



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

BR/GSE/18
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

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

Hugh C. Craig(*) / Manuel J.L. Lopez/Sergio O. Frontin
CONSÓRCIO THEMAG/ARCADIS LOGOS

Geraldo L.C. Nicola
ELETOBRAS ELETRONORTE

João Neves T. Filho
ETE

RESUMO

O objetivo deste informe é apresentar as principais características do projeto das estações conversoras de Porto Velho e Araraquara 2 do primeiro bipolo do sistema de transmissão do Rio Madeira com destaque para as características dos equipamentos tanto no lado de CA como de CC: transformadores conversores, válvulas, reatores de alisamento, filtros, para-raios, equipamentos do pátio de manobra e serviços auxiliares. Serão enfatizadas as principais diferenças construtivas entre as duas subestações conversoras.

PALAVRAS-CHAVE

Estação conversora, Transformadores conversores, Válvulas, Filtros, Reatores de alisamento.

1.0 - INTRODUÇÃO

A implantação do sistema de transmissão associada à integração das usinas do Rio Madeira foi objeto de leilão 007/2008, realizado pela Aneel, que definiu sete diferentes lotes. Dentre estes lotes podemos citar: as estações conversoras de Porto Velho e Araraquara 2, bipolos 1 e 2, linhas de transmissão em 600 kV interligando os dois bipolos e o sistema back-to-back em Porto Velho. Este informe técnico se refere à implantação do Lote C, Conversoras do Bipolo 1, de propriedade da Estação Transmissora de Energia (ETE), implantadas nas subestações Coletora Porto Velho e Araraquara 2. São comentados aspectos do compartilhamento com as outras empresas acessantes. A figura 1 apresenta uma visão geral deste sistema integrado às usinas do Rio Madeira.

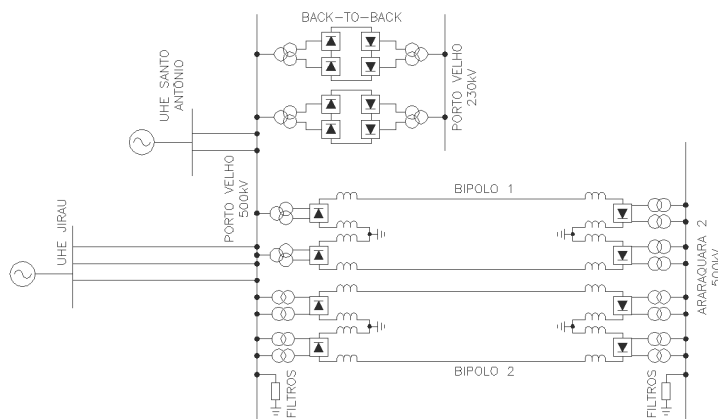


FIGURA 1 – Sistema de Transmissão de Corrente Contínua do Rio Madeira

2.0 - ESTAÇÕES CONVERSORAS

O projeto das estações conversoras e as especificações dos equipamentos foram elaborados em atendimento aos requisitos técnicos básicos estabelecidos pelo edital do leilão do sistema de transmissão do Rio Madeira (Anexo 6C - CC) e pelos Procedimentos de Rede do ONS (Submódulo 2.5 – Requisitos Mínimos para os Elos de Corrente Contínua Rev. 1.0 – 05/08/2009)

As duas estações possuem o mesmo arranjo em 500 kV, sendo pátio de manobra em corrente alternada em barra dupla com disjuntor e meio para conexão aos transformadores conversores monofásicos e as ilhas dos filtros de corrente alternada. A área de conversão de corrente alternada para corrente contínua é composta pelos transformadores conversores, válvulas e do pátio em corrente contínua com os respectivos filtros de CC.

Os arranjos foram concebidos para permitir o paralelismo entre o bipolo 1 (polos 1 e 2) e o bipolo 2 (polos 3 e 4), bem como entre os eletrodos proporcionando as condições operativas estabelecidas no Edital da Aneel (normal, monopolar com retorno via terra, monopolar com retorno metálico, monopolar com retorno via terra e linhas paralelas, monopolar com retorno metálico e linhas paralelas, linhas em paralelo, cruzado, polos em paralelo e bipolos em paralelo na mesma linha). As figuras a seguir ilustram os pátios de CA e CC:



FIGURA 2 – Pátio de CA em Araraquara



FIGURA 3 – Pátio de CC em Porto Velho

3.0 - TRANSFORMADORES CONVERSORES

Os transformadores conversores de $500/\sqrt{3} - 254/\sqrt{3} - 254$ kV com potência unitária de 630 MVA de Porto Velho possuem os enrolamentos secundários das ligações Y e Δ construídos em um mesmo tanque com três enrolamentos (um primário e dois secundários) perfazendo seis unidades (três para o polo 1 e três para o polo 2) mais uma unidade de reserva e as válvulas são de tipo quádrupla. Em Araraquara 2 os transformadores conversores de $500/\sqrt{3} - 236/\sqrt{3}$ kV (Y-Y) e de $500/\sqrt{3} - 236$ kV (Y- Δ) com potência unitária de 292,1 MVA são de apenas um único enrolamento secundário seja de ligação em Y, seja em Δ perfazendo doze unidades (seis para o polo 1 e seis para o polo 2) mais duas unidades de reserva. Todos os transformadores conversores possuem 31 taps comutados no lado de alta e as válvulas são do tipo duplas. A decisão de projetar os transformadores conversores com duas filosofias distintas deve-se a logísticas de transporte diferentes pois a peça de maior massa chega a 393 T (massa total 614 T) no caso de Porto Velho que tem a possibilidade de transporte desde a fábrica em Ludvika por via marítima e fluvial e 256 T (massa total 395 T nas unidades Y-Y de maior massa) para Araraquara onde o transporte desde a fábrica em Guarulhos é por via rodoviária. As figuras a seguir ilustram os transformadores conversores:



FIGURA 4 – Transformador Conversor Porto Velho



FIGURA 5 – Transformador Conversor Araraquara



FIGURA 6 – Descarga do transformador no porto de Porto Velho

4.0 – VÁLVULAS

As válvulas do bipolo 1 são abrigadas, isoladas a ar e refrigeradas a água. Na conversora de Porto Velho foram instaladas três válvulas quadruplas por polo, isso é, quatro válvulas simples conectadas em série, montadas uma em cima da outra, constituindo uma única estrutura mecânica, sendo assim, três estruturas destas são necessárias para cada grupo conversor de 12 pulsos. Na conversora de Araraquara 2, foram empregadas seis válvulas duplas por polo, ou seja duas válvulas simples montadas numa mesma estrutura, sendo portanto necessário seis estruturas para cada conversor de 12 pulsos. Os tiristores tem uma tensão nominal de 7200 V e 2.695 A com uma área ativa de aproximadamente 90 cm². As válvulas são suspensas através de isoladores de porcelana. O tipo de arranjo das válvulas está relacionado a forma de conexão das buchas de baixa dos transformadores às mesmas já que com 4 buchas no secundário (Y- Δ) a montagem quadrupla de Porto Velho facilita a conexão, bem como a quantidade de unidades transformadoras por polo três em Porto Velho leva a a um arranjo mais verticalizado (prédio de válvulas mais alto e estreito) que o de Araraquara com 6 unidades por polo.

Cada unidade completa de uma válvula simples na estação retificadora consiste de 11 módulos de tiristores conectado em série com reatores intermediários. Cada módulo têm até 9 tiristores conectados em série formando assim 95 níveis de tiristores. Os valores correspondentes no inversor são: 10 módulos, 9 tiristores e 88 níveis. As figuras a seguir ilustram os arranjos das válvulas em Porto Velho e Araraquara:



FIGURA 7 – Sala de válvulas em Araraquara



FIGURA 8 – Sala de válvulas em Porto Velho

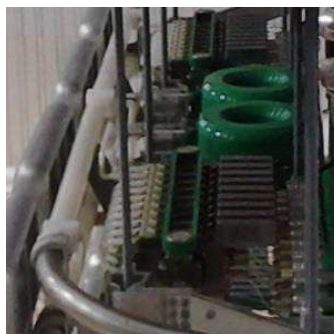


FIGURA 9 – Detalhe de um módulo de válvula

FIGURA 12 – Diagrama esquemático da disposição dos para-raios para um polo



FIGURA 13 – Para-raios no pátio de CC

7.0 – REATORES DE ALISAMENTO

Os reatores de alisamento do lado de CC são utilizados basicamente para amortecer a oscilação da corrente (ripple), limitar as sobre-correntes transitórias e harmônicos sendo adotados para esse fim 1 reator de 15 mH para cada polo e dois reatores de 150 mH em série nos neutros dos polos. A utilização dos reatores maiores no neutro otimiza o projeto com diminuição da altura do equipamento pelo menor nível de isolamento requerido.

No bipolo 1 os reatores, isolados a ar, próprios para instalação ao tempo e encapsulados em resina sintética de fibra de vidro para possibilitar alta resistência às intempéries.

A figura a seguir mostra em primeiro plano o reator do polo 1 de Araraquara e ao fundo os quatro reatores do neutro.



FIGURA 14 – Reatores de Alisamento

8.0 DISJUNTORES

Os disjuntores de CA das estações conversoras são elencados em três tipos de aplicações: para conexão dos transformadores conversores; conexão dos bancos de filtros de CA e conexão dos sub-bancos de filtros de CA.

Todos os disjuntores são em SF6 com tensão nominal de 500 kV, NBI de 1.550 kV, NBS de 1.175 kV, capacidade de interrupção, valor eficaz, de 50 kA em Porto Velho e 63 kA em Araraquara e capacidade de estabelecimento nominal em curto-circuito, valor de crista, 130 kA em Porto Velho e 164 kA em Araraquara.

Os disjuntores aplicados para conexão dos transformadores conversores monofásicos são dotados de unidades para sincronismo de chaveamento.

Devido as solicitações das tensões de reestabelecimento transitórias (TRT), 2.800 kV de pico em Porto Velho e 1.470 kV de pico em Araraquara, nas conexões às barras os disjuntores de Porto Velho possuem 4 camaras de extinção e em Araraquara possuem 2 camaras.

Os disjuntores centrais dos vãos de conexão dos transformadores conversores na SE Araraquara 2 tiveram que ser equipados com resistores de pré-inserção para o fechamento, com tempo de permanência mínimo de 8 milisegundos, por compartilharem a conexão com duas linhas de transmissão de 500 kV para interligação com a SE Araraquara - Furnas.

O controle de corrente nos polos é executado pelas válvulas, portanto os disjuntores aplicados no pátio de CC atuam como comutadores do sentido da corrente no neutro e são dotados de um reator, um capacitor e de um

resistor não linear. O capacitor é instalado em série com o reator e em paralelo com o disjuntor SF6 de modo a criar uma oscilação para passar a corrente por zero e possibilitar a extinção do arco no disjuntor, a corrente de CC continuará fluindo via capacitor e o carrega ao nível da tensão de comutação que é determinada pela característica do resistor não linear ligado em paralelo.

No pátio de CC em Porto Velho temos quatro aplicações de disjuntores: para transferência de retorno metálico (MTBR); para transferência de retorno pela terra (GRTS); para chaveamento da barra de neutro (NBS) e para aterramento rápido da barra de neutro (NBGS). Em Araraquara são duas: para chaveamento da barra de neutro e para aterramento rápido da barra de neutro. Como os disjuntores de CC são aplicados no neutro as tensões nominais são de 80 kV e corrente comutada de 3.693 A. A figura a seguir mostra o diagrama com localização dos disjuntores de CC:

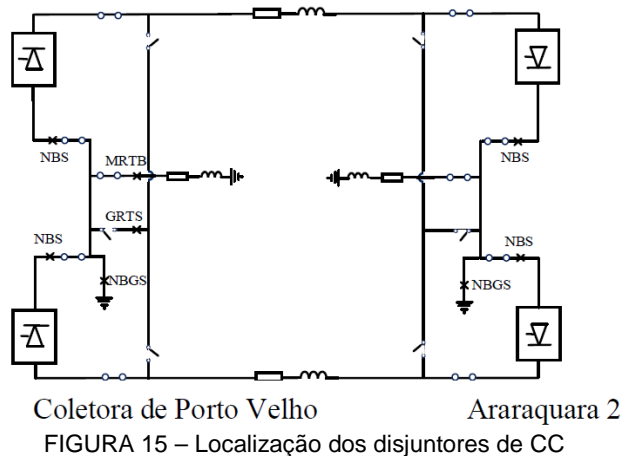


FIGURA 15 – Localização dos disjuntores de CC

As figuras a seguir ilustram aplicações dos disjuntores:



FIGURA 16 – Disjuntor com duas câmaras



FIGURA 17 – Disjuntor com quatro câmaras



FIGURA 18 – Disjuntor de CC

9.0 SISTEMA DE RESFRIAMENTO

O sistema de resfriamento das válvulas é projetado para dissipar as perdas térmicas geradas nas válvulas conversoras das estações e utiliza como líquido de arrefecimento água desionizada pura. O sistema consiste de bombas, filtros, vasos e trocadores de calor externos (radiadores) como mostrado no fluxo da figura 19.

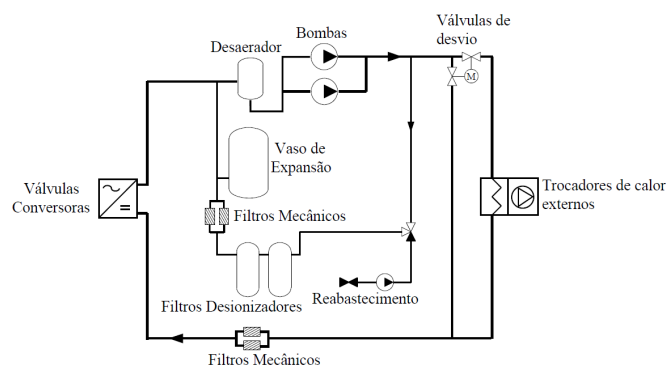


FIGURA 19 – Sistema de resfriamento das válvulas

Como o arranjo das válvulas conversoras e as condições climáticas são distintas em Araraquara e Porto Velho as características dos sistemas de resfriamento apresentam características diferentes em cada estação.

O de Porto Velho possui uma capacidade de resfriamento de 4.467 kW, vazão mínima de 93 l/s, temperatura máxima de admissão nas válvulas de 49,8 °C, temperatura máxima de retorno das válvulas de 64°C e com 9 radiadores externos com 5 ventiladores cada. Em Araraquara a capacidade é de 4.181 kW, vazão mínima de 70 l/s, temperatura máxima de admissão nas válvulas 47°C, de retorno 64°C e com 6 radiadores com 5 ventiladores cada. As figuras a seguir ilustram o sistema de resfriamento:



FIGURA 20 – Sala de bombas



FIGURA 21 – Conjunto de radiadores externos

10.0 SERVIÇOS AUXILIARES

Os sistemas de serviços auxiliares de CA e CC são independentes para cada polo (quadros principais separados) e conforme definido no Edital Aneel os serviços auxiliares das estações conversoras possuem redundância de 100 % com duas fontes independentes de 13,8 kV, sendo as duas barras de 13,8 kV também independentes e compartilhadas por todos os acessantes, dois circuitos de 13,8 kV (provenientes um de cada barra) e dois transformadores abaixadores 13,8 kV-380/220 V – 1600 kVA por polo.

Em Porto Velho o suprimento em 13,8 kV é feito a partir de um transformador de 230/13,8 kV da concessionária responsável pelo módulo geral (Porto Velho Transmissora de Energia) e de um transformador de 500/13,8 kV da ETE.

Em Araraquara 2, as fontes principais em 13,8 kV de suprimento dos serviços auxiliares em corrente alternada para a ETE e para todas as demais concessionárias acessantes é provido pela concessionária responsável pelo módulo geral da subestação (Araraquara Transmissora de Energia).

Os quadros principais de CA, localizados no prédio de serviço, são compostos de duas barras para cargas essenciais que alimentam basicamente os sistemas das válvulas, transformadores conversores, sistema de incêndio, os quadros gerais de CC e o subquadro de cargas essenciais do prédio de serviço e uma para cargas não essenciais.

São quatro subquadros (2 essenciais e 2 não essenciais) sendo os subquadros do prédio de serviço atendem as cargas dos pátios, prédio de serviço e aos subquadros da casa de relés dos filtros.

Ambas as estações são dotadas de um grupo diesel gerador de emergência (GMG) 380/220 V – 670 kVA para cada polo nos quadros principais para alimentação das cargas essenciais em caso de perda das duas alimentações.

O sistema de 125 Vcc é composto por dois quadros gerais, três subquadros para cargas do polo 1, três para o polo 2, três para a casa de relés, três para o setor de neutro e interfases com o campo e dois para o pátio de 500 kV. As figuras a seguir ilustram o sistema de serviços auxiliares:



FIGURA 22 – GMG



FIGURA 23 – Quadros de CA



FIGURA 24 – Sala de baterias

11.CONCLUSÃO

As estações conversoras de Porto Velho e Araraquara foram projetadas para atendimento aos requisitos de projeto estabelecidos pela Aneel no edital do leilão de transmissão das usinas do Rio Madeira e igualmente em atendimento aos Procedimentos de Rede do ONS. O informe indica as principais diferenças entre as duas subestações. Os transformadores conversores de Porto Velho possuem três enrolamentos e foram fabricados pela ABB em Ludvika e os transformadores de Araraquara 2 possuem dois enrolamentos e foram fabricados pela ABB em Guarulhos. As válvulas de Porto Velho são do tipo quádruplas por polo e em Araraquara são do tipo duplas por polo. Todas as válvulas são abrigadas, isoladas a ar e refrigeradas a água. Os filtros de CC em ambas as subestações possuem dois ramos separados. Os filtros de CA possuem características próprias para atendimento aos requisitos de desempenho harmônico em cada localidade. Em Araraquara 2, a compensação reativa dos filtros de CA é complementada por bancos de capacitores shunt. Os para-raios são de óxido de zinco, cujo rating e localidade foram detalhadamente determinados por estudos de coordenação de isolamento, enfatizando-se aqueles localizados na sala de válvulas. Os reatores de alisamento foram instalados na barra de neutro e na entrada de cada polo. Foram aplicados disjuntores de CC para realização de operações de transferência de retorno metálico, retorno para aterro e aterramento.

12.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Edital de Leilão nº 007/2008-ANEEL – Anexo 6C-CC- Lote C-CC – Integração do Madeira;

13.0 DADOS BIOGRÁFICOS



Hugh Cameron Craig nasceu em 1945 em Sheffield, Inglaterra. Graduiu em 1968 em Engenharia Elétrica pela North Staffordshire Polytechnic. Trabalhou para GEC Switchgear Ltd. até 1976, havendo atuado em Venezuela e Colômbia. Em 1979 na Themag Engenharia trabalhou na primeira etapa de Tucuruí e a interligação do sistema de transmissão Norte-Nordeste. Trabalhou para empreiteiras na interligação do sistema interligada Norte-Sul no centro-oeste do Brasil. Atualmente como integrante da equipe de Engenharia de Proprietário da Estação Transmissora de Energia, empresa do grupo Eletrobrás Eletronorte.



Manuel José Lopez Lopez: MBA Executivo Internacional – APG AMANA (1997), Pós-Graduação na PUC –RJ (1978) – “Alta Tensão e Surtos de Manobra” e “Análise de Sistemas de Potência Via Computador”, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1976). Trabalhou na Montreal Engenharia, IESA, Monasa Consultoria e Projetos, Indústrias Hitachi, Brascep Engenharia, Eletronorte e CEB. Atualmente presta serviços de consultoria na área de transmissão de energia elétrica e participa da equipe que desempenha a função de engenharia do proprietário para a Estação Transmissora de Energia no projeto das estações conversoras do primeiro bipolo do Madeira.



Sergio de Oliveira Frontin: Mestrado em Sistemas de Potência (1971) pelo Rensselaer Polytechnic Institute – Troy – Nova York - Estados Unidos, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1969). Ex-professor da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1972 a 1977), Instituto Militar de Engenharia (1978) e Universidade Estadual do Rio de Janeiro (1980 a 1986). Trabalhou em Furnas Centrais Elétricas S.A, Itaipu Binacional, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – Cepel e Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel. Atualmente é professor colaborador da Universidade de Brasília e consultor nas áreas de Energia,

Regulação, Tecnologia da Informação e Gestão do Conhecimento.



Geraldo L. C. Nicola, engenheiro eletricitista pela Universidade de Brasília atua na Eletrobrás Eletronorte desde 1977 na área de engenharia de transmissão, subestações. Participou de projetos e implantações de vários empreendimentos em corrente alternada entre 69 e 500 kV, corrente contínua de 600 kV e compensação de reativos de transmissão.



João Neves Teixeira Filho nasceu em 1959 em Floriano, Piauí (Brasil). Graduiu-se em 1984 em Engenharia Elétrica, modalidade Eletrônica, pelo Instituto de Tecnologia de Governador Valadares, Minas Gerais, e concluiu Mestrado em Economia da Regulação e Defesa da Concorrência pela Universidade de Brasília em 2002. Tem especialização em Matemática (UniCEUB, Brasília 1987), Redes (computação) (PUC, Brasília 1998) e Análise Econômica do Setor Elétrico – Integração Energética da América Latina (UFRJ, Rio de Janeiro 2010). Atuou na

área de inspeção em fábrica para equipamentos de subestações; planejamento energético e por sete anos esteve à frente da superintendência de planejamento da expansão, todos na Eletronorte, onde trabalha desde 1986. Atualmente é Diretor Técnico da Estação Transmissora de Energia, empresa estatal do Grupo Eletrobras Eletronorte.