



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO - 004**

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE EQUIPAMENTOS FACTS ATRAVÉS DE TESTES EM SIMULADOR EM TEMPO REAL (RTDS™): O EXEMPLO DO COMPENSADOR ESTÁTICO DE SILVES**

**Manfredo Correia Lima (\*)**  
**Chesf**

**Adolpho Calazans**  
**Chesf**

**Marcio de Oliveira**  
**ABB**

**Mikael Åberg**  
**ABB**

**Rickard Ellstrom-Jonforsen**  
**ABB**

**RESUMO**

Através do leilão ANEEL 004/2008, a interligação Tucuruí-Macapá-Manaus foi dividida em três lotes, cabendo ao Consórcio Manaus Transmissora de Energia (MTE) a implantação do lote C, formado pelas linhas Oriximiná-Silves-Lechuga 500kV e pelas subestações Silves e Lechuga. Para atendimento aos critérios de planejamento e procedimentos de rede, está prevista a instalação, dentre outros equipamentos, de um compensador estático (-200 a +300Mvar 500kV) na subestação de Silves. Este trabalho descreve os testes em simulador em tempo real (RTDS™) realizados nos laboratórios do Fabricante para avaliação do desempenho deste compensador, integrantes da primeira etapa realizada, apresentando os principais resultados, conclusões e recomendações.

**PALAVRAS-CHAVE**

Capacitor Manobrado, Compensador Estático, Controle Adaptativo, Desempenho, Otimizador de Ganho, Reator Controlado, Resposta ao Degrau, Simulador em Tempo Real,

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O Programa de Expansão da Transmissão ciclo (2008 - 2012) da Empresa de Planejamento Energético (EPE) definiu através de estudos de planejamento da expansão da transmissão o conjunto de obras necessárias ao sistema elétrico brasileiro no horizonte de cinco anos, remetido ao Ministério de Minas e Energia e à ANEEL como recomendação para ser objeto de leilão de concessão.

Para a região Norte do Brasil, o referido programa definiu a instalação da interligação Tucuruí-Macapá-Manaus, composta por 1490km de linhas de transmissão em 500kV, conectando Tucuruí a Manaus (Lechuga), com quatro subestações intermediárias (Xingu, Jurupari, Oriximiná e Silves) e por 339km de linhas de transmissão em 230kV de Jurupari a Macapá, com uma subestação intermediária em Laranjal, utilizando estruturas de circuito duplo em corrente alternada. A referida interligação permitirá a integração dos sistemas que alimentam a Região Amazônica, atualmente operando isolados e supridos principalmente por usinas térmicas a óleo e gás, ao Sistema Interligado Nacional.

O início da operação do referido sistema é previsto para outubro de 2011 e sua capacidade inicial será de 1730MW, podendo ser expandido até 2530MW. A previsão de demanda dos sistemas isolados a serem supridos por este empreendimento em 2012 é de 1400MW, atingindo 1900MW em 2017. Sua operação permitirá uma redução significativa na queima de combustíveis fósseis e na emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera de cerca de um milhão de toneladas por ano.

O sistema de transmissão aqui descrito foi dividido em três lotes, objeto do leilão ANEEL 004/2008, conforme mostrado na Figura 1, onde as atuais subestações de Silves e Lechuga são identificadas como Itacoatiara e Cariris, conforme original do Edital da ANEEL (1). O lote C, formado pelas linhas Oriximiná-Silves e Silves-Lechuga, além das subestações 500/138kV Silves e 500/230kV Lechuga, teve como vencedor o Consórcio Manaus Transmissora de Energia (MTE), formado por Abengoa, Chesf e Eletrobras Eletronorte. Para permitir o atendimento aos critérios de planejamento e procedimentos de rede, serão instalados bancos de capacitores série em todos os trechos das

linhas de 500kV e um compensador estático (CE) de potência reativa (-200 a +300Mvar, 500kV) na subestação de Silves. O referido compensador possui tensão secundária 20kV, onde estão conectados dois reatores controlados a tiristores (RCT), dois capacitores manobrados a tiristores (CCT) e dois filtros tipo *single-tuned* sintonizados na quinta harmônica (STF). O seu sistema de controle em malha fechada é puramente digital e adaptativo, o que garante elevado grau de disponibilidade e uma resposta constante para todas as configurações da rede elétrica contempladas no projeto. Além disso, redundância é aplicada ao sistema de controle, incluindo as placas de interface E/S.

A proposta deste IT é apresentar a primeira etapa dos testes em simulador em tempo real (RTDS™) realizados nos laboratórios do Fabricante para avaliação do desempenho do CE Silves, analisando-se os principais resultados obtidos. Para tal, os painéis reais de controle do CE Silves são conectados a um simulador digital em tempo real, onde é representada a rede elétrica e a partir daí, são realizados testes funcionais e simulações de pequenas perturbações (degraus na tensão de referência) e grandes perturbações (curtos-circuitos, manobra de linhas, energização de transformador, etc), com base nas quais é avaliado o desempenho dinâmico do compensador.

A presença do CE Oriximiná (-200 a +300Mvar, 500kV) no lote B do sistema Tucuruí-Manaus requer especial atenção neste caso, tendo em vista a proximidade elétrica do CE Silves. Simulações de aplicação de distúrbios na região de influência comum a ambos os compensadores devem também ser realizadas, visando assegurar que estes respondem de forma satisfatória, sem a presença de oscilações não amortecidas entre os seus controles.

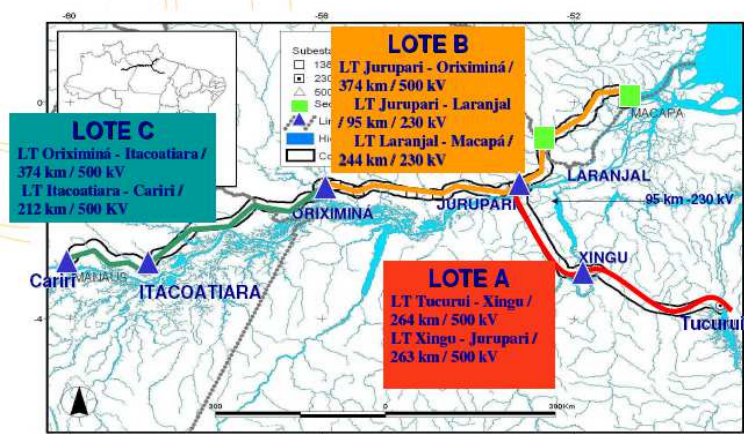


FIGURA 1 – Composição dos Lotes do Sistema de Transmissão Tucuruí-Manaus (1)

## 2.0 - COMPENSADOR ESTATICO DE SILVES

O CE Silves é conectado à barra de 500kV da referida subestação através de um banco de transformadores 500/20kV-300MVA, unidades monofásicas, ligação estrela aterrada/delta, com uma unidade reserva. Este equipamento é composto por dois reatores controlados a tiristores (RCT) de 148Mvar, dois capacitores manobrados a tiristores (CCT) de 139Mvar e dois bancos de filtros sintonizados na quinta harmônica de 37Mvar (Figura 2). A variação contínua do ângulo de disparo dos RCT e o chaveamento dos CCT, combinados com a contribuição dos filtros capacitivos fixos, produz um valor de potência reativa de saída continuamente variável situado entre os seus limites nominais indutivo (200Mvar) e capacitivo (300Mvar). Cada componente é ligado à barra de 20kV através da respectiva chave seccionadora. A seguir, são descritas as funções de controle mais relevantes do CE Silves.

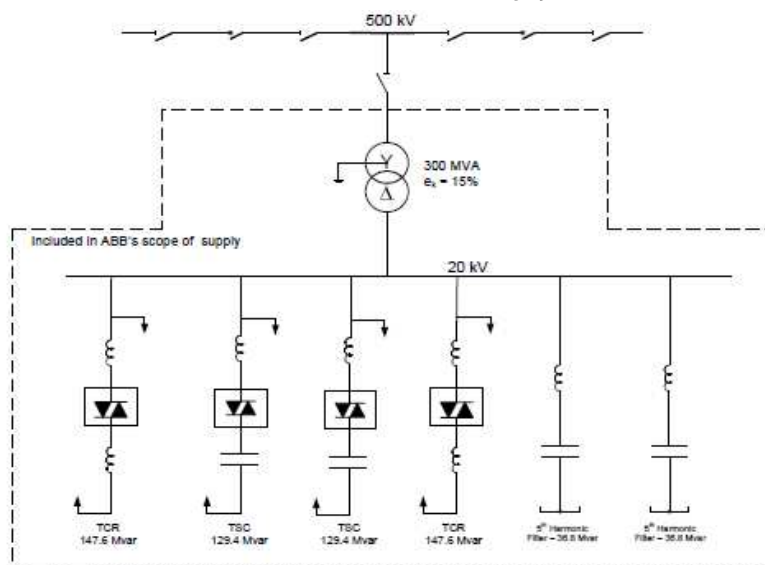


FIGURA 2 – Diagrama Unifilar Simplificado do CE Silves (2)

## 2.1 Modos de Controle Automático e Manual

Conforme estabelecido em (2), em condições normais de operação, o CE Silves deverá operar no modo de controle automático de tensão, que consiste de um sistema em malha fechada que efetua o controle da tensão de sequência positiva da barra de 500kV com base em uma estrutura proporcional-integral (Figura 3). O sinal de saída deste controlador é a susceptância equivalente do CE,  $B_{SVC}$  que multiplicada pela tensão medida, fornece um sinal equivalente à corrente do CE. Este sinal, multiplicado pelo ajuste do *slope*, cujo valor pode variar de 0,1 a 10%, conforme especificação, quando adicionado à tensão de entrada, produz a desejada inclinação na curva tensão x corrente do CE Silves (2). No modo de controle manual, o compensador opera em malha aberta. O valor desejado

de potência reativa de saída é ajustado manualmente por meio da estação de trabalho do operador, através da variação da susceptância equivalente calculada na barra de 500kV de Silves.

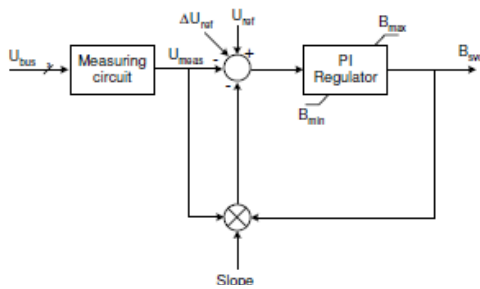


FIGURA 3 – Diagrama de Blocos Simplificado do Controlador de Tensão (2)

## 2.2 Otimizador do Ganho

Para atendimento aos requisitos de performance especificados (4), (5) um esquema otimizador de ganho foi proposto para o CE Silves. Este esquema funciona com base na aplicação de pequenos degraus de tensão no somador de entrada do controlador de tensão (Figura 3) e na medição da variação da susceptância do CE na sua barra de 500kV (teste de ganho). Caso a variação da susceptância seja superior a um valor pré-definido em magnitude, o ganho do controlador de tensão será elevado ou reduzido, conforme a polaridade do *overshoot* medido. Uma tabela

de ganhos, definida com base nos níveis máximo e mínimo de curto-circuito trifásico calculados na barra de 500kV do compensador, é utilizada para cálculo do ganho otimizado. Esta técnica, originalmente denominada *Gain Scheduling*, tem seus princípios teóricos apresentados em (3).

## 2.3 Supervisor do Ganho

Condições de operação não previstas no projeto que implicassem em níveis de curto-circuito no 500kV da subestação de Silves inferiores ao valor mínimo especificado ou a redução da potência de curto-circuito do sistema devido à abertura de linhas ou perda de geração, resultando em um ganho excessivamente elevado no controlador de tensão poderiam levar o compensador a apresentar comportamento oscilatório.

Para evitar este comportamento indesejável, um esquema de supervisão de ganho, que detecta a presença de oscilações superiores a determinada magnitude e duração é implementado no CE Silves. Este esquema, ao detectar o comportamento oscilatório no sinal de saída do compensador, reduz o ganho do seu controlador de tensão, até que as oscilações que deram origem à sua atuação sejam adequadamente amortecidas. O referido ganho permanecerá neste valor reduzido até a realização do próximo teste de ganho programado através do otimizador de ganho, quando o mesmo voltará a ser elevado, caso a rede elétrica tenha retornado às suas condições normais de operação.

## 2.4 Modos Degradados de Operação

Em caso de defeito em um ou mais componentes do CE Silves, estes serão isolados, conforme a seguir descrito e em seguida, o sistema de controle avalia a possibilidade do retorno à operação com redução na faixa de potência nominal indutiva ou capacitiva do compensador, em um modo degradado de operação. Existem modos degradados de operação permitidos, onde é possível o atendimento às especificações do compensador e modos proibidos, onde requisitos da especificação seriam violados e o equipamento não retorna à operação.

O esquema de proteção associado aos modos degradados opera conforme a seguir, em caso de falha em um ou mais componentes do CE Silves.

- Bloqueio dos pulsos de disparo de todas as válvulas de tiristores.
- Abertura do disjuntor do 500kV.
- Abertura das seccionadoras e ativação do relé de bloqueio do elemento defeituoso.
- Avaliação pelo sistema de controle se o modo degradado resultante da perda do elemento defeituoso é permitido.
- Em caso positivo, o disjuntor de 500kV é fechado e o CE Silves retorna à sua operação com redução na faixa de potência reativa indutiva ou capacitiva. O sistema de controle é ajustado automaticamente à nova característica temporária do compensador.
- Em caso negativo, o CE Silves permanece fora de operação até que o elemento defeituoso seja normalizado.

As possíveis conseqüências de falha em um ou mais componentes do CE Silves são listadas a seguir.

- Falha de um ou dois CCT: O valor máximo da susceptância capacitiva do CE é automaticamente reduzida pelo controle e não há modificação na sua susceptância máxima indutiva.
- Falha de um RCT: o valor máximo da susceptância indutiva do CE é automaticamente reduzida pelo controle e não há modificação na sua susceptância máxima capacitiva.
- Falha em um dos filtros: O valor máximo da susceptância capacitiva do CE é automaticamente reduzida pelo controle e não há modificação na sua susceptância máxima indutiva.
- Falha de dois RCT: modo degradado não permitido, pois é necessária a presença de pelo menos um RCT para permitir o controle contínuo da susceptância de saída do compensador. Neste caso, o disjuntor de 500kV permanece aberto até a normalização de pelo menos um RCT.
- Falha em dois filtros: modo degradado não permitido, pois é necessária a presença de pelo menos um filtro

para drenar os harmônicos produzidos por um RCT, uma vez que o outro, caso esteja disponível, estará sempre ou totalmente inserido ou totalmente bloqueado por estratégia de controle. Neste caso, o disjuntor de 500kV permanece aberto até a normalização de pelo menos um filtro.

## 2.5 Manobra de Elementos Externos

Em atendimento à especificação, o CE Silves é capaz de efetuar de modo automático a conexão e a desconexão de reatores e capacitores shunt externos. Encontra-se inserido neste esquema um reator de 200Mvar / 500kV instalado na subestação Silves e é prevista a implementação de bancos de capacitores futuros. Tais elementos podem também ser manobrados através da ação do operador. Maiores detalhes quanto à implementação desta lógica são fornecidos em (2). Sua ativação por intermédio do controle do CE se dá apenas quando o compensador opera no modo de controle automático de tensão.

## 3.0 - TESTES EM SIMULADOR DIGITAL EM TEMPO REAL (RTDST<sup>TM</sup>)

Para a realização dos testes de performance do CE Silves, com o objetivo de comprovar que o desempenho dinâmico do referido equipamento encontra-se em conformidade com os requisitos especificados, os seus painéis de controle reais foram conectados ao simulador digital em tempo real (RTDST<sup>TM</sup>), que inclui a representação da rede elétrica onde encontra-se inserido o compensador, além do seu transformador abaixador, RCT, CCT e filtros. Três tipos de rede foram utilizadas para a realização dos estudos:

- Rede simplificada, composta por um equivalente de Thévenin em Silves 500kV, cuja impedância pode ser variada de forma a reproduzir os níveis máximo (11000MVA – Sistema Forte) e mínimo (2400MVA – Sistema Fraco) de curto-circuito no 500kV da referida subestação, com relação  $X/R = 15$ . São representados o compensador estático de Silves, seu transformador e seus disjuntores, além de reatores e capacitores shunt conectados no 500kV para a realização de testes tais como do esquema de chaveamento de elementos externos. Esta rede foi utilizada na primeira etapa dos testes, cujo objetivo principal foi testar a funcionalidade intrínseca dos recursos de controle do compensador.
- Rede completa, com representação de linhas, capacitores série, reatores shunt, transformadores abaixadores e cargas de 138kV (Oriximiná e Silves) e 230kV (Lechuga), a partir de um equivalente de Thévenin em Jurupari 500kV (Figura 4). O CE Oriximiná (-200/+300Mvar, 500kV) integrante do lote B do sistema Tucuruí-Manaus, foi representado por um modelo típico *built-in* do RTDST<sup>TM</sup>, que não possui as características adaptativas provavelmente disponíveis no referido compensador. Esta rede será utilizada na segunda etapa dos testes, cujo objetivo é avaliar o desempenho dinâmico do CE Silves.
- Rede degradada com operação via Lechuga, considerando a não entrada em operação dos Lotes A e B com potência de curto-circuito trifásica de 1000MVA em Silves 500kV e cargas de, respectivamente, 50% e 10% do caso de mínima potência de curto-circuito (2400MVA) em Silves e Lechuga. Esta rede foi estudada para avaliar a possibilidade de energização do Lote C a partir da subestação de Lechuga com o CE Silves em operação em caso de atraso na entrada dos lotes A e B do sistema Tucuruí-Manaus.

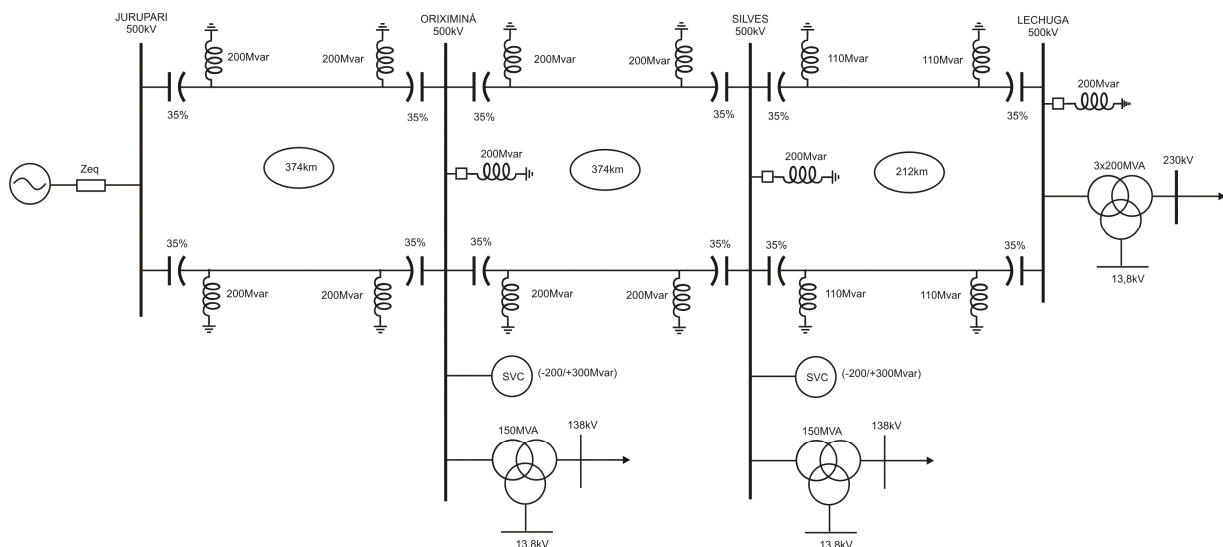


FIGURA 4 – Diagrama Unifilar Simplificado da Rede Completa Representada nos Testes em RTDS

## 3.1 Testes de Funções de Seqüência de Operação

Com o CE Silves conectado à rede simplificada descrita no item 3.0, são testadas as seguintes funções relativas à sequência de operação do referido equipamento:

- Funções de intertravamento, que só liberam a partida do compensador caso, entre outras condições, não haja sinais de trip não resetados, o sistema de resfriamento das válvulas de tiristores esteja disponível e pelo menos um filtro e um RCT estejam disponíveis (operação em modos degradados válidos).
- Sequência de partida com um e dois filtros disponíveis.
- Sequência normal de parada com potências de saída de 300Mvar capacitivos e 200Mvar indutivos.
- Sequência instantânea de parada por atuação da proteção com potência de saída de 300Mvar capacitivos.
- Sequência de religamento e operação em modos degradados.

### 3.2 Testes de Inserção e Bloqueio de CCT

Com o CE Silves conectado à rede simplificada descrita no item 3.0, são testadas as seguintes funções relativas à inserção e bloqueio dos CCT:

- Inserção dos CCT com seus capacitores descarregados.
- Inserção dos CCT com seus capacitores carregados.
- Bloqueio dos CCT.

### 3.3 Calibração da Curva de Susceptância do Compensador

A curva da susceptância do CE Silves foi preliminarmente calibrada durante os testes objeto deste IT usando-se os parâmetros nominais dos respectivos componentes. A verificação final da referida curva deverá ocorrer em campo. Para calibração da citada curva, o CE Silves opera no modo manual e a susceptância de referência  $B_{REF}$  é suavemente elevada nos sentidos indutivo e capacitivo. A susceptância calculada ( $B_{SVC} = Q_{SVC} / V_{RESP}^2$ ) é plotada contra  $B_{REF}$ , sendo obtida uma relação linear.

$Q_{SVC}$  = Potência reativa de saída do CE Silves.       $V_{RESP}$  = Tensão de saída do controle do CE Silves.

Durante os testes, todas as possíveis condições de operação do compensador são verificadas, sendo algumas destas listadas a seguir. Conforme registrado em (2), a desejada linearidade é obtida.

- Todos os elementos do compensador disponíveis.
- Um filtro e um TSC indisponíveis.
- Dois TSC indisponíveis.
- Um filtro e um TCR indisponíveis.
- Um TCR e dois TSC indisponíveis.

## 4.0 - TESTES DE RESPOSTA AO DEGRAU

### 4.1 CE Silves Ligado a uma Rede Simplificada

Na primeira etapa dos testes em RTDS, o CE Silves foi conectado através da sua barra de 500kV a uma impedância equivalente de Thévenin descrita no item 3.0, representando as condições de sistema forte (11000MVA) e sistema fraco (2400MVA). A Tabela 1 resume as simulações de aplicação de degrau realizadas. Em todos os casos, um degrau positivo na tensão de referência do compensador foi aplicado em  $t = 0,1\text{seg}$  e removido em  $t = 0,6\text{seg}$ .

Tabela 1 – Ensaio de Resposta ao Degrau do CE Silves

S <sub>CC</sub> (MVA)	V <sub>REF</sub> (kV)	Ganho CE	Slope (%)	Degrau (%)	Q <sub>CE</sub> (Mvar)	ΔB <sub>CE</sub> (pu)
11000	494,0	4500	0,1	1,0	100 Indutivo	-1,0 a 0,0
11000	494,0	4500	0,1	2,0	100 Indutivo	-1,0 a 0,0
11000	494,0	4500	5,0	2,0	37 Indutivo	-0,4 a 0,4
11000	499,0	4500	10,0	2,0	0	0,0 a 0,47
11000	503,5	4500	0,1	1,0	100 Capacitivo	1,0 a 2,0
2400	478,9	1100	0,1	4,0	100 Indutivo	-1,0 a 0,0
2400	478,9	1100	5,0	4,0	66 Indutivo	-0,7 a 0,0
2400	498,6	1100	0,1	2,0	0	0,0 a 0,46
2400	498,6	500	5,0	5,0	0	0,0 a 0,83
2400	520,0	1100	0,1	2,0	100 Capacitivo	0,98 a 1,41
2400	520,0	500	10,0	5,0	59 Capacitivo	0,55 a 1,18



O sistema otimizador de ganho foi desativado neste grupo de simulações, para evitar que a sua atuação durante a aplicação do degrau interferisse na resposta do compensador. Os parâmetros de performance selecionados conforme (4), (5) são:

- Sobrelevação Percentual (Overshoot -  $M_{PT}$ ) não superior a 20%.
- Tempo de Subida ( $T_R$ ) não superior a 30 msec.
- Tempo de Estabilização ( $T_S$ ) não superior a 100 msec.

Em todas as situações apresentadas na Tabela 1, o atendimento aos parâmetros de performance é obtido. O parâmetro Ganho CE corresponde ao ganho integral do compensador. O ganho proporcional foi considerado igual a zero nas simulações apresentadas na Tabela 1.

A título de ilustração, a Figura 5 apresenta a simulação indicada na sexta linha da Tabela 1, que representa a aplicação de degrau de 4% na tensão de referência, com o CE Silves inicialmente operando em 100Mvar indutivos e potência de curto-circuito no 500kV correspondente a Sistema Fraco (2400MVA). São registrados na Figura 5 os seguintes sinais do CE Silves:

- $V_{RESP}$  (pu): Tensão de saída do controlador principal do CE Silves.
- $B_{REF}$  (pu): Admitância equivalente do CE Silves.
- $ITCR22\_AB, BC, CA$  (kA): Correntes internas ao delta do RCT 2.

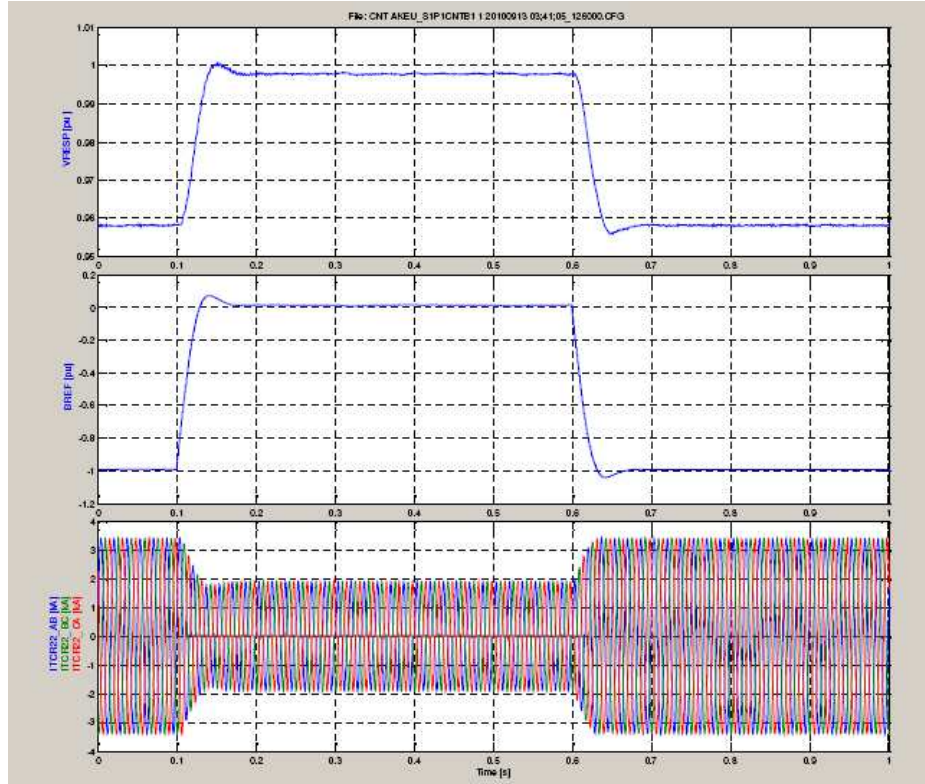


FIGURA 5 – Aplicação de Degrau de 4% no CE Silves ( $S_{CC} = 2400MVA$ )

Os testes de aplicação de degrau com o CE Silves conectado à rede completa, considerando inclusive a presença do CE Oriximiná, serão realizados na segunda etapa dos trabalhos relatados neste IT, programada para o primeiro semestre de 2011.

## 5.0 - TESTES DE FUNÇÕES DE CONTROLE

### 5.1 Supervisor de Ganho

Considerando o CE Silves operando na condição de rede forte ( $S_{cc} = 11000 MVA$ ),  $Q_{SVC} = 200Mvar$  capacitivos, Ganho = 5800,  $V_{REF} = 525kV$ , Slope = 5%, o nível de curto-circuito em Silves 500kV é bruscamente reduzido para 2400 MVA. Devido ao elevado valor de ganho utilizado, adequado para o nível de curto-circuito de 11000 MVA, oscilações de magnitude superior a 10% da faixa total da susceptância do SVC surgem nos sinais de saída deste equipamento. O supervisor de ganho detecta estas oscilações e reduz o ganho relativo do compensador ( $REL\_GAIN$ ) a partir da terceira oscilação, até que as mesmas sejam amortecidas, comprovando o adequado desempenho desta malha de controle (Figura 6).

São registrados na Figura 6 os seguintes sinais do CE Silves:

- $V_{RESP}$  (pu): Tensão de saída do controlador principal do CE Silves.
- $B_{REF}$  (pu): Admitância equivalente do CE Silves.
- $REL\_GAIN$  (pu): Ganho relativo do controlador principal do CE Silves (1.0 pu corresponde ao ganho nominal).
- $ITSC21\_AB, BC, CA$  e  $ITSC22\_AB, BC, CA$  (kA): Correntes internas ao delta dos CCT 1 e 2.
- $ITCR22\_AB, BC, CA$  (kA): Correntes internas ao delta do RCT 2.

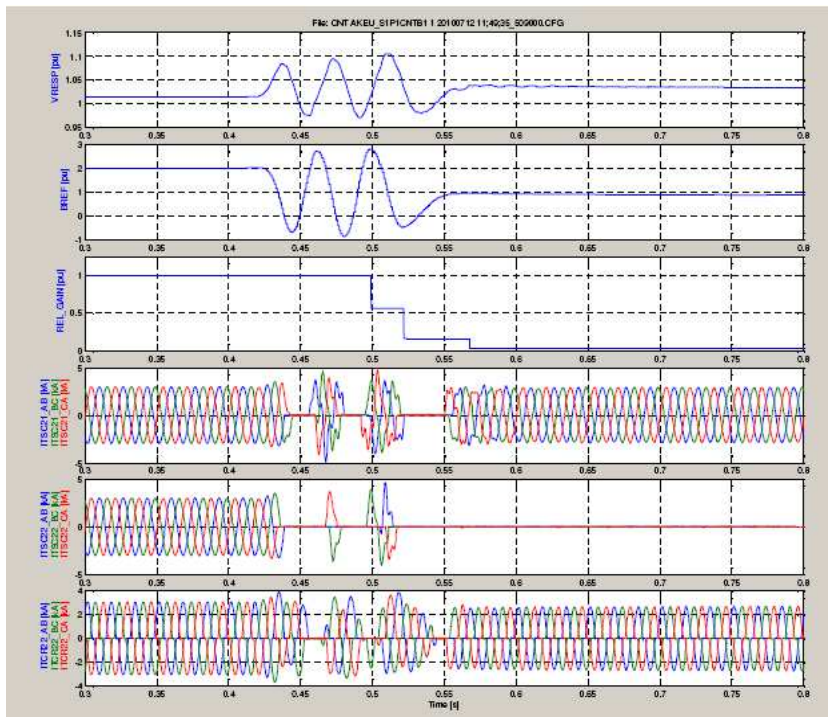


FIGURA 6 – Operação do Supervisor de Ganho para Redução no Nível de Curto-circuito de 11GVA para 2,4GVA

A falta é eliminada em  $t = 0,6$  seg, mas devido ao retardo de 50 msec para desbloqueio (valor também usado apenas para teste da funcionalidade), o compensador permanece no mesmo ponto de operação por este intervalo adicional e em seguida, volta a operar normalmente no modo de controle automático de tensão (Figura 7).

Valores iniciais para os parâmetros deste esquema serão definidos na segunda etapa deste estudo, considerando o CE Silves conectado à rede completa. Resultados preliminares indicam como adequados os ajustes de 0,70 pu para bloqueio, 0,75 pu para desbloqueio e retardo no bloqueio e liberação do compensador de 20 msec. Não obstante, os valores finais destes parâmetros deverão ser definidos durante estudos pré-operacionais para o sistema Tucuruí – Manaus, considerando a presença dos lotes A e B.

São registrados na Figura 7 os seguintes sinais do CE Silves:

- UP1\_A, B, C: Tensões do 500kV.
- $V_{RESP}$  (pu): Tensão de saída do controlador principal do CE Silves.
- $B_{REF}$  (pu): Admitância equivalente do CE Silves.
- UV\_STRAT: Indicação do bloqueio por subtensão.
- Sinais de bloqueio e inserção dos CCT 1 e 2.
- $ITCR21_{AB, BC, CA}$  (kA): Correntes internas ao delta do RCT 1.

### 5.3 Energização da Subestação Silves via Lechuga

Para analisar a viabilidade da energização do lote C via Lechuga com a utilização de geração térmica em caso de atraso na entrada em operação dos lotes A e B, foi representada no RTDSTM uma rede degradada com nível de

### 5.2 Esquema de Bloqueio por Subtensão

Com o SVC Silves operando próximo a 100Mvar capacitivos,  $V_{REF} = 545,8$ kV e Slope = 1%, uma carga trifásica é conectada à barra de 500kV para simular a aplicação de falta remota. Na aplicação da falta ( $t = 0,2$  seg), a tensão cai abaixo de 0,8pu (nível de bloqueio usado apenas para teste da funcionalidade). Devido ao retardo de 100 msec no bloqueio (valor também usado apenas para teste da funcionalidade), o compensador desloca-se para o seu limite capacitivo, na tentativa de compensar o afundamento de tensão provocado pela falta. Decorridos os 100 msec iniciais, os CCT são bloqueados e o RCT1 conduz, forçando o CE Silves a operar no ponto correspondente à susceptância de saída correspondente a 0,5pu, definido através da interface com o operador, também de forma preliminar.

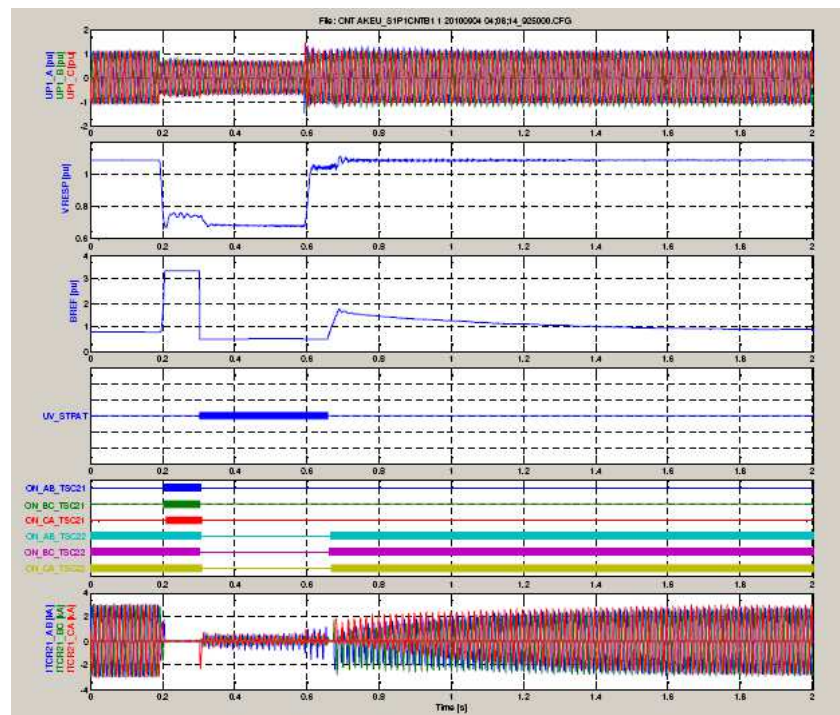


FIGURA 7 – Operação do Esquema de Bloqueio por Subtensão Durante Aplicação de Falta Remota

curto de 1000MVA em Silves 500kV e carga equivalentes, respectivamente, a 50% e 10% dos valores utilizados no caso de 2400MVA, rede completa, em Silves e Lechuga, considerando apenas o lote C em operação. Como os resultados independem da presença do CE Oriximiná, a referida análise foi efetuada já na primeira etapa dos testes em RTDS™.

Foram realizadas as seguintes simulações, com e sem a presença do reator de barra de 200Mvar / 500kV na subestação de Silves:

- a. Energização do CE Silves.
- b. Aplicação de falta 3F-T em Silves 138kV eliminada em 100mseg com rejeição total de carga naquela subestação.

Os resultados das simulações mostram que devido ao reduzido nível de curto associado a esta configuração, inferior ao mínimo especificado para operação do CE Silves, é possível a sua operação na condição de rede degradada, energizada por Lechuga e sem os lotes A e B em operação, desde que atendida uma das seguintes condições a seguir listadas.

- a. Com o reator de 200Mvar / 500kV de Silves em operação, o CE Silves poderá operar no modo automático de controle de tensão, com o otimizador de ganho habilitado.
- b. Com o reator de 200Mvar / 500kV de Silves indisponível, o CE Silves poderá operar no modo automático de controle de tensão, com ganho mínimo e o otimizador de ganhos desabilitado.
- c. Com o reator de 200Mvar / 500kV de Silves indisponível e o otimizador de ganho desabilitado, o CE Silves deverá operar no modo de controle manual.

Deve ser lembrado que o otimizador de ganho pode ser habilitado ou desabilitado através da estação de trabalho do operador.

## 6.0 - CONCLUSÕES

- a. Testes em RTDS utilizando os painéis reais de controle permitem que seja avaliado o desempenho de equipamentos FACTS de forma completa e detalhada, abreviando de forma significativa os trabalhos de comissionamento, uma vez que muitos dos testes realizados nesta etapa não terão de ser repetidos em campo.
- b. Os resultados da primeira etapa dos testes, considerando o CE Silves conectado a uma rede simplificada e sem a presença do CE Oriximiná, integrante do lote B do sistema Tucuruí – Manaus mostram que o desempenho deste equipamento é satisfatório e atende aos requisitos de especificação.
- c. A segunda etapa dos testes, considerando o CE Silves conectado à rede completa descrita ao longo deste IT, bem como a presença do CE Oriximiná, será realizada no primeiro semestre de 2011.
- d. É possível a energização do lote C via Lechuga considerando os lotes A e B fora de operação e com a presença do CE Silves, desde que respeitadas as condições recomendadas no item 5.3 deste IT.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Edital de Leilão nº 004/2008-ANEEL, ANEXO 6C – LOTE C – INTERLIGAÇÃO TUCURUÍ – MACAPÁ – MANAUS: TRECHO ORIXIMINÁ – CARIRIS (MANAUS)
- (2) SVC Tucuruí-Manaus Lot C / F10112 Control Strategy Report
- (3) ADAPTIVE CONTROL, Karl J. Åström and Björn Wittenmark, Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company 1995, pp.19 -20, pp.390 - 416
- (4) GUIDELINES FOR PREPARING A STATIC VAR COMPENSATOR (SVC) SPECIFICATION, NR 500/021 E, February, 2011, www05.abb.com
- (5) ENGENHARIA DE CONTROLE MODERNO, Katsuhiko Ogata, Quarta Edição, 2003 Pearson Education do Brasil, pp. 188-190



## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**Manfredo Correia 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. Correia Lima ingressou na Chesf em 1978, onde desenvolve atividades 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 (FACTS e Elos CCAT) da Cigré Brasil.



**Adolpho Calazans** nasceu em Garanhuns, Brasil, em 1958. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 1981. Em 2004, recebeu o grau de Mestre em Ciências da Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Ingressou em 1982 na Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf). No período de 1995 a 2009 foi gerente na área de manutenção de equipamentos de subestação e desde 2009 trabalha na área de projetos de subestações, com atuação em projetos de equipamentos FACTS e HVDC.

**Marcio Magalhães de Oliveira** nasceu no Rio de Janeiro, Brasil, em 1967. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 1990 e obteve o grau de Mestre em 1992, ambos pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Em 2000, obteve o grau de Ph.D na área de Eletrônica de Alta Potência, pelo Royal Institute of Technology, na Suécia. No mesmo ano, ingressou na ABB em Västerås, também na Suécia. Desde então, tem trabalhado em ofertas e projetos na área de compensação reativa (equipamentos FACTS), participando também de vários estudos envolvendo o simulador RTDS™ e o sistema de controle da ABB. Em 2007, foi apontado especialista em análise e controle de dispositivos FACTS pela ABB.

**Mikael Åberg** nasceu em Bolmsö, Suécia, em 1956. obteve o grau de M.Sc. pela Chalmers University of Technology, Gothenburg, Suécia em 1982, quando ingressou na ASEA, atual ABB. De 1982 a 1986, trabalhou na área de System Design de estações conversoras CCAT e de 1986 a 1989, trabalhou como coordenador técnico no projeto do elo CCAT de Rihand Delhi, Índia. Após um período de três meses em Kinshasa, Congo, onde atuou nos trabalhos de modernização do elo CCAT Inga Shaba, transferiu-se para o Marketing & Sales HVDC Department da ABB em Ludvika, onde foi responsável pela área de HVDC Marketing para a América Latina. Em 1998, foi coordenador técnico do primeiro projeto de HVDC Light na Suécia, fornecido pela ABB para a Gotland Energi. Em 2001, transferiu-se para a Emerson Energy Systems de Estocolmo, onde atuou como gerente de projetos de fornecimentos turn-key de sistemas de comunicações telefônicas.

Entre 2002 e 2004, trabalhou como consultor para a Svenska Energhuset AB, onde realizou diversos tipos de estudos de expansão para companhias de distribuição e transmissão suecas. Em meados de 2004, Mikael transferiu-se para a Swedish Energy Agency, onde suas principais atividades foram o desenvolvimento e o gerenciamento do Programa de Eficiência Energética do governo sueco para indústrias com uso intensivo de energia elétrica. Ao final de 2006, retornou à ABB como gerente de projetos de SVC e bancos de capacitores série em Västerås, Suécia. Desde janeiro de 2011, atua como gerente de projetos de equipamentos FACTS na ABB Brasil em Guarulhos, São Paulo.

**Rickard Ellstrom-Jonforsen:** biografia resumida não disponível.