



**XXIII SNPTTE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GAT/02
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - IV

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

EXPERIÊNCIA NA MODELAGEM DE GRANDE REDE DE TRANSMISSÃO EM ESTUDOS DE INSERÇÃO DE ELOS HVDC ± 800 KV

João Henrique M. Almeida (*)

Alexandre de M. Silva

Dourival de S. Carvalho Jr.

José Antônio D. S. Cardoso

Tiago C. Rizzotto

EPE

RESUMO

A proposição deste trabalho é a verificação dos elementos de rede minimamente necessários para os estudos de detalhamento de um elo CCAT. Nele são apresentadas as soluções para viabilizar a modelagem e obtenção de um equivalente de rede, buscando possíveis simplificações. O trabalho tem como partida a base de dados utilizada para a realização dos estudos do Elo de Corrente Contínua ± 800 kV Xingu - Terminal Rio, e apresenta uma rede reduzida com a qual foram obtidos os resultados originais.

PALAVRAS-CHAVE

Modelagem de Rede, Elos CCAT, Equivalentes de Rede, Transitórios, *Multi-Infeed*

1.0 - INTRODUÇÃO

A rede de transmissão dos estudos de detalhamento do elo de Corrente Contínua ± 800 kV Xingu - Terminal Rio [1] é composta por uma extensa malha da rede básica da região Sul-Sudeste, e também da região Norte do Sistema Interligado Nacional (SIN). Em relação à região Sudeste, a rede efetivamente representada (retida) abrange uma área que envolve as conversoras dos quatro bipolos de ± 600 kV (dois de Porto Velho que chegam a Araraquara 2 e dois de Itaipu que chegam a Ibiúna), já existentes, e a dos dois bipolos de ± 800 kV planejados, relativos à usina de Belo Monte. A rede retida na região Norte contempla as regiões próximas à subestação de Xingu, como por exemplo, as usinas de Belo Monte e Tucuruí.

Os estudos de detalhamento do Elo CCAT ± 800 kV Xingu –Terminal Rio (Bipolo 2) foi composto por um conjunto de estudos, como por exemplo os estudos de transitórios eletromagnéticos, estudos de dinâmica, os estudos de *multi-infeed*, dentre outros.

Os estudos de transitórios eletromagnéticos são realizados com auxílio de ferramentas de simulação, que permite análises dos fenômenos no domínio do tempo ou pela resposta em frequência de seus componentes. A representação da rede simulada possui natural complexidade, devido ao nível de detalhamento dos equipamentos, que acabam refletindo em certo custo computacional, mesmo para os processadores atuais. Considerando a extensão requerida da rede modelada, além dos sistemas de controle dos elos CCAT, é recomendado que a rede equivalente seja a menor possível, tanto para simplificação da modelagem como para melhoria de desempenho do processamento.

Já os estudos de dinâmica necessitam da modelagem das máquinas presentes na rede retida, bem como dos reguladores de tensão e estabilizadores de potência, para adequada simulação do fenômeno.

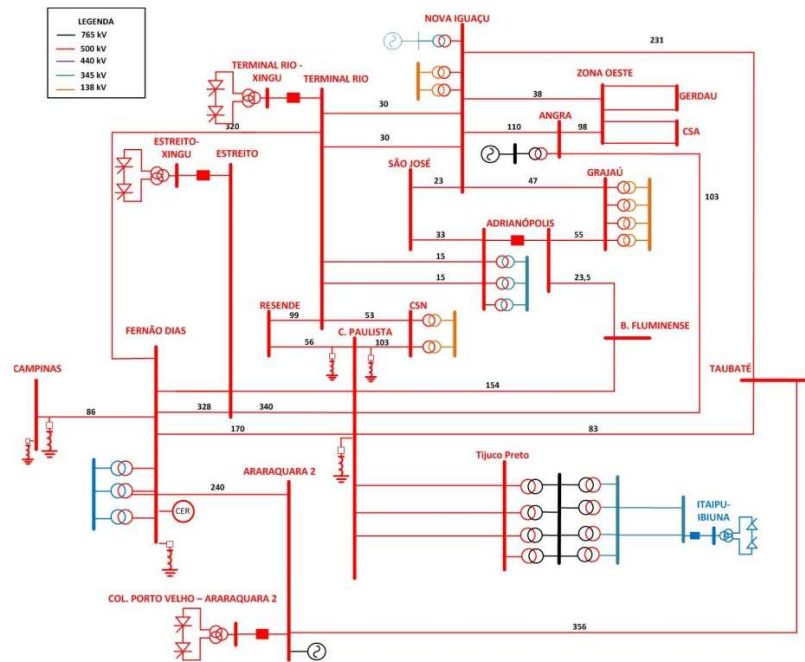


FIGURA 2 – Rede Proposta para região Sul-Sudeste

2.1 Equivalente de Redes

O equivalente de rede foi calculado através do software ANAFAS, desenvolvido pelo CEPEL. Utilizou-se primeiramente uma impedância de corte que revelasse o menor número de elementos possível. Verificou-se, entretanto, que mesmo com valores relativamente baixos de impedância de corte, o número de elementos equivalentes é elevado, resultando ainda em erros percentuais elevados nos níveis de curto circuito.

Procurou-se reduzir ao máximo a rede de equivalentes de modo a preservar um erro mínimo definido para cada conjunto de barras. De acordo com a relevância de cada região para os estudos realizados nas conversoras foram definidas as tolerâncias admissíveis conforme tabela a seguir:

Tabela 1 – Erros máximos admissíveis dos níveis de curto circuito para geração do equivalente de redes

Vizinhança	Erro (%)
0	7
1	10
2	13

As barras das conversoras são consideradas como vizinhança 0, é esperada que as piores solicitações ocorram devido às faltas nas mesmas, portanto a tolerância de erro é reduzida. São consideradas barras de vizinhança 1 as adjacentes às conversoras, as demais barras foram classificadas como de vizinhança 2. Os níveis de erro admissíveis para rede proposta foram reduzidos em relação ao trabalho original pelo fato das barras fronteira estarem mais próximas da barra de Terminal Rio.

Partindo de uma impedância de corte de elevado valor percentual, obteve-se um expressivo número de elementos equivalentes. Em busca da redução do número de elementos, foi adotada a estratégia de monitoração dos níveis de curto-circuito em todas as barras da rede retida. À medida que os elementos equivalentes foram retirados, foi mensurado o impacto da alteração em toda rede, impacto esse, determinante ou não na eliminação do elemento. Desta forma, obteve-se um resultado satisfatório do número elementos, com os níveis de erros dentro da faixa desejada para cada região da rede retida. Esse método foi utilizado tanto na concepção da Rede Original quanto na Rede Proposta. A tabela 2 apresenta os dados relativos aos equivalentes gerados em ambas.

Tabela 2 - Número de Impedâncias Equivalentes

Equivalentes	Rede Proposta		Rede Original	
	ANAFAS (Inicial)	Após redução	ANAFAS (Inicial)	Após redução
Total de Impedâncias Próprias	29	22	41	29
Total de Impedâncias de Transferência	132	23	163	38
Total de Equivalentes	161	45	204	67

Pode-se notar que em ambos os casos o número de equivalentes inicial é relativamente alto. Para rede proposta, após as eliminações de elementos equivalentes, obteve-se uma redução de aproximadamente 72% do número de elementos totais.

Comparando a rede Original com a Proposta, nota-se que após as reduções em ambas, a rede Original tem aproximadamente 50% de elementos a mais do que a Proposta. Dessa forma a inserção dos dados no programa PSCAD, utilizado nas simulações, bem como os ajustes para o acerto do ponto operação se tornam mais simples.

2.2 Modelagem

As informações utilizadas para modelagem da rede retida são as mesmas dos estudos de detalhamento do Bipolo 2. As adaptações feitas tiveram como objetivo a redução da rede original da região Sul-Sudeste, conforme explicitado anteriormente. Para região Norte-Nordeste não houve alterações pelo fato da mesma se enquadrar dentro dos critérios mínimos usualmente estabelecidos para os estudos de transitórios eletromagnéticos. Detalhes dos dados utilizados como parâmetros das linhas de transmissão, dos transformadores, reatores, conversoras, etc., estão explícitos em [1].

A tabela 3 apresenta os valores comparativos dos níveis curto circuito monofásico e trifásico nas principais barras da região sul-sudeste:

Tabela 3 – Comparação entre os níveis de curto circuito ANAFAS e PSCAD (kA)

Barra	Curto	ANAFAS	PSCAD	Erro
Ibiuna 345 kV	1φ	36,82	35,40	-4%
	3φ	36,35	34,86	-4%
Terminal Rio 500 kV	1φ	18,82	18,77	0%
	3φ	19,74	18,94	-4%
Fernão Dias 500 kV	1φ	36,28	34,81	-4%
	3φ	24,44	23,45	-4%
Nova Iguaçu 500 kV	1φ	20,08	18,95	-4%
	3φ	19,56	19,49	-4%
Estreito 500 kV	1φ	19,94	19,83	-1%
	3φ	25,82	24,03	-1%
Araraquara 500 kV	1φ	16,55	16,01	-1%
	3φ	25,13	24,35	-1%

Os valores de curto circuito encontrados na modelagem feita no PSCAD ficaram bastante aderentes ao caso base do ANAFAS. Ressalta-se que ainda pequeno o erro, a rede de uma forma geral apresentou níveis de curto inferiores ao caso base, o que torna o modelo um pouco mais conservativo. Os ajustes de tensão nas barras e fluxo de potência nas linhas de transmissão ficaram bem aderentes ao caso base do ANAREDE, validando assim a modelagem para verificação das contingências sob o aspecto de transitórios eletromagnéticos.

Para os estudos de dinâmica, foram adicionados ainda ao PSCAD os modelos das máquinas síncronas contidas à rede retida, bem como os controles das mesmas. Já para os estudos de *multi-infeed* foram inseridos os modelos e controles dos elos HVDC ± 600 kV de Itaipu e do Madeira.

3.0 - RESULTADOS

Uma vez validado o modelo, foram selecionados as contingências de maior relevância da rede Sul-Sudeste para os estudos de transitórios eletromagnéticos, dinâmica e *multi-infeed*. Os resultados simulados a partir da rede Proposta foram comparados com os da rede Original, e são apresentados nos itens a seguir.

3.1 Estudos de Transitórios

Os estudos de transitórios foram feitos a partir de simulações no software PSCAD. Ressalta-se que o modelo, bem como configurações dos elos de corrente contínua utilizados para os dois bipolos de Belo Monte foram os mesmos tanto para rede Original quanto para a Rede proposta.

Foram simulados curtos circuitos francos trifásicos e monofásicos para a terra com duração de 100 ms. A tabela 4 apresenta ilustra os resultados encontrados.

Tabela 4 – Comparação da sobretensões resultantes entre a rede Proposta e rede Original

Contigência	Sobretensão Resultante (pu) na barra			
	T. Rio 500 kV (1,07 pré)		F. Dias 500 kV (1,03 pré)	
	Rede original	Rede Proposta	Rede original	Rede Proposta
Curto 1F T. Rio	1,32	1,39	1,12	1,18
Curto 3F T.I Rio	1,48	1,51	1,12	1,33
Curto 1F F.Dias	1,26	1,39	1,27	1,18
Curto 3F F.Dias	1,34	1,49	1,28	1,23

Observa-se que os resultados simulados com a rede Proposta ficaram bastante aderentes aos resultados da rede Original. As sobretensão na Barra Terminal Rio devido ao curto circuito na mesma foram 2% superior para curto trifásico e 5% superior para curto monofásico na rede Proposta. De uma forma geral, os valores de sobretensões obtidos com a rede Proposta foram semelhante aos da rede Original.

3.2 Estudos de Dinâmica

A partir do caso do modelo proposto para transitórios eletromagnéticos foram inseridos os modelos das máquinas de Belo Monte, Tucuruí, Angra 1 e dois compensadores síncronos de Grajaú. Foram simulados curtos-circuitos monofásico e trifásico na SE Terminal Rio, área de interesse, e Fernão Dias, subestação próxima às conversoras de Estreito e Terminal Rio.

Os principais resultados referentes ao tempo de recuperação da potência ativa do Bipolo 2 são apresentados na tabela 5. A figura 3 apresenta as curvas de recuperação desse bipolo para o curto monofásico no Terminal Rio, confrontando a rede Original com a rede Proposta.

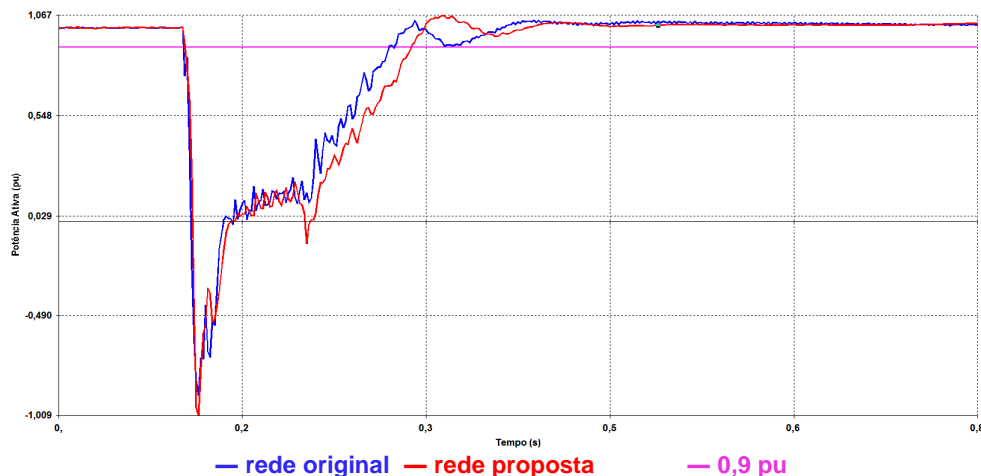


Figura 3 - Potência ativa do bipolo 2. Falta monofásica em T. Rio com abertura da LT 500 kV T. Rio - Nova Iguaçu.

A figura 4 apresenta a comparação entre os perfis de tensão para a mesma contingência, na rede original e na rede proposta.

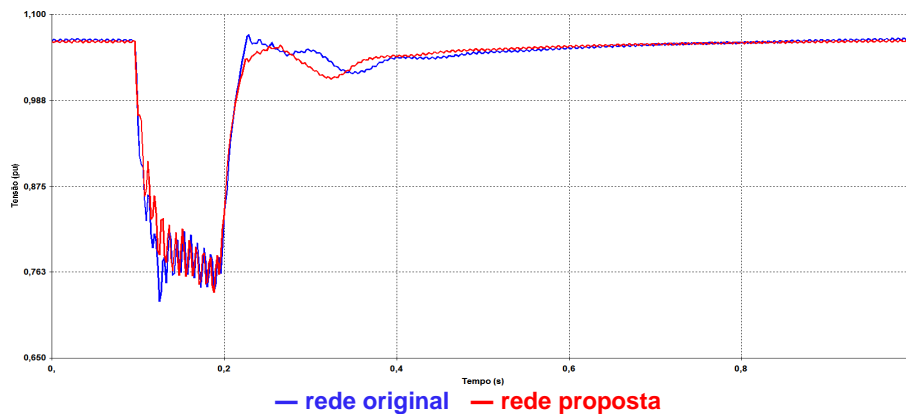


Figura 4 – Tensão na SE Terminal Rio 500 kV. Falta monofásica no Terminal Rio com abertura da LT 500 kV Terminal Rio-Nova Iguaçu.

Tabela 5 – Tempo de Recuperação da potência do Bipolo 2

Contigência	Rede original	Rede Proposta
Curto 1F T. Rio	96 ms	107 ms
Curto 3F T.I Rio	142 ms	144 ms
Curto 1F F.Dias	75 ms	77 ms
Curto 3F F.Dias	143 ms	150 ms

Observa-se que o Bipolo 2 apresentou um tempo de recuperação aceitável nas duas redes estudadas, sendo que no pior desempenho, curto monofásico no Terminal Rio, o elo CCAT de Xingu-T.Rio foi 11 ms (11,5%) mais lento na rede proposta.

O perfil de tensão nas emergências estudadas foi semelhante nas duas redes. Para falta remota, Fernão Dias, observou-se que as tensões na rede original amorteceram-se mais rápido e em um nível mais próximo ao de regime. Já para faltas no Terminal Rio as tensões se estabilizaram em valores muito próximos, enquanto que o amortecimento foi mais rápido na rede original.

Faltas na SE Fernão Dias tiveram impacto muito semelhante nas conversoras de Estreito e Terminal Rio, ou seja, a rede proposta foi capaz de reproduzir o mesmo desempenho para faltas remotas às conversoras.

3.3 Estudos de *multi-infeed*

Os estudos de *multi-infeed* adotaram como premissa eventos que situados num intervalo de tempo inferior a 200 ms, razão pela qual não houve modelagem dinâmica das máquinas representadas nos equivalente de sistema.

As figuras a seguir, ilustram o perfil de tensão nos barramentos das conversoras dos Elos CCAT F. do Iguaçu – Ibiúna, Coletora Porto Velho – Araraquara 2, Xingu – Estreito e Xingu – Terminal Rio para um defeito trifásico aplicado no barramento de 500 kV da subestação Terminal Rio.

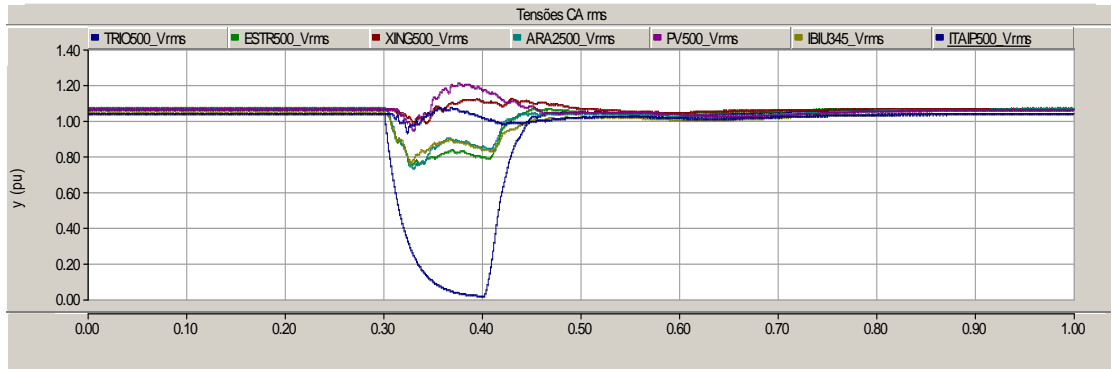


FIGURA 5 – Perfil de tensão nas conversoras na rede Original, para curto trifásico em T. Rio.

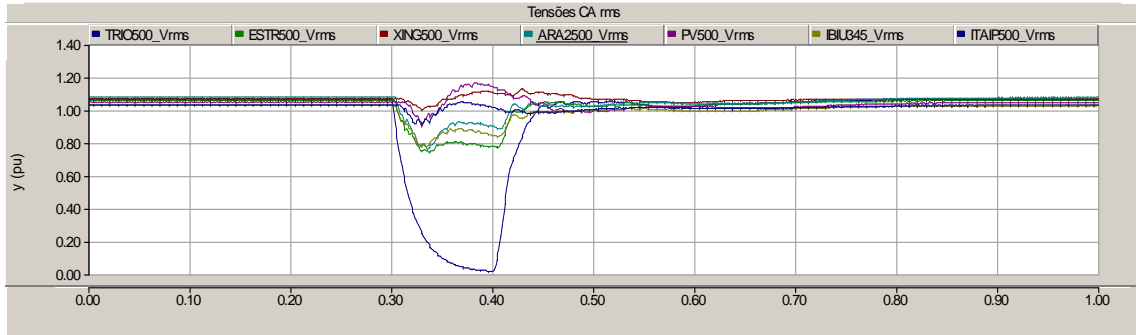


FIGURA 6 – Perfil de tensão nas conversoras na rede Proposta, para curto trifásico em T. Rio.

Observa-se que não foram identificadas falhas de comutação nos elos CCAT após o início da recuperação de potência CC ocasionadas por curtos-circuitos trifásicos em Xingu e Terminal Rio. Também não foram identificadas falhas de comutação nos demais elos CCAT ocasionadas pela falha de disparo de uma válvula em uma conversora de Terminal Rio.

O perfil de tensão para todas as contingências estudadas foram semelhantes tanto utilizando a rede Proposta quanto na rede Original.

A tabela 6 apresenta uma comparação dos resultados das investigações sobre falhas de comutação nas conversoras entre as redes Original e Proposta. Nos casos em que ocorreram falhas, é apresentado o tempo de duração das mesmas.

Tabela 6 - Comutação das conversoras CCAT durante as emergências

Contingência	Duração das falhas nas conversoras CCAT em ms							
	Terminal Rio		Estreito		Araraquara 2		Ibiúna	
	Original	Proposta	Original	Proposta	Original	Proposta	Original	Proposta
Curto-3F Xingu	-	-	-	-	16	16	-	16
Curto-3F Terminal Rio	105	105	32	32	32	32	16	32
Misfiring-TerminalRio	16	16		-		-		-

Em relação às falhas de comutação e duração das mesmas, houve algumas diferenças nas simulações na rede Proposta em relação à rede Original, destacadas a seguir:

- A duração da falha de comutação no Elo CCAT F. do Iguaçu – Ibiúna para o curto-circuito trifásico em T. Rio, que passou de 16 ms para 32 ms;
- A duração da falha de comutação no Elo CCAT F. do Iguaçu – Ibiúna para o curto-circuito trifásico em Xingu, que passou ocorrer por um ciclo.

A variação observada para os tempos de falhas de comutação em elos distantes do defeito não afetou o desempenho dos mesmos durante a recuperação do sistema após a eliminação do mesmo.

4.0 - CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento dos estudos de detalhamento do Bipolo 2, buscou-se a definição de uma rede retida única para os diferentes estudos realizados, de forma a reduzir o trabalho empregado na etapa de modelagem da rede. Foi definido por tanto uma extensa rede retida, principalmente na região Sul-Sudeste. A proposta deste trabalho foi modelar uma rede significativamente menor e comparar os resultados dos principais estudos com os da rede Original.

Em relação à modelagem, a rede Original teve o número de barras retidas e equivalentes na ordem de 50% a mais do que a rede Proposta. A modelagem da rede Proposta se apresentou bastante aderente ao problema, como pode ser constatado nas comparações entre níveis de curto circuito com o caso base do ANAFAS, e entre fluxo de potência e tensões nas barras com o caso base do ANAREDE.

Pode-se observar que os resultados apresentados para a rede Proposta ficaram muito próximos aos obtidos com a rede Original para estudos de transitórios eletromagnéticos, dinâmica e *multi-infeed*. O desempenho da rede Proposta frente aos estudos selecionados foi considerado satisfatório, tendo como principal benefício uma modelagem mais simples.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Expansão da Interligação entre as Regiões Norte/Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste Elo de Corrente Contínua \pm 800 kV Xingu –Terminal Rio. Relatório R2, nº EPE-DEE-RE-136-2014-rev0.

(2) Expansão das interligações Norte-Sudeste e Norte-Nordeste – Escoamento da usina de Belo Monte e reforços no SIN. Análise técnico-econômica de alternativas: Relatório R1, nº EPE-DEE-RE-040/2011-rev0, agosto 2011.

(3) Expansão das Interligações Norte-Sudeste e Norte-Nordeste, Parte II, Detalhamento da Alternativa Recomendada, Relatório R1, nº EPE-DEE-RE-063/2012-r0, julho 2012.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

João Henrique Magalhães Almeida, nascido em 1985 em Alvinópolis, MG. Engenheiro Eletricista formado pela UFMG em 2009. Pós Graduando em Engenharia Econômica pela UERJ em 2014/2015. Trabalha na EPE como analista na Superintendência de Transmissão de Energia desde 2013. Trabalhou na CEMIG D na área de estudos da Gerência de Expansão de Linhas e Subestações de 2010 a 2013.

Alexandre de Melo Silva, nasceu em 21/10/1982 em Catalão, Goiás. Graduou-se em Engenharia Elétrica e Física pela UFMG/UNICAMP em 2006. Especialização em Sistemas Elétricos de Potência pela UNIFEI (2011). Trabalhou na Eletronorte em 2007 na área de proteção de subestações e está na EPE desde 2007. É analista na Superintendência de Transmissão de Energia Elétrica desde 2007 com atuação em estudos de expansão do Sistema Interligado Nacional envolvendo Análises de Estabilidade do Sistema.

Dourival de Souza Carvalho Junior, engenheiro eletricista formado pela PUC-Rio em 1976; mestre em ciências em engenharia elétrica pela Coppe/UFRJ em 1980; Academic Visitor no Imperial College of Science and Technology (Londres, Inglaterra), por um ano, em 1987; mestre em administração de empresas pela PUC-Rio em 1995. É analista na Superintendência de Transmissão de Energia na EPE desde 2007. Experiência de mais de 30 anos em planejamento, consultoria, ensino, pesquisa e estudos de sistemas elétricos de potência, atuando em empresas como Ptel, Promon, Marte, Cepel e PA Consulting.

José Antonio d’Affonseca S. Cardoso, engenheiro eletricista formado pela UFRJ em 2001; mestre em Engenharia Elétrica pela UFRJ em 2006. Atualmente é pesquisador do CEPEL desde 2002, trabalhou na EPE entre 2011 e 2015, na Superintendência de Transmissão de Energia. Experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em técnica de ensaios em equipamentos de Alta Tensão e planejamento da expansão da transmissão. Principais temas de atuação: ensaios de equipamentos de alta tensão, corona em LTs, monitoramento de equipamentos em subestações e estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas CA e CC.

Tiago Campos Rizzotto, engenheiro eletricista formado pela UFU em 2007; mestrando em sistemas de potência pela Coppe/UFRJ. Trabalhou nas Centrais Elétricas de Rondônia em 2008. É analista na Superintendência de Transmissão de Energia Elétrica desde 2008 com atuação preponderante na área de estabilidade eletromecânica e interligações regionais.