



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

FI/GOP/18  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - IX**

**GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GOP**

**A EXPERIÊNCIA DA CEMIG NA OPERAÇÃO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS INTERLIGADOS NO SIN**

**Daniel de Sousa Ramos(\*)**  
**CEMIG GT SA.**

**Alexandre Pinto da Silva**  
**CEMIG GT SA.**

**RESUMO**

Neste trabalho sobre operação de Compensadores Estáticos Reativos - CER, é demonstrado como é feito a operação e o uso do reativo para o controle de tensão em alguns pontos Sistema Interligado Nacional - SIN, com foco na experiência adquirida pela Cemig.

O melhor aproveitamento de controladores de tensão tem como objetivo principal obter uma operação otimizada que torne possível melhorar o desempenho dinâmico do SIN e otimizar a utilização dos ativos cuja responsabilidade de O&M é do agente de transmissão, para alguns casos, eliminando limitações operativas associadas ao despacho de usinas e aos intercâmbios entre áreas do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE**

Operação, Compensador Estático Reativo, Agente Transmissão, Controle de Tensão, Modo Operação.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Atualmente, a Cemig possui dois Compensadores Estáticos Reativos – CER instalados em operação comercial e mais um previsto para entrar em operação ainda no ano de 2015, todos sendo interligados em estações da Rede Básica.

Estes equipamentos possuem as seguintes dimensões elétricas:

- SE Ouro Preto 2 - CER conectado no Terciário do T3 e T4 500kV/138kV-13,45kV de +100/- 80 MVar em operação comercial desde 1995.
- SE Santos Dumont 2 - CER conectado no 345 kV de +100/- 84 MVar em operação desde fevereiro de 2014.
- SE Bom Despacho 3 – CER conectado no 500 kV de -200/+300 MVar previsto para operação comercial em 2015.

Os CERs possuem basicamente em sua composição, Reatores, Capacitores e Válvulas Tiristoras, que são os filtros de 5º e 7º harmônico, além de um disjuntor próprio para a proteção de todos os equipamentos que o compõe.

Através da comutação desses equipamentos, o controle de reativo é feito, com variação de potência reativa indutiva, e potência reativa capacitiva, dependendo da necessidade do SIN.

O objetivo principal desse trabalho é mostrar a experiência da Cemig na operação desses equipamentos, já que o Compensador Estático previsto para da SE Bom Despacho 3 é um dos maiores da América Latina e também operamos o CER da SE Ouro Preto 2 operamos a quase vinte anos. Este trabalho demonstra como a Cemig opera esses equipamentos de forma, objetiva e inovadora, utilizando recursos tecnológicos para automatismos e operação remota centralizada.

Serão descritas todas as fases para a operação dos equipamentos, desde o planejamento da instalação, elaboração das instruções operativas, treinamento dos despachantes do Centro de Operação do Sistema – COS da Cemig e a operação do ativo com visão de um agente de transmissão propriamente.

O uso dos CER otimiza o sistema, reduzindo a utilização de recursos de controle reativos de máquinas síncronas de forma mais rápida e econômica, o que só foi possível com o avanço das novas tecnologias da eletrônica de potência.

## 2.0 - COMPENSADORES ESTATICO REATIVOS

Compensadores são um conjunto de equipamentos, composto por reatores, capacitores e válvulas tiristoras, montados em paralelo e que através de comando eletrônico tem sua potência reativa resultante variável, em função da necessidade do sistema, gerando ou absorvendo potência reativa.

A função principal do compensador estático é gerar ou absorver potência reativa regulando a tensão do barramento, pela compensação de energia reativa, capacitiva ou indutiva, além amortecer oscilações dinâmicas de tensão que possam aparecer durante perturbações no sistema. Como vantagem do compensador estático sobre o compensador síncrono é a ausência de partes rotativas, o que aumenta a vida útil e o rendimento e minimiza a necessidade de manutenção.

A potência reativa capacitiva de um compensador estático é gerada a partir de filtros de harmônicos, que evitam que as correntes de harmônicos geradas pelos tiristores se propaguem pelo sistema.

### 2.1 Operação de Compensadores Estáticos Reativos

Operamos os ativos de geração e transmissão da CEMIG GT através de uma estrutura centralizada no Centro de Operação do Sistema, sendo que todo o controle remoto e centralizado em tempo real é realizado através do Sistema de Supervisão e Controle Distribuído - SSCD de todos os equipamentos de controle.

Os CERs podem operar em modo “automático” ou em modo “manual”. No modo de operação “automático”, o compensador estático atua, constantemente, alterando o ângulo de disparo dos tiristores, que varia a potência de reatores de zero até a sua potência máxima, que em composição com a potência fornecida pelos bancos de capacitores, resulta em uma potência reativa variável de natureza ora indutiva, ora capacitiva, controlando uma tensão de referência de um determinado barramento. No modo de operação “manual”, o compensador estático irá operar com potência fixa, até que seja realizado um comando manual, atuando no ângulo de disparo no sentido de elevar ou reduzir o reativo, de modo a permitir uma correção da tensão para o valor de referência. Variando em outros subcomandos de forma particular, que são supervisionados e controlados pelo COS da Cemig.

Os CERs são muito demandados para manobras, pois o sistema elétrico é muito dinâmico, sofrendo grandes variações durante sua operação, o que pode impor muitas intervenções para manutenções, devido aos números elevados de manobras. Diante desse cenário, é de suma importância uma gestão integrada nas programações de intervenções que garantam a disponibilidade máxima da função de transmissão no SIN.

Temos instruções específicas para operação dos compensadores estáticos para a pré-operação, tempo real e pós-operação, que nos auxiliam na operação desses ativos na CEMIG GT.

A operação é feita remotamente pelo COS da Cemig, mas também esses equipamentos podem ser operados pelas equipes locais, sendo que todas essas situações estão previstas em instruções específicas das instalações.

Para operação de novos equipamentos que entram em operação conectados em instalações da CEMIG, o COS da Cemig passa por várias etapas, iniciando pela etapa de conhecimento dos equipamentos, dos modos de operação, dos locais onde serão instalados etc.

Participamos de reuniões e apresentações sobre os equipamentos, para adquirir os conhecimentos necessários para a montagem da instrução de operação, no que tange da responsabilidade do agente na operação desses equipamentos.

Posteriormente, é feita a interação com o ONS, e outras áreas da Cemig, para a troca de informações sobre o equipamento, para que todas as instruções de operação estejam em conformidade para a operação do CER.

O ONS também elabora a sua instrução de operação, e insere as informações que são pertinentes para a sua supervisão, em uma visão macro do SIN, porém, é o agente que fará os comandos nos equipamentos que compõe o CER, e devido a complexidade dos mesmo, que possui várias particularidades, o agente é obrigado a fazer um estudo profundo dos comandos que estão disponíveis no CER, e documentar todo esse conhecimento adquirido, para que não haja dúvidas na pré-operação e operação em tempo real para o controle de reativo no SIN, no que se refere a comandos do agente.

No caso da Cemig, atualmente são operados pelo COS dois compensadores estáticos, um interligado à SE Ouro Preto 2 e outro interligado à SE Santos Dumont 2. E como já informado, ainda em 2015, está prevista a interligação de mais um compensador estático, este na SE Bom Despacho 3. Todas essas estações são da Rede Básica, com esses equipamentos tendo o controle operativo sendo efetuado pelo ONS, enquanto que os comandos são efetuados pelo COS da Cemig.

A seguir será detalhado a operação de cada compensador estático.

### 2.1.1 Operação do compensador estático da SE Ouro Preto 2

CER da SE Ouro Preto 2 de potências nominais +100/- 80 MVar está instalado nos terciários dos transformadores T3 e T4 500kV/138kV-13,45kV, conforme parte do diagrama unifilar abaixo, ver Figura 1.

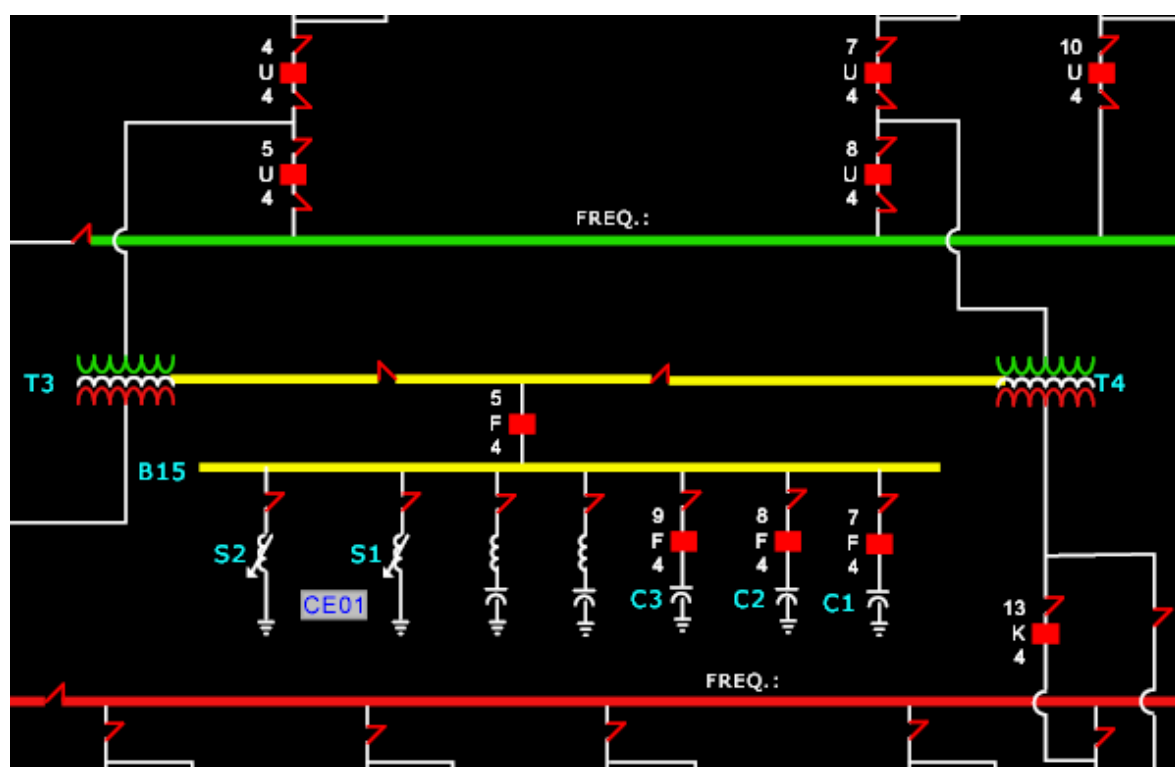


FIGURA 1 – Detalhe Diagrama Unifilar SE Ouro Preto 2 Com CER Representado

A Faixa de reativo do Compensador Estático CER da SE Ouro Preto 2, de acordo com o número de capacitores em operação é a seguinte, ver Tabela 1.

Tabela 1 – Numero de Capacitores e Potencias de Operação

Numero de Capacitores	Potência fornecida / absorvida
Com 0 cap.	+20 / -80 MVar
Com 1 cap.	+47 / -53 MVar
Com 2 cap.	+74 / -26 MVar
Com 3 cap.	+100 / 0 MVar

O modo de operação normal do Compensador Estático é na posição “AUTOMÁTICO”, porém, a inserção dos bancos de capacitores 3 x 27,5 MVar é realizada manualmente, sob autonomia/responsabilidade do COS.

A alteração do modo de controle de automático para manual é realizada sob autonomia/responsabilidade do COS. A operação é realizada sob autonomia/responsabilidade do COS, ver Figura 2.

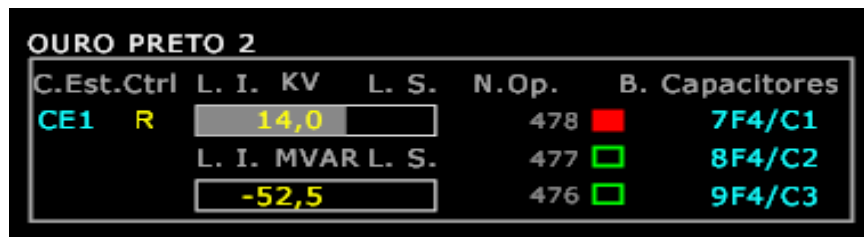


FIGURA 2 – Detalhe Com Os Status, Comandos e Disjuntores do CER

Operação do CER da SE Ouro Preto 2:

=> Após a abertura do 5F4 deve-se esperar no mínimo 5 minutos para completa desenergização da barra antes das manobras em qualquer seccionadora do 13,8 kV.

**Observação 1:** O banco de reatores S1 e S2 não poderão operar sem os filtros de 5º e 7º harmônicos. Motivo: Risco de queima dos transformadores T3 e T4.

**Observação 2:** Com os reatores S1 e S2 fora de operação, o banco de capacitores C1, C2 e C3 e os filtros de 5º e 7º harmônicos poderão permanecer em operação limitado a:

Com os filtros de 5º e 7º harmônicos ligados = 20 MVar;

Com 1 (um) Banco Capacitores ligado = 47 MVar;

Com 2 (dois) Bancos Capacitores ligado = 74 MVar;

Com 3 (três) Bancos Capacitores ligado = 100 MVar.

Sempre que houver a atuação do alarme “Alta Tensão no CER – Risco de Trip. Reduzir p/ limite” no SSCD do COS o despachante deverá atuar no controle de tensão da SE a fim de manter a tensão na Barra de Operação nº 15 – 13,8kV (barra do CER) abaixo de 15,2 kV.

## 2.1.2 SE Santos Dumont 2

CER da SE Santos Dumont 2 de potencias nominais +100/- 84 MVar está no 345 kV, conforme parte do diagrama unifilar abaixo, ver Figura 3.

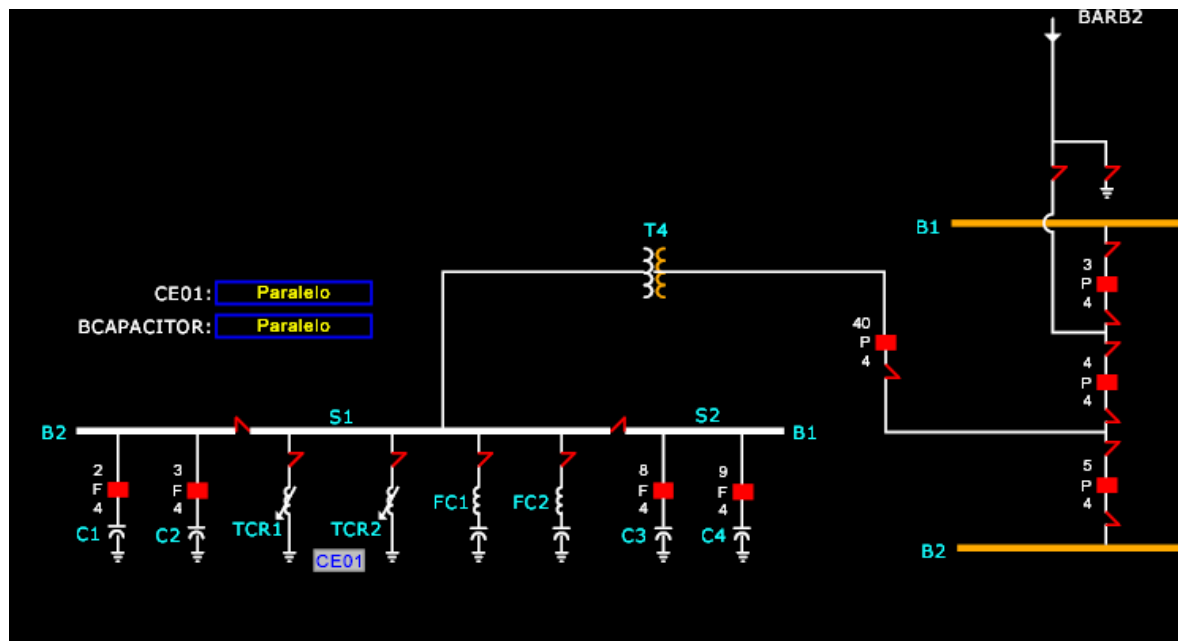


FIGURA 3 – Detalhe Diagrama Unifilar SE Santos Dumont 2 Com CER Representado

### OPERAÇÃO COMPENSADOR ESTATICO DE REATIVO – CER DA SE SANTOS DUMONT 2

A operação é realizada com autonomia pelo COS.

O CER é composto dos seguintes equipamentos, ver Tabela 2:

Tabela 2 – Componentes do CER

Equipamento	Número de Operação	Potência
Banco de Capacitores	C1	22 MVar
Banco de Capacitores	C2	22 MVar
Banco de Capacitores	C3	22 MVar
Banco de Capacitores	C4	22 MVar
Banco de Reatores	S1	75 MVar
Banco de Reatores	S2	75 MVar
Filtro de 5º Harmônico	FC1	10 MVar
Filtro de 7º Harmônico	FC2	10 MVar

A faixa limite de reativo do CER, de acordo com o número de capacitores em operação e respeitando a potência máxima do Trafo T4 que é de 105 MVA, ver Tabela 3.

Tabela 3 - FAIXA LIMITE DE REATIVO DO CER

Nº de Capacitores	Reativo Capacitivo	Reativo Indutivo
0	20 MVar	105 MVar
1 Conjunto (02 Bancos)	64 MVar	86 MVar
2 Conjuntos (04 Bancos)	105 MVar	42 MVar

Em condições normais de operação o comando do CER deverá estar sempre em **MODO REMOTO**, ou seja, o comando estará habilitado para o COS.

O CER, possui dois Modos de Operação: **Automático** e **Manual**.

**Observação:** O modo de controle **AUTOMÁTICO** ou **MANUAL** é definida pelo próprio CER dependendo dos equipamentos do CER que estiverem em serviço e possui tela de controle de tensão com as representações, ver Figura 4.

SANTOS DUMONT 2						
C. Est.	Ctrl	L. I. KV	L. S.	N.Op.	B. Capacitores	
CE1	R	10,4		539	<input type="checkbox"/>	2F4/C1
		L. I. MVAR	L. S.	539	<input type="checkbox"/>	3F4/C2
		-22,5		535	<input type="checkbox"/>	8F4/C3
				543	<input type="checkbox"/>	9F4/C4
Tensão:		352	B. Morta:		5,0	
Modo Ctrl CE01:		A		Modo Ctrl BCAP:		A

FIGURA 4 – Detalhe Com Status Dos Comandos e Disjuntores CER

#### A) CER no MODO AUTOMÁTICO:

**Observação 1:** Com todos os equipamentos do CER em serviço, sua operação estará no **MODO AUTOMÁTICO**, de acordo com a tensão de referência, que será estabelecida pelo COS através de *Set Point* de tensão para o CER.

**Observação 2:** Estando o CER no **MODO AUTOMÁTICO**, os bancos de capacitores podem operar no **MODO AUTOMÁTICO** ou no **MODO MANUAL**. No **MODO MANUAL** é possível o comando para HABILITAR/DESABILITAR o modo de operação dos bancos de capacitores do CER.

#### Com Comando dos Bancos de Capacitores no MODO AUTOMÁTICO:

- O COS envia *Set Point* de tensão para o CER e não comanda os bancos de capacitores. Os Bancos de capacitores serão manobrados de modo automático pelo CER segundo a necessidade do sistema
- Nesta situação os comandos 2 a 2 dos disjuntores dos bancos de capacitores e também o comando individual para cada disjuntor dos bancos de capacitores serão bloqueados automaticamente no SSCD.

#### Com Comando dos Bancos de Capacitores no Modo Manual:

- Nesta situação, serão habilitados (no SSCD) os comandos remotos dos bancos de capacitores. A unidade de controle local do CER garante que os disjuntores somente serão manobrados de 2 a 2, portanto os comandos de ABRIR/FECHAR dos disjuntores (2F4 + 3F4) e (8F4 + 9F4) estarão habilitados.
- Nesta situação é possível a inserção dos dois conjuntos de bancos de capacitores (44,0 MVar cada), com autonomia/responsabilidade do COS.
- O COS envia *Set Point* de tensão para o CER, porém comanda os bancos de capacitores apenas de 2 a 2. Não é permitido comandar os bancos individualmente.
- Com o ponto de supervisão no **Modo Manual** dos bancos de capacitores e com as seccionadoras 4F3, 5F3, 6F3 e 7F3 fechadas, deverá ser habilitada a função no Menu dos disjuntores dos bancos de capacitores para **Comando Simultâneo** de Abrir e Fechar os disjuntores 2F4 e 3F4, 8F4 e 9F4 e deverá ser bloqueada a função de envio de comandos individuais para os disjuntores 2F4, 3F4, 8F4 e 9F4.

**Observação 1)** Pontos de supervisão = SDUM2\_2F4\_AF, SDUM2\_3F4\_AF, SDUM2\_8F4\_AF e SDUM2\_9F4\_AF.

**Observação 2)** Pontos de controle = SDUM2\_2\_3F4\_AF e SDUM2\_8\_9F4\_AF, funções TRIP (2) e CLOSE (4).

**Observação 3)** Título da Função no SSCD = Enviar Controle 2F4 + 3F4  
Enviar Controle 8F4 + 9F4

- e) A função de controle e supervisão **MANUAL / AUTOMÁTICO** dos bancos de capacitores é representado no Menu do compensador estático:
- Ponto de supervisão = SDUM2\_CE01\_BCAPACITOR\_MA
  - Ponto de controle = SDUM2\_CE01\_BCAPACITOR\_MA, funções TRIP (2) e CLOSE (4).
  - Título da Função = Manual Automático – Capacitores.

**Observação 1)** Sempre respeitar um intervalo de 10 min após a abertura dos bancos de capacitores para um novo comando de fechamento.

#### B) CER no MODO MANUAL:

**Observação 1)** Este modo de operação somente é possível se os bancos de Reatores S1, S2 e os filtros de 5º e de 7º harmônicos estiverem **isolados**.

**Observação 2)** Estando o CER no **MODO MANUAL**, os bancos de capacitores somente podem operar no **MODO MANUAL**.

#### Modo Banco de Capacitores:

- a) Este modo de operação é o único que permite a operação dos bancos de capacitores individualmente. Neste caso a faixa limite de reativo do CER ficará conforme, ver Tabela 4.

Tabela 4 - FAIXA LIMITE DE REATIVO DO CER

Nº de Capacitores	Reativo Capacitivo	Reativo Indutivo
1 Banco de capacitores	22 MVar	0 MVar
2 Bancos de capacitores	44 MVar	0 MVar
3 Bancos de capacitores	66 MVar	0 MVar

- b) Os bancos de capacitores podem ser manobrados individualmente, com restrição de no máximo 3 bancos de capacitores interligados (máximo 66 MVar). Motivo: Não extrapolar limites de sobretensão no secundário do Trafo T4. Esta limitação é controlada automaticamente pelo modulo de controle do CER.
- c) O COS comanda os bancos de capacitores no modo individual enviando comandos de abrir e fechar os disjuntores 2F4, 3F4, 8F4 e 9F4, limitando em três bancos de capacitores em serviço, mas não envia *Set Point* de tensão para a barra de 345 kV.
- d) Com o ponto de supervisão dos bancos de capacitores no **Modo Manual** e com as seccionadoras 4F3, 5F3, 6F3 e 7F3 abertas, o COS envia comando de fechar os disjuntores 2F4, 3F4, 8F4 e 9F4, limitando em três bancos em serviço. As funções de comandos simultâneos e de comando para o 345 kV permanecem bloqueadas. Quando atingir o limite de três bancos em serviço à função de fechar os disjuntores 2F4, 3F4, 8F4 e 9F4 é bloqueada automaticamente.

**Observação 1)** Sempre respeitar um intervalo de 10 min após a abertura dos bancos de capacitores para um novo comando de fechamento..

**Observação 2)** Com o modo de operação do CER no **MODO MANUAL**, não há a possibilidade de comandar os bancos de capacitores no **MODO AUTOMÁTICO**.

#### Operação dos Reatores S1 e S2

Os bancos de reatores S1 e/ou S2 só poderão operar com os filtros de 5º e 7º harmônicos em operação. É proibida a operação do CER com um dos bancos de reatores em operação estando qualquer um dos filtros de harmônico fora de serviço.

**Observação 1)** Os bancos de reatores somente entram em operação **com os dois filtros (5º e 7º) harmônicos conectados**.

- a) Com os bancos de reatores S1 e S2 fora de operação, os conjuntos de bancos de capacitores C1, C2, C3 e C4, poderão permanecer em operação, independente dos filtros de 5º e 7º harmônicos estarem ou não em operação. No modo banco de capacitores (bancos de reatores S1 e S2 fora de operação), os filtros estarão também desconectados.

### 3.0 - CONCLUSÃO

Com a demonstração da complexidade da operação de compensadores estáticos, realizada pelo COS da Cemig, com o envolvimento de todas as áreas, fica o registro do grande trabalho que deve ser feito para que, o centro de operação possua uma instrução de operação que seja de fácil interpretação e execução, fazendo com que as dificuldades na operação dos compensadores estáticos se torne o mais simples possível.

Com esse trabalho, a Cemig mostra como é importante possuir esses equipamentos interligados no SIN, e como é complexa a sua operação, demonstrando a importância de haver todos os procedimentos para a operação desses equipamentos escritos, em uma linguagem operativa objetiva, e também todas as fases de implantação dessas etapas.

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) CEMIG GT, CEMIG GERAÇÃO E TRANSMISSÃO SA. Norma para Liberação de Equipamentos do Sistema 01000-DGT-1B. Belo Horizonte, Fevereiro 2014.

(2) CEMIG GT, CEMIG GERAÇÃO E TRANSMISSÃO SA. Operação Conjunta da SE Santos Dumont 2, revisão “e”. Belo Horizonte, Janeiro 2014.

(3) CEMIG GT, CEMIG GERAÇÃO E TRANSMISSÃO SA. Operação Conjunta da SE Ouro Preto 2, revisão “av”. Belo Horizonte, Outubro 2014.

### 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

- **DANIEL DE SOUSA RAMOS;**



- Bicas – Minas Gerais, 1980;
- Belo Horizonte – Minas Gerais, 2007;
- Engenheiro Eletricista graduado pela Faculdade Pitágoras; Eletrotécnico pelo Colégio Técnico Universitário - UFJF; Analista de Sistemas pela Universidade Presidente Antonio Carlos; Especializando em Sistemas Elétricos de Potência pela UFMG; Trabalhou 4 anos na antiga Companhia Força e Luz Cataguazes-Leopoldina, hoje Energisa Minas Gerais, como Técnico do Centro de Operação da Distribuição. Trabalha há 12 anos na CEMIG, como Técnico de Operação de Sistemas, com experiência nas áreas de Normatização, Tempo Real e Pós-operação.
- E-mail: [dsramos@cemig.com.br](mailto:dsramos@cemig.com.br) ; Fones: (31) 3506-4395, (31) 9295-6191.

- **ALEXANDRE PINTO DA SILVA;**

- Divinópolis – Minas Gerais, 1972;
- Belo Horizonte – Minas Gerais, 2001;
- Engenheiro Eletricista graduado pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais; Engenheiro de Segurança do Trabalho pós-graduado pela Universidade FUMEC-MG; Especializado em Sistema Elétrico de Potência pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG em Junho de 2007 e Mestre em Sistema Elétrico de Potência pela UFMG no ano de 2011, em Belo Horizonte - MG. Trabalha há 24 anos na operação do sistema elétrico de potência e atualmente atua como Engenheiro do Centro de Operação do Sistema, com experiência nas áreas de programação de intervenções e procedimentos operativos (Normatização). E-mail: [alpsilva@cemig.com.br](mailto:alpsilva@cemig.com.br) Fones: (31) 3506-4855, (31) 8797-4587.