



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GAT/06

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - IV**

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

**ESTUDOS FINAIS DE PLANEJAMENTO DE ELOS CCAT:  
APRIMORAMENTO METODOLÓGICO DERIVADO DA EXPERIÊNCIA DE ESTUDOS REALIZADOS**

**Dourival de Souza Carvalho Jr.(\*)**

**João Henrique Magalhães Almeida**

**Tiago Campos Rizzotto**

**EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA**

**RESUMO**

O artigo apresenta uma metodologia para estudos finais de planejamento de elos CCAT, desenvolvida com base em experiências. São indicados os tipos de estudos realizados e relatada sua evolução desde os do sistema do Madeira até os de Belo Monte. A partir do Madeira foi desenvolvido um modelo genérico de bipolo CCAT em 800 kV. Em seguida é apresentada a metodologia, que considera uma representação básica de rede, com ajustes específicos para estudos de transitórios eletromagnéticos, de dinâmica e de *multi infeed*, indicando limitações, mas concluindo pela viabilidade de aplicação em novos empreendimentos CCAT no país.

**PALAVRAS-CHAVE**

Elos CCAT, Estudos Finais de Planejamento, Metodologia para Estudos CCAT, Bipolo 800 kV.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Os estudos de planejamento da transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT) no Brasil, de elevada potência a grandes distâncias, têm sido desenvolvidos atualmente em duas etapas fundamentais. Na primeira etapa, de comparação de alternativas técnico econômicas e indicação de concepção básica, são realizadas simulações através de programas computacionais de fluxo de potência, curto-circuito e desempenho dinâmico, que utilizam modelos simplificados dos elos, mas representam o extenso conjunto dos elementos que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN).

Na segunda etapa, dos estudos finais que precedem o processo licitatório de concessão, são consideradas representações mais detalhadas dos elos e de controles, com modelagem trifásica e mais apurada da rede CA, que incluem a análise de fenômenos não cobertos na primeira etapa e a reprodução de investigações já realizadas, agora com novos recursos.

Para isto, são utilizados programas computacionais tipo EMT (Electromagnetic Transients Program), abordagem consagrada no meio técnico internacional para essas simulações. Em consequência dessa modelagem mais minuciosa, que requer maior esforço computacional e das equipes de trabalho envolvidas na elaboração dos casos, a representação da rede é comumente circunscrita a partes expressivamente menores do SIN. Além do mais, é recomendável que o tempo de processamento computacional fique dentro de certos limites, para tornar o trabalho dos analistas mais eficiente.

Esses estudos finais estão relacionados com a avaliação do desempenho dos novos elos CCAT e seu impacto na rede existente, frente a ocorrências de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos. Por apresentarem particularidades distintas, as simulações desses fenômenos demandam especificidades na modelagem de alguns dos principais elementos da rede. Entretanto, considerar para cada tipo de estudo uma modelagem própria do SIN,

resultaria na elaboração de diferentes representações dessa rede, com os consequentes esforços de trabalho e comprometimento de prazos.

Por essas razões, ao longo dos últimos estudos de planejamento no país, com a retomada da instalação de sistemas CCAT, que se iniciou com o sistema do Madeira, procurou-se desenvolver uma metodologia que minimizasse o esforço de representação dos elos CCAT e da rede envolvida, assim como, do tempo de processamento dos casos simulados.

Este artigo tem como objetivo principal apresentar uma metodologia para estudos finais de planejamento de elos CCAT, desenvolvida com base em experiências recentes de implantação dessas instalações no Sistema Interligado Nacional (SIN).

## 2.0 - ESTUDOS FINAIS DE PLANEJAMENTO DE ELOS CCAT

Na fase final de planejamento são realizados estudos de detalhamento que complementam as avaliações de desempenho do novo elo CCAT e de seu impacto na rede do SIN. Os resultados desses estudos consolidam as especificações básicas do novo empreendimento, necessárias ao processo licitatório.

Considerando os resultados dos estudos e das indicações da primeira fase, apresentadas no Relatório R1, três tipos fundamentais de análises são realizadas durante os estudos finais, apresentados no Relatório R2, relativos aos seguintes fenômenos: transitórios eletromagnéticos de manobra, transitórios eletromecânicos e *multi infeed*.

Os estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra investigam o impacto de curto-circuitos na rede CA (na barras das conversoras e em outras barras), de bloqueio de bipolo sem abertura de filtros, assim como, de curto-circuitos aplicados na linha de corrente contínua. São avaliadas, basicamente, sobretensões, energia dissipada em para-raios e uma primeira estimativa da recuperação do bipolo, dado que nesses estudos não se representam as dinâmicas das máquinas.

Os estudos de transitórios eletromecânicos (desempenho dinâmico) avaliam, além da estabilidade angular e estabilidade de tensão, a recuperação do elo CCAT após distúrbios, bem como sobretensões. Investigam também as condições para o sistema sobreviver a perdas de polo e de bipolo.

Os estudos de *multi infeed* avaliam a interação entre o novo elo CCAT a ser inserido no SIN com os principais elos já existentes. Em adição às avaliações estáticas preliminares, quando se estimam os fatores MIIFs (*Multi-Infeed Interaction Factors*) e MISCRs (*Multi-Infeed Short Circuit Ratios*), são realizadas simulações com aplicação de curto-circuitos em barras CA, curto-circuitos na linha CC e simulações de falhas de disparo das novas conversoras (*Misfiring*). São avaliados os comportamentos de tensões, a recuperação dos elos CCAT e falhas de comutação após o início da recuperação desses elos.

## 3.0 - EVOLUÇÃO DOS ESTUDOS DE ELOS CCAT

A metodologia apresentada neste artigo tem como base os estudos de planejamento de elos CCAT realizados no Brasil, a partir do sistema de transmissão do Madeira. Cerca de 25 anos após a experiência de Itaipu a transmissão em CCAT voltou a ser planejada no país, tendo como resultado um sistema em  $\pm 600$  kV, com dois bipolos paralelos de 3.150 MW e 2.345 km de extensão. Nos estudos finais foi considerada para representação desse elo CCAT um modelo compacto, com polos equivalentes, e para a rede CA, uma simplificação, através de equivalentes Thevenin "vistos" das conversoras. Na ocasião havia a percepção que uma representação mais detalhada dos elos CCAT e mais ampliada da rede CA teria forte impacto na modelagem e no esforço computacional.

Entretanto, durante os estudos do projeto básico desse empreendimento foi observado que as dificuldades de processamento estavam, em parte, associadas a modelagens extremamente detalhadas dos elos CCAT utilizadas pelos fabricantes fornecedores desses sistemas, com representações de controles e medições com detalhes não necessários às investigações em pauta.

Para os estudos finais de planejamento do primeiro bipolo CCAT  $\pm 800$  kV de Belo Monte (Bipolo I), inserido no SIN entre as SEs 500 kV Xingu e Estreito, um avanço significativo na modelagem foi conseguida, com o desenvolvimento de um modelo genérico e mais detalhado de bipolo CCAT  $\pm 800$  kV, adequado para o planejamento, considerando seus principais controles. A representação da rede CA foi expandida com incorporação de parte expressiva das regiões Norte e Sudeste do SIN [ 1 ], após testes de consistência, como ilustrado na Figura 1.

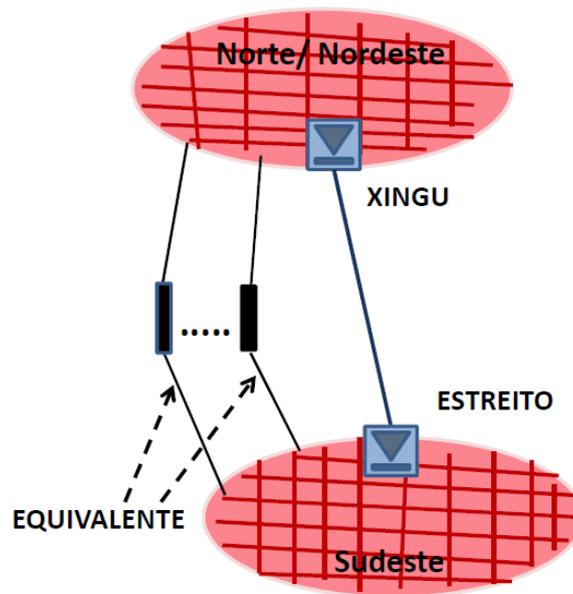


Figura 1 – Ilustração da rede representada nos estudos do bipolo  $\pm 800$  kV Xingu - Estreito

Nessa ilustração não estão considerados os demais elos CCAT da análise de *multi infeed* que foram posteriormente inseridos, com modificações e novos ajustes na rede CA. Como indicado na Figura 1 partes substanciais do SIN, distantes eletricamente dos pontos objetos dos estudos foram representadas por equivalentes próprios e de transferência. Observe-se que a região central da rede, entre as conversoras situadas a norte a sudeste foi incorporada aos equivalentes.

Nos estudos finais do segundo bipolo (Bipolo II),  $\pm 800$  kV Xingu – Terminal Rio [ 2 ], como sua conexão no Sudeste foi concebida em subestação distinta e relativamente distante da do primeiro (Estreito), houve necessidade de uma considerável expansão e ajustes na representação da rede CA. Entretanto, com base nas experiências pregressas, foi viável implementar essa expansão e ajustes, a partir da rede considerada nos estudos do primeiro bipolo, como ilustrado na Figura 2, com resultados satisfatórios. Foram representadas (rede retida) cerca de 80 barras trifásicas além dos equivalentes próprios e de transferência.

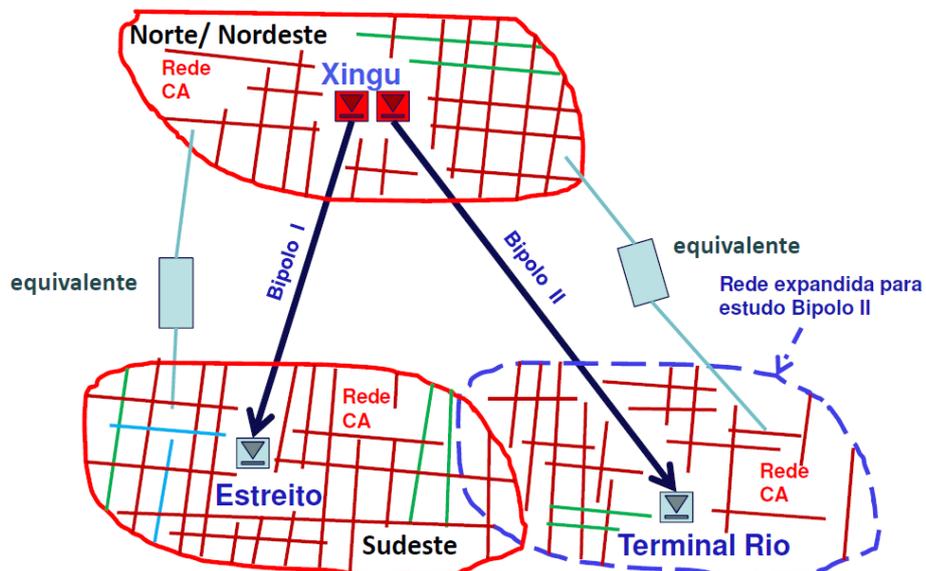


Figura 2 - Ilustração da rede representada nos estudos do bipolo  $\pm 800$  kV Xingu – Terminal Rio

Nessa ilustração não estão indicados os demais elos CCAT da análise de *multi infeed*, que, pela primeira vez em estudos do planejamento, foram inseridos na mesma rede básica CA das demais análises, o que representou um importante passo para o desenvolvimento de uma metodologia para estudos finais de planejamento.

#### 4.0 - MODELO GENÉRICO DE BIPOLO CCAT EM 800 KV

O modelo de bipolo CCAT em  $\pm 800$  kV, desenvolvido no programa PSCAD (Power Systems Computer Aided Design), foi aplicado com sucesso durante os estudos finais de planejamento do Bipolo I e, em seguida, nos estudos do Bipolo II de Belo Monte. Trata-se de um modelo genérico de representação de bipolo CCAT que contém a topologia e os controles atuais de uma conversora de 800 kV.

Esse modelo foi desenvolvido em diferentes etapas, a partir das experiências com o projeto do Madeira, que deu importantes indicações para sua concepção, dentre as quais considerar apenas um conjunto de controles básicos e elementos necessários para as simulações envolvidas nos estudos, de forma a minimizar as dificuldades de ajustes, inicialização e tempo de processamento.

O objetivo inicial do modelo era o de prover um recurso para estudos de transitórios eletromagnéticos. Adicionalmente, o modelo tomou como base a topologia de controle encontrada nos projetos atuais de CCAT e, assim, passou a ter utilidade na avaliação de controles de sistemas de CCAT.

O modelo tem como base o controle de disparo genérico "transvector" do PSCAD, que recebe um sinal dos controles de polo e gera pulsos de disparo para 12 válvulas conversoras. Os únicos ajustes importantes a serem definidos pelos usuários para o controle transvector são os ganhos. Os controles de alto nível (Controle de corrente de polo, VDCOL, controle de potência de bipolo, etc.) são definidos pelo usuário, seguindo uma topologia baseada no projeto CCAT de Itaipu. Alguns poucos ajustes são necessários para se obter um desempenho satisfatório.

A Figura 3, extraído diretamente do PSCAD ilustra a representação dos dois bipolos no terminal Xingu. As linhas de transmissão em  $\pm 800$  kV e dos eletrodos foram modeladas através do modelo de linha função da frequência do PSCAD (Phase). Os filtros AC foram representados por filtros de dupla sintonia ajustados para fornecer a potência desejada. O filtro CC representados com ajuste triplo de sintonia.

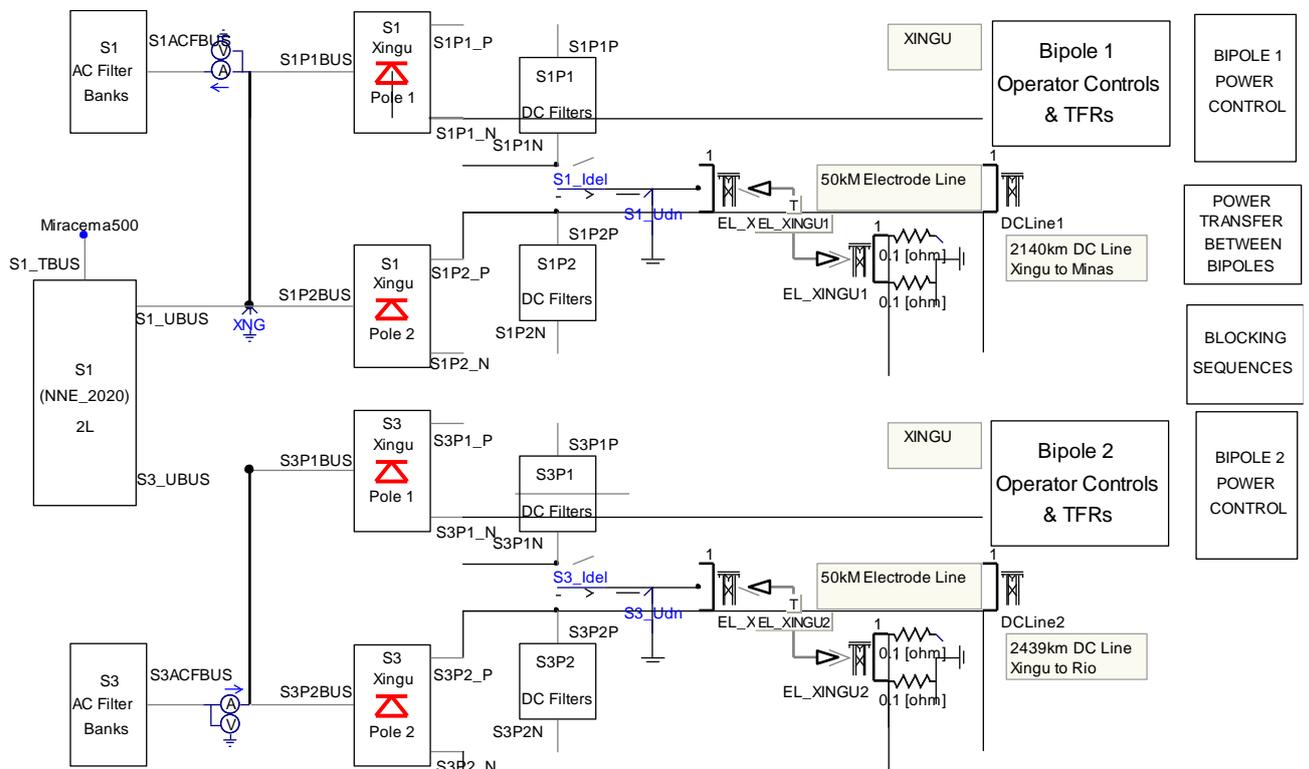


Figura 3 - Terminais Xingu dos bipolos I e II de Belo Monte, em  $\pm 800$  kV CCAT representados no PSCAD ("top view")

Esse modelo foi testado por inúmeros agentes de transmissão. Além dos que participaram dos estudos finais de planejamento dos bipolos de Belo Monte, outros que se interessaram em participar do processo licitatório de concessão desses empreendimentos.

#### 5.0 - METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE ESTUDOS FINAIS DE PLANEJAMENTO

Durante os estudos finais de planejamento são realizados diferentes tipos de simulações, com requisitos distintos para representação do SIN, no que diz respeito à extensão da rede retida e de seus principais componentes. Essas simulações são necessárias às análises de transitórios eletromagnéticos de manobra, de desempenho dinâmico (transitórios eletromecânicos) e de *multi infeed*.

Caso o sistema, composto pela parte do SIN a ser retida e o novo empreendimento CCAT fosse de pouca extensão, poderia se conceber uma representação única que atendesse aos requisitos dos diferentes tipos de simulações. Entretanto, para as condições que usualmente se apresentam no planejamento, uma estratégia de representação única poderia levar à representação bastante ampla e computacionalmente pesada, dado que conteria, além de uma extensa rede CA, vários elos CCAT e os controles dos principais geradores. Por outro lado, uma estratégia de uma representação por tipo de estudo, aumentaria demasiadamente o escopo do trabalho, por demandar ajustes de modelagem e testes para cada representação.

Por essas razões, a estratégia de modelagem que prevaleceu, com base na experiência do planejamento, foi a de conceber uma representação básica e única para a rede CA, mas factível de ser adaptada às necessidades dos três tipos de simulações previstas nos estudos de detalhamento. O tempo de processamento foi outra variável importante nessa concepção, para viabilizar a utilização de computadores pessoais usualmente utilizados por engenheiros analistas de empresas do setor elétrico. Essa estratégia busca implementar modelos que demandam grande tempo de processamento apenas quando o tipo de simulação exigir.

Assim, para atender a esses requisitos, inicialmente, delimita-se, a rede CA retida (representação básica), tendo em conta o critério largamente utilizado em estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra, de incluir na representação todas as barras distantes pelo menos duas barras das conversoras avaliadas. Em seguida, ajusta-se, de forma a estender a representação da rede para englobar as barras CA onde estão conectados os demais elos CCAT e as barras de geradores pré-selecionados. Nas fronteiras da rede retida são representados equivalentes próprios e de transferência, ajustados em função do ponto de operação. Todos os geradores são modelados através de equivalentes Thevenin.

A construção da representação da rede para cada um dos três estudos, que correspondem a tipos distintos de simulações, é realizada, como ilustrado na Figura 4, da seguinte forma:

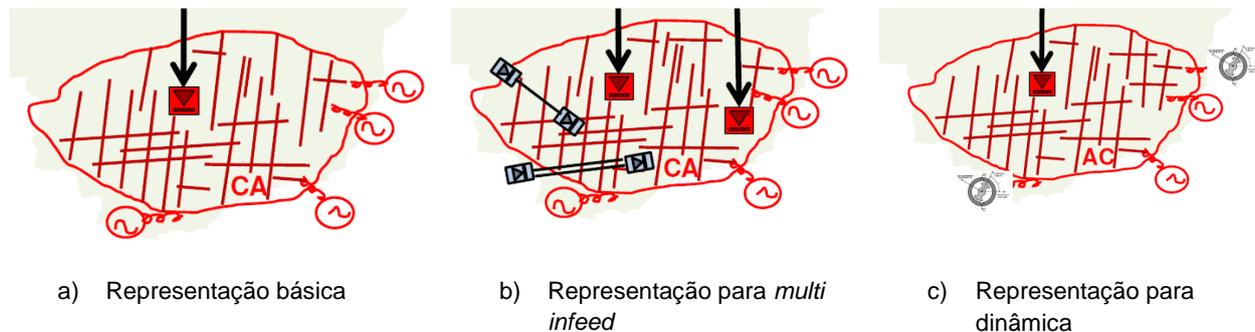


Figura 4 – Etapas de representação da rede para os estudos finais de planejamento

- ✓ Para as simulações de transitórios eletromagnéticos de manobra, parte-se da representação básica e adiciona-se os modelos genéricos dos elos CCAT objetos dos estudos de planejamento. Esse estudo de transitórios deve ser o primeiro a ser realizado por envolver uma menor quantidade de modelos mais complexos.
- ✓ Para as simulações de desempenho dinâmico, parte-se da representação básica, substituindo-se os geradores pré-selecionados por modelos de máquinas com seus respectivos controles. A seleção dos geradores nessa modelagem detalha é feita com o uso de programa de transitórios eletromecânico, quando se observa a influência desses geradores no comportamento dos elos CCAT em estudo.
- ✓ Para as simulações necessárias às análises de *multi infeed*, acrescenta-se à representação de transitórios eletromagnéticos os demais modelos dos elos CCAT.

Uma vantagem da realização dos estudos iniciando-se com os de transitórios eletromagnéticos é que a rede representada é bastante testada, quando as demais representações são menos complexas, de forma que, nos estudos subsequentes, ao se acrescentar, como ilustrado na Figura 5, ou substituir elementos por modelos mais elaborados, existe mais segurança nos novos ajustes.

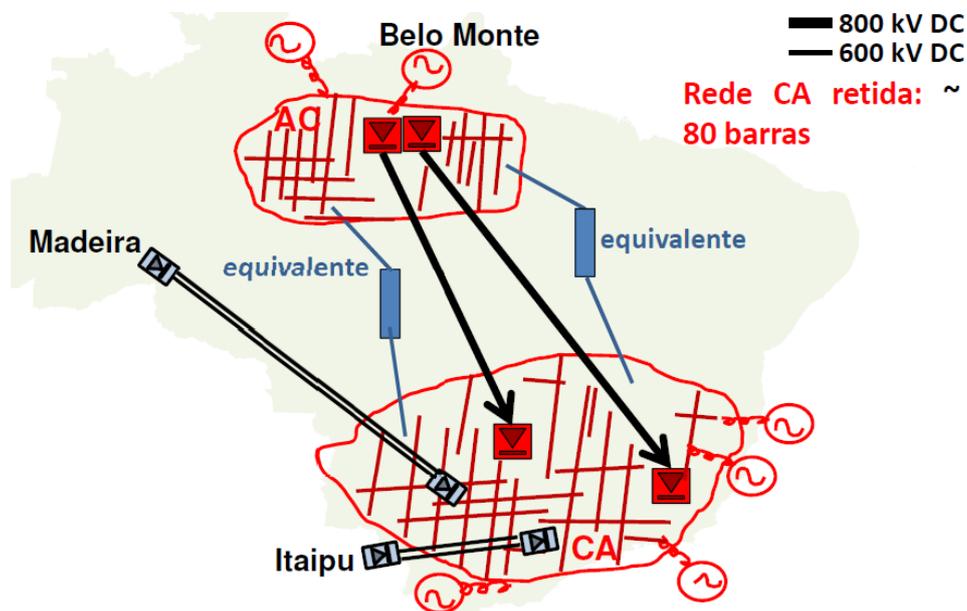


Figura 5 - Representação da rede para simulações de *multi infeed* - caso Bipolo II de Belo Monte

Com relação ao tempo de processamento, variável de suma importância, a metodologia apresentada resultou em tempos considerados satisfatórios para a extensão da rede representada e complexidade dos modelos utilizados. A Tabela 1, reproduzida dos estudos do Bipolo II de Belo Monte [ 2 ], dá uma boa indicação, considerando o uso de computadores pessoais com sistema operacional de 64 bits, 8 GB RAM, configuração comum, presente nas mesas de especialistas do setor elétrico.

Tabela 1 - Tempo de processamento típico – extraído do estudo do Bipolo II de Belo Monte

Tipo de simulação	Pre - inicialização ( <i>Snapshot</i> )		Simulação (partindo de pre - inicialização)	
	Tempo de simulação (s)	Tempo de processamento (min)	Tempo de simulação (s)	Tempo de processamento (min)
Transitórios eletromagnéticos	1	4,4	1	4,5
Desempenho dinâmico	4	18,2	1	5,5
Avaliação de <i>multi infeed</i>	1	13,2	1	13,5

Importante notar que o desempenho obtido pode ser melhorado com as facilidades de processamento paralelo, existente na nova versão do programa PSCAD, não utilizada nesses testes. Assim como, que em determinadas condições, é viável buscar a redução da extensão da rede retida, através de compactação, obtida através de testes de desempenho [ 4 ] .

## 6.0 - LIMITAÇÕES E POSSIBILIDADES DE APERFEIÇOAMENTO

A metodologia apresentada foi desenvolvida considerando que os estudos de *multi infeed* deveriam investigar, fundamentalmente, o fenômeno de falha de comutação e seus tempos envolvidos para observação da recuperação dos elos CCAT, não se alongando na observação de efeitos dinâmicos. Desta forma, não seria necessário a modelagem da dinâmica das máquinas. Em estudos futuros, caso se justifique para os estudos de *multi infeed* a incorporação dos modelos dinâmicos das máquinas, deverá ser investigada a adoção de processamentos mais eficazes.

Quanto a definição dos limites da rede retida, caso não seja factível englobar as barras dos geradores pré-selecionados, deverá ser considerada a elaboração de equivalentes dinâmicos, o que aumenta a complexidade dos equivalentes.

A metodologia apresentada está embasada na implantação na rede brasileira de concepções de elos CCAT, com tecnologia LCC, para transmissão de elevadas potências a grandes distâncias em ultra alta tensão, condições com elevado potencial de se repetir no país. Entretanto, para outras situações deve ser avaliada sua eficiência ou mesmo a sua aplicabilidade.

## 7.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada uma metodologia para estudos finais de planejamento de elos de Corrente Contínua em Alta Tensão (CCAT), desenvolvida com base em experiências recentes.

Foram identificadas limitações para sua aplicação generalizada, em qualquer sistema, mas com elevado potencial de aplicação no sistema brasileiro.

A utilização de um modelo genérico de bipolo com seus principais controles e uma estratégia de modelagem da rede, já testada, oferece uma alternativa metodológica viável para o desenvolvimento de futuros estudos de planejamento desse tipo de instalação no país.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[ 1 ] CARVALHO Jr., D. S.; SOUZA, D. F.; RIZZOTO, T. C.; CARDOSO J. A.; LUZ, G. S.; BIANCO, A.; XIMENES, M. J.; AZEVEDO, R. M.; ROTHSTEIN, O. J.; RISTOW, R.; BROETTO, R. B.; Final project planning conception for the first 800 kV HVDC link of Belo Monte, paper B4-103, 45ª Bienal Cigré, Paris, August 2014.

[ 2 ] CARVALHO Jr., D. S.; A.M. Silva, J.H. Almeida, T.C. Rizzoto, J.A. Cardoso, M.J. Ximenes, R.M. Azevedo, O.J. Rothstein, R. Ristow, R.B. Broetto, M.P. Monteiro, A. Dias Jr., F.C. Jusan, F. Alves, A.M. Pena. A second and longer  $\pm$  800 kV DC bipole completes Belo Monte's integration, paper B4-013, 46ª Bienal Cigré, Paris, August 2016

[ 3 ] MENZIES, D. F., Modelo de representação de elos de corrente contínua em 800 kV com representação dos filtros". Notas Técnicas para EPE, 2012.

[ 4 ] ALMEIDA, J.H.M., CARVALHO Jr., D. S., SILVA, A.M., CARDOSO, J.A.S., RIZZOTTO, T.C., Experiência na modelagem de grande rede de transmissão em estudos de inserção de elos HVDC  $\pm$  800 kV, XXIII SNPTEE, Grupo IV, Foz do Iguaçu, 2015

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**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.



**João Henrique Magalhães Almeida**, nascido em 1985 em Alvinópolis, MG. Engenheiro Eletricista formado pela UFMG em 2009. Pós Graduado em Engenharia Econômica pela UERJ em 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.



**Tiago Campos Rizzotto**, engenheiro eletricista formado pela Universidade Federal e Uberlândia em 2007; Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2016. É Analista de Pesquisa Energética, desde 2008, na Empresa de Pesquisa Energética – EPE, onde desempenha atividades relacionadas ao planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia.