

Uma Proposta para a Melhoria do Desempenho de Sistemas de Transmissão Radiais em 230 kV sob o Ponto de Vista do Controle da Tensão: Reator a Núcleo Saturado

A. B. Vasconcellos, *Dr*; R. Apolônio, *Dr*; J. C. Oliveira, *PhD*; M. K. Kawaphara, *Dr*; J. E. Carvalho, *Eng.*; J. M. Pacheco, *MSc*; I. A. Bacca, *Acad.*

Resumo - Este artigo apresenta considerações teóricas assim como também resultados relacionados com a implementação computacional de um compensador estático constituído por um Reator à Núcleo saturado (RNS). A modelagem do equipamento é direcionada ao simulador ATP, base esta que permite distintos estudos de desempenho do sistema e equipamento através da representação no domínio do tempo. Utilizando tais recursos procede-se a um conjunto de estudos investigativos que compreendem a operação de um sistema de transmissão radial com a inserção do mencionado dispositivo de compensação. Os resultados apresentados e discutidos ilustram a eficácia do modelo implementado e seus impactos sobre a dinâmica operacional do sistema, no que tange às variações de tensão.

Palavras-chave – Compensação Estática, Reatores Saturados, Modelagem, Controle de Tensão.

I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro é caracterizado por um expressivo número de linhas de transmissão longas. Isto se deve, dentre outros aspectos, a sua vasta extensão territorial, pela concentração do consumo de energia em regiões específicas, e pela geração predominantemente hidrelétrica. Uma das singularidades dos sistemas de transmissão longos em alta tensão está nas dificuldades inerentes à regulação de tensão junto às barras de consumo, tanto em regime permanente como sob condições transitórias.

Na operação em vazio ou em carga leve, vigente por ocasião das energizações ou como consequência das rejeições de carga, a capacitância associada a essas linhas de grande extensão impõe, freqüentemente, elevações na tensão das barras que superam os valores pré-definidos pelo órgão regulador (ANEEL). Por outro lado, quando funcionando na plenitude da carga, muitas vezes registra-se um comportamento inverso, ou seja, uma redução drástica da tensão. Objetivando a conformidade dos padrões de tensão, uma das soluções mais comuns encontra sustentação na compensação de reativos. De fato esta é uma das práticas mais comuns entre as concessionárias nacionais responsáveis pela geração e transmissão de energia elétrica. Dentre os mecanismos utilizados para tanto se destaca, como princípio, o emprego de compensadores fixos ou outros com características variáveis.

No contexto dos dispositivos dinâmicos, os reatores controlados a tiristores operando em conjunto com um banco de capacitores fixos ou chaveados têm sido largamente utilizados por muitas empresas. Esta tecnologia, surgida nos anos 80 ainda se destaca como uma alternativa altamente atrativa para muitas aplicações. Na atualidade aparecem outros dispositivos de chaveamento envolvendo tecnologias mais modernas associadas com inversores estáticos a IGBT, GTO e outros, equipados com avançadas técnicas de controle. Não obstante os pontos positivos relacionados com os dispositivos baseados na tecnologia de chaveamento eletrônico existem aplicações para as quais a utilização de soluções mais simples, de menor custo de investimento e de manutenção e outros aspectos, podem ser altamente relevantes. Nestas situações surge à idéia do uso de um princípio já bastante difundido na engenharia elétrica, qual seja, do emprego de dispositivos compensadores baseados na saturação magnética de reatores e sua operação em paralelo com bancos de capacitores. O efeito final é similar àquele obtido com

Este trabalho conta com o suporte financeiro da Eletronorte através do programa de P&D com a participação da UFMT e UFU.

J. C. de Oliveira trabalha na Universidade Federal de Uberlândia (e-mail: jcoliveira@ufu.br).

A. B. de Vasconcellos, J. M. Pacheco, M. K. Kawaphara e R. Apolônio trabalham na Universidade Federal de Mato Grosso (e-mails: arnulfo@ufmt.br Jackson@ufmt.br apolonio@cpd.ufmt.br kiyoshi@cpd.ufmt.br).

J. E. Carvalho trabalha na Eletronorte (joseduardo@eln.gov.br)

a tecnologia eletrônica, com a diferença que a compensação reativa variável não requer dispositivos de chaveamento e sofisticados sistemas de controle. Um dos pontos de maior importância deste produto refere-se, além dos custos e simplicidade, sua capacidade de promover um controle de tensão de forma intrínseca ao seu princípio construtivo.

A não linearidade da curva $B \times H$ do material constituinte do núcleo magnético define uma das mais importantes propriedades operativas do dispositivo. Devido a este fato, a corrente harmônica produzida pelo equipamento não deve ser esquecida quando o desempenho global do equipamento é considerado [1],[2]. Tal equipamento não é novo e já foi empregado há cerca de quatro décadas quando a tecnologia de semicondutores era ainda embrionária. No entanto, a sua utilização não foi amplamente difundida nos sistemas de energia, principalmente devido à opção oferecida pelo compensador estático tiristorizado.

O compensador estático a núcleo saturado fundamenta-se numa combinação de um núcleo magnético com características e enrolamentos especiais [3],[4],[5]. Esta propriedade construtiva proporciona um equipamento robusto, com reduzida manutenção, boa eficiência na regulação de tensão e pequeno tempo de resposta. Tais vantagens, adicionadas ao baixo custo em comparação às alternativas eletrônicas, tornam estes dispositivos atrativos para uso em sistemas elétricos radiais.

Focando, pois o emprego destes equipamentos, este artigo tem por objetivo apresentar resultados de estudos de desempenho, via modelagem ATP, deste tipo de compensador e seus impactos num sistema de transmissão típico da rede nacional. Para tanto é utilizada uma linha de Transmissão da ELETRONORTE entre as cidades de Cuiabá e Sinop no Estado de Mato-Grosso. As investigações têm por propósito a avaliação da eficácia do compensador a núcleo saturado na regulação de tensão da unidade sob foco. Diferentes casos, compreendendo elevações de tensões, sob condições ideais, são considerados nas simulações.

Os princípios básicos e características de funcionamento do compensador estático de reator à núcleo saturado, assim como, o seu modelo físico e o seu correspondente diagrama de blocos foram tratados em [5], motivo pelo qual não serão inseridas no presente trabalho.

II. ESTUDOS COMPUTACIONAIS

Esta seção é voltada para os estudos relacionados com o desempenho do RNS no sentido de compensar condições diversas na rede de suprimento, tais como, elevações momentâneas e equilibradas de tensão.

O diagrama unifilar do sistema simulado é apresentado na Figura 1 cujos dados simplificados encontram-se na tabela 1.

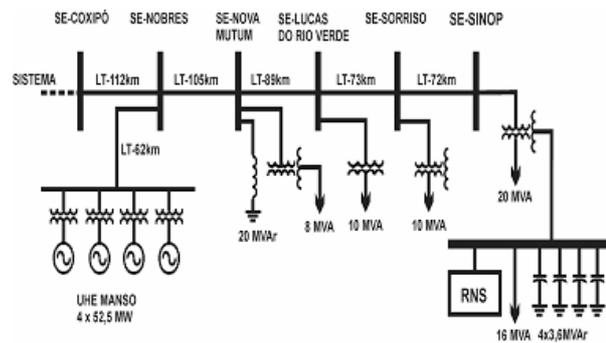


Fig.1 – Sistema elétrico utilizado na simulação

Tabela 1 – Dados do Sistema

Dados	Potência (MVA)	Fator de Potência	Tensão (kV)	Potência (MVAr)	Distância (Km)
Carga	20,0	0,8	138	-	-
Carga	16	0,8	13,8	-	-
Banco Capacitor Paralelo (C_p)	-	-	13,8	4x3,6	-
Compr. da linha	-	-	-	-	451
Reator Twin-Tripler	20,0	-	13,8	-	-

A. Elevação de Tensão sem a presença do RNS

Neste caso, as análises envolvem os efeitos da elevação momentânea de tensão sobre o barramento da cidade de Sinop na rede básica de 230 kV, quando da ausência do RNS. Nesse sentido, em $t=1s$ é provocada a ocorrência de tal evento, com a retirada de 80% da carga presente no secundário e terciário do transformador da cidade de Sinop, que provocou uma elevação de 8,8% na tensão com duração de 1,0 segundo.

Os perfis das tensões entre fases no barramento 230kV de Sinop, durante todo o intervalo de simulação (entre 0,0 e 3,0s), provenientes de tais manobras, encontram-se apresentada na Figura 2.

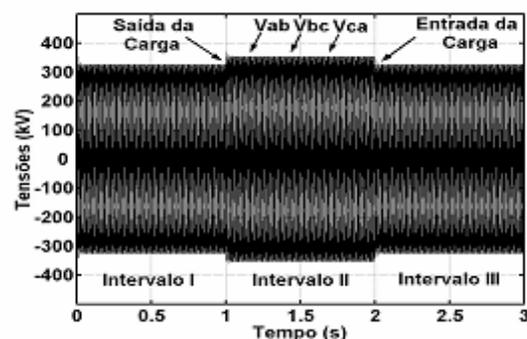


Fig.2- Tensões entre fases no barramento 230 kV da cidade de Sinop – alívio de carga sem o RNS.

As Figuras 3 (a) e (b) ilustram, respectivamente, detalhes das tensões em Sinop para duas condições, uma normal e outra sob a ação do alívio repentino da carga. Os resultados refletem o desempenho da tensão sem a presença do RNS. Como se constata, não houve um controle de tensão no barramento. O seu valor inicial, em torno de 230kV (1 p.u.), no intervalo de

0,0 a 1,0s, foi elevado para 250,3kV (1,08 p.u.), no intervalo de 1,0 a 2,0s. Esta tensão retoma o seu valor inicial, após o religamento da carga, que ocorrem em $t \geq 2,0s$, como mostra a figura 2.

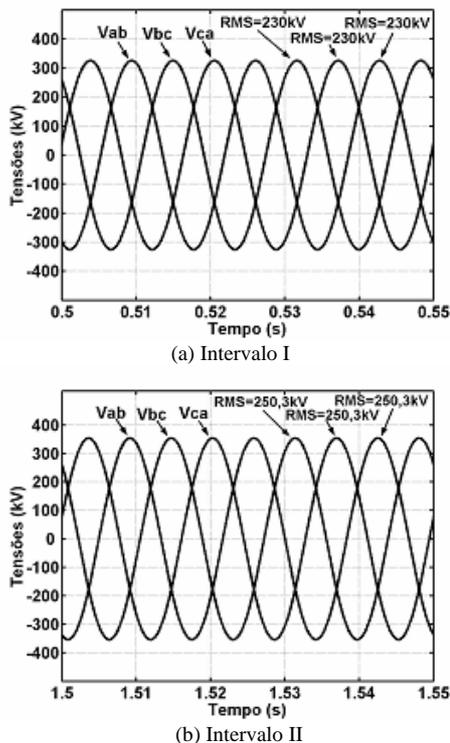


Fig.3- Tensões entre fases no barramento 230kV da Cidade de Sinop – detalhes para as condições: (a) com carregamento normal e (b) com alívio de carga – sem a presença do RNS.

Os efeitos sobre as tensões do lado de 138kV de Sinop, durante todo o intervalo de simulação (entre 0,0 a 3,0s), provenientes de tais manobras, encontram-se apresentados na Figura 4.

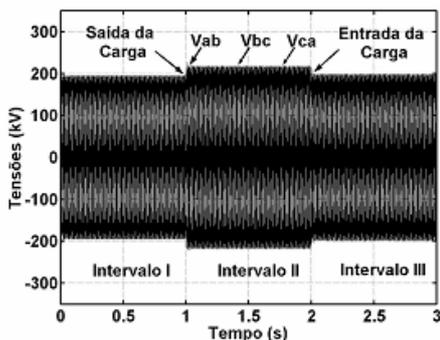


Fig. 4- Tensões no barramento 138 kV da cidade de Sinop – alívio de carga sem o RNS.

Como anteriormente realizado para o barramento de 230 kV, as figuras 5 (a) e (b) fornecem detalhes sobre as tensões nas duas regiões, uma com a carga normal e outra com a sua retirada e respectiva manifestação da elevação da tensão. Como se constata, a tensão no barramento de 138kV em Sinop, que se encontrava em 138kV (1 p.u.), no intervalo de 0,0 a 1,0s, foi elevada para 153,7kV (1,11 p.u.), no intervalo de 1,0 a 2,0s.

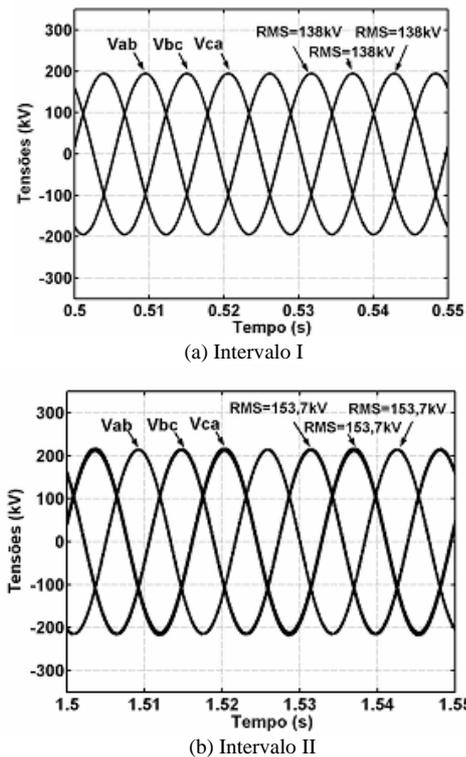


Fig. 5- Tensões entre fases no barramento 138kV da Cidade de Sinop - detalhes para as condições: (a) com carregamento normal e (b) com alívio de carga – sem a presença do RNS.

Avançando na direção da rede de distribuição na cidade de Sinop, a Figura 6 destaca os perfis das tensões entre fases do barramento 13,8kV durante todo o intervalo de simulação (entre 0,0 e 3,0s).

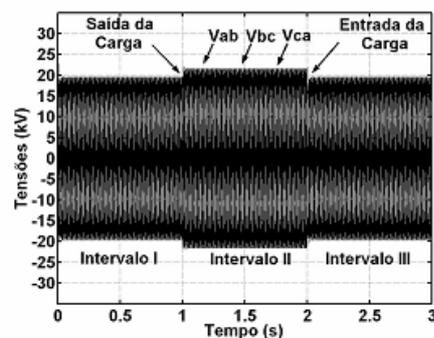
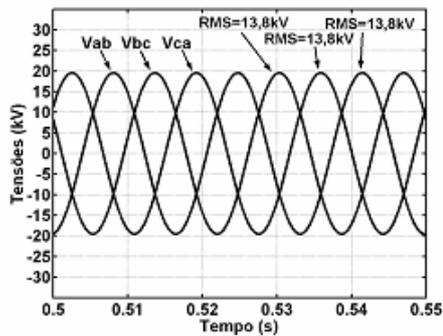
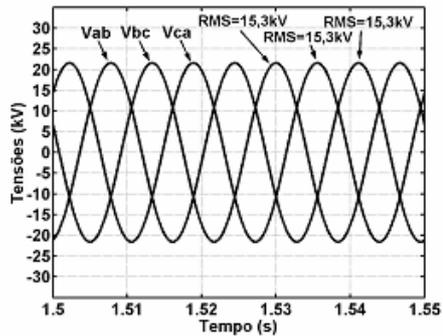


Fig.6- Tensões no barramento 13,8 kV da cidade de Sinop – alívio de carga sem o RNS.

Seguindo a mesma estratégia anterior, as Figuras 7 (a) e (b) mostram detalhes da tensão na rede de distribuição, considerando os dois momentos focados nos estudos. Como se observa, o valor de 13,8kV (1 p.u.), no intervalo de 0,0 a 1,0s, foi incrementado para 15,3kV (1,1 p.u.), no intervalo de 1,0 a 2,0s.



(a) Intervalo I



(b) Intervalo II

Fig. 7- Detalhes das tensões no barramento 13,8kV da Cidade de Sinop: (a) com carregamento normal e (b) com alívio de carga – sem a presença do RNS.

B. Elevação de Tensão com a Presença do RNS

Da mesma forma procedida na seção anterior, o comportamento da tensão nos barramentos de 230 kV, 138 kV e 13,8 kV, sob a ação de um reator saturado de 20 MVar, foi também simulado. A localização física do reator pode ser observada na Figura 1, que mostra sua inserção na barra de 13,8 kV. As condições operativas são as mesmas já discutidas.

Diante disso, a Figura 8 exibe as formas de onda das tensões para o barramento de 230kV de Sinop, durante todo o intervalo de estudo (entre 0,0 e 3,0s).

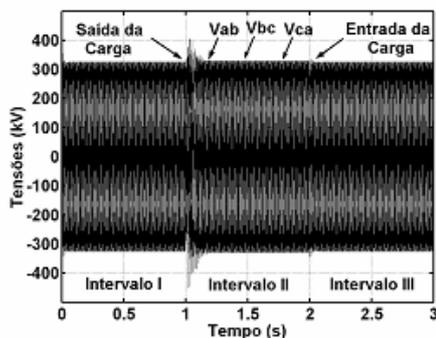
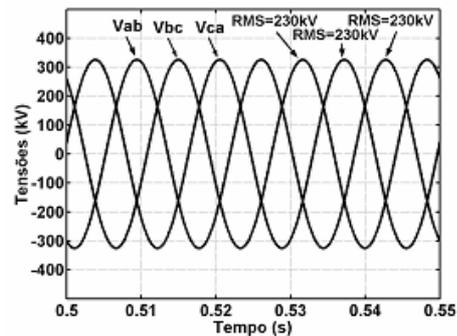
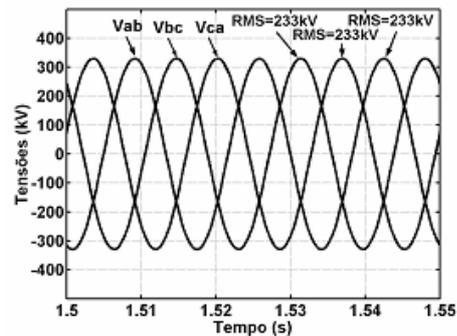


Fig. 8 – Tensões no barramento 230kV na Cidade Sinop – alívio de carga com o RNS.



(a) Intervalo I



(b) Intervalo II

Fig. 9– Tensões no barramento 230 kV na Cidade Sinop - detalhes para as condições: (a) com carregamento normal e (b) com alívio de carga – com a presença do RNS.

Baseando-se nas Figuras 9 (a) e (b), pode-se constatar a eficácia do RNS em manter a tensão no barramento da subestação da cidade de Sinop. Esta que era inicialmente de 230kV (1,0 p.u.) foi elevada para 233kV(1,013p.u.), mesmo durante a retirada momentânea de 80% da carga. Esta tensão retorna o seu original, apenas quando o referido distúrbio é eliminado em $t \geq 2,0s$ como mostra a figura 8. Nestes termos, verifica-se que o reator, agindo no sentido de absorver reativos do sistema, ofereceu a compensação almejada para a tensão final de operação.

No que tange ao barramento de 138kV de Sinop, durante o intervalo de estudo (entre 0,0 e 3,0s), a Figura 10 indica as tensões obtidas. Também, visando o fornecimento de maiores detalhes sobre o desempenho das tensões durante o fenômeno causado pelo alívio momentâneo da carga, as Figuras 11 (a) e (b) esclarecem sobre os níveis de tensão obtidos e ratificam as conclusões anteriores.

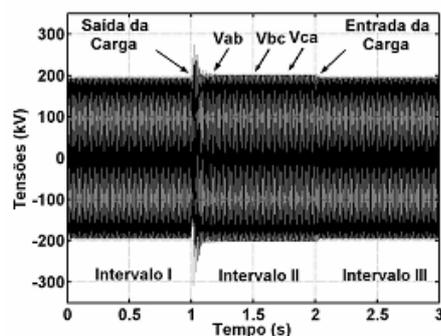


Fig. 10 – Tensões no barramento 138kV na Cidade Sinop – alívio de carga com o RNS

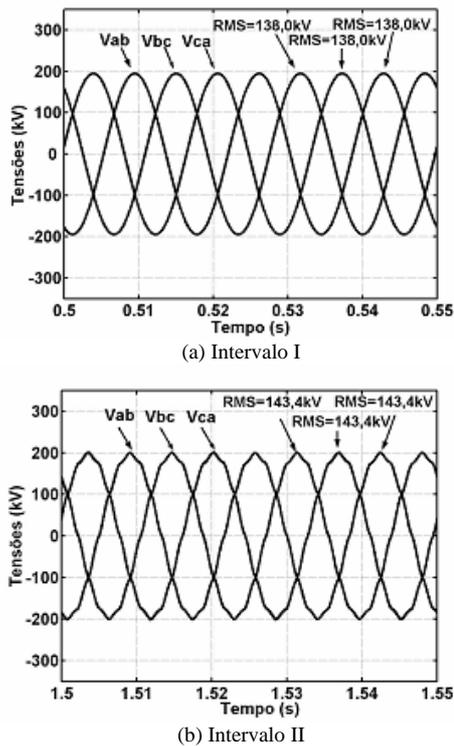


Fig. 11– Tensões no barramento 138 kV na Cidade Sinop - detalhes para as condições: (a) com carregamento normal e (b) com alívio de carga – com a presença do RNS.

Os resultados anteriores destacam que a tensão inicial de 138kV (1,0 p.u.) foi elevada para 143,4kV (1,03p.u.), mesmo durante a retirada momentânea de 80% da carga. Esta tensão retoma o seu original, apenas quando o referido distúrbio é eliminado em $t \geq 2,0s$ como mostra a figura 10.

A figura 12 destaca as tensões registradas no barramento de 13,8kV de Sinop, durante todo o intervalo de estudo (entre 0,0 e 3,0s).

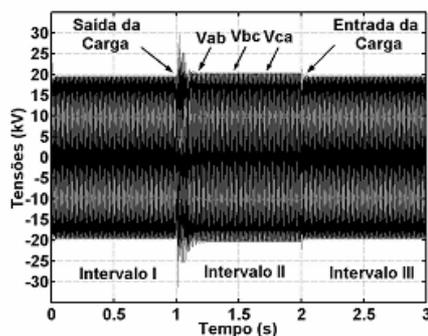


Fig. 12 – Tensões entre fases no barramento 13,8kV na Cidade Sinop – alívio de carga com o RNS

Complementarmente, as Figuras 13(a) e (b), ressaltam os resultados para os momentos anteriores e posteriores ao alívio de carga.

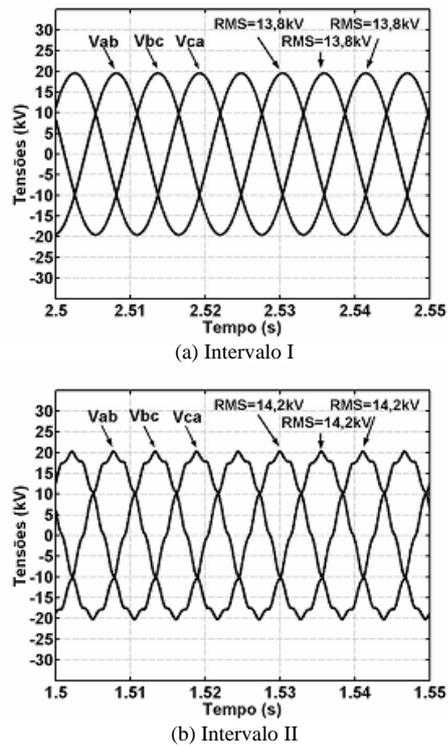


Fig. 13– Tensões no barramento 13,8 kV na Cidade Sinop - detalhes para as condições: (a) com carregamento normal e (b) com alívio de carga – com a presença do RNS.

Observa-se que, no que tange ao barramento 13,8kV, a tensão inicial de 13,8kV (1,0 p.u.) foi elevada, durante o distúrbio, para 14,2kV (1,028 p.u.). Este valor retoma o seu nível original, apenas quando o referido distúrbio é eliminado em $t \geq 2,0s$. Desta forma constata-se, mais uma vez, que o reator foi efetivo no controle da tensão. Vale observar que, quando da ausência do reator, a tensão havia sido elevada para 15,3 kV.

Um ponto relevante a ser ressaltado para este último barramento refere-se à questão das distorções harmônicas detectadas. De fato, ao se observar os resultados relativos à Figura 13(b) são evidentes as distorções anteriormente não registradas. Esta constatação é esperada quando se considera o princípio operacional do equipamento de compensação utilizado. Este, conforme estabelecido pela teoria clássica que rege o assunto, produz, quando de sua operação, correntes harmônicas cujas ordens são similares àquelas relacionadas com um sistema retificador de 12 pulsos. Portanto, as frequências esperadas mais significativas correspondem às ordens 11 e 13, o que está em consonância com o desempenho esperado de um reator trifásico tipo Twin-Tripler, o qual, idealmente, gera harmônicos de ordem $(12K \pm 1)$ [4], sendo K um número inteiro positivo qualquer.

Processando o sinal de tensão, à nível de 13,8 kV, obtém-se o espectro de frequências indicado na Figura 14. Esta ratifica as observações anteriores.

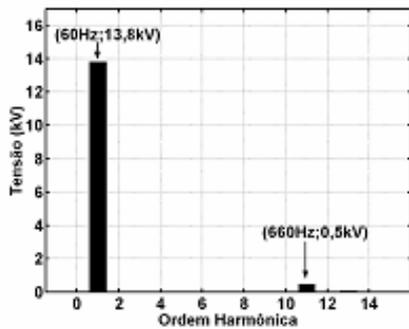


Fig. 14- Espectro harmônico da tensão do barramento 13,8 kV na Cidade Sinop - durante atuação do RNS.

III. CONCLUSÕES

Este artigo teve por foco principal apresentar os resultados obtidos para o desempenho operacional de um sistema elétrico compreendendo o suprimento à nível de 230kV, 138 kV e 13,8 kV. Este arranjo, correspondente a alimentação da cidade de Sinop – MT, tem sido alvo de estudos e soluções voltadas para o controle da tensão. O tipo de compensação investigado contemplou uma solução não convencional para os dias atuais, a qual se fundamenta no emprego de compensadores de reativos à base da saturação magnética. Este dispositivo foi modelado nos termos exigidos pelo simulador ATP e estudos investigativos, envolvendo os efeitos causados por alívios de carga, foram considerados. A presença do reator saturado se mostrou bastante efetiva no processo da compensação, e o emprego desta alternativa se mostra promissor para aplicações específicas, como a aqui analisada.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Oliveira, J. C., Vasconcellos, A. B., Apolônio, R. – Compensador Estático a Reator Saturado: Geração Harmônica Sob Condições Ideais e Não Ideais de Suprimento. V SBQEE, Aracaju – Sergipe – Brasil, 17 a 20 de Agosto de 2003.
- [2] J. C. Oliveira, A. B. Vasconcellos, R. Apolônio; “Análise do Desempenho Dinâmico de um Compensador Estático a Reator a Núcleo Saturado”; VI SBQEE, Aracaju-SE, Brasil, Agosto/2005.
- [3] J. C. Oliveira, A. B. Vasconcellos, R. Apolônio; “Saturated Core Reactor Static Compensator: Computational Analysis Versus Experimental” (in Portuguese), XV CBA, Gramado-RS, Brazil, September/2003.
- [4] M. A. Carvalho; “Application of Saturated Reactors in Systems of Transmission” (in Portuguese), XIII SNPTEE, Camboriú-SC, Brazil, October/1995.
- [5] E. Friedlander, K. M. Jones; “Saturated reactors for Long Distance Bulk Power Lines”; Electrical Review, 27th June/1969, pp 940 – 943.

V. BIOGRAFIAS



Jose C. Oliveira nasceu em Itajuba–MG, Brazil. Obteve os títulos de Bacharel e Mestre na Universidade Federal de Itajubá-Brasil e o título de PhD na Universidade de Manchester – Instituto de Ciência e Tecnologia – Manchester – Reino Unido. Atualmente é pesquisador na Faculdade de Engenharia Elétrica, na Universidade Federal de Uberlândia-Brasil.



Arnulfo Barroso de Vasconcellos nasceu em Corumbá-MT, Brasil. Obteve o título de bacharel em engenharia elétrica em 1980 na Universidade Federal de Mato Grosso, o título de mestre em 1987 na Universidade Federal de Uberlândia – Brasil e o título de Doutor em 2004 na Universidade Federal de Uberlândia.



Roberto Apolônio nasceu em Lucélia-SP, Brasil. Obteve o título de bacharel em engenharia elétrica em 1981 na Universidade Federal de Mato Grosso, o título de mestre em 1988 na Universidade Federal de Santa Catarina-Brasil e o título de Doutor em 2004 na Universidade de Uberlândia – Brasil.



Mário Kiyoshi Kawaphara, obteve o título de bacharel em engenharia elétrica em 1980 na Universidade Federal de Mato Grosso, o título de mestre em 1993 na Universidade Estadual Paulista-Brasil e o título de Doutor em 1997 na Universidade Estadual Paulista – Brasil. Atualmente é professor e pesquisador da Faculdade de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Mato Grosso- Brasil.



Ivandro Antonio Bacca nasceu em Coronel Vivida – PR, Brazil. Ele é graduando do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso. Ele atualmente é possuidor de uma bolsa de pesquisa na área de qualidade de energia da Faculdade de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Mato Grosso – Brasil. Seus principais interesses são na área de qualidade de energia.



Jackson Marquês Pacheco nasceu em Cuiabá–MT, Brazil. . Obteve o título de bacharel em engenharia elétrica em 1980 na Universidade Federal de Mato Grosso; o título de mestre em 2000 na Universidade Federal de Mato Grosso – Brasil e Doutorando em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Uberlândia.



José Eduardo de Carvalho nasceu em Monte Aprazível-SP. Obteve o título de bacharel em engenharia elétrica em 1981, pela Escola de Engenharia de São Carlos-USP. Trabalha como Engenheiro Eletricista na Eletronorte desde 1989.