



**GRUPO XIII  
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE  
ENERGIA – GCCQ**

**APLICAÇÃO DE SUPRESSORES RÁPIDOS DE VARIAÇÃO DE TENSÃO À BASE DE REATORES  
SATURADOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

**Manoel Afonso de Carvalho Jr\***  
UFPE

**Luiz Antônio M. da Fonte**  
UFPE

**Fabiana da S. Leal**  
UFPE

**Wider B. Santos**  
CELPE

**RESUMO**

O artigo propõe o uso de supressores rápidos de variação de tensão à base de reatores saturados para o controle da tensão de sistemas de distribuição durante distúrbios, de forma a assegurar padrões de qualidade compatíveis com as exigências do mercado. Os resultados apresentados mostram a perfeita adequação desse dispositivo para o objetivo sugerido, destacam a rapidez de sua atuação e apontam um desempenho harmônico dentro das normas técnicas vigentes. Os protótipos do reator saturado, componente do supressor, que foram construídos, demonstram o acerto dos procedimentos de projeto e do modelo matemático eleito para as simulações no programa EMTP-ATP.

**PALAVRAS-CHAVE**

Controle de Tensão, Curtos-circuitos, Construção de Protótipo, Reator Saturado, Supressor Rápido.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A oferta de energia elétrica com um elevado padrão de qualidade é um propósito permanente da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), não somente para cumprimento dos índices impostos pelo contrato de concessão firmado com o poder público, mas também pela satisfação de oferecer aos seus clientes um produto que atenda a todos os requisitos exigidos pelas normas vigentes. Com esse intuito, todos os fenômenos elétricos, que incidem no sistema de distribuição operado pela CELPE e produzem variações significativas na tensão dessa rede, são alvos de exames cuidadosos com vistas à identificação

de um conjunto de medidas capazes de combater apropriadamente as suas conseqüências.

O supressor rápido de variação de tensão formado pela conjugação de um reator saturado (1)-(2)-(3) com um ou vários capacitores, aqui identificado pela sigla SRVT, é um dos mecanismos habilitados para essa tarefa. A velocidade de atuação desse dispositivo durante os transitórios resulta numa redução significativa das variações de tensão, sendo esse um dos atrativos para a aplicação do mesmo. Ainda mais, os custos do SRVT são considerados um dos menores, senão o menor, dentre todos os equipamentos do gênero, uma vez que não faz uso de qualquer sistema de controle.

**2.0 - METODOLOGIA DO TRABALHO**

Os estudos para avaliação do desempenho do SRVT na rede elétrica da CELPE foram conduzidos através de um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento em parceria com a UFPE, através do seu Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência (DEESP). Esse projeto foi inteiramente fundamentado no programa EMTP-ATP, tendo em vista ser essa uma ferramenta corriqueira entre os especialistas dos sistemas elétricos brasileiros e consistiu, basicamente, das seguintes etapas:

- Seleção e modelagem do subsistema CELPE, tendo-se em conta os critérios de frequência e severidade das variações registradas na tensão do mesmo;
- Definição e modelagem do SRVT que, conectado à barra escolhida do subsistema, mitigue as variações de tensão verificadas quando da incidência de distúrbios;

\* Universidade Federal de Pernambuco (Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência) - Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N - CEP.: 50670-901 – Recife – PE – BRASIL  
Fone/Fax: (081) 3271-8739 - E-MAIL: macj@ufpe.br

- Análise de desempenho do subsistema CELPE com o SRVT instalado;
- Estudos de penetração no sistema dos componentes harmônicos gerados pelo SRVT;
- Projeto e construção de dois modelos reduzidos de reator saturado.

### 3.0 - SELEÇÃO DO SUBSISTEMA

Um exame do sistema de transmissão e distribuição da CELPE, com base na frequência e na intensidade dos afundamentos de tensão verificados nos 6 meses que antecederam o início do projeto, apontou o sistema regional de PIRAPAMA II como o mais vulnerável, sendo esse, portanto, o subsistema eleito para os estudos. O ponto desse subsistema selecionado para a conexão do SRVT foi a barra responsável pelo suprimento da empresa FORTILIT, localizada na SE PRAZERES. Esse foi o sistema representado trifásicamente no EMTP-ATP.

### 4.0 - CARACTERÍSTICAS DE OPERAÇÃO DO SRVT

A partir de uma análise detalhada do comportamento do referido sistema regional, decidiu-se pela introdução de um SRVT capaz de suprir uma potência reativa capacitiva da ordem de 10% da potência de curto-circuito no ponto de acoplamento do dispositivo. A característica tensão-corrente desse equipamento para satisfazer ao critério estipulado acima está retratada na Figura 1, segundo a qual, uma injeção de 7,13Mvar capacitivo ocorrerá quando a tensão na barra de acoplamento reduzir-se para 0,90pu, exatamente a medida desejada para correção dos afundamentos. Na tensão nominal do barramento, 1,0pu, o SRVT não deverá ter nenhuma participação ativa no sistema, o que significa que não deverá fornecer nem consumir qualquer parcela de potência reativa.

Para os estudos comparativos, dois tipos de SVRT com essa característica operacional foram projetados para aplicação no subsistema PIRAPAMA II, um utilizando reator saturado com enrolamentos conectados em série e outro com ligação paralela entre os enrolamentos (4)-(5). A implementação do modelo digital desses supressores no EMTP-ATP foi obtida pelo uso de um programa desenvolvido no âmbito da UFPE (6)-(7).

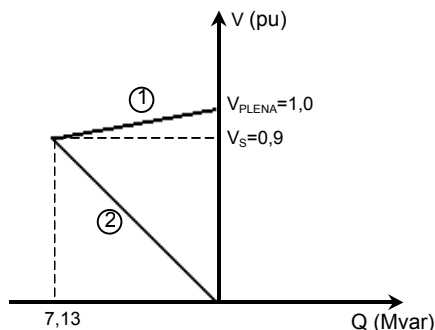


FIGURA 1 - Característica operacional do SRVT

### 5.0 - DESEMPENHO DO SISTEMA

Considerando-se que a origem mais comum para os fenômenos de afundamentos da tensão em sistemas de potência é a ocorrência de curtos-circuitos, uma série desses eventos foi, então, simulada no EMTP-ATP para duas condições operacionais do subsistema PIRAPAMA II, com e sem a presença do SRVT na barra FORTILIT da SE PRAZERES. Nos curtos-circuitos trifásicos, registrou-se nessa barra um combate aos afundamentos de tensão da ordem de 10% após a aplicação do SVRT, valor já esperado, haja vista que esse foi o grau de compensação estabelecido em projeto para o supressor.

Nos curtos-circuitos monofásicos impostos à fase A, a tensão na barra de FORTILIT apresentou um comportamento similar, como mostra a Tabela 1. Observa-se, ainda mais, que, no esforço de recuperar a tensão na fase atingida pelo curto-circuito, o supressor produziu uma pequena elevação da tensão, além do valor nominal, nas fases sãs. Tal fato decorre do uso de uma ligação similar ao "zig-zag" entre os diferentes núcleos do reator saturado, o que produz um acoplamento entre as três fases do mesmo. Para defeitos equilibrados, a variação de tensão pelo SRVT mediante afundamentos para até 0,9pu (segmento 1 da Figura 1), será função da inclinação da característica tensão-corrente do reator saturado e da impedância equivalente vista pelo SRVT no ponto de acoplamento. Para afundamentos para valores abaixo de 0,9pu (segmento 2 da Figura 1), a capacidade do SRVT elevar a sua tensão terminal dependerá da potência reativa armazenada no banco de capacitores no momento da ocorrência de tais fenômenos. É importante registrar que não foi constatada qualquer diferença significativa no desempenho do subsistema PIRAPAMA II com a aplicação dos dois tipos de SRVT, com ligação série ou paralela dos enrolamentos.

Quanto à rapidez de atuação do SRVT, a Figura 2 retrata o comportamento da tensão na barra FORTILIT durante a ocorrência e a remoção de um curto-circuito trifásico na barra CABO 13,8 kV, respectivamente nas marcas de 0,2 e 0,248 s. Conforme se constata nessa ilustração, o SRVT responde imediatamente às oscilações de tensão decorrentes de tal operação, restabelecendo o regime permanente numa ação instantânea.

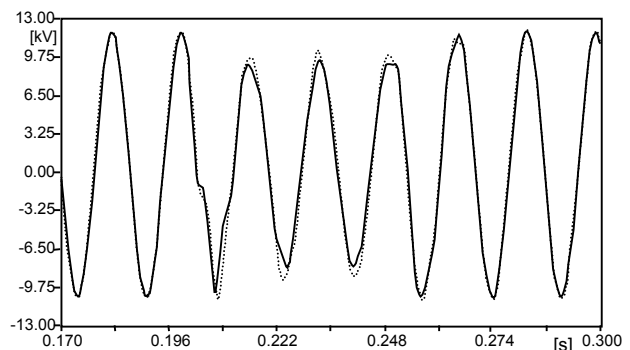


FIGURA 2 - Tensão em Fortilit durante uma falta trifásica em Cabo 13,8kV

— Sistema sem supressor    ···· Sistema com supressor

TABELA 1 - Tensão registrada em Fortilit durante a ocorrência de curtos-circuitos monofásicos na fase A

Barra em Curto	Tensão Pré-Falta (pu)	Tensão Durante a Falta (Sistema com supressor) (pu)			Tensão Durante a Falta (Sistema sem supressor) (pu)		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Pontezinha 13,8kV	1,00	0,80	1,00	1,01	0,71	0,93	0,93
Piedade 13,8kV	1,00	0,84	0,99	1,01	0,74	0,93	0,94
Suape 13,8kV	1,00	0,89	1,00	1,01	0,78	0,94	0,96
Prazeres 69kV	1,00	0,87	1,07	0,83	0,79	1,00	0,74
Pirapama 69kV	1,00	0,90	1,06	0,90	0,82	1,00	0,81
Pirapama II 13,8kV	1,00	0,92	1,01	0,99	0,82	0,96	0,95
Brahma 69kV	1,00	0,91	1,05	0,91	0,83	1,00	0,82
Cabo 13,8kV	1,00	0,93	1,02	0,99	0,83	0,96	0,96
White Martins II 69kV	1,00	0,94	1,04	0,94	0,85	1,00	0,85
Cabo 69kV	1,00	0,94	1,04	0,94	0,85	1,00	0,85
Rhodia 69kV	1,00	0,94	1,04	0,94	0,85	1,00	0,87
Refinações de Milho 69kV	1,00	0,96	1,03	0,95	0,86	1,00	0,88
Vitoria 13,8 Kv	1,00	0,94	1,01	1,00	0,87	0,95	0,98
Ipojuca 13,8kV	1,00	0,95	1,02	1,00	0,87	0,96	0,98
Porto 13,8 kV	1,00	0,95	1,02	0,99	0,88	0,97	0,98
Pontezinha 69 kV	1,00	0,97	1,03	0,95	0,88	1,00	0,89
Sec Jussaral 69kV	1,00	0,98	1,03	0,95	0,88	1,00	0,89
Escada 13,8kV	1,00	0,95	1,02	1,00	0,88	0,96	0,98
Sec. Jussaral 13,8kV	1,00	0,95	1,02	0,99	0,89	0,97	0,97
Simisa 69kV	1,00	0,98	1,03	0,96	0,90	1,00	0,92
Suape 69kV	1,00	0,98	1,03	0,96	0,90	1,00	0,91
Suape Textil 69kV	1,00	0,98	1,02	0,96	0,90	1,00	0,91
Lanesa 69kV	1,00	0,98	1,02	0,96	0,91	1,00	0,92
Piedade 69kV	1,00	0,98	1,02	0,96	0,91	1,00	0,92
Escada 69kV	1,00	0,98	1,02	0,97	0,92	1,00	0,94
Ipojuca 69kV	1,00	0,98	1,02	0,96	0,92	1,00	0,94
Porto de Galinhas 13,8kV	1,00	0,96	1,01	1,00	0,91	0,97	0,99
Vitória 69kV	1,00	0,99	1,01	0,97	0,94	1,00	0,95

## 6.0 - OPERAÇÃO MEDIANTE DESBALANÇOS

O SRVT, por dispor na sua composição de um reator operando em regime de saturação, produz uma certa distorção harmônica, a qual, todavia, é bastante reduzida para condições balanceadas do sistema. Contudo, no cotidiano, um sistema elétrico jamais funciona em perfeito equilíbrio, e essa situação produz perturbações no processo de compensação harmônica do reator.

Com o intuito de avaliar as repercussões desse regime desequilibrado de operação, a fonte de suprimento do sistema foi desbalanceada em cerca de 2%, máximo desequilíbrio recomendado para os sistemas de potência em regime permanente, determinando-se, nessas condições, a distorção harmônica da tensão produzida pelo SRVT. Os resultados das simulações revelaram que a distorção harmônica total (DHT) da tensão na barra de FORTILIT infringiu, realmente, os valores estipulados pela norma IEEE-519 (8). Todavia, com a introdução de filtros sintonizados na frequência dos harmônicos de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens, maiores responsáveis pelos afastamentos verificados, a distorção harmônica retornou aos níveis satisfatórios da condição balanceada de tensão, condição demonstrada na Tabela 2.

## 7.0 - PENETRAÇÃO HARMÔNICA

Na primeira parte desses estudos, as componentes harmônicas da corrente geradas pelo SRVT durante a operação em plena carga, condição de maior criticidade, foram obtidas por intermédio da sub-rotina

"Fourier Analysis" do EMTP-ATP, com a fonte de suprimento em condições perfeitamente equilibradas. Em seguida, a impedância equivalente do sistema vista de barra de FORTILIT foi obtida através da subrotina "Frequency Scan" do EMTP-ATP. Os resultados dos procedimentos descritos são apresentados na Figura 3, sendo evidente da mesma que a impedância  $Z(\omega)$  não exibe qualquer pico na frequência dos harmônicos característicos injetados na rede pelo SRVT, que são aqueles de ordem  $(18k \pm 1)$ ,  $k \in \mathbb{N}$ .

TABELA 2 - Tensão em Fortilit com desequilíbrio de 2% na fonte

CASO ESTUDADO	Distorção harmônica total da tensão (DHT) (%)		
	Fase A	Fase B	Fase C
Supressor sem filtros de harmônicos	5,71	5,65	5,50
Supressor com filtros de harmônicos	0,81	0,82	0,82

Embora os riscos dos eventos de ressonâncias possam ser imediatamente afastados, uma vez que os valores máximos da impedância tomaram lugar em frequências múltiplas não inteiras da frequência fundamental, as distorções harmônicas produzidas na tensão da barra de FORTILIT poderiam ultrapassar os patamares recomendados pela norma IEEE-519. Uma verificação desse fato foi, então, encetada e consistiu, simplesmente, na execução do produto de cada

componente harmônica da corrente do supressor pela impedância harmônica correspondente. Os resultados desse processo para cada uma das frequências de interesse até a ordem 49<sup>a</sup>, exibidos na Tabela 3, demonstram que tanto os limites estipulados para os harmônicos individuais, como o limite definido para a distorção total pela norma IEEE-519 foram inteiramente respeitados.

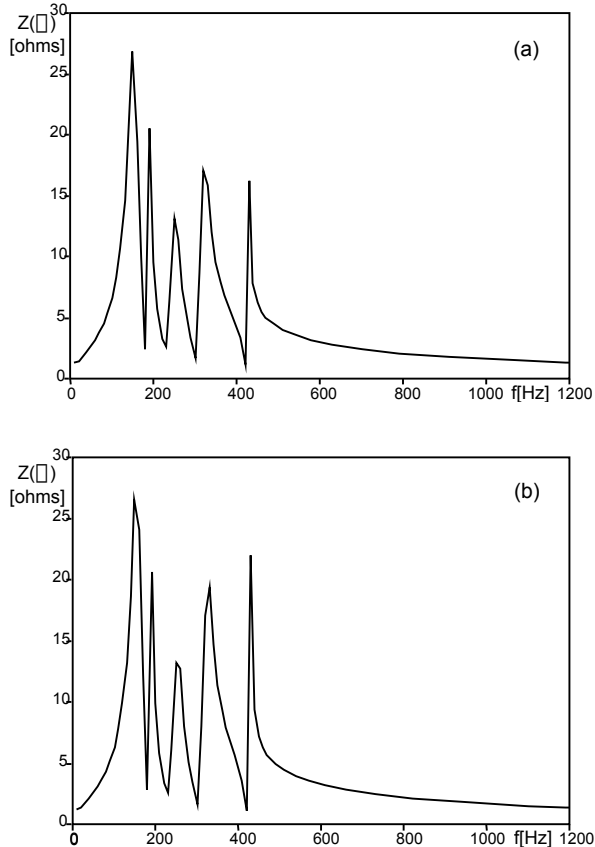


FIGURA 3 – Impedância harmônica vista da barra Fortilit para o SVRT com reator saturado de ligação paralela (a) e com reator saturado de ligação série (b)

## 8.0 - PROTÓTIPOS DO REATOR SATURADO

O SRVT é formado pela combinação de dois elementos: um reator saturado operando em paralelo com um banco de capacitores. Evidentemente que o componente de maior complexidade desse conjunto é o reator saturado, já que os capacitores não representam grandes desafios para a sua obtenção, sendo parte da linha normal de produção de várias empresas nacionais. Tal facilidade não se verifica para os reatores saturados, os quais terão que ser produzidos especificamente para o fim pretendido. Pelas razões expostas, decidiu-se pelo projeto e fabricação de protótipo de reator saturado, que permitisse uma comprovação dos procedimentos desenvolvidos no âmbito da UFPE com essa finalidade (9).

Obviamente que, por tratar-se de um empreendimento singular, ainda não intentado nos meios acadêmicos brasileiros, algumas diretrizes conservadoras foram adotadas para assegurar o sucesso da pesquisa,

sendo a principal delas, a orientação de iniciar os estudos por um protótipo de dimensões reduzidas. Essa posição visou, como de fato verificou-se, facilitar a busca de uma indústria pernambucana, particularmente na cidade do Recife, que mostrasse interesse na empreitada, uma vez que os recursos financeiros e de infra-estrutura requeridos seriam de pequena monta. Também, as baixas tensões de trabalho especificadas para o protótipo não exigiriam tecnologias além do alcance das empresas que, hoje, já fabricam transformadores de pequeno porte, tão comum no nosso parque industrial. Com base nessas premissas, procedeu-se o dimensionamento de dois protótipos de reatores saturados, um com ligação série dos seus enrolamentos e o outro com ligação paralela, ambos exibindo uma característica tensão-corrente similar àquela mostrada na Figura 4. Os dois protótipos construídos pela empresa SOTRAFO podem ser apreciados na fotografia da Figura 5.

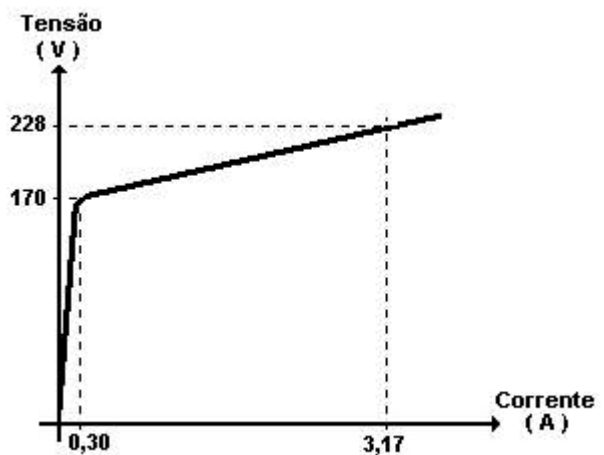


FIGURA 4 - Característica tensão x corrente dos protótipos de reator saturado



FIGURA 5 - Protótipos dos dois tipos de reatores saturados

Os dados colhidos nos ensaios de tomada de carga dos protótipos estão registrados na Figura 6 para o reator saturado com ligação série dos enrolamentos, juntamente com os resultados proporcionados pelas simulações desse protótipo no EMTP-ATP. Como se pode observar no referido gráfico, a resposta do

protótipo aproximou-se bastante do comportamento previsto nas simulações, o que valida os procedimentos de cálculo em uso na UFPE.

Quanto ao teor harmônico presente na corrente de alimentação dos protótipos, novamente observou-se uma proximidade bastante grande entre os valores previstos pelas simulações no EMTP-ATP e medidos nos ensaios.

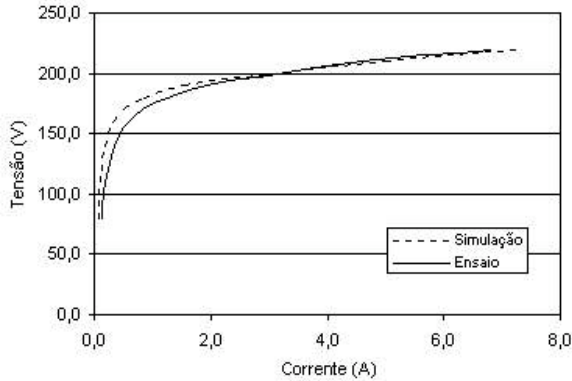


FIGURA 6 - Característica operacional do reator saturado

## 9.0 - CONCLUSÕES

O SRVT, como demonstrou o presente trabalho, constitui-se, realmente, numa ferramenta de grande potencialidade para o controle da tensão de sistemas elétricos, podendo exercer essa função na escala que for pretendida pelo usuário, bastando, para tal, especificar o nível da compensação desejada. Nos estudos ora desenvolvidos, por exemplo, a capacidade do SRVT foi limitada a, apenas, 10% da potência de curto-circuito na barra de conexão, valor que se refletiu integralmente na recuperação obtida da tensão do sistema em estado permanente.

Embora tal desempenho possa ser encontrado também em outros equipamentos oferecidos pelo mercado, a resposta transitória do SRVT é inigualável, como demonstram os resultados das simulações. A inexistência de qualquer meio externo de controle torna o SRVT quase instantâneo, o que não pode ser imitado pelos dispositivos controlados. Essa velocidade de atuação durante os transitórios produz uma drástica redução das variações de tensão, sendo esse um dos atrativos para a aplicação do SRVT.

Ainda mais, os custos desse tipo de equipamento são considerados um dos menores, senão o menor, dentre todos os equipamentos concebidos para a mesma

TABELA 3 – Tensões harmônicas em valores percentuais da tensão nominal na barra de Fortilit

Ordem do Harmônico	Frequência (Hz)	Z(□) (Ohms)	Reator com Ligação Paralela dos Enrolamentos		Reator com Ligação em Série dos Enrolamentos	
			Amplitude da Corrente Injetada (A)	Distorção Harmônica Individual de tensão (% de 13,8kV)	Amplitude da Corrente Injetada (A)	Distorção Harmônica Individual de tensão (% de 13,8kV)
3	180	12,60	0,07	0,01	0,05	0,01
5	300	3,68	5,82	0,19	0,55	0,02
7	420	9,05	5,10	0,41	0,35	0,03
9	540	13,06	0,02	0,00	0,09	0,01
11	660	16,57	2,08	0,31	0,05	0,01
13	780	19,82	0,90	0,16	0,03	0,01
15	900	23,00	0,02	0,00	0,04	0,01
17	1020	26,12	13,30	3,08	32,60	7,56
19	1140	29,23	8,18	2,12	13,38	3,47
21	1260	32,31	0,03	0,01	0,07	0,02
23	1380	35,37	1,11	0,35	0,12	0,04
25	1500	38,42	1,04	0,36	0,01	0,01
27	1620	41,46	0,01	0,00	0,07	0,02
29	1740	44,49	0,26	0,10	0,02	0,01
31	1860	47,51	0,33	0,14	0,07	0,03
33	1980	50,53	0,01	0,00	0,04	0,02
35	2100	53,54	4,90	2,33	3,61	1,72
37	2220	56,54	5,92	2,97	9,01	4,52
39	2340	59,54	0,03	0,02	0,06	0,03
41	2460	62,54	0,45	0,25	0,08	0,04
43	2580	65,53	0,05	0,03	0,03	0,02
45	2700	68,52	0,01	0,00	0,06	0,04
47	2820	71,51	0,34	0,22	0,01	0,01
49	2940	74,49	0,41	0,27	0,07	0,05
				DHT=5,4%		DHT=9,6%

função, pois, afinal, o mesmo não faz uso de qualquer sistema de controle.

As dificuldades apontadas, em passado recente, para simular os equipamentos de múltiplos núcleos saturados, como é o caso do SRVT, de muito foram superadas, como atestam os estudos apresentados. Modelos matemáticos tradicionais do EMTP-ATP prestam-se, perfeitamente, para a representação do SRVT como verificou-se nos ensaios de desempenho dos protótipos construídos.

Finalmente, o presente trabalho elimina, por completo, um receio percebido desde longa data entre os técnicos do setor elétrico brasileiro, de que não dispúnhamos da tecnologia necessária para a fabricação desse tipo de equipamento, ou que seria muito dispendioso o processo de resgate da tecnologia utilizada na década de 70 pela GEC. Embora o presente projeto tenha se limitado à construção de protótipos em modelo reduzido, a técnica de concepção é, sem dúvida, idêntica àquela aplicável às grandes unidades. Trata-se, realmente, dos mesmos procedimentos utilizados para o projeto de transformadores de potência com alguns ajustes.

#### 10.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) THANAWALA, H. L., YOUNG, D. J. Saturated Reactors: Some Recent Application in Power Systems; Energy International, vol.7, N<sup>o</sup>11, November 1970.
- (2) COOPER, C. B., YOUNG, D. J. Saturated Reactors Compensator for Stabilising Voltage at Load and Generation Points; IEE Conference Publication N<sup>o</sup>107, International Conference on High Voltage DC and/or AC Power Transmission, 19<sup>th</sup> – 23<sup>th</sup> November 1973, London.
- (3) KENNEDY, M. W., LOUGHRAN, J., YOUNG, D. J., Applications of a Static Suppressor to Reduce Voltage Fluctuations Caused by a Multiple Arc Furnace Installation; IEE Conference Publication N<sup>o</sup>110, International Conference on Sources and Effects of Power System Disturbances, 22<sup>th</sup> – 24<sup>th</sup> April 1974, London.
- (4) The Control of System Voltage using AC Saturated Reactors; GEC Publication N<sup>o</sup> TD6301t-1068, Power Transmission Division, England.
- (5) LEAL, F. S., Reatores Saturados com Excitação Paralela; Dissertação de Mestrado, Novembro 2000.
- (6) CARVALHO Jr, M. A., Steady State Representation of Reactive Compensating in HVDC Converter Station; Ph.D. Thesis, UMIST, September 1983.
- (7) BRASIL, D. O. C., Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Transmissão; Tese de Mestrado, UFPE, Maio 1996.
- (8) IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems; IEEE Standard 519-1992.
- (9) MAGNATA DA FONTE, L. A., Reatores Saturados: Alguns Aspectos Operacionais e de Projeto; Tese de Mestrado, UFPE, Dezembro 1997.