



**GRUPO IV  
ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GAT)**

**UMA FERRAMENTA PARA SIMULAÇÃO DE FENÔMENOS DINÂMICOS DE LONGA DURAÇÃO**

*Jorge Luiz de A. Jardim      Marcos Affonso Fernandes      Carlos Alberto da Silva Neto*

**FURNAS CENRAIS ELÉTRICAS S.A.**

**RESUMO**

Este trabalho apresenta as principais características de uma ferramenta computacional desenvolvida para simulação de fenômenos dinâmicos de longa duração. Mostra-se a implementação de técnicas de controle do passo e ordem de integração, as facilidades gráficas e mecanismos inteligentes de apoio ao usuário na análise de simulações.

**PALAVRAS-CHAVE**

Simulação dinâmica de longa duração, funções de energia, integração numérica.

**1.0 INTRODUÇÃO**

A simulação de fenômenos dinâmicos em uma janela de tempo de 10 a 20 segundos pode não ser suficiente para a análise de sistemas de potência. Uma avaliação segura da estabilidade do sistema, para as condições operativas atuais, requer muitas vezes que o período de simulação se estenda muito além dos 20 segundos normalmente utilizados [1,2,9]. Por outro lado, estender a simulação implica em um esforço computacional muito alto para os programas de simulação de passo fixo [3,6], resultando em tempos de CPU inconvenientemente altos. Uma forma de tornar esta análise muito mais eficiente é a utilização de métodos de integração que façam uso de passos variáveis [4,6,7,8].

O requisito básico da integração numérica é que esta represente com boa exatidão a solução verdadeira dos modelos do sistema. Intuitivamente pode-se entender que durante transitórios rápidos a integração requeira passos pequenos para conseguir a fidelidade da solução das equações do sistema, e que a medida que as

oscilações do sistema vão sendo amortecidas a fidelidade pode ser mantida com passos maiores. Por exemplo, com as oscilações totalmente amortecidas (regime permanente), teoricamente seria possível se utilizar passos infinitos. Os métodos de integração que utilizam o passo variável se baseiam neste princípio. A própria instabilidade numérica, freqüentemente relacionada a métodos de integração, são na realidade resultantes de acumulação de erros numéricos. Então, ao se buscar a fidelidade da simulação, automaticamente se exerce um controle sobre a estabilidade numérica. O resultado do controle do passo é uma ferramenta muito mais precisa e eficiente.

Este artigo apresenta uma nova ferramenta computacional – PSim - concebida para estudos de fenômenos dinâmicos de longa duração (estabilidade de tensão, controle automático de geração, treinamento de operadores e outros) que utiliza a técnica de variação do passo de integração e da ordem de integração. É feita uma breve descrição dos métodos numéricos empregados [7,8], são descritos os critérios de modelagem e as características principais do PSim. Um aspecto importante é que a metodologia empregada permite que a mesma ferramenta seja utilizada para simulações de curta, média e longa duração, o que facilita sobretudo a utilização do programa e a manutenção do banco de dados.

Outra facilidade implementada é o cálculo de funções de energia que permitem acessar margens de estabilidade e índices de sensibilidade como, por exemplo, as unidades geradoras que mais oscilam. Estas características são importantes porque nem sempre se consegue detectar problemas no sistema pela simples inspeção de um pequeno subconjunto de variáveis. Informações sobre atuação de dispositivos de proteção e controle também são disponibilizadas.

A ferramenta permite ainda a interatividade com o usuário. Ou seja, é dada a facilidade de se interromper a execução do programa em qualquer instante para modificação de parâmetros ou término da simulação. Três formas de plotagem são disponibilizadas: em tempo de execução; pós-execução e pré-especificada; pós-execução e pós-especificada.

## 2.0 MÉTODOS NUMÉRICOS

As equações diferenciais e algébricas dos modelos dinâmicos representados no programa são descritas utilizando-se uma formulação semi-implícita da seguinte forma

$$\dot{y} = f(y, x, t) \quad (1)$$

$$0 = g(y, x, t) \quad (2)$$

onde  $y \in R^n$  é o vetor de variáveis de estado (ou de fase) que representam os modelos dinâmicos dos elementos de controle da rede (máquinas síncronas, reguladores de tensão e velocidade, compensadores estáticos, etc.),  $x \in R^m$  é o vetor de variáveis algébricas (tensões da rede, correntes, e algumas variáveis dos modelos).

### 2.1 Métodos de Integração

O algoritmo utilizado na solução numérica de (1) e (2) é do tipo ‘Linear Multistep’ - LM. Os métodos LM implementados na forma de “preditor-corretor” em geral são de fácil implementação e maior eficiência computacional. Dentre os vários métodos do tipo LM possíveis, o PSim utiliza apenas os métodos das famílias Adams-Bashforth-Moulton - ABM - e ‘Backward Differentiation Formulae’ - BDF [4,5,7] de ordem menor ou igual a dois. A restrição em relação a ordem se deve ao fato do sistema de equações estar sujeito a um grande número de descontinuidades. Neste caso, a limitação da ordem facilita a implementação dos algoritmos. Tais métodos são implementados na forma preditor-corretor com ordem variando de 1 a 2 e passo de integração variando de 0.001s a 40s.

Os métodos ABM e BDF de primeira ordem são idênticos e correspondem ao método de Euler Simples -  $y_{n+1} = y_n + hf_n$  - (previsão) e Euler Modificado -  $y_{n+1} = y_n + hf_{n+1}$  - (correção). O ADM de segunda ordem corresponde aos métodos trapezoidal explícito para previsão -  $y_{n+1} = y_n + 0.5h(3f_n - f_{n-1})$  - e implícito para a correção -  $y_{n+1} = y_n + 0.5h(f_{n+1} + f_n)$ . O BDF de segunda

ordem é dado por  $y_{n+1} = 3y_n - 3y_{n-1} + y_{n-2}$  e  $y_{n+1} = \frac{4}{3}y_n - \frac{1}{3}y_{n-1} + \frac{2}{3}f_{n+1}$ .

O método ABM é utilizado para as equações diferenciais. O método BDF para as equações algébricas e para as equações diferenciais com constante de tempo muito pequenas (inferiores a 10 ms) [7]. Por questões de eficiência computacional as informações com relação aos passos anteriores são armazenadas através do vetor Nordsieck [4].

### 2.2 Solução das Equações

A aplicação do método de integração às equações (1) e (2) resulta em um sistema de equações algébricas da seguinte forma [1]

$$0 = y_{n+1} - \mathbf{b}_{n+1}hf(y_{n+1}, x_{n+1}) - C \quad (3)$$

$$0 = g(y_{n+1}, x_{n+1}), \quad (4)$$

onde  $C$  é a soma ponderada dos termos  $y$  e  $\dot{y}$  anteriores a  $t_n$  e  $\mathbf{b}_{n+1}$  é a constante que multiplica  $f_{n+1}$  nas respectivas fórmulas dos métodos numéricos de integração. A solução das Eq. (3 e 4) é obtida no PSim através do método de Newton modificado (ou desonesto). A matriz Jacobiano só é recalculada e fatorada quando ocorre a mudança de passo de integração, não se obtém convergência em três iterações, ou ocorrem grandes descontinuidades nas equações do sistema. Em geral o algoritmo requer de duas a três iterações para convergir.

### 2.3 Variação do Passo e da Ordem

A escolha adequada dos métodos de integração e de solução das equações algébricas possibilita a implementação de mecanismos eficientes para variação do passo e ordem de integração, obtendo-se assim algoritmos extremamente rápidos de integração numérica.

O mecanismo para variação do passo funciona da seguinte forma. Ao final de cada passo verifica-se se a estimativa do erro de truncamento local está dentro da tolerância permitida. Em caso positivo, aceita-se o passo e determina-se, com base no mesmo erro, se há margem para aumento do passo. Em caso negativo, rejeita-se o passo e determina-se que passo será necessário para que o erro se mantenha dentro da tolerância.

A estimativa de erro de truncamento local é dada por (série de Taylor)

$$E_k = h^{k+1} y^{(k+1)} / (k+1)!,$$

onde  $k$  é a ordem do método.

O máximo passo de integração  $\bar{h}$  pode ser calculado considerando-se que para este passo o erro seria igual ao da tolerância. Desta forma, obtém-se

$$\bar{h} \approx h[t / E_k]^{1/(k+1)},$$

onde  $t$  é a tolerância. Considerando-se que pode haver erros nesta estimativa, adota-se um passo um pouco inferior ao passo máximo.

Sempre que houver mudança de passo, avalia-se também a ordem dos métodos. Isto permite se alterar simultaneamente o passo e a ordem de integração. A ordem é escolhida de forma a que os termos da série de Taylor truncada sejam sempre decrescentes [12]. A razão para esta estratégia é que a expansão da série de Taylor se comporte como esperado para segunda ordem somente se a magnitude dos termos até terceira ordem formam um seqüência decrescente. Se isto não acontece a ordem 1 é adotada.

O programa evita a troca de passo e ordem com muita freqüência. O mesmo passo é mantido por pelo menos quatro intervalos de integração. A simulação sempre é reinicializada com ordem 1.

## 2.4 Descontinuidades

Um problema difícil na implementação de programas de simulação é o tratamento de descontinuidades. Os métodos numéricos que utilizam apenas um passo, tratam deste problemas com um pouco mais de facilidade, embora sejam computacionalmente menos eficiente [10,12]. Os métodos de integração que utilizam a informação de mais de um passo requerem a variação do passo e da ordem para tratar do problema. Esta é uma outra vantagem do uso do passo e ordem variáveis. Caso haja necessidade o passo pode ser reduzido de modo a coincidir com a descontinuidade. Entretanto, a memória dos passos anteriores pode causar erros de estimação. Por isso, se faz necessário forçar a reinicialização do processo de integração na descontinuidade.

A forma com que uma descontinuidade é tratada no PSim depende do seu tipo. Os três tipos a seguir são tratados pelo PSim.

- a) Chaveamentos na rede e em sistemas de controle;
- b) não linearidades em equações algébricas;
- c) não linearidades em variáveis de estado.

Os chaveamentos podem ser produzidos por eventos programados pelos usuários (por exemplo, uma falta na

rede) ou eventos gerados internamente (por exemplo, atuação de um limitador através de um seletor de sinais ou atuação de uma proteção). Dependendo da severidade do chaveamento medida pela norma do vetor de derivadas, o PSim reinicializa o processo de integração e resolve uma nova condição inicial utilizando-se um passo de integração igual a zero. Em seguida faz-se o passo igual ao passo mínimo e deixa-se que o algoritmo varie o passo automaticamente. Os chaveamentos gerados internamente são executados, sempre que necessário, ao final de cada passo. Caso a diferença entre o momento correto de ocorrer o chaveamento (obtido por interpolação) e o instante ao final do passo seja maior que uma tolerância (por exemplo, 10ms), o passo é rejeitado e o novo passo é calculado para que os dois instantes coincidam. Ao reinicializar o processo as informações dos passos anteriores são anuladas, a matriz Jacobiano é atualizada, e a ordem de integração é ajustada para 1.

As não linearidades em equações algébricas alteram o cálculo de  $f_{n+1}$ . A matriz Jacobiano só é atualizada caso haja problemas de convergência. O controle de passo se encarrega de erros numéricos acima da tolerância.

As não linearidades em variáveis de estado (saturação ou interrupção de integração) também alteram o cálculo de  $f_{n+1}$ . Neste caso, as variáveis de estado são modeladas como blocos integradores dotados de uma chave na entrada. Uma operação desta chave, provoca a anulação dos valores passados da respectiva variável. O controle de passo se encarrega de erros numéricos acima da tolerância.

## 3.0 MODELOS

De uma forma geral o PSim adota duas formas diferentes para implementação de modelos. Aqueles modelos essencialmente contínuos, porém sujeitos a eventuais descontinuidades, são modelados da forma descrita nos itens anteriores, ou seja, com solução simultânea e controle de erro. Neste grupo estão as máquinas síncronas e seus controladores, elos de corrente contínua, etc.).

Os modelos que são essencialmente descontínuos, ou seja o seus efeitos no sistema ocorrem sempre de forma descontínua (por exemplo, alguns modelos de transformadores com Tap variável e proteções), são modelados como processos geradores de eventos. Ao término de cada passo, tais modelos são processados e verifica-se a necessidade de gerar algum evento. Tais eventos gerados internamente podem provocar a reinicialização do processo de integração dependendo da norma do vetor de derivadas. Se esta norma é acima de uma tolerância, a integração é reinicializada. Em

caso contrário, o controle de erro fica responsável pela exatidão dos resultados. A precisão do instante de chaveamento também é monitorada. No caso de erro excessivo o passo é reduzido.

No momento todos os modelos são internos ao programa. Facilidades para que o usuário possa construir seus próprios modelos serão incluídas futuramente no PSim. Para isto pretende-se incluir algoritmos de diferenciação automática que permitam a montagem da matriz Jacobiano eficientemente, evitando-se a queda acentuada da velocidade de processamento, que em geral se observa em programas de simulação, quando se usa uma grande quantidade de modelos definidos pelos usuários.

O programa contém atualmente os seguintes modelos:

- máquinas síncronas (6 modelos);
- reguladores de tensão (9 modelos);
- estabilizadores de sistemas de potência (4 modelos);
- reguladores de velocidade (4 modelos);
- limitadores de sobreexcitação (1 modelo);
- limitadores de subexcitação (1 modelo);
- compensador de impedância (1 modelo);
- compensador estático (2 modelos);
- elo de corrente contínua (1 modelo);
- modelo de carga estática exponencial com variação com a frequência (várias combinações);
- motor de indução (1 modelo);
- capacitor série controlado (1 modelo);
- transformador com tap variável (3 modelos);
- controle automático de geração (1 modelo).

Os controles são modularizados de forma a permitir combinações e reaproveitamento de módulos existentes. Por exemplo, nos sistemas de excitação os limitadores são modelados independentemente do regulador de tensão.

É permitido ao usuário utilizar mais de um equipamento por barra. Por exemplo, vários geradores podem ser conectados à mesma barra, ou compensadores estáticos podem ser conectados a um terminal de elo de corrente contínua.

#### 4.0 RECURSOS GRÁFICOS

O PSim permite três tipos de saída gráfica: o gráfico em tempo de execução; o gráfico pós execução de grandezas pré-selecionadas; e o gráfico pós-execução e pós-processado.

Uma das vantagens de se ter o gráfico durante o tempo de execução é permitir ao usuário detectar qualquer problema com a simulação e interrompê-la se necessário [10]. Este tipo de gráfico é fundamental

também para a interatividade com o usuário, permitindo ações manuais de diversos tipos.

Os gráficos pós-execução são mais apropriados para análises detalhadas. Neste caso o PSim fornece a possibilidade de pré-selecionar as variáveis de interesse ou deixar para selecioná-las após o processamento do caso.

Os três tipos de saídas gráficas não são mutuamente exclusiva. Entretanto, cada uma destas adiciona uma carga computacional a mais. Então, dependendo do tipo de uso do programa, o usuário pode precisar ser seletivo. A opção de selecionar saídas gráficas após o processamento pode ser muito custosa dependendo das dimensões do sistema simulado, pois todos os estados do sistema são armazenados em arquivo a cada passo de integração. Isto requer uma grande quantidade de acesso ao disco rígido impactando a velocidade de processamento. Portanto, esta característica só deve ser utilizada para processamentos em que a velocidade não seja o fator principal.

As opções de gráficos pré-selecionados e gráficos em tempo de execução têm um impacto relativamente pequeno no tempo de simulação.

A entrada de dados pode ser através de arquivos texto, banco de dados ou através de caixas de diálogo.

#### 5.0 CARACTERÍSTICAS INTELIGENTES

Uma das deficiências das ferramentas de simulação, frequentemente mencionadas na literatura, é a dificuldade de se obter índices qualitativos e de sensibilidade do comportamento dinâmico dos sistemas. Tais índices são obtidos com mais facilidade em ferramentas lineares, por exemplo.

O PSim está dotado de dois recursos com o objetivo de mitigar estes problemas. Um dos recursos consiste da utilização de funções de energia [11] para extração de informações relativas a margens de estabilidade, tempo crítico de abertura de falta, máquinas síncronas que mais oscilaram durante uma perturbação, etc. Estes são recursos poderosos para a detecção de limites de transmissão, determinação de características de proteção e identificação dos equipamentos que devem ser melhor trabalhados em termos de controle para atenuação de instabilidades.

As funções de energia são úteis também para a determinação de instabilidades angulares em que as proteções não separam os subsistemas instáveis. O PSim oferece a opção de auto-terminar uma simulação quando da detecção da instabilidade. Isto é sempre conveniente porque em tais condições a simulação

deixa de ser representativa do que ocorreria no sistema. Isto se deve ao fato de que com os pólos das máquinas síncronas deslizando umas com relação as outras, ocorrem transitórios de alta frequência que necessitariam de modelos mais elaborados e intervalos de integração muito reduzidos para serem representados corretamente.

O outro recurso consiste em armazenar em um arquivo todos os eventos ocorridos durante uma simulação. Tais eventos em conjunto com uma base de conhecimento simples, permitem ao programa identificar e orientar o usuário com relação a possíveis problemas do sistema. Esta característica de auto identificação de problemas é muito importante porque a quantidade de variáveis é muito grande e se torna difícil a observação de todos os problemas através de algumas poucas variáveis selecionadas.

## 6.0 ASPECTOS COMPUTACIONAIS

Os algoritmos matemáticos do PSim estão programados em FORTRAN 90/95 e a interface em Visual Basic\*. O PSim está programado de forma estruturada e faz uso intensivo de encapsulamentos e heranças, que facilitam a manutenção e alteração do código.

## 7.0 DESEMPENHO

O tempo de execução do PSim depende não só das dimensões do sistema mas também da quantidade e natureza dos eventos programados ou gerados internamente. Isto porque a cada evento o passo de integração é diminuído para permitir a simulação com fidelidade de transitórios rápidos.

Uma simulação de dois eventos severos (aplicação de falta com remoção de linha e corte de carga) em uma janela de 100s com o Sistema Elétrico Sul-Sudeste Brasileiro (1800 barras e 80 geradores), demandou aproximadamente 35 segundos de cpu (Pentium 200 MHz). Para este mesmo caso foram utilizados 309 passos de integração e houve apenas 20 atualizações/fatorações da matriz Jacobiano.

## 8.0 CONCLUSÕES

O trabalho apresentou os principais elementos que constituem uma nova ferramenta – PSim - para simulações dinâmicas de curta, média e longa duração.

A principal característica do PSim é a eficiência computacional. Os resultados de simulação mostram uma eficiência computacional muito maior que as obtidas com programas convencionais que fazem uso de passo e ordem de integração fixos.

Futuros desenvolvimentos incluem a adição de novos modelos, implementação de facilidades de modelagem pelo usuário e recursos gráficos adicionais.

## 9.0 AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à FINEP pelos recursos computacionais através do projeto RECOP.

## 10.0 REFERÊNCIAS

- (1) M. Stubbe, "Long Term Dynamics in Power Systems: An International Survey of the Present Status and the Perspective of Long Term Dynamics in Power Systems", CIGRÉ, SC-38 WG38.02 TF08, Final Report - Phase I, 1993.
- (2) M. Stubbe, "Long Term Dynamics in Power Systems: Phase II", CIGRÉ, SC-38 WG38.02 TF08, Final Report- Phase II, 1995.
- (3) J. Arrillaga and C.P. Arnold, "Computer Modelling of Electrical Power Systems", John Wiley & Sons, 1983.
- (4) C.W. Gear "Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1971.
- (5) R. L. Burden and J. D. Faires, "Numerical Analysis", PWS-KENT Publishing Company, 1989.
- (6) B. Stott, "Power System Dynamic Response Calculations", Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No. 2, Feb 1979.
- (7) J.Y.Astic, A. Bihain and M. Jerosolimski, "The mixed Adams - BDF Variable Step Size Algorithm to Simulate Transient and Long Term Phenomena In Power Systems", IEEE Trans. on PS, Vol. 9, No. 2, May 1994.
- (8) J. Jardim 'Utilização de Ferramentas de Simulação Dinâmica de Longa Duração na Análise de Fenômenos de Colapso de Tensão e no Treinamento de Operadores', XIV SNPTEE, Belém – PA, 1997.
- (9) J. Jardim, X. Vieira Filho, 'Long Term Dynamics: Its Perspective in Brazil; VI SEPOPE, Recife - PE, Maio, 1996.
- (10) J.Jardim, B. Cory, N. Martins, 'Efficient Transient Stability Assessment Using Transient Energy Functions', XIII PSCC, Trondheim – Noruega, 1999.
- (11) B.S. Bennett, 'Simulation Fundamentals', Prentice Hall Internacional, 1995.

- (12) K. Brenan, S. Campbell, and L. Petzold, 'Numerical Solution of Initial Value Problems in Differential-Algebraic Equations'. SIAM, Philadelphia, second edition, 1996.

## 11. BIOGRAFIAS

**Jorge L. Jardim** nasceu em 26 de maio de 1957. Obteve o grau de Engenheiro Eletricista (sist. Potência) em 1982 pela UFF, MSc. pela PUC-RJ e o PhD pela Universidade de Londres. Desde 1984 trabalha para Furnas Centrais Elétricas SA. É professor adjunto da UFF. Seus interesses são nas áreas de simulação, estabilidade e controle de sistema de sistemas de potência, otimização e sistemas de gerenciamento de energia.

**Marcos A. Fernandes** nasceu em 01 de janeiro de 1968. Obteve o grau de Engenheiro Eletricista (Sist. Potência) pela UFRJ em 1993. Desde de 1993 trabalha para Furnas Centrais Elétricas SA. Seus interesses são nas áreas de sistemas de controle, simulação de sistemas e ciências da computação.

**Carlos Alberto da S. Neto** nasceu em 16 de agosto de 1962, obteve o grau de Eng. Eletricista em 1984 pela UFRJ e MSc pela COPPE/UFRJ em 1999. Trabalha para Furnas Centrais Elétricas S.A. Seus interesses são na área de simulação e otimização de sistemas de potência.