



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

FI/GAT/17  
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**

**MELHORIAS NA IDENTIFICAÇÃO E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE CONVERGÊNCIA DO ANATEM**

**Sergio Gomes Jr.(\*)**  
CEPEL, UFF

**Fabricio Lucas Lirio**  
CEPEL

**Agilio Coutinho Netto**  
FPLF-PUC

**Leonardo Pinto de Almeida**  
CEPEL

**RESUMO**

O método iterativo utilizado no programa ANATEM para simulação de transitórios eletromecânicos consiste em uma solução alternada entre os sistemas CC e CA, que proporciona precisão, robustez e principalmente uma grande eficiência computacional, tanto em relação à economia de memória como em esforço computacional. Mesmo com ótimas características, este método pode apresentar problemas de convergência durante a solução dos subsistemas de maneira não simultânea. Este artigo apresentará os desenvolvimentos realizados na nova versão do ANATEM com o objetivo de melhor identificar causas de problemas de convergência e disponibilizar novas alternativas de solução. Ao final serão apresentados resultados de aplicação ao Sistema Interligado Nacional contemplando uma condição futura de operação, com a presença dos bipolos de Belo Monte.

**PALAVRAS-CHAVE**

Transitórios eletromecânicos, Solução alternada, Problemas de convergência

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O programa de transitórios eletromecânicos ANATEM, desenvolvido pelo CEPEL, possui um método de solução alternada entre os sistemas CC e CA. Neste processo, cada sistema terá inicialmente a solução dos modelos e em seguida da rede. Nas soluções de rede CA ou CC, a rede elétrica é representada pela matriz de admitâncias nodais e os elementos conectados à rede são representados por injeções de corrente.

O método de solução alternada do ANATEM proporciona precisão, robustez e principalmente uma grande eficiência computacional, tanto em relação à economia de memória como em relação a esforço computacional. O método de solução simultânea, baseado na aplicação do método de Newton-Raphson para todas as equações do sistema, por outro lado, embora apresente taxa de convergência quadrática e uma maior robustez quando próximo à solução, apresenta algumas características inferiores ao método alternado como a maior demanda de memória, maior esforço computacional e menor robustez de convergência quando distante da solução ou com chaveamentos em malhas de controle de modelos definidos pelo usuário.

Mesmo com ótimas características, o método de solução alternada pode apresentar problemas de convergência durante a solução dos subsistemas de maneira não simultânea. A entrada dos elos de corrente contínua do aproveitamento do Rio Madeira, com grande injeção de potência no sistema Sudeste e com a conexão em back-to-back de conversores com capacitores de comutação (CCC) em Porto Velho a um sistema de 230 kV no inversor com baixa potência de curto-circuito, provocaram o agravamento destes problemas de convergência, principalmente, pela grande quantidade de simulações realizadas para entrada destes elementos, aplicando-se contingências muito severas para avaliação das reais restrições operativas associadas.

(\*) Av. Horácio Macedo, 354, Cidade Universitária – Rio de Janeiro – RJ – Brasil – CEP 21.941-911  
Tel: (+55 21) 2598-6231 – Fax: (+55 21) 2598-6451 – Email: sgomes@cepel.br

Verifica-se ainda que, no horizonte do planejamento, a entrada em operação dos elos associados ao reforço da Interligação Norte-Sudeste para escoamento do complexo hidrelétrico de Belo Monte pode trazer maiores dificuldades ao processo de convergência do ANATEM.

Foram então realizados diversos novos desenvolvimentos apresentados na nova versão do ANATEM com o objetivo de melhor identificar causas de problemas de convergência e disponibilizar novas alternativas de solução. Acredita-se que com estes novos desenvolvimentos, seja possível resolver a grande maioria dos problemas de convergência de simulações do ANATEM. Neste artigo serão detalhados os diversos problemas encontrados no processo alternado de solução e as soluções disponibilizadas. Serão apresentados também resultados de simulação do Sistema Interligado Nacional (SIN) onde as melhorias do processo de solução ficarão evidenciadas e os tempos computacionais envolvidos no processo de solução serão também tratados. Nestes resultados será considerada uma condição futura de operação onde os elos de corrente contínua de Belo Monte estejam presentes, representando uma condição máxima de interação CA-CC para o SIN. Serão ainda utilizadas contingências severas, com o objetivo de obtenção de casos críticos para convergência e utilização dos novos recursos desenvolvidos para a solução de todos os problemas encontrados. Será ainda comparado o desempenho da nova versão com o da versão anterior do ANATEM, que ainda não possuía tais recursos.

## 2.0 - O PROCESSO DE SOLUÇÃO ALTERNADA

A simulação de transitórios eletromecânicos no programa ANATEM pode ser descrita resumidamente no fluxograma apresentado na Figura 1. Neste fluxograma a etapa denominada processo iterativo de solução de equações algébrico-diferenciais é composta pela solução alternada entre os sistemas CC e CA, no qual cada sistema terá inicialmente a solução dos modelos e em seguida da rede, conforme ilustrado na Figura 2, onde são indicados os números máximos de iterações de cada laço de solução, respectivamente, modelo e rede CC (MRDC), modelo CA (IMDS), rede CA (IACS) e os laços modelo-rede CA (MRAC) e sistema CC-CA (ITMR).

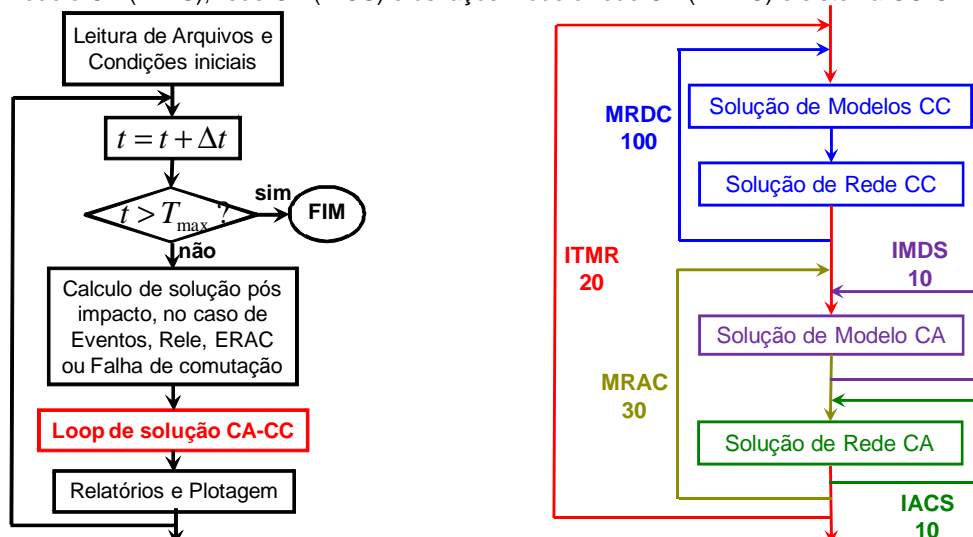


FIGURA 1 – Processo de Simulação no ANATEM FIGURA 2 – Processo de Solução do Sistema de Equações

Nas soluções de rede CA ou CC, a rede elétrica é representada pela matriz de admitâncias nodais e os elementos conectados à rede são representados por injeções de corrente. A eficiência computacional do método de solução alternada dos sistemas CA e CC está associada ao fato que durante a solução ao longo do tempo, a matriz de admitâncias nodais permanece quase todo o tempo constante, exceto nos pontos de mudança topológica da rede, que só ocorre nos instantes de aplicação de eventos como defeitos ou abertura de circuitos. Com isto, esta matriz fica armazenada fatorada em memória a partir da sua tabela LU esparsa. Apenas as injeções irão variar ao longo da simulação e que são eficientemente levadas em conta durante a solução LU esparsa do sistema linear.

Este processo de solução é muito eficiente, comparado com um processo simultâneo, mas pode apresentar problemas de convergência em um ou mais laços de solução. No próximo item serão apresentadas as melhorias realizadas no diagnóstico dos problemas de convergência e novas alternativas de soluções.

## 3.0 - PRINCIPAIS NOVOS DESENVOLVIMENTOS

Neste item são descritas as novas implementações desenvolvidas na versão 10.5 do ANATEM com o objetivo de auxiliar na identificação e solução de problemas de convergência.

### 3.1 Identificação de problemas de convergência

Nas versões anteriores do ANATEM havia certa dificuldade para diagnosticar quais os principais elementos responsáveis por problema de convergência e era necessário recorrer ao relatório de convergência, acionado pela opção RCVT, que era confuso, por trazer muitas informações e não haver uma documentação com sua descrição

detalhada. Como novos desenvolvimentos, passou-se a apresentar, quando a solução não convergia, os elementos que produziam os maiores erros na última iteração do processo. Cada tipo de elemento possui uma mensagem específica. Para exemplificar, a seguir é apresentada a mensagem de não convergência de um modelo de regulador de tensão:

#### MODELO CA DE REGULADOR DE TENSAO NAO CONVERGENTE

```
X---X---X-----X---X-----X
Barra Grupo Nome Da Barra Modelo Erro Max
X---X---X-----X---X-----X
7064 10 SANTO-ME23GR 0021 0.1395E+01
```

No caso de não convergência envolvendo múltiplos laços, serão apresentados os erros de todos os laços não convergentes. Além disto, o relatório de convergência (RCVT) foi bastante melhorado e documentado no manual do ANATEM, conforme exemplificado a seguir. Acredita-se que estes novos relatórios sejam suficientes para a correta identificação da causa de não convergência.

```
*****
* SOLUCAO CA-CC: ITMR = 1 *
*****
SOLUCAO CC DOS MODELOS E REDE
X-----X---X---X-----X-----X-----X-----X
Tempo MRDC Tipo Barra Bloco / Conv Elo associado Erro Modelo Erro
(seg) CDU Nome Da Barra Num Nome REL / ABS Rede
X-----X---X---X-----X---X-----X-----X-----X
0.1000 CDU 9324 7 0.2712E-06
0.5152E-05
1 BAR 2106 INV+BTB02 2002 BtB PVELHO POLO 2 0.2067E-08
SOLUCAO CA DOS MODELOS
X-----X---X---X---X---X-----X-----X
Tempo MRAC IMDS Tipo Barra NEQP Erro Max Erro Max
(seg) CDU BLK REL ABS
X-----X---X---X---X---X-----X-----X
0.1000 1 1 CDU 4705 12 0.1900E-05 0.2622E-05
0.1000 1 2 GER 7064 10 0.0000E+00 0.0000E+00
SOLUCAO CA DA REDE
X-----X---X-----X-----X
Tempo IACS Num Barra Nome Da Barra Erro Max
X-----X---X-----X-----X
0.1000 1 7064 SANTO-ME23GR 0.3795E-07
FINAL DO PASSO DE INTEGRACAO
X-----X-----X-----X-----X
Tempo Modelos Rede CA Rede CC
(seg) MRAC TIP Barra NEQP Erro Rel IACS Barra Erro MRDC Bar. Erro
Total CDU BLK Erro Abs Tot. Total
X-----X---X---X---X---X---X-----X---X---X-----X
0.1000 1 CDU 9324 7 0.271E-06 1 7064 0.380E-07 1 2106 0.207E-08
0.515E-05
```

### 3.2 Método de Newton para Solução da Rede CA

Para solução de alguns problemas de convergência na rede CA, foi implementada a opção NEWT no código EXSI para solução pelo método de Newton-Raphson da rede CA. Nesta opção, as derivadas parciais das injeções de corrente são incluídas no Jacobiano, que é resolvido a cada iteração do processo da solução de rede CA. Deve-se observar que o método de Newton foi aplicado apenas à solução da rede CA, permanecendo as soluções modelo-rede CA e CC resolvidas de forma alternada. A solução simultânea de todos os laços não é eficiente computacionalmente pois o Jacobiano de todo o sistema seria extremamente grande e com coeficientes muito variáveis ao longo da simulação, devido às diversas não linearidades e limites existentes nos diversos modelos de equipamentos e sistemas de controle.

Em relação ao método convencional onde a rede é representada por uma matriz constante de admitâncias nodais com injeções variáveis de correntes, o método de Newton é geralmente mais robusto e converge em um número muito menor de iterações. No entanto, pode ser menos eficiente pela necessidade de solução de sistema linear com matriz jacobiana variável em todas as iterações.

A opção pode ser utilizada em situações em que o método convencional falhe, quando é indicado que houve problema de convergência na solução de rede CA. O método de Newton também pode ser empregado para verificação da não existência de solução matemática associado a cargas ZIP ou elos de corrente contínua em redes CA em processo de colapso de tensão ou em defeito. Caso a rede CA não convirja pelo método convencional de injeção de corrente e também pelo método de Newton, há um forte indício que é uma situação de

rede sem solução matemática e, neste caso, deve-se alterar os modelos de carga ou os dados de falha de comutação dos elos de corrente contínua que estão vizinhos à região indicada no relatório de erro de convergência.

Complementando a opção NEWT, foi criada também a opção DNWT no código EXSI para solução pelo método de Newton-Raphson "desonesto" (Dishonest Newton). Este método consiste em um Newton onde o Jacobiano é apenas atualizado na primeira iteração da solução de rede CA, no início do passo. Há ainda a alternativa de atualização de jacobiano com frequência especificada no código DSIM (ex. de 5 em 5 passos de tempo).

A opção DNWT, principalmente com a utilização de atualizações menos frequentes, pode ser mais eficiente computacionalmente que o método convencional e certamente é mais eficiente que o método de Newton, embora menos robusto. Especial cuidado deve ser tomado para não utilização da opção DNWT com frequência não unitária durante passos de integração em que haja inversão de sinal de sensibilidade de corrente em relação à tensão, como por exemplo, troca de comportamento capacitivo e indutivo de compensadores estáticos ou capacitores série controlados. Neste caso este método pode divergir.

### 3.3 Solução Desacoplada CA e CC

A opção SADD no código EXSI foi implementada para solução desacoplada CA e CC. Esta opção pode ser utilizada quando os processos iterativos de solução de redes e modelos CA e CC convergem individualmente, no entanto não convergem simultaneamente. Quando isto ocorre, haverá mensagem de erro indicando a não convergência simultânea. Na utilização da opção SADD é recomendável utilizar passos de integração reduzidos (inferior a 1 ms) para evitar erros de interface consideráveis e utilizar esta opção apenas em um curto período de tempo em que haja a necessidade, pois os erros de interface não terão o mesmo grau de precisão da solução de cada módulo do processo alternado.

### 3.4 Solução Desacoplada Modelo CC e Rede CC

Opção DLCC no EXSI para solução desacoplada entre os processos iterativos modelo CC e rede CC, pela inclusão de um atraso de um passo de integração no ângulo de disparo do controle a ser utilizado pelos conversores para solução da rede CC. Esta opção pode ser utilizada quando o pequeno erro entre o modelo CC e rede CC não permite a convergência conjunta entre os processos iterativos. Na utilização da opção DLCC é recomendável utilizar passos de integração reduzidos (0,2 ou 0,1 ms) para que a influência do atraso na dinâmica dos elos de corrente contínua seja desprezível. Deve-se também utilizar esta opção apenas em um curto período de tempo em que haja a necessidade, para evitar a utilização de passo de integração reduzido em toda a simulação.

### 3.5 Solução do CCC com Condutância Variável

A solução da rede CC com CCC utilizava um modelo de Norton (fonte de corrente em paralelo com uma condutância igual à resistência de comutação) que possuía uma baixa taxa de convergência. Este modelo foi substituído por um Norton com condutância variável com o valor da sensibilidade da corrente em relação à tensão, sendo equivalente à aproximação de primeira ordem da equação da tensão variável do CCC. Para que haja um desacoplamento desta solução de rede CC e o controle de cada conversor, recomenda-se a utilização da opção DLCC, quando a taxa de convergência da solução da rede CC passa a ser quadrática, equivalente ao método de Newton-Raphson aplicado à solução da rede CC com as fontes equivalentes dos conversores. Para desabilitar esta nova solução, utilizando o método convencional anterior, pode-se utilizar a opção CCCO.

### 3.6 Extrapolação de variáveis de interface CA-CC

Outra melhora realizada na nova versão do ANATEM foi a criação de extrapolção quadrática para cálculo da estimativa das variáveis de interface CA-CC no início do processo iterativo de cada passo de integração. Verificou-se que esta alteração, além de reduzir o número de iterações e o tempo computacional de casos de contingências próximas a elos de corrente contínua, tornou a versão mais robusta, ou seja, casos que não convergiam por problemas do processo alternado de solução CA-CC, passaram a convergir.

### 3.7 Outras Soluções para o Problema de Convergência

Neste item são apresentadas outras soluções que podem ser adotadas para solução de problemas de convergência, algumas já existentes na versão anterior do programa, para que sejam todas utilizadas em sua plenitude:

-Diminuição do passo de tempo de integração. Passo recomendável: 1 ms perto de elo convencional ou nos instantes iniciais dos eventos ou 0.2 ms para eventos próximos de equipamentos de ação rápida como elos back-to-back ou equipamentos VSI. Para situações normais e após os distúrbios, 3 ms pode ser suficiente. Não é recomendável utilização de passo de tempo superior a 3 ms em sistemas de grande porte, para evitar problemas de imprecisão ou convergência.

-Inclusão de bloco DELAY em laço de controle que apresenta problema de convergência ou antes do bloco EXPORT quando há simultaneamente problema de convergência de modelo CDU de equipamento e da rede, em barra vizinha ao equipamento em questão. Utilizar neste caso passos reduzidos (1 ms ou inferior no caso de equipamentos de ação rápida) para evitar erros associados à inclusão do bloco de atraso.

-Separação de eventos em passos de tempo distintos ao invés de aplicação de múltiplos eventos de forma simultânea ou aplicação de defeito em etapas (ex. ao invés de aplicar um curto circuito pelo evento MDSH de 6000 Mvar, utilize 3 MDSH de 2000 Mvar).

-Alteração do parâmetro Vmin do modelo de carga para um valor maior (ex. 0.8 pu) para conversão da carga em Z constante quando a tensão passa a ser muito baixa, evitando erros de convergência da rede CA. Esta não convergência da rede CA é indicada como erro no arquivo de saída. Isto ocorre pois a rede CA em colapso ou em defeito pode não ter capacidade de atendimento à carga e isto está associado a uma não solução matemática da rede CA (potência das cargas acima da margem de estabilidade de tensão do sistema).

-Utilização de dados de falha de comutação por nível de tensão, utilizando valores da ordem de 0,7 pu. Em redes com defeito, pode não haver solução matemática para a injeção transitória do elo, durante este período e, na prática, quando isto ocorresse provavelmente haveria a falha de comutação dos inversores. A não utilização deste critério pode levar à não convergência da rede CA.

-Acerto das tolerâncias de convergência TEMD, TETE e TABS. Valores muito baixos podem ser inviáveis de serem atingidos, causando erros de convergência, enquanto que valores altos podem levar a resultados errôneos, inclusive instabilidades não existentes, que novamente podem causar erros de convergências. Valores recomendáveis para sistemas de grande porte: TEMD=1e-4, TETE=1e-4 e TABS=1e-7.

Abaixo são dados os parâmetros recomendados para simulações com eventos provocados ocorrendo em até 0,2 s envolvendo elos de corrente contínua. Neste conjunto foi utilizado um passo razoavelmente reduzido para o início em conjunto com as opções SADD e DLCC, trazendo grande robustez ao processo de solução sem perda de precisão.

```
DSIM
( Tmax ) ( Stp ) ( P ) ( I )
0.50 .0001 25
EXSI DLCC SADD
DSIM
( Tmax ) ( Stp ) ( P ) ( I )
2. .0005 5
EXSI
DSIM
( Tmax ) ( Stp ) ( P ) ( I )
15. .001 5
EXSI
```

Alternativamente quando surgir problema de convergência na rede CA, pode-se recorrer ao método de Newton (EXSI DLCC SADD NEWT). No caso de eventos provocados ocorrendo em pontos com certa distância dos elos de corrente contínua, pode-se utilizar valores menos rígidos, como por exemplo, 1 ms até 2 s de simulação e 3 ms para o restante até 15 s. Recomenda-se fazer uma avaliação prévia de resultados de simulação para escolha de um passo de tempo adequado que traga eficiência, precisão e confiança de resultados.

#### 4.0 - APLICAÇÃO DOS NOVOS DESENVOLVIMENTOS AO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

Para a aplicação dos procedimentos desenvolvidos, utilizou-se o cenário de 2020 em carga leve do SIN, com o Sistema Norte Exportador. Este cenário serviu de base para os estudos de planejamento do reforço na transmissão para o escoamento da Central Hidrelétrica de Belo Monte coordenado pela EPE. Considera-se este cenário crítico do ponto de vista de processo alternado de solução CA-CC por possuir os 6 bipolos chegando na região Sudeste (Itaipu, Madeira e Belo Monte), com forte interação dinâmica entre eles e a rede CA, além da presença de um back-to-back CCC em Porto-Velho alimentando um sistema de 230 kV de baixa capacidade na Região Acre-Rondônia.

##### 4.1 Não convergência do Pós – Impacto

Na rotina pós-impacto apenas a rede CA é solucionada e as injeções dos elementos na rede são atualizadas com as tensões convergidas a cada iteração de forma alternada. Nesta situação, cargas funcionais ou injeções de conversores CA-CC podem produzir problemas de convergência no processo alternado, ou simplesmente pela não existência de solução, já que nem sempre a rede deteriorada pós-impacto possui solução com o modelo de injeções funções da tensão considerado. No primeiro caso, em que há solução, o método de Newton desenvolvido (opção DNWT) provavelmente irá resolver o problema, por substituir o processo alternado de solução por um processo simultâneo. Quando isto não ocorre, provavelmente ocorre a segunda situação que é a de não existência de solução. De forma geral pode-se adotar uma aplicação escalonada do evento, dividindo-o em diversos intervalos de tempo de pequeno espaçamento. No caso do problema estar relacionado com as cargas funcionais, pode-se ainda convertê-las para impedância constante durante o período de não solução, podendo-se utilizar do campo Vmin no código DCAR, cujo valor recomendável é de 80%. No caso de problema na injeção de conversores CA-CC, não há esta possibilidade, devendo-se recorrer à solução de escalonamento de eventos ou alteração dos dados de falha de comutação, para que ele entre em falha durante o período de não existência de solução.

Para ilustrar este problema, considerou-se o evento de curto circuito monofásico em P. Bueno 230 kV com perda de um circuito da LT Pimenta Bueno – Ji-Paraná. Verifica-se que a solução da rede CA na rotina pós impacto não foi bem sucedida, conforme listagem do evento e mensagem de erro na Figura 1. Aplicou-se o método de Newton e o erro permaneceu, indicando que o problema não tinha solução. Tentou-se ainda modificar as cargas de todo o sistema para impedância constante, no período de aplicação do evento. Mesmo assim permaneceu o erro.

Pela mensagem de erro da Figura 1, verifica-se que o problema está na região de Rio Branco, próxima ao elo back-to-back de Porto Velho. O relatório RCVT confirmou esta informação, apresentando-se erros máximos alternando entre a barra indicada e a barra coletora do inversor deste back-to-back. Utilizou-se então o escalonamento do evento, conforme listagem da Figura 2, e o problema de convergência foi resolvido. Tomou-se o cuidado de utilizar tempos de simulação reduzidos no escalonamento (0.0002 s) para não comprometer os resultados. Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os gráficos das tensões no ponto de curto-circuito e na barra coletora de Porto Velho onde havia o problema de convergência.

```
DEVT IMPR
(Tp) (Tempo) (EI) (Pa) Nc(Ex) (%) (ABS)
MDSH .1000 9534 -500.
MDSH .2150 9534 500.
ABCI .2150 9534 9530 1
999999
```

#### Mensagem de erro:

Numero maximo de iteracoes excedido no processo de solucao pos-impacto da rede CA.

REDE CA NAO CONVERGENTE

X-----X-----X-----X

Num Barra Nome Da Barra Erro Max

X-----X-----X-----X

9538 R-BRAN-AC230 0.3989E+00

FIGURA 1 – Evento aplicado instantaneamente

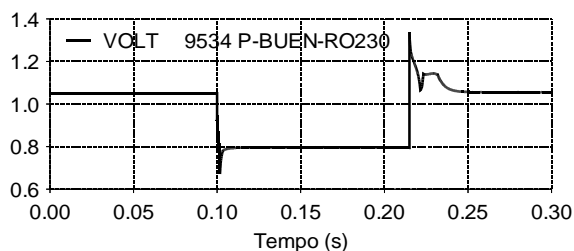


FIGURA 3 – Tensão na barra do curto

```
DEVT IMPR
(Tp) (Tempo) (EI) (Pa) Nc(Ex) (%) (ABS)
MDSH .1000 9534 -100.
MDSH .1004 9534 -100.
MDSH .1008 9534 -100.
MDSH .1012 9534 -100.
MDSH .1016 9534 -100.
MDSH .2150 9534 500.
ABCI .2150 9534 9530 1
999999
```

#### Sem mensagem de erro

FIGURA 2 – Evento aplicado escalonadamente

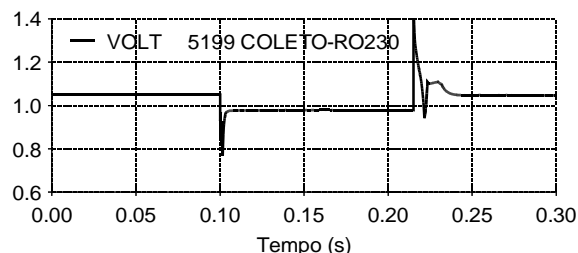


FIGURA 4 – Tensão na barra coletora de PV

#### 4.2 Não convergência do Modelo-Rede CC

Para ilustração do problema de convergência devido ao laço modelo-rede CC, aplicou-se o evento de curto-circuito monofásico em Araraquara2 com perda da LT Araraquara2 – Fernão Dias. Obteve-se então a seguinte mensagem de erro:

\*\*\* ERRO ESTSOL-100 \*\*\*

T= 0.2052s

Numero maximo de iteracoes excedido no processo alternado de solucao CA-CC (constante ITMR).

REDE CC NAO CONVERGENTE

X-----X-----X-----X-----X-----X

Num Barra Nome Da Barra Num Elo Nome Do Elo Erro Max

X-----X-----X-----X-----X-----X

1105 RET+ABB02 1002 SANT-ARAABBPOLO2 0.6161E-02

MODELO CC DE CONTROLE DE CONVERSORES NAO CONVERGENTE

X-----X-----X-----X-----X-----X

Num Cnv Modelo Num Elo Nome Do Elo Variavel Erro Max

X-----X-----X-----X-----X-----X

1201 101 1001 SANT-ARAABBPOLO1 ALFA(Saida Final) 0.3884E-02

Para solução do problema utilizou-se a opção DLCC no primeiro segundo de simulação, com o mesmo passo de integração de 0,2 ms, resolvendo-se o problema. A seguir são apresentados resultados de simulação, correspondente à tensão em Araraquara 2 e o ângulo de disparo do Retificador de um dos bipolos do Madeira, que apresentava problema de convergência.

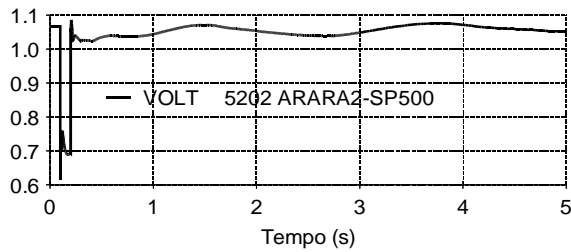


FIGURA 5 – Tensão na barra do curto

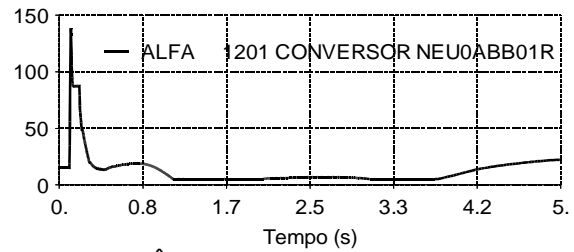


FIGURA 6 – Ângulo de disparo de bipolo do Madeira

#### 4.3 Dificuldades de convergência da Rede CA

No sistema exemplo não foi encontrado um caso específico de não convergência da rede CA devido ao processo alternado de solução da rede CA por injeções de corrente. Por este motivo, não foi possível apresentar um caso de simulação em que o método de Newton resolvesse um problema específico de convergência. De qualquer modo, neste item será apresentada a diferença entre a taxa de convergência da solução da rede CA com e sem a opção NEWT ativada. Considerou-se o caso anterior para quatro instantes de tempo: 0,100 s, 0,105 s, 0,250 s e 0,600 s, que mostra a diferença do comportamento de convergência dos métodos original e o método de Newton desenvolvido, nos períodos de tempo pós impacto, logo após a aplicação do evento de curto-circuito, logo após a remoção do curto-circuito, e após algum tempo passado do evento. O desempenho do método de Newton em relação à convergência é muito superior, como pode ser comprovado na Tabela 1, onde são mostrados, para cada método, os erros máximos de cada iteração, para as quatro primeiras e quatro últimas iterações, quando existirem.

Por exemplo, na solução pós-impacto, o método original converge em 45 iterações, com taxa de convergência extremamente baixa, enquanto que o método de Newton converge em apenas 5 iterações com taxa de convergência quadrática. Para os outros tempos o método de Newton converge em apenas 2 iterações, enquanto que o método original leva de 11 a 15 iterações.

TABELA 1 - Erros máximos ao longo das iterações da solução de rede CA, para quatro diferentes tempos

t = 0,100 s		t = 0,105 s		t = 0,250 s		t = 0,600 s	
Original	Newton	Original	Newton	Original	Newton	Original	Newton
01 0.2022	01 0.4982	01 1.104E-	01 2.206E-	01 9.590E-	01 1.918E-	01 1.146E-	01 2.292E-
02 0.1081	02 9.111E-	2	2	4	3	3	3
03 5.834E-	2	02 5.518E-	02 8.891E-	02 4.795E-	02 1.520E-	02 5.730E-	02 1.493E-
2	03 4.598E-	3	9	4	8	4	9
04 3.200E-	3	03 2.757E-		03 2.398E-		03 2.865E-	
2	04 1.179E-	3		4		4	
:	5	04 1.377E-		04 1.199E-		04 1.432E-	
42 1.649E-	05 4.20E-	3		4		4	
6	11	:		:		:	
43 1.290E-		12 5.163E-		08 7.494E-		09 4.477E-	
6		6		6		6	
44 1.009E-		13 2.541E-		09 3.747E-		10 2.238E-	
6		6		6		6	
45 7.888E-		14 1.242E-		10 1.874E-		11 1.119E-	
7		6		6		6	
		15 6.015E-		11 9.368E-		12 5.596E-	
		7		7		7	

#### 4.3 Avaliação do desempenho computacional

Para a avaliação do desempenho computacional, utilizou-se como caso de referência um curto-circuito fase-terra em Cachoeira Paulista, seguida da abertura da LT Cachoeira Paulista-Fernão Dias. Este caso é simulado sem problemas na versão original do ANATEM, sem as alterações realizadas para melhoria do processo de convergência, e por este motivo pode ser utilizado na comparação de desempenho computacional entre a versão antiga e nova, assim como realizar comparações entre as diversas opções de execução criadas com a versão nova. Serão considerados dois fatores: tempo computacional e quantidade de iterações das simulações. Todas as simulações apresentam os mesmos resultados visuais, dentro da tolerância considerada no cálculo. Nas Figuras 7 e 8 são apresentados alguns resultados das simulações: tensão na barra de Cachoeira Paulista e correntes dos elos de corrente contínua presentes no SIN.

As simulações foram de 15 s, com passo de tempo  $\Delta t$  variável, ou seja,  $\Delta t = 0,2$  ms no período de 0 a 0,5 s,  $\Delta t = 0,5$  ms no período de 0,5 s a 2 s e  $\Delta t = 1$  ms no período de 2 a 15 s. A plotagem foi feita com frequência de cinco passos de integração. A precisão utilizada foi a recomendada (TEMD=1e-4, TETE=1e-4 e TABS=1e-7).

Inicialmente fez-se a comparação das simulações utilizando computadores com diferentes características, a saber:

- Comp 1: Desktop Intel Core2 Quad, Q9550, 4 núcleos, 2.83 GHz, Windows 7 32 Bits, Memória de 4 Gbytes

- Comp 2: Desktop HP Compaq, AMD Phenon II, X4 955, 4 núcleos, 3.2 GHz, Windows 7 32 Bits, Memória 4 Gb.
- Comp 3: Laptop HP Core i7-3610QM, 4 núcleos (8 lógicos), 2.3 GHz, Windows 8.1 64 bits, Mem. 8 Gb
- Comp 4 Desktop Dell Precision T7600, Intel Xeon CPU E5-2620, 6 núcleos (12 lógicos), 2 GHz, Windows 7 64 Bits, Memória de 16Gb.

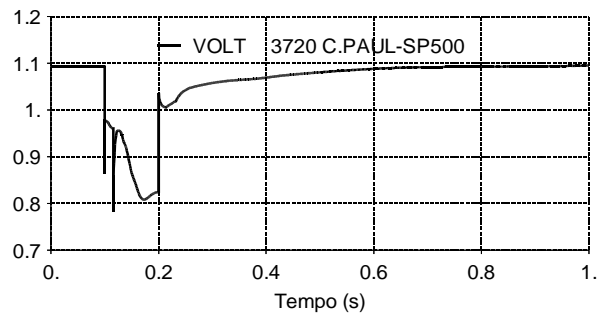


FIGURA 7 – Tensão na barra do curto

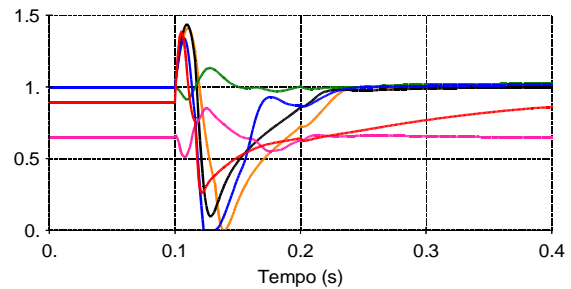


FIGURA 8 – Correntes em pu dos elos HVDC: Itaipu (vermelho), Madeira ABB (azul), Madeira Areva (verde), BtB Porto Velho (rosa), Belo Monte Estreito (preto), B. Monte N. Iguaçu (laranja)

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os gráficos do desempenho computacional da simulação do mesmo caso anterior, feita múltiplas vezes, utilizando o recurso de processamento paralelo do ANATEM (simulação em lote). À esquerda é apresentado o gráfico de barras dos tempos de simulação de 1, 4 e 8 casos para os computadores 1, 2 e 3 e 1, 6 e 12 casos para o quarto computador, já que este último possui 6 núcleos físicos e 12 lógicos. Em cinza é apresentado o tempo de simulação de um caso único multiplicado pela quantidade de simulações, correspondendo ao tempo teórico de execução dos casos em sequência utilizando um único núcleo, para verificar o ganho conseguido com o processamento paralelo. À direita é apresentado o gráfico de tempo computacional dividido pela quantidade de simulações, que mostra uma taxa correspondente ao tempo por simulação que se consegue ao utilizar processamento paralelo. Verifica-se por este gráfico que os computadores 3 e 4 possuem as maiores eficiências de paralelização, ou seja, os tempos por simulação decaem significativamente com o aumento do número de simulações, atingindo valores de tempo bem menores quando se utiliza a quantidade de simulações igual ao número de núcleos lógicos (8 para o computador 3 e 12 para o 4). Para os computadores 1 e 2 a redução de tempo por simulação é desprezível quando se passa de 4 para 8 simulações, já que eles só possuem 4 núcleos.

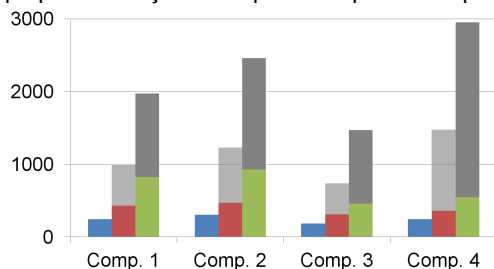


FIGURA 9 – Tempo total das simulações em cada computador, junto com o tempo teórico de uso de um único núcleo, em cinza

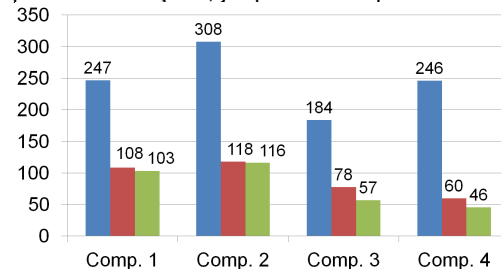


FIGURA 10 – Tempos totais das simulações para cada computador, divididos pela quantidade de simulações

A próxima avaliação realizada foi em relação à eficácia da melhoria dos métodos de solução de rede CA, ou seja, das opções NEWT e DNWT desenvolvidas. Para isto utilizou-se o computador 3, que possuía melhor desempenho na simulação de caso único. Considerou-se quatro simulações em sequência do mesmo caso, a primeira utilizando a versão 10.4.6 original do ANATEM e as três outras utilizando a nova versão 10.5, com as opções padrões, a opção NEWT e a opção DNWT, respectivamente. Nas Figuras 11 e 12 a seguir são apresentados os tempos computacionais e a média de iterações de solução de rede CA por passo, para cada período de tempo simulado.

Pela Figura 11, verifica-se que entre as versões 10.4.6 e 10.5 já há um ganho de tempo significativo, devido às melhorias realizadas, neste caso, principalmente a extrapolação quadrática das variáveis de interface CA-CC. Verifica-se ainda que o método de Newton foi bem mais lento do que o convencional e o DNWT um pouco mais lento, no entanto, pela Figura 12, comprova-se a grande superioridade nas características de convergência de ambos, pela redução significativa da média de quantidade de iterações de rede CA por passo de tempo.



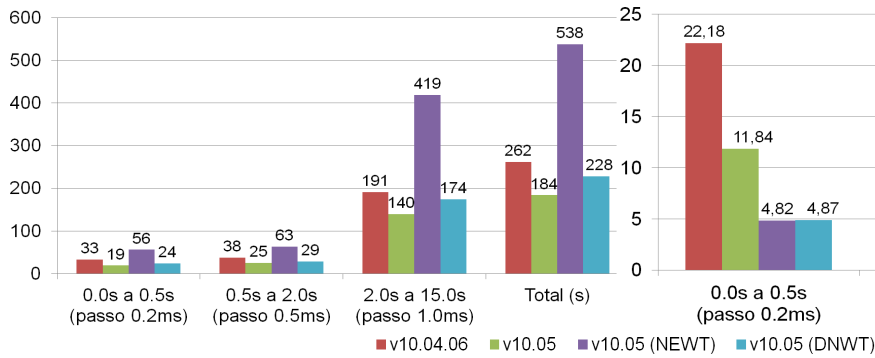


FIGURA 11 – Tempos computacionais

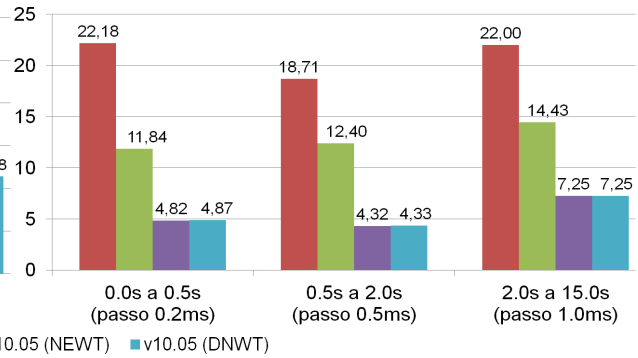


FIGURA 12 – Média de Iterações de Rede CA por passo

A próxima avaliação foi em relação à melhoria da solução do sistema CC, ou seja, as opções DLCC e SADD, a nova solução do CCC utilizando o método da condutância variável e a extrapolação quadrática das variáveis de interface. Utilizou-se o computador 3. Considerou-se apenas o período inicial da simulação, uma vez que o uso de DLCC ou SADD com passos de tempo maiores não é recomendável por perda de precisão. Foram simulados quatro casos, o primeiro com a versão original 10.4.6 do ANATEM e os seguintes com a nova versão 10.5, com as opções padrões, a opção DLCC e as opções DLCC e SADD simultâneas. Nas Figuras 13 e 14 são apresentados os resultados dos tempos computacionais e média de iteração da solução modelo-rede CC por passo. Observa-se que as opções padrões da nova versão já incluem a nova solução do CCC utilizando condutância variável e a extrapolação quadrática.

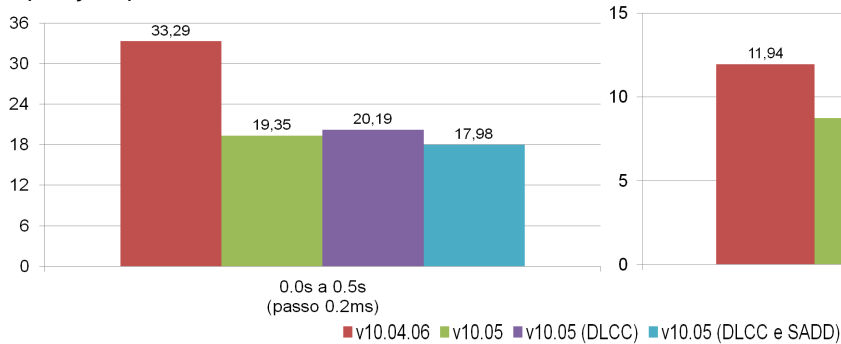


FIGURA 13 – Tempos computacionais

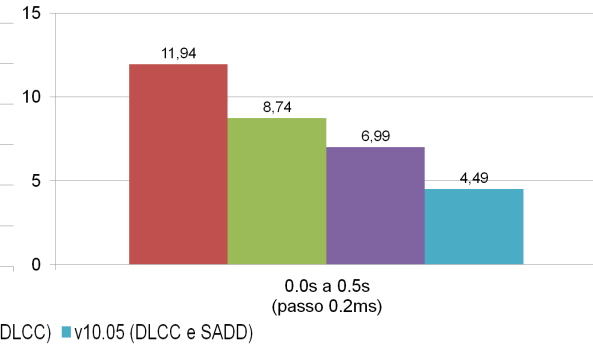


FIGURA 14 – Média de Iterações de Rede CC por passo

Entre as versões 10.4.6 e 10.5 houve ganho significativo tanto de tempo computacional como quantidade de iterações. Comparando-se as diversas opções de execução da nova versão 10.5, o ganho de tempo computacional não foi significativo entre elas, já a quantidade de iterações foi significativamente reduzida. Embora a melhora de tempo computacional não seja tão significativa, em casos problemáticos estas opções são muito importantes pois podem ser utilizadas como solução de problemas de convergência em casos que não teriam outra alternativa de solução. Deve-se observar que estas opções só devem ser utilizadas com passo de integração reduzido.

A última avaliação realizada foi em relação ao tempo computacional da simulação deste cenário de 2020 com o atual banco de dados do ONS do planejamento da operação. Utilizou-se o cenário de outubro 2014, carga pesada, aplicando-se um curto-circuito em Cachoeira Paulista 500 kV e abrindo-se o circuito Cachoeira Paulista-Campinas. No caso do ONS, Belo Monte não está em operação e há uma quantidade razoavelmente inferior de modelos.

Além disto, no caso de 2020, devido às incertezas de modelagem dos empreendimentos futuros, há uma utilização muito grande de modelos "típicos", não consolidados, que dificultam a convergência do caso por não estarem otimizados para operação real do sistema, que só é conseguida na prática após o comissionamento. No computador 2, o tempo de simulação do cenário 2020 foi de 308 s, sendo que no cenário 2014 este tempo passou para 179 s (42% de redução). Foi ainda possível simular o cenário 2014 com passo de tempo de 1 ms nos primeiros 2 s de simulação e 3 ms para o tempo restante de 2 s até 15 s, sem qualquer alteração visual nos resultados de simulação. Neste caso o tempo passou a ser de 72 s (77% de redução). Para o cenário 2020 não foi possível utilizar estes tempos, pois as simulações se alteravam e ao final não convergia na mudança para o passo de 3 ms. Estes percentuais de ganho de tempo se mantinham aproximadamente para as simulações nos outros computadores.

## 5.0 - CONCLUSÃO

Foram feitos diversos novos desenvolvimentos no ANATEM com o objetivo de melhor identificação e solução de problemas associados à não convergência de casos de simulação. Estes desenvolvimentos foram apresentados no artigo, assim como, a aplicação em casos do SIN em cenário futuro já contemplando os elos HVDC do Madeira e Belo Monte em plena capacidade. As soluções desenvolvidas permitiram a simulação dos diversos eventos, inclusive alguns que não eram possíveis de serem executados na versão original do ANATEM. Foram ainda apresentados resultados de avaliação do desempenho computacional das soluções propostas e desenvolvidas.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) CEPEL, "Manual do Usuário do Programa ANATEM versão 10.5.1", Rio de Janeiro, 2014.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Sergio Gomes Junior. graduou-se em Engenharia Elétrica em 1992 pela Universidade Federal Fluminense, concluiu Mestrado e Doutorado também em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1995 e 2002 e em 2004 fez um pós-doutorado na *Northeastern University* em Boston, Estados Unidos. Desde 1994 é pesquisador do Cepel trabalhando na pesquisa e desenvolvimento de programas computacionais para a análise de sistemas de potência e desde 2000 é gerente do projeto PacDyn no Cepel. Desde 2010 também é professor adjunto da Universidade Federal Fluminense. Suas principais áreas de interesse são: dinâmica e controle de sistemas de potência, eletrônica de potência, harmônicos e transitórios eletromagnéticos. É *Senior Member* do IEEE e membro do Comitê de Estudos B4 do Cigré-Brasil.



Fabricio Lucas Lirio graduou-se em Engenharia Elétrica em 1998 na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) em 2000. Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) em 2007. Desde 2000 trabalha no CEPEL, onde atua no Departamento de Redes Elétricas (DRE). Trabalha no desenvolvimento do Programa ANATEM, participou dos estudos da alternativa CCAT para o Aproveitamento das usinas do rio Madeira e Belo Monte e auxilia no desenvolvimento dos Programa PacDyn. Seus campos de interesse são: Transmissão CCAT, Equipamentos FACTS, Controle aplicado a Sistemas de Potência, bem como Estudos de Transitórios Eletromagnéticos, Eletromecânicos e Harmônicos. É membro do Comitê de Estudos B4 do Cigré-Brasil.



Agilio Coutinho Netto graduou-se em Engenharia Elétrica em 2011 na Universidade Federal Fluminense (UFF). Concluiu as disciplinas de Mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), tendo sido bolsista de mestrado do CEPEL de 2012 a 2014. Em 2014 trabalhou por um ano como Analista de Projetos da Fundação Padre Leonel Franca da PUC-Rio em desenvolvimento de produtos computacionais para análise de sistemas de potência. Seus principais campos de interesse são relacionados à Dinâmica de Sistemas de Potência e Estabilidade Eletromecânica.



Leonardo Pinto de Almeida graduou-se em Engenharia Elétrica pela UFRJ em 2000, obteve o título de Mestre na área de Sistemas de Potência na COPPE/UFRJ. Desde 1998 trabalha no CEPEL. Atualmente, encontra-se no Departamento de Redes Elétricas e tem se dedicado à realização de estudos elétricos de sistemas de potência solicitados por diferentes agentes do Setor. Participa dos estudos do Projeto de Transmissão em CCAT para o Aproveitamento das usinas do rio Madeira, e mais recentemente, da usina de Belo Monte. É membro do Comitê de Estudos B4 (CCAT e Eletrônica de Potência) do Cigré-Brasil. Suas principais áreas de interesse são: Transmissão CCAT, Equipamentos FACTS, Controle aplicado à Sistemas de Potência e Estudos de Transitórios Eletromagnéticos e Eletromecânicos.