



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

CB/GAT/02

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - IV

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

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DINÂMICO DE COMPENSADORES ESTÁTICOS COM CONTROLE ADAPTATIVO E OPERANDO ELETRICAMENTE PRÓXIMOS EM SIMULADOR DIGITAL EM TEMPO REAL

**Manfredo Correia Lima (*)
Chesf (Brasil)**

**Patricia Feingold
Stellar Solutions (USA)**

**John Schwartzberg
GE Grid Solutions (USA)**

RESUMO

O presente informe técnico (IT) apresenta os estudos realizados em simulador digital em tempo real (RTDS) para avaliação do desempenho do CER Ceará Mirim, que integram os testes de aceitação em fábrica do referido equipamento. Devido à presença em ambos os compensadores de esquemas de cálculo automático de ganho, a operação coordenada entre os CER Ceará Mirim e Extremoz, este já em serviço há cerca de três anos e instalado eletricamente próximo ao CER Ceará Mirim, requereu a implantação de um esquema especial para assegurar a operação coordenada de tais equipamentos, apresentado neste IT. Os resultados mais relevantes dos referidos testes em RTDS são analisados.

PALAVRAS-CHAVE

Compensador Estático, Cálculo Automático de Ganho, Controle de Tensão, Operação Coordenada, RTDS.

1.0 - INTRODUÇÃO

Através de Leilão de Transmissão realizado pela ANEEL, foram licitados os direitos de construção, operação e manutenção de subestações e linhas de transmissão de energia elétrica, que agregam cerca de 2,3 GVA de capacidade de transmissão ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Parte destas instalações destina-se a permitir a conexão ao SIN de Instalações Compartilhadas de Geração Eólica (ICGE) localizadas na região Nordeste do Brasil. Neste contexto e para assegurar o desejado controle de tensão em condições de regime permanente, dinâmicas e transitórias, foi definida pela EPE (Empresa de Planejamento Energético) a instalação na subestação Ceará Mirim, Estado do Rio Grande do Norte, de um compensador estático de potência reativa (CER) com nominais (-75 a +150Mvar, 230kV), mostrado na Figura 1. Este equipamento utiliza a tecnologia tradicional de reatores controlados a tiristores e capacitores manobrados a tiristores comutados pela linha e juntamente com o já em operação CER Extremoz (-75 a +150Mvar, 230kV) tem por objetivo garantir o atendimento aos critérios de planejamento da EPE e aos procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema (ONS), em instalações de transmissão em uma rede elétrica com forte presença de geração eólica.

Neste contexto, o presente Informe Técnico (IT) apresenta os testes realizados em simulador digital em tempo real (RTDS) para avaliação do desempenho do CER Ceará Mirim que integram os testes de aceitação em fábrica dos sistemas de proteção e controle do referido equipamento, através da estratégia *hardware-in-the-loop*. Com este objetivo, foram utilizados os painéis e interfaces humano-máquina (IHM) reais do CER Ceará Mirim conectados ao RTDS, onde foram representados o sistema elétrico de potência associado e os demais componentes de potência do compensador (transformador abaixador, reatores controlados a tiristores, capacitores manobrados a tiristores e filtros). O CER Extremoz (ETD), que opera eletricamente próximo do CER Ceará Mirim, foi também representado no RTDS durante a realização dos testes descritos neste IT.

Devido à presença em ambos os compensadores de esquemas de cálculo automático de ganho para as suas malhas de controle principal, a operação coordenada entre os CER Ceará Mirim e Extremoz requereu a implantação de um esquema especial contemplando a troca de informações entre estes equipamentos. O referido esquema assegura a operação coordenada dos respectivos sistemas de controle automático de ganho, mesmo considerando que cada equipamento foi fornecido por diferentes fabricantes. Uma descrição da funcionalidade deste esquema é também apresentada. Concluindo, o presente IT apresenta a implementação, resultados e relevância da operação coordenada conjunta dos CER Ceará Mirim e Extremoz, em particular na área de controle adaptativo, destacando-se a aplicação de esquemas de cálculo automático de ganho e culminando com a melhoria do desempenho dos referidos compensadores em todas as condições da rede elétrica analisadas.

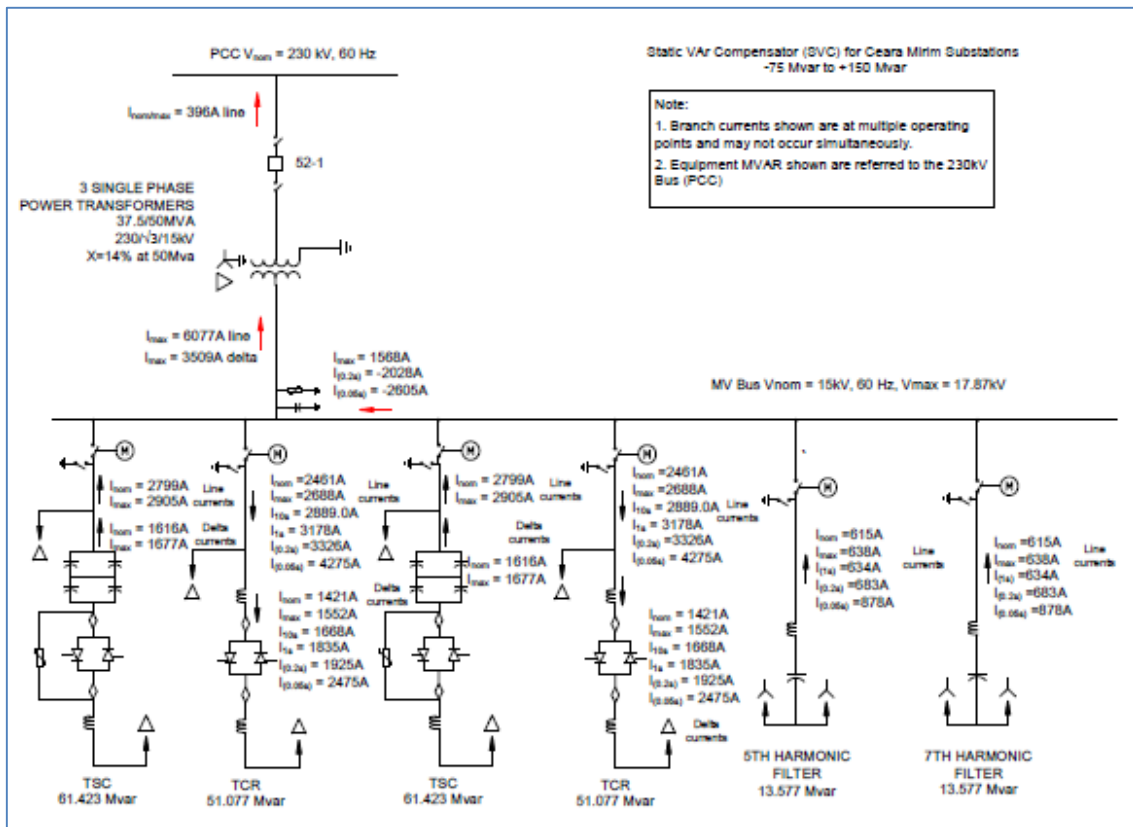


FIGURA 1 – CER Ceará Mirim: Diagrama Unifilar

2.0 - CER CEARÁ MIRIM: PROJETO DO CIRCUITO PRINCIPAL

Conforme indicado na Figura 1, o CER Ceará Mirim é composto pelos elementos a seguir descritos. Os valores de potências reativas indicadas são referidos à tensão de 0,95pu no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Este equipamento é projetado para fornecer os valores nominais especificados de potência reativa (-75 a 150Mvar) para qualquer valor de tensão no PAC situada no intervalo 230kV \pm 5%.

- Transformador abaixador 230/15kV, 150MVA, três unidades monofásicas, estrela aterrada – delta, com uma unidade reserva.
- Dois reatores controlados a tiristores (TCR) de 51,077Mvar cada, conectados em delta.
- Dois capacitores manobrados a tiristores (TSC) de 61,423Mvar cada, conectados em delta.
- Dois filtros capacitivos de 13,577Mvar sintonizados na quinta e sétima harmônica, estrela não aterrada.

Cada TCR é formado por três reatores a núcleo de ar monofásicos, divididos em duas meias-bobinas e por três válvulas de tiristores monofásicas refrigeradas a água e glycol, utilizando tiristores de 125 mm com disparo por corrente elétrica (Figura 1). Cada TSC é formado por três bancos de capacitores monofásicos, três reatores monofásicos para limitação de correntes de *inrush* e três válvulas de tiristores monofásicas refrigeradas a água e glycol, utilizando tiristores de 125 mm com disparo por corrente elétrica. Varistores de óxido metálico são utilizados para limitar as sobrecorrentes nas respectivas válvulas de tiristores (Figura 1).

3.0 - CER CEARÁ MIRIM: SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle do CER Ceará Mirim promove a operação coordenada dos TCR e TSC disponíveis no momento através da determinação da corrente de ordem do compensador, para atendimento às condições do

sistema elétrico existentes. A partir daí, um valor de corrente de ordem dos TCR e um requisito de chaveamento dos TSC são determinados. O referido equipamento possui dois modos de operação, o modo automático, onde o CER varia a corrente injetada no PAC para manter a sua tensão terminal no valor ajustado pelo operador e o modo de controle manual, onde este equipamento opera como uma injeção de corrente fixa, cujo valor é manualmente ajustado pelo operador (Figura 4). Um condicionamento de sinais é requerido para converter as correntes e tensões AC medidas no PAC em sinais RMS. Conforme mostrado na Figura 2, a tensão de controle do sistema é obtida a partir do valor médio dos valores RMS fase-neutro das tensões AC medidas no setor de 230kV. Estes sinais são elevados ao quadrado, e aplicados a filtros tipo MAF de fase bloqueada (Moving Average PLL Filters). Nesta etapa, as componentes de sequência zero e os harmônicos associados à elevação ao quadrado dos referidos sinais são removidos, produzindo um sinal DC. Em seguida, é calculada a raiz quadrada e a média aritmética destes sinais, produzindo um sinal de saída identificado como o valor médio quadrático das tensões AC de entrada (**3phRmsMeas**), que será utilizado na operação do CER no modo de controle automático.

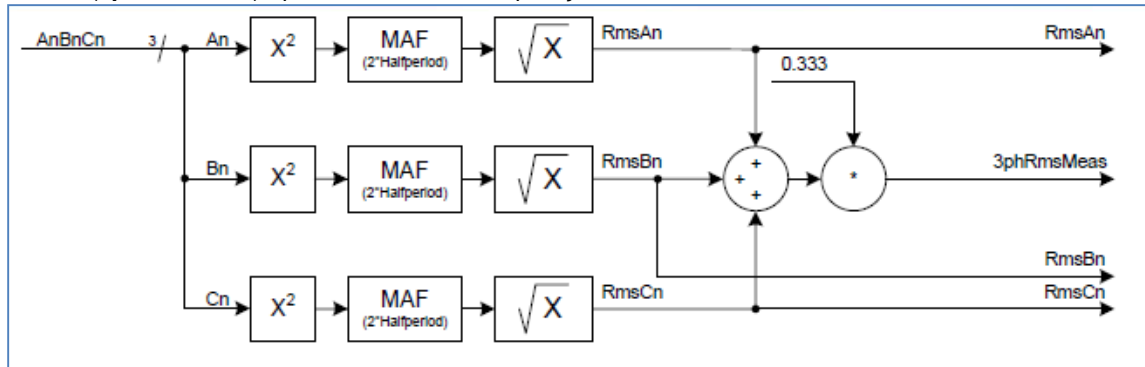


FIGURA 2 - CER Ceará Mirim: Formação do Sinal de Entrada do Controlador Principal

Conforme mostrado na Figura 3, ao sinal V_{ERROR} é aplicado o conjunto de ganhos a seguir descrito. O ganho SCL corrige o sinal de erro, calculado como a diferença entre o sinal **3phRmsMeas** e a tensão de referência ajustada pelo operador, com base no nível de curto-circuito dinâmico medido no ponto de acoplamento do CER com a rede básica (PAC 230kV), propiciando que os parâmetros de performance relativos à resposta ao degrau seja atendidos, conforme a seguir, em atendimento às definições estabelecidas na IEEE Guide Std 1031-2011 (1).

- 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 otimização do ganho (GO) baseia-se na aplicação programada de um pequeno distúrbio no sinal de saída do compensador e na medição da relação entre os erros de tensão e potência reativa correspondentes a este distúrbio, sendo tal procedimento conhecido como “Teste de Ganho”. Com base na magnitude e polaridade do sinal de saída do CER quando da aplicação do Teste de Ganho, o ganho SCL será elevado ou reduzido.

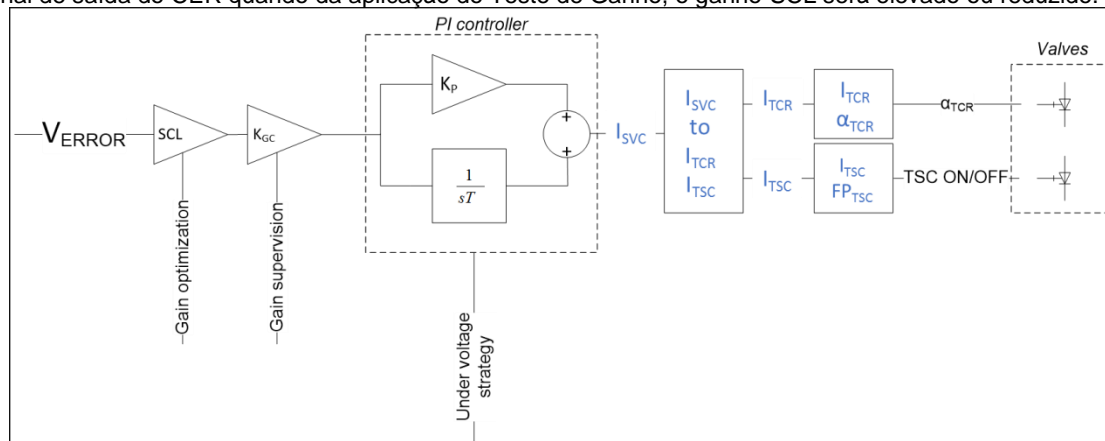


FIGURA 3 - CER Ceará Mirim: Estágio Final do Sistema de Controle em Malha Fechada

A segunda malha de controle, denominada Supervisor de Ganho (GS) tem por objetivo preservar a estabilidade do compensador caso sejam detectadas oscilações no seu sinal de saída, reduzindo o ganho K_{GC} do seu valor normal fixado em 1,0 até que tais oscilações sejam satisfatoriamente amortecidas. A malha de controle principal do CER Ceará Mirim baseia-se na ação de um controlador proporcional-integral (PI), com parâmetros ajustáveis através dos valores 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 reativa de saída igual a 0Mvar, constituindo o chamado “Esquema de Bloqueio por Subtensão” (Item

4.1). Conforme mostra a Figura 3, a corrente requerida do compensador (I_{SVC}) é então distribuída entre os valores correspondentes aos elementos controláveis disponíveis (TCR e TSC) e filtros de harmônicos. A corrente dos TSC é determinada com base nos limites de chaveamento definidos para estes elementos, que possuem estratégia de controle discreta (ON / OFF). A corrente dos 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 elementos são responsáveis pelo controle contínuo da potência reativa injetada pelo CER Ceará Mirim na rede básica. O sistema de controle do referido equipamento é formado por duas unidades totalmente redundantes de controle, produzindo uma redundância de 100%. A Figura 4 apresenta um diagrama de blocos simplificado do sistema de controle em malha fechada do CER Ceará Mirim.

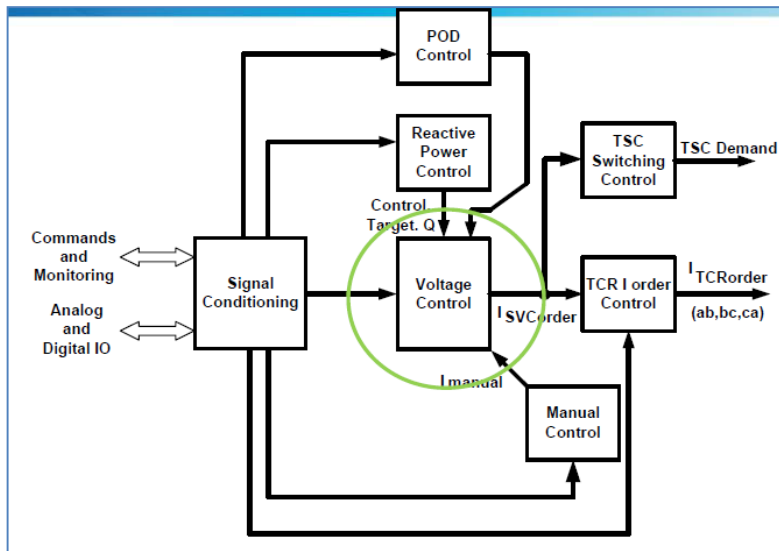


FIGURA 4 – CER Ceará Mirim: Sistema de Controle em Malha Fechada

4.0 - CER CEARÁ MIRIM: MALHAS SUPLEMENTARES DE CONTROLE

4.1 Esquema de Bloqueio por Subtensão

Este esquema força o CER a operar em 0Mvar caso a sua tensão terminal seja reduzida abaixo de um valor previamente ajustado, por um intervalo de tempo também determinado, o que corresponde ao bloqueio dos dois TSC e de um TCR, sendo o TCR remanescente utilizado para compensar a corrente dos filtros, resultando em 0Mvar no PAC 230kV (Figura 3). Esta função tem por objetivo evitar que na eliminação de faltas nas suas proximidades, o CER opere em pontos fortemente capacitivos e desta forma contribua para a elevação das sobretensões associadas à eliminação das faltas. A detecção do nível de atuação do referido esquema é efetuada utilizando a média dos valores RMS das três fases da tensão do 230kV para faltas trifásicas equilibradas e o mínimo valor RMS da referida tensão para faltas desequilibradas. O CER é liberado para efetuar o controle da tensão quando este sinal atingir um valor superior ao nível de bloqueio acrescido de uma histerese definida em projeto. Desta forma, o esquema de bloqueio por subtensão aqui descrito está apto a atuar para faltas locais e remotas, equilibradas e desequilibradas. Os mencionados níveis de bloqueio e desbloqueio podem ser modificados com base no nível de curto-circuito medido no PAC do CER, ficando a critério do usuário ativar ou não esta lógica. Para garantir que o disparo das válvulas de tiristores seja sempre efetuado de forma segura, é implementado no CER Ceará Mirim um esquema de bloqueio por subtensão no setor de 15kV que bloqueia os TCR e os TSC caso uma das tensões RMS fase-fase caia abaixo de um valor previamente definido em projeto. Decorrido um intervalo de tempo de 2 segundos, caso as tensões do 15kV não se recuperem a valores superiores a 0,3pu, uma sequência de desligamento do CER Ceará Mirim será iniciada.

4.2 Operação em Modos Degradados

O CER Ceará Mirim apresenta a possibilidade de operação automática em modos degradados quando da perda de elementos no setor de 15kV, o que produz elevado grau de flexibilidade e disponibilidade à operação deste equipamento. Por modo degradado válido, entende-se uma configuração onde, embora os limites de potência reativa de saída sejam reduzidos, é possível variar de forma contínua a potência de saída, mantendo-se os níveis de harmônicos produzidos pelo compensador abaixo dos limites especificados. Desta maneira, um modo degradado válido requer a presença de no mínimo um TCR e dois filtros ou de um TCR, um TSC e um filtro. São definidos para o CER Ceará Mirim treze modos degradados válidos. A seleção dos modos degradados válidos é efetuada de forma automática pelo sistema de controle com base no estado dos seus diversos elementos através do disjuntor de 230kV e das chaves seccionadoras motorizadas do setor de 15kV. Caso um modo degradado

inválido seja produzido, o religamento automático do CER é bloqueado. A função de religamento automático pode ser ativada ou desativada através da IHM do CER Ceará Mirim.

5.0 - OPERAÇÃO COORDENADA DE DOIS CER INSTALADOS ELETRICAMENTE PRÓXIMOS

5.1 Influência do CER Extremoz

Conforme mostrado na Figura 5, o CER Extremoz (-75 a 150Mvar, 230kV), foi representado nos estudos em RTDS apresentados neste IT através de um modelo construído a partir de informações fornecidas pela transmissora Chesf, proprietária deste equipamento. O CER Extremoz representa uma susceptância controlada de forma independente conectada eletricamente próxima do CER Ceará Mirim, o que dificulta a determinação do coeficiente de sensibilidade tensão x potência reativa em Ceará Mirim 230kV, associada à aplicação do Teste de Ganho (Item 3.0). Caso o CER Extremoz opere no modo manual, o Otimizador de Ganho do CER Ceará Mirim comporta-se de forma satisfatória. Entretanto nos cenários onde o CER Extremoz opera em automático, o desempenho do CER Ceará Mirim pode ser afetado. Este efeito é identificado nos testes de resposta ao degrau do CER Ceará Mirim após a ativação do seu Otimizador de Ganho e torna-se mais crítico na configuração de sistema com reduzido nível de curto-circuito (2). Esta influência é esperada, devido à proximidade elétrica entre os CER Extremoz e Ceará Mirim (30 km).

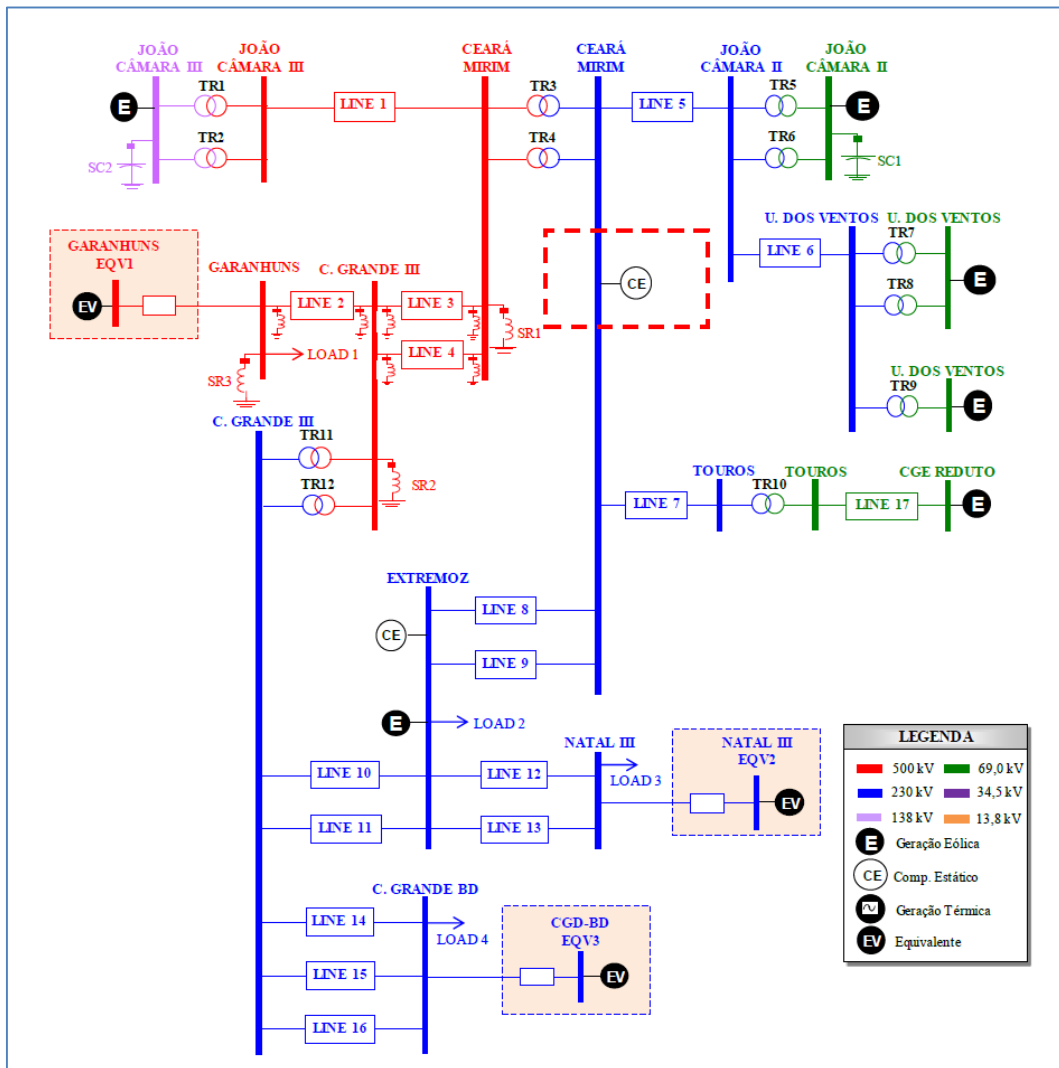


FIGURA 5 – Representação da Rede Elétrica no RTDS (Elevado Nível de Curto-Circuito no PCC)

5.2 Operação do Otimizador de Ganho com dois CER Operando Eletricamente Próximos

Como descrito em (4), quando se tem dois CER operando eletricamente próximos, para atender aos requisitos de especificação referidos no item 3.0, os ganhos dos seus respectivos sistemas de controle devem ser ajustados levando em conta a dinâmica da rede elétrica e a influência do CER vizinho. Assim, medições da sensibilidade tensão x potência reativa da rede elétrica devem ser efetuadas para propiciar a definição de ganhos adequados.

Como mencionado no item 3.0, este processo é implementado pela malha de controle denominada Otimizador de Ganho (GO). A medição dos coeficientes de sensibilidade da rede elétrica baseia-se na injeção pelo CER de um pulso de susceptância e na medição da variação de tensão ou potência reativa correspondente. No entanto, se um segundo CER opera eletricamente próximo daquele cujo GO encontra-se ativo, a resposta aparente da rede elétrica será alterada pela resposta do segundo CER. Como resultado, a medição efetuada durante o teste de ganho poderá ser imprecisa, produzindo valores de ganho incorretos para os referidos equipamentos. Uma estratégia para fazer face a esta questão baseia-se na implementação de um esquema de controle e de um link rápido de telecomunicação entre os CER eletricamente próximos que inibe a malha principal de controle do CER que não está realizando o seu teste de ganho naquele instante (CER passivo), forçando o referido equipamento a operar no modo manual durante um intervalo de tempo muito curto através da aplicação de uma pequena banda morta no seu controlador principal. O referido esquema pode ser implementado conforme descrito a seguir.

- Um sinal é enviado do CER ativo ao CER passivo, indicando que o primeiro irá aplicar o teste de ganho.
- Ao receber o sinal de alerta, o CER passivo aplica uma banda morta no seu sistema de controle e informa ao CER ativo que o teste de ganho pode ser aplicado.
- O CER ativo recebe esta confirmação do CER passivo e realiza o seu teste de ganho.
- Ao final do teste de ganho, o CER ativo informa ao CER passivo que a banda morta pode ser removida.
- O CER passivo remove a banda morta e retoma a sua operação normal (modo automático).
- Caso uma grande perturbação seja aplicada neste instante na rede elétrica, a banda morta é desativada e o CER passivo retoma de imediato à operação no modo de controle de tensão (automático), sem esperar a conclusão do teste de ganho realizado pelo CER ativo, que será cancelado e reprogramado.

Como principais características deste esquema, destacam-se: Algoritmo distribuído, Interface entre os CER *hardwired* para os sinais essenciais e informações adicionais transmitidas via protocolo DNP3. Devido à proximidade elétrica de 30km entre os CER Ceará Mirim e Extremoz, foi possível considerar idênticos os níveis de curto-circuito nas suas respectivas barras de 230kV. Desta forma, o CER ativo (Ceará Mirim), ao realizar o seu teste de ganho, informa ao CER passivo (Extremoz) o nível de curto-circuito resultante deste teste. O CER Extremoz utiliza então este valor para determinar o valor do seu ganho. Com o emprego desta estratégia e sendo os CER Extremoz e Ceará Mirim de fabricantes diferentes, o esquema aqui descrito pode ser implementado sem a necessidade do compartilhamento das estratégias de cálculo de ganho de cada CER, resguardando-se os aspectos de confidencialidade e de propriedade intelectual associados a cada projeto.

6.0 - TESTES HARDWARE-IN-THE-LOOP EM SIMULADOR DIGITAL EM TEMPO REAL (RTDS)

6.1 Testes Preliminares

A etapa inicial dos testes foi realizada considerando uma modelagem simplificada da rede elétrica, efetuada utilizando-se fontes equivalentes de Thévenin correspondentes aos níveis máximo e mínimo de curto-circuito definidos em projeto. A Figura 5 apresenta um diagrama unifilar da rede correspondente ao nível máximo de curto-circuito analisado. Foram considerados os seguintes valores para o nível de curto-circuito trifásico no 230kV de Ceará Mirim:

- Nível Mínimo de 1966MVA correspondente à operação com geração mínima, rede degradada.
- Nível Máximo de 4902MVA correspondente à operação com geração máxima, configuração normal.

Os testes foram iniciados através da verificação do desempenho de funções associadas a operações em malha aberta e de caráter protetivo do CER, tais como *start-up/shut-down*, desligamento por proteções, transição entre modos de controle, transição entre os sistemas de controle redundantes, variação do estatismo e religamento automático, variando-se o nível de curto circuito entre os valores máximo e mínimo aqui citados quando requerido pelos testes. Além disso, foram testadas funções de proteção associadas ao sistema de controle em malha fechada, destacando-se:

- Esquema de bloqueio por subtensão nos setores de alta e média tensão;
- Monitoração da corrente de saída do compensador;
- Transição do modo de controle manual para o de controle de tensão e vice-versa;
- Parada de emergência.

Em seguida, foi realizado o levantamento das curvas características tensão x corrente e tensão x potência reativa relativas ao setor de 230kV. Concluindo, foram testadas as funções de otimização de ganho (GO) e supervisão de ganho (GS) descritas no item 3.0, além da funcionalidade do esquema de operação conjunta entre os CER Extremoz e Ceará Mirim descrito no item 5.2.

6.2 Resposta ao Degrau

Conforme estabelecido no item 3.0, durante os ensaios de aplicação de degrau na tensão de referência, o CER Ceará Mirim deve propiciar o atendimento aos parâmetros de performance especificados, para o intervalo de níveis

de curto-circuito medidos no PCC definido em projeto. Desta forma, os testes de resposta ao degrau foram realizados variando-se os valores de estatismo, magnitude do degrau e valor inicial da tensão de referência do CER Ceará Mirim. Para o CER Extremoz, foi adotado estatismo de 5%.

Foram realizados ensaios de aplicação de degrau na tensão de referência do CER Ceará Mirim com representação completa da rede elétrica, para os níveis de curto-circuito mínimo (1966MVA – SCL Low) e máximo (4902MVA – SCL High) no PAC, considerando o CER Extremoz (-75 a 150Mvar, 230kV) mostrado na Figura 5 conectado em automático (ON) e desconectado (OFF). A Tabela 1 apresenta os resultados mais relevantes dos referidos ensaios. São observadas violações no valor especificado do tempo de estabilização (Ts) com o CER Extremoz em operação no modo automático (Casos 7, 8 e 11). Não há violação nos demais parâmetros de performance (overshoot e tempo de subida) em todos os testes realizados. O teste de resposta ao degrau baseia-se na aproximação por um sistema de controle de segunda ordem para aplicação de pequenas perturbações do sistema equivalente formado pela rede elétrica e um CER (3). Esta aproximação no entanto, não é válida quando se tem dois ou mais CER presentes, o que torna neste caso não aplicáveis os critérios do item 3.0 no que diz respeito aos parâmetros de performance especificados (4). Nos testes com estatismo 0% (Casos 4 e 5), foi observada também a violação do valor especificado para o tempo de estabilização. Como a operação do CER Ceará Mirim com estatismo nulo não é recomendada pelo Fabricante devido à presença do Otimizador de Ganho (GO), tais violações não foram consideradas na avaliação dos resultados (4). Pode-se afirmar com base nesta consideração que o atendimento aos parâmetros de performance especificados para o CER Ceará Mirim fica comprovado através dos ensaios de resposta ao degrau. Os índices 1, 2 e 3 indicados na Tabela 1 correspondem aos valores das grandezas registrados antes, após a aplicação do degrau e após a sua retirada.

Tabela 1 – CER Ceará Mirim: Resposta ao Degrau

Caso #	SCL	SVC ETD	Estatismo (%)	V _{REF1} (pu)	V _{REF2} (pu)	Ts (ms)	Tr (ms)	PO (%)	V _{REF3} (pu)	Ts (ms)	Tr (ms)	PO (%)
1	Low	Off	2	0,9761	0,9957	87	19	0,28	0,9761	79	29	0,17
2	High	Off	2	0,9761	0,9957	75	25	0,13	0,9761	78	30	0,17
3	Low	Off	2	0,9761	0,9957	90	20	0,29	0,9761	97	24	0,30
4	High	Off	0	0,9850	0,9957	169	26	0,15	0,9850	121	32	0,26
5	Low	Off	0	0,9850	0,9957	117	21	0,19	0,9850	157	23	0,26
6	Low	Off	2	0,980	1,004	56	25	0,26	0,980	90	22	0,37
7	Low	On	2	0,980	1,004	128	17	0,54	0,980	134	19	0,47
8	Low	On	2	0,980	1,020	1800	23	2,94	0,980	127	11	1,14
9	High	Off	2	1,000	1,0152	60	24	0,10	1,000	89	23	0,10
10	High	On	2	1,000	1,0152	99	20	0,24	1,000	80	22	0,24
11	High	On	2	1,000	1,0261	132	24	0,86	1,000	57	17	0,16

6.3 Desempenho durante a Aplicação de Grandes Perturbações

Foi analisada nos testes em RTDS a performance do CER Ceará Mirim durante a ocorrência de distúrbios na rede elétrica denominados “Grandes Perturbações” e listados a seguir, nas configurações correspondentes aos níveis mínimo e máximo de curto-circuito, rede completa, considerando o CER Extremoz em operação automática (Figura 5). Foram adotados os estatismos de 2% para o CER Ceará Mirim e 5% para o CER Extremoz.

- Energização de transformador 230/69kV, 150MVA em Extremoz.
- Energização de autotransformador 500 / 230kV, 450MVA em Ceará Mirim.
- Aplicação de faltas monofásicas, bifásicas à terra e trifásicas à terra nas linhas de 230kV Extremoz – Ceará Mirim, João Câmara II – Ceará Mirim, Extremoz – Natal III, Extremoz – Campina Grande III e Campina Grande BD – Campina Grande III, eliminadas em 100mseg com a abertura da linha em falta, considerando ativado e desativado o esquema de bloqueio por subtensão do CER Ceará Mirim, variando-se o terminal de aplicação da falta.
- Aplicação de faltas monofásicas, bifásicas à terra e trifásicas à terra nas linhas de 500kV João Câmara III – Ceará Mirim, Ceará Mirim – Campina Grande III e Garanhuns – Campina Grande III (500kV), eliminadas em 100mseg com a abertura da linha em falta, considerando ativado e desativado o esquema de bloqueio por subtensão do CER Ceará Mirim, variando-se o terminal de aplicação da falta.
- Inserção e retirada de reatores de barra de 150Mvar / 500kV em Ceará Mirim e Campina Grande III. Foram utilizados nas simulações acima os ajustes para o esquema de bloqueio por subtensão no 230kV do CER Ceará Mirim indicados na Tabela 2:

SCL	Bloqueio (pu)	Desbloqueio (pu)	Retardo Bloq. (ms)	Retardo Desbloq. (ms)
Low	0,6	0,65	5,0	10,0
High	0,5	0,55	5,0	10,0

As Figuras 6 apresentam sinais selecionados referentes à simulação de aplicação de uma falta trifásica à terra na linha Extremoz – Ceará Mirim 230kV, terminal Ceará Mirim, nível máximo de curto-circuito, eliminada em 100mseg com abertura da referida linha. O CER Extremoz opera no modo automático com ganho fixo. Logo após a aplicação

da falta, o CER Ceará Mirim desloca-se para o seu limite capacitivo, inserindo ambos os TSC. No entanto, o afundamento de tensão associado à falta leva à atuação do bloqueio por subtensão no 230kV, forçando este equipamento a operar em 0Mvar através do bloqueio destes elementos. No intervalo de aplicação da falta, destaca-se a circulação da *DC trapped current* no TCR1, que surge quando a tensão no setor de 15kV se anula e a integral da tensão aplicada a este elemento torna-se momentaneamente constante, dando origem à circulação de uma componente contínua de corrente nos reatores. Esta componente desaparece logo após a eliminação da falta e a recuperação da tensão no setor de 230kV. Na eliminação da falta, a corrente em ambos os TCR é elevada, levando o CER Ceará Mirim a operar em pontos medianamente indutivos. Não são registradas desta forma sobretensões significativas no 230kV, mesmo considerando a abertura da linha pela proteção. A redução no nível de curto-circuito em Ceará Mirim 230kV provocada pela abertura da linha em falta da origem a oscilações no sinal de saída deste equipamento, levando à atuação do seu Supervisor de Ganho (GS) (próximo a $t=1,4\text{seg}$), que reduz o seu ganho até o amortecimento satisfatório deste fenômeno. O CER Extremoz atua de forma satisfatória durante a falta e também na sua eliminação, não sendo observadas interações adversas entre este e o CER Ceará Mirim. Com a contribuição dos CER Ceará Mirim e Extremoz, um regime permanente estável pós falta é atingido.

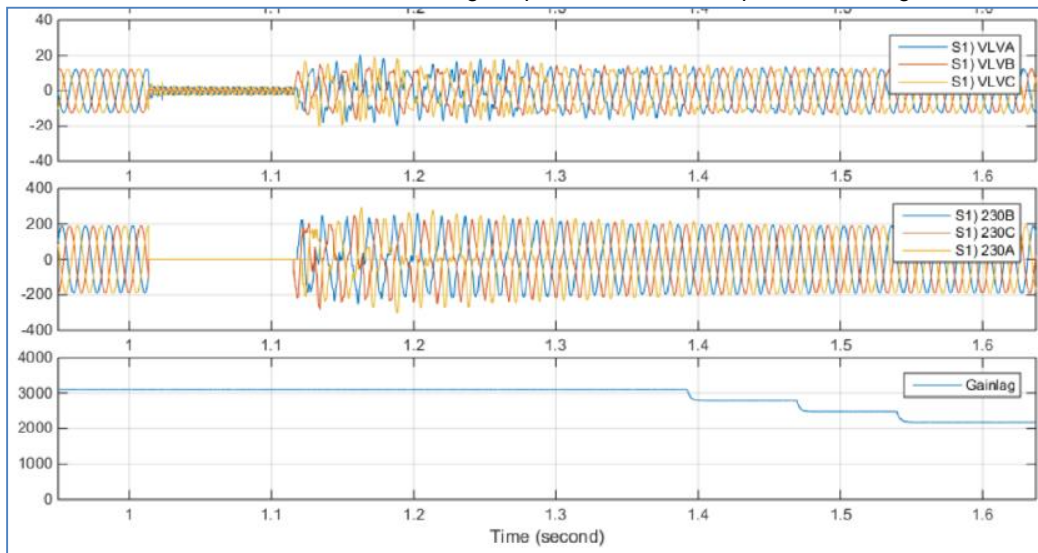


FIGURA 6 - (a) – Falta 3F-T LT Extremoz – Ceará Mirim 230kV, Nível alto de curto-circuito do PAC. Tensões do 15kV e 230kV e ganho do CER Ceará Mirim

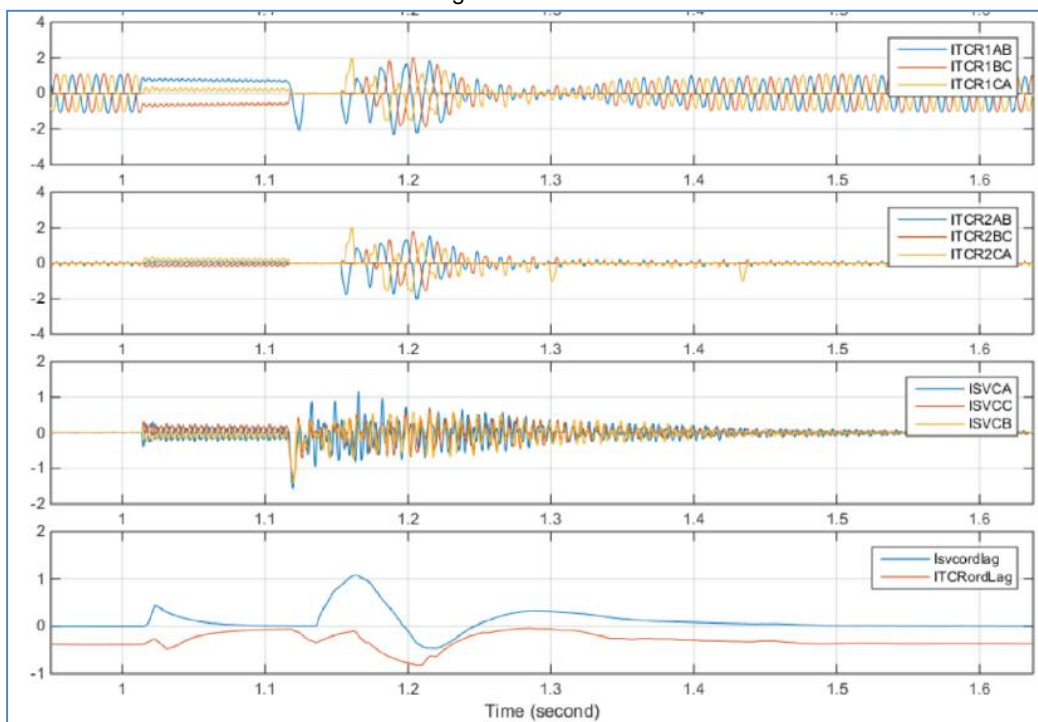


FIGURA 6 - (b) – Falta 3F-T LT Extremoz – Ceará Mirim 230kV, Nível alto de curto no PCC. Correntes nos TCR e no 230kV do CER Ceará Mirim. Correntes de ordem total e dos TCR do CER Ceará Mirim

7.0 – CONCLUSÕES

- O CER Ceará Mirim apresenta desempenho satisfatório, atendendo aos requisitos da sua Especificação em todas as condições analisadas nos testes de aceitação em fábrica realizados, cujo resumo é apresentado neste IT.
- Uma descrição da funcionalidade e dos testes do esquema de controle desenvolvido para assegurar a operação coordenada dos CER Ceará Mirim e Extremoz é apresentada. Esta lógica foi testada durante os ensaios de RTDS aqui descritos, sendo os resultados obtidos considerados satisfatórios.
- Durante os testes apresentados neste IT e com os parâmetros de controle adotados, não foram observadas interações adversas entre os CER Ceará Mirim e Extremoz.

8.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) 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.
- (2) LIMA, M, ALVES, F., DE OLIVEIRA, M., ELIASSON, P. E., ABERG, M., BAUER, J. Static Var Compensators Performance Evaluation Studies for Systems with Strong Presence of Fixed Series Capacitors: The Example of Tucuruí – Manaus 500kV Interconnection, XII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (SEPOPE), Rio de Janeiro-RJ, May 2012, Procedures in DVD.
- (3) KATSUHIKO OGATA, "Engenharia de Controle Moderno", São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2010, ISBN 978-85-7605-810-6. pp.154-166.
- (4) MANFREDO CORREIA LIMA, PER-EMIL ELIASSON, CLAES BRISBY, "Considerations Regarding Electrically Close Static Var Compensators Joint Operation and Performance", XIII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (SEPOPE), May 18th to 21th 2014, Foz do Iguaçu, Brasil, Procedures in DVD.

9.0 – 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. 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).



Patricia Feingold é atualmente engenheira senior de software e sistemas da Stellar Solutions, Inc. Com mais de 20 anos de experiência em simulação e design de software, particularmente na área de algoritmos de controles embutidos para aplicações em eletrônica de potência, possui experiência prática como desenvolvedora de software em plataformas multi-alvo em metodologias tradicionais e orientadas a objeto. Além de suas habilidades técnicas, a Sra. Feingold é uma experiente gerente de projetos técnicos e administradora de negócios com vasta experiência em liderar pequenas equipes dedicadas dentro de grandes organizações mundiais e em transmitir ideias técnicas complexas para públicos variados, desde colaboradores técnicos individuais e estudantes de pós-graduação até clientes seniors e equipes executivas. Como líder de equipe e facilitadora experiente em programas geograficamente distribuídos, atua de forma muito confortável em ambientes internacionais e é fluente em quatro idiomas. Com uma experiência no setor que abrange uma variedade de aplicativos altamente críticos, a Sra. Feingold conseguiu alavancar sua experiência técnica para impulsionar a criação de produtos inovadores e fornecer soluções impactantes para diversos projetos e clientes.

John Schwartzenberg recebeu os graus de BSC e MSC pela Drexel University, Filadélfia, PA, EUA respectivamente em 1989 e 1991. Atualmente, é engenheiro de projetos da General Electric na Filadélfia, PA. Ocupou diversas posições no desenvolvimento de aplicações de eletrônica de potência para empresas de transmissão e distribuição. De 1994 a 2006, trabalhou na Silicon Power Corporation, onde atuou como líder de projeto e fabricação de chaves de transferência estática de baixa e média tensão e sistemas de inversores customizados. Nesta posição, foi responsável pela engenharia de desenvolvimento, engenharia e gerenciamento de unidades de negócios. De 2006 a 2009, trabalhou na L-3 Communications e liderou o desenvolvimento de sistemas de conversão de potência modular para sistemas navais embarcados. Desde 2009, trabalha na General Electric e suas empresas predecessoras (Alstom Grid e Areva T & D), ocupando cargos de engenharia e engenharia de projetos para numerosos sistemas de compensação estática controlada (SVC) com aplicação em vários países.