



**XX SNPTEE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
GET.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO XIV

GRUPO DE ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DA TECNOLOGIA, DA INOVAÇÃO E DA EDUCAÇÃO - GET

APLICATIVO AVANÇADO PARA ENSINO E PESQUISA NA ÁREA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA

**Simone Bezerra
Chaves (*)**
ONS/UFF

**Carlos Alberto
da Silva Neto**
ONS/UFF

**Jorge Luiz de
Araújo Jardim**
Nexant

**Marcus Theodor
Schilling**
UFF

RESUMO

O artigo apresenta um novo aplicativo computacional integrado, de cunho didático-educacional, e de *livre acesso para todas as universidades no Brasil*, capaz de facilitar o ensino da solução de vários problemas típicos envolvendo análises estáticas e dinâmicas de sistemas de potência.

PALAVRAS-CHAVE

Fluxo de potência continuado, Fluxo de potência por dinâmica sintética, Função de energia, Análise de Prony, Avaliação de segurança.

1.0 - INTRODUÇÃO

O programa ORGANON, em sua versão oficial, disponível a todos os agentes credenciados no Brasil, via Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, apresenta muitas vantagens em relação às ferramentas atuais de planejamento da expansão e operação de sistemas elétricos no Brasil, pois disponibiliza, em um mesmo ambiente integrado, facilidades para realização de estudos de regime permanente, transitórios eletromecânicos e avaliação de segurança. No âmbito dos estudos em regime permanente, o ORGANON pode realizar análises de fluxo de potência através do método convencional de Newton-Raphson completo, ou utilizando o inovador e robusto método de fluxo de potência por dinâmica sintética (FPDS). Além disso, o programa também pode realizar análises de fluxo de potência continuado, análises de contingências e análises de sensibilidade. Nos estudos dinâmicos, o diagnóstico da condição de estabilidade pode ser feito através de inspeção visual, ou ainda pelo método quantitativo, que é baseado em conceitos de funções de energia e produto interno. Além disso, o ORGANON possui a análise de Prony, que identifica os principais modos de oscilação do sistema elétrico. O ORGANON também realiza análises de segurança estática e dinâmica e gera saídas gráficas das regiões de segurança estática e dinâmica. O programa ORGANON, em sua versão acadêmica, limitada a uma capacidade de processamento de sistemas com até 120 barras, mantém todas as versatilidades da versão oficial completa e está disponível gratuitamente a todas as universidades do Brasil [1], para fins de ensino, pesquisa e desenvolvimento de cunho acadêmico.

Por razões de limitação de espaço, o artigo restringir-se-á a uma discussão envolvendo o *cálculo de fluxo de potência por dinâmica sintética*, dado que o tema, embora de grande interesse, ainda permanece pouco divulgado. Uma exposição detalhada e abrangente, sob enfoque acadêmico, de todas as versatilidades do programa ORGANON pode ser vista na referência [1], disponível a todos os interessados via internet.

2.0 - ANÁLISE DE FLUXO DE POTÊNCIA POR DINÂMICA SINTÉTICA (FPDS)

O fluxo de potência por dinâmica sintética (*FPDS – Synthetic Dynamics Power Flow*) é um método recente e bastante robusto para resolver o problema de fluxo de potência convencional. Nele o problema algébrico do fluxo de potência é transformado em um problema algébrico-diferencial. Tal metodologia foi motivada pela proposta desenvolvida por Galloway [2], porém conceitualmente reformulada e implementada de forma mais eficiente por Jardim e Stott [3].

O valor potencial do *FPDS* é em problemas onde os métodos padrões de fluxo de potência falham ou convergem para pontos instáveis, devido ao fato do *FPDS* ser computacionalmente muito robusto (embora o processamento computacional seja bastante lento).

Em 1970, Galloway [2] propôs um modelo dinâmico de segunda ordem para as barras de geração para resolver o problema de fluxo de potência. O ponto fraco dessa abordagem é a possibilidade de ocorrência de uma resposta oscilatória. A implementação também foi prejudicada por utilizar integração com passo fixo.

No *FPDS*, cada controle do sistema elétrico de potência é representado por um modelo dinâmico de primeira ordem, ou seja, cada controle do sistema é um modelo de integrador, com uma malha de realimentação. A implementação do *FPDS* utiliza técnicas sofisticadas de integração numérica a passo variável, ou seja, o *FPDS* vai ajustando o tamanho do passo para cada etapa de integração sem a interferência do usuário, Jardim e outros [4].

No *FPDS*, as variáveis do sistema elétrico podem ser divididas em dois tipos: variáveis dependentes (x) e variáveis de controle (y). As variáveis dependentes são o módulo e o ângulo das tensões de barras não controladas do sistema. As variáveis de controle são o módulo e o ângulo das tensões dos geradores, os taps dos transformadores, o ângulo de transformadores defasadores e a admitância dos compensadores estáticos do sistema elétrico.

Na Figura 1, é apresentado o diagrama em blocos do modelo dinâmico de primeira ordem utilizado para representar os controles do sistema elétrico de potência no *FPDS*, ou seja, a dinâmica sintética para a solução do fluxo de potência.

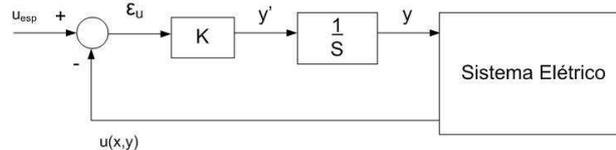


Figura 1 - Diagrama em blocos do modelo dinâmico do *FPDS*

Na Figura 1, u_{esp} e $u(x,y)$ são, respectivamente, os valores especificado e de realimentação para a função representada pela malha de controle; ϵ_u é o resíduo da malha de controle, ou seja, é o valor especificado menos a realimentação; K é o ganho da malha de controle; y' e y são, respectivamente, a derivada de primeira ordem e o valor da variável associada a essa malha de controle. O valor de y é obtido pelo método de integração "predictor-corrector backward differentiation formulae – BDF", Lambert [5]. O sistema elétrico da Figura 1 é representado por uma matriz de admitância de barra (Y_{BUS}) reduzida, onde foram mantidas apenas as barras associadas às variáveis de controle.

A simulação dinâmica no tempo para esse sistema pode ser obtida utilizando um método de integração passo a passo implícito e estável, onde, em um passo de integração n qualquer, a solução é dada pela equação (1):

$$y_n - \beta \cdot h \cdot y'_n - C = 0 \quad (1)$$

Onde:

- n - é o passo de integração;
- y_n - é o valor da variável de estado no passo n ;
- β - é um coeficiente constante;
- C - é um termo que incorpora os valores anteriores de y e y' ;
- h - é o tamanho do passo de integração;
- y'_n - é a derivada de primeira ordem da variável de estado no passo n e é dada por $K(u_{esp} - u(x, y))$, como é apresentado na Figura 1.

A cada passo de integração, a solução do sistema de equações algébricas criado, baseado na equação (1) para todas as variáveis de controle, é resolvido pelo método de Newton-Raphson convencional. A partir dessa solução são calculados os novos valores das variáveis dependentes. A solução do problema de fluxo de potência é obtida quando os resíduos de todas as malhas de controle do sistema elétrico forem menores que a tolerância pré-definida.

2.1 A Dinâmica da Potência Ativa para um Gerador

No *FPDS*, a variável de controle utilizada no modelo dinâmico da potência ativa para os geradores é o ângulo da tensão terminal do gerador (θ). O diagrama em blocos desse modelo dinâmico é apresentado na Figura 2.

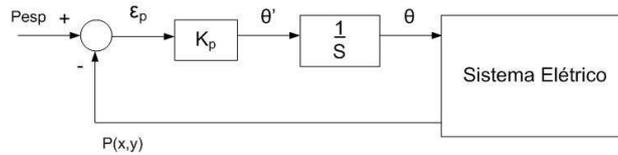


Figura 2 - Diagrama em blocos do modelo dinâmico para a potência ativa de um gerador

Na Figura 2, o P_{esp} é a potência ativa na barra de geração; $P(x,y)$ é o somatório da carga conectada na barra de geração com os fluxos de potência ativa que saem da barra de geração; ϵ_p é o resíduo de potência ativa na barra de geração, ou seja, é a potência ativa gerada, menos a potência ativa consumida pela carga conectada na barra de geração, menos o somatório dos fluxos que saem da barra de geração; K_p é o ganho da malha de controle; θ' e θ são, respectivamente, a derivada de primeira ordem e o valor do ângulo da tensão da barra terminal do gerador (variável de estado).

A dinâmica sintética da potência ativa para um gerador, cujo diagrama em blocos é apresentado na Figura 2, pode ser representada pela equação diferencial (2), Jardim e Stott [3]:

$$\theta' = K_p (P_{esp} - P(x, y)) \quad (2)$$

O método de solução para o problema de equações diferenciais acima resulta na equação algébrica (3), para cada intervalo de tempo:

$$\theta_n - \beta \cdot h \cdot \theta'_n - C = 0 \quad (3)$$

Onde:

- β - é um coeficiente constante;
- C - é um termo que incorpora os valores anteriores de θ e θ' ;
- h - é o tamanho do passo de integração;
- θ' - é dada pela equação (2).

Na Figura 2, no instante inicial (t_0) da análise do processamento do FPDS, os valores de potência ativa especificada (P_{esp}) e os valores iniciais de todas as variáveis de controle (y) e dependentes (x) do sistema elétrico são informações fornecidas pelo usuário. O somatório da carga conectada na barra de geração com os fluxos de potência ativa que saem da barra de geração ($P(x,y)$) é calculado a partir desses valores iniciais. O resíduo de potência ativa na barra de geração (ϵ_p) é a potência ativa especificada (P_{esp}) menos o somatório da carga conectada na barra de geração com os fluxos que saem da barra de geração ($P(x,y)$).

Quando ϵ_p é maior que zero, a solução do sistema de equações algébricas faz com que o ângulo da tensão da barra de geração (θ) aumente. Quando ϵ_p é menor que zero, a solução do sistema de equações algébricas faz com que o ângulo da tensão da barra de geração (θ) diminua.

Um aumento do ângulo da tensão da barra de geração (θ), por exemplo, resultará em um aumento dos fluxos que saem da barra, que por sua vez irá provocar uma redução no resíduo de potência ativa na barra (ϵ_p), como é desejado.

Na Figura 3, é apresentado um exemplo de uma função $f(z)$ onde o resíduo positivo acarreta um aumento no valor da variável de controle semelhante à relação ϵ_p e θ . Eventualmente um valor maior dessa variável pode levar a um resíduo maior. Nesse exemplo, no instante t_0 , a função $f(z_0)$ possui um valor positivo (ϵ_0). Como esse resíduo é positivo, o ângulo da tensão da barra de geração (θ) irá aumentar, o que corresponde à mudança de z_0 para z_1 .

No instante t_1 , a função $f(z_1)$ continua positiva (ϵ_1). Como esse resíduo é positivo, ocorre um novo aumento no ângulo da tensão da barra de geração (θ), o que equivale à mudança de z_1 para z_2 .

O mesmo comportamento observado no instante t_1 repete-se no instante t_2 . Entretanto, como o resíduo ϵ_2 é maior do que ϵ_1 , o aumento do ângulo da tensão da barra de geração (θ) no instante t_2 acaba sendo maior do que o aumento no instante t_1 , o que corresponde à mudança de z_2 para z_3 . Isso faz com que o resíduo que era positivo, no instante t_2 , passe a ser negativo no instante t_3 . Como esse resíduo é negativo, o ângulo da tensão da barra de geração (θ) irá diminuir, o que equivale à mudança de z_3 para z_4 .

A aproximação da solução z_s a partir de z_4 ocorre de maneira assintótica, devido ao fato de os resíduos de potência ativa (ϵ_p) serem cada vez menores, o que implica em mudanças no ângulo da tensão da barra de geração (θ) cada vez menores.

Na Figura 3, a robustez do FPDS pode ser exemplificada pela transição do ponto z_1 para z_2 . Em um método como o de Newton-Raphson, não seria possível encontrar uma solução, pois qualquer deslocamento a partir de z_1 resultaria em um aumento de $f(z)$, o que caracteriza a inexistência de uma direção que reduza o resíduo de potência ativa (ϵ_p). O FPDS, entretanto, encontra a solução, pois o deslocamento a partir de z_1 ocorre independente do valor de $f(z)$ aumentar.

Na Figura 4, é apresentado o comportamento da função $f(z)$ para o exemplo anterior ao longo do tempo. Como se pode observar a função $f(z)$ pode assumir valores positivos e negativos e a partir do instante t_4 a aproximação da solução para a função $f(z)$ ocorre de maneira assintótica.

Para os problemas que não têm solução o FPDS apresenta um comportamento cíclico do desbalanço (resíduo). Nesses casos o método é encerrado pelo tempo máximo de processamento.

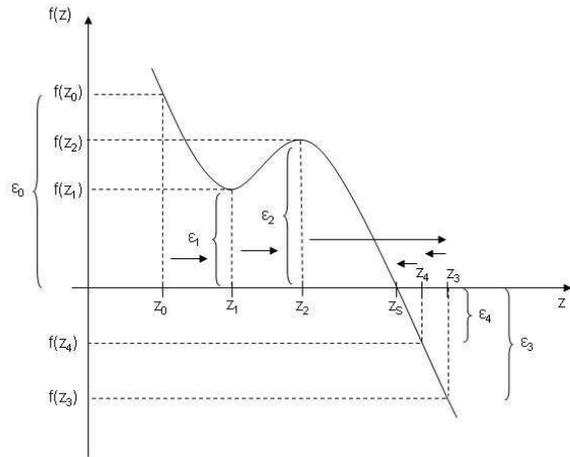


Figura 3 - Função $f(z)$ – equivalente ao resíduo de potência ativa na barra de geração

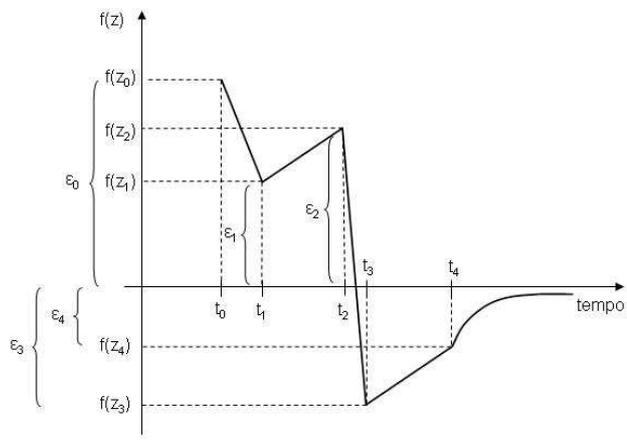


Figura 4 - Função $f(z)$ x tempo

2.2 A Dinâmica da Potência Reativa para um Gerador

No FPDS, a variável de controle utilizada no modelo dinâmico da potência reativa para os geradores é o módulo da tensão da barra controlada pelo gerador (V). O diagrama em blocos desse modelo dinâmico é apresentado na Figura 5.

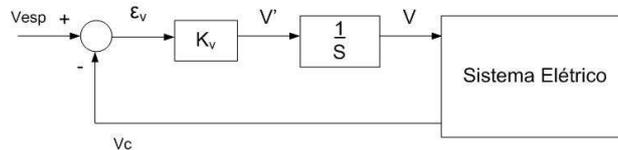


Figura 5 - Diagrama em blocos do modelo dinâmico para a potência reativa de um gerador

A dinâmica sintética da potência reativa para um gerador, cujo diagrama em blocos é apresentado na Figura 5, pode ser representada pela equação diferencial (4), Jardim e Stott [3]:

$$V' = K_v(V_{esp} - V_c) \tag{4}$$

O método de solução para o problema de equações diferenciais acima resulta na equação algébrica (5), para cada intervalo de tempo:

$$V_n - \beta \cdot h \cdot V_n' - C = 0 \tag{5}$$

Quando o gerador está operando no limite de potência reativa, no FPDS a variável de controle utilizada no modelo dinâmico da potência reativa para os geradores passa a ser a potência reativa do gerador (Q). O diagrama em blocos desse modelo dinâmico é apresentado na Figura 6.

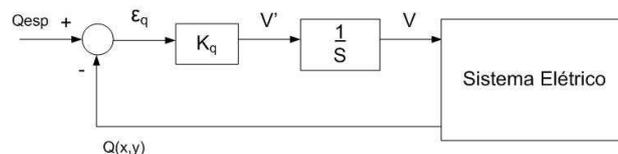


Figura 6 - Diagrama em blocos do modelo dinâmico para a potência reativa fixa de um gerador

A dinâmica sintética da potência reativa para um gerador operando no limite de potência reativa, cujo diagrama em blocos é apresentado na Figura 6, pode ser representada pela equação diferencial (6), Jardim e Stott [3]:

$$V' = K_q(Q_{esp} - Q(x, y)) \quad (6)$$

O método de solução para o problema de equações diferenciais acima resulta na equação algébrica (7) para cada intervalo de tempo:

$$V_n - \beta \cdot h \cdot V'_n - C = 0 \quad (7)$$

2.3 A Dinâmica de um Transformador com Comutação de Tape sob Carga

No *FPDS*, a variável de controle utilizada no modelo dinâmico de um transformador com comutação de tape sob carga (OLTC) é o tape do transformador (T). O diagrama em blocos desse modelo dinâmico é apresentado na Figura 7.

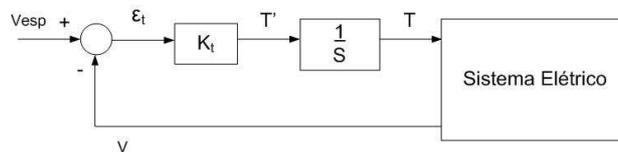


Figura 7 - Diagrama em blocos do modelo dinâmico para um transformador OLTC

A dinâmica sintética de um transformador com comutação de tape sob carga, cujo diagrama em blocos é apresentado na Figura 7, pode ser representada pela equação diferencial (8), Jardim e Stott [3]:

$$T' = K_t(V_{esp} - V) \quad (8)$$

O método de solução para o problema de equações diferenciais acima resulta na equação algébrica (9), para cada intervalo de tempo:

$$T_n - \beta \cdot h \cdot T'_n - C = 0 \quad (9)$$

2.4 A Dinâmica de um Transformador Defasador

No *FPDS*, a variável de controle utilizada no modelo dinâmico de um transformador defasador é o ângulo que regula o fluxo de potência ativa através do transformador (Φ). O diagrama em blocos desse modelo dinâmico é apresentado na Figura 8.

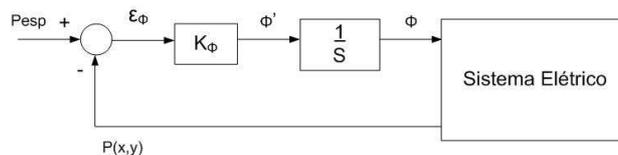


Figura 8 - Diagrama em blocos do modelo dinâmico para um transformador defasador

A dinâmica sintética de um transformador defasador, cujo diagrama em blocos é apresentado na Figura 8, pode ser representada pela equação diferencial (10), Jardim e Stott [3]:

$$\phi' = K_\phi(P_{esp} - P(x, y)) \quad (10)$$

O método de solução para o problema de equações diferenciais acima resulta na equação algébrica (11), para cada intervalo de tempo:

$$\phi_n - \beta \cdot h \cdot \phi'_n - C = 0 \quad (11)$$

2.5 A Dinâmica de um Compensador Estático

No FPDS, a variável de controle utilizada no modelo dinâmico de um compensador estático é a admitância do próprio compensador estático (B) utilizada para controlar o módulo da tensão de uma barra. O diagrama em blocos desse modelo dinâmico é apresentado na Figura 9.

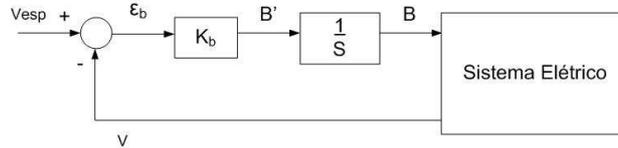


Figura 9 - Diagrama em blocos do modelo dinâmico para um compensador estático

A dinâmica sintética de um compensador estático, cujo diagrama em blocos é apresentado na Figura 9, pode ser representada pela equação diferencial (12), Jardim e Stott [3]:

$$B' = K_b (V_{esp} - V) \quad (12)$$

O método de solução para o problema de equações diferenciais acima resulta na equação algébrica (13), para cada intervalo de tempo:

$$B_n - \beta \cdot h \cdot B'_n - C = 0 \quad (13)$$

2.6 Implementação das Dinâmicas de Potência Ativa/Reativa para o Gerador

Por conveniência, no momento da implementação no programa ORGANON, o gerador é representado por uma tensão atrás de uma reatância muito pequena e as variáveis de controle são a tensão interna do estator (E) e o ângulo do rotor (δ).

Utilizando esse modelo para o gerador, a dinâmica da potência ativa passa a ser representada pela equação diferencial (14), que é equivalente à equação (2):

$$\delta' = K_p (P_{esp} - P(x, y)) \quad (14)$$

Ainda de acordo com esse modelo, a dinâmica da potência reativa passa a ser representada pelas equações (15) e (16), que são equivalentes às equações (4) e (6), respectivamente:

$$E' = K_v (V_{esp} - V_c) \quad (15)$$

$$E' = K_q (Q_{esp} - Q(x, y)) \quad (16)$$

3.0 - RESULTADOS PRÁTICOS E ANÁLISE COMPARATIVA [3, 4]

A seguir são apresentados os resultados do FPDS, consoante [3,4], de uma intensa bateria de testes avançados e muito severos com sistemas reais de grande porte e visando aplicações realistas na indústria. A Tabela 1 ilustra algumas características desses três sistemas [3,4]. Para que os resultados obtidos pudessem ser comparativamente avaliados de forma não tendenciosa, todos os sistemas também foram submetidos a processamentos através de três outros programas comerciais de cálculo de fluxo de potência, utilizados na indústria, tanto no Brasil como no exterior (doravante denominados como programas de referência).

Tabela 1 - Sistemas Teste Reais para o Método de Fluxo de Potência por Dinâmica Sintética [3,4]

| | Sistema # 1 (Brasil) | Sistema # 2 (EUA) | Sistema # 3 (EUA) |
|---|-------------------------|----------------------|----------------------|
| Barras | 3 410 | 9 146 | 40 020 |
| Geradores | 289 | 1 336 | 5 006 |
| Trafos c/ controles de tapas | 481 | 901 | 4 488 |
| Trafos c/ controle de defasagem angular | 0 | 13 | 41 |
| Reatores controlados | 11 | 54 | 226 |

Os métodos convencionais de cálculo de fluxo de potência só logram convergência a partir de pontos de operação iniciais favoráveis [6,7]. Isso ocorre pela natureza intrínseca do próprio algoritmo de Newton-Raphson. Uma estratégia comum é o uso de soluções anteriores ou, quando essa alternativa não é factível, o emprego de soluções iniciais aproximadas, tais como aquelas obtidas por uma iteração inicial do método desacoplado rápido.

Entretanto, em certos casos, mesmo essa estratégia pode não ter sucesso. Esse fato pode ser utilizado para demonstrar a grande robustez do método e do protótipo computacional baseado em dinâmica sintética, incorporado nas versões profissional e acadêmica do ORGANON, conforme é ilustrado na Tabela 2. Nessa tabela, “solução aproximada” significa que o cálculo do fluxo de potência foi inicializado a partir de dados convergidos lidos de arquivo texto (formatos Anarede e PSS/E). “Solução equalizada” se refere ao caso em que o cálculo é inicializado tomando todas as tensões e tapes com módulos unitários e ângulos de fase e defasagens angulares nulas. “Extremamente desfavorável” constitui o teste mais severo. Neste teste, as tensões das barras dos sistemas são inicializadas sucessiva, alternada e aleatoriamente com ângulos de fase iguais a zero e 180°, sendo os módulos de todas as tensões e tapes tomados como unitários. A Tabela 2 evidencia então a superioridade da estratégia de solução por dinâmica sintética, no que concerne a capacidade de atingir convergência numérica, pois a mesma foi capaz de prover soluções em todos os casos, o que não ocorreu com o procedimento via método de Newton-Raphson [4].

Tabela 2 - Desempenho do Método de Fluxo de Potência por Dinâmica Sintética [4]

| | Natureza do Ponto de Operação Inicial | Sistema # 1 (Brasil) | Sistema # 2 (EUA) | Sistema # 3 (EUA) |
|--|---------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| Newton-Raphson (3 programas comerciais usados n/ Brasil, exterior) | <i>sol. aproximada</i> | converge | converge | converge |
| | <i>sol. equalizada (“flat start”)</i> | não converge | não converge | não converge |
| | <i>extremamente desfavorável</i> | não converge | não converge | não converge |
| Dinâmica Sintética (Protótipo Jardim e Stott) | <i>sol. aproximada</i> | converge | converge | converge |
| | <i>sol. equalizada (“flat start”)</i> | converge | converge | converge |
| | <i>extremamente desfavorável</i> | converge | converge | converge |

Sob o ponto de vista de esforço computacional foi mostrado que a solução via síntese dinâmica [3] é equivalente ao esforço associado àquele entre duas e cinco soluções pelo método de Newton-Raphson convencional. Em geral, para condições de inicialização do tipo “extremamente desfavorável”, nos quais o método de Newton não consegue convergir, foi constatado que o método de dinâmica sintética [3] pode ser da ordem de até dez vezes mais lento que processamentos típicos, via Newton-Raphson. Reitera-se, entretanto, que esse desempenho não deve ser visto como fato desfavorável, dado que nesses casos, nem mesmo uma solução é obtível pelos métodos convencionais [4].

4.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma das principais versatilidades disponíveis na versão acadêmica do ORGANON, qual seja, o método de *Fluxo de Potência por Dinâmica Sintética (FPDS)* [3]. Embora seja um método original, deve ser ressaltado que o valor potencial do FPDS revela-se em problemas onde o método tradicional para a solução do fluxo de potência ou falha, ou converge para pontos instáveis.

A versão acadêmica do ORGANON está livremente disponível para toda a comunidade academia brasileira, para fins de pesquisa, desenvolvimento e ensino.

5.0 - AGRADECIMENTOS

Parte deste trabalho contou com o apoio do CNPq.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CHAVES, S. B., *Análise Estática e Dinâmica de Sistemas de Potência via Aplicativo Computacional Integrado: ORGANON*, Dissertação de M. Sc., Instituto de Computação, U. Federal Fluminense, Niterói, 2008. http://www.ic.uff.br/PosGraduacao/lista_dissertacao.php?ano=2008.

[2] GALLOWAY, R. H., TAYLOR, J., HOGG, W. D. and SCOTT, M., *New Approach to Power-System Load-Flow Analysis in a Digital Computer*, Proc. IEE, Vol. 117, No. 1, January 1970, pp. 165-169.

[3] JARDIM, J. L. A. and STOTT, B., *Synthetic Dynamics Power Flow*, IEEE - General Meeting, San Francisco, CA, USA, June 2005.

[4] JARDIM, J. L. A., TAKAHATA, A. Y., TARANTO, G. N. e SCHILLING, M. T., *Fluxo de Potência Robusto: Formulação Dinâmica Sintética*, XVIII SNPTEE, Curitiba, PR, BR, Outubro de 2005.

- [5] LAMBERT, J. D., *Numerical Methods for Ordinary Differential Systems: The Initial Value Problem*, Wiley, 1991.
- [6] STOTT, B., *Effective Starting Process for Newton-Raphson Load Flows*, Proc IEE, Vol. 118, No. 8, August 1971, pp. 983-987.
- [7] KLUMP, R. P., OVERBYE, T. J., *Techniques for Improving Power Flow Convergence*, Proc IEEE PES Summer Meeting, Seattle, July 2000.