



**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA - GCQ**

**EXPERIÊNCIA NA CONSTRUÇÃO DE PROTÓTIPOS DE REATORES SATURADOS PARA O CONTROLE
DOS TRANSITÓRIOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Luiz Antônio Magnata da Fonte

UFPE

Adriana Karla Brasileiro de Carvalho

CELPE

Manoel Afonso de Carvalho Jr.*

UFPE

Carlos Leoncio Gonzaga Costa

CELPE

Wider Basílio dos Santos

CELPE

Sandro Felinto da Silva

CELPE

RESUMO

Um dos modelos mais promissores dos supressores rápidos de variação de tensão é aquele construído a base de reatores com saturação natural. Esse equipamento, todavia, não está disponível para uma aplicação imediata no sistema elétrico brasileiro, pois não faz parte da linha normal de produção da indústria nacional. Tal conjuntura é motivada pela inexistência de uma metodologia para a fabricação do principal componente desses supressores, os reatores. Com vistas a superar tal dificuldade, um projeto de pesquisa foi firmado entre a CELPE e a UFPE, o qual culminou com a construção de protótipos desses reatores, como relata esse trabalho.

PALAVRAS-CHAVE

Reator com saturação natural, Supressor rápido, Projeto, Fabricação, Ensaios.

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 incidam no sistema de distribuição operado pela CELPE e que produzam variações significativas na tensão dessa rede, são alvos de exames cuidadosos com vistas à identificação de um conjunto de medidas capazes de mitigar apropriadamente as suas conseqüências.

O supressor rápido de variações de tensão formado pela conjugação de um reator com saturação natural (RSN) com um ou vários capacitores, Figura 1, de agora por diante identificado pela sigla SRVT, é um dos mecanismos habilitados para essa tarefa, (1), (2), (3) e (4). 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, (4). Ainda mais, os custos do SRVT são considerados um dos menores, senão o menor, dentre todos os equipamentos do gênero, pois, afinal, não faz uso de qualquer sistema de controle. Apesar dessas virtudes, a perspectiva de aplicação dos SRVTs tem sido frustrada pela inexistência, no parque industrial brasileiro, de empresas devidamente habilitadas para a produção dos RSNs, parte essencial dos supressores. Embora, no passado, muitos RSNs tenham sido fabricados e instalados principalmente em países da Europa e África, (1),

*Rua Hermógenes de Moraes, 190 – Madalena CEP 50610-160 - Recife - PE - BRASIL
Tel.: (81) 2126-8258 - Fax: (81) 2126-8739 - e-mail: macj@ufpe.br

onde, até hoje, funcionam em perfeitas condições operacionais, a GEC, General Electric Company, principal empresa produtora, cessou o fornecimento dos RSNs na década de 1980. Na atualidade, apenas se tem conhecimento de empresas em países da extinta União Soviética que fabricam esse tipo de equipamento, (5), o que, além de limitar a oferta do produto, também esbarra nas tradicionais dificuldades de importação. Resgatar, pois, a tecnologia de fabricação dos RSNs e disponibilizar esse conhecimento para o mercado industrial brasileiro

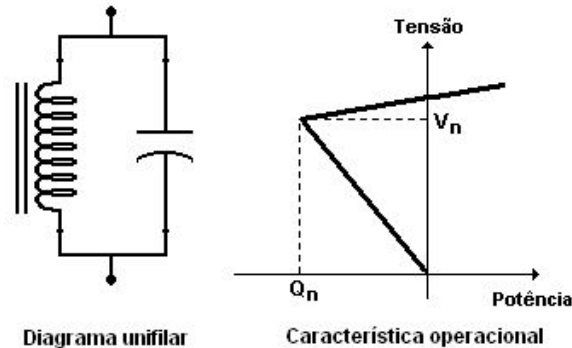


FIGURA 1 – Supressor rápido de variação de

são primordiais para que a CELPE, como as demais instituições do setor elétrico, possa usufruir dos benefícios oferecidos pelos SRVTs.

2.0 - PLANEJAMENTO DOS TRABALHOS

Os estudos para o estabelecimento de uma metodologia para a concepção dos RSNs foram conduzidos através de um projeto de P&D, firmado entre a CELPE e a UFPE, através do seu Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência, DEESP. Esse projeto foi realizado em duas etapas, sendo que na primeira, as técnicas de projeto dos RSNs foram definidas e na segunda, objeto do presente artigo, tratou-se da aplicação dessas técnicas à construção de protótipos.

O planejamento elaborado para a consecução desse ciclo do projeto consistiu das seguintes fases :

- Especificação dos protótipos de RSN.
- Seleção de uma empresa para produção dos protótipos.
- Projeto básico dos protótipos.
- Fabricação dos protótipos.
- Ensaios de avaliação dos protótipos.

3.0 - ESPECIFICAÇÃO DOS PROTÓTIPOS

Os RSNs apresentam uma larga diversidade de configurações tanto no que diz respeito ao aspecto magnético como do ponto de vista elétrico. Magneticamente, tais reatores, além de comportar qualquer quantidade de núcleos na sua estrutura, ainda admitem diversos tipos de arranjo para esses elementos. Assim, os mesmos poderão ser agregados tanto num monobloco único, como em estruturas parciais ou até individuais, as quais, por sua vez, poderão exibir uma geometria planar, circular ou com outras formas prismáticas. Sob o enfoque elétrico, por seu turno, é possível distinguir três tipos de conexões entre seus enrolamentos primários. Em duas delas, criadas pela GEC (General Electric Company), tais enrolamentos são ligados em série ou em paralelo, e na terceira, desenvolvida pela TTU (Tallinn Technical University), é proposta uma variedade da ligação paralela, onde os enrolamentos são conectados aos moldes de um autotransformador. Também enrolamentos secundários fazem parte dos expedientes à disposição dos projetistas para conformar o desempenho harmônico do RSN às normas em vigor, o que múltipla, ainda mais, as opções elétricas disponíveis.

Do exposto é evidente que, para não se incorrer num dispêndio volumoso de recursos financeiros e materiais, toda pesquisa envolvendo os RSNs deverá, em primeiro lugar, eleger um conjunto particular de configurações, consideradas mais apropriadas para a aplicação pretendida. Para o caso em apreço, uso de SRVTs para sistemas de potência, a recomendação dos estudiosos aponta para a estrutura magnética planar de nove núcleos em monobloco único como a formação mais indicada, parecer confirmado pelos estudos elaborados no âmbito do DEESP. Todavia, para reatores de grande porte, a estrutura magnética unificada apresenta importantes transtornos tanto para a fabricação, como para o transporte e o manuseio na instalação, o que aconselha o uso de monoblocos parciais, de sorte que essa é também uma alternativa de interesse. Do ponto de vista elétrico, a

pesquisa pretende examinar a eficácia de todos os arranjos viáveis, de sorte que os protótipos de RSN deverão ser construídos com as três modalidades possíveis de ligação para os enrolamentos primários dos mesmos. À luz dessas orientações, deliberou-se pela construção de 3 (três) protótipos de RSN com as seguintes composições eletromagnéticas :

- PROTÓTIPO 1 - Reator de nove núcleos com estrutura planar em monobloco único com ligação série dos enrolamentos primários e com enrolamentos secundários (Figura 2).
- PROTÓTIPO 2 - Reator de nove núcleos com estrutura magnética planar em monobloco único com enrolamentos primários conectados em paralelo (modelo GEC) e com enrolamentos secundários (Figura 3).
- PROTÓTIPO 3 - Reator de nove núcleos com estrutura magnética planar dividida em três unidades independentes cada uma dispo de três núcleos com enrolamentos primários em paralelo, porém aos moldes de um autotransformador (Modelo TTU) e com enrolamentos secundários dispostos como na Figura 4.

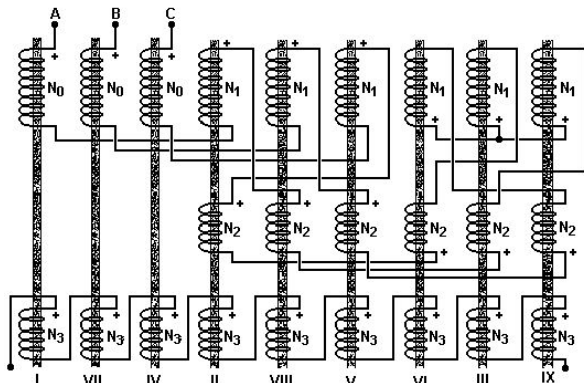


FIGURA 2 - Configuração elétrica do protótipo 1

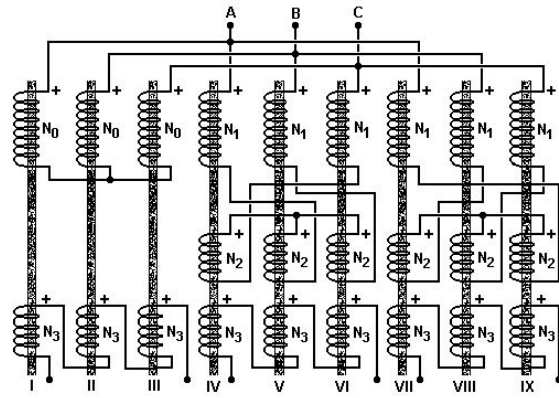


FIGURA 3 - Configuração elétrica do protótipo 2

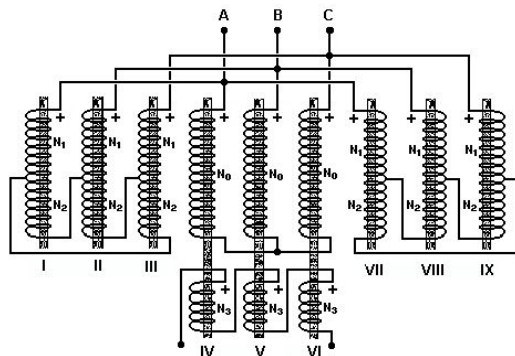


FIGURA 4 - Configuração elétrica do protótipo 3

Quanto ao porte desses protótipos, a escolha teve em conta as limitações financeiras impostas pela legislação vigentes para os projetos de P&D e as restrições do laboratório do UFPE-DEESP no tocante aos níveis de tensão e de potência disponíveis para os ensaios. Um exame desses aspectos apontou para a construção de protótipos de tamanho reduzido e em baixa tensão, dispo de da seguinte característica operacional :

- Tensão de início de saturação = 170 V
- Potência máxima desenvolvida = 1,250 kVA
- Inclinação da característica V_{xl} = 34 %
- Tensão na potência máxima = 228 V

4.0 - FABRICANTE DOS PROTÓTIPOS

A empresa eleita para promover a fabricação dos protótipos de RSN foi a SOTRAFO S. A., indústria especializada na produção de transformadores de pequeno porte e equipamentos similares. Na escolha dessa empresa, os aspectos relevantes considerados foram :

- Infra-estrutura industrial apropriada.
- Experiência comprovada na sua área de atuação.
- Capacitação técnica dos profissionais.
- Localização na imediata vizinhança da UFPE.

5.0 - PROJETO BÁSICO DOS PROTÓTIPOS

O elemento mais crítico para o projeto de um RSN é justamente o material ferromagnético empregado para a manufatura da sua estrutura magnética, uma vez que a característica tensão×corrente apresentada pelo mesmo reproduz em grande extensão a curva de magnetização normal do material. Geralmente os fabricantes desse tipo de equipamento, como é o caso das empresas russas, apontam para o uso dos materiais ferromagnéticos de grão orientado, pois esses exibem uma curva $B \times H$ com uma inclinação bastante acentuada (dB/dH , muito pequena), o que faculta ao projetista amplas possibilidades para a proposição de um RSN com uma característica tensão×corrente praticamente com qualquer declividade desejada. Também as baixas perdas por unidade de peso apresentada por tal material permite a fabricação de um RSN com um rendimento da mesma ordem de grandeza daquele verificado nos transformadores de potência. Por outro lado, para um pequeno fabricante como é o caso da SOTRAFO, empresa eleita para a construção dos protótipos de RSN, o uso de chapas de aço silicioso de grão orientado não se constitui uma rotina na sua linha normal de produção. Desse modo e considerando-se ainda que os protótipos não se destinam à produção industrial, mas tão somente à pesquisa, definiu-se, como material magnético, o aço de grão não-orientado tipo E-170 da ACESITA, disponível na SOTRAFO em chapas de 0,50 mm de espessura.

Uma vez definido o tipo do ferro para o circuito magnético, o passo seguinte consistiu na escolha da indução de trabalho imposta aos núcleos, parâmetro de grande relevância no projeto de um RSN. Para avaliar a influência do mesmo nas dimensões estruturais e no desempenho dos protótipos e, ao mesmo tempo, obter as informações necessárias para um juízo acerca do valor mais apropriado para essa grandeza, um estudo prévio foi realizado onde a indução para o início de saturação dos mesmos, ou seja, para a condição em vazio, foi feita variar entre 1,40 e 1,65 T. Tais pontos se posicionam na curva de magnetização do aço E-170 conforme assinala a Figura 5 e,

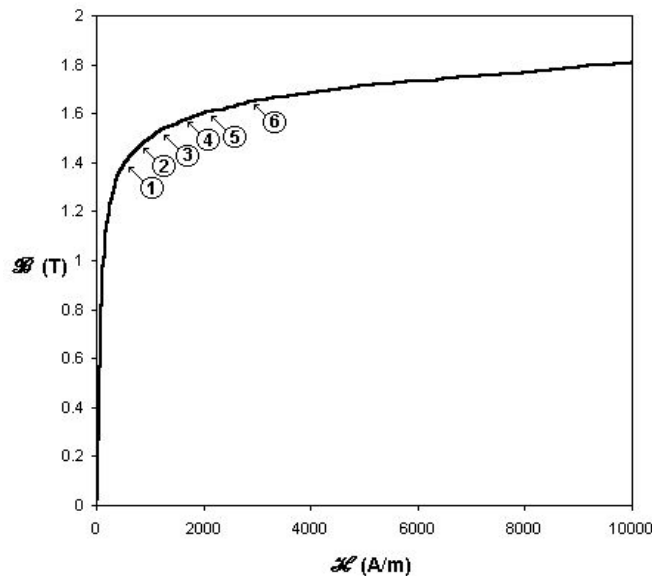


FIGURA 5 - Pontos de trabalho dos protótipos

para cada um desses pontos de trabalho, um projeto completo foi desenvolvido para os protótipos, tendo em vista as especificações estabelecidas. Um exame desses projetos mostrou que 1,5 T era o valor mais apropriado para a indução, já que ensejou a melhor solução de compromisso entre os custos de produção, representados pelo peso dos materiais ativos utilizados, e o desempenho operacional dos protótipos, perdas no ferro e cobre e distorção harmônica da corrente.

No tocante às travessas e aos retornos, elementos que em conjunto com os núcleos completam a estrutura magnética dos protótipos, estes deverão ser sempre dimensionados de sorte a exibirem, permanentemente, um funcionamento isento de saturação, condição imposta pelo princípio da mútua compensação harmônica. Com esse intuito e também para possibilitar as necessárias pesquisas acerca do tema, tais peças foram concebidas, nos protótipos 1 e 2, com o dobro da seção dos núcleos e, no protótipo 3, com um excesso de 50 % apenas.

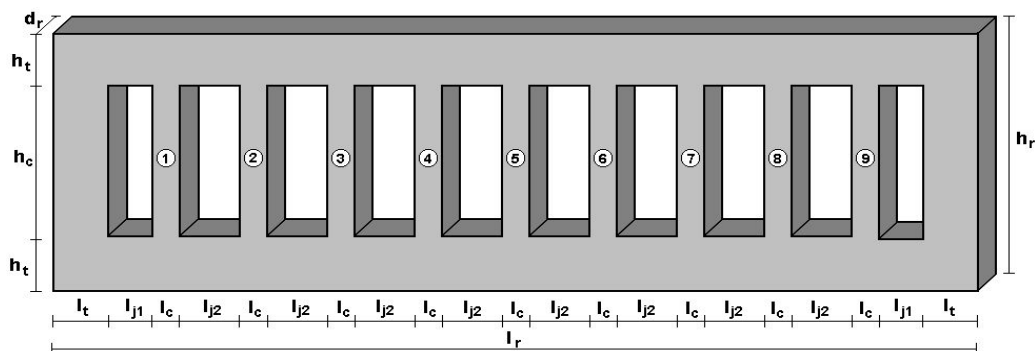


FIGURA 6 – Estrutura magnética dos protótipos 1 e 2

No tocante aos enrolamentos, a recomendação dos textos tradicionais para pequenos transformadores é que os mesmos sejam confeccionados com fio esmaltado de seção redonda e montados diretamente sob um carretel de material isolante.

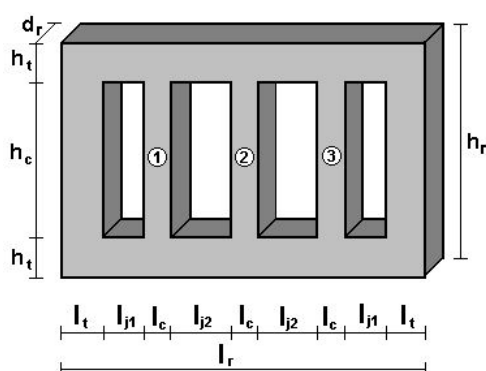


FIGURA 7 – Estrutura magnética do protótipo 3

A partir dessas informações, o programa de cálculo do RSN foi, então, utilizado para o projeto final de cada um dos protótipos, balizando-se, sempre, no atendimento da especificação estabelecida. As Figuras 6 e 7, juntamente com a Tabela 1, fornecem os dados de projeto referentes à estrutura magnética dos protótipos e a Tabela 2, as informações concernentes aos enrolamentos de cada um, de acordo com a notação das Figuras 2,3 e 4.

TABELA 1 – Dimensões da estrutura magnética (mm)

DIMENSÃO		PROTÓTIPO 1	PROTÓTIPO 2	PROTÓTIPO 3
Colunas	l_c	10,00	17,00	17,00
	h_c	255,00	375,00	375,00
Travessas	l_t	20,00	34,00	25,00
	h_t	20,00	34,00	25,00
Janelas	l_{j1}	17,90	15,60	11,00
	l_{j2}	33,80	19,20	16,00
Geral	l_r	436,40	486,00	155,00
	d_r	10,00	17,00	17,00

TABELA 2 – Número de espiras dos enrolamentos dos protótipos

ENROLAMENTO	PROTÓTIPO 1	PROTÓTIPO 2	PROTÓTIPO 3
N_0	718	953	953
N_1	533	707	331
N_2	284	376	1130
N_3	359	477	629

6.0 - FABRICAÇÃO DOS PROTÓTIPOS

A construção dos protótipos de RSN obedeceu às práticas já consagradas pela SOTRAFO para a fabricação de transformadores de pequeno porte com algumas modificações, inerentes a todo processo de caráter experimental. As chapas do circuito magnético dos protótipos foram cortadas por intermédio de uma guilhotina manual em peças retangulares com as dimensões apropriadas, as quais foram montadas pela técnica de superposição simples. Os enrolamentos de cada núcleo foram construídos individualmente, utilizando, para dar suporte mecânico ao conjunto, um prisma oco de secção quadrada, confeccionado com material isolante de 2,0 mm de espessura. Apesar, do fio de cobre utilizado para formar cada um dos enrolamentos já dispor de um esmalte de acabamento adequado ao isolamento entre as espiras, uma folha adicional de papel com 0,2 mm de espessura foi inserida entre enrolamentos distintos. Na extremidade de cada suporte, um pequeno carretel foi introduzido para servir de abrigo à bobina de prova, composta por 30 espiras de um fio extremamente delgado, pois se destina tão somente à medição da tensão induzida. Os terminais dos enrolamentos de todos os protótipos foram disponibilizados em réguas de bornes ou pinos localizados na parte posterior ou superior da estrutura dos mesmos. Dessa maneira, o pesquisador poderá promover qualquer ligação desejada entre os enrolamentos e, assim, experimentar várias distribuições distintas de FMMs atuando na estrutura magnética. A figura 8 mostra, numa vista geral, os protótipos de RSN construídos da forma descrita.



FIGURA 8 - Vista geral dos protótipos fabricados

7.0 - DESEMPENHO DOS PROTÓTIPOS

Os ensaios de carregamento dos protótipos utilizaram uma fonte de alimentação trifásica 220 V, 60 Hz, sendo o ajuste da tensão de suprimento obtido por intermédio de um autotransformador trifásico ajustável, especialmente construído para esse fim, com entrada de 220 / 380 V, 60 Hz e oferecendo, como saída, uma tensão entre 0 e 400 V, 60 Hz, sob uma corrente máxima de 15 A. As medidas das tensões e correntes de alimentação do protótipo foram efetuadas por intermédio de um registrador fabricado pela RMS Sistemas Eletrônicos, tipo MARH-21, faixa de leitura das tensões de 0 a 600 V e da corrente de 0 a 11 A, com precisão de acordo com a classe 0,5 da norma NBR-14519. A montagem para a realização desses ensaios encontra-se esquematizada na Figura 9 e o procedimento adotado consistiu em elevar gradualmente a tensão a partir de 120 V, em patamares de aproximadamente 10 V, até que a corrente demandada pelo protótipo alcançasse cerca de 10 A.

Os resultados do ensaio de carregamento do protótipo 1, registrados na Figura 10, mostram um casamento quase perfeito entre o comportamento previsto em projeto e aquele obtido experimentalmente, o que ratifica o acerto dos procedimentos de projeto adotados e do modelo matemático utilizado na representação do RSN. As pequenas divergências no "cotovelo" da curva da Figura 10 foram motivadas pela baixa indução de trabalho das travessas e retornos da estrutura magnética desse protótipo para tensões inferiores a 200 V. Caso esses elementos tivessem sido fabricados com uma secção transversal inferior, tais diferenças não seriam observadas. Quanto aos afastamentos na região de alta saturação, acima de 250 V, estes foram produzidos pelas discrepâncias entre a curva real de magnetização do ferro e a curva hipotética utilizada na modelagem.

Quanto ao protótipo 2, os resultados apresentados na Figura 11 embora ainda indiquem uma conformação razoavelmente satisfatória entre o comportamento estabelecido em projeto e os dados levantados experimentalmente, mostram, claramente, uma exacerbação das divergências apontadas anteriormente no desempenho do protótipo 1. Tal fato foi motivado pelo uso de uma distribuição das FMMs atuando nos núcleos muito distinta daquela preconizada como ótima, o que produziu um perfil bastante heterogêneo para a indução magnética nas travessas e retornos da estrutura. Assim, mesmo para tensões acima do "cotovelo" da curva, pontos das travessas e dos retornos desse protótipo já exibiam valores elevados de permeabilidade e, portanto, solicitando corrente de excitação que não era computada no modelo matemático e, portanto, ocasionando as discrepâncias registradas na figura 11. É importante lembrar que essa distribuição de FMMs foi deliberadamente

introduzida como parte das pesquisas da UFPE.

O ensaio de carregamento do protótipo 3, Figura 12, mostra que o comportamento estabelecido em projeto e os dados levantados experimentalmente aproximam-se numa escala razoável e que as divergências entre os mesmos são bem mais acentuadas que aquelas observadas para o protótipo 2. As mesmas motivações apontadas anteriormente são válidas para o presente caso, sendo que, para esse protótipo, o tipo de estrutura magnética empregada estimulou fortemente as divergências. De fato, a repartição em três unidades independentes provocou uma densidade de fluxo especialmente baixa nos retornos das estruturas mesmo nas tensões elevadas. A demanda de corrente de excitação por esses elementos foi a responsável pelo aprofundamento das diferenças entre o projeto e o ensaio. Todavia, como mencionado anteriormente, essa situação foi deliberadamente introduzida como parte das pesquisas da UFPE.

8.0 - CONCLUSÃO

A imensa potencialidade dos RSNs ainda permanece praticamente ignorada por grande parte do setor elétrico brasileiro em virtude, principalmente, da inexistência de um conjunto de procedimentos que possibilitem o tratamento dos mesmos, tanto do ponto de vista de fabricação, como de modelagem matemática. O projeto de pesquisa, cujos resultados ora são apresentados, foi, justamente, concebido para viabilizar os meios necessários para a abordagem do RSN em toda sua magnitude.

Os procedimentos de projeto estabelecidos foram inteiramente confirmados nos experimentos realizados com os protótipos, o que autoriza a utilização dos mesmos não somente para a fabricação de um SRVT, mas para muitos outros fins. Também, por seu intermédio é possível estabelecer o modelo matemático para qualquer das configurações apresentadas para o RSN e, assim, possibilitar os estudos de aplicação do mesmo nos sistemas de potência, via simulações no EMTP-ATP. A diversidade de técnicas de compensação poderá, dessa maneira, ser examinada cuidadosamente, iniciando-se pelas arquiteturas de maior simplicidade e evoluindo-se paulatinamente até aquelas de natureza mais complexas, buscando obter o desempenho harmônico desejado ao menor custo.

Ainda mais, a estimativa de preço estabelecida para a produção dos RSNs suprime completamente um receio, sempre presente no seio das empresas de energia elétrica. De fato, a noção de que uma estrutura magnética com

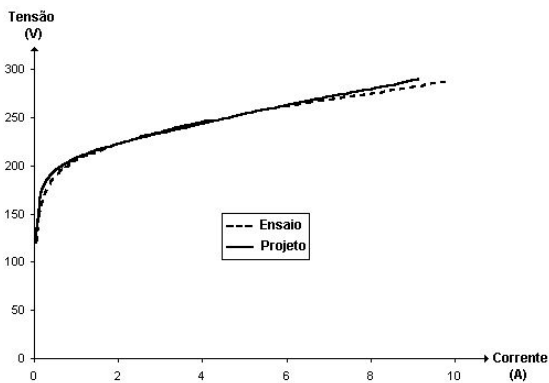


FIGURA 10 – Carregamento do protótipo 1

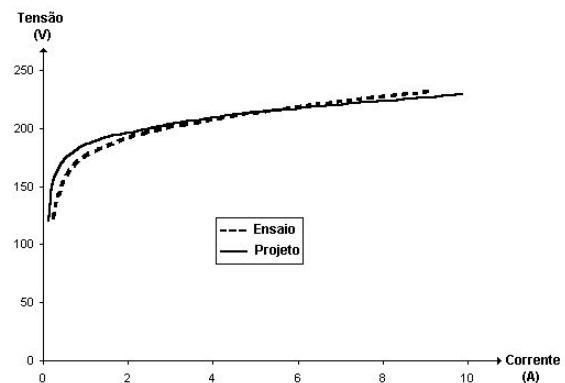


FIGURA 11 - Carregamento do protótipo 2

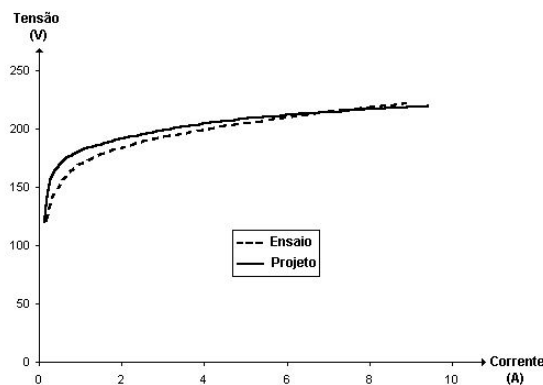


FIGURA 12 – Carregamento do protótipo 3

9 (nove) núcleos e cerca de 15 (quinze) enrolamentos primários demandaria o dispêndio de grandes somas foi

totalmente frustrada pelos estudos efetuados no DEESP, (6). Como foi demonstrado nessa publicação, um RSN com essa configuração não deverá custar mais do que um transformador de dois enrolamentos de igual potência e operando na mesma tensão primária.

Finalmente, o presente trabalho elimina, por completo, um outro temor percebido desde longa data entre os técnicos do setor elétrico brasileiro, de que não seria possível ou viável resgatar o processo de fabricação dos RSNs utilizado na década de 70 pela GEC. Nesses termos é realmente gratificante vislumbrar que tais técnicas estarão, em breve, disponíveis para qualquer indústria nacional, tornando exequíveis desafios como a construção dos SRVTs, a qual, como demonstrou Leal, (4), permitirá a CELPE e as demais empresas concessionárias de energia um importante avanço no aprimoramento da qualidade dos serviços ofertados.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) H. L. Thanawala and D. J. Young, "Saturated Reactors- Some recent application in power systems", Energy International, vol.7, nr.11, November 1970.
- (2) C. B. Cooper and D. J. Young, "Saturated Reactors compensator for stabilizing voltage at load and generation points", IEE Conference Publication nr.107, International Conference on High Voltage DC and / or AC Power Transmission, 19th – 23th November 1973, London.
- (3) M. W. Kennedy, J. Loughran and D. J. Young, "Applications of a static suppressor to reduce voltage fluctuations caused by a multiple arc furnace installation", IEE Conference Publication nr. 110, International Conference on Sources and Effects of Power System Disturbances, 22th – 24th April 1974, London.
- (4) F. S. Leal, L. A. M. Fonte, M. A. Carvalho Jr. e W. B. Santos, "Aplicação de supressores rápidos de variação de tensão à base de reatores saturados em sistemas de distribuição", XVII SNPTEE, 2003, Uberlândia.
- (5) J. Jarvik and J. Tellinen, "High power reactors for AC power transmission lines", Proceedings of the Estonian Academy of Science, vol.4, no.4, 1998, pp.243-263.
- (6) L. A. M. da Fonte, "Desenvolvimento de reatores com saturação natural para aplicação em sistemas de potência", Tese de doutorado, UFPE, Fevereiro 2004.