



Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT

Análise de Desempenho de Simulações no Programa Anatem com Passo de Integração Variável Aplicado ao Método de Solução Trapezoidal Implícito Alternado

**LÍGIA ROLIM DA SILVA*(1); NÍCOLAS ABREU ROCHA LEITE NETTO(1); PAULO PEREIRA MACHADO JR(2);
SERGIO GOMES JR(1,2); FABRICIO LUCAS LIRIO(1);
CEPEL(1); UFF(2);**

RESUMO

Os passos de integração utilizados nas simulações de transitórios eletromecânicos no programa Anatem são tradicionalmente mantidos fixos ao longo da simulação e, em casos específicos, são reduzidos manualmente pelo usuário no período de aplicação de distúrbios ou intervalos de difícil convergência. A determinação do passo de integração a ser utilizado sempre esteve a critério do usuário, sem a flexibilidade de ser ajustado automaticamente ao longo da execução para tornar o desempenho computacional mais eficiente. Em vista disso, foi implementada no programa Anatem uma metodologia de solução do sistema alternado de equações algébricas e diferenciais com passo de integração variável, visando melhoria de desempenho sem o comprometimento da precisão dos resultados da simulação. Neste trabalho serão apresentados detalhes da implementação desta metodologia, bem como a análise de desempenho do Anatem com este novo recurso. Serão comparados resultados de simulações dinâmicas de casos de pequeno porte e do Sistema Interligado Nacional com passo fixo e variável, considerando diferentes topologias e contingências.

PALAVRAS-CHAVE

Passo de Integração Variável, Anatem, Simulação Dinâmica, Método de Integração Trapezoidal Implícito Alternado

1.0 - INTRODUÇÃO

O programa Anatem, desenvolvido pelo Cepel e amplamente utilizado em estudos de transitórios eletromecânicos de sistemas elétricos de potência de grande porte, utiliza o método de integração trapezoidal implícito alternado para solução do sistema de equações algébricas e diferenciais que representam o comportamento dinâmico do sistema [1]. Assim, igualmente ocorre em todo método de integração numérica, o passo de integração utilizado no Anatem requer uma relação de compromisso entre a precisão da solução e o desempenho computacional consequente.

De forma geral, a solução do conjunto de equações algébricas da rede elétrica e diferenciais dos modelos dinâmicos dos equipamentos e controladores do sistema pode ser realizada de forma simultânea ou alternada. O primeiro método se baseia na solução simultânea do sistema de equações, por exemplo, pelo método de Newton-Raphson; enquanto o último, soluciona sequencialmente o conjunto de equações algébricas e diferenciais dos modelos dinâmicos dos equipamentos e controladores do sistema, alternadamente com as soluções matriciais da rede.

O passo de integração definido no programa Anatem é tradicionalmente mantido fixo ao longo de toda a simulação, porém, em determinados instantes de tempo, como em torno da aplicação de distúrbios, o passo de integração costuma ser reduzido manualmente pelo usuário, principalmente em casos de difícil convergência. Apesar da possibilidade de variar o passo manualmente, o programa não possuía até então a flexibilidade de se ajustar

automaticamente ao valor de passo mais adequado, de modo a tornar mais eficiente o desempenho computacional em tempo de execução, e ainda, garantir a precisão dos resultados e a convergência dos casos de estabilidade.

A representação do Sistema Interligado Nacional (SIN), por meio da Base de Dados de Transitórios Eletromecânicos [2] do programa Anatem, apresenta elevado nível de detalhamento dos modelos dos equipamentos do sistema e seus controladores, impactando significativamente o tempo total de simulação, principalmente em função da crescente quantidade de equipamentos modelados com a estrutura de Controladores Definidos pelo Usuário (CDU). Além disso, o crescimento natural do sistema acarreta crescimento da base de dados dinâmicos e, consequentemente, o tempo total de execução das simulações também aumenta.

Com a finalidade de melhorar o desempenho computacional e a convergência das simulações de casos de grande porte, foi implementada no Anatem a solução alternada implícita com passo de integração variável em tempo de execução, baseada na metodologia proposta em [3]. A utilização deste recurso removerá do usuário do Anatem a responsabilidade de definir os passos de integração ideais para cada trecho da simulação, permitindo uma comutação automática eficiente para o passo de integração de valor mais adequado, dentro de uma lista de passos previamente definida.

Portanto, neste trabalho será apresentada a metodologia de passo variável do Anatem, bem como a análise de desempenho do programa com este novo recurso. Adicionalmente, serão destacadas as vantagens e limitações desta metodologia na simulação de casos de pequeno e grande porte; sobretudo serão comparados os resultados de simulações dinâmicas de casos do SIN com passo de integração fixo e variável, considerando diferentes topologias e contingências. Destaca-se, ainda, a influência dos parâmetros de controle do recurso de passo variável que podem ser ajustados pelo usuário.

2.0 - PASSO DE INTEGRAÇÃO VARIÁVEL

A metodologia de variação de passo de integração explorada neste trabalho é fundamentada no algoritmo proposto em [3], que se aplica ao esquema de solução trapezoidal implícito alternado, compatível com o método utilizado no programa Anatem. Este algoritmo permite identificar o passo de integração mais adequado, em tempo de execução, dentre os valores contidos em uma lista de passos previamente definida pelo usuário.

De forma geral, o comportamento esperado para a variação do passo de integração é tal que no início da simulação, antes da aplicação de distúrbios, ocorre a inicialização a partir de um ponto de operação de regime permanente e espera-se que todas as variáveis do sistema estejam estabilizadas e, portanto, o passo de integração máximo da lista deveria ser adequado para começar a simulação. Imediatamente após a perturbação: o passo de integração deve assumir o valor mínimo da lista de passos, garantindo a melhor precisão para os resultados, e gradualmente aumentar para melhorar a eficiência computacional, conforme detecta-se o amortecimento das oscilações e um novo ponto de regime permanente.

A estratégia de variação do passo de integração desenvolvida no Anatem se baseia no fato de que os períodos da simulação com dinâmica mais assentada são aceitáveis para a utilização passos de integração maiores em relação aos utilizados durante os períodos mais oscilatórios [4]. Nesta análise, o principal critério para a variação do passo é apoiado na análise do **erro de extrapolação quadrática das tensões** das barras de corrente alternada (CA) do sistema. Esta metodologia será apresentada detalhadamente nas subseções a seguir, nas versões do **algoritmo original** e **modificado**, sendo este último, aquele efetivamente implementado no programa Anatem.

2.1 Algoritmo de Passo Variável Original

O algoritmo original de variação do passo de integração considera a análise do erro de extrapolação quadrática das tensões das barras CA do sistema. A extrapolação quadrática das variáveis algébricas é realizada no início de cada passo de integração, visando a redução do número de iterações na solução do método trapezoidal implícito, à medida que aproxima as estimativas iniciais das variáveis aos seus valores futuros com base no comportamento parabólico. A diferença entre os valores estimados via extrapolação quadrática e os valores convergidos em cada passo de integração é definido como **erro de extrapolação quadrática**.

A partir da análise do erro de extrapolação quadrática das tensões (ϵ_v), o algoritmo original realiza a busca do passo de integração ideal dentre valores previamente definidos pelo usuário em uma lista de passos, conforme o exemplo:

lista de passos = [0.1; 0.2; 0.5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100] ms

A Tabela 1 descreve sucintamente a lógica de variação do passo de integração em função da verificação do erro de extrapolação quadrática das tensões das barras CA, sendo “i” o índice relativo a uma barra genérica do sistema.

Tabela 1 – Algoritmo de variação do passo de integração

Verificação do erro de estrapolação quadrática (ϵ_{vi})	Algoritmo de passo variável
todos $\epsilon_{vi} < \text{TOLN}$	Aumenta o passo de integração
$\text{TOLN} < \epsilon_{vi} < \text{TOLM}$	Mantém o passo de integração atual
qualquer $\epsilon_{vi} > \text{TOLM}$	Reduz o passo de integração

Sendo: **TOLN** – Tolerância mínima para o erro de extrapolação quadrática abaixo da qual pode-se aumentar o passo

TOLM – Tolerância máxima para o erro de extrapolação quadrática acima da qual deve-se reduzir o passo

De forma geral, o método compara o erro ϵ_{vi} de todas as barras “i” do sistema com as tolerâncias TOLN e TOLM. Assim, basta uma barra CA com erro ϵ_{vi} acima de TOLM para acarretar redução imediata do passo de integração para um valor inferior da lista de passos; o aumento do passo de integração para um valor superior da lista é dado somente quando o erro ϵ_{vi} de todas as barras do sistema se encontram abaixo da tolerância TOLN. Entre as tolerâncias TOLN e TOLM define-se uma banda morta, onde todos os valores ϵ_{vi} devem permanecer enquanto o algoritmo de busca se mantém parado em valores de passos de integração intermediários da lista.

No entanto, podem ocorrer as situações limites nas quais o passo de integração atinge o valor mínimo ou máximo da lista, com o erro de extrapolação quadrática acima da tolerância TOLM, ou abaixo da tolerância TOLN, respectivamente. Nesses casos, o algoritmo mantém o passo de integração atual. Originalmente, os valores sugeridos para as constantes TOLN e TOLM são 10^{-5} e 10^{-4} , respectivamente.

O algoritmo original também propõe que seja realizado o cálculo e armazenamento de todos os **coeficientes** dos modelos dinâmicos que dependem do passo de integração e que permanecem constantes durante a utilização de um passo de integração específico. Assim, calcula-se na inicialização do programa, e somente uma vez, os coeficientes relativos a cada passo de integração da lista e armazena-se tais constantes para o devido restabelecimento quando o passo correspondente for chaveado. O cálculo prévio destes coeficientes permite uma melhora no desempenho computacional, pois este cálculo passa a ser realizado apenas uma vez para cada passo da lista, ao invés de serem recalculados toda vez que um dado passo é chaveado.

2.2 Algoritmo de Passo Variável Modificado

O algoritmo original foi utilizado como referência para a implementação computacional da variação automática de passo no Anatem. No entanto, quando aplicado em sua forma original na simulação de sistemas de grande porte, apresentou desvantagens no desempenho computacional em comparação à simulação com passo fixo. Esta limitação se deu, principalmente, pela rigidez dos critérios de redução e aumento de passo, detalhadas a seguir.

A necessidade de que **todas** as barras CA do sistema apresentem erro ϵ_{vi} abaixo de TOLN, para só então habilitar o aumento do passo, impede este chaveamento durante grandes períodos da simulação e leva à necessidade de aumentar esta tolerância para permitir o aumento do passo mínimo, simplesmente para o valor de passo habitual. O caso de referência da base de dados dinâmicos, disponibilizada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), em dezembro de 2018 com 6631 barras CA, mostrou a dificuldade de atendimento do critério de aumento de passo, apontando a necessidade de flexibilização do mesmo.

Além disso, nos casos do SIN, quando o método sugere o aumento do passo e este aumento é realizado instantaneamente, ocorrem diversas situações de não convergência dos modelos, ou de violação imediata da tolerância TOLM, levando à redução subsequente do passo e soluções de passos inutilizadas. Portanto, é necessário identificar um padrão contínuo de atendimento ao critério de aumento do passo, para só então liberar o seu aumento efetivo. Tal critério foi balizado pela observação da tendência do algoritmo em sugerir o aumento do passo durante um período, antes de executar o comando de aumento, inserindo um atraso neste chaveamento.

Acerca do comando de redução do passo de integração, a rigidez deste critério está relacionada ao fato de que **basta uma barra CA** com erro ϵ_{vi} acima de TOLM para que o passo de integração seja reduzido instantaneamente. Neste caso não é admitido atraso, pois considera-se que a redução do passo é determinada para garantir a precisão da resposta. No entanto, os casos do SIN revelaram dificuldades de cumprimento deste critério com valores de TOLM suficientemente pequenos para garantir a precisão devida, ao mesmo tempo em que se permite o chaveamento para passos de integração **usuais** nos períodos de simulação observados.

A variação de passo de integração nos casos do SIN com o algoritmo original resultou em um número elevado de chaveamentos indevidos com o padrão aumento/redução no mesmo instante de tempo. Ocorrendo ainda, em cada redução de passo, a necessidade de restabelecer todas as variáveis do instante anterior e as constantes associadas ao novo passo de integração, o que representa alto custo computacional. Além disso, a faixa relativa à banda morta, na qual o passo deveria ser mantido inalterado, praticamente não era alcançada.

Dadas as condições citadas, foram definidos, adicionalmente à metodologia original, os seguintes parâmetros (alteráveis pelo usuário) de controle do recurso de passo variável, com o fim de tornar o algoritmo mais robusto e adequado para aplicação em sistemas de grande porte, como o SIN.

- Latência, em segundos, para o aumento do passo (LTPV):** define o tempo de latência, em segundos, para que o algoritmo permita o aumento do passo de integração. Ou seja, por **LTPV** segundos, o algoritmo deve persistir indicando o aumento do passo de integração, caso contrário, a contagem do tempo de latência é zerada até que um novo comando de aumento do passo indique a inicialização de uma nova contagem de tempo.
- Latência, em número de passos, para o aumento do passo (NSPV):** representa o número de passos de integração que o algoritmo deve se manter sugerindo o aumento do passo até que este comando seja executado. Possui a mesma lógica do parâmetro LTPV, porém, quando o passo de integração assume os menores valores da lista, pode demandar muitos passos até que o algoritmo seja liberado pelo critério LTPV. Assim, a lógica de atraso baseada em **NSPV**, pode liberar o aumento de passo, mesmo que o atraso LTPV ainda

não tenha sido atendido.

- c. **Quantidade máxima de barras com erro de extrapolação quadrática acima da constante TOLM (MXBV):** este parâmetro permite a flexibilização do critério de redução do passo, realizando esta variação somente quando um percentual máximo de barras **MXBV** passem a apresentar erro ε_{vi} acima da tolerância TOLM, ao invés de reduzir o passo instantaneamente, quando uma única barra viola esta tolerância.
- d. **Quantidade mínima de barras com erro de extrapolação quadrática abaixo da constante TOLN (MNBA):** este parâmetro permite o aumento do passo de integração assim que um percentual mínimo **MNBA** de barras apresentarem erro ε_{vi} abaixo da tolerância TOLN.

Os parâmetros MXBV e MNBA são dados em percentual do número de barras do caso para que estes sejam adaptáveis a qualquer sistema de forma genérica. O Anatem possui limites para estes parâmetros, de modo que o usuário não pode redefini-los para as faixas de valores: $MXBV > 10\%$ e $MNBA < 90\%$. Atendendo aos limites citados, tais parâmetros podem ser ajustados por meio do código de alteração de constantes do programa (DCTE).

3.0 - RECURSO DE PASSO VARIÁVEL NO PROGRAMA ANATEM

O recurso de passo variável aplicado ao esquema de solução trapezoidal implícito alternado do Anatem foi desenvolvido conforme o algoritmo de passo variável modificado. Nesta seção são apresentados os comandos necessários para utilização deste recurso no Anatem.

3.1 Definição da lista de passos de integração

A lista de passos de integração deve ser definida pelo usuário por meio do Código de Execução **DLPV**. Espera-se que o valor máximo desta lista seja o maior valor de passo de integração com o qual seja possível inicializar o caso sem erros de simulação e com todas as variáveis estabilizadas. Ou seja, para cada sistema haverá uma lista de passos de integração ideal a ser definida.

Destaca-se, ainda, que a lista de passos adequada está bastante relacionada ao nível de detalhamento e ao porte do sistema a ser simulado. Assim, na ausência de definição da lista de passos por parte do usuário, foram pré-definidas no Anatem três listas de passos de integração *default*, descritas na Tabela 2. E neste caso, uma destas será escolhida pelo programa em função do número de barras do sistema a ser simulado com passo variável, ou seja, o fornecimento do código **DLPV** não é obrigatório para a utilização da ferramenta de passo variável.

Tabela 2 – Lista de passos de integração *default* do Anatem

Número de barras (NBUS)	Lista de Passos (ms)
NBUS < 1000	[0.1; 0.2; 1; 2; 10; 20; 100]
1000 < NBUS < 5000	[0.1; 0.2; 0.5; 1; 2; 3]
NBUS > 5000	[0.1; 0.2; 0.5; 1; 1.5]

3.2 Ajuste dos parâmetros de controle do recurso de passo variável:

As constantes de controle do método de passo variável assumem os valores *default* descritos na Tabela 3. No entanto, estes parâmetros podem ser alterados pelo usuário por meio do Código de Execução **DCTE**.

Tabela 3 – Parâmetros de controle do algoritmo de passo variável

Parâmetros	Valor default
TOLN	10^{-5}
TOLM	10^{-3}
LTPV	0.1 segundos
NSPV	50 passos
MNBA	99% de NBUS
MXBV	1% de NBUS

3.3 Habilitar execução da simulação com passo variável:

Finalmente, para realizar a simulação no Anatem com passo de integração variável deve-se habilitar a Opção de Execução **PVAR** junto ao Código de Execução **EXSI**. Durante a execução da simulação, outros algoritmos de melhoria do processo de convergência do programa (como SAD2 e NEWT automático) apenas serão habilitados quando o passo de integração mínimo da lista for atingido, ou seja, a redução do passo de integração será prioritária em relação às demais Opções de Execução que atuam no sentido de melhorar o processo de convergência.

4.0 - RESULTADOS

A análise de desempenho do recurso de passo variável do Anatem foi realizada por meio de simulações em sistemas de pequeno e grande porte. Os casos de pequeno porte analisados consistem dos sistemas de 14 barras e do caso equivalente da região Sudeste (730 barras), ambos disponibilizados no diretório de exemplos do programa Anatem. Os casos do SIN avaliados são os de referência da Base de Dados de Transitórios Eletromecânicos de junho e de dezembro de 2018, disponibilizadas pelo ONS.

Na comparação de desempenho dos algoritmos de passo fixo e variável será utilizado o principal índice de análise de desempenho computacional de algoritmos: o *speedup* (**S**). No presente trabalho, este índice relaciona o tempo necessário para a simulação com passo fixo e o tempo de simulação despendido com passo variável, conforme:

$$S = \frac{E[x]_{\text{passo fixo}}}{E[x]_{\text{passo variável}}}$$

Sendo: **E[x]** Tempo de execução esperado; **S** *Speedup* observado

Para o cálculo do *speedup*, todas as simulações foram realizadas em cluster dedicado Linux® com múltiplos nós, cada nó contendo 12 processadores AMD® de 2.6 GHz, 2MB de memória cache e 100 GB de memória RAM. Os tempos de execução de cada simulação foram avaliados em múltiplas tarefas (20 simulações sequenciais de cada contingência) para o cálculo do tempo de execução médio esperado ($E[x]$) e o desvio padrão (σ) associado para cada caso. Destaca-se, ainda, que as simulações no cluster foram realizadas sem a geração de arquivos de plotagem, visando a obtenção de tempos de execução isentos do esforço demandado pela rotina de escrita do arquivo de resultados, restando apenas o tempo de execução requerido pelos algoritmos de solução com passo fixo e variável.

Após diversas simulações variando os parâmetros de controle do algoritmo de passo variável, chegou-se ao conjunto de parâmetros que propiciaram resultados precisos em comparação à simulação de menor passo fixo (0.1 ms); além de maior robustez ao algoritmo de passo variável quanto à escolha do passo e ao padrão de variação do mesmo. A Tabela 4 apresenta estes valores e define os algoritmos que serão analisados neste trabalho em função da lista de passos adotada. Serão avaliados dois algoritmos de passo fixo (FIXO e SPLIT), sendo o modo SPLIT simulado com o menor passo da lista apenas durante o intervalo de 1.0 segundo após a aplicação do distúrbio. Os algoritmos de passo fixo serão comparados com simulações de passo variável (PVAR), cuja lista de passos escolhida será em função do porte do sistema analisado.

Tabela 4 – Descrição dos parâmetros utilizados nas simulações

Algoritmo	Lista de Passos (ms)	TOLN	TOLM	LTPV	NSPV	MNBA	MXBV
FIXO	[1]	-	-	-	-	-	-
SPLIT	[0.1;1]	-	-	-	-	-	-
PVAR 1	[0.1; 0.2; 0.5; 1; 1.5]	10^{-5}	10^{-3}	0.1s	50 passos	99%	1%
PVAR 2	[0.1; 0.2; 0.5; 1; 2; 3]	10^{-5}	10^{-3}	0.1s	50 passos	99%	1%
PVAR 3	[0.1; 0.2; 1; 2; 10; 20; 100]	10^{-5}	10^{-3}	0.1s	50 passos	99%	1%

Destaca-se que as simulações em modo SPLIT deverão resultar tempos de execução maiores que as simulações com o algoritmo FIXO, devido à utilização do passo de 0.1 ms durante 1 segundo de simulação. Portanto, para garantir uma comparação de *speedup* em relação ao caso de passo fixo de **menor tempo de execução**, apenas serão realizadas simulações em modo SPLIT nos casos em que não for possível executar toda a janela de simulação com o passo de 1 ms (modo FIXO).

4.1 Sistemas de pequeno porte

Para a análise de desempenho do recurso de passo variável em sistemas de pequeno porte, foram utilizados os sistemas de 14 barras e o equivalente da região Sudeste. No caso de 14 barras, foram realizados eventos de simulação durante uma janela de 5000 segundos. Esta longa janela de eventos, apesar de não ser prática usual em simulações de transitórios eletromecânicos, foi realizada neste caso apenas para estender o tempo de execução total e permitir uma comparação mais estável entre os tempos totais de processamento. Já o caso equivalente do Sudeste, foi simulado com a janela de simulação usual de 20 segundos. Os resultados relativos ao tempo de execução médio e *speedup* observado no caso 14 barras e no equivalente do Sudeste são descritos na Tabela 5.

Tabela 5 – Caso 14 Barras e Equivalente Sudeste: desempenho computacional com passo fixo e variável

Algoritmo	14 Barras		Equivalente Sudeste	
	$E[x] + \sigma[x]$ (s)	$S \pm \sigma[S]$	$E[x] + \sigma[x]$ (s)	$S \pm \sigma[S]$
FIXO	01:59,021 ± 00:03,131	-	00:11,809 ± 00:00,351	-
PVAR 1	27:09,514 ± 00:15,772	0,073 ± 0,002	00:09,568 ± 00:00,396	1,234 ± 0,063
PVAR 2	27:04,580 ± 00:05,100	0,073 ± 0,002	00:05,364 ± 00:00,225	2,202 ± 0,113
PVAR 3	00:18,575 ± 00:03,095	6,408 ± 1,081	00:06,224 ± 00:00,288	1,897 ± 0,104

Conforme esperado, os casos de pequeno porte apresentaram ganho de desempenho nas simulações com o algoritmo PVAR 3, que possui os maiores valores de passos a serem explorados. Sobretudo no caso de 14 barras, no qual foi possível atingir o passo de 20 ms após os distúrbios e manter este valor de passo durante diversos trechos da simulação, acarretando expressivo *speedup* ao simular o caso 6 vezes mais rápido que o modo FIXO. A Figura 1 apresenta a comparação entre os resultados dos algoritmos analisados e nota-se que, em todos os casos, obteve-se resultados coincidentes e, portanto, a simulação com passo variável propiciou ganho de desempenho sem perda de precisão na resposta.

Por outro lado, no caso 14 barras, os algoritmos PVAR 1 e 2 revelaram uma expressiva queda de desempenho em comparação ao modo FIXO. Neste cenário, tanto o custo de restabelecimento de constantes do passo nos chaveamentos, quanto o esforço demandado pelo algoritmo para variar o passo nos 5000 segundos em torno dos eventos, pesaram sobremaneira em comparação à simulação com passo fixo, uma vez que em cada instante de aplicação de distúrbio o algoritmo força a adoção do passo mínimo da lista. Assim, o ganho obtido pelos passos máximos destas listas (1.5 e 3.0 ms) não foram suficientes para compensar o custo adicional da longa utilização dos passos mínimos destas listas e dos múltiplos restabelecimentos de constantes devido aos chaveamentos.

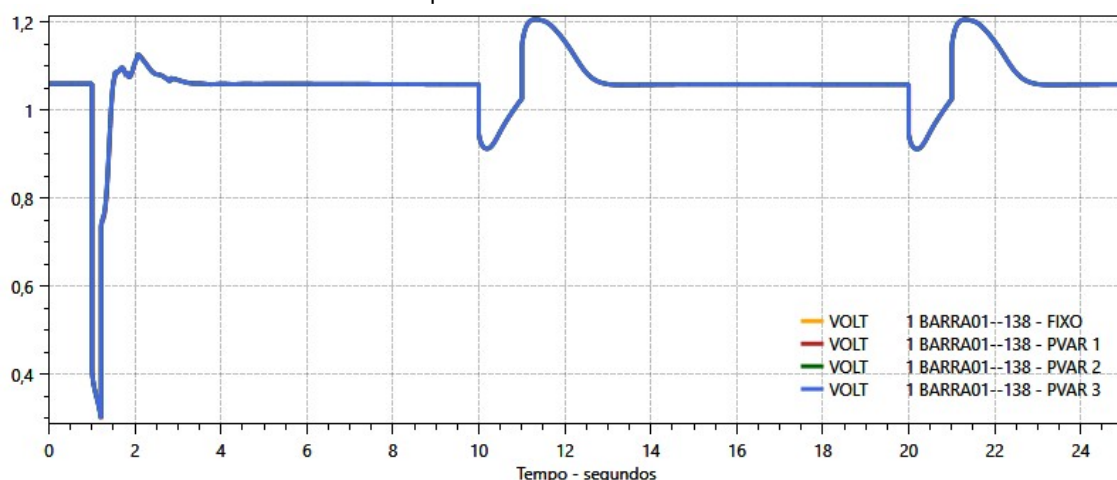


FIGURA 1 – Sistema de 14 barras: comparação dos resultados dos algoritmos de passo fixo e variável

Quanto às simulações do caso equivalente do Sudeste, observou-se ganhos de desempenho com passo variável e neste caso o melhor ganho de desempenho foi obtido na simulação com o modo PVAR 2, revelando a necessidade de uma lista de passos *default* intermediária para sistemas de médio porte.

4.2 Casos do Sistema Interligado Nacional

Para a análise de desempenho de casos do SIN foram realizadas simulações com diferentes topologias: Base de Dados de Transitórios Eletromecânicos de junho (6501 barras CA) e de dezembro (6631 barras CA) de 2018; e um conjunto variado de contingências, descritas na Tabela 6. Todas as contingências foram analisadas em 20 segundos de simulação e consistiram em aplicação de curto-circuito monofásico com duração de 100 ms, seguido de eliminação do curto pela abertura de circuito adjacente.

Tabela 6 – Descrição das contingências analisadas nos casos do SIN

Identificador	Descrição da contingência
BJLP-REGU	Curto-circuito monofásico na barra Rio das Éguas 500kV Abertura do circuito Bom Jesus da Lapa - Rio das Éguas 500kV
COLI-RGON	Curto-circuito monofásico na barra Colinas 500 kV Abertura do circuito Colinas - Ribeiro Gonçalves 500 kV
GURU-SMES	Curto-circuito monofásico na barra Gurupi 500 kV Abertura do circuito Gurupi - Serra da Mesa 500kV
IBIU-BATE	Curto-circuito monofásico na barra Ibiúna 500 kV Abertura do circuito Ibiúna - Bateias 500 kV
TUCU-MARA	Curto-circuito monofásico na barra Tucuruí 500 kV Abertura do circuito Tucuruí - Marabá 500 kV

A seguir são apresentadas as análises de desempenho dos casos do SIN considerando a seguinte disposição dos casos:

- BD0618**: caso de referência da base de dados de junho de 2018, sem a representação detalhada dos modelos das usinas eólicas e fotovoltaicas por CDU;
- BD1218**: caso de referência da base de dados de dezembro de 2018, sem a representação detalhada dos modelos das usinas eólicas e fotovoltaicas por CDU;
- BD1218-EOL**: caso de referência da base de dados de dezembro de 2018, com a representação detalhada dos modelos das usinas eólicas e fotovoltaicas por CDU.

A representação detalhada dos modelos das usinas eólicas e fotovoltaicas acarreta expressivo aumento de esforço computacional para a simulação e, conseqüentemente, tempos totais de execução maiores em comparação às simulações sem a representação detalhada destes modelos.

Seguindo a premissa de que o maior passo da lista deve permitir inicializar a simulação, verificou-se que o algoritmo PVAR 3 não atende a este critério, e que o máximo valor de passo possível para inicializar os casos do SIN é 3 ms. Portanto, nestas simulações foram considerados somente os algoritmos de passo variável **PVAR 1 e 2**.

Adicionalmente, destaca-se que todas as comparações a respeito da precisão dos resultados dos algoritmos serão realizadas em relação às respostas obtidas com o passo fixo de 0.1ms ao longo de todo o período de simulação. Este valor de passo fornecerá uma resposta no domínio do tempo mais precisa que o passo de 1ms, em detrimento do desempenho computacional procedente destas simulações.

4.2.1 Base de Dados Dinâmicos de Junho de 2018

A Tabela 7 apresenta os resultados de tempos médios de execução, desvio padrão e *speedup* observado nas simulações realizadas em ambiente Linux com os algoritmos FIXO e PVAR no caso BD0618.

Tabela 7 – BD0618: desempenho computacional das simulações com passo fixo e variável

Contingência	FIXO	PVAR 1		PVAR 2	
	E[x]+ σ[x] (s)	E[x]+ σ[x] (s)	S± σ[S]	E[x]+ σ[x] (s)	S± σ[S]
BJLP-REGU	07:03,572 ± 00:06,189	06:56,570 ± 00:07,128	1,017 ± 0,023	09:33,374 ± 00:36,174	0,739 ± 0,048
COLI-RGON	07:20,235 ± 00:09,833	07:15,839 ± 00:11,068	1,010 ± 0,034	11:32,312 ± 00:30,599	0,636 ± 0,031
GURU-SMES	07:22,202 ± 00:18,944	06:52,068 ± 00:21,032	1,073 ± 0,072	10:44,606 ± 00:39,396	0,686 ± 0,051
IBIU-BATE	07:07,545 ± 00:16,996	06:44,583 ± 00:20,872	1,057 ± 0,069	08:05,920 ± 00:21,171	0,880 ± 0,052
TUCU-MARA	07:33,275 ± 00:12,555	07:18,739 ± 00:15,266	1,033 ± 0,046	09:44,960 ± 00:32,772	0,775 ± 0,048

As simulações com o algoritmo PVAR 1 apresentaram desempenho computacional superior à simulação com passo fixo. Verificou-se o aumento da robustez das simulações, ao executar o chaveamento do passo de integração nos instantes necessários, garantindo a convergência e precisão dos resultados, além da possibilidade de explorar o passo de 1.5 ms em trechos da simulação com dinâmica mais assentada.

Por outro lado, as simulações com o algoritmo PVAR 2 resultaram em queda de desempenho computacional, porém em resultados mais precisos que aqueles obtidos com passo fixo. Visto que, no modo FIXO obteve-se respostas com **instabilidade numérica** (vide Figura 2). Este fato pode ser explicado pela existência de algum modelo dinâmico incompatível com a utilização de passo de integração de 1 ms ao longo de toda a simulação, sendo necessário o emprego das opções de flexibilização dos modelos dinâmicos: DLCC, SAD2 e DLCA.

A Figura 2 mostra a validação da resposta obtida com o algoritmo PVAR 1, ao apresentar comportamento coincidente com a resposta do caso de menor passo fixo (0.1 ms). Quanto ao algoritmo PVAR 2, observou-se pequenas variações (destacadas em laranja) em relação ao caso mais preciso; além de alguma instabilidade numérica (ao utilizar o passo de 3ms da lista), porém em menor grau que aquela observada com o passo de 1ms em todo o período de simulação. A queda de desempenho do modo PVAR 2 pode ser explicada pela necessidade de realizar muitos chaveamentos para mitigar o problema de instabilidade numérica associado à utilização do passo de 3 ms neste caso.

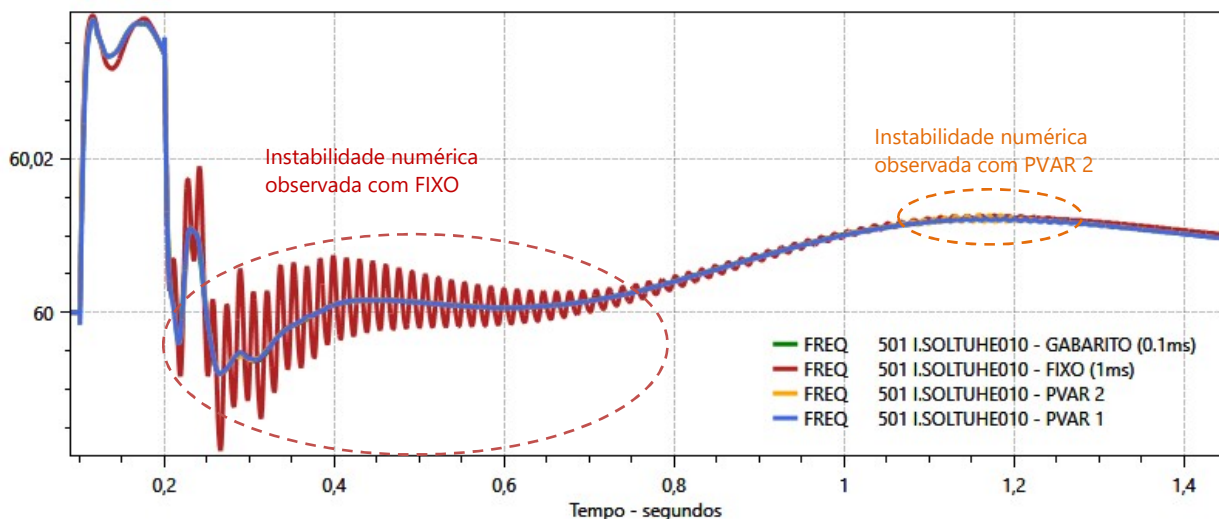


FIGURA 2 – BD0618: comparação dos resultados da frequência elétrica (Hz) da barra CA de Ilha Solteira

4.2.2 Base de Dados Dinâmicos de Dezembro de 2018

As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados relativos ao desempenho computacional das simulações realizadas em ambiente Linux com os algoritmos FIXO e PVAR nos casos BD1218 e BD1218-EOL, respectivamente.

Destaca-se que o modo SPLIT foi simulado somente no caso BD1218-EOL, pois este foi o único caso em que as contingências **COLI-RGON** e **GURU-SMES** não convergiram com o passo fixo de 1 ms, mesmo utilizando todas as Opções de Execução para melhoria de convergência disponíveis na versão 11.6.0 do Anatem e adotadas como padrão nos casos de referência do ONS. São estas: DLCA (inclusão de *delay* em variável não convergente de modelo CA), SAD2 (desacoplamento do laço de solução CA-CC) e DLCC (inclusão de *delay* na interface modelos-rede CC). Como esperado, o modo SPLIT acarreta tempos totais de execução superiores ao modo FIXO. Mesmo assim, por questão de coerência, o cálculo de *speedup* do caso BD1218-EOL foi realizado considerando o modo SPLIT.

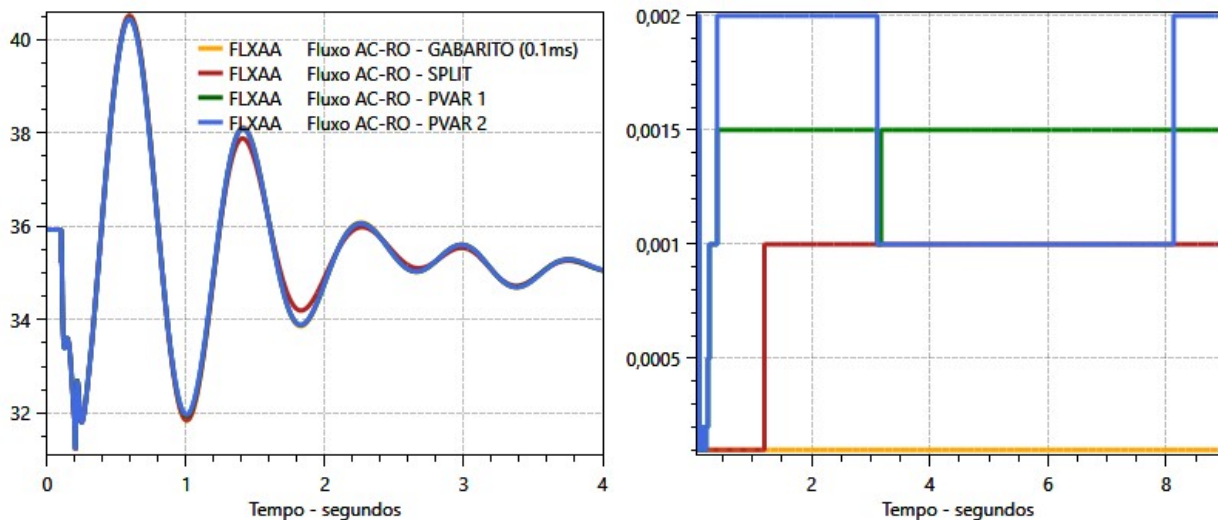
Tabela 8 – BD1218: desempenho computacional das simulações com passo fixo e variável

Contingência	FIXO	PVAR 1		PVAR 2	
	E[x] ± σ[x] (s)	E[x] ± σ[x] (s)	S ± σ[S]	E[x] ± σ[x] (s)	S ± σ[S]
BJLP-REGU	04:51,533 ± 00:06,252	05:59,278 ± 00:13,001	0,811 ± 0,034	05:11,984 ± 00:16,438	0,934 ± 0,053
COLI-RGON	04:52,701 ± 00:06,885	05:53,338 ± 00:16,291	0,828 ± 0,043	04:24,823 ± 00:11,791	1,105 ± 0,056
GURU-SMES	04:49,007 ± 00:06,684	06:01,412 ± 00:11,197	0,800 ± 0,031	04:34,162 ± 00:15,172	1,054 ± 0,063
IBIU-BATE	04:44,437 ± 00:06,109	05:54,819 ± 00:09,995	0,802 ± 0,028	04:37,258 ± 00:14,586	1,026 ± 0,058
TUCU-MARA	06:08,164 ± 00:08,734	06:38,789 ± 00:13,489	0,923 ± 0,038	04:58,413 ± 00:12,907	1,234 ± 0,061

Tabela 9 – BD1218-EOL: desempenho computacional das simulações com passo fixo e variável

Contingência	FIXO	SPLIT	PVAR 1		PVAR 2	
	E[x] ± σ[x] (s)	E[x] ± σ[x] (s)	E[x] ± σ[x] (s)	S ± σ[S]	E[x] ± σ[x] (s)	S ± σ[S]
BJLP-REGU	11:50,099 ± 00:15,031	14:36,475 ± 00:27,907	11:17,059 ± 00:47,509	1,295 ± 0,100	10:36,985 ± 00:15,389	1,376 ± 0,055
COLI-RGON	-	15:47,968 ± 00:19,510	23:44,432 ± 00:31,082	0,666 ± 0,020	25:18,388 ± 00:22,756	0,624 ± 0,016
GURU-SMES	-	11:12,681 ± 00:22,168	16:26,269 ± 00:25,201	0,682 ± 0,028	17:57,767 ± 00:27,055	0,624 ± 0,026
IBIU-BATE	09:27,964 ± 00:13,295	13:35,498 ± 00:27,296	12:11,368 ± 00:28,214	1,115 ± 0,057	10:55,038 ± 00:30,671	1,245 ± 0,072
TUCU-MARA	09:37,657 ± 00:24,386	14:22,558 ± 00:29,620	12:30,530 ± 00:35,772	1,149 ± 0,068	10:54,947 ± 00:46,977	1,317 ± 0,105

Nota-se que os casos de mais difícil convergência tiveram pior desempenho computacional com o passo variável. Em contrapartida, no quesito precisão observou-se que os modos PVAR 1 e 2 obtiveram respostas mais próximas aos resultados mais precisos, obtidos com o passo de 0.1 ms. A Figura 3.a mostra este resultado, e a Figura 3.b apresenta a variação do passo de integração no trecho inicial desta simulação.



(a) Fluxo ativo (MW) da conexão Acre-Rondônia

(b) Passo de integração

FIGURA 3 – BD1218-EOL: comparação dos resultados das simulações da contingência COLI-RGON

5.0 - CONCLUSÃO

O recurso de passo variável, apresentado neste trabalho, oferecerá maior conforto aos usuários do programa Anatem, garantindo tanto maior celeridade em trechos de simulação com dinâmica mais estabelecida, quanto maior confiança no fato de que o tamanho do passo de integração será sempre apropriado do ponto de vista de precisão numérica e convergência.

As simulações realizadas em sistemas de pequeno porte revelaram o potencial do algoritmo em propiciar ganho de desempenho em comparação à simulação com passo fixo, ao mesmo tempo em que é garantida a precisão dos resultados. No entanto, o ganho de desempenho está atrelado à utilização de uma lista de passos de integração adequada, na qual o algoritmo possa explorar valores de passos maiores que os valores utilizados para simulação de sistemas de grande porte.

Portanto, convencionou-se três listas de passos *default*, e (na ausência de redefinição da lista por parte do usuário) uma destas será escolhida pelo Anatem em função do número de barras do sistema analisado, garantindo flexibilidade ao algoritmo. Posto que, este necessita que a busca pelo passo ideal não demande grande esforço computacional, pois do contrário, o ganho obtido com a variação automática do passo será compensado pelo tempo despendido com o algoritmo de busca, resultando tempos totais de simulação semelhantes ou ainda piores em comparação à simulação com passo fixo.

Em diversas simulações de casos do Sistema Interligado Nacional, o algoritmo de passo variável apresentou desempenho superior em casos de fácil convergência e mais precisos em casos de difícil convergência, em comparação à simulação com passo fixo. Assim, verificou-se o aumento da robustez das simulações, ao garantir o chaveamento do passo de integração nos instantes necessários, além de melhorar a convergência e precisão dos resultados com a possibilidade de explorar passos maiores em trechos com dinâmica mais assentada.

Destaca-se ainda, que o recurso de passo variável possibilitará a simulação de contingências que não possuem solução com passo fixo usual, garantindo um número maior de casos convergidos independentes de intervenção do usuário para variar o passo de integração manualmente ao longo da simulação, ou da utilização de opções de melhoria de convergência para flexibilização dos modelos ou tolerâncias do programa.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Cepel, “Manual do Usuário do Programa de Análise de Transitórios Eletromecânicos - Anatem V11.6.0,” 2019.
- [2] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO “Casos de Referência – Estabilidade – Transitórios Eletromecânicos”, visitado em: fevereiro de 2019, Disponível em: <http://www.ons.org.br/>.
- [3] P. P. M. Junior, Simulação de Estabilidade Transitória com Passo de Integração Variável Utilizando Método Alternado Implícito, U. F. Fluminense, Ed., Niterói: Dissertação de Mestrado, 2018.
- [4] G. Ç. Kizilkan e K. Aydin, “Step Size Strategies for the Numerical Integration of Systems of Differential Equations,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 15, nº 236, pp. 3805-3816, 2012.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



LÍGIA ROLIM DA SILVA é formada em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Rio de Janeiro (2015). Atualmente cursa mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). Desde 2015, trabalha como pesquisadora no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), onde integra a equipe de desenvolvimento e treinamento do programa Anatem, atuando na modelagem computacional de equipamentos de sistemas elétricos de potência para simulação de transitórios eletromecânicos.

NÍCOLAS ABREU ROCHA LEITE NETTO é formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2014) e M.Sc. em Engenharia Elétrica (2016) pela mesma instituição. Desde 2014, trabalha como pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), onde tem atuado na área de métodos computacionais para dinâmica de sistemas de potência e análise de segurança de sistemas de potência. Pertence também à equipe de desenvolvimento do software Anatem.

PAULO PEREIRA MACHADO JUNIOR possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense, concluídos em 2015 e 2018, respectivamente. Desde 2018, atua como Engenheiro de Sistemas de Potência, na área de Planejamento Elétrico de Curto-Prazo do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Suas principais áreas de interesse são: modelagem computacional e simulações estáticas e dinâmicas de Sistemas Elétricos de Potência.

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, em 2004 fez um pós-doutorado na Northeastern University em Boston, Estados Unidos e em 2016 um pós-doutorado na Norwegian University of Science and Technology em Trondheim, Noruega. 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 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 possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), respectivamente em 1998 e 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 desde 2013, atual responsável pelo projeto Anatem, participou dos estudos da alternativa CCAT para o Aproveitamento das usinas do rio Madeira e Belo Monte e auxiliou no desenvolvimento do 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.