

## GRUPO IV

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

#### O DESENVOLVIMENTO DE UMA LINHA DE PRODUTOS PARA ESQUEMAS TURN-KEY DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA HVDC EM $\pm 800\text{kV}$

**Andre Paulo Canelhas\*, Colin Charnock Davidson, Marco Antonio da Silva Finoti, Norman Murray MacLeod  
AREVA T&D HVDC-FACTS**

## RESUMO

Uma nova geração de equipamentos foi desenvolvida para elos HVDC em  $\pm 800\text{kV}$ . Este trabalho descreve o projeto e os ensaios dos transformadores conversores e as suas buchas de isolamento seca. As válvulas de tiristores possuem um novo design de blindagem contra corona. Uma chave rápida de by-pass é fornecida nos esquemas onde forem usadas pontes em série. Foram projetados Seccionadores de HVDC que se encontram em fase de testes de longo prazo. Foi desenvolvida uma linha nova de transdutores de corrente contínua e divisores de tensão de alta precisão. Os isoladores compostos são amplamente usados devido à sua excelente performance.

## PALAVRAS-CHAVE

HVDC, 800kV, Equipamento, Transformador, Válvula

## 1.0 - INTRODUÇÃO

Durante vários anos, a tensão CC mais usada em esquemas de longa distância em sistemas de até 3000 MW era de  $\pm 500\text{kV}$ . Contudo, o consumo de energia nas economias em rápido desenvolvimento como a Índia e a China cresce tão rapidamente que a tensão de transmissão em HVDC teve de ser reconsiderada. Para aproveitar melhor as faixas de servidão e minimizar as perdas de transmissão, as tensões de transmissão em HVDC aumentaram com rapidez recentemente, dando lugar ao surgimento da nova tecnologia de Transmissão de Corrente Contínua de Ultra-Alta Tensão (UHVDC). O meio mais econômico de transportar elevados níveis de energia de 6000 MW e até mais, em longas distâncias (tipicamente 2000 - 3000 km) dos centros distantes de geração hidrelétrica até as cidades é o uso de esquemas de transmissão HVDC em tensões contínuas de  $\pm 800\text{kV}$ .

A introdução da tecnologia UHVDC apresentou vários desafios aos projetistas de equipamentos para subestações [Ref 1], principalmente no que diz respeito às elevadas solicitações dielétricas a que as estruturas de isolamento são submetidas. Isto é particularmente importante nas regiões de altitude e/ou de altos níveis de poluição, difundindo a aplicação de isoladores de composto nas estações em UHVDC.

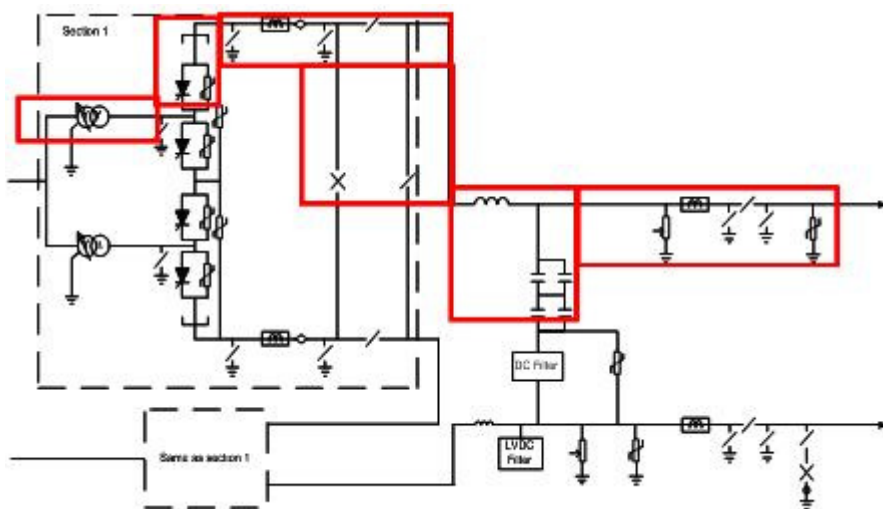


FIGURA 1 Equipamento de 800kV sujeito a novo desenvolvimento (contornado em vermelho)

A Figura 1 mostra um dos pólos do esquema de um bipolo, indicando os equipamentos envolvidos na operação em 800kV. Em cada caso, devem ser estudadas, desenvolvidas e testadas novas estruturas de isolamento, para garantir sua adequação em operações de longo prazo em tensões tão elevadas. A topologia ilustrada na Figura 1 possui duas pontes de 12 pulsos de 400kV ligadas em série por pólo, cada uma das quais requer uma chave de by-pass para curto-circuitar rapidamente a ponte em caso de falha, de maneira que a transferência de potência possa continuar com a outra ponte e apenas 50% da potência nominal do pólo seja perdida. Esta é a solução adotada nos primeiros projetos de UHVDC na China. Um método alternativo consiste no uso de uma única ponte de 800kV por pólo, desta forma evitando a complexidade de esquemas de operação com duas pontes e a necessidade de chaves de by-pass. A escolha de uma topologia pode depender da potência nominal dos esquemas e da possibilidade de usar conversores em paralelo para aumentar os níveis de potência. Nesse último caso, o uso de pontes em série e conversores em paralelo poderia ser considerado complexo demais.

As atividades de desenvolvimento para cada equipamento destacado na Figura 1 são descritas nas seções a seguir.

## 2.0 - TRANSFORMADORES CONVERSORES

Nos transformadores conversores, os princípios básicos de projeto não mudam como resultado das maiores tensões de operação, mas das solicitações na isolação no lado das válvulas, para a ponte de tensão mais elevada, exigem muito trabalho.

Desta forma, a principal atividade de desenvolvimento está focada no projeto de uma nova bucha do lado da válvula e novo arranjo de "turret" adequados para as solicitações de CA e CC suportadas pela isolação. A isolação dentro da caixa de proteção deve receber o formato apropriado para controlar a distribuição do campo eletrostático evitando a criação de áreas de solicitações elevadas. Considerando que a distribuição do campo de CA depende da permitividade do material de isolação óleo/sólido, a distribuição do campo de CC depende da resistividade dos materiais. São necessárias medidas adicionais para controlar as correntes de fuga ao longo das superfícies isolantes, que são particularmente onerosas durante os ensaios de inversão de polaridade. São necessárias várias folhas metálicas dentro da bucha para controlar a distribuição de campo e um complicado arranjo de barreiras óleo-sólido dentro da caixa de proteção. Foi utilizado um software de análise de elementos finitos (FEA) para calcular as distribuições de campos de CA e CC dentro desta estrutura de isolação. Isto levou em conta as condições de campo estáticas e transitórias durante a carga de campo elétrico de CC e a inversão de polaridade. Para isto foi necessário desenvolver novas técnicas para manipular os grandes modelos requeridos e para resolver as complicadas distribuições de campo dominadas por cargas espaciais.

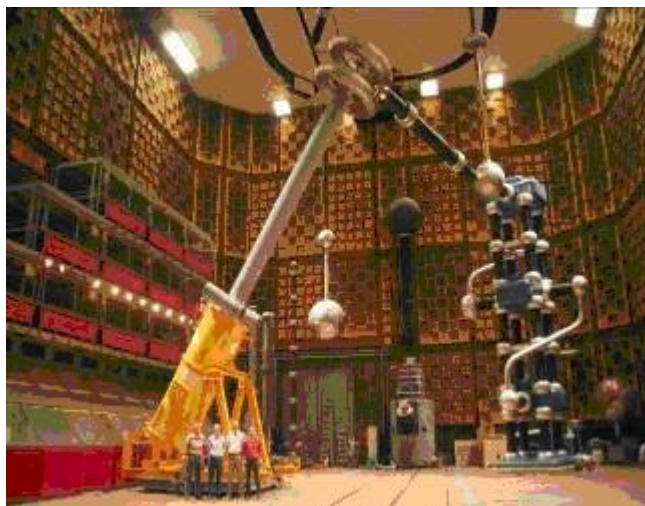


FIGURA 2 Bucha de 800kV sendo testada

A distribuição de solicitações varia ao longo da superfície e com o tempo de aplicação de uma inversão de polaridade. As solicitações podem ser muito mais elevadas em algumas regiões algum tempo após a inversão de polaridade, podendo de fato atingir um valor máximo após a segunda inversão de polaridade do que imediatamente na aplicação das solicitações de tensão.

Um arranjo de bucha e caixa de proteção foi construído e testado para validar os resultados dos cálculos dos campos e certificar-se de que o design do protótipo de bucha e caixa de proteção era adequado para usar com transformadores conversores em projetos de 800kV, como ilustra a Figura 2.

### 3.0 - VÁLVULA DE TIRISTORES

Cada nível de tiristores de uma Válvula de Tiristores de HVDC inclui seus próprios circuitos de nivelamento de tensão para todas as faixas de frequência normais. Portanto, na maioria das condições, para aumentar a capacidade de uma válvula de tiristores de 500kV para 800kV, é apenas suficiente aumentar a quantidade de níveis de tiristores conectados em série na proporção 800/500. Contudo, há certas condições onde o design da válvula não permite simplesmente ter o tamanho ajustado, sendo necessárias outras medidas. Tais questões incluem a distribuição de tensões entre níveis de tiristores conectados em série sob condições de transitórios de frente muito rápida e a capacidade dos tiristores de suportarem a corrente de energização das capacitâncias parasitas no transformador conversor e nas buchas [Ref 2].

A Figura 3 mostra o circuito elétrico equivalente de uma válvula. Cada nível de tiristores inclui circuitos de nivelamento de tensão  $Z_1$  para forçar a repartição de tensões. Os circuitos de nivelamento de tensões incluem uma combinação de circuitos resistivos simples, RC e, às vezes, circuitos capacitivos simples para lidar com diferentes regimes de frequências. A capacitância parasita entre uma camada da estrutura de válvulas e a seguinte se comporta de mesma maneira e necessita ser contada em  $Z_1$ .

Há também impedâncias parasitas  $Z_2$  de cada nível da válvula até a terra. Elas exercem um efeito de desequilíbrio na distribuição de tensões, fazendo com que os módulos conectados mais longe dos potenciais de terra estejam submetidos à maior sobretensão, um efeito que piora quando a estrutura da válvula ficar mais comprida. Sob condições de CC, frequência fundamental e impulsos de comutação,  $Z_2$  é muito maior do que  $Z_1$  e seus efeitos podem ser ignorados. Contudo, sob descargas atmosféricas e condições transitórias,  $Z_2$  pode se tornar relativamente baixa como resultado das capacitâncias parasitas da válvula até suas adjacências. Estas capacitâncias parasitas em relação à terra podem tornar bastante deficiente a repartição de tensões em alta frequência. No entanto, este efeito pode ser neutralizado aumentando a quantidade de capacitância niveladora não amortecida conectada sobre cada módulo, a qual se for grande o suficiente irá dominar o efeito da capacitância parasita.

- ▶ **Each thyristor level typically sees an impedance  $Z_1$  across it**
- ▶ **...and an impedance  $Z_2$  to ground.**
- ▶ **For good voltage sharing, we want**
  - **Close tolerance on all  $Z_1$**
  - **Close tolerance on all  $Z_2$**
  - **Ratio  $Z_1/Z_2$  should be small**
- ▶ **These aims are relatively easy to achieve...**
- ▶ **Except for lightning and steep-front impulse**
  - **Here, stray capacitances to ground become very important**

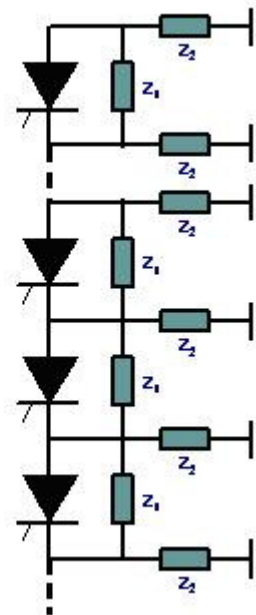


FIGURA 3 Modelo de arranjo de válvulas e capacitâncias parasitas

O design das válvulas Areva levou em conta este requisito e tomou as providências para a instalação adicional de um “Capacitor de Seção de Válvula”. Para tensões de CC na faixa de 300 - 500kV somente é necessário um Capacitor de Seção de Válvula. Um Capacitor de Seção de Válvula maior é requerido para uma única ponte de 800kV por pólo.

O conversor contém outras capacitâncias parasitas além daquelas da estrutura da válvula, sendo o transformador conversor e as suas buchas os componentes dominantes. Quando os tiristores são ligados, a descarga dessas capacitâncias parasitas nos tiristores é um aspecto importante do projeto da válvula. A energia armazenada nas capacitâncias parasitas deve ser dissipada em segurança, e a sua taxa de liberação deve ser controlada para evitar um valor excessivo de  $di/dt$  nos tiristores no momento da conexão ou uma corrente oscilatória excessiva nos tiristores. Isto é obtido mediante a instalação de um reator  $di/dt$  em cada seção de válvula. O número de reatores aumenta linearmente com a tensão de conexão (ou seja, o número de níveis), porém a energia total armazenada aumenta com o quadrado da tensão. Isso significa que, a 800kV com uma única ponte por pólo, cada reator na válvula deve dissipar 60% mais energia do que um reator numa válvula de 500kV. O reator  $di/dt$  usado no projeto da válvula da AREVA pode ter facilmente o seu tamanho ajustado para se adequar a este regime mais pesado.

Para atender os requisitos das maiores solicitações dielétricas de uma válvula de tiristores de 800kV, a Areva desenvolveu um novo design de blindagens contra corona nas partes superior e inferior da estrutura da válvula. Após muitos estudos de modelos de campos eletrostáticos [Ref 3] foi desenvolvido um novo design de blindagem contra corona que foi submetido a vários testes de CC, impulso de descarga atmosférica e impulso de comutação num laboratório independente. A Figura 4 ilustra um exemplo dos resultados dos cálculos de campo, juntamente com uma foto de um teste de impulso de comutação.

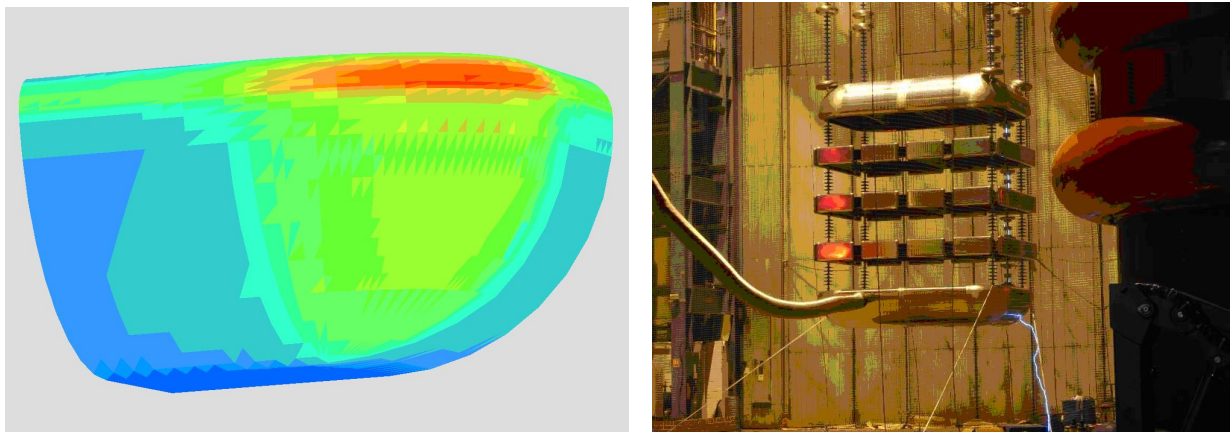


FIGURA 4 Modelo e objeto de teste de blindagem contra corona

#### 4.0 - BUCHA DE PAREDE

Está sendo construído atualmente um protótipo de bucha de parede para conexão da sala de válvulas com o pátio de manobras de CC. Esta é uma bucha de isolamento seca, que usa  $SF_6$  como meio isolante primário. Para suportar as altas solicitações de CC sob condições de poluição úmida, é usada a isolamento composta para o material da cobertura na superfície externa da bucha. Para atingir os requisitos de escoamento superficial, essa bucha deveria ter um comprimento total de aproximadamente 20m. As buchas serão submetidas a um conjunto completo de testes de tipo para comprovar a sua adequação para uso nos projetos de 800kV.

#### 5.0 - CONJUNTOS DE MANOBRA

Quando várias pontes de 12 pulsos forem conectadas em série em cada pólo, como mostra a Figura 1, é necessária uma chave rápida de by-pass para remover do serviço a ponte defeituosa, ou colocá-la novamente em serviço, sem interromper o fluxo de energia. Nos projetos UHVDC de 800kV, esta chave obviamente deve estar isolada para 800kV contra terra, tendo uma capacidade de suportar 400kV entre terminais abertos.

Durante a operação, esta chave de by-pass não precisa interromper a corrente de carga de CC. O conversor pode reduzir a zero a corrente de CC antes de emitir um comando de abertura do disjuntor. Diferentemente de um disjuntor de CA convencional (onde a velocidade de interrupção é prioritária e o fechamento pode ser uma

operação mais lenta), o requisito da chave de by-pass é o fechamento rápido, tendo menor importância a velocidade de abertura. Contudo, o projeto do disjuntor pode estar baseado substancialmente nos projetos existentes de um disjuntor de CA. A principal atividade de desenvolvimento se refere ao comportamento da isolamento interna de sólido e gás ( $\text{SF}_6$ ) sob solicitação sustentada de CC. Para proporcionar isolamento em várias partes do circuito de CC foi necessário desenvolver um novo modelo de seccionador para serviço em 800kV. Devido à altura da estrutura e sua aplicação potencial em áreas de abalos sísmicos, cada pé de sustentação do seccionador é construído com três isoladores. Em comum com outras estruturas de isolamento no circuito de CC, foi usada isolamento composta devido ao seu baixo peso e alta resistência a ambientes poluídos. Esta unidade foi desenvolvida e testada com sucesso estando agora em fase de testes de CC de longo prazo (a 855kV) no laboratório STRI na Suécia.

A Figura 5 ilustra um disjuntor de CA típico do tipo adotado para uso como chave de by-pass, e um seccionador de 800kV DC em teste no laboratório STRI.



FIGURA 5 Conjunto de manobra de CC: Chave de by-pass (esquerda) e seccionador de CC em fase de testes de longo prazo (direita)

## 6.0 - TRANSFORMADORES DE MEDIÇÃO

A AREVA está desenvolvendo uma nova linha de transformadores de medição não convencionais, especial para uso em sistemas HVDC de 800kV. O transformador de corrente de CC, que ilustra a Figura 6, consta de um cabeçote de medição conectado no barramento de CC, contendo o sensor e os circuitos eletrônicos locais. Isto converte a corrente de CC medida num sinal óptico para ser transmitido a um cubículo de interface primária no solo, mediante uma estrutura de isolamento composta. Uma fonte de raios laser é usada para energizar os circuitos eletrônicos no cabeçote e os circuitos que recebem o sinal de corrente e a conversão ao protocolo requerido. Outros cabos de fibras ópticas transmitem este sinal através de uma conexão Ethernet ao cubículo de interface secundária que recebe informações de vários transformadores de corrente no pátio de manobras de CC. A partir daqui há uma interface direta no sistema digital de controle e proteção.

Está sendo desenvolvido um novo modelo de divisor de tensão para aplicações de 800kV. Este é um divisor com compensação capacitiva, alojado dentro de uma estrutura independente com isolamento composta, como ilustra a Figura 6. O sinal de saída é levado a um cubículo de interface primária para conversão para um protocolo Ethernet. Esses sinais são enviados diretamente a um sistema digital de controle e proteção.

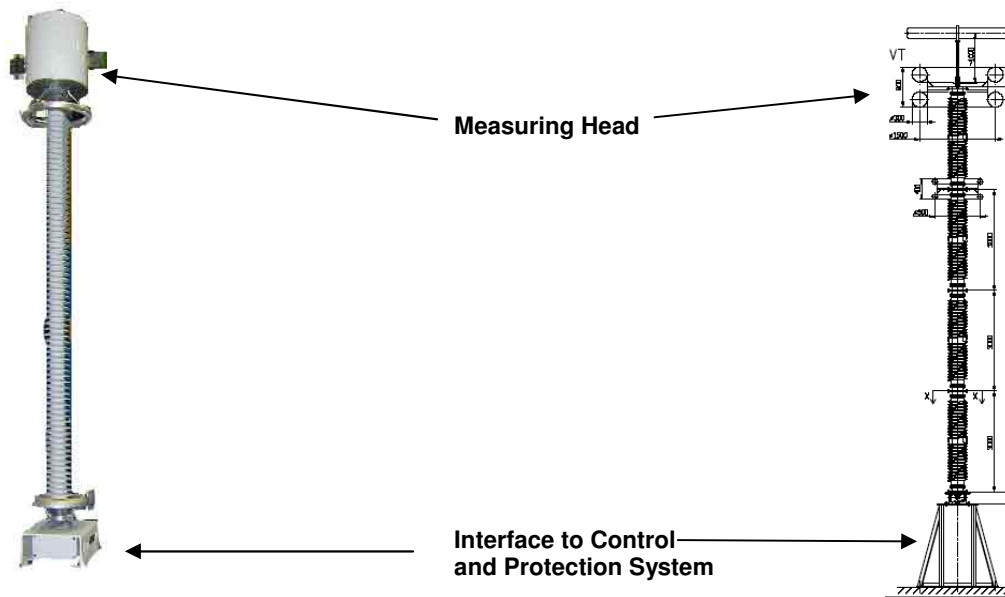


FIGURA 6 Transformador de corrente de CC (esquerda) e divisor de tensão de CC (direita)

## 7.0 - CONCLUSÃO

O aumento na faixa de tensão de operação de 500kV para 800kV é um significativo avanço na indústria do HVDC, que exigiu importantes desenvolvimentos em praticamente todos os principais equipamentos dos conversores.

No HVDC, até mais do que no HVAC, as interfaces entre equipamentos são as questões mais importantes. Por exemplo, os requisitos de precisão para os transformadores de medição de CC, vinculados ao sistema de controle e proteção, devem ser compatíveis com a necessidade de implementar uma tecnologia baseada em sensores ópticos. Da mesma forma, o projeto da isolação e as buchas de um transformador são críticos para atender os rigorosos requisitos de projeto. Como quase todos os principais equipamentos interagem entre si de alguma maneira, é necessária uma abordagem multidisciplinar, onde cada parte entenda as necessidades das outras.

Além de projetar os novos equipamentos, a fabricação e os testes dos mesmos são igualmente importantes. A AREVA está investindo pesado nessas áreas e está desenvolvendo instalações dedicadas para válvulas de tiristores, transformadores, buchas e outros equipamentos. Isto incluirá a capacidade de efetuar testes de longo prazo dos equipamentos.

A AREVA T&D empenhou todos os recursos da empresa no sucesso deste projeto de desenvolvimento, visando no futuro o fornecimento de esquemas HVDC em 800kV em regime turkey.

## 8.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) CIGRE WG 14.32. HVDC converter stations for voltages above  $\pm 600$ kV. Paris.
- (2) MACLEOD, N.M., DAVIDSON, C.C., WOODHOUSE, M.L., Design and testing of thyristor valves for 800kV HVDC projects; IEC/CIGRE UHV Symposium - CHINA.
- (3) STURGESS, J., BAKER, A., MACLEOD, N.M., PERROT, F., Development of insulation structures for the thyristor valves for use on 800kV HVDC transmission schemes; PowerCon 2009 – India.

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**André Canelhas** nasceu em São Paulo, Brasil em 1956. Graduiu-se em Engenharia Elétrica na PUC Rio de Janeiro em 1979. Através de um estágio em Furnas, teve contato cedo com grandes sistemas de energia elétrica. Depois de formado, ingressou na ABB, onde participou do projeto do sistema HVDC para Itaipu. No projeto de

Itaipu foi responsável também pelos testes e comissionamento. Em 1984 foi transferido à matriz da ABB na Suécia, gerenciando os departamentos de projeto, controle e proteção de sistemas. Foi gerente geral do projeto Kontek HVDC de interconexão por cabo entre a Dinamarca e a Alemanha, tendo por esse motivo recebido o prêmio “Gerente de Projeto do Ano – 1995”, da Academia de Projetos da Suécia.

De 1995 a 1997, André Canelhas trabalhou na equipe comercial de projetos na Malásia em consórcio com a construtora brasileira CBPO, que resultou na adjudicação da central hidrelétrica de Bakun de USD 5,5 bilhões em 1996. Atuou como gerente geral tecnicamente responsável pelo do projeto Bakun dentro do consórcio ABB-CBPO. Em 1997 voltou para o Brasil como Gerente Geral da Divisão de Projetos de Energia da ABB T&D conduzindo uma equipe para executar projetos de transmissão de energia na América Latina, responsável por USD 100 milhões em projetos. Em 2001 ingressou na VA TECH para gerenciar negócios de Projetos que cresceram rapidamente no Brasil e na América do Sul. Após a aquisição da VA TECH, ingressou na AREVA T&D em 2005, como Vice-Presidente de Linha de Produtos, com sede em Stafford, Reino Unido, responsável pelos negócios de Eletrônica de Potência, sistemas de transmissão de energia elétrica em corrente contínua (HVDC) e sistemas flexíveis de transmissão em corrente alternada (FACTS), da AREVA T&D.

André Canelhas possui trabalhos patenteados, participa ativamente no CIGRE e no IEEE sendo autor de trabalhos técnicos sobre sistemas avançados de energia elétrica.

**Colin Davidson** nasceu em Oxford, Reino Unido em 1966 e graduou-se pela Universidade de Cambridge (RU) em 1987. Em 1989 ingressou na GEC (atualmente AREVA) em Stafford, Reino Unido, onde esteve trabalhando principalmente no projeto de válvulas de tiristores para equipamentos HVDC e FACTS. Em 2006, assumiu plena responsabilidade por todas as atividades técnicas do centro de competência da AREVA em Stafford, e em 2008 tornou-se Diretor de tecnologia para todas as atividades da AREVA T&D no mundo todo para HVDC e FACTS. Ele é Fellow do IET e participou dos seguintes comitês técnicos:

- Membro do Grupo de Trabalho B4-43 do CIGRE
- Convocador da Equipe de Manutenção da norma internacional IEC60633 (Terminologia HVDC)
- Membro dos Grupos de Trabalho e Equipes de Manutenção do IEC para as normas IEC60700 (Testes de válvulas para HVDC), IEC61954 (Testes de válvulas para SVC) e IEC61803 (Determinação de Perdas em Estações Conversoras de HVDC).

**Norman MacLeod** nasceu em Helensburgh, RU em 1951 e graduou-se pela Universidade de Strathclyde, RU, (Graduação e Doutorado) em 1976. Ingressou na GEC (atualmente AREVA) em 1976 tendo trabalhado nas áreas de transformadores de força, análise de sistemas, projetos de filtros de harmônicos, projetos de sistemas SVC e projetos de sistemas HVDC. Atualmente é Diretor de Tecnologia da unidade de Stafford, responsável pela pesquisa e desenvolvimento em HVDC. É responsável pelos projetos de desenvolvimento de HVDC em 800kV e conversores VSC para HVDC. Dr. MacLeod é Fellow do IET, membro do IEEE e membro do CIGRE, participando dos seguintes grupos de trabalho.

- WG B4-45 Avaliação tecnológica de aplicações HVDC em 800kV
- WG B4-47 Questões especiais relacionadas aos filtros de harmônicos de CA para sistemas HVDC.

Dr. MacLeod é membro regular do Comitê de Estudos B4 do CIGRE no Reino Unido (HVDC e Eletrônica de Potência).

**Marco Finoti** nasceu em São Paulo, Capital, em 1949. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela FEI - Faculdade de Engenharia Industrial em São Bernardo do Campo - SP em 1975. Participou do projeto do HVDC de Itaipu como responsável pela fabricação e testes das unidades de disparo das válvulas tiristorizadas a partir de 1982, quando ingressou na ABB. É atualmente o Diretor Geral da Área de Eletrônica de Potência da Areva Transmissão & Distribuição Brasil que compreende as Unidades de Negócios HVDC e FACTS.