



**XXI SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO – IV

GRUPO DE ESTUDO DE ESTUDOS E ANÁLISE DE TÉCNICA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

**DESEMPENHO DINÂMICO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DO COMPLEXO DO RIO MADEIRA
FASE DO PROJETO BÁSICO**

Maria José C. Ximenes (*) ONS	Sergio L.A.Sardinha ONS	Antonio de P.Guarini ONS	Helio Pessoa ONS
Antonio Felipe Aquino ONS	Amelia Y.Takarata ONS	Raphael Gardos ONS	
	Arnoldo R.Saavedra DUAL	Marcio Szechetman DUAL	Paulo Fischer ABB

RESUMO

Este trabalho apresentará a conformidade do desempenho dinâmico do projeto Madeira com os requisitos técnicos requeridos na Especificação Técnica do sistema de transmissão CCAT associado as usinas do Rio Madeira.

PALAVRAS-CHAVE

Transmissão CCAT, estabilidade eletromecânica, sistema de potência

1.0 - INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Brasileiro apresenta algumas características únicas. A matriz energética é predominantemente hidráulica com grandes montantes de energia sendo transferida de plantas de geração hidráulica distantes dos maiores centros de carga, através de corredores de potência de longa distância (1000km) operando em EAT. Existem frequentes condições de operação que envolve transferência pesada de energia através dos quatro subsistemas (Norte, Nordeste, Sudeste e Sul). Os principais troncos são a interligação Norte – Nordeste 500kV (em torno de 4000MW), a interligação Sul – Sudeste 500 kV (em torno de 9000MW) e a usina de Itaipu associada a um sistema de transmissão composto por um tronco de 765kV (6300MW) e um elo de corrente contínua (6300MW).

Como consequencia do esgotamento do potencial hidráulico das bacias do Sul e Sudeste, os rios da região Amazônica serão objeto de novos aproveitamentos hidroelétricos para a geração de energia elétrica.

O primeiro destes projetos, previsto para entrar em operação em 2012, é o Complexo de Geração do Rio Madeira (usinas de Jirau e Santo Antonio). Estas usinas utilizam turbinas bulbo, de baixo impacto ambiental, e parte de sua energia será direcionada à região Sudeste (o maior centro de carga brasileiro) através de um sistema de corrente contínua em alta tensão composto de dois bipolos de +/-600kV – 3150MW e, parte à alimentação da região local – sistema Acre – Rondônia 230 kV, por meio de um sistema Capacitor Commutated Converter Back-to-Back – CCC – (2x 400MW).

O back-to-back e o primeiro bipolo estão com seu início de operação previsto respectivamente para março e outubro do ano 2012 e o segundo bipolo para março do ano 2013. Também está prevista transformação 500/440 kV, na subestação de Araraquara, 3x1250 MVA, para abril de 2012, para o recebimento da potência dos elos de corrente contínua.

A Figura 1 apresenta o sistema de transmissão que interliga as usinas do rio Madeira ao sistema interligado – SIN, através do elo de corrente contínua, e ao sistema de transmissão de 230 kV dos estados do Acre e Rondônia através do back – to –back.

(*) Rua da Quitanda, n° 196- 20º andar – Centro – Rio de Janeiro – CEP 20091-005 RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2203-9691 – Email: mjose@ons.org.br

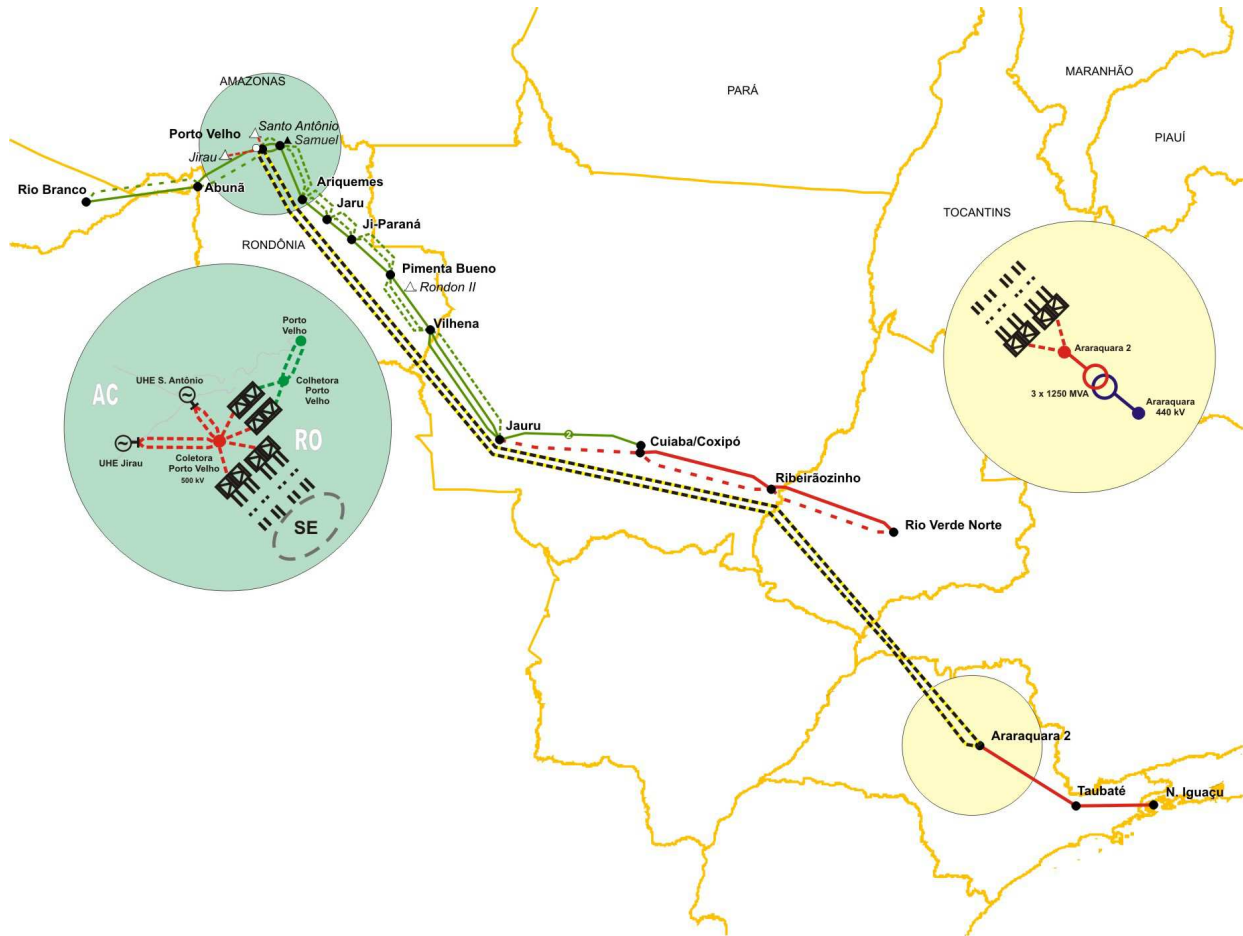


FIGURA 1 - Interligação das usinas do rio Madeira com o SIN

O sistema receptor no Sudeste será reforçado, a partir da subestação de Araraquara, por um conjunto de linhas de transmissão composto da LT em 500 kV Araraquara 2 – Taubaté C1, 330 km, prevista para dezembro de 2012, LT 500 kV Taubaté – Nova Iguaçu (novo terminal no Rio de Janeiro) C1, 230 km, prevista para 2013, LT em 500 kV Araraquara 2 – Campinas C2, 170 km, prevista para o ano 2014, LT em 500 kV Araraquara 2 – Taubaté C2, 330 km, prevista para o ano 2015. Ressalta-se, entretanto que estes reforços previstos pela EPE estão condicionados ao cronograma de entrada das usinas do rio Madeira.

2.0 - PRINCIPAIS REQUISITOS TÉCNICOS DO LEILÃO - ELO CCAT E BACK – TO - BACK

O anexo técnico do edital do leilão 007/2008 descreve os requisitos técnicos que devem ser atendidos pela transmissora no dimensionamento do elo de CCAT. A seguir estão listados alguns destes requisitos:

2.1 Valores Nominais

2.1.1 Frequência no lado CA

- a. Frequência nominal: 60 Hz
- b. Faixa de frequência de regime permanente: 60 Hz +/-0.5 Hz
- c. Faixa de variação transitória de frequência:
56.0 Hz to 59.5 Hz até 20 segundos;
60.5 Hz to 66.0 Hz até 20 segundos.

2.1.2 Tensão no lado CA

A tensão nominal do lado CA do elo de CC, nas subestações Coletora Porto Velho e Araraquara 2, é de 500 kV. Já nos terminais dos equipamentos back-to-back, nas subestações Coletora Porto Velho, são de 500 kV e 230 kV. No

entanto, o elo CC e o back –to –back devem ser dimensionados para operar continuamente em toda faixa de tensão, conforme descrito:

- Faixa de tensão do 500 kV: 475 kV até 550 kV;
- Faixa de tensão do 230 kV: 207 kV até 242 kV.

2.2 Requisitos relacionados ao estudo dinâmico

Os principais requisitos do elo CC e do back – to – back, contidos no anexo técnico do leilão referido, são sintetizados a seguir:

- Operar sem restrições, dentro da faixa operativa de potência especificada para as configurações n e n-1 dos sistemas CA adjacentes, sem provocar oscilações perturbadoras de potência, tensão ou frequência.
- Auxiliar a rede básica no controle de oscilações eletromecânicas, por meio da modulação da potência e/ou reativos.
- Não submeter à rede básica a qualquer instabilidade de tensão, em qualquer condição operativa do elo CC e do back –to –back, seja em condição normal, seja em critério (n-1) da rede CA, inclusive durante afundamento de tensão provocado por faltas.
- Atender a tensão decorrente de aplicação de falta no sistema CA, na primeira oscilação após a remoção da mesma, de no mínimo de 0,80 pu.
- O sistema de controle deve possibilitar o controle da frequência por meio da variação da corrente ou potência ativa, a escolha do operador, no lado retificador (Coletora Porto Velho), para fazer frente a perdas de geração ou a rejeição de carga no elo CCAT;
- O sistema de controle deve possibilitar a modulação da potência ativa ou reativa, separada ou simultaneamente, para estabilização do sistema CA, o que reduz instabilidades angulares;
- O sistema de controle deve possibilitar a redução da potência ou da corrente para controlar contingências no sistema CA (run back limiter), a fim de evitar instabilidade de tensão no sistema CA e falhas de comutação no inversor. A informação de abertura das linhas de transmissão que partem da subestação inversora deverá ser processada pelo controle mestre para definir o limite máximo admissível pela rede CA, de injeção de potência pelo elo CC;

3.0 - CENÁRIOS DE INTERCÂMBIOS E GERAÇÃO

O perfil de geração das usinas de Jirau e Santo Antônio, devido a inexistência de reservatório de regularização, acompanham o perfil das vazões naturais afluentes, com gerações mais altas no período entre dezembro e junho e uma menor geração de energia nos meses de julho a novembro, com o mínimo observado no mês de setembro. A região Norte/Tucuruí e a usina de Samuel apresentam a mesma sazonalidade de aflúências que as usinas do rio Madeira. Na região Sudeste é onde se encontram os maiores reservatórios do sistema interligado.

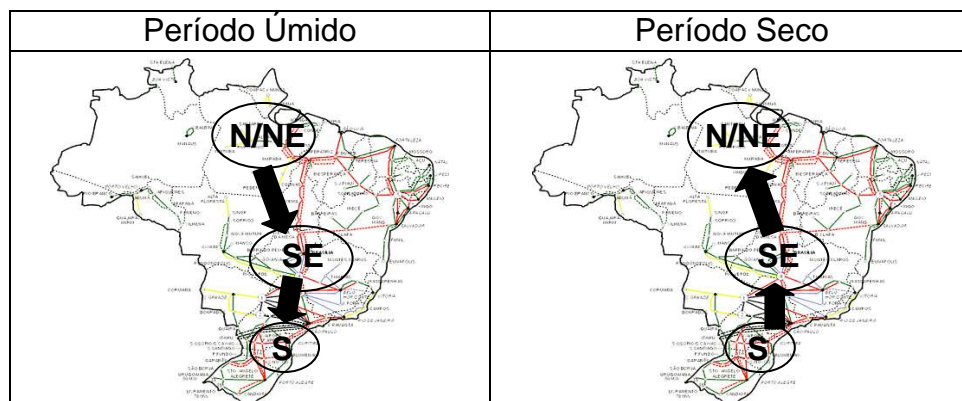


FIGURA 2 – Cenários de Intercâmbios

Portanto, as análises de estabilidade estão baseadas nos dois cenários, ver Figura 2, acima:

- a. Cenário A: representa o período úmido da região norte (1º semestre) logo a região norte estará exportando para as regiões sudeste e sul;
- b. Cenário B: representa o período seco da região norte (2º semestre) e de chuvas na região sul logo, as regiões sul e sudeste estarão exportando para as regiões norte e nordeste.

4.0 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE – FREQUENCIA FUNDAMENTAL

Foram estudados os fenômenos dinâmicos resultante da integração as usinas hidrelétricas do rio Madeira por meio do sistema de transmissão em corrente contínua ao sistema interligado Brasileiro - SIN. Como este sistema de transmissão irá se interligar ao SIN em diferentes regiões distantes entre si, i.e., no Acre/Rondônia através do back - back CCC e em São Paulo através do elo de CCAT, o estudo contemplou também a interação entre as diferentes partes do sistema.

O estudo verificou se um fenômeno dinâmico, balanços eletro-mecânicos ou oscilações do rotor em máquinas síncronas, iniciado por um distúrbio típico no sistema resultaria em um comportamento estável, em que as oscilações do sistema sejam devidamente amortecidas.

Sabe-se que a condição estável do sistema de potência implica que este apresente um bom equilíbrio de potência reativa e ativa, localmente ou globalmente, caso contrário ocorreriam instabilidades. Este desequilíbrio pode se desenvolver de formas diferentes e pode causar um comportamento instável, dependendo da característica da contingência e dos controles do sistema.

O problema de instabilidade de tensão está relacionado com a potência reativa e pode ser resolvido localmente, em geral, por simples ajuste dos controles do sistema de transmissão CCAT.

Foram considerados nas análises os dois cenários mencionados no item 3 que foram estressados com fluxo máximo nas interligações. No patamar de carga leve e cenário "B" obteve-se a inércia mínima da região sudeste. Já no patamar de carga pesada e cenário "A" obteve-se o maior carregamento no sistema de transmissão da região sudeste. Os cenários com inércia mínima e máxima na região sudeste apresentam, respectivamente, nível de curto-circuito - Scc de 17.000 MVA e 20.000 MVA, na subestação de Araraquara2.

Considerando que o novo sistema de transmissão CCAT é eletricamente próximo das usinas hidrelétricas no rio Madeira, e o fato de que as conversoras do back-to-back CCC conectam estas usinas a uma rede muito fraca, Porto Velho 230 kV, foram adotadas as seguintes medidas de mitigação necessárias para estabilizar as máquinas e rede durante distúrbios no sistema.

Foram previstos os seguintes controladores, ver Tabela 1:

TABELA 1 – Controladores previstos nos bipolos e back - to - back

Função	Objetivo	Ação
Frequency Control	Auxiliar os reguladores de velocidade das unidades geradoras do Madeira a minimizar as excursões de frequência provocadas por distúrbios no sistema emissor.	Modulação da potência transmitida no CCAT em função da variação de frequência na Coletora Porto Velho 500 kV.
STABSIN	Fazer o sistema de CCAT participar da regulação primária do SIN.	Modulação da potência transmitida no CCAT em função da variação de frequência em Araraquara.
STAB230	Modular a potência do back – to – back quando da abertura da interligação em 230kV do AC/RO.	Modulação da potência no back – to – back em função da variação da frequência na Coletora Porto Velho 230 kV.
Tensão CA 230 kV Coletora PV	Regular a tensão de referência na Coletora Porto Velho definida pelo operador, entre 0,95-1,05 pu.	A saída do controlador será a ordem Alpha no inversor, contanto que este parâmetro esteja dentro dos limites permitidos.
Runback	Restabelecer o equilíbrio carga-geração quando da perda de geração no complexo das usinas do rio Madeira.	Redução da potência transmitida nos bipolos (ou back-to-back se os bipolos estiverem fora de operação).
	Compatibilizar a potência no sistema de CCAT com a capacidade do sistema receptor na perda de linhas/transformadores em Araraquara.	

Esses controladores adicionais foram incorporados aos controles do sistema de transmissão no nível de cada conversora, exceto o Runback que está no Master Control.

4.1 Configuração Inicial do CCAT

Para operação inicial do back-to-back CCC, sem a presença dos elos de corrente contínua para Araraquara, as seguintes condições devem ser satisfeitas:

- É necessário que esteja em operação quatro unidades geradoras na usina de Santo Antônio;
- Que seja implementada uma malha adicional proporcional à frequência no controlador do Back-to-Back, com ganho sugerido de 1,0 pu/pu;
- Que esteja em operação uma malha adicional de controle mestre que monitore as potências dos dois back-to-back CCC, as unidades geradoras da usina e os filtros do sistema de 500 kV.

O limite de injeção de potência do back-to-back CCC em Porto Velho 230 kV em condições de carga pesada é de 600 MW. Valores acima de 600 MW poderão levar a interligação Acre – Rondônia a colapso de tensão na condição de período úmido, com cinco máquinas gerando em Samuel.

Em carga leve, o mercado do sistema Acre – Rondônia fica reduzido em cerca de 50%. Nesse caso a região Acre-Rondônia disporá de mais energia para exportação exigindo mais da interligação Acre-Rondônia. Nessa situação a máxima injeção possível de potência do back-to-back CCC é de 400 MW.

Foi observado que em todas as faltas realizadas o comportamento das tensões CA na rede de 230 kV apresenta-se amortecida, sem violação do critério de variação de tensão na primeira oscilação.

A configuração com alta hidráulicidade em Porto Velho, havendo 4-5 máquinas em Samuel em operação, foi considerada mais crítica. O desempenho da rede de Porto Velho 230 kV se apresentou mais oscilatório uma vez que o carregamento das linhas na região de Vilhena e Ariquemes seria maior.

O estudo indicou que há um baixo nível de torque sincronizante nas máquinas geradoras de Samuel devido à longa distância entre Porto Velho e Jauru, onde então o sistema de 230 kV se conectaria a um ponto mais forte da rede Brasileira, no sistema de 500 kV do SIN. Isso explica a forte tendência oscilatória das máquinas da UHE Samuel.

O controle de tensão da rede CA feita pelo conversor CCC se mostrou adequado para diminuir a tendência oscilatória das máquinas de Samuel, aumentando o grau de amortecimento dessas oscilações, ver Figura 3.

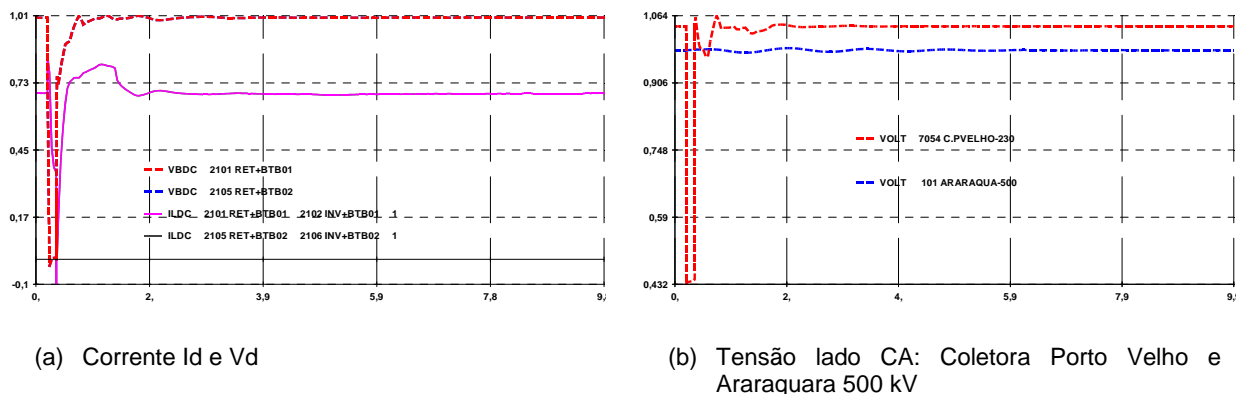


FIGURA 3 –BTB=600 MW – Carga Pesada - falta na Coletora Porto Velho 230 kV, falha de comutação com duração igual ao tempo da falta (150 ms) e abertura da LT 230 kV CPV - PV.

4.2 Configuração Completa do CCAT

Na análise da configuração completa foi considerado as usinas do Rio Madeira operando em plena carga, totalizando 88 unidades, dois elos de corrente contínua transmitindo a energia para Araraquara e dois blocos do back – to – back CCC injetando potência em Porto Velho. Desta forma, o desempenho do sistema Madeira foi testado na configuração final, usando um cenário muito crítico.

O Cenário “A” carga leve é a condição mais crítica, considerando que muitas máquinas nas usinas geradoras na região de Araraquara estariam fora de operação, bem como linhas de transmissão desligadas. Isso enfraquece a rede elétrica, tornando mais difícil a operação das conversoras em Araraquara.

A seguir os principais resultados para esta configuração:

- d. Em um cenário crítico de carga leve onde a geração das usinas do Rio Madeira ultrapassa 6000 MW e onde há baixa inércia na região sudeste, o sistema permaneceu estável para todas as contingências simuladas.
- e. Os defeitos no lado do retificador, que não provocam falha de comutação, não causam maiores distúrbios ao sistema, que se estabiliza rapidamente.
- f. Os defeitos próximos a subestação de Araraquara provocam falha de comutação no inversor. Nesse caso, houve uma maior exigência do controle de frequência dos bipolos e o sistema estabilizou-se.
- g. Quando há o bloqueio de um bloco do back-to-back CCC, ocorre a transferência de potência para o outro bloco sem problemas de estabilidade para o sistema.
- h. Quando há o bloqueio de um pólo, os outros três pólos assumem a transmissão (capacidade de sobrecarga) do primeiro sem que o sistema perca o sincronismo.
- i. O bloqueio de um pólo em Itaipu ou uma falha de comutação na estação inversora de Ibiúna não resultou em perda de estabilidade do sistema.

5.0 - CONCLUSÕES

Para operação inicial do back-to-back CCC, sem a presença dos bipolos de Corrente Contínua para Araraquara, as seguintes condições devem ser satisfeitas:

- É necessário que esteja em operação quatro unidades geradoras na usina de Santo Antônio, nesse caso somente um filtro deve estar ligado na barra coletora em 500 kV, em Porto Velho;
- Que seja implementada uma malha adicional proporcional à frequência no controlador do back-to-back, com ganho sugerido de 1,0 pu/pu;
- Que esteja em operação um sistema de controle mestre que monitore as potências dos dois back-to-back, as unidades geradoras da usina e os filtros do sistema de 500 kV;
- Não foi detectada a necessidade de compensadores síncronos em Porto Velho 230 kV para que o sistema responda adequadamente às solicitações de potência reativa durante contingências simples, N-1.

O controle de tensão da rede CA feita pelo conversor CCC se mostrou adequado para diminuir a tendência oscilatória das máquinas de Samuel, aumentando o grau de amortecimento no sistema 230 kV do Acre/Rondônia.

Na configuração completa, o Cenário “A” carga leve é a condição mais crítica, considerando que muitas máquinas nas usinas geradoras na região de Araraquara estariam fora de operação, bem como linhas de transmissão desligadas. Isso enfraquece a rede elétrica, tornando mais difícil a operação das conversoras em Araraquara. Porém o sistema se mostrou estável para todas as contingências estudadas.

As características dos controladores (*Frequency Control*, STABSIN, STAB230, Controle de Tensão CA 230 kV e *Runback*) introduzidos garantem uma operação sistêmica segura com relação tanto ao SIN como para as próprias usinas do rio Madeira.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Plano de Ampliações e Reforços- PAR 2011-2013, Volume II, Acre/Rondônia, ago2010;
- [1] Procedimentos de Rede do ONS – Módulo2;
- [3] Anexo técnico do edital do leilão 007/2008

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Maria José da C. Ximenes

Desenvolvendo estudos relacionados ao sistema de transmissão de CCAT de Itaipu na Promon Engenharia Consultoria na década de 80.

Desenvolvendo estudos relacionados ao planejamento e dimensionamento de sistemas de transmissão e estudos de longo prazo em Furnas e no Operador Independente do Sistema Brasileiro - ONS, nos últimos 20 anos.

Últimos dois anos em um grupo de trabalho para analisar o projeto básico de sistema de transmissão do Rio Madeira