



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

BR/GAT/10  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - IV**

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMA DE POTÊNCIA - GAT**

**ESTUDOS DINÂMICOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO CC DAS USINAS DO RIO MADEIRA FOCANDO OS ASPECTOS MULTI-INFEED COM ITAIPU**

**Felipe A. Sobrinho (\*)**  
Eletrobras Eletronorte

**Paulo F. D. Toledo**  
ABB

**Filipe R. Lopes**  
Eletrobras Eletronorte

**Joaquim N. Rezende Jr.**  
Eletrobras Eletronorte

**Ulisses G. Galvão**  
Eletrobras Eletronorte

**RESUMO**

O efeito de um elo Corrente Contínua (CC) na operação de outro elo CC através de uma rede Corrente Alternada (CA) comum cuja distância elétrica de acoplamento entre os conversores é relativamente pequena é comumente denominada de 'DC Multi-Infeed'. Este será o caso quando o sistema de transmissão CC do Rio Madeira iniciar sua operação injetando potência na região sudeste do Sistema Elétrico Interligado Nacional Brasileiro (SIN) que já inclui o sistema de transmissão CC de Itaipu.

O sistema de transmissão CC de Itaipu quando operando na capacidade nominal injeta aproximadamente 6000 MW na subestação de Ibiúna na região sudeste do SIN. Outro montante de 6000 MW será injetado na região sudeste, na subestação de Araraquara proveniente do elo CC do Rio Madeira após a conclusão das instalações prevista para o final do ano de 2013. A subestação conversora de Araraquara está eletricamente próxima da subestação de Ibiúna, portanto é de se esperar que o efeito 'DC Multi-Infeed' entre esses dois elos CC possa ocorrer.

Esse trabalho tem como objetivo mostrar que as interações entre os elos CC do Rio Madeira e o de Itaipu suportam contingências críticas e que não há qualquer indicação de possíveis riscos de instabilidade de tensão e potência nas conversoras e que tampouco existe a possibilidade de falhas de comutação sucessivas durante a recuperação do sistema após distúrbios na rede elétrica.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sistemas HVDC, DC Multi-infeed, Itaipu, Rio Madeira, PSCAD/EMTDC

## 1.0 - INTRODUÇÃO

O efeito da operação de um Elo CC na presença de outro, através de um sistema CA convencional onde a impedância entre os dois Elos CC é pequena, é usualmente chamado de '*Multi-Infeed HVDC System*' ou Sistema CCAT com Múltiplas Alimentações. Este será o caso quando o Sistema CC do Rio Madeira iniciar sua operação injetando potência no Sistema Interligado Nacional, SIN, cuja rede abriga o Sistema CC de Itaipu, que, quando opera com potência máxima, injeta aproximadamente 6000 MW na SE Ibiúna. Após a conclusão da sua instalação no final de 2013, o Elo CC do Rio Madeira irá injetar também aproximadamente 6000 MW em Araraquara. A estação conversora de Araraquara está conectada eletricamente próxima a Ibiúna, portanto, espera-se que haja uma considerável interação entre estes dois elos CC.

Este estudo tem o objetivo de investigar se o sistema que considera a interação entre as duas estações conversoras pode suportar contingências críticas. Adicionalmente, o estudo se propõe a investigar se existe alguma indicação de possibilidade de instabilidade de tensão/potência dos conversores e risco de falhas de comutação sucessivas durante a recuperação após aplicação dos distúrbios no sistema.

Este trabalho foi realizado utilizando a ferramenta de simulação digital de sistemas elétricos de potência, o PSCAD/EMTDC. Tanto o Elo CC de Rio Madeira quanto o de Itaipu foram modelados neste simulador, incluindo os dois bipolos do Elo CC do Rio Madeira (o segundo Bipolo, cujo lote não pertence à Estação Transmissora de Energia, foi representado como cópia do Bipolo 1) e os dois Bipolos do Elo CC de Itaipu. O Back-to-Back (dois blocos CC de 400 MW que alimenta o sistema CA do Acre-Rondônia), por conveniência de simulação, não foi representado neste estudo.

## 2.0 - BASE DE DADOS E MODELAGEM DE SISTEMA

O diagrama de blocos da figura a seguir ilustra a modelagem dos Sistemas CC de Rio Madeira e Itaipu no PSCAD/EMTDC.

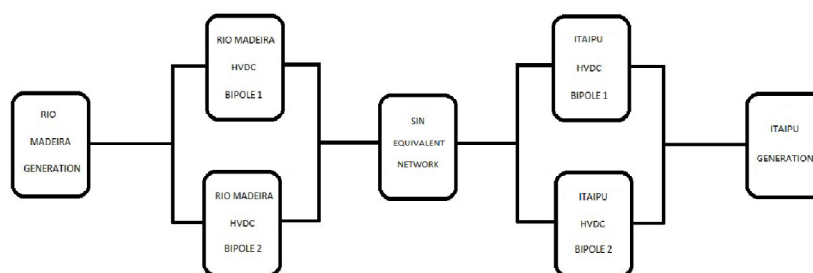
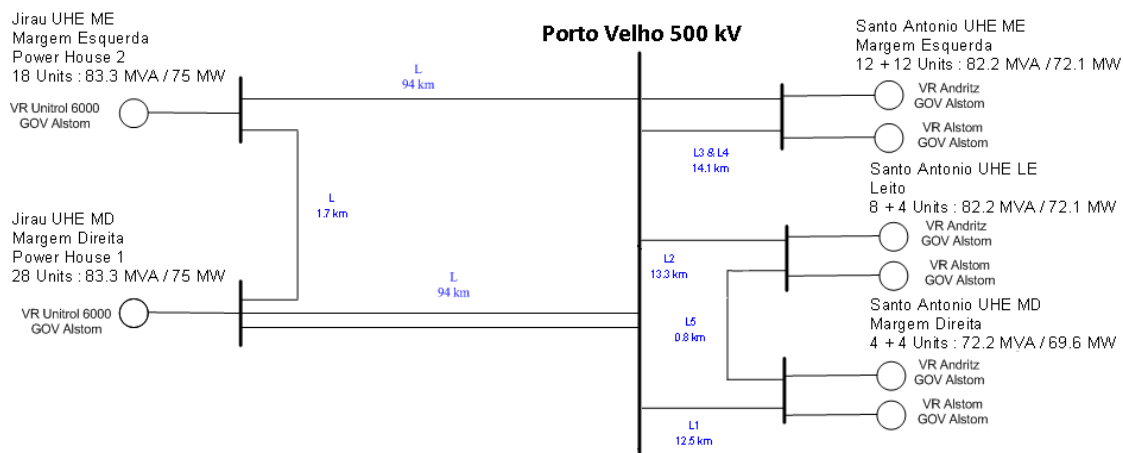


FIGURA 1 – Representação CA e CC no estudo de Multi-Infeed

### 2.1 Coletora Porto Velho 500 kV

Esta rede engloba as Usinas de Jirau e Santo Antônio. Todas as linhas que conectam as usinas à Estação Coletora 500 kV foram representadas no modelo. O modelo equivalente das máquinas de Jirau e Santo Antônio incluem representação da turbina-gerador, da excitação, do regulador de velocidade e do PSS. A Figura 2 apresenta o diagrama unifilar da rede modelada.



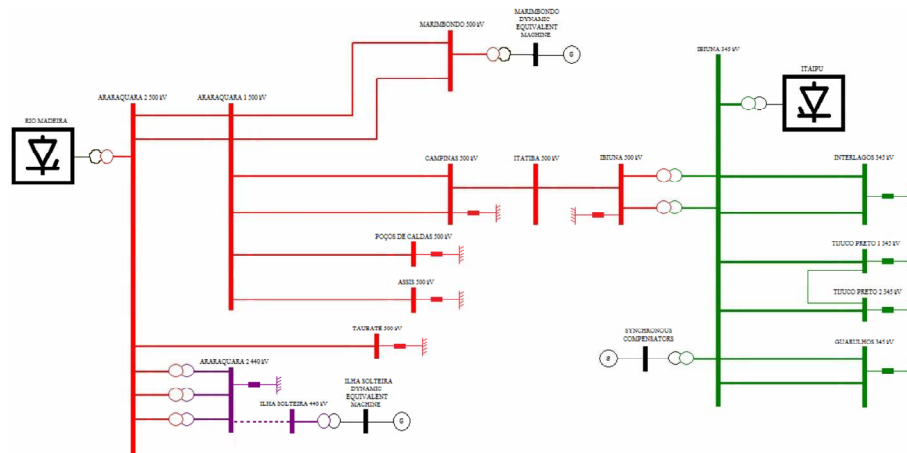


Tabela 2 – Níveis de Curto-circuito em condição de Carga Leve e Pesada

Parâmetro	CARGA LEVE		CARGA PESADA	
	Araraquara 2	Ibiúna	Araraquara 2	Ibiúna
Potência Nominal [MW]	6300	6300	6300	6300
Potência Despachada [MW]	5828	5372	5828	5555
Filtros [MVA]	3050	3050	3660	2774
SCC [MVA]	17239	19098	19152	21528
SCR	2.87	3.18	3.19	3.59
MSCR	2.35	2.52	2.89	2.98
ESCR	2.36	2.67	2.58	3.13
MESCR	1.95	2.12	2.39	2.60
ESCR (considerando a potência efetivamente despachada)	2.43	2.98	2.66	3.38
MIESCR (considerando a potência efetivamente despachada)	1.82	2.06	2.07	2.70

Comparando os parâmetros SCR e ESCR com seus correspondentes MSCR para cada estação inversora, pode-se concluir que os dois Elos CC de Rio Madeira e Itaipu estão conectados eletricamente próximos um do outro. Por exemplo, considerando a estação inversora do Rio Madeira, o valor medido de SCR = 2.87 em Araraquara é reduzido para MSCR = 2.35 considerando a influência de Itaipu. Da mesma maneira, o correspondente ESCR = 2.36 é reduzido para MESCR = 1.95. Analogamente, considerando a estação inversora de Itaipu, o SCR = 3.18 é reduzido para MSCR = 2.52 considerando a influência de Rio Madeira; o índice ESCR = 2.67 é reduzido para MESCR = 2.12. Essas considerações se referem à condição de Carga Leve, podendo ser estendido no caso de Carga Pesada, como pode ser visto na Tabela 2.

### 2.3 Modelagem dos Sistemas HVDC

#### 2.3.1 Bipolos 1 e 2 de Rio Madeira

A capacidade de transmissão do Bipolo 1, cujos equipamentos instalados foram projetados e construídos pela ABB, é 3150 MW, operando em  $\pm 600$  kV. A Tabela 3 apresenta algumas características de projeto deste Elo CC.

Tabela 3 – Principais Características dos Bipolos 1 e 2 de Rio Madeira	
Capacidade de Transmissão de Potência CC	3150 MW
Tensão CC Nominal	$\pm 600$ kV
Corrente CC Nominal	2625 A
Capacidade de Sobrecarga por 30 minutos	4190 MW
Capacidade de Sobrecarga de curta duração – 5 segundos	4725 MW
Ângulo de Disparo do Retificador, ângulo $\alpha$	15°
Ângulo de Extinção do Inversor, ângulo $\gamma$	17°

#### 2.3.2 Bipolos 1 e 2 de Itaipu

Os dois bipolos de Itaipu foram representados no PSCAD como sendo um modelo semelhante aos dos bipolos do Rio Madeira. Foram feitas modificações nos principais requisitos elétricos e modificações em alguns parâmetros no controle de corrente, limitador dinâmico da ordem de corrente, VDCOL, etc.

A Tabela 4 apresenta algumas características de projeto do Sistema CC de Itaipu.

Tabela 4 – Principais Características dos Bipolos 1 e 2 de Itaipu

Capacidade de Transmissão de Potência CC	3150 MW
Tensão CC Nominal	$\pm 600$ kV
Corrente CC Nominal	2625 A
Ângulo de Disparo do Retificador, ângulo $\alpha$	$15^\circ$
Ângulo de Extinção do Inversor, ângulo $\gamma$	$17^\circ$

### 3.0 - CONFIGURAÇÕES ESTUDADAS

O estudo considerou duas configurações de rede:

- Configuração para o ano de 2014 em condição de Carga Pesada
- Configuração para o ano de 2014 em condição de Carga Leve

Os casos simulados tiveram a seguinte configuração de despacho de potência em cada Elo CC:

- Configuração 2014 em Carga Pesada: Rio Madeira = 6300 MW e Itaipu = 5800 MW
- Configuração 2014 em Carga Leve: Rio Madeira = 6300 MW e Itaipu = 5600 MW

### 3.1 Contingências no Sistema CA estudadas

Foram simulados alguns casos de faltas CA considerando as duas condições de carga, leve e pesada. A lista de casos simulados no estudo é apresentada abaixo:

- Curtos-circuitos monofásico e trifásico na LT Araraquara 2 – Araraquara seguido de trip na linha
- Curtos-circuitos monofásico e trifásico na LT Coletora Porto Velho – Santo Antônio seguido de trip na linha
- Curtos-circuitos monofásico e trifásico na LT Ibiúna – Interlagos seguido de trip na linha
- Curtos-circuitos monofásico e trifásico em Foz do Iguaçu

### 4.0 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir, serão feitas algumas análises dos resultados obtidos nas simulações:

Todos os casos de faltas não apresentaram risco para o sistema, e a recuperação dos sistemas CC após a eliminação da falta foi considerada rápida. O curto-circuito aplicado, seja em Araraquara 2 ou em Ibiúna, causa falha de comutação em todas estações inversoras. Contudo, a recuperação tanto da falta quanto da falha de comutação se dá de maneira satisfatória. Entretanto, como pode se verificar, para o Sistema HVDC do Rio Madeira, durante a recuperação e após a potência alcançar cerca de 90% do nível da potência pré-falta, as máquinas de Jirau e Santo Antônio reagem de maneira contrária à recuperação, ocorrendo alguns afundamentos de tensão CA em Coletora Porto Velho 500 kV. Esse afundamento prolonga o tempo de recuperação em cerca de 500 ms. Este efeito já foi observado em outros estudos dinâmicos, que indicaram que modificações no regulador de tensão, principalmente em Santo Antônio, poderiam melhorar o desempenho do sistema ao reduzir o afundamento de tensão como visto neste estudo que se apresenta. A utilização do PSS – Power System Stabilizer – poderia também ajudar o desempenho de tensão na rede de 500 kV em Porto Velho.

A Figura 4 apresenta o resultado de uma simulação de falha de comutação aplicada em um dos polos do bipolo 1 da transmissão CC do Rio Madeira e como este defeito induz outra falha de comutação nos bipolos de Itaipu.

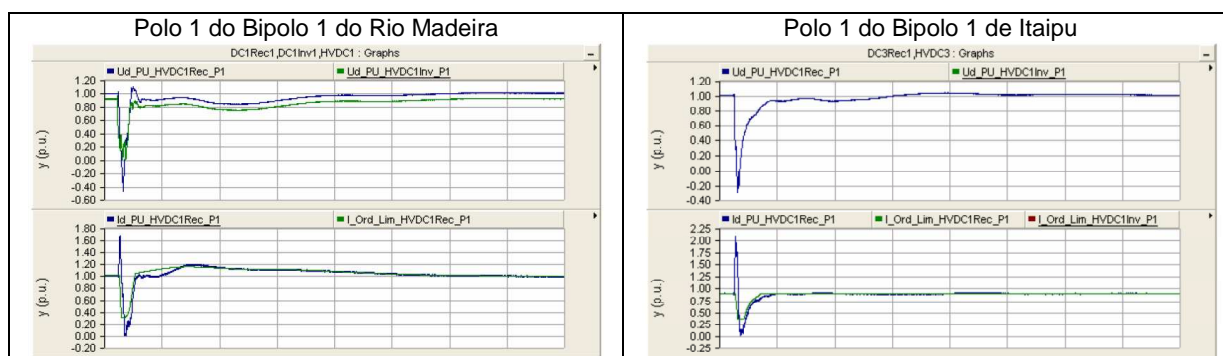


Figura 4 – Falha de Comutação aplicada no polo1 do bipolo 1 da transmissão CC do Rio Madeira

Os curtos-circuitos trifásicos e monofásicos, sejam eles em qualquer uma das linhas de transmissão conectadas, tanto a Araraquara quanto a Ibiúna, seguido de trip para remoção da falta apresentam características de recuperação similares. Isto significa que a recuperação do sistema de transmissão continua firme mesmo tendo o sistema sido enfraquecido por causa da remoção da linha CA defeituosa.

Curtos-circuitos (monofásico e trifásico) na rede CA no lado do retilicador dos Elos CC causam falha de comutação no outro Elo. Por exemplo, uma falta na rede CA de Foz do Iguaçu do sistema de transmissão HVDC de Itaipu afeta o sistema HVDC de Rio Madeira, onde também ocorre falha de comutação. Da mesma maneira, uma falta na rede CA de Porto Velho 500 kV do HVDC de Rio Madeira afeta o Elo CC de Itaipu, verificando-se também falha de comutação. Entretanto, verificou-se que a recuperação deste tipo de distúrbio é segura e rápida.

Durante faltas na linha CC, as proteções de linha iniciam diferentes tipos de procedimentos: inicialmente desenergizam o polo sob falta procurando eliminar a falta e iniciam a compensação de potência entre os polos dos bipolos para minimizar a perda de capacidade de transmissão. Quando o período de desenergização estiver completo, um pulso de restart é automaticamente disparado pelo Controle de Disparo do Conversor, visando acelerar a recuperação da transmissão CC. Quando o polo sob falta estiver reiniciando, o polo íntegro retorna à potência inicial de pré-falta. Essa sequência entre os polos de um bipolo é bem coordenada, minimizando a possibilidade da ocorrência de distúrbio no outro Bipolo.

Esse caso de falta foi testado em um dos dois polos de corrente contínua do complexo Rio Madeira. Os resultados apresentaram um bom desempenho do sistema. A partida do polo após o período de desenergização é segura, sem nenhuma indicação de falha de comutação durante o processo de recuperação. A compensação de carga aplicada no polo remanescente do bipolo reduz a perda de transmissão durante o período de falta. A influência sobre o outro bipolo durante o período transitório causado pela contingência é pequena. Adicionalmente, o sistema CC de Itaipu sofre uma 'leve' perturbação causada pela falta aplicada. A Figura 5 mostra o resultado desta simulação.

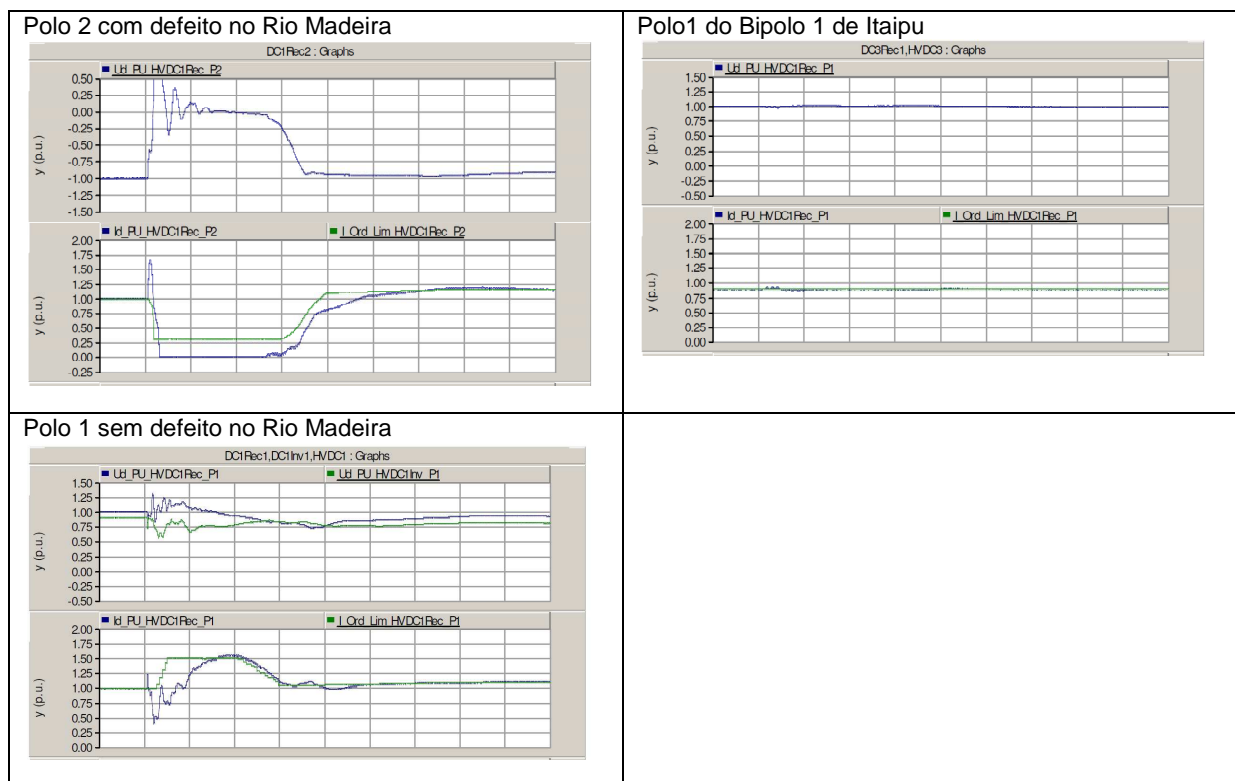


Figura 5 – Falta DC aplicada no polo 2 do bipolo 1 na transmissão CC do Rio Madeira

## 5.0 - CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que são esperadas algumas interações entre os Sistemas de Transmissão CC de Rio Madeira e Itaipu, por estarem conectados a uma rede receptora de potência elétrica CA relativamente fraca e eletricamente próximas uma da outra. Entretanto, o desempenho dinâmico observado em ambos os Elos CC

durante a recuperação do distúrbio no sistema indica que não há riscos de instabilidade de tensão ou potência nos conversores, nem risco de falhas de comutação consecutivas. Os resultados podem ser considerados satisfatórios para ambos os Elos CC do Rio Madeira e Itaipu e, por isso, não há necessidade de modificar seus controles.

Diferentes tipos de perturbações foram estudados e suas conclusões são apresentadas a seguir:

#### Curtos-Circuitos CA:

Todos os casos de falta apresentaram uma recuperação rápida e segura. Não há indícios de instabilidade de tensão e potência dos conversores e não há risco de falhas de comutação consecutivas durante a recuperação.

#### Indução de Falha de Comutação

Observou-se que uma falha de comutação em um dos polos em Araraquara ou Ibiúna também induz falha de comutação em todos os outros conversores, seja em Araraquara 2 ou Ibiúna. Entretanto também é observado que esses conversores se recuperam rapidamente e de maneira segura, sem riscos de falhas de comutação consecutivas.

#### Falta aplicada na Linha CC em um dos Polos do Rio Madeira

Os resultados apresentaram um bom desempenho do sistema. Depois da aplicação da falta em um dos polos do bipolo, a partida do mesmo após o período de desenergização é segura, sem qualquer indicação de falha de comutação durante a recuperação. A compensação da carga aplicada no polo íntegro do bipolo reduz a perda de transmissão durante o período de falta. O outro bipolo do Rio Madeira sofre uma leve influência durante o período de transitórios causado pela perturbação. Ademais, o Elo CC de Itaipu sofre pequenas perturbações causadas pela aplicação da referida falta em um dos polos do Sistema HVDC do Rio Madeira.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] P.F. de Toledo, B. Bernt Bergdahl, G. Asplund, "Multiple Infeed Short Circuit Ratio – Aspects Related to Multiple HVDC into One AC Network", IEEE/PES Dalian 2005 Conference, China

[2] Cigre working group WG B4.41, Systems with Multiple DC Infeed

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Felipe Alves Sobrinho** Formado em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (2004). Trabalhou na Marte Engenharia e, atualmente, trabalha na área de planejamento de sistemas de transmissão na Eletrobras Eletronorte. Participou de diversos estudos do projeto básico do Back-to-Back de Porto Velho e do Bipolo 1 entre Porto Velho e Araraquara.

**Paulo Fischer de Toledo** formado como Engenheiro Elétrico pela Faculdade de Engenharia Mauá em 1978, Licenciatura e Ph.D. pelo Royal Institute of Technology (KTH), Estocolmo, Suécia em 2003 e 2007, respectivamente. Tem trabalhado na área de transmissão de energia elétrica associado a sistemas de Corrente Contínua desde 1980. Ele é Engenheiro da ABB – Asea Brown Boveri, e trabalhou em vários departamentos técnicos dentro da empresa. Responsável pelo projeto e solução sistêmica do projeto Rio Madeira, lotes A e C.

**Filipe Rodrigues Lopes** nasceu no Rio de Janeiro, Brasil, em 1983. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2006. Trabalha desde 2007 na Eletrobras Eletronorte como Engenheiro de Operação desenvolvendo estudos elétricos nas áreas de Fluxo de Potência, Transitórios Eletromagnéticos e Transitórios Eletromecânicos.

**Joaquim Neto de Rezende Jr.** nasceu em Araguari, Minas Gerais, Brasil, em 1963. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia em 1988. Mestrado em

sistemas de potencia pela Universidade Brasília em 1999. Trabalha desde 1989 na Eletrobrás Eletronorte como Engenheiro de Operação desenvolvendo estudos de proteção e automação.

**Ulisses Gomes Galvão** nasceu em Anápolis, Goiás, Brasil, em 1962. Graduiu-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás em 1988. Especialização em proteções digitais para sistemas elétricos pela Universidade Federal de Brasília em 1999. Especialização em proteção de sistemas elétricos pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) em 2003. Trabalha desde 1989 na Eletrobrás Eletronorte como Engenheiro de Operação desenvolvendo estudos de proteção e automação.