



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 03 075

Tópico: Modelagens e Simulações

COMPENSADOR ESTÁTICO A REATOR SATURADO: GERAÇÃO HARMÔNICA SOB CONDIÇÕES IDEAIS E NÃO IDEAIS DE SUPRIMENTO

José Carlos de Oliveira, PhD
UFU

Arnulfo Barroso De Vasconcellos, MSc*
UFMT

Roberto Apolônio, MSc
UFMT

RESUMO

Este artigo apresenta uma análise sobre compensadores estáticos a reatores saturados em relação a sua geração de harmônico sob condições ideal e não ideal de tensão de suprimento. Este tipo de dispositivo eletromagnético tem mostrado ser bem eficaz quando ocorre suprimento de tensões senoidais equilibradas, mas esta situação ideal é difícil de ser encontrada em sistemas reais. Portanto, é apresentado um modelo trifásico para o equipamento no domínio do tempo e sua implementação no simulador Saber. Diferentes estudos compreendendo as condições ideais e não ideais de suprimento são então consideradas e a geração de harmônicos do compensador é avaliada.

PALAVRAS-CHAVE

Controle de Tensão, Reator Saturado, Compensação Reativa, Qualidade de Energia, Harmônicos.

1.0 INTRODUÇÃO

Os sistemas de potência devem ser planejados e operados de forma tal a fornecer aos seus usuários níveis de qualidade dentro dos padrões aceitos, sendo o nível de tensão um importante fator a ser considerado. A demanda crescente da potência dos sistemas elétricos tem levado os especialistas a tratar o controle da potência reativa e da tensão com mais rigor, principalmente em sistemas elétricos com características radiais e sazonais. Neste contexto, surgem inúmeras soluções, algumas tradicionais (p.e., unidades capacitivas automáticas e compensadores síncronos) e outras envolvendo as mais modernas técnicas da eletrônica, como é o caso dos modernos UPF's. Para algumas

necessidades específicas, tais como áreas com baixa densidade populacional, como encontradas em muitas linhas de transmissão rurais, o uso de compensador baseado na eletrônica são atrativos tecnicamente, contudo, exige necessidades de manutenção, que associado ao alto custo, pode tornar-se uma solução proibitiva. Para tais tipos de aplicação, o desafio consiste em achar uma alternativa mais simples, econômica e robusta, contanto que o dispositivo tenha baixo custo de manutenção e desempenho efetivo bom. Conciliando pois estas propriedades, nasce a idéia de utilizar um dispositivo eletromagnético, o qual já foi empregado no início dos anos 70 quando a tecnologia dos semicondutores era embrionária. O citado compensador estático fundamenta-se numa combinação de um núcleo magnético com características e enrolamentos especiais e um conjunto de capacitores em série e paralelo com o mencionado dispositivo. A isto se atribui a robustez do equipamento, reduzida manutenção, boa eficiência na regulação de tensão e pequeno tempo de resposta. Essas características adicionadas ao baixo custo em comparação as alternativas eletrônicas tornam estes dispositivos atrativos para uso em sistemas elétricos como acima mencionados. A não linearidade da curva BxH 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. Este assunto tem sido largamente discutido na literatura [1],[2],[3],[4],[5],[6], mas somente para condições de tensão de suprimento senoidal e equilibrada. Reconhecendo que freqüentemente os sistemas elétricos reais operam sobre condições não ideais de tensão, este artigo apresenta um modelo trifásico para o equipamento, no domínio do

tempo, e sua implementação computacional no simulador Saber. Diferentes estudos compreendendo operação sob condições ideais e não são então consideradas e a geração de harmônicos do compensador avaliada a fim de estimar o comportamento do equipamento assim como a produção/compensação harmônica e sua correlação com a operação. É mostrado que a compensação harmônica interna idealizada e esperada através de arranjos especiais, como a configuração Twin-Tripler, não é tão efetiva sob condições não ideais de suprimento.

2.0 REATOR SATURADO: PRINCÍPIOS BÁSICOS E CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO

O reator saturado tem o seu núcleo de forma fechada como o de um transformador, sem enrolamento de potência no secundário. O material magnético não linear usado neste tipo de equipamento deve, idealmente, apresentar as seguintes propriedades:

- Alta permeabilidade na região não saturada;
- Efeito desprezível da histerese;
- Baixa permeabilidade na região saturada.

O aço-silício de grãos orientados laminado a frio embora não seja o ideal, atende, em parte, aos requisitos acima expostos.

A característica $V \times I$ do compensador é mostrada na figura 1. É possível observar que, antes de ser atingida a saturação, a indutância apresentada pelo reator vista pelo suprimento é alta e a corrente correspondente é baixa. Assim que a saturação é alcançada a indutância cai e a corrente associada é substancialmente aumentada. Desta maneira, o reator a núcleo saturado pode ser usado para compensar elevação de tensão quando um controle muito rígido não é exigido (ele é um consumidor natural de energia reativa).

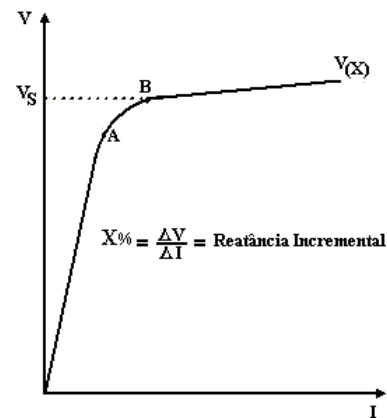


Figura 1 – Característica de Saturação

Com a inclusão de um capacitor paralelo (X_{CP}), como mostra a Figura 2, o novo arranjo pode tornar mais eficiente o controle de tensão. Além disso, com a instalação de um capacitor série em cada fase do reator, é possível melhorar a inclinação de sua curva característica. Valores adequados de capacitores são escolhidos de forma a obter-se uma característica de inclinação total que mantenha as oscilações de tensão dentro de limites bastante rígidos. As figuras 2 e 3 ilustram o arranjo completo. A figura 2 dá o diagrama esquemático do equipamento para uma fase e a figura 3 as características de operação.

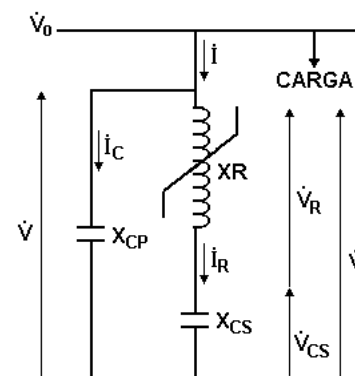


Figura 2 – Diagrama unifilar

Na figura 2 tem-se:

V_0 = Tensão do sistema CA no ponto de acoplamento do compensador;

I = Corrente no ramo entre o compensador e o sistema CA;

V = Tensão nos terminais do compensador;

V_R = Tensão nos terminais do reator;

V_{CS} = Tensão nos terminais do capacitor série;

I_C = Corrente no capacitor shunt;

X_R = Reatância do reator a núcleo saturado;

X_{CP} = Reatância do capacitor em paralelo para aumentar a flexibilidade de operação do compensador;
 X_{CS} = Reatância do capacitor série para melhorar a inclinação da curva característica, ou seja, seu estatismo.

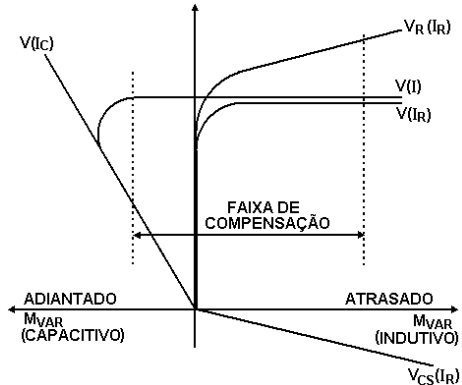


Figura 3 – Característica V x I do compensador estático a reator saturado

Na figura 3:
 $V_R(I_R)$ = característica tensão x corrente do reator saturado;
 $V_{CS}(I_R)$ = característica tensão x corrente do capacitor – série;
 $V(I_R)$ = característica tensão x corrente do conjunto reator + capacitor série;
 $V(I_C)$ = característica tensão x corrente do capacitor – shunt;
 $V(I)$ = característica tensão corrente do compensador (reator + capacitor série + capacitor paralelo).

3.0 MODELO DO REATOR SATURADO

A figura 4 mostra o modelo físico do reator à núcleo saturado Twin-Tripler e a figura 5 mostra o correspondente diagrama de blocos. Um arranjo de seis unidades é composto por dois reatores com três unidades cada. Cada unidade operará sobre as mesmas leis físicas, porém limitada por condições de fronteira. Essas dependerão do arranjo dos enrolamentos de cada unidade e do tipo de conexão usado. Twin-Tripler é o termo comum usado para o reator de seis unidades consistindo de dois enrolamentos zig-zag com ângulos de 30° entre eles e conectados em série. Através desses modelos, as características de regime permanente são analisadas e a avaliação de percentagem de harmônicos na corrente é estudada, tanto em condições ideais e não ideais de suprimento.

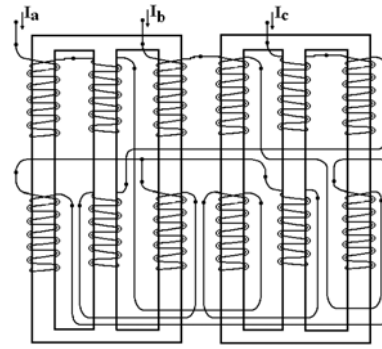


Figura 4 – Modelo físico do reator à núcleo saturado Twin-Tripler

Sendo as correntes i_A , i_B e i_C as correntes de linha do reator, estas podem ser dadas pelas seguintes expressões matemáticas[3]:

$$i_A(t) = 0,259 \frac{V}{\omega L} \text{sen}(\theta + 75^\circ) \quad (1)$$

$$i_B(t) = -0,966 \frac{V}{\omega L} \text{sen}(\theta + 75^\circ) \quad (2)$$

$$i_C(t) = 0,707 \frac{V}{\omega L} \text{sen}(\theta + 75^\circ) \quad (3)$$

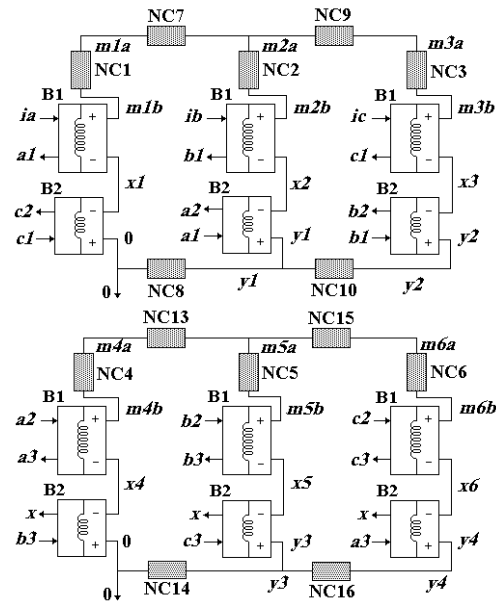


Figura 5 – Diagrama de bloco do reator à núcleo saturado Twin-Tripler implementado computacionalmente

Na figura 5:

- NC1 até NC16 = Núcleos magnéticos não lineares, modelados no simulador SABER utilizando a *template* “Nonlinear Core (corenl)”;
- $m1a$ até $m6a$, $m1b$ até $m6b$, $x1$ até $x6$, $y1$ até $y4$ e 0 = São pontos de conexão das partes do núcleo;

- B1 = Bobinas superiores que possuem um número de espiras n , sendo modelado no simulador SABER utilizando a *template* "Winding (wind)";
- B2 = Bobinas inferiores que possuem um número de espiras $0,366n$, sendo modelado no simulador SABER utilizando também a *template* "Winding (wind)";
- ia e $a1$, ib e $b1$, ic e $c1$, $c2$ e $c1$, $a2$ e $a1$, $b2$ e $b1$, $a2$ e $a3$, $b2$ e $b3$, $c2$ e $c3$, x e $b3$, x e $c3$, x e $a3$ = São pólos elétricos que representam a alimentação das bobinas do reator em uma ligação zig-zag com um defasamento angular de 30° entre cada conjunto, sendo ia , ib e ic modelados no simulador SABER utilizando a *template* "vsine". Os demais pontos são interligações entre bobinas.

4.0 CASOS ESTUDADOS

Para os estudos computacionais realizados utilizou-se de um compensador o qual foi submetido à diferentes condições de suprimento, conforme estabelece a Tabela 1.

Tabela 1 – Quadro resumo dos casos analisados

| Caso | Características da Tensão de Suprimento | Tipo de Estudo |
|------|--|-----------------|
| 1 | Característica Ideal | • Computacional |
| 2 | Desequilíbrio da Tensão de Suprimento 5% | • Computacional |
| 3 | Suprimento Contendo Distorção Harmônica | • Computacional |
| 4 | Afundamentos de Tensão Desequilibrados | • Computacional |

Genericamente, o diagrama unifilar do sistema simulado é apresentado na figura 6.

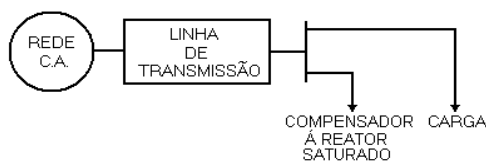


Figura 6 – Esquema do sistema elétrico utilizado na simulação

4.1 Caso 1

As tensões e correntes ilustradas nas figuras 7 e 8, expressam os resultados sob condições ideais para as tensões trifásicas de suprimento. O espectro harmônico da corrente da linha **a** é ilustrado na figura 9.

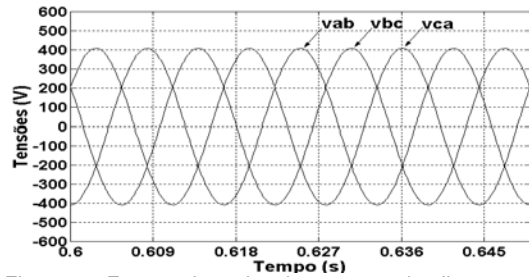


Figura 7 – Formas de ondas das tensões de alimentação do compensador em condições ideais de suprimento

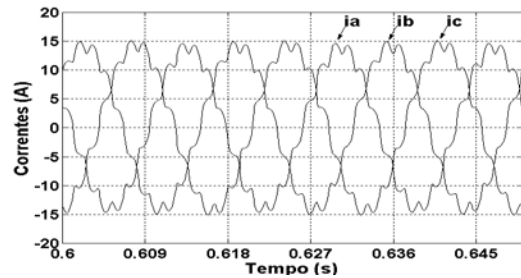


Figura 8 – Formas de ondas das correntes do compensador em condições ideais de suprimento

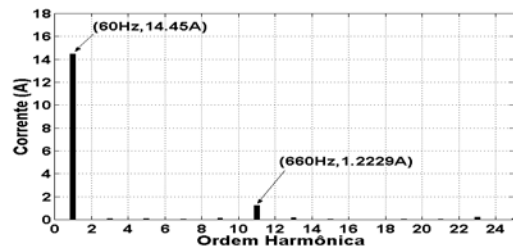


Figura 9 – Espectro harmônico da corrente da linha A do compensador em condições ideais de suprimento

O compensador apresentou na forma de onda da corrente a frequência fundamental e o 11º harmônico como o mais significativo. Isto ratifica que, sob as condições de suprimento ideal o compensador apresentou um desempenho considerado normal e esperado para o modelo Twin-Tripler. Este dispositivo, como se sabe, é responsável pela geração de harmônicos característicos de ordem $(12K \pm 1)$. Isto implica que as demais ordens harmônicas são canceladas através dos arranjos especiais dos núcleos e enrolamentos ilustrados na figura 4.

4.1 Caso 2

A figura 10 mostra as tensões trifásicas com um desequilíbrio de 5%. As correntes resultantes são indicadas na figura 11 e o espectro harmônico da corrente de linha **a** está indicado na figura 12.

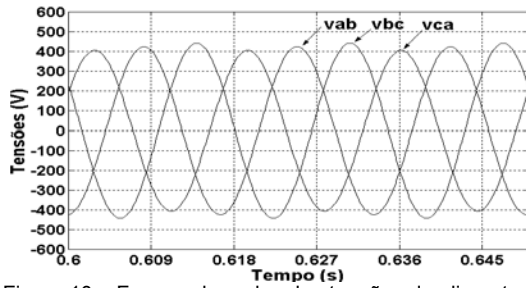


Figura 10 – Formas de ondas das tensões de alimentação do compensador com 5% de desequilíbrio na tensão de suprimento

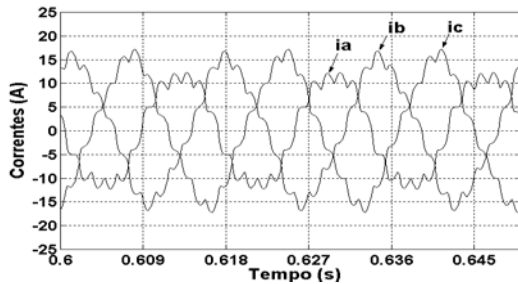


Figura 11 – Formas de ondas das correntes do compensador com de desequilíbrio de 5% na tensão de suprimento

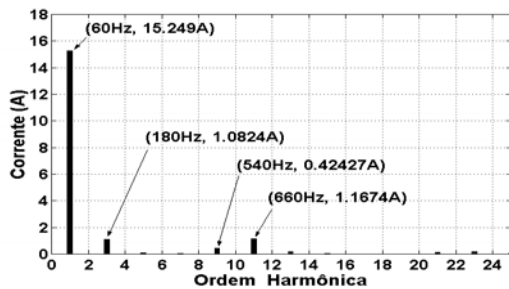


Figura 12 – Espectro harmônico da corrente da linha da fase a do compensador com desequilíbrio de 5% na tensão de suprimento

Sob as condições acima impostas, o compensador, além dos harmônicos característicos, produziu distorções de ordem 3 e seus múltiplos ímpares. Estes últimos são considerados não-característicos.

4.1 Caso 3

Na seqüência foi investigado o comportamento do compensador quando colocado em uma rede com a qualidade de energia comprometida pela presença do 5° e do 7° harmônico na tensão de suprimento, conforme ilustrado na figura 13.

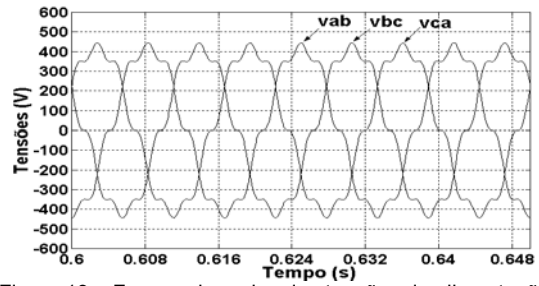


Figura 13 – Formas de ondas das tensões de alimentação do compensador contendo distorção do 5° e do 7° harmônicos

As correntes trifásicas resultantes e o espectro harmônico da corrente de linha da fase a estão ilustrados, respectivamente, nas figuras 14 e 15.

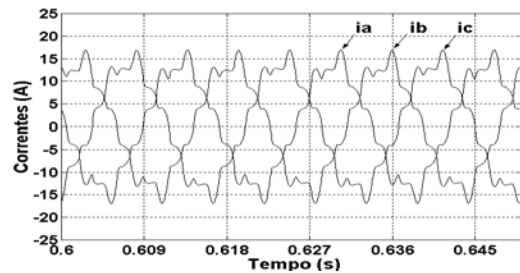


Figura 14 – Formas de ondas das correntes no compensador com o 5° e o 7° harmônicos na tensão de suprimento

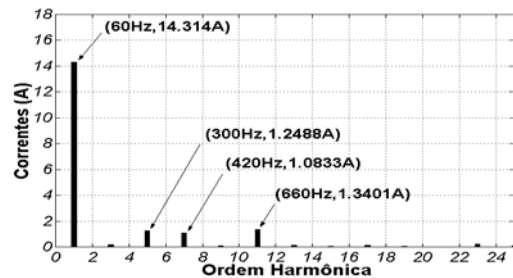


Figura 15 – Espectro harmônico da corrente da linha da fase a do compensador

Conforme mostrado, as distorções impostas sobre a tensão fundamental de suprimento, alteraram a forma de onda das correntes do compensador (figura 14). O espectro da corrente da linha a, figura 15, mostra que, além do 11° harmônico, que é característico para o tipo de reator usado, detectou-se, ainda, a presença dos 5° e o 7° harmônicos (ambos presentes na tensão de suprimento). Isto evidencia, mais uma vez, que os arranjos especiais dos núcleos e enrolamentos do reator Twin-Tripler cancelam somente os harmônicos de ordem 5 e 7 gerados pelo próprio dispositivo e não as distorções harmônicas que lhe são aplicadas através das tensões de suprimento.

4.1 Caso 4

Finalmente aplicou-se afundamentos de tensões em duas das fases, no caso **b** e **c**, de 70% da tensão nominal, com duração de 6 ciclos, conforme ilustrado na figura 16. Assim procedendo, analisou-se o desempenho do compensador quanto as correntes resultantes e quanto ao espectro harmônico da corrente de linha **a**. Os resultados desta ocorrência podem ser observados nas figuras 17 e 18.

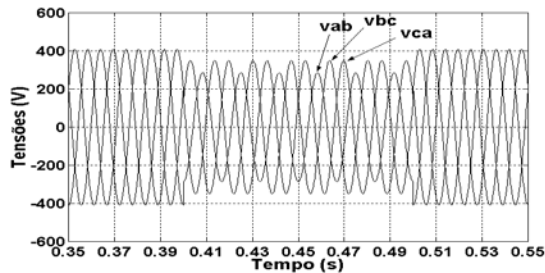


Figura 16 – Formas de ondas das tensões de alimentação do compensador contendo afundamento temporário nas fases **b** e **c** durante 6 ciclos

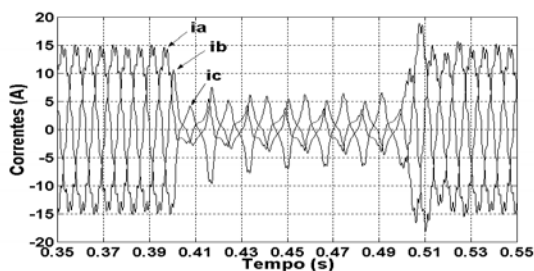


Figura 17 – Formas de ondas das correntes no compensador contendo afundamento temporário nas fases **b** e **c** durante 6 ciclos

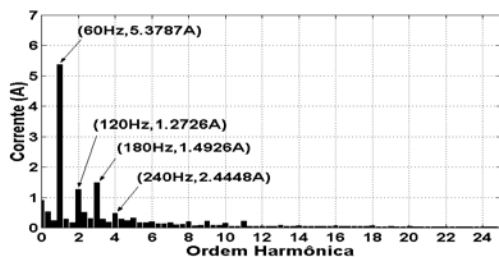


Figura 18 – Espectro harmônico da corrente da linha **a** do compensador quando ocorre um afundamento temporário nas fases **b** e **c** durante 6 ciclos

Os resultados indicam que, com um suprimento contendo afundamento temporário de tensão, verifica-se correspondentes diminuições nas amplitudes das correntes do compensador. Estas apresentaram um substancial nível de desequilíbrio e apreciáveis aumentos das distorções harmônicas em relação aos casos anteriores. Isto pode ser notadamente observado no espectro da corrente de linha **a**, que apresenta harmônicos de ordem ímpar e par de várias amplitudes. Pode-se observar também que, sob

tais condições, houve uma diminuição na potência reativa absorvida pelo reator.

5.0 CONCLUSÕES

A modelagem do compensador estático a reator saturado no simulador Saber, constituído de bancos de capacitores série e paralelo e o reator Twin-Tripler, permitiu que se investigasse o desempenho do compensador, inserido em sistema de potência do tipo radial, sob condições ideais e não ideais de suprimento. Sob suprimento ideal, as simulações reproduziram as ordens harmônicas presentes nas correntes estabelecidas pela teoria. Entretanto, sob situações tais que as tensões de suprimento apresentam-se com desequilíbrios e distorções harmônicas, o reator Twin-Tripler não foi capaz de proporcionar a mesma eficácia no que tange ao processo de cancelamento das harmônicas geradas nas correntes. Trabalhos futuros deverão contemplar a construção de um protótipo do reator Twin-Tripler para análise experimental em laboratório, a fim de comparar com os resultados obtidos nas simulações, bem como o desenvolvimento da modelagem do reator do tipo Treble-Tripler com nove núcleos, o qual apresenta um cancelamento harmônico mais eficiente.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Friedlander, E. and Jones, K. M. – *Saturated reactors for Long Distance Bulk Power Lines*, Electrical Review, 27th June 1969, pp 940 – 943
- [2] Cooper, C. B., and Young, D. J.– *Saturated Reactor and Compensator for Stabilising Voltage at Load and Generation Points*, IEE International Conference on HDVC and/or AC Power Transmission, November 1973, London
- [3] Cooper, C. B. – *Voltage and Power Factor Control*, IEE Symposium on Supplies for Industrial Systems, 24 th February 1976, UMIST
- [4] Friedlander, E. – *Transient Reactance Effects in Static Shunt Reactive Compensators for Long AC Lines* IEEE Transactions (PAS), vol. 95, No. 5 Sep/Oct, 1976, pp 1669 – 1680
- [5] Kusko, Alexander – *Poliphase Closed-Core Reactors*, IEEE Transactions (PAS) vol. 84, pp 57 – 64, January/1965.
- [6] Brasil, D. O. C., *Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Transmissão*; Tese de Mestrado, UFPE, Maio 1996.