



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

FI/GAT/20
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

**AValiação DO AMORTECIMENTO DE OSCILAÇÕES ELETROMECAÑICAS NO PACDYN UTILIZANDO
LUGAR DAS RAÍZES COM VARIAÇÕES NO FLUXO DE POTÊNCIA**

Sergio Gomes Junior (*)
CEPEL, UFF

Tiago Santana do Amaral
CEPEL

Thiago J. Masseran A. Parreiras
CEPEL

RESUMO

A avaliação do amortecimento de oscilações em sistemas de potência é de vital importância, tanto no planejamento como na operação, pois um comportamento dinâmico inadequado neste aspecto pode causar diversos problemas como, por exemplo, restrições aos valores de intercâmbio entre áreas, limitações nos despachos de usinas, desligamentos de equipamentos e, em situações extremas, blecautes. Por este motivo estes estudos procuram achar cenários críticos do ponto de vista de amortecimento de oscilações para evitá-los por meio de restrições operativas ou modificar o sistema por reforços ou ajustes de controladores e sinais estabilizadores. Neste sentido, o programa computacional PacDyn utiliza diversas ferramentas matemáticas de análise linear para auxiliar na identificação e proposta de melhorias de problemas de oscilações em sistemas de potência. Neste artigo é apresentado o novo recurso do PacDyn de traçado do Lugar das Raízes variando-se parâmetros de rede. Os objetivos do método desenvolvido são auxiliar na busca de pontos de operação críticos para problemas de oscilações, com o objetivo de evitá-los, verificar se mudanças programadas no ponto de operação são seguras ou buscar pontos de operação mais adequados. O método proposto exigiu a comunicação entre o PacDyn e o programa ANAREDE de cálculo de fluxo de potência que foi implementada computacionalmente pela criação de uma biblioteca de ligação dinâmica (DLL) denominada ANABRIDGE. Além do método proposto desenvolvido, serão descritos aspectos computacionais e apresentados resultados do método aplicado ao atual Sistema Interligado Nacional.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilidade a Pequenos Sinais, Amortecimento de Oscilações, Lugar das Raízes, Análise Linear.

1.0 - INTRODUÇÃO

O programa PacDyn utiliza a análise linear para avaliação do amortecimento de oscilações eletromecânicas. A modelagem para análise linear é baseada na formação de uma matriz Jacobiana, correspondente à linearização das equações de todo o sistema de potência ao redor de um ponto de operação. Nesta linearização, as equações dos diversos equipamentos, rede de transmissão e sistema de controle são consideradas de forma simultânea e acoplada. A utilização do método de decomposição modal permite a obtenção dos autovalores da matriz Jacobiana que definem as características dos modos de oscilação naturais que estarão presentes no sistema quando pequenos distúrbios são aplicados ao sistema.

A avaliação da frequência e amortecimento destes modos de oscilação servirão para identificação dos possíveis problemas de instabilidade ou baixo amortecimento de oscilações, elementos responsáveis por tais problemas, equipamentos que mais "sentem" tais oscilações e as possíveis soluções que podem ser adotadas para mitigação destes problemas.

(*) 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

Uma das limitações do método de análise linear é a dependência do ponto de operação. O sistema pode operar em diversas condições e em diversas configurações, ou seja, diferentes níveis de carregamento, topologia, ajustes, despachos etc. Para cada ponto de operação, haverá modos de oscilações com características distintas. Com o objetivo de facilitar esta análise foi desenvolvido o recurso no PacDyn de "Múltiplos Cenários" em que diversos pontos de operação podem ser analisados e comparados automaticamente e simultaneamente, com o objetivo principal de identificação dos pontos de operação mais críticos para a análise. Este trabalho foi apresentado no SEPOPE de 2012 [1] e se baseia na análise de múltiplos pontos de operações isolados, ou seja, de forma discreta e não contínua.

Para este artigo, buscou-se apresentar um método baseado na avaliação do impacto do ponto de operação de forma contínua. Para isto, implementou-se a possibilidade de variação do ponto de operação, criando-se uma comunicação entre o PacDyn e o programa de cálculo de fluxo de potência ANAREDE, de forma que passou a ser possível modificar o ponto de operação e calcular os novos polos do sistema. Para visualização gráfica destes polos utilizou-se o método do Lugar das Raízes com a variação dos parâmetros do fluxo de potência em vez da variação dos parâmetros de controle.

Nesta primeira versão da nova implementação do PacDyn, considerou-se variações da carga, geração de potência ativa e parâmetros de linha de transmissão. A variação da carga possibilita avaliar aumentos de carregamento do sistema para identificação das margens de estabilidade a pequenos sinais. A variação da geração de potência ativa permitirá verificar o impacto da mudança de despacho entre usinas para aumento ou diminuição dos níveis de amortecimento ou frequência de oscilações. A variação dos parâmetros de linhas permitirá analisar de forma contínua como é a transição dos polos na abertura de uma determinada linha, pelo aumento gradativo da sua impedância e redução do carregamento capacitivo.

Do ponto de vista computacional, criou-se uma biblioteca de ligação dinâmica (DLL) denominada ANABRIDGE que tem como objetivo receber as informações de alterações de rede do PacDyn, executar o ANAREDE para convergir o fluxo e potência com as alterações solicitadas e gerar um arquivo com as informações do novo fluxo de potência para ser lido pelo PacDyn. O PacDyn utiliza então o método DPSE [2] ou QR para cálculo dos polos na nova condição operativa e, após repetir este processo para todas as variações solicitadas, apresenta graficamente a variação dos polos no plano s , onde é possível observar as variações de frequência e amortecimento dos polos monitorados relativas às alterações realizadas no fluxo de potência.

Serão apresentados alguns detalhes da implementação computacional do método proposto e resultados da sua aplicação na análise a pequenos sinais do Sistema Interligado Nacional (SIN). Ressalta-se que os resultados apresentados utilizam arquivos de dados no formato ANATEM, mostrando que é possível utilizar o método para solucionar problemas encontrados na simulação do ANATEM, não linear no domínio do tempo, sem que seja necessária a preparação adicional de dados ou arquivos. Acredita-se que o método proposto será importante nas avaliações de estabilidade a pequenos sinais do SIN e trará mais robustez às soluções de problemas de oscilações propostas pelo PacDyn.

2.0 - A COMUNICAÇÃO COM O ANAREDE

No método proposto de traçado de lugar das raízes variando-se parâmetros de rede, uma das grandes dificuldades de implementação computacional seria a comunicação com o programa ANAREDE. Neste item serão descritos os aspectos computacionais deste desenvolvimento.

No ANAREDE, todos os dados de fluxo de potência podem ser armazenados em formato binário próprio, denominado arquivo histórico ou "savecase". Para gerenciamento deste arquivo de dados por outros programas do CEPEL já haviam sido criadas as seguintes bibliotecas DLL:

- RETCAS.DLL: Tem por finalidade principal a leitura de um caso de fluxo de potência.
- SAVCAS.DLL: Tem por finalidade principal a gravação de um caso de fluxo de potência.
- ANADLL.DLL: Tem por finalidade principal a execução de um caso de fluxo de potência a partir de um arquivo histórico previamente gravado.

Essas bibliotecas contam com uma Interface de Programação de Aplicativos (ou API) que permite o fácil carregamento e gravação de dados de/para arquivos em formato binários do ANAREDE. A ideia por trás da implementação dessas bibliotecas é que os programas do CEPEL possam ler ou escrever toda (ou a maior parte) dos dados elétricos a partir dos arquivos em formato binário do ANAREDE. Nesse sentido, desde que essas bibliotecas foram desenvolvidas, elas têm sido usadas com sucesso por vários programas do CEPEL para a troca de dados e execução de fluxo de potência.

No entanto, para a implementação do Lugar das Raízes, houve a necessidade da alteração, não da maior parte dos dados elétricos, mas de apenas um ou alguns poucos dados de certos elementos do sistema elétrico. Neste caso, havia a necessidade de criação de um caso de fluxo de potência que fosse quase idêntico a outro caso gravado em um arquivo binário, exceto por um ou alguns poucos dados de determinados elementos (a potência gerada por uma usina, a carga em uma determinada barra do sistema ou os parâmetros de uma linha de transmissão). O mesmo tipo de necessidade também havia para o programa NH2 do CEPEL de análise de confiabilidade.

Isso motivou a criação de uma nova biblioteca, que foi chamada de ANABRIDGE. Apesar de a motivação inicial ter sido possibilitar a alteração de dados de elementos específicos, a implementação dessa nova biblioteca criou novas possibilidades e oportunidades, que serão discutidas a seguir.

2.1 Implementação

Para possibilitar a alteração de dados de apenas um elemento específico do sistema elétrico, a biblioteca ANABRIDGE gerencia a troca de dados e a execução de fluxo de potência como ilustra a figura 1.

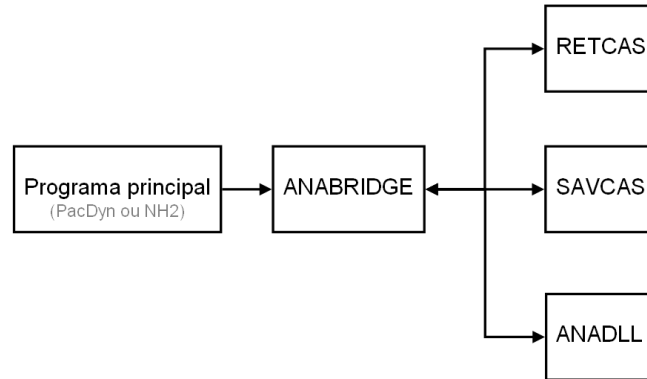


FIGURA 1 – Comunicação entre a ANABRIDGE e os demais programas.

Nessa figura, a arquitetura implementada com a ANABRIDGE centraliza a gerência e a execução dos dados. Quando o programa principal necessita alterar os dados de um caso de fluxo de potência, a funcionalidade exposta pela ANABRIDGE faz quatro coisas:

- 1) Aloca a menor quantidade possível de memória necessária para reproduzir aquele caso de fluxo de potência. Essa menor quantidade de memória é determinada automaticamente pela ANABRIDGE com base no tipo de alteração.
- 2) Chama os procedimentos adequados nas bibliotecas do ANAREDE (RETCAS, SAVCAS e ANADLL). A própria ANABRIDGE gerencia quais os procedimentos são necessários para cada caso.
- 3) Cria novos processos no sistema operacional para fazer a execução do fluxo de potência.
- 4) Retorna os dados para o programa principal.

Tudo isso é gerenciado pela ANABRIDGE de maneira completamente transparente ao programa principal. Essa arquitetura de alocação e execução centralizadas traz diversas vantagens, tanto para os desenvolvedores dos programas que utilizam a ANABRIDGE, como vantagens que podem ser percebidas pelo usuário. Essas vantagens podem ser percebidas em três aspectos: na gerência de dados, na alocação dinâmica de memória e na execução assíncrona.

2.2 Gerência de dados

Para a gerência da troca de dados, a ANABRIDGE aloca internamente toda a memória necessária. Isso facilita a implementação e manutenção de soluções por parte do programa principal porque, para alterar os dados de um único elemento do sistema elétrico, é necessário chamar uma única função da biblioteca com alguns poucos parâmetros.

Além disso, como a mesma biblioteca é compartilhada por vários programas, atualizações nas bibliotecas do ANAREDE (RETCAS, SAVCAS e ANADLL) se refletem apenas em alterações no código da ANABRIDGE e não no código dos programas principais.

No entanto, a vantagem principal em ter uma biblioteca única que gerencie os dados de fluxo de potência é o isolamento de memória. Como toda a memória necessária é alocada pela biblioteca em outro espaço de memória do sistema operacional, os vetores de dados do programa principal permanecem íntegros e intactos antes e depois da alteração de dados e da execução do fluxo de potência. Isso diminui a possibilidade da corrupção dos dados do programa principal (no caso de um fluxo de potência divergente, por exemplo) e, consequentemente, diminui a possibilidade de efeitos colaterais imprevistos.

2.3 Alocação dinâmica

Toda a alocação de memória por parte da ANABRIDGE é realizada de maneira dinâmica. Isso diminui em muito o consumo da memória do sistema, uma vez que apenas a memória necessária para cada caso de fluxo de potência é alocada e gerenciada pela ANABRIDGE. Por exemplo: a alocação estática de todos os vetores do ANAREDE

consome cerca de 700 MB da memória virtual da máquina, enquanto que a alocação dinâmica de todos os vetores para o caso do SIN consome cerca de 50 MB (uma economia, nesse caso, de mais de 90%).

Essa alocação dinâmica também torna possível carregar e comparar vários casos diferentes em memória. Anteriormente, quando os programas principais acessavam diretamente as bibliotecas RETCAS e SAVCAS, alocar de maneira estática os dados de dois casos diferentes de fluxo de potência para compará-los era um processo difícil e passível de erros uma vez que exigia a duplicação de toda a estrutura de dados de fluxo de potência na memória do programa principal. A ANABRIDGE supera essa dificuldade com a alocação dinâmica e automática dos dados, tornando possível o carregamento de vários casos de fluxo de potência ao mesmo tempo (o número de casos é determinado apenas pelos recursos de memória do sistema).

2.4 Execução assíncrona

A ANABRIDGE gerencia a execução do fluxo de potência de maneira assíncrona. Isso significa que, quando o programa principal deseja executar um fluxo de potência, a ANABRIDGE está encarregada de criar e gerenciar um processo separado no sistema operacional para isso.

Essa execução assíncrona, aliada à alocação dinâmica de memória é, na verdade, crucial para a adição de funcionalidades em determinados casos. Isso porque o sistema operacional (Windows) limita a quantidade de memória virtual disponível para cada processo. Com isso, programas que já operam normalmente próximos a esse limite (como é o caso do PacDyn) estariam muito limitados a novas implementações. No entanto, como a biblioteca ANABRIDGE gerencia a criação de processos diferentes no sistema operacional, o programa principal pode, de fato, ultrapassar esses limites.

A execução assíncrona também tem a possibilidade de aumentar a velocidade de processamento. Enquanto o processo de execução do fluxo de potência está em execução, gerenciado pela ANABRIDGE, o algoritmo do programa principal pode continuar executando outras tarefas. Esse duplo processamento (da execução do fluxo de potência e do algoritmo do programa principal) acontece de forma paralela, o que pode reduzir o tempo total de processamento.

3.0 - O MÉTODO DO LUGAR DAS RAÍZES

O método do Lugar das Raízes ("Root-Locus" em inglês) é muito utilizado na área de controle e, de forma geral, consiste no traçado do lugar geométrico correspondente à variação da posição dos polos de um sistema linear ou linearizado no plano complexo, para uma dada variação paramétrica. Especificamente, foi criada toda uma teoria e regras para traçado manual do lugar das raízes para variações de um ganho em uma malha de realimentação do sistema, que são comumente encontradas em diversos livros [3], [4] e apresentadas nos cursos de Engenharia. No caso de variações de múltiplos parâmetros ou parâmetros diferentes de ganhos, algumas destas regras deixavam de ser válidas, e nestes casos, alguns autores passaram a utilizar outras nomenclaturas para o Lugar das Raízes, como o "Root Contour" para variações de múltiplos parâmetros. No artigo será utilizada a nomenclatura genérica de Lugar das Raízes para o lugar geométrico dos polos do sistema para uma variação de qualquer quantidade e tipo de parâmetros.

No PacDyn, o método do Lugar das Raízes, já implementado há alguns anos, permite variar qualquer quantidade de parâmetros do sistema de controle. O usuário especifica os parâmetros que serão variados, os valores iniciais e finais de cada um e a quantidade de pontos a serem considerados. Com isto, o algoritmo básico do método consiste dos seguintes passos:

1. Dados os valores iniciais e finais de cada parâmetro e a quantidade de pontos, o programa divide cada intervalo de variação pela quantidade de pontos especificada e calcula os novos pontos a variar de forma proporcional.
2. Para cada novo ponto, o programa:
 - a. Remonta a matriz Jacobiana;
 - b. Aplica um método numérico para cálculo dos polos.
3. Ao final, os polos calculados são apresentados no plano complexo para visualização gráfica e, desde que seja usada uma quantidade razoável de pontos, a aparência dos pontos discretos é suficiente para dar a ideia visual de como seriam os ramos contínuos, imaginando-se a ligação entre os pontos vizinhos.

Os métodos numéricos para cálculo de polos atualmente disponíveis são o QR e o DPSE [2]. O método QR permite o cálculo de todos os polos do sistema, no entanto a sua carga computacional é muito grande, assim como a exigência de memória. Já o método DPSE permite o cálculo de forma muito rápida, eficiente e robusta de um conjunto reduzido de polos dominantes de uma dada função de transferência. O uso do método QR é mais simples por não precisar de qualquer dado adicional para o cálculo. O método DPSE, por outro lado, requer estimativas iniciais para os polos dominantes, assim como a definição de uma função de transferência, embora isto não represente dificuldade na aplicação prática.

3.1 Ajustes iniciais do algoritmo para a variação dos parâmetros de rede

Para a variação dos parâmetros de rede, o algoritmo do método do Lugar das Raízes precisou ser ajustado em dois aspectos: no cálculo inicial dos novos pontos (passo 1 do algoritmo anterior) e na remontagem da matriz Jacobiana (passo 2.a do algoritmo anterior). Na implementação atual, considerou-se a variação de carga, geração de potência ativa e parâmetros de linha de transmissão. Nesses casos os ajustes feitos são aqueles descritos a seguir.

No momento do cálculo inicial dos novos pontos (passo 1), caso o usuário tenha especificado a variação de parâmetros de rede, o PacDyn chama a função LoadFile da ANABRIDGE. Essa função carrega na memória da ANABRIDGE a menor quantidade possível de informações relativas ao arquivo histórico ANAREDE cujos parâmetros de rede se desejam variar. Nesse ponto, os dados do sistema elétrico ainda não são carregados na memória da ANABRIDGE. Esse carregamento é adiado até ser estritamente necessário. Isso diminui o consumo de memória no caso de haverem erros durante o processo.

Nesse momento, a função LoadFile retorna para o PacDyn o endereço de memória onde os dados daquele arquivo histórico serão armazenados na memória da ANABRIDGE. Aqui se percebe uma das vantagens dessa arquitetura para a manutenção do PacDyn: em vez de declarar todo um espaço de memória para armazenar os dados do fluxo de potência, o PacDyn precisa apenas declarar uma variável para armazenar o endereço de memória onde os dados serão carregados pela ANABRIDGE. Essa implementação, de fato, separa os espaços de memória do PacDyn e do ANAREDE (gerenciado pela ANABRIDGE).

3.2 Ajustes dos parâmetros de rede e reconvergência do fluxo de potência

O outro ajuste que precisou ser feito no algoritmo mostrado anteriormente consiste na remontagem da matriz Jacobiana. No caso de o usuário ter especificado a variação dos parâmetros de rede, no momento da remontagem da matriz Jacobiana, o programa tem armazenado os novos valores para todos os parâmetros que serão variados nesse ponto.

Com isso, o PacDyn pode chamar as funções da ANABRIDGE que realmente fazem as alterações dos dados de rede do caso em estudo. Essas funções são as seguintes:

- No caso da variação dos parâmetros de carga, o PacDyn tem armazenado o valor para o próximo ponto da carga ativa. Então, calcula-se o valor para o próximo ponto de carga reativa que seja proporcional a esse. Isso é feito através da equação $Q_{L_novo} = Q_{L_anterior} \cdot \frac{P_{L_novo}}{P_{L_anterior}}$. Com esse novo ponto, são chamadas as funções SetBusPLOAD e SetBusQLOAD da ANABRIDGE.
- No caso da variação dos parâmetros de geração ativa, o PacDyn já tem armazenado o valor para o próximo ponto de geração ativa. Assim, só é necessário chamar a função SetGerPGEN da ANABRIDGE.
- No caso da variação dos parâmetros de linha de transmissão, o PacDyn tem armazenado o valor para o próximo ponto da reatância série da linha (X). Então, calcula-se o valor de um fator de variação que é $f = \frac{X_{novo}}{X_{anterior}}$. Com esse fator, a variação dos outros parâmetros da linha pode ser calculada como:
 $R_{novo} = R_{anterior} \cdot f$ e $B_{C_novo} = B_{C_anterior} \cdot f$, onde R é a resistência série da linha e B_C é a susceptância shunt da linha. Com esses novos valores, são chamadas as funções SetLinB, SetLinG e SetLinBc da ANABRIDGE para realmente fazerem as alterações. Note que com o aumento de f para valores altos, o efeito é a desconexão da linha (R , X aumentam e B_C diminui).

Em todos os casos anteriores, as funções da ANABRIDGE executam um procedimento semelhante: caso os dados em questão (dados de barra, de gerador ou de linha de transmissão) ainda não tenham sido carregados na memória da ANABRIDGE, essas funções os carregam. A seguir, elas realizam a alteração dos dados carregados na memória da ANABRIDGE apenas nos elementos onde essa alteração é necessária.

Depois que todos os parâmetros do novo ponto do Lugar das Raízes já foram devidamente ajustados, o PacDyn chama a função LoadFlow da ANABRIDGE. Essa função verifica se os dados necessários para a convergência do fluxo de potência já foram carregados do arquivo histórico ANAREDE original. Caso algum dado ainda não tenha sido carregado, ela os carrega. Depois, ela salva um arquivo histórico ANAREDE contendo os dados de fluxo de potência que estão na memória da ANABRIDGE. Por fim, ela cria um novo processo do sistema operacional para executar um fluxo de potência a partir desse arquivo salvo. Essa função retorna valores indicativos da convergência do caso de fluxo de potência.

Se o fluxo de potência anterior convergiu, o PacDyn recarrega do arquivo histórico salvo os dados do ponto de operação do fluxo de potência e procede com a remontagem da matriz Jacobiana como anteriormente. A seguir, os demais passos do algoritmo do Lugar das Raízes (2.b e 3) são executados a partir desse novo ponto de operação.

4.0 - RESULTADOS

O método de Lugar das Raízes variando-se parâmetros de rede foi aplicado a caso mais atual disponível do Sistema Interligado Nacional (SIN) distribuído pelo ONS, Outubro 2014, carga pesada, relativo ao Planejamento Mensal da Operação. O sistema possui 5465 barras, 7579 circuitos, 295 máquinas síncronas equivalentes de usinas e os elos de corrente contínua de Itaipu, um bipolo e o back-to-back CCC do Madeira. A matriz jacobiana possui 6.959 estados, dimensões de 56.652 linhas e colunas e 161.364 elementos não nulos.

O primeiro cálculo de lugar das raízes com variação de parâmetros de rede deste artigo foi realizado, através do método DPSE, levando-se em consideração a variação da geração de potência ativa da Usina Espora (Barra 3744), de 10 a 110% de seu valor no ponto de operação original, onde foi monitorado o modo eletromecânico de oscilação local dessa usina. O resultado desse cálculo pode ser visualizado na figura 2.

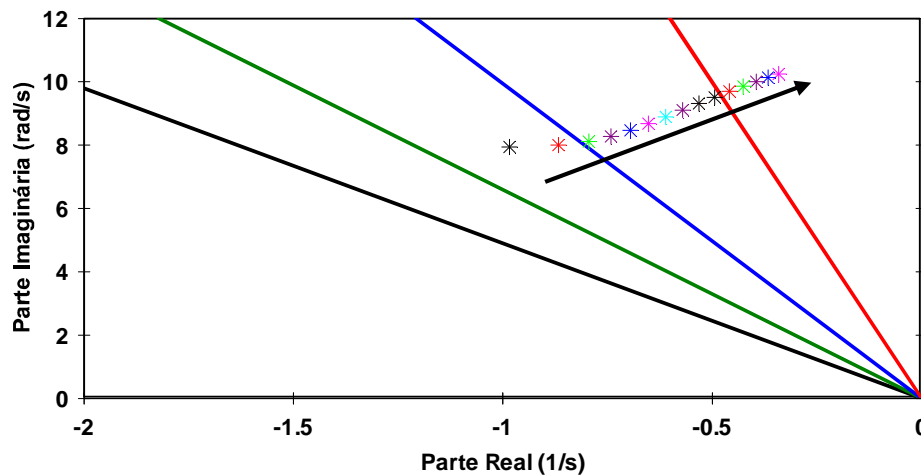


FIGURA 2 – Lugar das raízes com variação de geração de potência ativa.

Analisando o resultado mostrado na figura 2, é possível notar que, com o aumento do despacho de potência ativa da Usina Espora, o seu modo de oscilação local vai caminhando para o lado direito do plano complexo, diminuindo, dessa forma, o seu amortecimento, chegando a ficar com o amortecimento final menor que 5%.

Depois, foi realizado um novo cálculo do lugar das raízes, também através do método DPSE, levando-se em consideração a variação dos parâmetros de um circuito do tronco de 765kV do sistema de escoamento da Usina Itaipu 60Hz entre as SEs Foz do Iguaçu e Ivaiporã, de 100 a 1000% de seu valor original, com o objetivo de simular a abertura desse circuito. Nesse cálculo, foi monitorado o modo eletromecânico de oscilação local de Itaipu 60Hz. O resultado desse cálculo pode ser visualizado na figura 3.

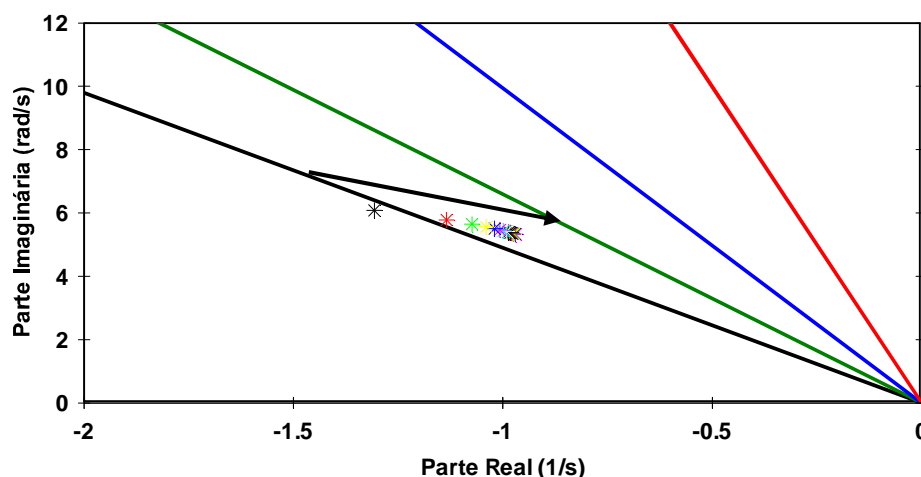


FIGURA 3 – Lugar das raízes com variação de parâmetros de linha de transmissão.

Analisando o resultado mostrado na figura 3, é possível notar que, com o aumento impedância das linhas de transmissão do tronco de 765kV do sistema de escoamento de Itaipu, o modo de oscilação local dessa usina vai

caminhando para o lado direito do plano complexo, diminuindo, dessa forma, o seu amortecimento, chegando a ficar com o amortecimento final próximo a 17%.

O último cálculo do lugar das raízes deste trabalho foi realizado levando-se em consideração a variação da carga do barramento 3702 do SIN, da região de Rio Verde, que está localizada próximo ao ponto de conexão da Usina Espora (Barra 3744). Para esse cálculo foi utilizada uma variação de 10 a 480% do valor original da carga desse barramento e foi monitorado o modo eletromecânico de oscilação local da Usina Espora. O resultado desse cálculo pode ser visualizado na figura 4.

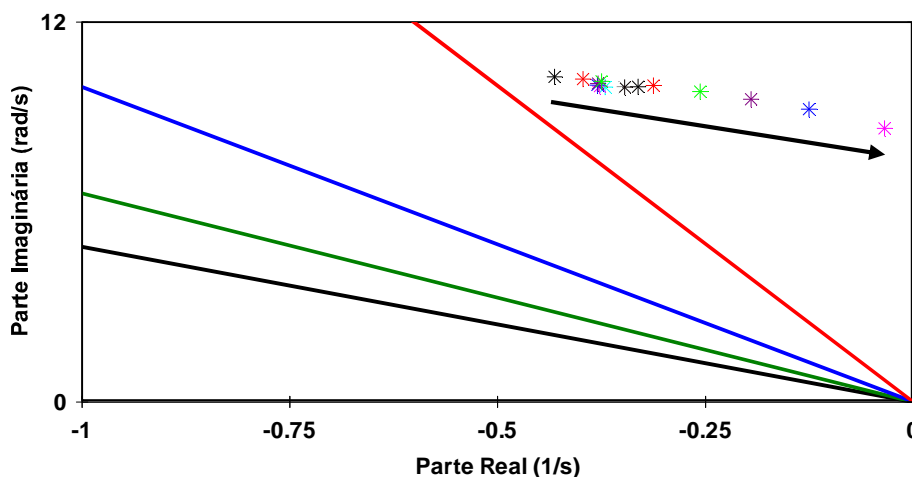


FIGURA 4 – Lugar das raízes com variação de carga.

Analisando o resultado mostrado na figura 4, é possível notar que, com o aumento da carga do barramento 3702 do SIN, o modo de oscilação local dessa usina vai caminhando para o lado direito do plano complexo, diminuindo, dessa forma, o seu amortecimento, chegando a ficar com o amortecimento final menor que 0,5%.

5.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo, o método de Lugar das Raízes variando parâmetros de rede foi implementado no programa PacDyn e aplicado em um caso exemplo do Sistema Interligado Nacional. Analisando os resultados obtidos, é possível notar a importância da nova ferramenta desenvolvida no PacDyn para o estudo de estabilidade de sistemas elétricos de potência, através da qual será possível identificar a sensibilidade da localização no plano complexo de modos de oscilação do sistema em relação a parâmetros de rede elétricas, tais como: carga, geração de potência ativa e parâmetros de linhas de transmissão.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PARREIRAS, T. J. M., GOMES JUNIOR, S., TARANTO, G. N., AMARAL, T. S., “Desenvolvimentos no PacDyn para Análise da Estabilidade a Pequenos Sinais de Múltiplos Cenários em Sistema de Potência de Grande Porte”, XII SEPOPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- [2] N. Martins, “The dominant pole spectrum eigensolver”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 12, pp. 245-254, February 1997.
- [3] K. Ogata, Modern Control Engineering. Prentice Hall, 2001.
- [4] B. C. Kuo, Automatic Control Systems, 7th ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1995.

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.



Tiago Santana do Amaral graduou-se em Engenharia Elétrica em 2004 pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, concluiu Mestrado também em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2007. Desde 2006 é pesquisador do Cepel trabalhando na pesquisa e desenvolvimento de programas computacionais para a análise de sistemas de potência. Suas principais áreas de interesse são: confiabilidade e dinâmica e controle de sistemas de potência.



Thiago Jose Masseran Antunes Parreiras possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2009) e mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2012). Atualmente cursa doutorado em engenharia elétrica na Universidade Federal do Rio de Janeiro e é Profissional Pesquisador II do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em sistemas elétricos de potência, atuando principalmente nos seguintes temas: dinâmica, controle e estabilidade de sistemas elétricos.