



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

BR/GAT/13  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO – IV**

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

**O Papel das Ferramentas de Simulação Digital no Suporte à Operação  
do Sistema de Transmissão do Rio Madeira**

**Roberto Fontoura(\*), Henildo Medeiros, Alex de Castro,  
Amelia Takahata, Marcelos Groetaers.**

**Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)**

**RESUMO**

O Complexo do Madeira, composto pelas hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau, em Rondônia, tem uma potência instalada total de cerca de 6.900 MW em sua fase final. Para o escoamento da energia produzida por essas usinas, foi concebido um sistema de transmissão composto por dois bipolos de corrente contínua em  $\pm 600$  kV, que cobrem uma distância de 2.375 km até São Paulo, e duas conversoras Back-to-Back, de 2 x 400 MW, instaladas em Porto Velho, para o suprimento local.

A fim de que fosse possível realizar plenamente os estudos elétricos associados ao comissionamento e operação desse sistema, foi estruturado no Operador Nacional do Sistema Elétrico, um conjunto de ferramentas para simulação digital. Tais ferramentas referem-se não só a aquelas diretamente relacionadas às simulações em escala real de tempo, mas também aos modelos para a realização de simulações off-line.

Este trabalho descreve os principais aspectos técnicos associados à implantação deste conjunto de ferramentas de simulação digital para suporte aos estudos elétricos do sistema de transmissão das usinas do Rio Madeira.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transmissão em Corrente Contínua, Modelos para Estudos Elétricos, Simulação Digital.

**1.0 INTRODUÇÃO**

É fundamental para a operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) a realização de estudos que permitam verificar o desempenho deste sistema, sob o ponto de vista de atendimento aos critérios e padrões estabelecidos nos Procedimentos de Rede. Tais estudos consideram os recursos de geração e transmissão existente, levando em conta a previsão de carga e a instalação de novos equipamentos dentro do horizonte de análise.

A realização de tais estudos demanda a disponibilidade de ferramentas que ofereçam precisão, flexibilidade e facilidade de representação dos equipamentos. Para sistemas de transmissão em corrente contínua, como é o caso do Madeira, as ferramentas devem ser tais que permitam representar os conversores em detalhes e ofereçam recursos que viabilizem a realização de estudos tais como:

- avaliação dos impactos sistêmicos;
- avaliação dos controladores CCAT e sistemas de proteção, na forma "closed-loop"; e
- verificação da adequação dos modelos computacionais utilizados nos estudos "off-line".

No ONS foram estruturados dois conjuntos específicos de ferramentas para atender as necessidades de estudos para o sistema de transmissão do Madeira. O primeiro deles refere-se ao simulador em escala real do tempo,

(\*) Rua da Quitanda, n° 196 – 14 andar -- CEP 20091-005 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil  
Tel: (+55 21) 22039820 - Fax: (+55 21) 22039414 – Email: rfontoura@ons.org.br

constituído de um simulador propriamente dito e das réplicas dos cubículos de controle e proteção do HVDC existentes no campo. O outro conjunto está associado às ferramentas “off-line”, que permitem a realização dos estudos de transitórios eletromagnéticos.

## 2.0 SIMULADOR EM ESCALA REAL DE TEMPO

### 2.1 Antecedentes

A implantação do Simulador em Escala Real de Tempo (simulador de Redes em Corrente Contínua) nas instalações do ONS, para suporte aos estudos elétricos operacionais do sistema de transmissão em CCAT do Madeira, foi um dos requisitos estabelecidos no Edital de Licitação deste empreendimento.

Naquela oportunidade, por critérios de ordem técnica e de conveniência operativa, decidiu-se agregar ao conjunto de ferramentas “off-line” empregadas nos estudos elétricos uma ferramenta de simulação em escala real de tempo na qual fosse possível uma representação mais realista dos controladores associados às instalações do campo. Em última análise, essa iniciativa teve como objetivo a provisão do suporte adequado às atividades associadas à operação do sistema de transmissão em CCAT do empreendimento do Rio Madeira quando da sua integração ao SIN.

Tal simulador digital possui capacidade de representação de todos os equipamentos de potência e controle/proteção do sistema de corrente contínua, e compõe-se de um simulador em escala real de tempo, desenvolvido pela RTDS Technologies Inc. e de réplicas dos cubículos de controle e proteção dos conversores Back-to-Back, Bipolo I e Bipolo II, a serem utilizados no campo, manufaturados os dois primeiros pela ABB e o último pela ALSTOM.

### 2.2 Expansão do Simulador

No ano de 2011, o acompanhamento em fábrica das rotinas de ensaios/testes para aceitação dos controladores da conexão “back-to-back” possibilitou ao ONS, dentre outros benefícios, a coleta de informações quanto à metodologia de ajuste dos controladores que seria adotada pela ABB para as mesmas rotinas associadas à interligação do Bipolo I. Nessa campanha o ONS constatou a adoção de um modelo de representação da rede CA conectada a SE Araraquara II, consistindo de um equivalente da Thevenin a frequência fundamental. Segundo o fabricante ABB, tal procedimento estava embasado na elevada potência de curto-circuito oriunda da rede CA naquela subestação e também na sua experiência técnica em projetos de elos CCAT desse porte.

O Operador constatou que a maior parte do esforço de detalhamento da representação dos equipamentos CA, e, conseqüentemente o dimensionamento dos recursos de hardware RTDS associados para tal, foi alocado para suporte ao ajuste dos controladores da conexão “back-to-back”. Segundo a ABB, a especificidade do projeto em vista da adoção de tecnologia CCC (“Capacitor Commuted Converter”) para o elo “back-to-back” e a forte interação dessa interligação com a rede CA em 230KV conectada à subestação coletora Porto Velho justificavam essa decisão.

Com base nessas constatações, concluiu-se que o Simulador a ser cedido ao ONS, embora adequado à realização dos estudos elétricos do ponto de vista dos vencedores dos leilões da Transmissão do Rio Madeira, não dispunha de recursos de hardware em número suficiente para a realização dos estudos de interação entre os sistemas de transmissão CC do Madeira e sistema de transmissão CA do Sudeste em 500KV e 440KV. Tal conclusão levada a debate interno com diversas equipes de estudos elétricos do Operador confirmou a necessidade da incorporação de hardware RTDS complementar, que permitisse a adequada representação do sistema CA quando da execução dos estudos elétricos de responsabilidade do Operador, dentre os quais se destacam:

- Interação dos sistemas CA e CC: Interação harmônica de baixa ordem; interação torsional em frequência subsíncrona; interação devido a efeito de transformação de frequência nos conversores, etc.
- Interação entre controladores CCAT: Resposta à falha de comutação, resposta durante defeitos nos sistemas CA e CC; interação devido à sobretensões temporárias.



FIGURA 1 – Painéis do Simulador RTDS

## 2.2 Espectro de Utilização do Simulador

O Simulador de Rede em Corrente Contínua irá permitir às empresas participantes dos consórcios vencedores do leilão do Madeira (ETE, PVTE e IE Madeira) e ao ONS, realizar simulações em escala real de tempo do desempenho do sistema de corrente contínua e seus controles operando conjuntamente com o sistema de corrente alternada nas mais diferentes condições de operação. Isto significa dizer que é possível a realização de estudos detalhados de situações que envolvam falhas no mencionado sistema CCAT, identificando a repercussão das mesmas nas subestações próximas aos pontos de conexão dessa interligação ao Sistema Interligado Nacional.

Além disso, em face das suas responsabilidades frente à execução dos estudos elétricos que visam garantir a implantação e operação adequada do sistema de transmissão do Rio Madeira, o ONS deverá realizar análises precisas para diagnóstico e mitigação de possíveis interações adversas envolvendo o referido elo CC e respectivos controladores com os demais equipamentos do SIN, verificando a interação dos sistemas CA e CC e entre controladores CCAT.

Em resumo, a disponibilidade de um Simulador em escala real de tempo corresponde ao acesso imediato a recurso técnico adequado à realização dos seguintes tipos de estudos elétricos, sob a responsabilidade do Operador:

### a) Estudos de Impacto Sistêmico

Solicitações transitórias causadas por manobra de equipamentos e/ou aplicação e eliminação de defeitos;  
Definição das condições de operação sob configuração degradada quando das intervenções em equipamentos para manutenção preventiva e/ou corretiva.

### b) Estudos do tipo “closed-loop” para avaliação de controladores CCAT e sistemas de proteção

Desempenho dinâmico de elo CCAT Madeira e controladores associados;  
Análise da interação entre controladores dos bipolos 1 e 2 do elo CCAT Madeira na SE Araraquara e controladores da estação inversora Ibiúna;  
Desempenho sistema de proteção da rede CA (proteções individuais e sistêmicas) conectada na proximidade elétrica das SEs Porto Velho e Araraquara.

### c) Estudos associados à adequação de modelos computacionais

Análises comparativas e complementares às simulações executadas com ferramentas “off-line” PSCAD/EMTDC e ATP;  
Suporte a integração de ferramentas de simulação de transitórios eletromagnéticos e dinâmico.

### d) Suporte à elaboração de novos editais de empreendimentos em CCAT e equipamentos do tipo FACTS

Identificação de localização mais adequada às subestações inversoras;  
Identificação dos requisitos mínimos dos equipamentos de potência;  
Identificação dos requisitos mínimos dos controladores.

## 2.3 Constituição do Simulador em Redes de Corrente Contínua

O Simulador é um conjunto composto de vinte e três cubículos, constituído de um equipamento central - o RTDS -

e réplicas dos módulos de controle e proteção (C&P) associados aos conversores do Bipolo 1, Bipolo 2 e conexão Back-to-Back, instalados nas SEs Araraquara e Porto Velho. Assim, torna-se possível avaliar o desempenho desses controladores aos mais variados eventos que possam ocorrer nas redes AC e CC simuladas em RTDS, antecipando-se as consequências desses distúrbios para o sistema real.

O conjunto, instalado no ONS, está distribuído da seguinte forma:

- Equipamento Central – seis cubículos de fabricação RTDS (sendo quatro associados ao Madeira e dois correspondentes à expansão feita pelo ONS, prevendo estudos futuros de interação entre os sistemas do Madeira e de Itaipu);
- Quatro cubículos de controle e proteção associados ao Back-to-Back back to back – fabricação ABB;
- Seis cubículos de controle e proteção associados ao bipolo Bipolo I 1 – fabricação ABB; e
- Sete cubículos de controle e proteção associados ao bipolo Bipolo II 2 – fabricação Alstom.

#### 2.4 Software de Controle e Proteção.

O Back-to-Back e o Bipolo I do sistema de transmissão do Madeira são operados por um sistema especializado de controle e proteção, desenvolvido pela ABB, denominado MACH2. Este sistema compreende um conjunto de cubículos compostos de peças de hardware de diferentes fabricantes, cartões funcionais de fabricação ABB e computadores industriais que executam um software especialmente projetado para aplicação à operação de conversores CCAT.

A totalidade da programação das lógicas de controle e proteção incluídas no software que compõe o sistema MACH2, e também uma parcela significativa da biblioteca de modelos proprietários do fabricante empregados em simulação “off-line” com o programa PSCAD/EMTDC, é realizada através do uso de uma plataforma de desenvolvimento denominada HiDraw. O HiDraw corresponde a uma estrutura para programação de modelos em linguagem gráfica e que foi desenvolvido ao longo dos anos pela ABB para a agilização dos seus projetos de controladores empregados em sistemas de transmissão em HVDC, dispositivos FACTS e demais equipamentos que incorporam eletrônica de potência.

Portanto, quaisquer modificações na programação dos controladores MACH2 e/ou bibliotecas de modelos ABB para PSCAD/EMTDC, associadas à implantação de aprimoramentos da lógica, inibição de funções, alteração de parâmetros e correção de bugs, deve ser realizada por interação do usuário com o HiDraw. Está sendo realizada a capacitação nesta ferramenta por parte da equipe do ONS dedicada ao Simulador, para que possa ser verificado, imediatamente quando necessário, o desempenho e as consequências de possíveis ajustes nos modos de operação dos controles do CCAT, em especial nos aspectos relacionados à interação entre Bipolo 1, Bipolo 2 e Itaipu.

#### 2.4 Equipe Técnica.

O ONS constituiu uma equipe que estará dedicada à operação do Simulador, e que será responsável, dentre outras tarefas, por: programar e executar as rotinas de uso do equipamento, aprimorar os modelos de representação da rede, disponibilizar as instalações aos usuários, cuidar da evolução dos equipamentos com vistas a demandas futuras. Com foco em seus usuários, o Simulador atenderá à solicitações originárias das equipes de estudos do próprio ONS e dos consórcios proprietários das instalações do sistema de transmissão do Rio Madeira.

### 3.0 FERRAMENTAS “OFF LINE”

Através de projetos realizados em parceria com entidades externas, o ONS tem viabilizado a incorporação de melhorias ao ferramental computacional “off-line” empregado no suporte aos estudos de elétricos a serem realizados no Simulador em escala real de tempo. Nesse sentido, e com o objetivo de aprimorar as respectivas análises, tornando-as mais ágeis e confiáveis, foram desenvolvidas três principais ferramentas de suporte com finalidades bastante distintas: a) Integração do ambiente de cálculo e simulação associado ao programa ATP à sua contrapartida associada ao programa PSCAD/EMTDC; b) Integração do ambiente de cálculo e simulação associado aos programas de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC e transitórios eletromecânicos Organon; c) Síntese automatizada de equivalentes elétricos multi-porta em frequência e incorporação direta de modelo de representação correspondente em ferramentas “off-line” ATP, PSCAD/EMTDC e EMTP-RV e Simulador em escala real de tempo RTDS.

Esse ferramental para suporte ao Simulador agrega ganhos expressivos em qualidade e flexibilidade de representação de equipamentos com eletrônica de potência e controles digitais, através do uso simultâneo e/ou compartilhado das bibliotecas das diferentes ferramentas de simulação utilizadas. O mesmo fez-se mandatório na medida em que a execução dos diversos estudos elétricos associados ao empreendimento do Rio Madeira, sem a adoção do uso integrado das ferramentas ATP, PSCAD/EMTDC e ORGANON exigiria a adoção de metodologia

laboriosa para a conversão de modelos entre as três ferramentas bem como a sua exportação para o ambiente do Simulador.

#### 4.0 CENÁRIO FUTURO

Num cenário em que se observa a chegada da transmissão do Madeira em Araraquara, o sistema de transmissão de Itaipu em Ibiúna e, possivelmente, a chegada da transmissão de Belo Monte nas proximidades dos demais sistemas, com injeção de grandes blocos de potência numa mesma área por meio de links em CCAT, será preciso verificar o comportamento de uma conversora frente à outra e a interação entre as mesmas. Além disso, deverá ser analisada a interação da corrente contínua com a rede de corrente alternada que já está implantada.

Será necessário ainda verificar como as conversoras se comportarão diante de determinadas contingências, como irão interagir com o sistema em corrente alternada, se irá ocorrer um problema de tensão ou um problema de frequência. Por meio do simulador, será possível verificar essas situações em escala real de tempo.

A tecnologia atualmente usada no Simulador deverá sofrer mudanças em futuro próximo e deve se estar atento, com o objetivo de antecipá-las e, caso necessário, capacitar as equipes em plataformas computacionais mais genéricas e versáteis, que possam permitir maior nível de detalhe e maior abrangência.

#### 5.0 CONCLUSÃO

Em vista da envergadura de projetos de transmissão em CCAT em longa distância, ora em implantação ou previstos, o Operador deverá aperfeiçoar seus procedimentos a partir da experiência de implantação do Simulador em escala real de tempo e do conjunto de ferramentas “off-line”.

Os principais aspectos que deverão ser observados são os seguintes:

- a) Detalhamento de requisitos técnicos associados ao Simulador e ferramentas “off-line” quando da elaboração de futuros editais de leilão de interligações em CCAT;
- b) Participação em discussões técnicas com o fabricante visando ampliar o acesso aos modelos de representação “off-line” e no Simulador em escala real de tempo, a serem utilizados nos diferentes estágios do projeto e posteriormente no suporte à operação da interligação;
- c) Acompanhamento próximo, junto à equipe técnica do consórcios e fabricantes, dos trabalhos contemplados ao longo do projeto executivo.

#### 6.0 DADOS BIOGRÁFICOS

Barros, H. M. - Graduiu e obteve o título de MSc pela UFRJ. Tem 25 anos de experiência em engenharia elétrica. Trabalhou no CEPEL e desde 2002 está no ONS como Engenheiro Especialista. Seus interesses e especialização são em especificação de equipamentos de alta tensão e representação de sistemas de potência em simuladores offline e em escala real de tempo.

Santos, M. G. - Possui graduação em Engenharia Elétrica - Eletrotécnica pela UFRJ (1982), mestrado pela Universidade Federal de Itajubá (1995) e doutorado em Computação pela UFF (2009). Atualmente é gerente no ONS Tem experiência na área de Planejamento e Programação da Operação, com ênfase em Engenharias, atuando principalmente nos seguintes temas: estabilidade, autovalores, pequenas perturbações, oscilações subsíncronas, controle de sistemas de potência, confiabilidade e risco.

Castro, A. - 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 senior no Operador Nacional do Sistema - ONS. Suas áreas de interesse são transitório eletromagnético, HVDC e simulação em tempo real. Tem experiência em modelos de componentes para simulações no domínio do tempo.

Fontoura Filho, R. N. – Graduado em engenharia elétrica pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) em 1979, com Mestrado e Doutorado pela COPPE/UFRJ, respectivamente em 1984 e 1994. Trabalhou na Promon Engenharia e Eletrobrás, e está no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) desde 2000, onde atualmente é Gerente Executivo e Coordenador do Comitê de Desenvolvimento Tecnológico. É Professor Adjunto da UERJ.

Takahata, A. Y. – Graduado 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 ONS como engenheira senior desde 2003. No período de 2003 até 2012 trabalhou no Plano de Ampliações e Reforços.