



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

CB/GAT/05

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - IV**

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

**O SIMULADOR DE SISTEMAS DE CORRENTE CONTÍNUA DO ONS E OS DESAFIOS PARA A INTEGRAÇÃO DO PRIMEIRO BIPOLO DE BELO MONTE AO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL**

**Henildo M. de Barros (\*)**

**Alex de Castro**

**Amélia Y. Takahata**

**João José R. Oliveira**

**Adriano de Andrade Barbosa**

**Roberto Nogueira Fontoura Filho**

**ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico**

**RESUMO**

Desde a sua implantação em março de 2013, o Simulador de Sistemas de Corrente Contínua (SSCC) do ONS tem se mostrado uma ferramenta essencial no processo de tomada de decisão pelo Operador e agentes transmissores, tendo sido largamente utilizado em análises de Projeto Básico, Estudos Pré-Operacionais e na cadeia de planejamento e programação da operação, no âmbito do empreendimento de transmissão em corrente contínua (HVDC) do Rio Madeira.

Com a entrada em operação do primeiro bipolo associado à Usina de Belo Monte, prevista para 2018, o ONS vem se preparando para os desafios técnicos provenientes da integração dos novos equipamentos de Controle e Proteção (C&P) ao simulador em escala real de tempo do ONS.

**PALAVRAS-CHAVE**

Simulador, Escala Real de Tempo, HVDC, Corrente Contínua, Belo Monte

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Em 2018, entrará em operação o primeiro bipolo em extra alta tensão (UHVDC  $\pm 800$  kV – 4.000MW) do Brasil, o qual integra o sistema de transmissão associado à Usina de Belo Monte, localizada no estado do Pará. O referido bipolo está sendo construído e será operado pela Belo Monte Transmissora de Energia (BMTE), concessionária vencedora da licitação da concessão dessa instalação de transmissão, sendo que esta, por sua vez, contratou a SIEMENS para fornecer e montar os equipamentos das estações conversoras.

Em atendimento ao requisito estabelecido no Edital da citada licitação, o ONS receberá da BMTE, até maio de 2017, os seguintes equipamentos:

- Três cubículos referentes ao simulador de sistemas de potência em escala real de tempo, desenvolvido pela RTDS Technologies Inc.;
- Seis cubículos manufaturados pela SIEMENS, réplicas dos sistemas de controle e proteção dos conversores UHVDC do Bipolo 1 utilizados em campo;
- Respectivos consoles/computadores para monitoramento, operação e programação dos controladores.

Esses recursos de simulação serão incorporados ao Simulador de Sistemas de Corrente Contínua do ONS, razão pela qual serão necessárias diversas iniciativas no sentido de adequar a atual instalação do SSCC para receber todos estes equipamentos (cubículos, consoles e computadores).

Nesse contexto, em que se estabelece um panorama de desafio técnico de alto nível, exigindo planejamento e organização, estão sendo conduzidas diferentes ações para o adequado suporte aos estudos elétricos que estão sob a responsabilidade de execução e acompanhamento pelo Operador, e que serão detalhadas nos itens seguintes:

- I. Aprimoramento e adequação do ferramental de simulação em escala real de tempo;
- II. Adequação das ferramentas de simulação *off-line* de suporte ao SSCC;
- III. Capacitação da equipe técnica;
- IV. Adequações de infraestrutura;
- V. Envolvimento com parceiros externos de alto nível de conhecimento.

A Figura 1 apresenta a planta baixa do SSCC do ONS considerando os cubículos existentes do Projeto Madeira (ABB, GE/Alstom e RTDS), bem como a disposição planejada para as réplicas de C&P do Projeto Belo Monte, incluindo a previsão de integração do Bipolo 2. Essa figura agrega, em um mesmo ambiente, 4 bipolos e 1 back-to-back de quatro diferentes fabricantes e os respectivos cubículos de RTDS.

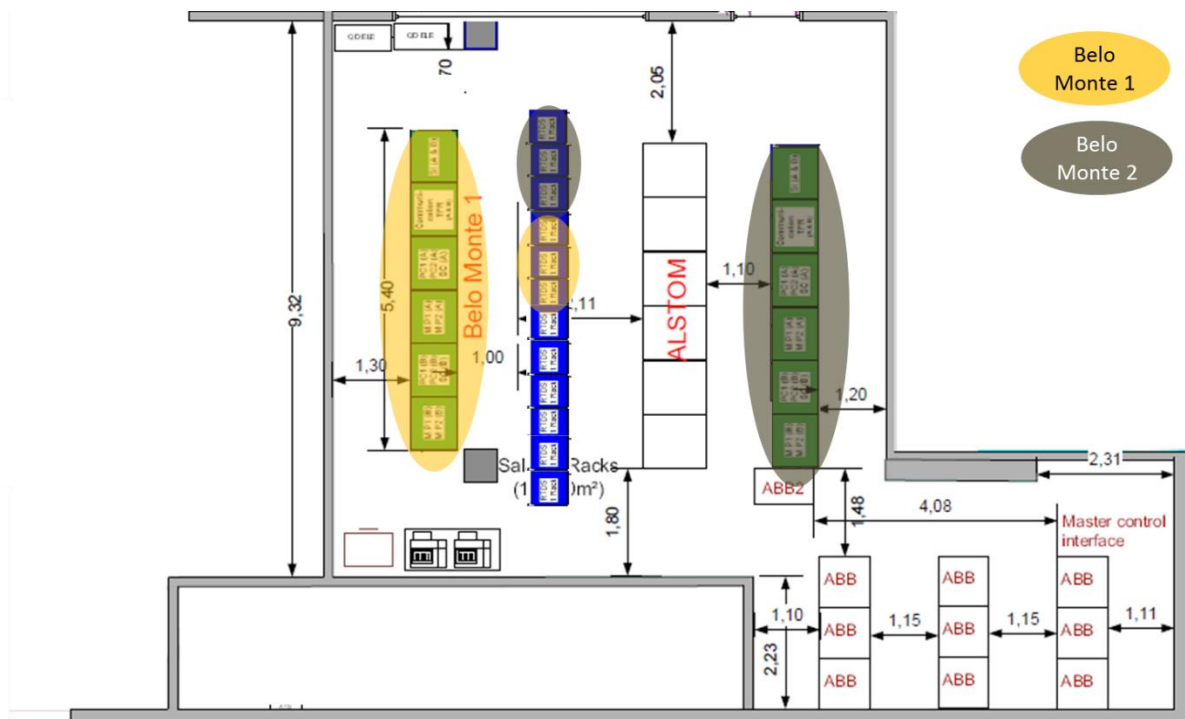


Figura 01 – Planta baixa do SSCC com a disposição das réplicas C&P de quatro fabricantes e cubículos de RTDS

## 2.0 - APRIMORAMENTO E ADEQUAÇÃO DO FERRAMENTAL DE SIMULAÇÃO EM ESCALA REAL DE TEMPO

Com relação aos equipamentos de simulação na escala real de tempo (cubículos de fabricação RTDS), além da representação da rede de potência associada a cada novo elo CC, é necessário antecipar o atendimento a outras necessidades, como por exemplo:

- a) expansão da capacidade de processamento para representação de demais instalações (conversores do elo CC de Furnas);
- b) prospecção para uso do hardware FPGA na representação dos equivalentes elétricos de rede;
- c) análise de viabilidade para integração de hardware de simulação em escala real de tempo de outro fornecedor, com fins de co-simulação;
- d) recurso de operação de bipolos via RTDS, em alternativa ao uso dos sistemas supervisórios proprietários dos fabricantes.

Os cubículos de fabricação RTDS providos pelos agentes, e que representam a maior parcela do hardware empregado na simulação da rede de potência, são dimensionados para a representação do elo CC específico e de parte do sistema CA cuja proximidade elétrica das subestações conversoras impacte no desempenho dos respectivos controladores, quando da ocorrência de faltas e/ou manobra de equipamentos. Tal dimensionamento contempla apenas a necessidade da adequada representação da rede elétrica associada aos estudos específicos da nova instalação de transmissão, sem o compromisso de prover recursos adicionais de hardware RTDS para análises de cunho sistêmico. Por exemplo, no caso dos estudos elétricos para avaliação do desempenho dinâmico dos controladores considerando a interação entre os mesmos, dada a proximidade elétrica das subestações conversoras (*multi-infeed*), há necessidade de representação individualizada das interligações relevantes. Tal requisito corresponde à utilização de maior quantidade de hardware para simulação, o que obriga o ONS a avaliar a utilização de modelos de representação mais versáteis ou mesmo a utilização de hardware de simulação de melhor relação custo/benefício em forma cooperativa com o RTDS (co-simulação).

Uma questão crucial diz respeito à característica particular da instalação de simulação mantida pelo ONS, a qual, diferentemente do que ocorre em empresas internacionais que operam os sistemas de transmissão de energia elétrica, não está associada à propriedade de instalações de campo. Considerado o quadro presente, o agente proprietário do novo sistema de transmissão em HVDC pode optar por fornecer uma plataforma de simulação que atenda plenamente ao requisito de integração com os atuais equipamentos do ONS, conforme definido no documento de edital do empreendimento, mas que possa ser suprida por empresa distinta da RTDS Inc.

Nos anos mais recentes, avanços significativos no desempenho computacional das plataformas de hardware comercial multiprocessadas, baseadas em arquitetura do tipo Intel, e a utilização de sistemas operacionais que possibilitam a execução de uma aplicação específica em tempo de relógio, permitiram o surgimento de simuladores na escala real de tempo que não são baseados em hardware dedicado (RTDS) ou em supercomputadores. Tais simuladores de atualização e expansão menos dispendiosa estão sendo aplicados em diferentes ramos da indústria incluindo a de sistemas de potência. Consequentemente, antecipa-se no médio prazo (cinco anos) uma mudança de paradigma na plataforma de hardware empregada em simulação na escala real de tempo, que deverá migrar de uma solução baseada em hardware e software proprietários para uma solução cujo hardware proprietário restringir-se-á apenas às interfaces de I/O e cujo software deverá estar integrado ao conjunto das ferramentas de simulação *off-line* comercial.

Como consequência das afirmações anteriores e, dentro de uma visão estratégica de sustentabilidade da sua instalação de simulação, o ONS vem avaliando a utilização de interfaces apropriadas à integração de outras plataformas de simulação. No momento encontra-se em fase final de avaliação o desempenho da interface GT-FPGA do RTDS para fins de co-simulação com hardware de outro fornecedor via barramento PCI-express. O componente de potência que está sendo usado para fins dessa avaliação é o mesmo que os simuladores já citados utilizam para fins de paralelização da solução da rede, correspondendo a linhas de transmissão. Outro elo possível seria o uso de equivalentes em frequência do tipo multiporta dotados de um atraso ajustável em sua função de síntese. O resultado dessa investigação permitirá identificar de forma precisa o atraso imposto pela comunicação (latência) e o limite superior de dados numéricos a serem transacionados dentro de um passo de integração fixo (número máximo de interconexões).

### 3.0 - ADEQUAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO *OFF-LINE* DE SUPORTE AO SSCC

O ferramental computacional para suporte à realização dos trabalhos no SSCC compreende, além de obviamente os programas “*off-line*” de simulação de transitórios, programas de pré-processamento para suporte à representação da rede e programas de pós-processamento para elaboração de relatórios. Complementarmente, são necessárias adequações aos programas de simulação “*off-line*” para fins de utilização mais eficiente e flexível dessas ferramentas, a saber:

- a) disponibilidade de paralelização assistida pelo usuário para a solução de redes de grandes dimensões em plataforma computacional multiprocessada;
- b) desenvolvimento de interfaces para a simulação cooperativa no domínio eletromagnético e híbrida inter-domínios eletromagnético e eletromecânico;
- c) desenvolvimento de metodologia aplicável à síntese de equivalentes dinâmicos em programa de transitórios eletromecânicos.

Embora a realização de estudos no SSCC possa lançar mão de simulações *off-line* em ferramentas como o PSCAD-EMTDC e o ATP, para fins de análise preliminar ou complementar aos testes de loop fechado em laboratório (*Hardware in the loop*), tais simuladores carecem de suporte nativo a execução em ambiente de computação distribuída e também de interfaces amigáveis para uso cooperativo desses programas. A demanda por ambiente de computação distribuída atende a necessidade da realização de simulações computacionais envolvendo sistemas de transmissão de grande porte com múltiplos conversores. Já a demanda por um ambiente de co-simulação amigável ao usuário atende a necessidade de integração dos modelos de representação dos

controladores HVDC, desenvolvidos pelos fabricantes no padrão de simuladores utilizados pela indústria (PSCAD-EMTDC e SIMULINK-SPS), com a modelagem da rede em CA no simulador ATP adotado nos estudos elétricos do ONS e agentes. Essa prática evita a utilização de modelagem simplificada dos controladores (modelos estilizados ou conceituais) além da tediosa conversão de dados entre diferentes programas.

Consideradas as razões anteriores, o ONS implementou uma metodologia para execução paralela do PSCAD-EMTDC em computador de quatro processadores (CPU) baseada em mecanismo de comunicação entre processos de maior eficiência para a referida arquitetura [1]. Como resultado, foi obtido um ganho apreciável no desempenho computacional, conforme verificado na execução de simulações envolvendo a representação dos dois elos do sistema de transmissão do Rio Madeira, ficando indicada a viabilidade para adoção de solução análoga à rede com maior número de elos CC. Entretanto, a implementação da mesma metodologia à solução de rede com diversos conversores CC demanda a utilização de mecanismo de comunicação entre processos que seja adequado à computação distribuída (ou em cluster), o que não foi realizado por conta da necessidade de prover aos usuários dessa solução uma interface visual de fácil utilização. Mais recentemente, o desenvolvedor do PSCAD-EMTDC (Manitoba HVDC-RC), por sugestão do ONS, incorporou esse recurso à versão 4.6 empregando uma suíte comercial específica para computação em grid.

Noutra vertente vem sendo investigada a utilização das interfaces disponíveis para uso cooperativo das ferramentas de transitórios eletromagnéticos (ATP e PSCAD-EMTDC) e de transitórios eletromecânicos (ORGANON) [2,3]. Tal iniciativa, denominada de simulação híbrida ou inter-domínios, atende não somente à rotina de aferição dos modelos de equivalente de rede que são utilizados na simulação em escala real de tempo como também à redução do tempo necessário à preparação de cenários diferenciados de carga e geração a serem investigados nos estudos elétricos com o ferramental "off-line".

Em complementação, desenvolveu-se num trabalho de parceria com entidade externa (COPPETEC), o ferramental específico para a síntese de equivalentes elétricos em frequência do tipo multiporta, aplicável às três ferramentas de simulação "off-line" PSCAD-EMTDC, EMTD-RV e ATP e também ao simulador RTDS. Esse ferramental, o qual utiliza as interfaces que cada programa possui para a inclusão de modelos de componentes elétricos definidos pelo usuário, realiza a síntese da resposta em frequência da rede pelo método de ajuste denominado de "vector-fitting", com posterior aproximação da curva sintetizada por funções racionais.

#### 4.0 - CAPACITAÇÃO DA EQUIPE TÉCNICA

Conforme citado anteriormente, com a entrada em operação do primeiro bipolo de Belo Monte, serão instaladas no Simulador SSCC as réplicas dos cubículos de controle e proteção de campo com os respectivos consoles de monitoramento, controle e programação, as interfaces analógicas e digitais de I/O e um simulador na escala real de tempo (RTDS), que serão integrados à instalação de simulação já existente.

Este conjunto de computadores industriais e hardware especializado tem por objetivo cumprir as tarefas específicas de monitoração e controle. A interação com esse sistema de controle é feita por meio de uma série de interfaces gráficas especializadas e programadas para permitir o completo domínio sobre o ambiente integrado.

Neste contexto, diante da entrada de novas linguagens e tecnologias, a operação e a manutenção dos novos cubículos demandam treinamento especializado da equipe técnica do SSCC, exigindo do ONS a capacitação necessária para operar os equipamentos ao longo da sua vida útil com autonomia em relação aos fabricantes. A capacitação dos profissionais do ONS deverá incluir a identificação de problemas, ajustes de parâmetros operativos e manutenção primária do sistema.

Adicionalmente, com a possibilidade de uso do hardware FPGA, para representação dos equivalentes elétricos de rede, a equipe do Simulador deverá passar por treinamento especializado em linguagem de programação associada ao software dedicado ao hardware FPGA.

Seguindo essa mesma linha de desenvolvimento e prospecção de novas tecnologias para extrair a melhor utilização possível dos recursos do Simulador, bem como do ferramental de simulação *off-line*, o uso intensivo de PSCAD-EMTDC para prover a integração – em uma base comum – dos modelos recebidos dos agentes de transmissão em corrente contínua, acarreta em demanda de treinamento avançado neste software, com foco em processamento distribuído.

Deve-se avaliar ainda a participação de profissionais e usuários em fóruns mundiais de discussão técnica sobre o uso de RTDS, organizado anualmente pelo fornecedor, permitindo estabelecer um contato mais próximo com as tendências e as novidades que envolvem a simulação em escala real de tempo.

## 5.0 - ADEQUAÇÕES DE INFRAESTRUTURA

O ambiente do Simulador SSCC oferece atualmente as condições adequadas para a realização das atividades que estão em curso no escopo do Projeto Madeira. No entanto, com a integração das réplicas de Belo Monte, toda a infraestrutura precisa passar por uma revisão, de forma a identificar qual(is) tipo(s) de obra(s) será(ão) necessária(s) na preparação do espaço do Simulador.

Nesta etapa, que antecede as demais e é fundamental para o pronto atendimento na chegada das réplicas, é necessário planejar as ações que demandarão a interrupção temporária das atividades no Simulador SSCC, para viabilizar a execução das seguintes obras, bem como minimizar o impacto sobre o andamento das atividades em curso pelos agentes e/ou pelo ONS:

- Obras civis de adequação do espaço da sala de operadores e da sala de reunião para receber o agente BMTE, melhorando a infraestrutura disponível para todos os agentes, fabricantes e para as equipes do ONS;
- Obras de instalações elétricas para adequação do quadro de alimentação no suprimento de energia aos cubículos da BMTE/Siemens, verificando a capacidade atual e a necessidade (ou não) de redimensionamento das instalações para comportar a chegada dos novos equipamentos;
- Avaliação do sistema de refrigeração de todos os ambientes, uma vez que haverá relativo aumento de carga e a área do Simulador SSCC requer controle de umidade e de temperatura como requisito para seu melhor funcionamento;
- Expansão do acesso à rede corporativa e definição de rede dedicada aos consoles do fabricante, para adequação à chegada de equipamentos do agente BMTE;
- Novo dimensionamento do almoxarifado, que deverá ter espaço suficiente para abrigar todas as peças, ferramentas de manutenção e material sobressalente fornecido pelos agentes/fabricantes do Projeto Madeira, bem como pelos agentes/fabricantes do Projeto Belo Monte.

## 6.0 - ENVOLVIMENTO COM PARCEIROS EXTERNOS DE ALTO NÍVEL

Conceitualmente, as instalações de um simulador de sistemas de corrente contínua estão expostas continuamente aos avanços tecnológicos dos fornecedores e fabricantes de equipamentos. A inovação permeia as atividades dos profissionais envolvidos com o Simulador, que buscam o aprimoramento necessário para se manterem sempre atualizados.

Mesmo com uma agenda programada de cursos, treinamentos e participações em seminários, com o intuito de agregar conhecimento às atividades, é comum e recomendável recorrer a parcerias externas de reconhecido nível de atuação na área. Dentre outras, pode-se destacar a realização de convênios com universidades, centros de pesquisa e contratação de consultoria especializada. Este é um caminho promissor com relação a resultados obtidos nos mais diferentes projetos de cooperação técnica, ampliando a preparação e a capacidade de aprendizado da equipe do ONS diante de novos desafios.

## 7.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um panorama sobre a expansão do Simulador de Sistemas de Corrente Contínua do ONS, para permitir a integração das réplicas do primeiro bipolo associado a Belo Monte, considerando as instalações existentes que estão em operação e pertencem ao Projeto Madeira. É um cenário que estabelece um conjunto de desafios técnicos de alto nível e exige deste Operador planejamento, organização, logística e inovação. Deve-se ressaltar que as ações voltadas para o Simulador de Sistemas de Corrente Contínua, de forma a preparar a incorporação das novas réplicas, estão contidas no Planejamento Estratégico do ONS, como uma diretriz corporativa prioritária, no âmbito da segurança elétrica sistêmica.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] H. M. Barros, A. Castro, R. N. Fontoura Filho, M. Groetaers dos Santos, C. F. Teodósio Soares – Efficient Application of Parallel Processing with Standard Tools for Electromagnetic Transients Simulation, International Conference on Power Systems Transients (IPST2013), Vancouver, Canada July 18-20, 2013.

[2] Alex de Castro, Henildo M. de Barros, Roberto N. Fontoura, Marcelos G. dos Santos – Aplicação Eficiente de Processamento Paralelo com Ferramenta Padrão para Simulação de Transitórios Eletromagnéticos. XIII SEPOPE, 18 a 21 de maio 2014, Foz do Iguaçu (PR) - Brasil.

[3] Jorge Jardim, Karen Caino de Oliveira Salim, Pedro Henrique Lourenço dos Santos, Carlos Alberto da Silva Neto, Marcelos Groetaers dos Santos, Henildo Medeiros de Barros, Glauco N. Taranto – Variable Time Step Application on Hybrid Eietromechanical-Eletromagnetic Simulation, IET Generation, Transmission & Distribution, Available online: 20 February 2017

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Henildo Medeiros de Barros – Nascido em Natal-RN em 1962 graduou-se e obteve o título de M.Sc. pela UFRJ em 1987 e 1992, respectivamente. Trabalhou como pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) entre os anos de 1987 a 2002 no laboratório de Simulação de Redes. Desde 2002 atua no ONS como Engenheiro Especialista em estudos elétricos voltados à análise de transitórios eletromagnéticos devido à manobra de equipamentos. A partir de 2011 passou a integrar a equipe responsável pela operação do Simulador de Sistemas de Corrente Contínua. Seus interesses e especialização estão relacionados à especificação de equipamentos de alta tensão e representação de sistemas de potência em programas *off-line* e simuladores na escala real de tempo.

Alex de Castro – Nascido em Niterói-RJ em 1965 possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1994. Trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS desde 2010. Trabalhou no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL e atualmente exerce a função de engenheiro sênior no Operador Nacional do Sistema - ONS. Suas áreas de interesse são transitórios eletromagnéticos, HVDC e simulação em escala real de tempo. Tem experiência em modelos de componentes para simulações no domínio do tempo.

Amélia Yukie Takahata – Graduada em engenharia elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá e doutorado em sistemas de potência pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trabalhou na Themag Engenharia e LIGHT na área de planejamento de sistemas elétrico, e está no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) como engenheira sênior II desde 2003. No período de 2003 até 2012 trabalhou no Plano de Ampliações e Reforços e atualmente trabalha com simulador em tempo real (RTDS).

João José Rodrigues de Oliveira – Nascido em Valença-RJ em 1958, graduou-se em Engenharia Elétrica ênfase Eletrônica pela UFRJ em 1983 e em 1992 obteve o título de M.Sc. em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ. Trabalhou de 1986 a 2014 como pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) onde atuou na simulação, analógica e digital de circuitos elétricos voltados para estudos de transitórios eletromagnéticos. Atuou também na integração do simulador EPRI/OTS ao sistema REGER do ONS. Em 2016 começou a trabalhar no ONS onde está envolvido com o suporte e prospecção da capacidade de simulação do SSCC (Simulador de Sistemas de Corrente Contínua).

Adriano Andrade Barbosa – Nasceu em Juiz de Fora, em 1973. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFJF, em 1995, e obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ, em 1999. Em 2011 concluiu o MBA em Gestão de Energia Elétrica, pela PUC/RJ. Iniciou sua carreira profissional no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) em 1996. Trabalhando no ONS desde 2001, atualmente é responsável pela Gerência de Metodologias e Modelos Elétricos (GMC3).

Roberto Nogueira Fontoura Filho – Engenheiro Eletricista, IME, 1979; Doutor em Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, 1994; MBA em Energia Elétrica, IE/UFRJ, 1998. Atuou na Promon Engenharia e Eletrobrás. No ONS desde 2000, onde hoje é Gerente Executivo de Metodologias, Modelos e Carga. Professor Adjunto na UERJ.