



**XXII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GSE/07
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

LIMITADOR DE CORRENTE DE CURTO CIRCUITO A BASE DE REATOR SATURADO: ESPECIFICAÇÃO, ESTUDOS, CONSTRUÇÃO, ENSAIOS E COMISSIONAMENTO NO SISTEMA DA CHESF

Marcelo J. A. Maia

*

Luiz A. M. da Fonte

Fernando E. F. Freitas

Chesf

UFPE

Chesf

RESUMO

Este informe técnico visa apresentar as diversas atividades desenvolvidas para a construção de um Limitador de Corrente de Curto Circuito – LCC a base de reator saturado. Foi realizada a especificação, a modelagem no programa de transiente eletromagnético ATP, simulações de regime permanente e transitório e por fim, a construção dos principais componentes do LCC (reator linear, capacitores e reator saturado) para operar na tensão de 13,8 kV em uma subestação do sistema da Chesf – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco. Após a fabricação, o LCC será ensaiado no laboratório de Alta Potência do Cepel - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

PALAVRAS-CHAVE

Reator Saturado, Equipamento, Limitação de curto-circuito, Sobretensões, LCC.

1.0 INTRODUÇÃO

O Limitador de Corrente de Curto circuito a base de reatores saturados, abreviado por LCC, oferece várias possibilidades de configuração, cada uma apropriada para uma dada situação operacional, podendo inclusive, se desejado, incorporar também a função de uma compensação série. Essas diferentes alternativas de arranjo foram investigadas com o intuito de atenuar as correntes de curto-circuito de um ponto específico do sistema elétrico da Chesf, exatamente o barramento de 13,8 kV de uma Subestação. Nesse local, a capacidade dos dispositivos de interrupção já se mostrava insuficiente para determinadas ocorrências, o que recomendava a adoção de medidas prementes. Diversas alternativas foram avaliadas, entretanto os estudos desenvolvidos com essa finalidade apontaram que, para essa aplicação em particular, a configuração originalmente proposta pela GEC^[1], Figura 1, apresentou-se como a mais indicada em face da simplicidade do arranjo e dos fins ora pretendidos. Esse arranjo foi motivo de apresentação de um informe técnico no XXI SNPTEE^[2].

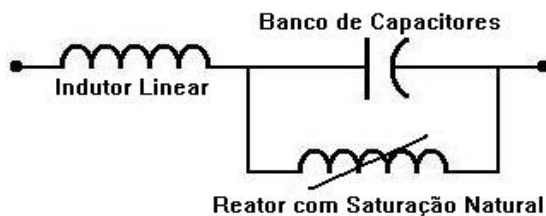


Figura 1

* Chesf- Rua Delmiro Gouveia, 333, Sala D-205, Bongi, Recife, PE, Brasil. E-mail: mjamaia@chesf.gov.br

2.0 ESPECIFICAÇÃO DO LCC

A especificação de cada um dos componentes do LCC com a configuração da Figura 1 foi conduzida, conforme ilustra o fluxograma da Figura 2, em três etapas:

Estudos Preliminares – onde uma primeira estimativa dos parâmetros do LCC é estabelecida;

Viabilidade Técnica - onde se verifica a viabilidade construtiva dos elementos com base nos parâmetros definidos, propondo novos valores em caso contrário;

Especificação – onde a especificação técnica propriamente dita de cada componente é elaborada.

2.1 Estudos Preliminares

Esses estudos obedeceram às etapas assinaladas no fluxograma da Figura 3, onde, a partir da configuração eleita para o LCC, um valor foi determinado para a reatância do indutor linear com vistas a reduzir em 50% os níveis de curto-circuito no barramento de 13,8 kV da subestação sob estudo:

$$X_L = 0,4527 \, \Omega$$

A partir desse valor, a reatância do banco de capacitores foi estabelecida, uma vez que, para o arranjo da Figura 1, o reator e os capacitores estão sintonizados:

$$X_c = 0,4527 \, \Omega$$

Em regime permanente, a corrente nominal do barramento de 13,8 kV da subestação atinge 1.067 A; desse modo tanto o indutor linear como o banco de capacitores do LCC estarão submetidos às seguintes condições operacionais:

$$V_{nominal} = 483 \, V \quad I_{nominal} = 1.067 \, A$$

Fundamentado nesse valor, a característica operacional do RSN foi estipulada, Figura 4, cujos parâmetros principais são:

$$\begin{aligned} I_\phi &= 54 \, A \\ V_s &\geq 483 \, V \\ x_r &< 0,4527 \, \Omega \end{aligned}$$

Tal característica presta-se como dado de entrada de um programa de computador, especialmente concebido para elaborar o projeto executivo do RSN (Reator de Saturação Natural) e fornecer os elementos necessários para a modelagem matemática desse equipamento.

A investigação da eficácia do LCC assim concebido foi desenvolvida por intermédio de simulações no programa de transiente eletromagnético ATP e, com esse intuito, o subsistema, onde a subestação encontra-se inserida, foi representado obedecendo-se às recomendações do CIGRÉ^[3]. Os modelos empregados foram aqueles especificados para os estudos transitórios de baixa frequência, as quais abrangem os fenômenos na faixa de 0,1 Hz até 3 kHz, perfeitamente satisfatório para os objetivos pretendidos. No que tange ao RSN, único elemento do LCC cuja representação não consta no guia CIGRÉ^[3], o modelo eleito foi aquele proposto por Neves e Dommel^[4] para transformadores, Figura 3. Tal modelo é composto de um indutor não-linear reproduzindo a característica de magnetização do núcleo saturado conectado em paralelo com um resistor linear para simular as perdas nesse núcleo. As perdas no cobre desse elemento do LCC foram representadas por um resistor linear em série com o conjunto descrito.

Os resultados das simulações para diferentes tipos de defeitos ratificaram as expectativas, obtendo-se uma redução em torno de 50% nas correntes de curto-circuito monofásico, bifásico e trifásico. A Figura 5 ilustra o comportamento da corrente solicitada do sistema com e sem a presença do LCC por ocasião de um curto-circuito

trifásico franco no ponto de aplicação desse dispositivo e no instante mais crítico. É evidente a atenuação obtida na corrente com o uso do LCC desde o momento de incidência do defeito até o estado permanente ser atingido.



Figura 2



Figura 3

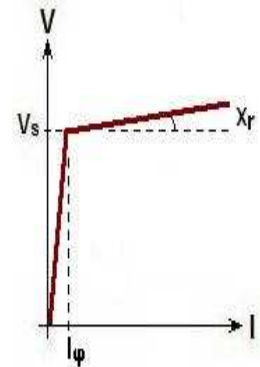


Figura 4

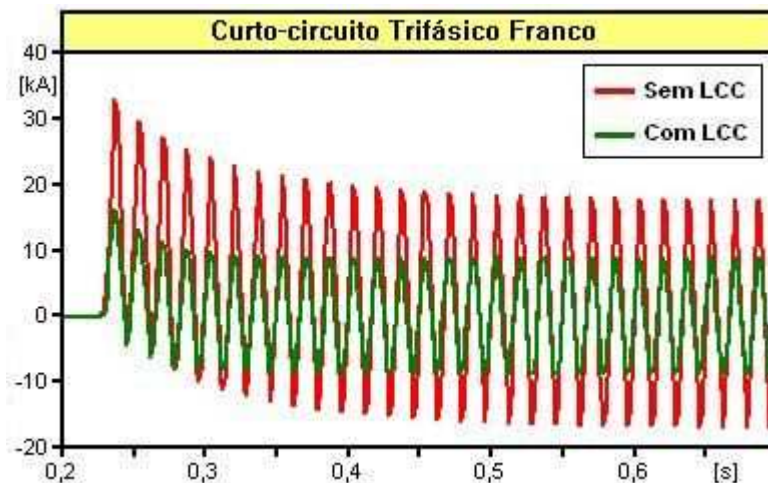


Figura 5

2.2 Viabilidade Técnica

Em princípio, os elementos projetados para o LCC são sempre viáveis do ponto de vista construtivo, uma vez que a indústria já oferece equipamentos similares para outras finalidades. Contudo, dependendo dos valores especificados para cada componente, as pretensas vantagens decorrentes do uso de um LCC poderão ser perdidas, tornando-se mais viável do ponto de vista econômico a permuta dos dispositivos de seccionamento superados. O componente do LCC responsável pela maior parcela dos custos de fabricação é exatamente o banco de capacitores por conta da baixa reatância exigida pela conexão série conjugada à intensidade das tensões e correntes transitórias impostas ao mesmo quando o LCC for solicitado por ocasião de um defeito. De acordo com as simulações efetuadas para o caso da subestação sob foco, os valores de pico máximos alcançados por ocasião dos defeitos mais críticos, curtos-circuitos francos no ponto de conexão do LCC, estão registrados na Tabela 1. O comportamento da tensão e da corrente nos terminais do banco de capacitores durante o curto-circuito monofásico pode ser apreciado na Figura 6.

Tabela 1

CONDIÇÃO	Volts	Ampéres
Nominal	483,0	1.067,0
Curto-circuito Trifásico	3.238,0	22.324,0
Curto-circuito Bifásico	3.055,0	21.496,0
Curto-circuito Bifásico para Terra	3.304,0	22.536,0
Curto-circuito Monofásico	3.337,0	22.720,0

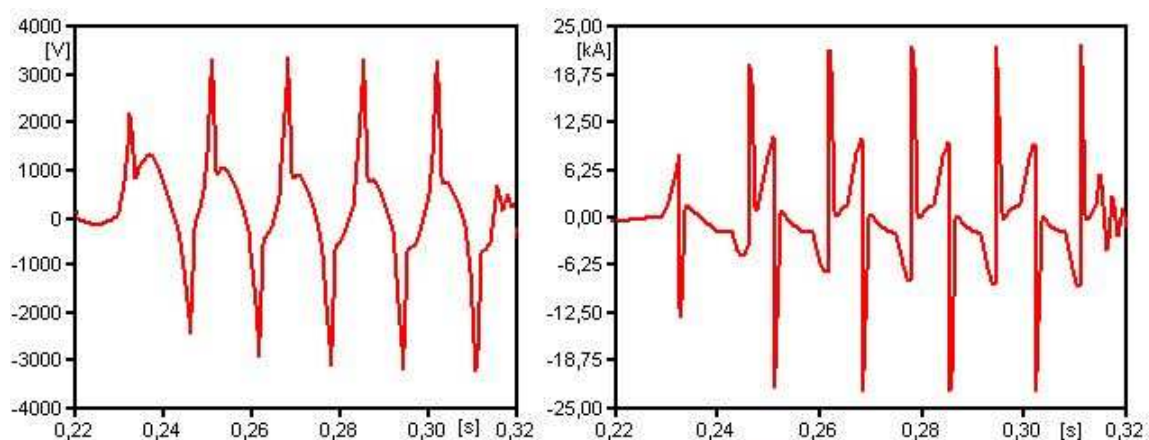


Figura 6

Uma análise das células capacitivas padronizadas ofertadas pela indústria elétrica à luz dos valores operacionais permanentes e transitórios estabelecidos nos estudos e das recomendações da norma NBR 5282⁽⁵⁾ que estipulam os seguintes limites:

- Tensões transitórias de até $2\sqrt{2}$ vezes a tensão nominal;
- Corrente transitórias de até 100 vezes a corrente nominal;

resultou nas seguintes formações por fase para o banco de capacitores:

Tabela 2

TENSÃO (V)	POTÊNCIA (kvar)	CORRENTE (A)	REATÂNCIA (Ω)	NÚMERO DE CÉLULAS
2400	25	10,42	230,40	509
	50	20,83	115,20	255
	100	41,67	57,60	128
	200	83,33	28,80	64
	300	125,00	19,20	43

Com base no número de células na Tabela 2 e tendo-se em conta o custo estimado de aquisição por célula no entorno de R\$ 6,00/kVAr, o investimento previsto para a formação do banco de capacitores foram calculados e os resultados registrados na Tabela 3.

Tabela 3

Potência (kvar)	Custo (R\$)	Nº Células	Custo (R\$)
25	150,00	509	229.050,00
50	300,00	255	229.500,00
100	600,00	128	230.400,00
200	1.200,00	64	230.400,00
300	1.800,00	43	232.200,00

Como se verifica na Tabela 3, o montante previsto para aquisição do banco de capacitores alcança um patamar bastante expressivo e a alternativa para redução desse custo consiste na elevação da reatância do mesmo. As restrições a esse procedimento residem, justamente, no aumento dos dispêndios relacionados com o indutor, pois tal elemento apresenta uma composição de custos inversa do capacitor, ou seja, quanto maior a reatância do indutor, maior o preço de produção do mesmo. Esse comportamento antagônico requereu uma análise conjunta para uma determinação ótima dos componentes do LCC.

2.2 Características Básicas

A análise desenvolvida resultou na definição das características básicas para os componentes do LCC constante da Tabela 4, considerada a de maior viabilidade do ponto vista econômico.

Tabela 4

ELEMENTO	GRANDEZA	
INDUTOR LINEAR	Tensão Eficaz Nominal (V)	1.320,0
	Tensão de Pico Transitória (kV)	8,0
	Corrente Eficaz Nominal (A)	1.200,0
	Corrente de Pico Transitória (kA)	9,2
	Potência Nominal (kVAr)	1.584,0
	Reatância (Ω)	1,1
BANCO DE CAPACITORES	Tensão Eficaz Nominal (V)	1.320,0
	Tensão de Pico Transitória (kV)	16,0
	Corrente Eficaz Nominal (A)	1.200,0
	Corrente de Pico Transitória (kA)	16,0
	Potência Nominal (kVAr)	1.584,0
	Reatância (Ω)	1,1
REATOR COM SATURAÇÃO NATURAL	Tensão Eficaz Nominal (V)	1.320,0
	Tensão de Início de Saturação (V)	1.750,0
	Tensão de Pico Transitória (kV)	16,0
	Corrente Eficaz Nominal (A)	60,0
	Corrente de Pico Transitória (kA)	16,0
	Inclinação da Característica (%)	11,0

3.0 IMPACTOS NA REDE ELÉTRICA

A inserção na rede elétrica da Chesf de um LCC a base de reatores saturados requer a realização de estudos que apure o comprometimento harmônico das tensões desse sistema, tomando-se como referência os limites estabelecidos na norma IEEE Std. 519^[6] Tabela 5. Considerando-se a reduzida potência do LCC, verificou-se, apenas, a distorção harmônica da tensão no barramento de 13,8 kV da Subestação sob estudo, local de aplicação do LCC. Um estudo de penetração harmônica propriamente dito somente seria necessário se os limites normalizados fossem violados para essa barra.

Tabela 5

Tensão na Barra (kV)	Distorção Harmônica Individual – DHI (%)	Distorção Harmônica Total – DHT (%)
$V_b < 69$	3,0	5,0
$69 < V_b \leq 161$	1,5	2,5
161	1,0	1,5

3.1 Componentes Harmônicas

A composição harmônica da tensão na barra de conexão do LCC foi levantada para todos os eventos capazes de ativar esse dispositivo, especificamente a energização do banco de capacitores existente na subestação e os curtos-circuitos no barramento de 13,8 kV. A situação harmônica da tensão vigente antes da ocorrência desses eventos foi, então confrontada com os valores apurados após as manobras citadas, sendo que para o caso dos curtos-circuitos, também foi apreciado o comportamento durante a aplicação dos mesmos. Os resultados estão registrados na Tabela 6 e mostram que com o transcurso de apenas 1 s após a remoção do defeito, a distorção harmônica total da tensão na barra já exibia valores bem inferiores aos patamares normalizados de 5 %. Ainda mais, mesmo durante o período transitório do defeito, apenas em algumas ocasiões os limites prescritos para o estado permanente foram infringidos. Contudo, para os fenômenos de curtíssima duração, como é o caso dos curtos-circuitos, a norma IEEE ^[6] recomenda valores até três vezes maiores que os especificados na Tabela 5.

Tabela 6

CONDIÇÃO		SISTEMA SEM LCC			SISTEMA COM LCC		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Energização do banco de capacitores	Antes	0,0033	0,0071	0,0058	0,0033	0,0071	0,0058
	Depois	0,0033	0,0071	0,0058	0,0033	0,0071	0,0058
Curto-circuito Trifásico Franco	Antes	0,0033	0,0071	0,0058	0,0033	0,0071	0,0058
	Durante				8,0337	8,0373	8,0333
	Depois	0,0033	0,0071	0,0058	0,2518	0,2609	0,3296
Curto-circuito Bifásico Franco	Antes	0,0033	0,0071	0,0058	0,0033	0,0071	0,0058
	Durante	0,0058	0,0058	0,0058	6,4152	7,4363	0,6741
	Depois	0,0033	0,0071	0,0058	0,1182	0,2255	0,1184
Curto-circuito Bifásico para Terra Franco	Antes	0,0033	0,0071	0,0058	0,0033	0,0071	0,0058
	Durante			0,0057	8,2264	8,2875	2,4208
	Depois	0,9426	0,9426	0,9424	4,0578	4,0971	4,0244
Curto-circuito Monofásico Franco	Antes	0,0033	0,0071	0,0058	0,0033	0,0071	0,0058
	Durante		0,0073	0,0065	8,3109	2,0268	2,0024
	Depois	0,3447	0,3449	0,3447	2,4993	2,5294	2,5277

Infere-se, portanto, do exposto que, no tocante à distorção harmônica na barra de 13,8 kV da subestação em estudo, o LCC atende com folga as prescrições da norma em vigor no setor elétrico nacional, dispensando, dessa forma, a realização de estudos de penetração harmônica.

3.2 Ressonância Subsíncrona

A possibilidade de ocorrer ressonância subsíncrona, suscitada em face da presença de máquinas rotativas no Subsistema na qual a subestação encontra-se inserida, e do uso de capacitores em série na montagem do LCC, foi verificada por intermédio da análise da impedância vista dos terminais das máquinas em função da frequência, conforme preconiza a literatura especializada [7,8]. A ferramenta disponível no ATP para a realização dessa análise é a rotina denominada de "frequency scan", a qual fornece o comportamento da impedância vista de terminais previamente selecionados na forma polar e retangular. Para isso, todas as fontes existentes na rede simulada deverão ser postas em curto-circuito e uma fonte de corrente de 1 A com frequência fixada no valor inicial da análise aplicada aos terminais de interesse. No caso do Subsistema, os locais mais vulneráveis para o evento de uma ressonância subsíncrona são duas usinas térmicas conectadas ao mesmo. A investigação da ocorrência desse fenômeno nos terminais dessas máquinas foi efetuada para as seguintes configurações:

- Subsistema na condição original sem a presença do LCC;
- Subsistema com o LCC em operação normal sem a incidência de qualquer defeito, ou seja, com o RSN retirado da montagem;
- Subsistema com o LCC operando em condição de curto-circuito, caracterizada pela remoção do RSN e dos capacitores de ambas as montagens;
- Subsistema com o LCC numa configuração especial contando apenas com o capacitor para verificar a influência desse elemento operando sozinho.

Os resultados obtidos e apresentados na Figura 6 mostram que a inclusão ou não de um LCC nos moldes concebidos no barramento de 13,8 kV da Subestação não provoca qualquer alteração na impedância vista de qualquer uma das usinas térmicas. Como se observa na Figura 7 para uma delas, a impedância é de natureza indutiva desde 0,5 até 60 Hz, de modo que inexistente a possibilidade da incidência do fenômeno de ressonância subsíncrona.

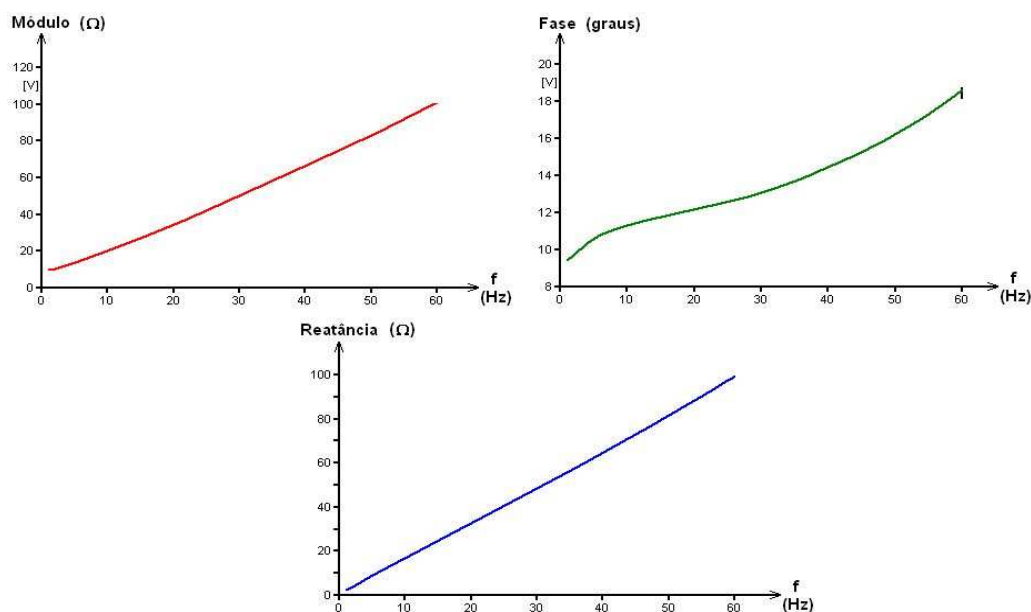


Figura 7

4. CONCLUSÃO

Este informe técnico apresentou os principais aspectos para a construção de um Limitador de Corrente de Curto Circuito – LCC a base de reator saturado, com destaque para o dimensionamento e especificação básica dos seus componentes, reator linear, capacitores e reator saturado.

A modelagem para estudos de transitório eletromagnético de modo a verificar seu desempenho conjuntamente com o sistema onde será inserido é de fácil implementação, não necessitando de desenvolvimento específico.

A construção e instalação do LCC numa subestação do sistema Chesf, bem como os ensaios no laboratório do Cepel que servirão como uma certificação dos componentes, ensejarão que outras empresas do setor elétrico brasileiro venham, na seqüência, implantar esse tipo de equipamento.

BIBLIOGRAFIA

- (1) THANAWALA, H. L., YOUNG, D. J., 1970, *Saturated reactors: Some recent applications in power systems*, Energy International, vol. 7, no. 11, November, pp.1155-1164.
- (2) MAIA, M. J. A., FONTE, L. A. M., JUNIOR, M. A. C., FREITAS, F. E. F., MAIA, L. E. C., 2011, *Limitador de corrente de curto circuito a base de reator saturado: comparações entre modelo de ATP e modelo reduzido de laboratório*, XXI SNPTTE, Grupo VIII, GSE 3, Outubro, Florianópolis-SC, Brasil.
- (3) CIGRÉ, 1990, *Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients*, Working Group 02 (SC 33).
- (4) NEVES, W. L. A., DOMMEL, H. W., 1993, *On Modeling Iron Core Nonlinearities*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no.2, May, pp.417-425.
- (5) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS, *Capacitores de potência em derivação para sistema de tensão nominal acima de 1000V*, NBR 5282, 1998., Brasil.
- (6) IEEE Std. 519, 1982, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*.
- (7) KUNDUR, P., 1994, *Power Systems Stability and Control*, McGraw-Hill, 1st Edition, New York, Chapter 15, pp.1025-1071.
- (8) AGRAWAL, B. L., FARMER, R. G., 1979, *Use of Frequency Scanning Techniques for Subsynchronous Resonance Analysis*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 2, March/April, pp.341-349.

DADOS BIOGRÁFICOS



Marcelo José de Albuquerque Maia: Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (1978), pós-graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (1980) e MBA em Administração de Empresa pela Fundação Getulio Vargas - RJ (1997). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Planejamento da Transmissão de Energia Elétrica e Transitórios Eletromagnéticos, atuando principalmente nos seguintes temas: Transitórios de chaveamento, controle de tensão, compensação de reativos, reator saturado e para-raios.

Luiz Antônio Magnata da Fonte. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (1969), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (1997) e doutorado em Processamento da Energia pela Universidade Federal de Pernambuco (2004). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Geração e Transmissão de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: controle de tensão, reator saturado, compensação de reativos, reatores lineares, transformadores e máquinas rotativas.

Fernando Edier França Freitas. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (2005) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (2010). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: transitórios eletromagnéticos, reator saturado, compensação de reativos, reatores lineares e transformadores.