



## Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

### Utilização de Reator de Bloqueio Série em Compensadores Estáticos de Potência Reativa: Uma Nova Abordagem para Redução de Perdas e Requisitos de Filtragem

MANFREDO LIMA(\*)  
Chesf

#### RESUMO

A operação de Compensadores Estáticos de Potência Reativa (CEs) produz harmônicos devido ao controle da sua corrente, que depende do ângulo de disparo das suas válvulas de tiristores. No caso apresentado neste Informe Técnico (IT), o CE Tauá (-45 a 90 Mvar, 230kV), tais harmônicos são reduzidos em parte através da instalação de um reator de bloqueio série no seu setor de média tensão. Utilizando-se uma modelagem detalhada desenvolvida em ATP/TACS, são apresentadas simulações de aplicação de faltas nas proximidades do CE Tauá, efetuando-se a comparação entre tais resultados e testes *Hardware-in-the-Loop* (HIL) realizados em RTDS, ressaltando-se a correspondência entre ambos. A eficácia do reator de bloqueio série para redução de harmônicos e perdas do compensador é também destacada.

#### PALAVRAS-CHAVE

Compensador Estático, Controle Automático de Ganho, Reator Série, RTDS, Transitórios Eletromagnéticos.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Encontra-se em operação na SE Tauá, situada na Região Sul do Estado do Ceará, desde dezembro de 2016, um compensador estático (CE) com nominais de (-45 a 90 Mvar / 230kV). A instalação deste equipamento foi realizada conforme estudos de planejamento realizados pela EPE e autorização da ANEEL como detalhado em (3). A evolução da rede elétrica na área de influência da SE Tauá registra a existência de reduzidos níveis de curto-circuito no ponto de acoplamento (PAC) do CE Tauá com a rede básica, produzindo relações entre a faixa de potência reativa do compensador e o nível de curto-circuito no PAC (SCR) de 0,50 (ano 2015, rede degradada) a 0,20 (ano 2022, rede completa). Os reduzidos valores de SCR encontrados, em conjunto com a identificação, durante a fase de projeto, de ressonâncias entre o CE Tauá e a rede elétrica para harmônicas superiores à décima primeira, levaram à adoção de uma solução que contempla a instalação de um reator de bloqueio série entre os dois barramentos de média tensão do compensador (Figura 1). Além disso, os valores máximos de perdas especificados mostraram não ser viável para este projeto a adoção de soluções baseadas na tecnologia VSC (*Voltage Source Converter*) (1).

Neste contexto, este IT apresenta um resumo do cálculo das perdas do CE Tauá, destacando-se o atendimento aos critérios da Especificação, além de uma comparação entre resultados de simulações utilizando-se uma modelagem detalhada em ATP/TACS e aquelas realizadas em simulador digital em tempo real (RTDS) utilizando os painéis reais do compensador conectados ao RTDS, onde foram representados o sistema elétrico de potência e os demais componentes de potência deste equipamento (3). Concluindo, é destacada a importância do esquema de controle automático de ganho presente no CE Tauá para o atendimento aos parâmetros de performance especificados, bem como a correspondência entre os resultados das simulações em ATP e em RTDS. Os resultados dos ensaios de comissionamento do CE Tauá realizados em campo são também comentados.

## 2.0 - COMPENSADOR ESTÁTICO DE TAUÁ

### 2.1 Componentes do Circuito Principal

Conforme mostrado na Figura 1, o CE Tauá é composto pelos elementos de potencia a seguir descritos, sendo o valor de potência reativa indicado para cada componente referido à tensão de 0,95pu no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Este compensador é projetado para injetar no sistema elétrico de potência os valores nominais de (-45 MVAR indutivos a 90MVAR capacitivos) para qualquer valor de tensão no PAC no intervalo (230kV  $\pm$  5%).

- Transformador abaixador 230/15kV, 90MVA, banco de unidades monofásicas, estrela aterrada – delta, uma unidade reserva.
- Um reator controlado a tiristores (TCR) de 97MVAR, conectado em delta.
- Dois capacitores manobrados a tiristores (TSCs) de 26Mvar cada, conectados em delta.
- Um filtro capacitivo de 23MVAR sintonizado na quinta harmônica, estrela não aterrada.
- Um reator de bloqueio série de 1,13mH conectando os dois barramentos de 15kV.

Durante estudos realizados na fase do projeto do CE Tauá, foram identificadas ressonâncias entre este equipamento e a rede elétrica relacionadas às harmônicas de ordem 11, 13 e superiores, que levavam à presença de níveis de distorção harmônica no PAC superiores aos estabelecidos na Especificação (3). A redução destas distorções harmônicas pelo método tradicional de instalação de filtros shunt demandaria a instalação de filtros adicionais de ordem elevada, o que provocaria a elevação das perdas e reduziria os índices de disponibilidade do compensador, devido ao acréscimo do número de componentes instalados. Para contornar esta dificuldade, foi introduzido neste projeto o reator de bloqueio série acima mencionado, cuja impedância aumenta com a frequência e proporciona o adequado amortecimento das harmônicas de ordem elevada. Com esta estratégia, o CE Tauá passa a atender aos requisitos da Especificação, utilizando-se apenas filtros shunt de quinta e sétima harmônicas, o que contribui também para a redução das perdas totais do referido equipamento. Esta solução, baseada na elevação da impedância entre o compensador e o PAC, foi inicialmente utilizada no projeto descrito em (2), onde é detalhado como a introdução do reator de bloqueio série contribui para viabilizar a aplicação da tecnologia tradicional de compensadores estáticos considerando as peculiaridades do ponto de conexão relacionadas a seguir:

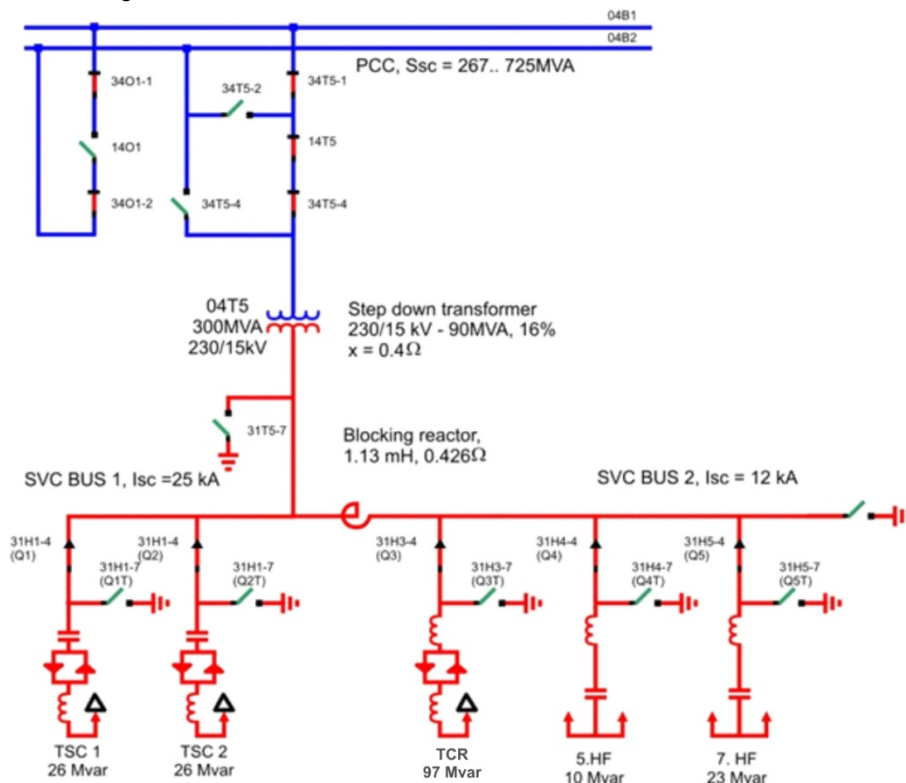


FIGURA 1 – CE Tauá: Diagrama Unifilar

- Reduzidos níveis de curto-circuito no PAC, da ordem de duas vezes a faixa de potência nominal do compensador na condição de operação degradada da rede elétrica.
- Ressonâncias entre o compensador e a rede elétrica associadas a harmônicas de ordem elevada.
- Reduzidos valores de perdas máximas nos pontos de operação especificados.

Além disso, no que diz respeito ao projeto do circuito principal do compensador, o emprego do reator série implica em redução do número de tiristores conectados em série nos reatores controlados, redução dos requisitos de corrente nos reatores controlados e redução dos requisitos de curto-circuito no setor de média tensão.

## 2.2 Sistema de Controle em Malha Fechada

O sistema de controle do CE Tauá utiliza como principais entradas a tensão de sequência positiva e a componente reativa da sua corrente, ambas medidas no setor de 230kV. Os valores instantâneos destes sinais são filtrados através de filtros digitais do tipo IIR (*Infinite Impulse Response*) sintonizados na terceira, quinta e sétima harmônicas. Em seguida, é efetuada a conversão dos referidos sinais do domínio das componentes de fase para o das componentes alfa e beta, a partir das quais são obtidas as componentes de sequência positiva e negativa dos sinais de tensão e as componentes  $d$  e  $q$  dos sinais de corrente.

As magnitudes do fasor de tensão de sequência positiva e da componente reativa da corrente do compensador no 230kV são retificadas e aplicadas a um filtro sintonizado na segunda harmônica. Em seguida, o sinal de corrente é multiplicado pelo estatismo (*slope*) e subtraído do sinal de erro de tensão, obtido a partir da diferença entre a tensão medida no 230kV e a tensão de referência, cujo valor é ajustado pelo operador. O resultado ( $V_{ERROR}$ ) é o sinal de erro compensado pelo estatismo, entrada do controlador principal do CE Tauá (Figuras 2 e 3).

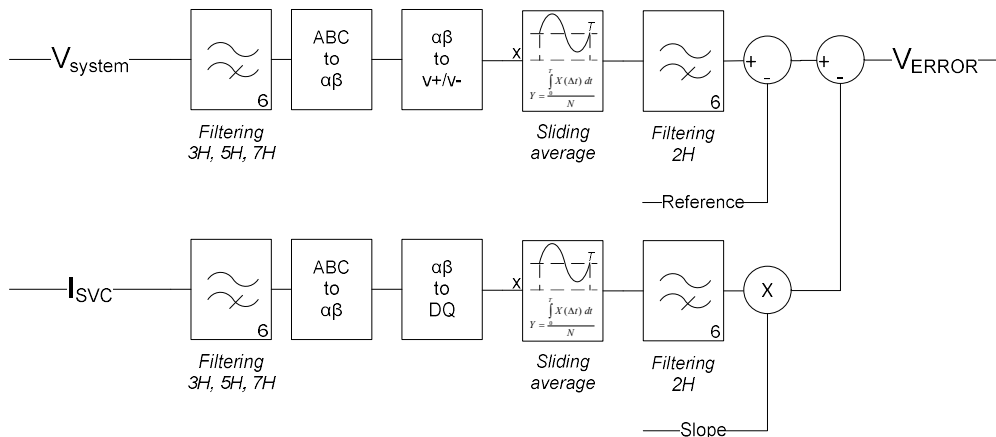


FIGURA 2 – CE Tauá: Formação do Sinal de Entrada do Controlador Principal

O sinal de entrada do controlador principal ( $V_{ERROR}$ ) é aplicado ao conjunto de ganhos mostrado na Figura 3. O ganho SCL corrige o sinal de entrada do controlador principal com base no nível de curto-circuito dinâmico medido no PAC para produzir o atendimento aos parâmetros de performance relativos à resposta ao degrau a seguir indicados, conforme estabelecido na IEEE Guide Std 1031-2011 (4). O atendimento aos referidos parâmetros foi comprovado através dos testes em RTDS descritos em (3).

- Percentual de *Overshoot* (PO) máximo de 30%.
- Tempo de Subida (*Rise Time - Tr*) máximo de 33mseg.
- Tempo de Estabilização (*Settling Time -Ts*) máximo de 100mseg.

O algoritmo de cálculo do ganho SCL (*Gain Optimization*) baseia-se na aplicação programada de um pequeno distúrbio no sinal de entrada do controlador principal e na medição da variação do sinal de saída do CE Tauá associada a este distúrbio, procedimento chamado de **Teste de Ganho**. Com base na magnitude e polaridade da relação entre o sinal de distúrbio aplicado e a variação do sinal de saída do compensador, o ganho SCL será elevado ou reduzido.

O supervisor de ganho (GS) tem por objetivo preservar a operação estável do compensador caso sejam detectadas oscilações no seu sinal de saída, reduzindo o ganho  $K_{GC}$  a partir do valor normal (1,0), até que tais oscilações sejam devidamente amortecidas, podendo atingir o valor mínimo definido em projeto. A malha de controle principal do CE Tauá baseia-se em um controlador proporcional-integral (PI), com ganho  $K_P$  e constante de tempo  $T$ . O ganho global desta malha torna-se variável através da variação dos ganhos SCL e  $K_{GC}$ .

Este controlador sofre *by-pass* caso a tensão terminal do compensador (230kV) caia abaixo de um valor definido em projeto, quando este equipamento é forçado a operar com potência de saída 0Mvar, constituindo o chamado Esquema de Bloqueio por Subtensão. Como mostra a Figura 3, a susceptância requerida do CE ( $B_{SVC}$ ) é então distribuída entre o TCR e os dois TSCs. A susceptância dos TSCs é determinada com base nos limites de chaveamento definidos para estes elementos, que possuem estratégia de controle discreta (ON/OFF). A susceptância do TCR é variada continuamente entre os seus limites máximo e mínimo, com base no valor do ângulo de disparo dos tiristores definido pelo sistema de controle do compensador. Este elemento é responsável pelo controle contínuo da potência reativa injetada pelo CE Tauá no sistema elétrico de potência.

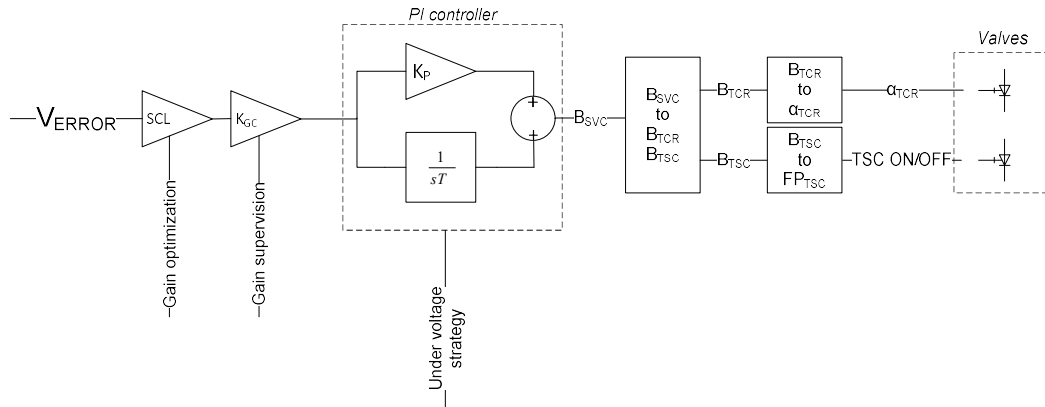


FIGURA 3 – CE Tauá: Controlador Principal

### 2.3 Cálculo das Perdas do Compensador

Devido aos reduzidos limites de perdas estabelecidos para os compensadores estáticos instalados no Sistema Elétrico Brasileiro pela Agência Reguladora Brasileira (ANEEL), este tema vem recebendo especial atenção durante a fase de projeto destes equipamentos.

Conforme especificado, as perdas do CE Tauá são calculadas nos pontos de operação correspondentes aos nominais indutivos (-45MVar), nominais capacitivos (90MVar) e 0MVar.

Os principais elementos do compensador responsáveis pela geração de perdas são válvulas de tiristores, capacitores e reatores do TCR e dos TSCs, filtros de harmônicos, transformador de acoplamento, serviços auxiliares, sistema de resfriamento das válvulas de tiristores, além dos painéis de proteção e controle. O resumo das perdas calculadas para o CE Tauá é apresentado na Tabela 1 para os pontos de operação indicados, de onde se verifica o atendimento aos limites especificados.

Tabela 1 – Perdas Calculadas para o CE Tauá

Perdas (kW)	90MVAR cap	20MVAR cap	0MVar	20MVar ind	45MVar ind
TSCs e Filtros	90,22	16,57	13,60	14,27	10,08
Válvulas dos TSCs	94,28	0,00	0,00	0,00	0,00
TCR	5,99	10,89	37,25	82,91	143,62
Válvulas do TCR	26,74	43,38	69,34	94,00	136,09
Transformador de Acoplamento	315,00	56,08	45,00	56,08	103,50
Reator Série	14,58	6,62	0,00	6,62	33,51
Barramentos e Conexões	14,56	2,30	2,98	5,69	12,89
Sistema Resfriamento	7,38	3,42	4,40	5,24	6,06
Painéis e Sala de Comando	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
Total	574,25	144,76	178,07	270,31	451,25
Limites Especificados	<b>630</b>	-x-	<b>180</b>	-x-	<b>540</b>

### 3.0 - SIMULAÇÕES REALIZADAS EM ATP

Como parte dos requisitos para atendimento à Especificação, um modelo para simulações no programa de transitórios eletromagnéticos ATP foi incluído no fornecimento do CE Tauá. O modelo utiliza a subrotina TACS e contempla a representação das principais malhas de controle que influenciam de forma relevante o desempenho do compensador durante a ocorrência de transitórios eletromagnéticos no sistema elétrico de potência. São representadas entre outras as etapas de condicionamento dos sinais de entrada do controle, o controlador principal ( $K_p$  e  $T$  da Figura 3), o esquema de bloqueio por subtensão, os sistemas de disparo do TCR e dos TSCs e o esquema de supervisão de ganho ( $K_{Gc}$  da Figura 3), além dos elementos de potência descritos na Seção 2.1 deste IT.

O esquema de cálculo automático de ganho não é representado diretamente no modelo, uma vez que o intervalo de tempo estabelecido para a realização do teste de ganho descrito na Seção 2.2 é da ordem de minutos, muito superior aos tempos associados aos transitórios eletromagnéticos existentes no sistema elétrico.

Para representar na simulação a influencia deste parâmetro, existe no modelo um ganho fixo, ( $SCL$  na Figura 3) calculado como a relação entre o nível de curto-circuito trifásico no PAC e a potência nominal capacitiva do CE Tauá, cujo valor deverá ser fornecido pelo usuário como dado de entrada. As simulações apresentadas a seguir consideram a configuração de rede completa, máximo nível de curto-circuito em Tauá 230kV no horizonte do projeto de 725MVA, correspondente à configuração de geração máxima no ano 2022 (Figura 4).

São apresentadas neste IT simulações de aplicação de faltas equilibradas (trifásicas) e desequilibradas (bifásicas) na linha Milagres-Tauá 230kV, terminal Tauá, eliminadas em 100mseg com a abertura da referida linha. A abertura desta linha na eliminação da falta produz uma variação no nível de curto-circuito em Tauá 230kV suficiente para provocar a atuação do supervisor de ganho. A atuação desta malha de controle e a sua contribuição para a obtenção de um regime permanente estável após a eliminação da falta são analisadas.

Além das correntes instantâneas no TSC1 e no TCR, são registradas as seguintes grandezas do sistema de controle deste equipamento:

- V\_\_PCC:** Valor eficaz da tensão de sequencia positiva medida no PCC (pu)
- B\_\_REG:** Sinal de saída do controlador PI (pu)
- DV\_\_SL:** Erro na entrada do controle compensado pelo estatismo (pu)
- GAINRE:** Sinal de atuação do estabilizador de ganho no sinal DVR\_\_SL

São utilizados nas simulações os seguintes valores para os ganhos do compensador:

- K<sub>P</sub>** = 0,36 conforme definido no projeto do CE Tauá
- SCL** = 8,0 correspondente ao máximo nível de curto-circuito em Tauá 230kV
- K<sub>Gc</sub>** = 1,0 correspondente ao estabilizador de ganho não atuado

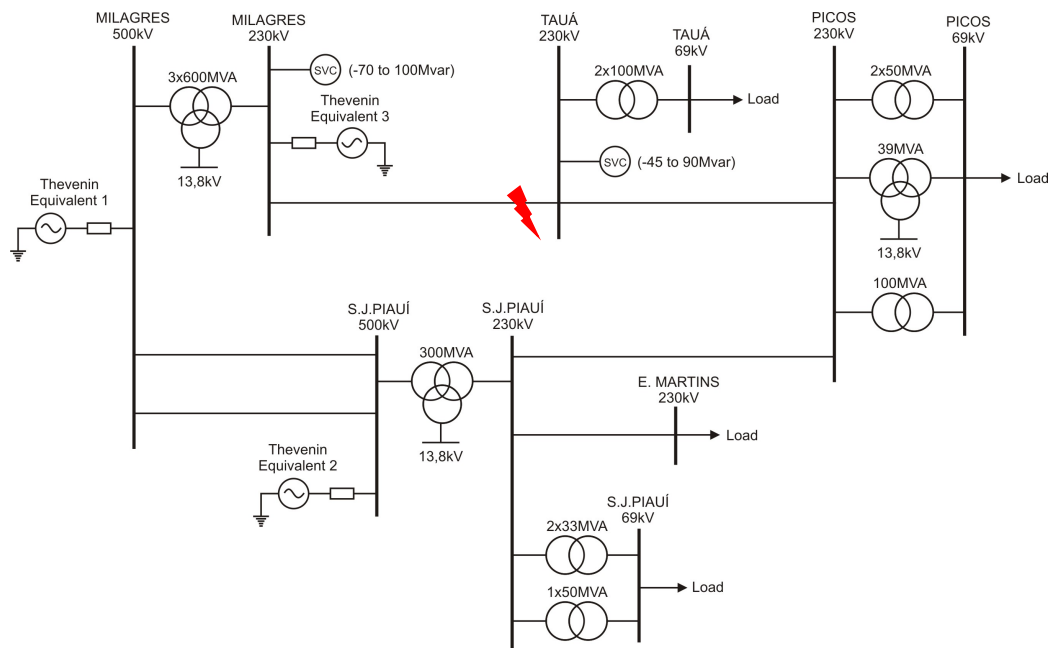


FIGURA 4 – Diagrama Unifilar da Rede Associada ao CE Tauá

### 3.1 Falta Trifásica na Linha Milagres-Tauá 230kV

Conforme mostrado nas Figuras 5, durante a falta, o CE Tauá opera em 0Mvar devido à atuação do esquema de bloqueio por subtensão. Verifica-se a presença de oscilações de alta frequência no sinal B\_\_REG durante cerca de 38,3 mseg após a eliminação da falta devido à redução do nível de curto-circuito em Tauá 230kV provocado pela abertura da linha Milagres-Tauá 230kV. O sinal GAINRE (**K<sub>Gc</sub>**) é então reduzido do seu valor inicial 1,0 até 0,4839 devido à atuação do supervisor de ganho, sendo tais oscilações amortecidas de forma satisfatória.

O TSC1 é inserido após a atuação do supervisor de ganho, decorridos 22,3 mseg do amortecimento das oscilações. Não ocorre oscilação entre o TCR e o TSC1, que permanece inserido até o final da simulação, caracterizando uma operação coordenada entre este elemento e o TCR. O TSC2 não é utilizado e permanece bloqueado até o final da simulação.

O sinal V\_\_PCC mostra que em cerca de 200mseg da eliminação da falta, um regime permanente estável e satisfatório é obtido na SE Tauá, que registra tensão RMS de regime pós-falta ligeiramente inferior (1,023pu) ao valor pré-falta (1,026pu) e um pico de sobretensão de 1,06pu.

As tensões instantâneas em Tauá 230kV apresentam picos de sobretensão de 1,16 a 1,18pu imediatamente após a eliminação da falta, devidamente amortecidos pela ação do TCR.

Durante a falta trifásica observa-se a presença de componentes de corrente DC no TCR, que circulam quando no instante em que a tensão aplicada ao TCR se anula devido aos efeitos da falta, a sua corrente não é nula (circulado em preto nas Figuras 5-(b) e 7-(b)). Com tensão nula, a corrente no reator, que é proporcional à integral da tensão,

permanece constante, dando origem à chamada *DC Trapped Current*, que deixa de circular quando a falta é eliminada e a tensão aplicada ao reator não é mais nula. Observa-se também a presença de uma componente AC de corrente de frequência 180Hz (terceiro harmônico) superposta à *DC Trapped Current* que também desaparece na eliminação da falta. Tais correntes são devidamente consideradas no dimensionamento das válvulas de tiristores e não são motivo de preocupação para a operação do compensador.

### 3.2 Falta Bifásica na Linha Milagres-Tauá 230kV

Conforme mostrado nas Figuras 6 e de maneira análoga à falta trifásica, o CE Tauá opera em 0Mvar durante a falta devido à atuação do esquema de bloqueio por subtensão. Imediatamente após a eliminação da falta, verifica-se a presença de oscilações de alta frequência no sinal B\_REG durante cerca de 25mseg, devido à redução do nível de curto-circuito em Tauá 230kV, provocado pela abertura da linha Milagres-Tauá 230kV. O sinal GAINRE ( $K_{GC}$ ) é então reduzido do seu valor inicial 1,0 até 0,4850 devido à atuação do supervisor de ganho, amortecendo de forma satisfatória tais oscilações.

O TSC1 é inserido após a atuação do estabilizador de ganho, decorridos 22,0mseg do amortecimento das oscilações. Não existe oscilação entre o TCR e o TSC1, que permanece inserido até o final da simulação, caracterizando uma operação coordenada entre este elemento e o TCR. O TSC2 não é utilizado e permanece bloqueado até o final da simulação. Não se verifica neste caso a circulação de componentes de corrente DC no TCR, uma vez que devido à natureza desequilibrada da falta bifásica, a tensão aplicada ao TCR não se anula durante a sua aplicação. Os resultados da simulação mostram que o grau de severidade da falta bifásica é inferior ao da falta trifásica analisada na Seção 3.1.

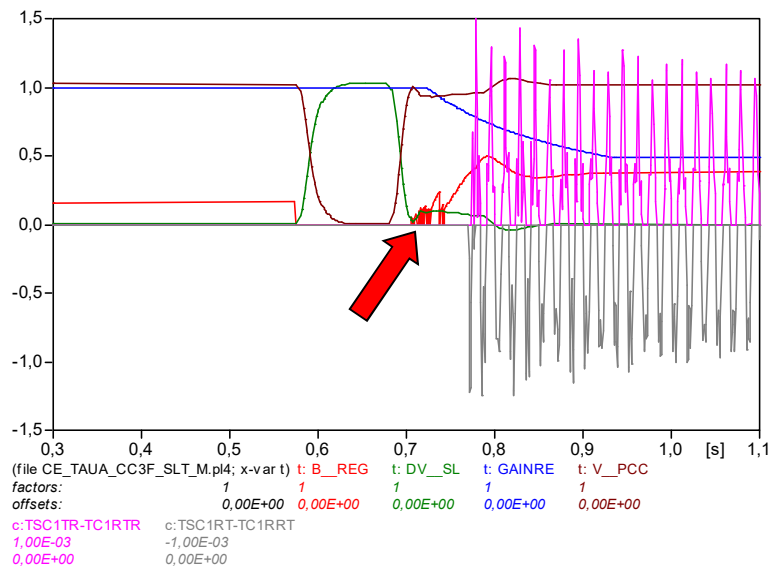


FIGURA 5–(a) – Falta Trifásica na LT Milagres-Tauá 230kV Terminal Tauá, Sinais de Controle ( $K_P = 0,36$ )  
Escala Vertical em pu

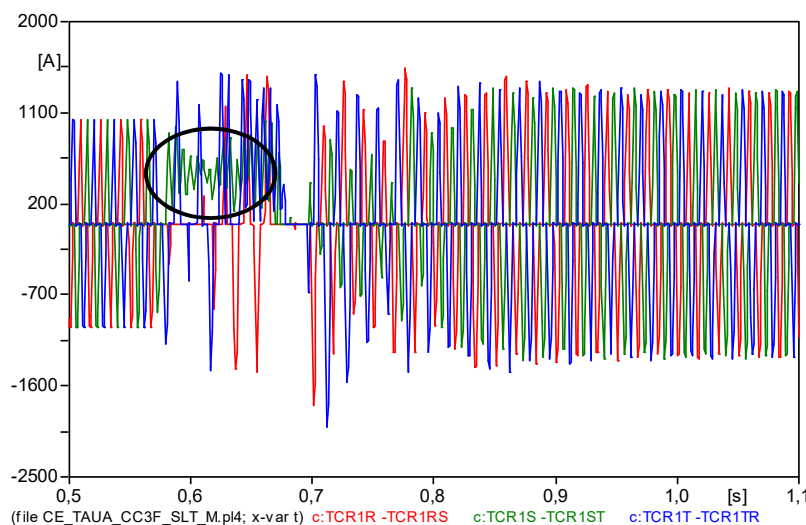


FIGURA 5–(b) – Falta Trifásica na LT Milagres-Tauá 230kV Terminal Tauá, Corrente no TCR ( $K_P = 0,36$ )

### 3.3 Falta Trifásica na Linha Milagres-Tauá 230kV com Elevação de Ganho

Para avaliar o comportamento do CE Tauá em uma situação mais severa do que as contempladas no seu projeto original, forçando este equipamento a operar em uma condição de potencial instabilidade, foi simulada a aplicação da falta trifásica descrita na Seção 3.1 considerando o ganho  $K_P$  elevado de 0,36 para 0,72, cerca de duas vezes o valor definido no projeto do CE Tauá. A análise do comportamento do referido compensador nestas condições é efetuada a seguir e os resultados mostrados nas Figuras 7.

Durante a falta, o CE Tauá opera em 0Mvar devido à atuação do esquema de bloqueio por subtensão. Verifica-se a presença de oscilações de alta frequência no sinal B\_\_REG durante cerca de 68,8 msec após a eliminação da falta devido à redução do nível de curto-circuito em Tauá 230kV provocado pela abertura da linha Milagres-Tauá 230kV. Tais oscilações são satisfatoriamente amortecidas através da atuação do supervisor de ganho. Após o amortecimento das oscilações de alta frequência, surge no sinal B\_\_REG uma oscilação subsíncrona da ordem de 11Hz, que só é amortecida quando o sinal GAINRE ( $K_{GC}$ ) é reduzido para 37,8% do seu valor inicial.

O TSC1 é inserido em cerca de 22mseg após o surgimento da oscilação de 11Hz, permanecendo em operação por cerca de dois ciclos, quando é bloqueado pela ação do controle. O bloqueio do TSC1 coincide com o pico positivo da oscilação de 11Hz que provoca sobretensão na rede elétrica. Depois de 27 msec do seu bloqueio, o TSC1 volta a ser inserido e assim permanece até o final da simulação.

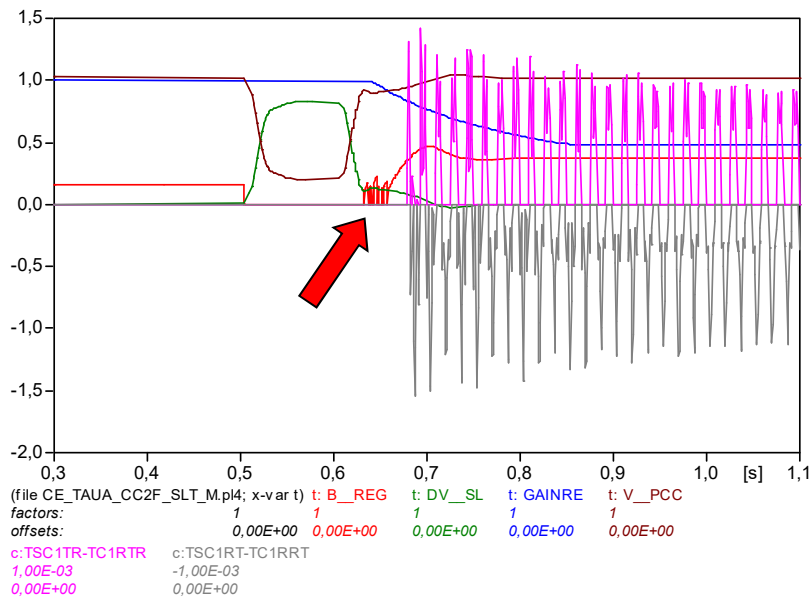


FIGURA 6–(a) – Falta Bifásica na LT Milagres-Tauá 230kV Terminal Tauá, ( $K_P = 0,36$ )  
Escala Vertical em pu (Sinais de Controle) e em kA (Corrente TSC1 – fase ab)

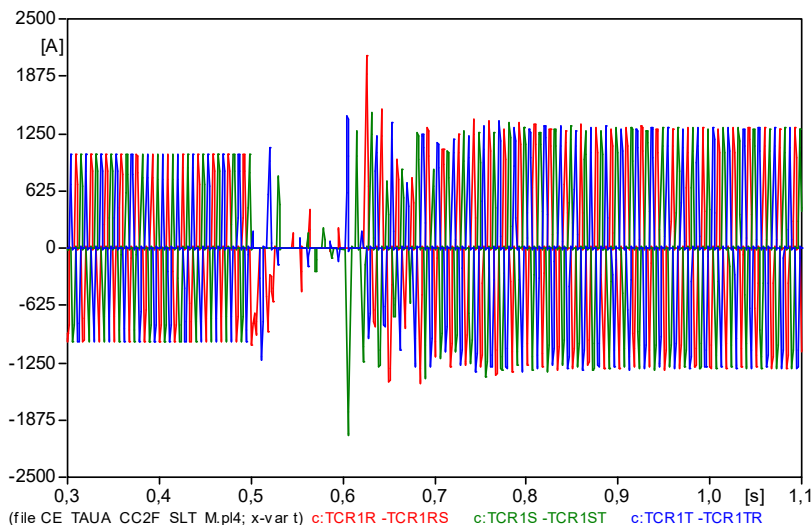


FIGURA 6–(b) – Falta Bifásica na LT Milagres-Tauá 230kV Terminal Tauá, Corrente no TCR ( $K_P = 0,36$ )



O TSC2, cuja corrente não é mostrada nas Figuras 7, é inserido durante o primeiro semiciclo da oscilação de 11Hz e é bloqueado no segundo semiciclo. Até o final da simulação, este elemento não volta a ser inserido.

O supervisor de ganho atua através do sinal GAINRE durante cerca de 315 mseg, reduzindo o ganho  $K_{GC}$  do valor inicial 1,0 até 0,377 e amortecendo satisfatoriamente as oscilações de alta e baixa frequência. Um regime permanente estável e satisfatório é obtido, com tensão eficaz pós-falta de 1,022pu, valor ligeiramente inferior à tensão pré-falta de 1,027pu. As oscilações de 11Hz produzem um pico de sobretensão de 1,126pu no sinal  $V\_PCC$ , que em seguida é satisfatoriamente amortecido. Este valor é muito inferior ao patamar máximo de 1,8pu por 50mseg definido no ciclo de sobretensão especificado para o CE Tauá.

De forma similar ao caso apresentado na Seção 3.1, componentes DC e de terceira harmônica de corrente circulam no TCR durante a falta. Tais correntes são devidamente consideradas no dimensionamento das válvulas de tiristores e não são motivo de preocupação para a operação do compensador.

Através dos resultados aqui apresentados, fica comprovado que o sistema de controle do CE Tauá é projetado de forma robusta e segura, garantindo um desempenho estável, mesmo nas severas condições de operação aqui simuladas, não previstas no seu projeto original.

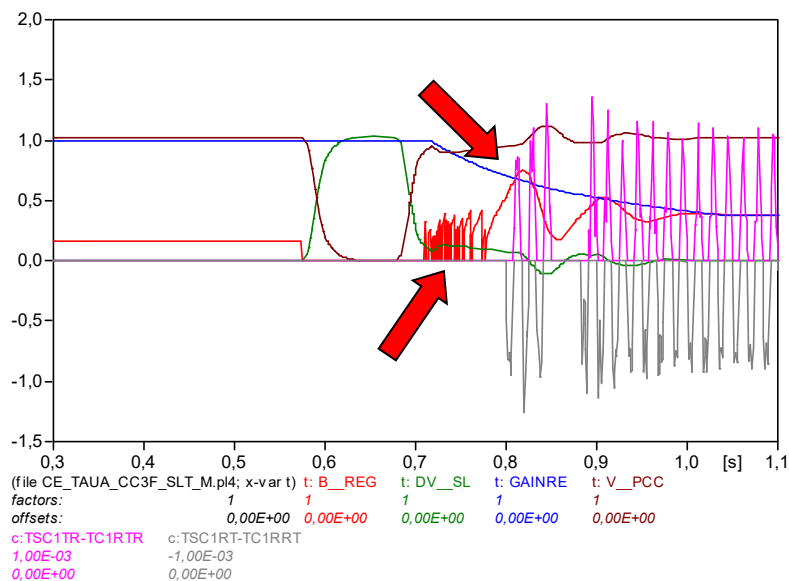


FIGURA 7-(a) – Falta Trifásica na LT Milagres-Tauá 230kV, Terminal Tauá, ( $K_p = 0,72$ )  
Escala Vertical em pu (Sinais de Controle) e em kA (Corrente TSC1 – fase ab)

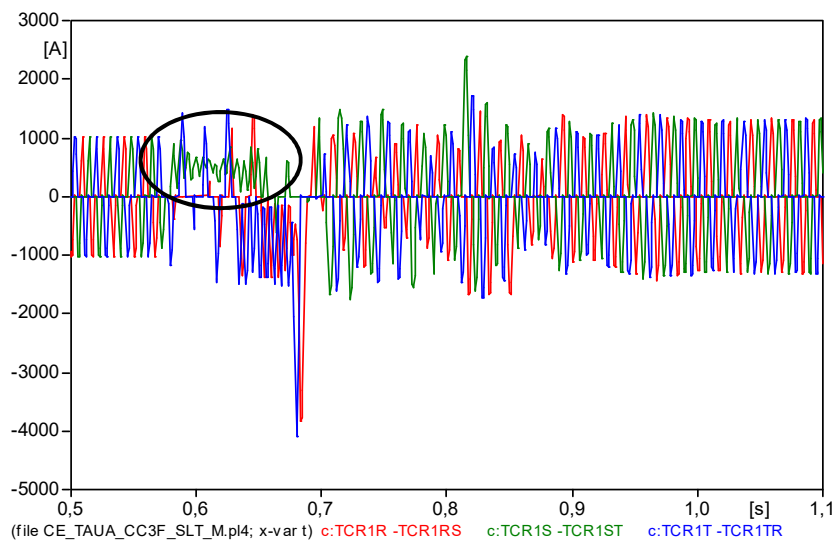


FIGURA 7-(b) – Falta Trifásica na LT Milagres-Tauá 230kV Terminal Tauá, Corrente no TCR ( $K_p = 0,72$ )



## 4.0 - TESTES REALIZADOS EM RTDS

Conforme detalhado em (3), como parte dos testes de aceitação em fábrica do CE Tauá, foram realizados testes em simulador digital em tempo real (RTDS) utilizando-se os painéis reais do referido equipamento, com o compensador conectado à rede elétrica apresentada na Figura 4. Os referidos testes contemplaram a verificação da funcionalidade dos sistemas de proteção e controle de malha aberta e fechada, além da análise da resposta ao degrau e do desempenho do CE Tauá durante grandes perturbações na rede elétrica. Dentre as várias simulações efetuadas, são apresentados na Figura 8 os resultados da simulação de aplicação de falta trifásica na linha Milagres – Tauá 230kV, terminal Tauá, eliminada em 100mseg com abertura da LT, rede completa, nível de curto-circuito no PAC de 725MVA. As tensões estão em kV e as correntes em kA.

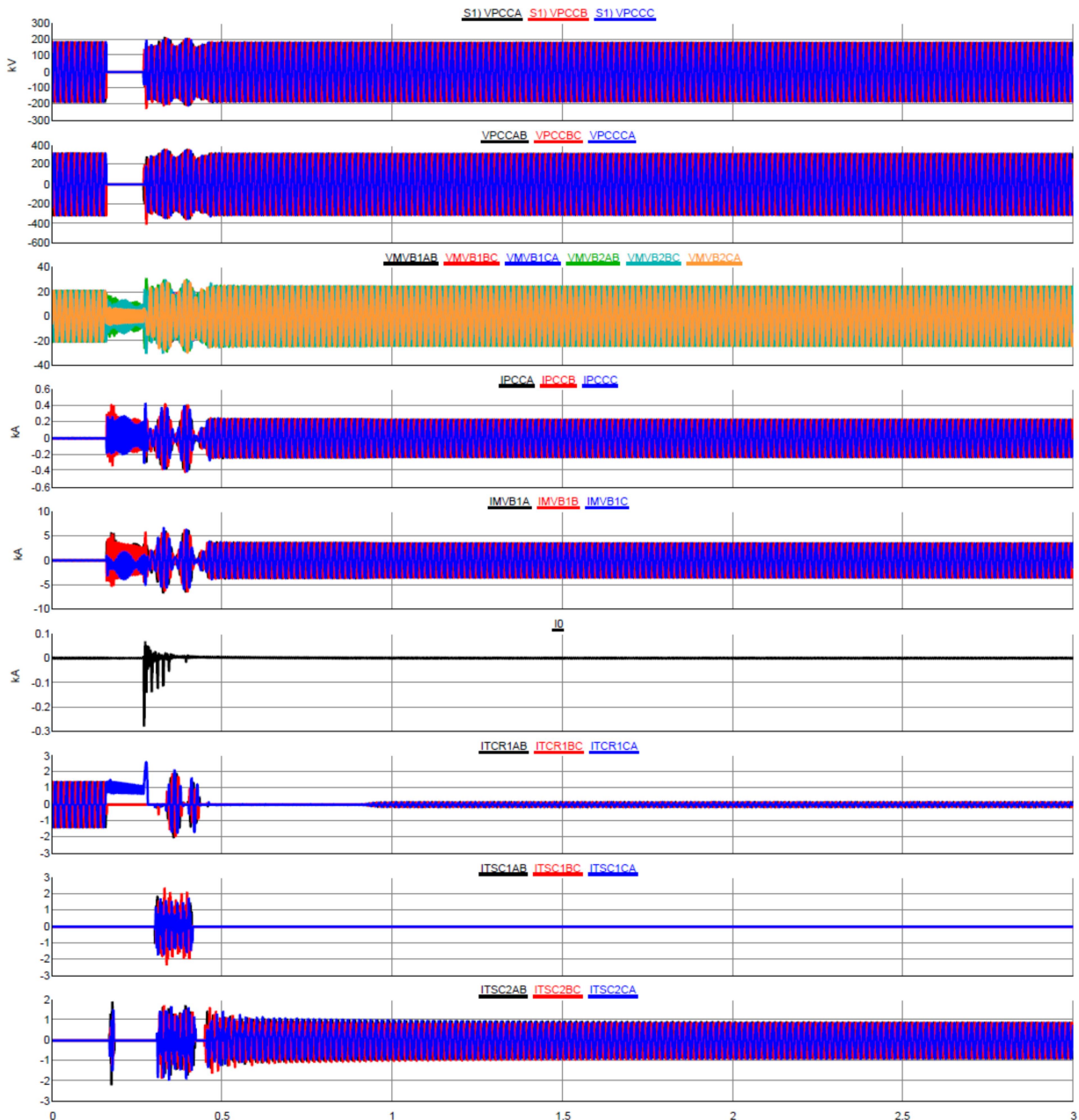


FIGURA 8 - Falta Trifásica na LT Milagres-Tauá 230kV Terminal Tauá, Teste em RTDS, Sistema Completo, Nível de Curto-Circuito Trifásico de 725 MVA em Tauá 230kV. Escala de Tempo em Segundos

**Grandezas Registradas na Figura 8:** Tensões fase-neutro 230kV, Tensões entre fases 230kV, Tensões entre fases 15kV, Correntes injetadas no 230kV pelo CE Tauá, Correntes totais do 15kV do CE Tauá, Corrente de sequência zero no 15kV do CE Tauá, Correntes instantâneas no delta do TCR, Correntes instantâneas no delta do TSC1, Correntes instantâneas no delta do TSC2.

A análise dos resultados do teste em RTDS apresentado na Figura 8 a seguir resumida comprova a desejada correspondência entre as simulações em ATP e o teste em RTDS:

- Na eliminação da falta com abertura da linha Milagres – Tauá 230kV, observa-se a presença de oscilações subsíncronas da ordem de 12Hz nas tensões e correntes dos setores de alta e média tensão do CE Tauá, tal como ocorre nas simulações em ATP apresentadas nas Figuras 5 e 7.
- Tais oscilações são amortecidas de forma satisfatória através da ação do estabilizador de ganho em cerca de dois ciclos (33mseg).
- Observa-se a presença da *DC Trapped Current* nas correntes do TCR, tal como nas simulações em ATP apresentadas nas Figuras 5 e 7.
- Apenas um dos TSCs (no caso o TSC2) permanece inserido no regime permanente pós-falta, que é atingido de forma satisfatória em cerca de 200mseg da sua eliminação.

Durante o comissionamento do CE Tauá, foram realizados no sistema real ensaios de resposta ao degrau, com resultados equivalentes aos obtidos nos testes realizados no RTDS. Quanto aos ensaios de aplicação de grandes perturbações, por razões sistêmicas não foi liberada a aplicação de faltas nas proximidades do CE Tauá, não permitindo a comparação com os resultados apresentados em ATP e no RTDS. Foi autorizada apenas a realização de testes de baixo grau de severidade, tais como manobra de transformador externo, manobra de linha de transmissão de 230kV e de reator shunt de 230kV nas proximidades do CE Tauá, com resultados satisfatórios.

## 5.0 – CONCLUSÕES

- O reator de bloqueio série configura-se como uma alternativa eficaz para viabilizar a aplicação da tecnologia tradicional de compensadores estáticos em pontos da rede elétrica com reduzidos valores de SCL e onde os valores de perdas máximas especificados não permite o emprego da solução baseada em conversores VSC.
- Os resultados apresentados neste IT demonstram a eficácia e robustez dos esquemas de cálculo automático e supervisão de ganho implementados no CE Tauá, que contribuem de forma significativa para o amortecimento de oscilações e a obtenção de um regime permanente pós-falta estável mesmo em condições de operação não previstas no projeto original do referido equipamento.
- Os resultados aqui apresentados atestam a desejada correspondência entre as simulações em ATP e os testes HIL realizados no RTDS, com a utilização dos painéis reais de controle do CE Tauá.
- Em prosseguimento aos trabalhos apresentados neste IT, pretende-se analisar, utilizando uma modelagem detalhada em ATP, a operação conjunta dos CEs Tauá e Milagres (-70 a 100Mvar, 230kV), que operam eletricamente próximos. O primeiro utiliza recursos de controle digital e adaptativo, enquanto o segundo utiliza controle analógico e ganhos fixos.

## 6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) G. Pilz, D. Langner, M. Battermann, H. Schmitt, "Line - or self-commutated Static Var Compensators (SVC) – Comparison and application with respect to changed system conditions" *Cigré Colloquium HVDC and Power Electronics to Boost Network Performance*, October 2nd-3th 2013, Brasília, Brazil.
- (2) J. Aho, N. Thomson, A. Kähkönen, K. Kaasalainen, "Main Reactor Concept – a Cost and Performance Efficient SVC Configuration", *The 16<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics Application – EPE'14 ECCE Europe Procedures*, Lappeenranta, Finland, August 26<sup>th</sup> to 28<sup>th</sup> 2014.
- (3) M. Lima, H. Salvador, S. Kuusinen, T. Nissinen, A. Kähkönen, M. Spinella, R. Campos, "Estudos em Simulador Digital em Tempo Real para Avaliação do Desempenho de Compensadores Estáticos de Potência Reativa com Controle Adaptativo em Sistemas de Transmissão com Reduzidos Níveis de Curto-Circuito: o Exemplo do CE Tauá", *XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*, Foz do Iguaçu, Brasil, 18 a 21 de Outubro de 2015.
- (4) SERGIO DE OLIVEIRA FRONTIN (ORGANIZADOR), "Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas", Brasília, Teixeira, 2013, ISBN 978-85-88041-07-7. pp. 703-735.

## DADOS BIOGRÁFICOS

**Manfredo Lima** nasceu em Recife, Brasil, em 1957. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 1979, recebeu o grau de Mestre em Engenharia Elétrica pela UFPE em 1997 e o de Doutor em Engenharia Mecânica, com ênfase em automação de sistemas pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em 2005. Dr. Lima ingressou na Chesf em 1978 onde desenvolve atividades de estudos elétricos e engenharia nas áreas de eletrônica de potência, equipamentos FACTS, qualidade de energia, sistemas de controle, transitórios eletromagnéticos e transmissão em CCAT. Em 1992, ingressou na Universidade de Pernambuco (UPE), onde é responsável pelas disciplinas Eletrônica de Potência e Controle de Processos e desenvolve atividades de pesquisa. É representante da Chesf no CE - B4 (Eletrônica de Potência e Elos CCAT) da Cigré Brasil, com participação em grupos de trabalho nacionais e internacionais. É também sócio fundador da Sociedade Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica (SBQEE).

