrente Fundamental			Potência Reativa [MVAR]
	Ia1 [A]	Ib1 [A]	Ic1 [A]	
Pleno	81,285	82,883	77,125	2,05
Leve	171,64	174,53	166,77	4,42



(a) Carregamento leve.



(b) Carregamento pleno.

Fig. 14. Formas de onda das tensões da barra 7 - 13,8 kV – com reator saturado – DTT 10%.

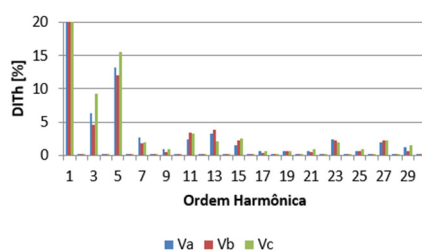
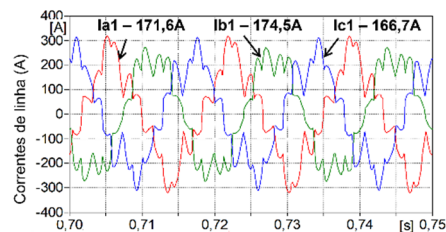
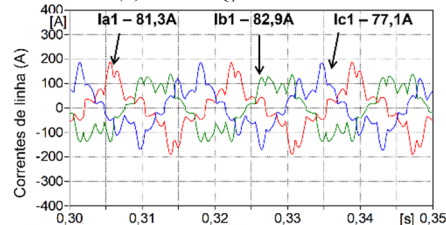


Fig. 15. Espectro harmônico das tensões nos terminais do reator saturado - barra 7 - 13,8 kV – DTT 10% - carregamento leve.



(a) Carregamento leve.



(b) Carregamento pleno.

Fig. 16. Formas de onda das correntes do RNS – DTT 10%.

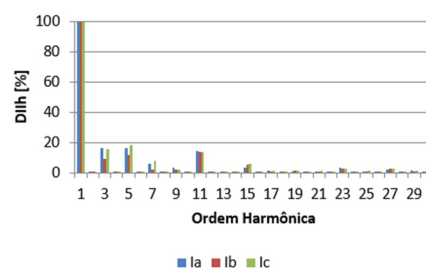


Fig. 17. Espectro harmônico das correntes do RNS – DTT 10% - carregamento leve

Como para os demais estudos, constata-se a presença das componentes harmônicas de ordem 11, 13, 23 e 25, além daquelas componentes harmônicas impostas à rede nas condições pré-operação do reator (ordens 3, 5, 7, 9). Para a condição de carregamento leve a DTT verificada foi de 26,7%, enquanto na condição de carregamento pleno, foi obtido 39,2%.

C-3 - Rede com ocorrência de Variação de Tensão de Curta Duração - VTCD

Avançando nas investigações e, a partir das condições iniciais e ideais da rede, foi então estabelecida uma falta na forma de um curto-circuito fase-terra ocorrido no barramento 7. A Tabela XVI apresenta as características do evento imposto.

Como resultado do fenômeno acima descrito, as tensões do barramento 7 apresentaram afundamentos temporários de tensão (VTCD), como indicado na Tabela XVII. Destaque é feito ao fato que, na tabela, tem-se as tensões durante a falta e também após sua eliminação.

Os oscilogramas das tensões diante do distúrbio imposto encontram-se apresentados nas Fig. 18 e 19, as quais evidenciam, respectivamente, as tensões na barra 7 e as correntes no reator. Os desempenhos apresentados através dos oscilogramas mostram que o RNS, embora submetido aos efeitos transitórios decorrentes do distúrbio, se manteve em plena operação, indicando pleno restabelecimento de suas condições de funcionamento após a eliminação da falta.

TABELA XVI. CARACTERÍSTICAS DO VTCD PROMOVIDO PELO CURTO CIRCUITO FASE-TERRA

Informações do curto-circuito	
Tipo de curto	Fase terra com impedância
Informações de manobra	
Início do curto	0,6 s

Término do curto	0,65 s
Informações da impedância de curto-circuito	
Tipo de impedância	Monofásica RLC - ATPDraw
R1	0,01 ohms
L1	10 mH
VTCD equivalente pretendido	
Tipo de VTCD	Afundamento Monofásico
Duração	3 ciclos ou 0,5 s
Magnitude	0,4 pu
Tensão nominal da barra 7	13,8 kV

TABELA XVII. SÍNTESE DOS RESULTADOS DAS TENSÕES NA BARRA 7 COM REATOR SATURADO – VTCD PARA 0,4 PU - CURTO FASE-TERRA

Barra - Fase	Tensão Nominal (kV)	Nível de Carregamento na Barra 7			
		Leve – durante VTCD		Leve – após VTCD	
		Tensão Fase (kV)	Desvio (%)	Tensão Fase (kV)	Desvio (%)
7 - A	13,8	3,2	-59,7	8,2	3,2
7 - B	13,8	8,1	+1,8	8,2	3,2
7 - C	13,8	7,2	-10,0	8,2	3,2

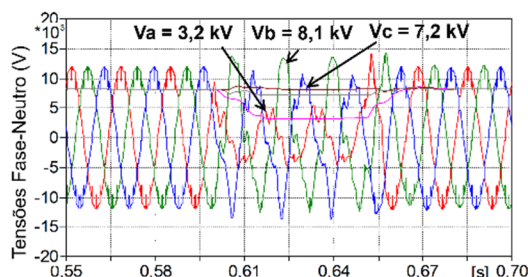


Fig. 18. Formas de onda das tensões – barra 7 - 13,8 kV – com reator saturado – VTCD para 0,4 pu.

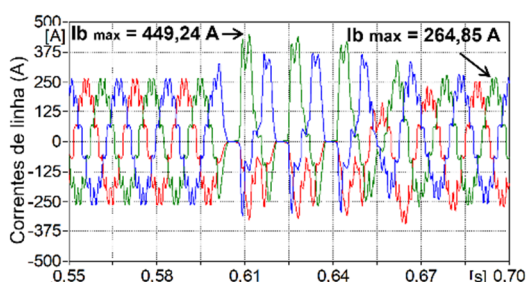


Fig. 19. Formas de onda das correntes solicitadas pelo RNS – barra 7 - 13,8 kV - VTCD para 0,4 pu.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho, focado na questão operacional dos reatores à núcleo saturado, contemplou, sobremaneira, a avaliação do desempenho do compensador sob condições não-ideais impostas pela rede elétrica de conexão. Para tanto, foram avaliadas as condições operativas do equipamento e sua eficácia diante da manifestação de desequilíbrios de tensão, distorções harmônicas de tensão e também diante da incidência de uma variação de tensão de curta duração.

Os resultados obtidos sob condições de funcionamento sob uma alimentação ideal ratificaram a presença das componentes harmônicas definidas pela expressão ($n=12\pm 1$), portanto, um comportamento similar aos conversores eletrônicos de 12 pulsos. Todavia, uma vez impostas as condições não-ideais avaliadas no trabalho, outras componentes harmônicas se fizeram presentes, além das já conhecidas características. Um aspecto importante é que apenas ordens ímpares surgiram, em adição àquelas já

previstas no funcionamento normal. Isto determina, pois, que quando da análise dos efeitos de um compensador à base de reatores saturados, os estudos de harmônicos deverão contemplar, também, tais componentes de frequência.

Uma outra avaliação de desempenho, focada na ocorrência de VTCD, foi realizada com vistas a identificar as condições transitórias impostas sobre o equipamento regulador e a rede como um todo. Os resultados obtidos mostraram que, não obstante os picos mais elevados constatados para as tensões e correntes, seus valores não representam motivo de maiores preocupações, a exemplo dos fenômenos associados com energização de transformadores ou outros.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam gratidão à Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia – COELBA/Neoenergia, pelo apoio ao projeto de P&D firmado com a UFU:PD-00047-0095/2023 intitulado “Alocação Otimizada de Reatores Saturados Cabeça de Série em Redes de Distribuição Multirramais para Regulação da Tensão”, através do qual foram realizados os desenvolvimentos aqui relatados.

REFERÊNCIAS

- [1] I. STANDARD, IEC 60038, Ed. 6.2, 1997.
- [2] 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.
- [3] A. B. VASCONCELLOS, “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, 2009.
- [4] J. A. F. BARBOSA JUNIOR, “Performance Analysis and Computational Model Validation of a Real Scale Saturated Core Reactor,” *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] A. M. BRYANTSEV. **Magnetically Controlled Electrical Reactors**. Moscou, Rússia: Znack, 2012.
- [7] M. A. C. Jr. e L. A. M. FONTE, “Increasing the Capacity of Long EHV Transmission Lines by Saturated Reactors”, *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] L. Mandache e K. Al-Haddad. “High Precision Modeling of Saturable Transformers used as Voltage Regulators,” *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 2695-2699, 9-13 Julho 2006.
- [10] C. S. Chaves, J. C. Oliveira, M. L. R. Chaves e A. C. Santos. “Saturated Core Voltage Regulators: Parametrization, Computational Models and Performance Studies”, *European Transactions on Electrical Power*, pp. 1-12, 2016.
- [11] BARBOSA JR., J. A. F. *Uma Contribuição para a Modelagem, Construção e Análise de Desempenho de Compensadores de Tensão a Reator Saturado*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, Brasil, 2013.
- [12] C. S. CHAVES. *Projeto, Modelagem e Avaliação da Eficácia dos Reatores a Núcleo Saturado ao Processo da Regulação de Tensão*. Uberlândia: Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2016