



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

BR/GPC/03  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - V**

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA  
- GPC**

**SISTEMAS DE CONTROLE E PROTEÇÃO DAS ESTAÇÕES CONVERSoras DE PORTO VELHO E  
ARARAQUARA 2. PRIMEIRO BIPOLO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DAS USINAS DO RIO MADEIRA.**

**Antonio A. C. Pagioro(\*)  
ABB**

**Paulo C. Campos/Antonio Spalenza  
Eletrobras Eletronorte**

**Marcus D. Perfeito  
Consórcio Themag/ Arcadis Logos**

**RESUMO**

O sistema de controle e proteção é baseado nos procedimentos normais para conversores de corrente contínua (CC) e envolve sequências para conexões e diferentes modos de operação para os conversores (monopolar, bipolar, tensão reduzida, etc). Todos os algoritmos usados para simulações no estudo de desempenho dinâmico são os mesmos usados no sistema de controle real.

A principal tarefa do Bipole Control (Controle do Bipolo) é manter o nível de potência ativa transmitida através das ações de:

- Controle da tensão em vazio em ambas as estações, tensão CC e corrente CC.
- Chaveamento dos filtros CA através do Controle de Potência Reativa (RPC).
- Controle das sequências para início ou término de transmissão de energia.

Para isto, o sistema de controle interage com os equipamentos do circuito principal das seguintes formas:

- Determinação do instante para o disparo do pulso das válvulas tiristorizadas.
- Controle da relação de transformação do transformador através do comutador de tap sob carga.
- Determinar as posições corretas dos disjuntores, chaves seccionadoras e chaves de aterramento nos pátio CA e CC.

Além das funções descritas, o sistema de controle do Bipolo 1 contribui com o Master Control no gerenciamento das situações de trip de geração ou transmissão de forma a ajudar manter o balanço a potência gerada e transmitida. Também executa as ordens do Master Control para que o número de filtros conectados não exceda o limite de auto-excitação dos geradores.

O Bipolo 1 do Rio Madeira dispõe de um sistema de proteção específico para HVDC. A função desse sistema é detectar condições anormais de operação e retirar de operação o equipamento com falha ou operação anormal através da ação adequada. A proteção envolve as proteções normais para um conversor HVDC (ex. curto-circuito na válvula, diferencial de pólo, diferencial do transformador, etc) e suas diversas ações de proteção. A operação paralela entre os pólos do bipolo 1 e bipolo 2 usando a mesma linha de transmissão requer ações especiais de proteção ou variações das já aplicadas durante a operação isolada.

O sistema de proteção está projetado para detectar qualquer falha com ao menos duas proteções diferentes arranjadas com sobreposição de zonas. Para cada possível falta, deverá existir uma proteção primária rápida com zona limitada. Esta proteção é suportada com uma proteção secundária, mais lenta e menos sensível, que servirá como back-up. A proteção de back-up irá, sempre que possível usar uma fonte alternativa de medição e quando aplicável, com um alcance de zona maior que sua proteção principal. Para os casos onde a filosofia de proteção primária e principal não pode ser aplicados sem grandes complicações, as proteções essenciais são duplicadas. No sistema de proteção HVDC, os sistemas A e B são completamente independentes um do outro e cada um representa um conjunto completo de todas as proteções aplicáveis ao sistema de transmissão HVDC.

## PALAVRAS-CHAVE

Transmissão em CC, Rio Madeira, Sistema de Controle, Sistema de Proteção, Estação Conversora.

### 1.0 INTRODUÇÃO

O Bipolo 1 do sistema transmissão do Rio Madeira, no estado de Rondônia, tem potência nominal de 3150 MW, tensões de operação nominais de  $\pm 600$  kV na estação retificadora e utiliza um conversor de 12 pulsos em cada um dos dois polos que formam o Bipolo 1. A conexão elétrica com a estação de Araraquara 2, no interior do estado de São Paulo, é feita através de uma linha de transmissão com aproximadamente 2350 km. Essa será a linha de corrente contínua mais longa a entrar em operação até o momento desse estudo.

Apesar de existirem vários projetos com características nominais similares, esta é uma configuração usada pela primeira vez no mundo devido aos valores de tensões escolhidos. Outros projetos que possuem potência similar, ex. Itaipu, utilizam tensões de operação de  $\pm 500$  kV.

Entretanto os maiores desafios para os sistemas de controle e proteção são:

- a) a grande quantidade de modos operacionais proporcionados tanto pela existência de um segundo bipolo quanto pela existência de uma segunda linha de CC em paralelo;
- b) o comprimento total das linhas de transmissão.

O princípio de controle do sistema de transmissão do bipolo 1 está descrito na figura 1. As caixas em amarelo representam funções de controle pertencentes ao bipolo 1. As funções de proteção também acompanham a mesma distribuição.

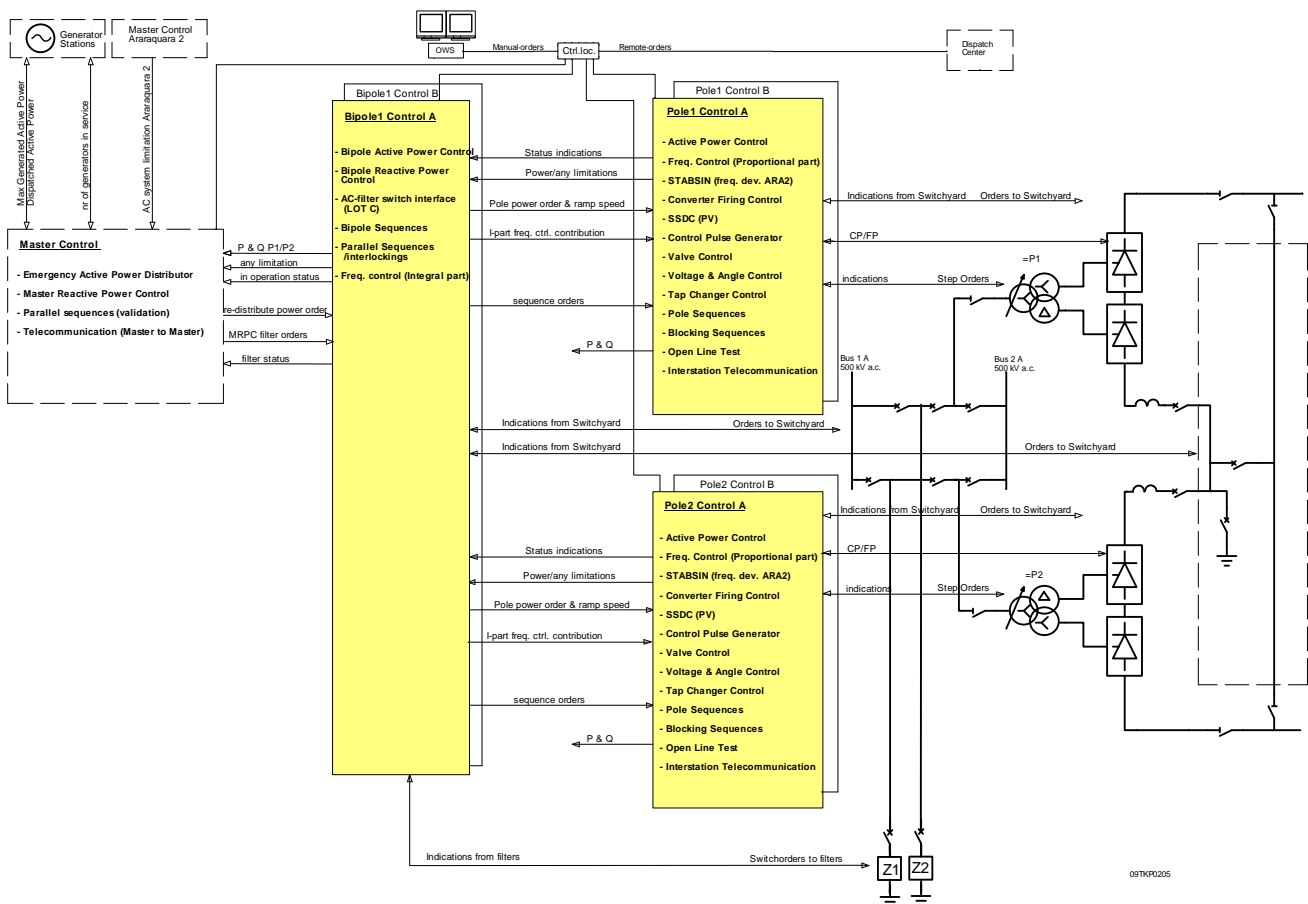


FIGURA 1 : Visão Geral do Sistema de Controle do Bipolo 1, Rio Madeira.

Todas as funções de controle e proteção executadas pelo bipolo 1, em Porto Velho e Araquara, estão distribuídas dentro das seguintes unidades físicas.

#### Controle

- Master Control (não discutido nesse documento)

- Bipole Control (Controle do Bipolo)
- Pole Control (Controle do Polo)
- HMI (IHM – interface homem-máquina)

#### Proteção

- Bipole Protection (Proteção do Bipolo)
- Pole Protection (Proteção do Polo)
- AC Filter Protection (Proteção de Filtro CA)

Cada uma dessas unidades representa um sistema independente, de controle ou proteção, com suas respectivas zonas de atuação e repetem-se para Porto Velho e Araraquara.

A Figura 02 oferece uma visão geral de como o hardware do sistema de controle e proteção foi desenvolvido para o Bipolo 1. Estão também representados o sistema de SCM (Station Control and Monitoring) e o Master Control que não serão tratados nesse estudo.

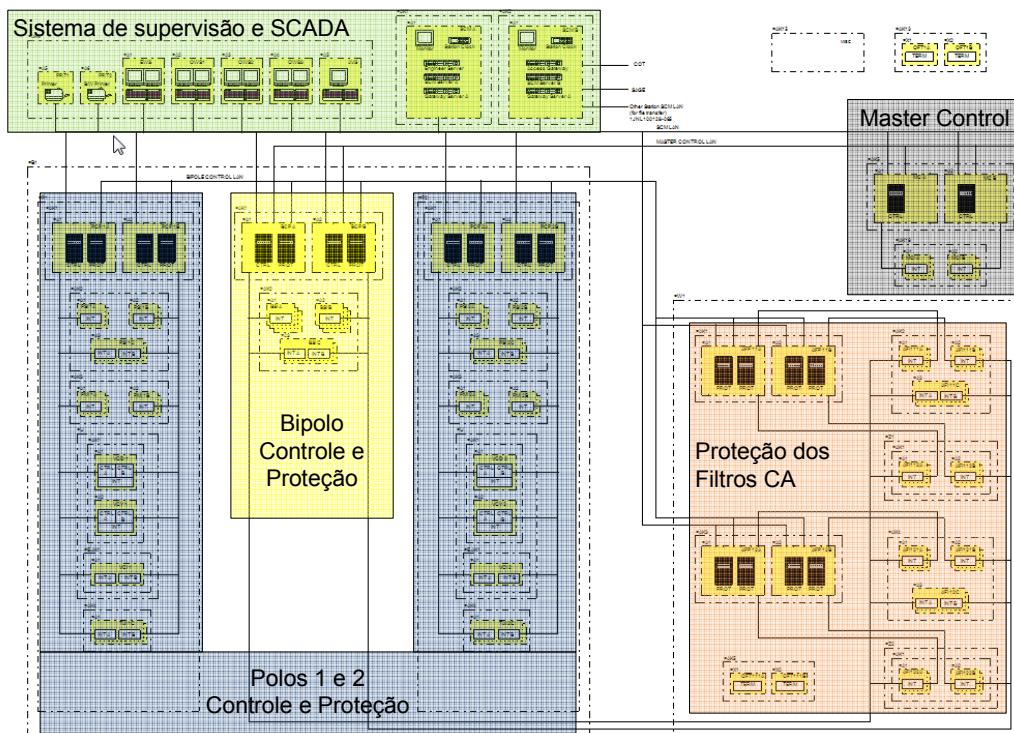


Figura 1: Visão geral do hardware usado no sistema de controle do bipolo 1.

A seguir iremos discutir individualmente as principais funções estabelecidas para cada uma dessas unidades.

## 2.0 SISTEMA DE CONTROLE E PROTEÇÃO

Todos os equipamentos usados são completamente redundantes. Os sistemas considerados essenciais, como medições e equipamentos de proteção, são também duplicados no campo. Indicações de chaves seccionadoras e alarmes em geral são duplicados no nível de controle e proteção, entretanto não necessariamente possuem duplicidade no equipamento principal.

O sistema de C&P (controle e proteção) do Bip1 (bipolo 1) é hierarquizado, conforme já descrito, e a comunicação entre eles é feita através de barramento de comunicação. Cada unidade central (Bipole, Pole control e AC Filter) dispõe de painéis de entrada e saída (I/O) com comunicação direta e dedicada.

Esses diferentes barramentos de comunicação são responsáveis por transportar as informações analógicas e digitais dos equipamentos de campo para as unidades centrais de processamento. Todo esse processamento é feito por hardware de alto desempenho com resolução de cerca de 833 us para dados digitais e cerca 50 us para dados analógicos.

O modo de operação normal é o de Potência constante definida estação operando como retificador. Isso significa que para cada variação na corrente CC, uma variação proporcional na tensão é feita de maneira a manter-se a potência transmitida.

A estratégia de proteção usada foi basicamente a mesma definida em edital. Cada equipamento do circuito principal é protegido por no mínimo duas proteções distintas, preferencialmente usando equipamentos de medição diferentes. Quando não foi possível usar dois equipamentos independentes ou duas proteções distintas, o critério mínimo de utilização de enrolamentos individuais foi sempre observado.

Essas ordens são variadas e dependem principalmente do objeto protegido e causa da falha. Entre elas, estão as seguintes ordens: ordem de balanço de potência (no caso de desbalanço de corrente entre os polos), alarme e atuação para minimização da corrente no eletrodo (caso haja sobrecarga na linha do eletrodo) ou ainda sinais de trip podem ser enviados para os polos que estiverem em operação.

Figura 3 Visão geral do sistema de controle do bipolo.

A maior parte das funções de controle descritas no diagrama da Figura 3 é recorrente na grande parte dos projetos de CC e, portanto não oferecem objeto de estudo adicional. Essas funções serão sucintamente descritas. As análises serão focadas sobretudo na parte do controle das sequências e no sistema de proteção para a linha CC.

#### 2.1.1 Controle de Potência Ativa do Bipolo (BAPC)

O sistema de controle do bipolo assegura que o total de potência CC transmitida permaneça aquela ordenada pelo operador e que a corrente seja igualmente distribuída entre os polos, mantendo assim a corrente de neutro baixa.

#### 2.1.2 Controle de Potência Reativa (RPC)

Essa função opera de maneira a ordenar a entrada da compensação de harmônicos existe tanto em Porto Velho como em Araraquara. Os valores de entrada são dados com relação às condições de operação (rating) e de desempenho (performance) do sistema de transmissão HVDC. O controle manual dos filtros é possível, entretanto algumas funções são independentes da seleção de operação manual ou automática. Os critérios para retirada de filtros são executados no Master Control.

#### 2.1.3 Controle de Sequências CA do Bipolo (ACBSSQ)

Responsável pela execução da ordem para todos os equipamentos localizados no pátio CA. Executa tanto ordens manuais dadas quanto ordens automáticas, como conexão e desconexão de filtros CA.

#### 2.1.4 Sistema de Modulação de Potência (MOD)

Esse sistema faz com que haja compensação de potência ativa para corrigir pequenos desvios de frequência causados por distúrbios na rede de 500 kV.

#### 2.1.5 Controle de Sequência do Bipolo (BSSQ)

Em outras estações de HVDC essa função é somente responsável pela coordenação e execução das ordens dadas para os equipamentos do pátio CC.

Entretanto, para o Bipolo 1 do Rio Madeira, essa função é responsável pelo intertravamento de e coordenação, somente para o próprio Bipolo, de todas as manobras possíveis de serem feitas usando os dois sistema de transmissão HVDC em paralelo, sejam as linhas ou os polos.

De acordo com o edital proposto, deveria ser possível a operação em diversos modos paralelos. Uma análise foi feita e chegou-se a conclusão que os trinta modos mais plausível de serem usados deveriam ser previstos. Fazer entender que trinta modos por polo, o que significam sessenta modos diferentes de operação.

Além dessas funções, o BSSQ é também responsável pelas sequências automáticas de troca de modo de operação, transferindo de retorno por terra para retorno metálico sem a necessidade de interrupção da transmissão. Importante notar que essa transferência somente é exequível para situações em que não há qualquer tipo de operação em paralelo, seja de polos ou linhas.

Também estão no BSSQ todos os intertravamentos necessários para garantir a energização correta dos equipamentos do pátio de 600 kV CC.

Na tabela 1 podemos ver os modos de operação previstos. Observem que somente estão descritos usando os modos operacionais dos polos 1 e 3. Uma tabela dual existe com os modos de operação previstos para os polos 2 e 4.

Tabela 01: Modos Operacionais Previstos.

Configuração	Modo Operacional	Modo de Retorno
1	Polo 1 // Polo 3 pela linha 1	Retorno por Terra
2	Polo 1 // Polo 3 pela linha 3	Retorno por Terra
3	Polo 1 // Polo 3 pela linha 1	Retorno Metálico pela linha 2
4	Polo 1 // Polo 3 pela linha 1	Retorno Metálico pela linha 4
5	Polo 1 // Polo 3 pela linha 1	Retorno Metálico pelas linhas 2//4
6	Polo 1 // Polo 3 pela linha 1	Retorno Metálico Polo 1 pela L2 e Polo 3 por L4
7	Polo 1 // Polo 3 pela linha 3	Retorno Metálico pela linha 4
8	Polo 1 // Polo 3 pela linha 3	Retorno Metálico pela linha 2
9	Polo 1 // Polo 3 pela linha 3	Retorno Metálico pelas linhas 2//4
10	Polo 1 // Polo 3 pela linha 3	Retorno Metálico Polo 1 pela L2 e Polo 3 por L4
11	Polo 1 pela linha 3	Retorno por Terra
12	Polo 1 pelas linhas 1//3	Retorno por Terra

13	Polo 1 pela linha 1	Retorno Metálico pela linha 4
14	Polo 1 pela linha 1	Retorno Metálico pelas linhas 2//4
15	Polo 1 pela linha 3	Retorno Metálico pela linha 2
16	Polo 1 pela linha 3	Retorno Metálico pela linha 4
17	Polo 1 pela linha 3	Retorno Metálico pelas linhas 2//4
18	Polo 1 pelas linhas 1//3	Retorno Metálico pela linha 2
19	Polo 1 pelas linhas 1//3	Retorno Metálico pela linha 4
20	Polo 1 pelas linhas 1//3	Retorno Metálico pelas linhas 2//4
21	Polo 3 pela linha 1	Retorno por Terra
22	Polo 3 pelas linhas 1//3	Retorno por Terra
23	Polo 3 pela linha 3	Retorno Metálico pela linha 2
24	Polo 3 pela linha 3	Retorno Metálico pelas linhas 2//4
25	Polo 3 pela linha 1	Retorno Metálico pela linha 4
26	Polo 3 pela linha 1	Retorno Metálico pela linha 2
27	Polo 3 pela linha 1	Retorno Metálico pelas linhas 2//4
28	Polo 3 pelas linhas 1//3	Retorno Metálico pela linha 4
29	Polo 3 pelas linhas 1//3	Retorno Metálico pela linha 2
30	Polo 3 pelas linhas 1//3	Retorno Metálico pelas linhas 2//4

GR = ground return = retorno por terra  
MR = metallic return = retorno metálico  
// = operação em paralelo = exemplo L1//L3 = linha 1 em paralelo com linha 3  
Px = Polo x = exemplo = P1 = polo 1  
Lx = Linha x = exemplo = L1 = linha 1

Durante a fase de design, acordou-se que cada um dos bipolos irá realizar o check da configuração atual e enviar ao Master Control que por sua vez, irá receber as informações de ambos os bipolos e verificar se as configurações são compatíveis. Se existir compatibilidade então o Master Control enviará uma permissão para que os bipolos possam iniciar sua operação em paralelo.

#### 2.1.6 Sistema de Proteção do Bipolo

O sistema de proteção do Bipolo faz a proteção da área de neutro comum aos dois polos. Corrente e tensões são monitorados e valores anormais irão fazer com que a proteção tome as devidas ações. Nenhuma função especial de proteção foi necessariamente desenvolvida para essa zona.

### 2.2 SISTEMA DE CONTROLE E PROTEÇÃO DO POLO

Esta secção dará uma descrição geral sobre as principais funções de controle e proteção situadas nas unidades de controle e proteção dos polos (PCP), de acordo com a figura 04.

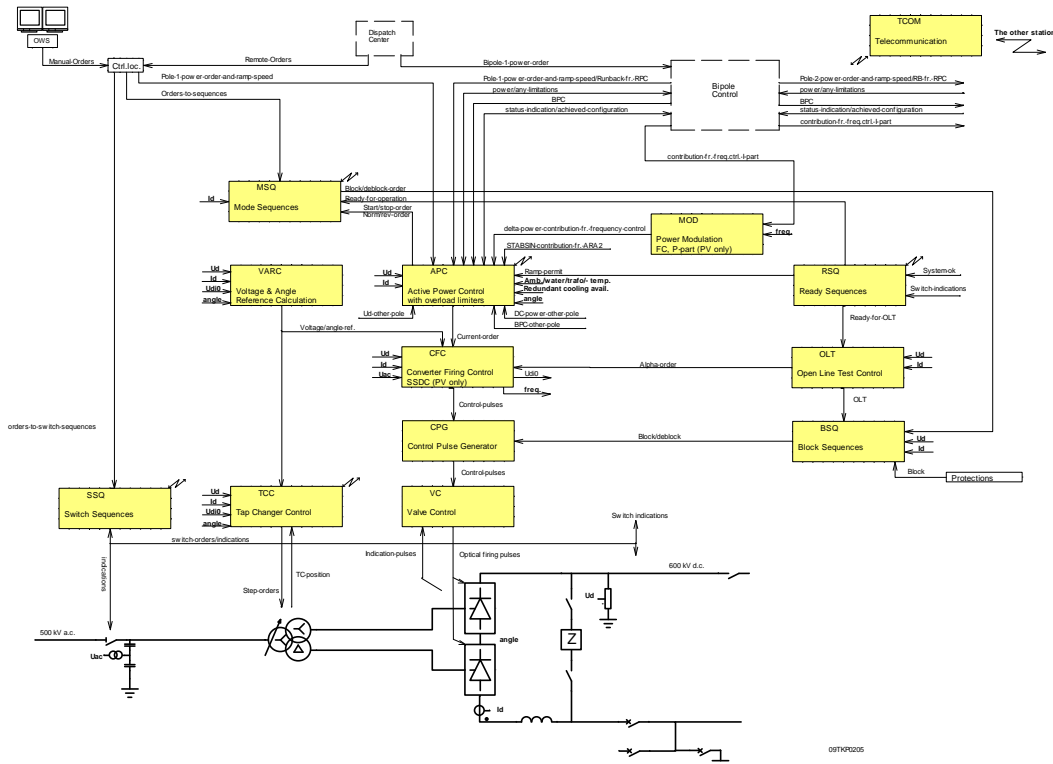


Figure 4 Visão geral do sistema de controle dos polos.

Da mesma forma como tratamos o sistema de controle do Bipolo, será feita uma breve descrição para o sistema de controle do polo, uma vez que todas as funções de controle são baseadas em técnicas existentes de HVDC.

### 2.2.1 Controle de Potência Ativa (APC)

Garante que a ordem de potência definida pelo operador, ou resultado de uma ordem do Master Control, seja corretamente interpretada e calcula os valores a serem usados como referência para o disparo das válvulas tiristórias.

### 2.2.2 Controle de Disparo do Conversor (CFC)

O CFC faz com o cálculo feito pelo APC seja convertido em um valor de ângulo de disparo para as válvulas tiristórias. Tal valor de ângulo é então executado de forma a garantir que as válvulas não excederão as suas limitações.

### 2.2.3 Controlador do Tap Changer (TCC)

O TCC é corresponsável pelo valor do ângulo de disparo de extinção respectivamente nas estações retificadora e inversora. Ele trabalha junto com o CFC e garante as margens de ângulo na estação retificadora e controle de tensão CC na estação inversora.

### 2.2.4 Controle de Sequências do Polo (SSQ)

Essa função basicamente ajuda o operador a executar as funções de conexão e desconexão dos equipamentos do pátio de CA e CC relativos ao polo. Também é responsável pela conexão e desconexão dos filtros CC.

### 2.2.5 Teste de Linha Aberta (OLT)

O OLT é uma função que permite fazer o desbloqueio das válvulas em modo retificador e com os terminais remotos abertos. Esse teste normalmente antes da primeira energização e após longos períodos de inatividade ou manutenção na linha de transmissão.

### 2.2.6 Sistema de Telecomunicação (TCOM)

Esse sistema é responsável pela transmissão de informações entre as estações. Ele faz com que as ordens e status de uma estação sejam enviados para a outra.

### 2.2.7 Sistema de Proteção do Polo

O sistema de proteção do polo é o maior sistema individual de proteção dentro da estação HVDC. Primariamente ele está dividido entre proteção para conversor, polo, transformador conversor e pátio CA.

As proteções usadas são soluções comumente usadas em sistemas de HVDC, diferindo-se somente quando da operação em paralelo com o outro Bipolo, o Bipolo 2.

Nessa situação foram adotadas medidas para que a falha em conversor não causasse danos também no outro conversor. Para tal, sinais são trocados de forma rápida para que o polo que estiver sob falha possa ser isolado em tempo hábil.

Um grande desafio encontrado durante o período de design foi a adequação da proteção da linha de transmissão CC devido a uma forte influência entre as linhas para faltas de longa distância. Por tratar-se de uma linha muito longa, a detecção de falha na linha requereu um grande esforço da engenharia para aperfeiçoar um algoritmo customizado para essa aplicação. Além disso, a possibilidade de transmissão usando as linhas em paralelo fez com que esse desafio fosse ainda maior. Todos os testes pertinentes, entretanto, foram feitos satisfatoriamente com a utilização do sistema RTDS (Real Time Digital Simulator ®).

### 2.3 SISTEMA DE PROTEÇÃO DOS FILTROS CA

Foram utilizadas proteções convencionais para filtros AC como sobrecorrente, diferencial, sobretensão e proteções particulares do sistema de compensação de harmônicos.

### 2.4 TESTES DE SISTEMA EM FÁBRICA

Os testes executados têm por finalidade assegurar que todo o sistema irá funcionar como especificado. Durante esses testes é desenvolvido um modelo para o RTDS (Real Time Digital Simulator ®) que simula todo o comportamento para o sistema de HVDC.

Esse teste consiste na conexão do RTDS representando os equipamentos da subestação, basicamente da seguinte forma: disjuntores, válvulas, transformadores de corrente, transformadores de tensão, filtros CA, filtros CC, linha de transmissão, malha CA equivalente dos dois lados e algumas chaves seccionadoras que possuem funções em alguma sequência pré-definida.

Todos esses equipamentos são testados de forma integrada, durante meses na plataforma de ensaios na fábrica. Durante esse período todas as sequências de transmissão, manobras automáticas, ordens de proteção, conexão e desconexão de filtros CA e CC são executadas.

## 3.0 CONCLUSÃO

Devido ao eficaz método de testes em fábrica, o tempo total para seu comissionamento foi severamente reduzido, tomando cerca de seis meses durante a segunda metade do ano de 2012.

As características particulares desse projeto, grande quantidade de sequências, distância da linha de transmissão e presença de um sistema de controle central entre geração e transmissão, o Master Control, aumentou o grau de complexidade e refinamento das soluções apresentadas.

Essas variações exigiram um esforço maior e singular no sentido de compreender os mecanismos de controlabilidade presentes em todo complexo, não somente para Bipolo 1.

Ao final dos testes de fábrica e comissionamento, o sistema de controle e proteção do Bipolo 1 foi capaz de desempenhar as funções que eram esperadas, capaz de gerenciar adequadamente as condições normais assim como as contingências previstas em projeto.

## 4.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) The Rio Madeira HVDC System – Design aspects of Bipole 1 and the connector to Acre-Rondônia, B4 111 2012, CIGRE 2012
- (2) EDITAL DE LEILÃO NO 007/2008-ANEEL, ANEXO 6C-CC – LOTE LC-CC – INTEGRAÇÃO DO MADEIRA
- (3) EDITAL DE LEILÃO NO 007/2008-ANEEL, ANEXO 6A-CC – LOTE LA-CC – INTEGRAÇÃO DO MADEIRA

- (4) Procedimentos de Rede, Submódulo 2.5, Requisitos mínimos para elos de corrente contínua – ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, 07/07/2008.

## 5.0 DADOS BIOGRÁFICOS



**Antonio Augusto C. Pagioro** nasceu em Fernandópolis, São Paulo, em 1977. Graduiu-se em engenharia elétrica pela Universidade Estadual Paulista, Unesp Campus Ilha Solteira, em 2005. Iniciou sua carreira profissional em 2000 como estagiário na área de service de subestações da ABB em Osasco. Trabalhou em comissionamentos de alta e média tensões até 2005 quando transferiu-se para a área de CC da ABB em Guarulhos. Foi engenheiro supervisor de operação e manutenção das estações conversoras de Garabi 1 e 2 até 2009, quando transferiu-se para a unidade de CC da ABB em Ludvika, onde desde então executa funções relacionadas a Controle e Proteção de sistemas de CC. Participou no projeto do Rio Madeira como engenheiro líder da equipe de desenvolvimento do sistema de controle e proteção do Bipolo 1 e sistema de proteção das estações Back to Back 1 e 2.

**Paulo Cesar Gonçalves** Campos nasceu no Rio de Janeiro em 1954. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Veiga de Almeida – RJ em 1981. Possui curso de Especialização em Automação de Sistema de Potência pela Universidade Federal da Bahia e curso de Especialização em Proteção de Sistemas Elétricos pela FUPAI da Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI. Trabalha na Eletronorte desde 1986 na área de estudos de sistemas de proteção, controle e automação.

Participou no desenvolvimento dos projetos básico, executivo e testes em fábrica do sistema de controle e proteção do Bipolo 1 - Rio Madeira, como engenheiro responsável pela equipe da Eletronorte em Ludvika.



**Antonio Spalenza** nasceu em 1959 em Santa Tereza, Espírito Santo (Brasil). Graduiu-se em 1983 em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, e concluiu Especialização em Automação e Controle de Processos pela Universidade Federal do Pará em 2005. É bacharel em Direito pela Universidade Federal de Rondônia, no ano de 2002. Atuou na área de Manutenção e Operação de Usinas Termoelétricas, Linhas de Transmissão e Subestações de Alta Tensão, na Eletronorte, onde trabalha desde 1984. Atualmente Coordenador da Operação e Manutenção do Bipolo 1 no Terminal de Porto Velho, referente ao sistema de Transmissão 600 KV DC do Projeto Rio Madeira.



**Marcus Danilo Perfeito** nasceu em 1962 em Morrinhos, Goiás (Brasil). Graduiu-se em 1984 em Engenharia Elétrica, modalidade Eletricista, pela Universidade de Brasília, Brasília, e concluiu pós-graduação em Engenharia de Sistemas Elétricos pela Universidade de Itajubá, Minas Gerais, em 1993. Atuou na área de estudos e projeto de sistemas de proteção e controle de subestações. Atualmente Coordenador da Engenharia de Proprietário da Estação Transmissora de Energia, empresa do Grupo Eletrobras Eletronorte.