



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

FI/GOP/09  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO - IX**

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

**INOVAÇÃO E DESAFIOS: EXPERIÊNCIA DA ELETRONORTE NA OPERAÇÃO DO SISTEMA EM CORRENTE CONTÍNUA (HVDC) DO COMPLEXO DO MADEIRA**

**Nome YGHOR PETERSON S. A. CUNHA (\*)  
ELETROBRAS ELETRONORTE**

**Nome JOSÉ JORGE C. TAVARES  
ELETROBRAS ELETRONORTE**

**RESUMO**

O Sistema Interligado Nacional (SIN) passa atualmente por um contínuo processo de expansão proporcionado principalmente pela construção de novas hidrelétricas, principalmente no Norte do País, com a implantação do complexo de geração/ transmissão do Rio Madeira (UHEs Santo Antônio e Jirau) além da UHE Belo Monte.

Esta tecnologia que utiliza a transmissão em corrente contínua, denominada “High Voltage DC Transmission System (HVDC)” vem sendo ampliada no país devido as vantagens que oferece em relação a transmissão em corrente alternada para grandes extensões. Entretanto, a operação dos equipamentos que fazem parte do sistema HVDC tem exigido das equipes de operadores dos Centros de Operação e Instalações da Eletrobras Eletronorte um esforço a mais para a gestão destes ativos do ponto de vista da eficiência operacional e nos aspectos de segurança quanto à manutenção dos equipamentos.

Este trabalho ressalta a experiência adquirida pela Eletrobras Eletronorte durante o período de testes da implantação do Sistema HVDC nas subestações Coletora Porto Velho e Araraquara II, através das suas equipes de operação e manutenção além do relacionamento com os outros Agentes e fabricantes, novas tecnologias e conceitos, filosofias inerentes a atividade que impactaram na operação de sistemas.

Ressalta-se que com a entrada em operação do segundo Bipolo, ocorrerá um aumento na complexidade operacionais do Sistema HVDC, incluindo os processos de recomposição, manobras de compartilhamento de equipamentos, comunicação entre os agentes, ou seja, vários fatores com reflexo e impacto nos processos da Eletronorte.

**PALAVRAS-CHAVE**

Operação, Transmissão, Manobras, Controle Mestre, HVDC, Sistema Interligado Nacional.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) passam hoje por um contínuo processo de expansão proporcionado pela construção de novas hidrelétricas, principalmente no Norte do País, com a implantação do Complexo do Madeira (UHEs Santo Antônio e Jirau) além da UHE Belo Monte.

O Complexo do Madeira é composto pelas Usinas de Santo Antonio e Jirau, Sistema de transmissão HVDC composto pelos Bipolos 1 e 2 em 600 kV da SE Coletora Porto Velho / Araraquara (Eletronorte e IEMadeira) e Back-to-back (Eletrosul) e é considerado a maior rede de corrente contínua do mundo, com influência determinante no sistema elétrico da região Acre / Rondônia.

(\*)Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A - Eletrobras Eletronorte - SCN Quadra 06 Conj. A, Blocos B e C, Entrada Norte 2, Asa Norte – CEP 70.716-901 - Brasília, DF, – Brasil - Tel: (+55 61) 3429-5151 – Email: yghor.cunha@eln.gov.br

A figura 01 apresenta o complexo de transmissão HVDC do Rio Madeira. Destaca-se o lote C de propriedade da Eletrobras Eletronorte responsável também pela operação/ manutenção do Controle Mestre (CM).

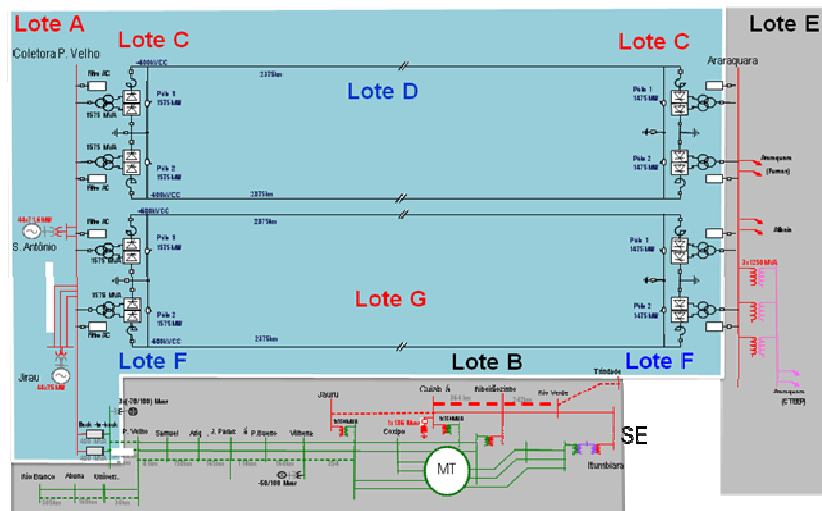


Figura 1 - Complexo de transmissão em corrente contínua do Rio Madeira

Devido a extensão entre as áreas interligada a alternativa utilizada para o escoamento desses blocos de energia foi a Transmissão em corrente contínua (HVDC). Especificamente no complexo de geração/ transmissão Rio Madeira foi utilizado um sistema com tensão em 600 kVcc, interligando as Usinas do Madeira até a SE Araraquara II (figura 02 – polo 01 e 02).



Figura 2 - SE Araraquara II (Conversoras CA/CC)

A transmissão em corrente contínua oferece algumas vantagens em relação a corrente alternada, dentre elas podemos destacar:

- Menor impacto ambiental;
- Perdas reduzidas para transmissões em longas distâncias;
- Menores custos de investimento;
- Redução do custo total para transmissão de energia para longas distâncias;
- Menores níveis de curto-circuito.
- Distúrbios em um sistema não são propagados para o outro;
- Controle rápido e preciso do fluxo de potência;
- Controle rápido das correntes de curto;
- Transmissão com ajuda do eletrodo de terra;
- Conexão de sistemas CA sem necessidade de sincronismo;
- Menores níveis de isolamento;

- Chaveamentos mais suaves;

No dia 21 de novembro de 2013 entrou em operação comercial o primeiro bipolo de corrente contínua de propriedade da Eletrobras Eletronorte juntamente com linha de transmissão em  $\pm 600$  kVcc com cerca de 2.500 km de extensão, ligando as cidades de Porto Velho e Araraquara.

Outro marco importante para a transmissão em corrente contínua será o complexo de Belo Monte. Este sistema foi projetado em 800 kVcc, consolidando a experiência do Brasil neste tipo de tecnologia desde a construção de Itaipu.

## 2.0 - CONTROLE DO SISTEMA

O sistema de controle HVDC é estruturado de tal forma que a maioria das funções está localizada na menor unidade comutável, por exemplo, o conversor 12 pulsos (polo ou bloco Back-to-Back). No próximo nível há o controle de Bipolo ou Bibloco coordenando polos ou blocos e no nível mais alto existe o CM, coordenando as funções nas hierarquias mais baixas através de computadores redundantes para uma máxima disponibilidade de geração/ transmissão.

As funções de controle do CM são empregadas em módulos programáveis em diferentes processadores, operando em um ambiente multitarefas. A arquitetura é aberta e utiliza tecnologia em “estado da arte” com computadores industriais e comunicações serial e paralela padrões.

O CM é responsável por funções primordiais no sistema de geração e transmissão das usinas do complexo do Rio Madeira. Dentre essas funções podemos destacar:

- A realização do balanço entre as potências geradas pelas usinas de Jirau e Santo Antônio e transmitidas pelas linhas em corrente continua (atendimento ao Sudeste) e Back-to-Back (atendimento a área Acre/Rondônia);
- Equilibrar e controlar o fluxo de energia reativa entre os conversores HVDC e as redes de corrente alternada;
- Realizar o controle da frequência CA do sistema.

O CM também é responsável por redistribuir ordens de potência ativa de uma forma ideal entre os Bipolos e Back-to-back devido perda ou limitação na capacidade de transmissão em qualquer parte do sistema, equalizando a potência ativa na barra CA de 500kV na SE Coletora Porto Velho com o montante gerado pelas usinas de Santo Antônio e Jirau. Isto implica na ordem chamada de “Runback” da potência transmitida nos Bipolos 1 e 2 em caso de perda de geração ou perda da capacidade de transmissão CA em Porto Velho.

A figura 02 apresenta a estrutura de atuação do CM no complexo do Rio Madeira:

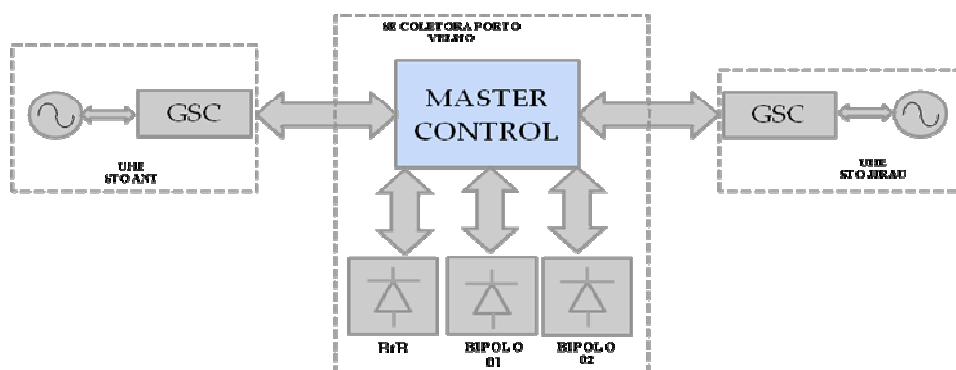


Figura 3 - Representação do Controle Mestre

Outras funções do CM são:

- Redistribuir ordens de potência de forma ideal entre os bip 01 e bip 02 por perda ou limitação de transmissão;
- Equalizar a potência ativa na barra CA de 500 kV com o monte gerado nas usinas;
- Ordenar a quantidade necessárias de filtros para operação normal;
- Contribuir no controle de frequência do sistema.

Os geradores localizados em Jirau e Santo Antônio que alimentam a transmissão HVDC precisam estar coordenados, de forma a manter equilibrada a potência ativa gerada e a potência consumida. Esta é a função do Coordenador da Estação de Geração (GSC) juntamente com o Controle Mestre de Potência Reativa (MRPC) que utiliza a informação do número de geradores conectados, número de linhas CA conectadas e número de filtros CA inseridos.

Se a capacidade do Sistema HVDC for reduzida, em virtude de trip no Polo ou no Bipolo, o Controle Mestre agirá rapidamente recalculando imediatamente o valor da potência ativa que pode ser transmitida pelo HVDC. Se a quantidade de potência ativa despachada no momento exceder a “Máxima Potência Ativa Admitida” o GSC atuará equalizando o fluxo de potência ativa através do envio de trip às unidades de geração selecionadas (Runback).

Os pólos 01 ou 02 podem operar em sobrecarga de 1,33 pu (2095 MW) em virtude de defeito no outro pólo em um período de 30 min. Caso a sobrecarga no pólo remanescente persista, ao final dos 30 minutos haverá automaticamente redução na transmissão ao valor nominal (1575 MW) conseqüentemente com ordem de Runback (redução de geração) nas UHE Santo Antônio e Jirau por ação do Controle Mestre.

### 3.0 - OPERAÇÃO DO SISTEMA HVDC

Com a chegada deste empreendimento surgiu para a Eletronorte o desafio de operar um sistema totalmente diferenciado em termos de tecnologia, sendo o Centro de Operação Regional de Rondônia - COR-RO responsável pela coordenação dos testes e telecomando de todos os equipamentos do bipolo 01.

Primeiramente foram realizados os testes de transmissão monopolares nas configurações com retorno pela terra (utilizando-se o eletrodo de terra) e retorno metálico (utilizando as duas linhas de transmissão). Nesta fase foram testados todos os pacotes de comandos para conexão de polos, transferência dos modos de retorno pela terra e retorno metálico como também a simulação real de curto circuitos nas linhas de 600kV e consequentes reflexos nos polos e rede CA. As figuras 04 e 05 ilustram os modos de operação monopolares testados na primeira fase.

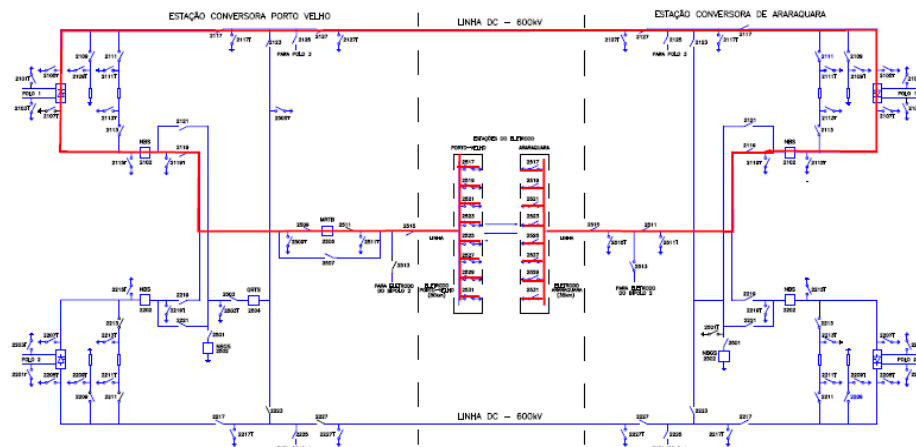


Figura 4 - Operação monopolar com retorno pela terra (fonte: ONS)

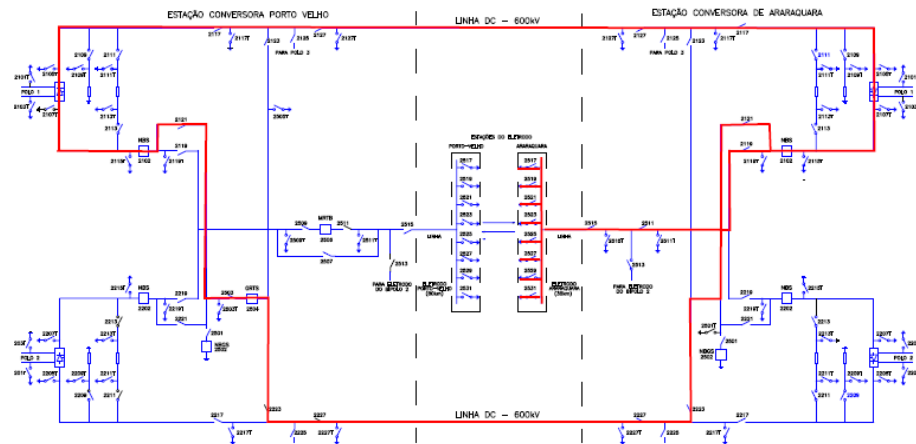


Figura 5 - Operação monopolar com retorno metálico (fonte: ONS)

À medida que se aumentava a disponibilidade de unidades geradoras das usinas de Santo Antônio e Jirau, testava-se a inserção de filtros e capacitores shunt. Em condição normal de operação o conversor CA/CC absorve potência reativa na ordem de 50% do montante de potência ativa transmitida.

Devido à restrição de número mínimo de unidades geradoras disponíveis houve um intervalo entre os testes monopolares e bipolares (operação dos dois polos). Este tempo foi importante para verificar o comportamento sistêmico do modo de operação monopolar e alguns aspectos foram importantes como a identificação da flexibilidade operativa proporcionada pelo Eletrodo de terra e a necessidade de utilização do transformador provisório de 465 MVA em 500/230 kV operando em paralelo com os blocos do Back-to-Back.

A operação na configuração monopolar com retorno pela terra só deverá ocorrer quando da indisponibilidade de um dos circuitos da LT 600 kV Coletora Porto Velho/ Araraquara 2 e está limitada em 220 horas/ano.

Algumas situações inesperadas como o roubo de cabos do Eletrodo de terra no terminal de Araraquara ocorreram e forçaram uma análise mais detalhada quanto às condições de operação no caso da indisponibilidade deste equipamento. Sendo necessária a utilização do terra local da subestação Araraquara II, por meio dos disjuntores NBGS (Neutral Bus Ground Switch) ilustrada na figura 06.

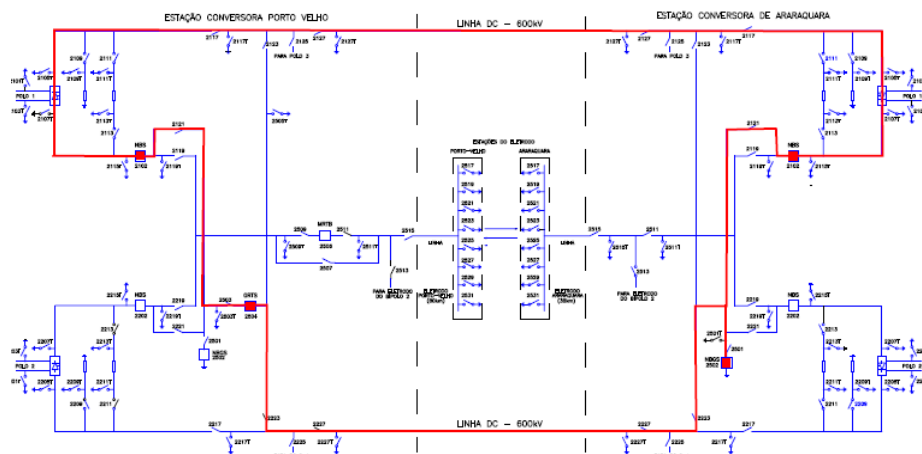


Figura 6 - Retorno metálico sem eletrodo de terra (terra local na SE Araraquara II)

A medida que a disponibilidade de geração das usinas de Santo Antônio e Jirau aumentou foi possível a realização dos testes com transmissão bipolar. A figura 07 ilustra o modo de operação bipolar.

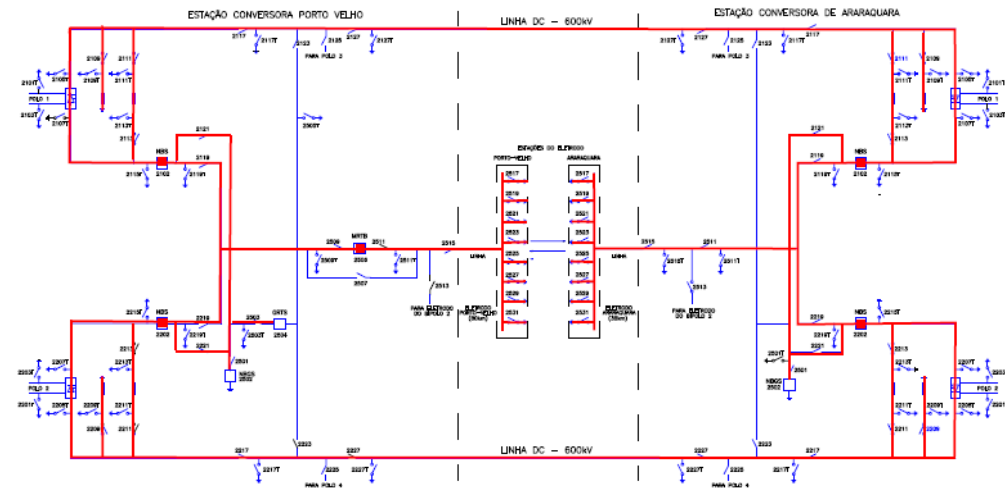


Figura 7 - Configuração Bipolar

A estratégia da equipe de engenharia de operação da Eletrobras Eletronorte foi documentar todas as ações operacionais necessárias como também o comportamento do sistema nas diversas situações de teste. Desse trabalho surgiu a "Instruções Especial de Operação do Sistema HVDC" contendo o passo a passo das ações operacionais relacionadas ao sistema HVDC. Este documento foi sendo atualizado constantemente de acordo com os teste e outras situações que iam surgindo.

#### 4.0 - CONTROLE DE TENSÃO DO SISTEMA HVDC

Os LTCs dos trafos conversores do bipolo 01 operam no modo automático e controlam a tensão do Elo CC visando manter a potência transmitida no valor pré-determinado pelo operador. Para conseguir isto o sistema de controle atua principalmente determinando o instante de disparo das válvulas e controlando a relação de transformação dos transformadores conversores.

A tensão contínua é controlada pelo comutador de carga do inversor enquanto os ângulos de extinção são mantidos constantes. A corrente contínua é controlada pelo ângulo de disparo do retificador.

Então, a condição ideal para a operação das Estações Conversoras é procurar manter o os tapes dos Transformadores Conversores na posição mais intermediária possível, o que propiciará uma faixa maior de possibilidade de ajustes da potência transmitida.

Outro ponto de flexibilidade operativa que temos no sistema HVDC do Madeira, é a possibilidade da operação com tensão CC no modo normal ou reduzida:

- Tensão CC normal: transmissão de potência com tensão CC nominal (600 kV)
- Tensão CC reduzida: transmissão de potência com um nível de tensão CC menor que a nominal, geralmente para superar um eventual problema de isolamento da linha CC (420 kV).

#### 5.0 - FINALIZAÇÃO DOS TESTES.

A última fase dos testes contemplou o funcionamento do Controle Mestre em situações como:

- Desligamento de um dos polos em modo de operação bipolar, sendo identificada a transferência de potência para o polo remanescente;
- Simulação de desligamento de unidades geradoras em Santo Antônio e Jirau forçando o CM a ordenar a diminuição da potência transmitida no Bipolo 01;
- Desligamento dos blocos do Back-to-Back onde o CM ordenava o aumento de potência transmitida no Bipolo 01 de modo a garantir o balanço entre potência gerada e transmitida;

## 6.0 - CONCLUSÃO

Futuramente com a entrada em operação do Bipolo 02 de propriedade da empresa Integração Elétrica do Madeira – IEM haverá necessidade dos testes de operação paralela entre os dois Bipolos e verificação da atuação do Controle Mestre neste novo cenário.

O Norte do Brasil ainda possui locais de aproveitamento hidráulico, tendo em vista sua importância e a dimensão das Usinas que lá serão instaladas, cabe-nos aprimorar os estudos elétricos da região de forma a servir de fontes de consultas para novos empreendimentos.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) JARDINI, J. A. et al – Alternativas não Convencionais para a Transmissão de Energia Elétrica – Estudos Técnicos e Econômicos. Livro. Editora Goya. Brasília 2012.

(2) JARDINI, J. A. et al. – Alternativas não Convencionais para a Transmissão de Energia Elétrica – Estado da Arte. Livro. Editora Goya. Brasília 2011.

(3) FRONTIN, S. O. et al. Ultra High Voltage Technology. (CIGRÉ Brochura 85). Working Group 04 (UHV Testing Facilities and Research) of the Study Committee 38 (Power System Analysis and Techniques). Jun/1994.

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

(1) Yghor Peterson Socorro Alves da Cunha, nascido em 1979 em Araguari / MG, formou como técnico em eletrotécnica no ano 2000 pela Escola Técnica Federal de Goiás. Obteve o grau de engenheiro eletricista pela Universidade Federal de Goiás (UFG) em 2004. No ano de 2007 obteve o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás na área de Sistemas de Controle de Máquinas Elétricas. Ingressou na Eletrobras Eletronorte no ano de 2007 ocupando o cargo de Engenheiro de Operação trabalhando na área de operação de sistemas entre 2007 à 2014. Atualmente trabalha na Superintendência de Engenharia de Manutenção na área de Estudos de Proteção e Controle.

(2) José Jorge Corrêa Tavares, nascido em 1980 em Recife / PE, obteve o grau de engenheiro eletricista pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) em 2004. Trabalhou no Centro de Operação do Sistema Chesf no período de 2002 a 2007 e, desde 2007, exerce atividades na Superintendência de Operação de Sistemas Elétricos da Eletrobras Eletronorte.