



SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA

GAT - 01  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO IV**  
**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**FLUXO DE POTÊNCIA ROBUSTO: FORMULAÇÃO DINÂMICA SINTÉTICA**

**J. L. A. Jardim**  
ONS

**A. Y. Takahata \***  
ONS

**G. N. Taranto**  
COPPE/UFRJ

**M. Th. Schilling**  
UFF

**RESUMO**

Este artigo apresenta uma nova metodologia de cálculo de fluxo de potência baseada na transformação do problema de fluxo de potência, originalmente algébrico, em um problema de natureza algébrico-diferencial. A solução do mesmo é obtida através da integração numérica de equações. O método apresenta excepcional capacidade de convergência, além da importante propriedade de não-convergência para pontos de equilíbrio instáveis. O esforço computacional exigido pela nova solução pode ser intenso, se a mesma não for implementada com algoritmos avançados de integração numérica.

**PALAVRAS-CHAVE**

Fluxo de Potência; Integração Numérica; Algoritmo; Modelagem; Dinâmica Sintética.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A avaliação de fluxo de carga em regime permanente é certamente um dos mais tradicionais e importantes estudos que são frequentemente realizados em sistemas de potência. A literatura [1,2] registra investigações pioneiras já por volta dos anos cinquenta. Esse talvez seja um dos problemas para os quais se contabilize o maior número de formulações variantes e contribuições oriundas de pesquisadores, acadêmicos e profissionais de diversos países, empresas, universidades e centros de pesquisa [3-6]. O cálculo de fluxos em regime permanente é extensivamente realizado nas fases de planejamento da expansão, pré e pós-operação dos sistemas de potência.

O objetivo do cálculo de fluxo de potência é a determinação do estado estacionário de operação do sistema para uma dada topologia da rede e condição de carga do sistema. Esse cálculo implica em determinar os módulos e ângulos de tensões de todas as barras do sistema e, a partir das tensões, calcular os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos. A potência reativa gerada ou consumida pelas máquinas e as perdas no sistema são também usualmente avaliadas. O cálculo do fluxo de potência é um problema algébrico, não-linear, de grande dimensão e com restrições, envolvendo variáveis complexas e reais contínuas ou discretas. Tais características, implicam na existência de múltiplas soluções e dificuldade de convergência para o Método de Newton e suas variantes. Por esse motivo, a análise do problema de fluxo de potência tem sido, ao longo dos anos, objeto de inesgotáveis estudos e pesquisas, visando, ainda hoje, o desenvolvimento de métodos cada vez mais robustos e rápidos. O desenvolvimento de computadores cada vez mais poderosos, em termos de memória e rapidez, têm viabilizado a consolidação de métodos mais eficientes tais como o tradicional *Newton-Raphson completo*. Mesmo assim, em algumas condições extremas de operação podem ocorrer problemas durante o cálculo numérico.

Em 1956 Ward & Hale [2,3] publicam um dos primeiros artigos sobre o tema, propondo uma solução do problema baseada em métodos matriciais iterativos, dando início a uma longa linhagem de soluções calcadas em processos algébrico-iterativos. O ano de 1974 talvez tenha sido um dos mais pródigos no que concerne a divulgação pública de avanços relacionados a soluções originais para o problema de fluxo de potência. Neste ano, Despotović [7]

\*Rua da Quitanda, 196, 20º andar, CEP: 20091-005, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL.

Tel.: (0xx21) 2203 9654 - Fax: (0xx21) 2203 9420 - C-ele: amelia@ons.org.br, jorge.jardim@ons.org.br

publica um artigo propondo o conceito de desacoplamento como alternativa de solução, mas seu trabalho permaneceu na obscuridade devido a infeliz escolha de uma estratégia de solução que não explorava numericamente todas as potencialidades e sutilezas da variante. Entretanto, a vantagem do novo método foi plenamente apreciada no mesmo ano, por Stott & Alsaç, que propuseram [8] um método de solução desacoplada rápida, contornando, com sucesso, todos os obstáculos numéricos não superados por Despotović. A contribuição de Stott & Alsaç é considerada um marco histórico [1] na área de sistemas de potência, conforme recente julgamento realizado pelo IEEE. (Nota: essa contribuição justificou a outorga aos autores da “IEEE Millennium Medal”). Ainda naquele ano, Borkowska [9] publica uma formulação original e de grande elegância para o tratamento de incertezas, cristalizando pioneiramente o conceito de fluxo de potência probabilístico.

É interessante notar que, ao longo dos anos, diversos autores sempre tentaram, sem significativo sucesso, alternativas de solução ditas não-iterativas, analíticas ou baseadas em métodos não ortodoxos. Por exemplo, em 1981, Sauer [10] adianta uma proposta explorando uma modelagem baseada em séries. Na mesma linhagem, Xu *et alii* [11] em 1998 insistem em estratégia de solução similar. Em 1982, Bandler & El-Kady [apud 12] descrevem uma formulação inteiramente baseada no *Teorema de Tellegen*. Por volta do ano 2000 surgem rumores sobre a criação de uma solução supostamente *não-iterativa*, porém admitidamente de caráter *algébrico-recursivo*, baseada na teoria das frações contínuas, explorando um conceito proposto por Euler [13] em 1737. Embora muito elaborada, os autores dessa proposta mantêm seu detalhamento e divulgação sob sigilo, alegando imposições oriundas de processo de solicitação de patente. Também pairam, até o presente, dúvidas sobre a capacidade dessa formulação incorporar, com sucesso, todas as facetas resultantes da modelagem avançada dos recursos de controle do típico problema de fluxo de potência.

Este artigo mostra uma nova metodologia [14], *Fluxo de Potência de Dinâmica Sintética (FPDS)*, que transforma o problema algébrico em um problema algébrico-diferencial. Tal metodologia foi motivada pela proposta desenvolvida por Galloway *et alii* [15], porém conceitualmente reformulada e implementada de forma mais eficiente. Este novo método apresenta excepcional capacidade de convergência e não oferece o risco de convergência para uma solução instável. Embora não se tenha uma demonstração formal das características de convergência absoluta, não se observaram falhas de convergência durante uma intensa bateria de severas simulações realizadas até o presente.

## 2.0 - RESGATANDO UMA ANTIGA FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE POTÊNCIA [15]

Em 1970, Galloway *et alii* [15] propuseram um tratamento das barras de geração baseado em um modelo dinâmico de segunda ordem (equação “*swing*” sem amortecimento) com tensão terminal constante (barras PV), conforme a Eq. (1.a), e barras de geração sem regulação (barras PQ), Eqs.(1.a,b):

$$\begin{cases} d^2\theta / dt^2 = (P - P_e) / H & (1.a) \\ d^2V / dt^2 = (Q - Q_e) / G & (1.b) \end{cases}$$

onde:

$\theta, V$  – ângulo e módulo da tensão;

$P$  e  $P_e$ ;  $Q$  e  $Q_e$  – potências ativa e reativa especificadas e correntes;

$H, G$  – constantes de inércia fictícias, artificialmente introduzidas.

Nessa formulação,  $\theta$  é a variável de controle para ajuste do valor de  $P$  especificado. Em essência, o argumento fundamental para a solução proposta em [15] é o fato de que equações algébricas são equivalentes às equações diferenciais, nos pontos de equilíbrio. Sendo assim, admite-se que os métodos de solução numérica de integração usados para resolver sistemas de equações diferenciais sejam igualmente capazes de prover as soluções estacionárias de sistema de equações algébricas não-lineares em tempo finito para uma dada precisão, caso a solução exista e a condição inicial esteja na região de atração do ponto de equilíbrio. Embora essa proposta pareça introduzir uma complexidade desnecessária, ter-se-ia o benefício de aumento de robustez, possibilitando a obtenção de soluções em casos onde métodos convencionais não logram convergência numérica.

Quando o termo  $(d^2\theta/dt^2)$  é nulo,  $\theta$  é tal que  $P_e$  torna-se igual a  $P$ . Todavia, este modelo resulta em trajetórias angulares essencialmente oscilatórias. Assim, a obtenção do valor conveniente de  $\theta$  não é trivial. Portanto, é necessário a introdução de amortecimento para que as trajetórias convirjam assintoticamente para o ponto de equilíbrio. Por outro lado, a introdução de um termo de amortecimento convencional altera o ponto de equilíbrio original. Para resolver este problema Galloway *et alii* propõem anular a velocidade ( $d\theta/dt=0$ ) sempre que ocorrer o cruzamento de  $P_e$  por  $P$ . Um procedimento semelhante pode ser utilizado para a Eq (1.b), associada às barras geradoras do tipo PQ. Por sua vez, as cargas podem ser modeladas algebricamente, como no método convencional, ou dinamicamente, como geradores (Eqs. 1.a,b).

### 3.0 - FLUXO DE POTÊNCIA POR DINÂMICA SINTÉTICA (FPDS) [14]

A proposição original [15] contém diversas debilidades que, na prática, a tornam inviável como opção realista. A despeito do amortecimento artificial introduzido, a resposta é tipicamente oscilatória, não permitindo a adoção de métodos de integração numérica eficientes. Adicionalmente, não há garantias de convergência. Nesse contexto, uma nova formulação foi proposta [14], *Fluxo de Potência por Dinâmica Sintética - FDPS*, com o objetivo de melhorar a robustez e o desempenho computacional, mas mantendo a formulação algébrico-diferencial. Os principais aspectos deste novo método são enumerados a seguir:

(i) Foi sintetizada uma dinâmica de primeira ordem, e.g.,  $d\delta/dt = (P-P_e)/H$  (Galloway et alii propuseram um modelo de segunda ordem);

(ii) Foi racionalizado o tratamento do conjunto de equações algébrico-diferenciais representativo do sistema multi-máquinas (o processo original de Galloway et alii pode conduzir à instabilidade numérica e não contempla as melhores estratégias de ordenamento de cálculo);

(iii) Foram introduzidas técnicas sofisticadas de integração numérica a passo-variável controlado (Galloway et alii utilizam passo fixo);

(iv) Todos os controles foram modelados, e.g., *tapes* (OLTC) e elementos em derivação (“shunts”), (Galloway et alii consideram apenas os limites de reativo da geração);

(v) A síntese dinâmica foi implementada usando-se um modelo de tensão atrás de uma reatância arbitrária e explorando o módulo  $E$  e o ângulo  $\delta$  da tensão interna como variáveis de decisão (Galloway et alii utilizaram os parâmetros  $V$  e  $\theta$  das barras terminais, expressos na Eq. 1). As equações usadas [14] são:

$$\left\{ \begin{array}{l} dE/dt = K_v (V_{ref} - V) \\ d\delta/dt = K_p (P_{ref} - P) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (2.a) \\ (2.b) \end{array}$$

(vi) O método foi implantado na plataforma computacional de um programa avançado (*Organon*) projetado ad-hoc para análise de segurança dinâmica em tempo real e que explora avançadas técnicas de processamento distribuído (Galloway et alii dispunham de poucos recursos computacionais em 1970).

### 4.0 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO

Testes exaustivos com o FPDS têm mostrado excelentes características de convergência, até então não observadas por métodos puramente algébricos. Ainda não foram verificadas falhas para casos com solução factível. Tais resultados suscitam a possibilidade de demonstração de uma justificativa teórica do método. Tal justificativa pode ser difícil ou mesmo impossível para sistemas realistas com, por exemplo, descontinuidades acentuadas. Trabalhos estão sendo desenvolvidos no sentido de se fundamentar teoricamente o método apenas para modelos simplificados. Os resultados ainda não são conclusivos, mas oferecem elementos sólidos para a análise desejada.

A determinação do modelo sintético adotado, ao contrário do proposto em [15], pretende satisfazer as condições do *Teorema do Critério do Círculo de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas* [16]. Ou seja, para que a convergência seja global, seria suficiente garantir que as não-linearidades das equações diferenciais de primeira ordem satisfizessem a denominada *Condição de Setor*. É fácil verificar que para o controle  $P \times \theta$  e  $Q \times V$  isolados, essa condição é satisfeita, para condições de não-colaço total de tensão. Entretanto, os efeitos de  $V$  em  $P$  e  $\theta$  em  $Q$  não são facilmente observados. Maiores detalhes podem ser vistos em [14,16].

Outra fundamentação teórica pode ser obtida através da *Teoria da Passividade*. As equações diferenciais de primeira ordem representam sistemas passivos. Então, se a rede e as cargas se comportam de forma passiva, ou seja, não geram energia, o sistema pode ser dito assintoticamente estável. Em outras palavras, o sistema dissipa energia como um todo e se acomoda em um ponto de energia nula [17]. Cabe observar que quando não há solução e, por conseguinte, não existe ponto de equilíbrio, a rede não se comporta de forma passiva. Isto pode ocorrer, por exemplo, em casos de cargas modeladas como potência constante. Assim, para todo sistema de potência que admita um ponto de equilíbrio estático e adotando-se uma estratégia de integração conveniente, garante-se que a solução estacionária final de fluxos de potência, caso exista, será sempre obtida.

### 5.0 - RESULTADOS PRÁTICOS E ANÁLISE COMPARATIVA

Inicialmente o método foi testado para dois sistemas fictícios muito reduzidos, com o intuito de apenas evidenciar aspectos computacionais lógicos de implementação e viabilidade operacional. Para o sistema de 3 barras mostrado na Figura 5.1, verificou-se que o *método desacoplado rápido tradicional* apresentou problemas de convergência quando a tensão terminal da máquina 4 é tentativamente controlada em 1.0 pu.

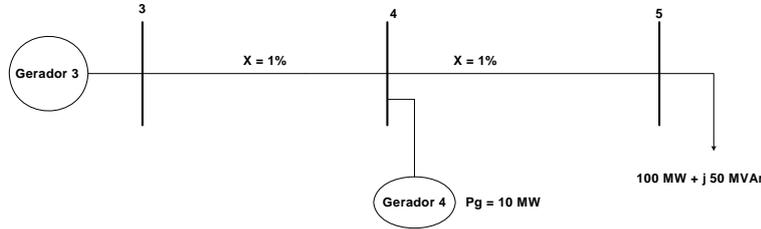


FIGURA 5.1: Sistema Fictício de 3 Barras

Por outro lado, utilizando-se o método proposto, a solução pode ser obtida em 12 iterações / 3 fatorações, mesmo com a tensão terminal da máquina 4 especificada em 1.0 pu. Nesse caso, como a máquina 4 ultrapassa o limite máximo de reativo especificado, o método proposto permite a flutuação de tensão terminal da máquina enquanto não permite violação do limite máximo de geração de reativo permitido na barra. Assim, o novo valor da tensão terminal obtida pela metodologia é de 1.045 pu. Quando esse valor de 1.045 pu é *ab-initio* proposto como módulo da tensão controlada para um processamento através do método desacoplado rápido convencional, a solução é obtida em apenas 2 iterações, como ilustrado na Tabela 5.1. Evidencia-se desta forma a característica de robustez do novo procedimento. Por outro lado, também já fica aparente, mesmo neste reduzido sistema, que a robustez do método é alcançada à custa de um esforço computacional muito maior do que o do método tradicional. Nesse ponto é conveniente lembrar que, enquanto o método clássico de Newton-Raphson completo apresenta características de convergência quadrática, o mesmo não ocorre no método de dinâmica sintética. É também interessante notar que uma implementação com passo fixo de integração demandou, neste caso, um total de 23 iterações.

TABELA 5.1 : Resultados para o Sistema Teste de 3 Barras.

| Nº Barra (Nome)  | <i>Método Desacoplado Rápido</i> |   |  |                 | <i>Método de Dinâmica Sintética</i> |   |  |                    |
|------------------|----------------------------------|---|--|-----------------|-------------------------------------|---|--|--------------------|
|                  | Tensão (pu/graus)                | Potência Ativa/Reativa Gerada (MW + j MVar) | Potência Ativa/Reativa Consumida (MW + j MVar) | Nº de iterações | Tensão (pu/graus)                   | Potência Ativa/Reativa Gerada (MW + j MVar) | Potência Ativa/Reativa Consumida (MW + j MVar) | Nº de iterações    |
| 3 (GER-03) Swing | 1.050 / 0.00                     | 98.1 + j 52.9                               | 0. + J 0.                                      | 2               | 1.050 / 0.00                        | 98.1 + j 48.8                               | 0. + J 0.                                      | 12 (PV)<br>23 (PF) |
| 4 (BARRA-04)     | 1.045 / -.50                     | 10.0 + j 3.6                                | 0. + J 0.                                      |                 | 1.045 / -.51                        | 10.1 + j 3.6                                | 0. + J 0.                                      |                    |
| 5 (BARRA-05)     | 1.040 / -1.1                     | 0. + J 0.                                   | 108.1 + j 50.0                                 |                 | 1.041 / -1.08                       | 0. + J 0.                                   | 108.1 + j 50.0                                 |                    |

Nota: PV- passo de integração variável; PF – passo fixo

Outro sistema reduzido [18], mostrado na Figura 5.2, também foi submetido a teste com o intuito de comprovar as tendências verificadas na primeira investigação, porém agora utilizando como referência o Método de Newton-Raphson completo. Nesse caso foram adotadas tolerâncias de 0.001 pu para os resíduos de potência ativa e reativa das máquinas mostradas na Figura 5.2.

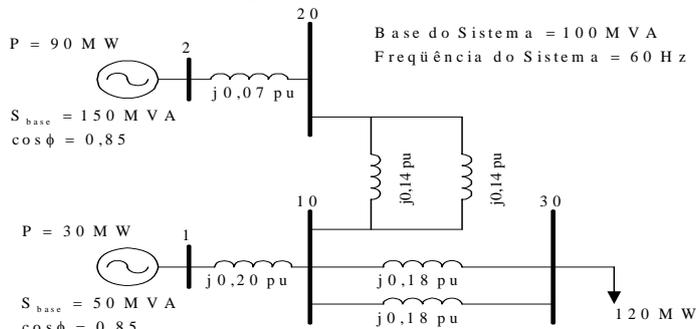


FIGURA 5.2 : Sistema Fictício de 5 Barras

Na Tabela 5.2 pode-se ver que, nesse caso, os resultados obtidos para os módulos e ângulos de tensões de todas as barras do sistema e as potências ativa e reativa geradas ou consumidas pelas máquinas, também são

praticamente idênticos àqueles obtidos com o método de Newton-Raphson tradicional completo. Como também já era esperado, o esforço computacional exigido pelo método de dinâmica sintética foi mais elevado do que o necessário pelo método de Newton-Raphson. Enquanto este último obteve a solução em apenas 1 iteração global, o processamento via dinâmica sintética solicitou 26 iterações / 7 fatorações. A diferença de esforço computacional revela-se agora bem mais elevada, se a formulação de Galloway original, a passo fixo, é tentada.

**TABELA 5.2 : Resultados para o Sistema Teste de 5 Barras.**

| Nº Barra (Nome)  | <i>Método de Newton-Raphson convencional</i> |   |  |                 | <i>Método de Dinâmica Sintética</i> |   |  |                 |
|------------------|--|---|--|-----------------|-------------------------------------|---|--|-----------------|
|                  | Tensão (pu/graus)                            | Potência Ativa/Reativa Gerada (MW + j MVar) | Potência Ativa/Reativa Consumida (MW + j MVar) | Nº de iterações | Tensão (pu/graus)                   | Potência Ativa/Reativa Gerada (MW + j MVar) | Potência Ativa/Reativa Consumida (MW + j MVar) | Nº de iterações |
| 1 (Maq1 Swing)   | 1.017 / .0                                   | 28.6 + j 9.4                                | 0. + j 0.                                      | 1               | 1.017 / .00                         | 28.7 + j 9.5                                | 0. + j 0.                                      | 26<br>(PV)      |
| 2 (Maq2)         | 1.00 / .40                                   | 45.0 + j 1.4                                | 0. + j 0.                                      |                 | 1.00 / .37                          | 45.0 + j 1.4                                | 0. + j 0.                                      |                 |
| 10 (Maq3)        | 1.00 / -3.2                                  | 45.0 + j 6.5                                | 0. + j 0.                                      |                 | 1.00 / -3.24                        | 45.0 + j 6.5                                | 0. + j 0.                                      |                 |
| 20 (BarraTerm 2) | 1.00 / -1.4                                  | 0. + j 0.                                   | 0. + j 0.                                      |                 | 1.00 / -1.44                        | 0. + j 0.                                   | 0. + j 0.                                      | 730<br>(PF)     |
| 30 (Barra PQ)    | 0.994 / -9.4                                 | 0. + j 0.                                   | 118.6 + j 0.                                   |                 | 0.994 / -9.3                        | 0. + j 0.                                   | 118.6 + j .0                                   |                 |

*Nota: PV- passo de integração variável; PF – passo fixo*

Utilizando o FPDS, consoante [14], foi finalmente realizada uma intensa bateria de testes avançados e muito severos, desta feita com sistemas reais de grande porte e visando aplicações realistas na indústria. Para tanto, um protótipo computacional especializado foi implementado [14,19,20]. Neste sentido, pode-se afirmar que *foi desenvolvido um novo paradigma para a solução do tradicional problema de cálculo de fluxo de potência em grandes sistemas elétricos*. Utilizando o protótipo desenvolvido com as características descritas na seção 3, três sistemas reais foram testados. A Tabela 5.3 ilustra algumas características desses três sistemas [14]. 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 5.3 : Sistemas Teste Reais para o Método de Fluxo de Potência por Dinâmica Sintética**

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

Como é sobejamente conhecido, os métodos convencionais de cálculo de fluxo de potência só logram convergência a partir de pontos de operação inicial favoráveis [21,22]. 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. Não obstante, 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, desenvolvido por Jardim & Stott [14], conforme é ilustrado na Tabela 5.4. 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 do 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 5.4 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.

TABELA 5.4 : Desempenho do Método de Fluxo de Potência por Dinâmica Sintética

|  | Natureza do Ponto de Operação Inicial | Sistema # 1 (Brasil) | Sistema # 2 (EUA) | Sistema # 3 (EUA) |
|--|---------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Newton-Raphson</b><br>(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      |
| <b>Dinâmica Sintética</b><br>(Protótipo Jardim & 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 [14] que a solução via síntese dinâmica 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 [14] que o método de dinâmica sintética 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 detrativo, dado que nesses casos, nem mesmo uma solução é obtível pelos métodos convencionais.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os resultados preliminares de um *novo paradigma para a solução do tradicional problema de cálculo de fluxos de potência em grandes redes elétricas*. O método proposto [14], aqui denominado como *Fluxo de Potência por Dinâmica Sintética (FPDS)* resgatou, adaptou, aperfeiçoou e inovou um procedimento sugerido no ano de 1970 por Galloway *et alii* [15], que na época em veio a lume não teve maior sucesso na indústria. Isso em parte ocorreu porque, na época de sua publicação, os requisitos necessários de capacidade de processamento computacional (velocidade, memória) não eram disponíveis. *A principal vantagem do novo método é a excepcional capacidade de convergência numérica, demonstrada em diversas situações realistas, nas quais os métodos tradicionais fracassam*. Essa característica tem potencial de aplicação prática nas conjunturas onde a obtenção de uma solução numérica é imprescindível (e.g. nas vizinhanças do colapso de tensão). O novo procedimento exige um grande esforço computacional e, portanto, não deve ser visto como um substituto natural dos tradicionais e eficientes métodos de solução calcados no algoritmo de Newton-Raphson. Sua aplicação só deve ser invocada nas situações extremas, a título de último recurso. O novo método [14] apresenta riquíssimo espectro de possíveis variantes, constituindo assim um excelente manancial de tópicos de pesquisa de grande interesse prático para a indústria. No momento, os esforços de desenvolvimento do método estão concentrados na melhoria de desempenho computacional.

7.0– AGRADECIMENTOS: Os dois últimos autores agradecem o apoio do *CNPq* e *PRONEX – FAPERJ*.

## 8.0- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) G.T. Heydt, S.S. Venkata, N. Balijepalli, *High Impact Papers in Power Engineering, 1900-1999*, **NAPS**, U. of Waterloo, October 23-24, 2000.
- (2) J.B. Ward, H.W. Hale, *Digital Computer Solution of Power-Flow Problems*, **AIEE Trans.**, Vol 75, June 1956, pp 398-404.
- (3) B. Stott, *Review of Load-Flow Calculation Methods*, **Proc. of the IEEE**, Vol 62, No 7, July 1974, pp 916-929.
- (4) H.P.Pinto, J.L.R.Pereira, N.Martins, J.A.Passos Filho, S.Gomes, F.R.M. Alves, J.C.R.Ferraz, R.M.Henriques, V.M Costa, *Needs and Improvements in Power Flow Analysis*, **VII SEPOPE**, Curitiba, Maio, 2000.
- (5) J.C.Das, **Power System Analysis Short-Circuit Load Flow and Harmonics**, Marcel-Dekker Inc, New York, 2002.
- (6) L.Powell, **Power System Load Flow Analysis**, McGraw-Hill, New York, 2004.
- (7) S.T. Despotović, *A New Decoupled Load-Flow Method*, **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, Vol PAS-93, No. 3, May/June 1974, pp 884-891.
- (8) B. Stott, O. Alsac, *Fast Decoupled Load Flow*, **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, Vol PAS-93, No. 3, May/June 1974, pp 859-869.
- (9) B. Borkowska, *Probabilistic Load Flow*, **IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems**, Vol PAS-93, No. 3, May/June 1974, pp 752-759.
- (10) P.M. Sauer, *Explicit Load Flow Series and Functions*, **IEEE Trans. on PAS**, 1981, pp 3754-3763.
- (11) W. Xu, Y. Liu, J.C. Salmon, T. Le, G.W.K. Chang, *Series Load-Flow: A Novel Non-iterative Load Flow Method*, **Proc. IEE-Gen. Trans., Distr.**, Vol 145, No 3, May 1998, pp 251-256.
- (12) L.A.F.M Ferreira, *Tellegen's Theorem and Power Systems-New Load Flow Equations, New Solution Methods*, **IEEE Trans. on CS**, Vol 37, No 4, April 1990, pp. 519-526.
- (13) L. Euler, **De Fractionibus Continuis**, 1737 (*apud* Aguilera-Navarro M.C.K. *et al.*, Rev. Ciências Exatas e Naturais, Ano 2, no.1, Jul/Dez 2000, Guarapuava, PR, pp. 73-86).
- (14) J. Jardim, B. Stott, *Synthetic Dynamics Power Flow*, (submetido 14.12.2004), **IEEE General Meeting**, San Francisco, 12-16 June 2005.

- (15) R.H. Galloway, J. Taylor, W.D. Hogg, M. 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.
- (16) H.K. Khalil, **Nonlinear Systems**, Macmillan Publishing Company, New York, 1992.
- (17) M. Guillen, **Five Equations that Changed the World, The Power and Poetry of Mathematics**, Hyperion, New York, 1995.
- (18) N. Martins, J.C.R.Ferraz, S.Gomes, P.E.M.Quintão, J.A.Passos Filho, *A Demonstration Example of Secondary Voltage Regulation: Dynamic Simulation and Continuation Power Flow Results*, **Proc IEEE PES Summer Meeting**, Vancouver, July 2001.
- (19) J.L.A.Jardim, C.S. Neto, W.T. Kwasnicki, *Design Features of a Dynamic Security Assessment System*, **IEEE Power Eng. Conf and Expo.**, New York, October 2004.
- (20) B. Stott, *Power System Dynamic Response Calculations*, **Proc. of the IEEE**, Vol 67, No 2, February 1979, pp 219-241.
- (21) B.Stott, *Effective Starting Process for Newton-Raphson Load Flows*, **Proc IEE**, Vol 118, No 8, August 1971, pp. 983-987.
- (22) R.P. Klump, T.J. Overbye, *Techniques for Improving Power Flow Convergence*, **Proc IEEE PES Summer Meeting**, Seattle, July 2000.

Rio de Janeiro, 12.01.2005

*Nota: O título original deste artigo era "Alcançando Robustez Absoluta na Solução do Problema de Fluxo de Potência Combinando Método não Ortodoxo com Artifício Numérico Inteligente".*