
UMA NOVA ABORDAGEM PARA A SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO DE CARGA PELO MÉTODO DE NEWTON COM OTIMIZAÇÃO DE PASSO

Carlos A. Castro
ccaastro@dsee.fee.unicamp.br

Luciana M.C. Braz
luciana@dsee.fee.unicamp.br

UNICAMP/FEEC/DSEE
C.P. 6101
13081-970 Campinas SP

RESUMO – Este trabalho apresenta uma nova abordagem para a resolução do problema de cálculo de fluxo de carga pelo método de Newton utilizando otimização de passo. A cada iteração obtém-se um fator que é multiplicado pelo vetor de correções das variáveis de estado de forma a minimizar uma função quadrática baseada nos *mismatches* de potência. O método proposto é testado para redes de pequeno e grande portes. Atenção especial é dada a redes mal-condicionadas e sobrecarregadas. Mesmo que não haja um ponto de operação factível (solução das equações de fluxo de carga), a utilização da otimização de passo fornece como resultado o estado mais próximo possível da região de operação factível da rede. Esse resultado admite uma interpretação importante do ponto de vista da operação de redes. O método proposto pode ser uma ferramenta particularmente útil para os métodos de análise de instabilidade e colapso de tensão.

ABSTRACT – This paper presents a new approach to the Newton's power flow solution using step size optimization. At each iteration a scalar is computed and multiplied by the state variable update vector so as to minimize a power mismatch based quadratic function. Small and large systems are used in the simulations. Special attention is paid to ill-conditioned and overloaded systems. Even in the cases where there is no feasible operating point (solution of the power flow equations), step optimization provides meaningful and important results: they represent the closest possible point to the region of feasible operation. These results provided by the new formulation allow an important interpretation from the system operation standpoint. The proposed method can be an important tool for voltage instability and voltage collapse analysis methods.

1 INTRODUÇÃO

O cálculo de fluxo de carga é uma ferramenta básica na análise de sistemas de potência, tanto em nível de planejamento como de operação. Os primeiros estudos visando

a solução computacional do problema de fluxo de carga remontam a 1956, com o método de Ward e Hale (1956). Pouco tempo depois o método Newton foi proposto (Van Ness, 1959; Tinney e Hart, 1967) e até hoje é largamente utilizado. Com o desenvolvimento das tecnologias dos computadores digitais, surgiu a necessidade de se ter algoritmos cada vez mais rápidos, especialmente em ambientes de operação em tempo real. Um grande avanço foi o desenvolvimento de técnicas de esparsidade (Tinney e Walker, 1967) e armazenamento compacto (Zollenkopf, 1971). Muitos trabalhos de pesquisa têm sido publicados sobre métodos de solução de fluxo de carga, a maioria deles propondo técnicas para a melhoria das características de convergência (Van Amerongen, 1989), e alguns poucos tratando da análise teórica do problema (Monticelli *et alii*, 1990). Observam-se dificuldades na utilização dos métodos tradicionais de resolução do problema de fluxo de carga para:

- as chamadas redes mal-condicionadas. Estas são redes que têm um ponto de operação factível, porém, os métodos existentes não conseguem obtê-lo, ou o obtêm com dificuldades numéricas;
- redes que, devido ao seu crescente carregamento, tornam-se mal-condicionadas. Este fato se deve ao crescimento da demanda de energia elétrica sem o correspondente investimento nos sistemas de geração e, principalmente, de transmissão. Sob estas condições as redes operam próximas aos seus limites de operação e podem sofrer, entre outros, os fenômenos de instabilidade de tensão e até de colapso de tensão. Estes representam as mais severas condições de operação de um sistema de potência e têm recebido atenção especial por parte das empresas concessionárias de energia e instituições de pesquisa;
- redes que não têm de fato um ponto de operação factível. Estes casos podem ocorrer para redes após distúrbios severos (como por exemplo a remoção de um equipamento de uma rede já sobrecarregada) e podem levá-las ao colapso de tensão;
- redes que admitem múltiplas soluções.

Artigo submetido em 27/04/97

Revisão em 04/08/97

Aceito sob recomendação do Ed. Cons. Prof. Dr. Jorge Coelho

Estas situações podem ser melhor entendidas através da figura 1, onde são definidas três regiões no espaço multidimensional de parâmetros (Overbye, 1994).

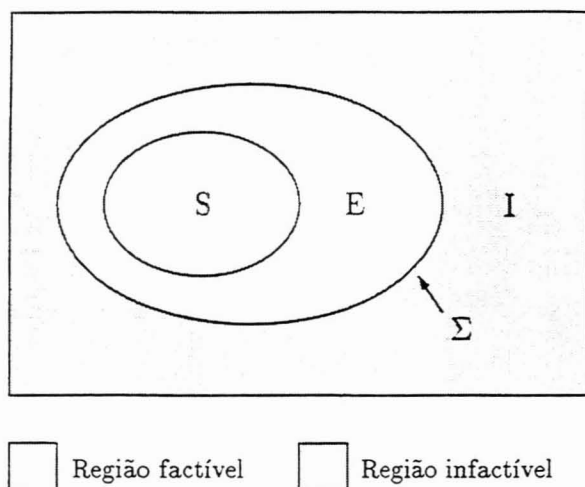


Figura 1: Espaço multidimensional de parâmetros.

A *região factível* é composta pelos pontos no espaço de parâmetros onde a operação da rede é possível. A *região infactível* (I) representa pontos no espaço de parâmetros em que a operação não é possível. Os pontos que compõem a região factível podem ainda ser do tipo *seguro* (S), ou seja, todos os limites de operação da rede são respeitados (tensões nas barras, fluxos de potência nos ramos, etc.), ou do tipo *de emergência* (E), onde alguns limites de operação são violados. Naturalmente deseja-se operar a rede na região factível segura todo o tempo. Em muitos casos, é possível que a rede opere na região factível de emergência por um certo tempo até que medidas corretivas sejam tomadas para levá-la à região segura. O conjunto de pontos da fronteira entre as regiões factível e infactível é representado na figura por Σ .

Dependendo das características próprias das redes, os métodos de resolução do problema de fluxo de carga podem ou não obter um ponto de operação para elas, mesmo que haja um na região factível. É necessário o desenvolvimento de ferramentas que:

- melhorem as características de convergência da rede caso ela seja mal-condicionada e haja um ponto de operação na região factível;
- obtenham um estado da rede mesmo que não haja solução e quantifiquem a distância do estado obtido à fronteira Σ , identificando o grau de insolubilidade e os parâmetros que otimizem a volta do sistema para a região com solução (EPRI, 1989; EPRI, 1991).

Uma aplicação importante do método proposto é no estudo da instabilidade de tensão e colapso de tensão, que atualmente tem recebido muita atenção. Devido a vários incidentes ocorridos em redes nos últimos anos (EPRI, 1989), tem-se hoje várias propostas de métodos que procuram estimar a distância do ponto de operação da rede ao colapso de tensão. Alguns métodos, como os propostos por Flatabø *et alii* (1993) e por Alvarado *et alii* (1994), baseiam-se no

aumento gradativo da carga até que o estado do sistema atinja a fronteira (Σ) entre as regiões factível e infactível indicando que a rede está sujeita ao colapso de tensão. Em particular, o aumento de carga definido pelo método proposto por Flatabø *et alii* (1993) é obtido através de análise de sensibilidade. Como, ao se aproximar de Σ , o problema torna-se cada vez mais não linear (rede mais carregada) os fatores de sensibilidade que definem o aumento de carga são cada vez menos precisos, e pode ser definido um aumento de carga tal que o estado da rede saia da região factível. Torna-se então necessário fazer modificações no método tradicional de solução do problema de fluxo de carga de forma a fornecer informações adicionais sobre o resultado obtido, que não seja simplesmente um aviso de não-convergência ou divergência. Por exemplo, pode ser conveniente que se tenha uma idéia de quão longe da fronteira Σ o sistema está, a fim de obter meios de trazê-lo de volta à região factível delimitada por Σ através de ações de controle. Dispõe-se então de duas alternativas básicas de abordagem do problema. A primeira é a utilização dos chamados métodos de continuação (Iba *et alii*, 1991). Neste caso, resolve-se as equações de fluxo de carga parametrizadas, e o parâmetro dá uma indicação de que o problema tem solução (se igual a zero) ou não (se diferente de zero). Uma segunda alternativa foi originalmente proposta por Wallash (1968), Sasson (1969) e Sasson *et alii* (1971), onde o cálculo de uma solução para as equações de fluxo de carga pode ser considerado como um problema de programação não-linear. São determinadas a direção e a magnitude da correção do estado da rede em cada iteração tal que uma certa função custo seja minimizada. O valor da função custo torna-se zero quando houver uma solução para a rede, ou permanece não nulo e constante caso a solução não exista. Modificando o caminho de convergência e/ou o passo de cada iteração pode-se conseguir uma melhor característica de convergência para o problema de fluxo de carga.

Seguindo a idéia de se considerar o fluxo de carga como um problema de programação não-linear, Iwamoto e Tamura (1978; 1981) propuseram a introdução de um *fator multiplicador escalar ótimo* que otimize cada passo de iteração do fluxo de carga. Esse fator (μ) é calculado de forma a minimizar uma função quadrática baseada nos *mismatches* de potência e é multiplicado pelo vetor de correção de estado para melhorar o caminho de convergência do fluxo de carga. Na formulação proposta as tensões aparecem em coordenadas retangulares. Scudder (1981) e Scudder e Alvarado (1981) propuseram uma adaptação deste método para a formulação do fluxo de carga em que as tensões aparecem em coordenadas polares, que é o caso mais comum encontrado na prática. O método proposto utiliza transformações de coordenadas polar-retangular e vice-versa durante o processo iterativo, além de envolver algumas aproximações em relação ao método original.

Dehnel e Dommel (1989) propuseram um método originalmente desenvolvido para o caso em que as tensões são dadas em coordenadas polares. A idéia básica do método é similar ao método proposto em (Iwamoto e Tamura, 1981), onde é obtido um fator de amortecimento (λ) que é multiplicado pelo vetor de correção de estado. A função a ser minimizada no entanto é diferente da utilizada por Iwamoto e Tamura. Este método apresenta algumas dificuldades básicas com relação ao cálculo de λ : (a) a função a ser minimizada assume queda quadrática da norma do vetor de *mismatches*

de potência, o que pode não ser verdadeiro e resultar em valores de λ não utilizáveis, especialmente para redes bem condicionadas; (b) ele depende de um fator de ajuste que é obtido empiricamente; (c) este fator de ajuste funciona bem para casos em que não há solução das equações de fluxo de carga, mas pode resultar em desempenho fraco para redes bem condicionadas; e (d) seu cálculo apresenta problemas na primeira iteração, sendo eventualmente necessário mudar o ponto de operação inicial para valores não usuais.

A formulação proposta neste trabalho baseia-se na obtenção de um *fator de otimização de passo* similar ao proposto por Iwamoto e Tamura (1981), mas originalmente aplicado ao fluxo de carga com as tensões em coordenadas polares, não exigindo transformações trigonométricas ou definição de fatores empíricos. A utilização do método proposto garante a obtenção da *melhor solução possível* para a estimativa inicial, mesmo para os casos do fluxo de carga sem solução ou com soluções múltiplas. Outras vantagens desse método são um pequeno esforço computacional e pouca memória de armazenamento adicionais, podendo ser facilmente incorporado a um programa de fluxo de carga (em coordenadas polares) com poucas e simples modificações, que são apenas acrescentadas ao programa para o cálculo de μ , sem alterar o algoritmo original de resolução do fluxo de carga.

A seção 2 apresenta uma breve descrição dos métodos propostos em (Iwamoto e Tamura, 1981), (Scudder, 1981) e (Scudder e Alvarado, 1981). Na seção 3 o método proposto neste trabalho é apresentado. A seção 4 contém os resultados das simulações. Finalmente a seção 5 apresenta as conclusões deste trabalho.

2 DESCRIÇÃO DE DOIS MÉTODOS DE FLUXO DE CARGA COM OTIMIZAÇÃO DE PASSO

Os métodos propostos em (Iwamoto e Tamura, 1981) (que será chamado de método de Iwamoto) e em (Scudder, 1981; Scudder e Alvarado, 1981) (que será chamado de método de Scudder) serão apresentados de maneira sucinta. Maiores detalhes poderão ser obtidos nas referências bibliográficas propriamente ditas.

2.1 Método de Iwamoto (Iwamoto e Tamura, 1981)

As injeções nodais líquidas de potência ativa e reativa com as tensões em coordenadas retangulares são (Overbye, 1994):

$$P_k = \sum_{m=1}^n [e_k (e_m G_{km} - f_m B_{km}) + f_k (f_m G_{km} + e_m B_{km})]$$

$$Q_k = \sum_{m=1}^n [f_k (e_m G_{km} - f_m B_{km}) - e_k (f_m G_{km} + e_m B_{km})] \quad (1)$$

onde n é o número de barras da rede, $(e_k + j f_k)$ é a tensão na barra k e $(G_{km} + j B_{km}) = Y_{km}$ é um elemento da matriz admitância nodal. As equações básicas de fluxo de carga

para uma rede de n barras podem ser colocadas na forma matricial:

$$\Delta s(\mathbf{x}) = s^{esp} - s(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \Delta P(\mathbf{x}) \\ \Delta Q(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}^{esp} - \mathbf{P}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{Q}^{esp} - \mathbf{Q}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2)$$

onde Δs tem dimensão $(2n \times 1)$ e representa o vetor dos *mismatches* de potência, constituído pelas partes ativa ΔP ($n \times 1$) e reativa ΔQ ($n \times 1$). Os *mismatches* são dados pela diferença entre as injeções especificadas para as barras e as injeções calculadas através das equações (1). O vetor de estado \mathbf{x} ($2n \times 1$) é dado por:

$$\mathbf{x} = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n \ f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n]^T \quad (3)$$

Considera-se o vetor \mathbf{x} como tendo dimensão $(2n \times 1)$ para tornar mais simples a apresentação dos aspectos gerais do método. Evidentemente, alguns elementos de \mathbf{x} não são incógnitas e constituem dados iniciais do problema. Por exemplo, a barra de referência (tipo *slack*) tem e_k e f_k previamente definidos. Para barras de geração (tipo PV) e_k e f_k devem ser calculados de forma que $(e_k^2 + f_k^2)^{1/2} = V_k$, onde V_k também é previamente definido. Essas particularidades alteram a forma das equações de fluxo de carga, porém não são relevantes para o entendimento do princípio geral do método descrito. As mesmas considerações são válidas para os vetores das potências.

Devido à característica quadrática das equações de *mismatches* de potência, pode-se mostrar que suas expansões em série de Taylor em torno de um ponto de operação \mathbf{x} até os termos de segunda ordem são exatas e têm a seguinte forma:

$$\Delta s(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) = s^{esp} - s(\mathbf{x}) - \mathbf{J} \Delta \mathbf{x} - s(\Delta \mathbf{x}) = \mathbf{0} \quad (4)$$

onde \mathbf{J} é a matriz Jacobiana e $s(\Delta \mathbf{x})$ representa as próprias equações das potências nodais calculadas para a variação de estado. Na formulação tradicional do fluxo de carga só são considerados os termos até primeira ordem da expansão em série de Taylor (o termo $s(\Delta \mathbf{x})$ é desprezado) e o estado da rede na iteração j é obtido por:

$$\mathbf{x}^j = \mathbf{x}^{j-1} + \Delta \mathbf{x}^{j-1} \quad (5)$$

onde $\Delta \mathbf{x}^{j-1} = \mathbf{J}^{-1} \Delta s(\mathbf{x}^{j-1})$. A idéia proposta em (Iwamoto e Tamura, 1981) é obter o estado da rede através de:

$$\mathbf{x}^j = \mathbf{x}^{j-1} + \mu \Delta \mathbf{x}^{j-1} \quad (6)$$

onde μ é um *fator de otimização de passo* calculado de forma a minimizar a função:

$$F(\mathbf{x}^j) = \frac{1}{2} [\Delta s(\mathbf{x}^j)]^T [\Delta s(\mathbf{x}^j)] \quad (7)$$

onde \mathbf{x}^j é dado pela equação (6). $F(\mathbf{x})$ é uma função quadrática em termos dos *mismatches* calculados no ponto de operação obtido com a utilização do fator de otimização de passo μ .

Deseja-se que a introdução do fator μ melhore as características de convergência do processo iterativo de obtenção da solução do estado da rede, em especial para redes muito carregadas e/ou mal-condicionadas (Overbye, 1994). Aplicando o fator μ , a equação (4) fica:

$$\begin{aligned} s^{esp} - s(\mathbf{x}) - \mu \mathbf{J} \Delta \mathbf{x} - \mu^2 s(\Delta \mathbf{x}) &= 0 \\ \mathbf{a} + \mu \mathbf{b} + \mu^2 \mathbf{c} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Pode-se notar que $\mathbf{a} = -\mathbf{b}$ é o próprio vetor de mismatches de potência e que \mathbf{c} é um vetor cujos elementos apresentam a mesma forma das expressões das injeções de potência nodais, porém calculados a partir do vetor de correção de estado.

Substituindo (8) em (7) e aplicando a condição de otimalidade $\partial F / \partial \mu = 0$, obtém-se o valor de μ que é dado pela solução da seguinte equação cúbica em μ :

$$g_0 + g_1 \mu + g_2 \mu^2 + g_3 \mu^3 = 0 \quad (9)$$

na qual:

$$\begin{aligned} g_0 &= \sum_{i=1}^{2n} (a_i b_i) & g_2 &= 3 \sum_{i=1}^{2n} (b_i c_i) \\ g_1 &= \sum_{i=1}^{2n} (b_i^2 + 2a_i c_i) & g_3 &= 2 \sum_{i=1}^{2n} (c_i^2) \end{aligned} \quad (10)$$

Para redes bem condicionadas, μ apresenta valores em torno de 1,0. Para redes sem solução μ assume valores muito baixos. Teoricamente μ tende a zero neste caso, indicando que a solução atual não pode ser melhorada a fim de minimizar a função quadrática dos mismatches (7).

O processo iterativo básico de solução do fluxo de carga utilizando o fator de otimização de passo μ é:

- (1) Inicializar contador de iterações $j = 0$. Escolher estimativa inicial de estado \mathbf{x}^j ;
- (2) Calcular mismatches de potência $\Delta \mathbf{s}(\mathbf{x}^j)$ e vetores \mathbf{a} e \mathbf{b} ;
- (3) Calcular correção no estado $\Delta \mathbf{x}^j = (\mathbf{J}^j)^{-1} \Delta \mathbf{s}(\mathbf{x}^j)$;
- (4) Calcular vetor \mathbf{c} ;
- (5) Calcular coeficientes da equação cúbica g_0, g_1, g_2 e g_3 ;
- (6) Calcular fator μ ;
- (7) Obter novo estado $\mathbf{x}^{j+1} = \mathbf{x}^j + \mu \Delta \mathbf{x}^j$;
- (8) Incrementar contador de iterações $j = j + 1$ e voltar ao passo (2).

A inserção dos passos (4), (5) e (6) e as modificações dos passos (2) e (7) representam um esforço computacional adicional muito pequeno ao problema. Deve-se esclarecer também que a introdução do fator de otimização de passo não altera os procedimentos convencionais de consideração de controles e limites no problema de fluxo de carga, tais como controle de tap de transformadores e limites de geração de potência reativa em geradores.

2.2 Método de Scudder (Scudder, 1981; Scudder e Alvarado, 1981)

Em (Scudder, 1981; Scudder e Alvarado, 1981) foi proposta uma adaptação do método descrito anteriormente para o caso mais comum na prática, que é ter o problema de fluxo de carga formulado com as tensões em coordenadas polares. Nesta formulação as equações de potência são:

$$P_k = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})$$

$$Q_k = V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (11)$$

onde $V_k \angle \theta_k$ é a tensão da barra k , $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ e o vetor de estado é:

$$\mathbf{x} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n \ V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n]^T \quad (12)$$

A formulação tradicional do problema de fluxo de carga (desprezando os termos de ordem superior a um na expansão em série de Taylor) é:

$$\Delta \mathbf{s} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \mathbf{J} \cdot \Delta \mathbf{x} \quad (13)$$

onde \mathbf{H} , \mathbf{N} , \mathbf{M} e \mathbf{L} são submatrizes que formam a matriz Jacobiana e são associadas às sensibilidades $\partial P / \partial \theta$, $\partial P / \partial V$, $\partial Q / \partial \theta$ e $\partial Q / \partial V$, respectivamente.

A dificuldade associada à adaptação da formulação se refere à obtenção do vetor de correção do estado da rede. Dado um ponto \mathbf{x}^p , onde o índice superior p indica coordenadas polares, e o seu correspondente \mathbf{x}^r (coordenadas retangulares), nota-se que os respectivos vetores de correção de estado são diferentes, ou seja:

$$\Delta \mathbf{x}^p = (\mathbf{J}^p)^{-1} \Delta \mathbf{s}(\mathbf{x}^p) \neq \Delta \mathbf{x}^r = (\mathbf{J}^r)^{-1} \Delta \mathbf{s}(\mathbf{x}^r) \quad (14)$$

A diferença se deve às matrizes Jacobianas, já que os vetores de mismatches são os mesmos. Observando as equações (4) e (8) nota-se que o vetor \mathbf{a} é o mesmo para ambas as formulações. Em (Scudder, 1981; Scudder e Alvarado, 1981) afirma-se que o vetor \mathbf{c} também é o mesmo e que, devido à diferença mostrada em (14), o vetor \mathbf{b} é diferente. Mostra-se que:

$$\mathbf{b} = -\mathbf{J}^r \Delta \mathbf{x}^r \approx -\mathbf{J}^p (\Delta \mathbf{x}^p + \Delta \Delta \mathbf{x}^p) \quad (15)$$

na qual:

$$\Delta \Delta \mathbf{x}^p = \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \Delta V_1 / V_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \Delta V_n / V_n \\ -V_1 \Delta \theta_1^2 / 2 \\ \vdots \\ -V_n \Delta \theta_n^2 / 2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Na verdade o vetor \mathbf{c} não é o mesmo nas duas formulações, o que pode ser confirmado através da análise da equação (14). Se os vetores de correção são diferentes, as equações de potência calculadas para esses vetores resultarão em valores diferentes. Para fins de implementação computacional e comparações entre os métodos, mantivemos neste trabalho a idéia originalmente apresentada em (Scudder, 1981; Scudder e Alvarado, 1981). Através da comparação com o método que será proposto na seção seguinte será avaliado o efeito desta aproximação nos resultados. O processo iterativo básico de solução neste caso é:

- (1) Inicializar contador de iterações $j = 0$. Escolher estimativa inicial de estado \mathbf{x}^p e o correspondente \mathbf{x}^r ;
- (2) Calcular *mismatches* de potência $\Delta s(\mathbf{x}^p)$ e vetor \mathbf{a} ;
- (3) Calcular correção no estado $\Delta \mathbf{x}^p = (\mathbf{J}^p)^{-1} \Delta s(\mathbf{x}^p)$;
- (4) Obter $\Delta \mathbf{x}^r$ e $\Delta \Delta \mathbf{x}^p$;
- (5) Calcular vetores \mathbf{b} e \mathbf{c} ;
- (6) Calcular coeficientes da equação cúbica g_0, g_1, g_2 e g_3 ;
- (7) Calcular fator μ ;
- (8) Obter novo estado $\mathbf{x}^r = \mathbf{x}^r + \mu \Delta \mathbf{x}^r$;
- (9) Obter \mathbf{x}^p a partir de \mathbf{x}^r ;
- (10) Incrementar contador de iterações $j = j + 1$ e voltar ao passo (2).

Deve-se observar que, a fim de facilitar a notação, o contador de iterações j não aparece como índice, aparecendo somente os índices referentes às formulações polar e retangular. O método proposto em (Scudder, 1981; Scudder e Alvarado, 1981) apresenta as seguintes características:

- baseia-se em uma adaptação direta do método existente com as tensões em coordenadas retangulares, ou seja, a equação final (8) obtida em (Iwamoto e Tamura, 1981) foi adaptada para a formulação em que as tensões aparecem em coordenadas polares. Deve-se lembrar que a expansão das equações de fluxo de carga em coordenadas polares se diferencia da expansão em coordenadas retangulares pois apresenta infinitos termos. A consideração dos termos até segunda ordem, então, constitui uma aproximação;
- faz-se uma aproximação com relação ao vetor \mathbf{b} ;
- faz-se também uma aproximação com relação ao vetor \mathbf{c} . Quanto mais longe da solução, maior será a diferença entre os vetores \mathbf{c} calculados com $\Delta \mathbf{x}^p$ e $\Delta \mathbf{x}^r$;
- o cálculo de μ é feito como se o problema fosse formulado em coordenadas retangulares, pois faz-se uma transformação de coordenadas durante o processo. Não entanto, o vetor de correção de estado original é calculado em coordenadas polares, o que naturalmente constitui uma aproximação.

3 MÉTODO PROPOSTO

3.1 Idéia básica

O método proposto neste trabalho utiliza a formulação do fluxo de carga em que as tensões aparecem em coordenadas polares, conforme a equação (11). A formulação para obtenção do fator de otimização de passo é baseada na idéia apresentada em (Iwamoto e Tamura, 1981) (método de Iwamoto). Deve-se lembrar porém que a expansão das equações dos *mismatches* de potência neste caso possui infinitos termos e que a consideração somente dos termos de ordem igual ou inferior a 2 representa uma aproximação. Considerar a equação de *mismatch* de potência ativa de uma barra k . Sua expansão em série de Taylor em torno de

um ponto de operação \mathbf{x} considerando os termos de ordem igual ou inferior a 2 resulta em:

$$\Delta P_k(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) = \Delta P_k(\mathbf{x}) + \left[\sum_{m \in \mathcal{K}} \Delta x_m \cdot \frac{\partial}{\partial x_m} \right] \cdot \Delta P_k(\mathbf{x}) + \frac{1}{2} \cdot \left[\sum_{m \in \mathcal{K}} \Delta x_m \cdot \frac{\partial}{\partial x_m} \right]^2 \cdot \Delta P_k(\mathbf{x}) = 0 \quad (17)$$

Escrevendo equações similares para todas as barras da rede ($k = 1 \dots n$) e lembrando que os *mismatches* de potência são dados pela diferença entre um valor especificado constante e um valor calculado, que depende do próprio estado da rede, pode-se definir:

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_P &= \Delta \mathbf{P}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{b}_P &= \left[\sum_{m \in \mathcal{K}} \Delta x_m \cdot \frac{\partial}{\partial x_m} \right] \cdot \Delta P_k(\mathbf{x}) \\ &= -\mathbf{H} \cdot \Delta \theta - \mathbf{N} \cdot \Delta V = -\mathbf{a}_P \\ \mathbf{c}_P &= \frac{1}{2} \cdot \left[\sum_{m \in \mathcal{K}} \Delta x_m \cdot \frac{\partial}{\partial x_m} \right]^2 \cdot \Delta P_k(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (18)$$

Procedendo da mesma maneira para os *mismatches* de potência reativa, obtendo os respectivos vetores \mathbf{a}_Q , \mathbf{b}_Q e \mathbf{c}_Q e lembrando das idéias básicas para introdução dos fatores de otimização de passo do método de Iwamoto e apresentadas na seção anterior, pode-se escrever:

$$\Delta s(\mathbf{x} + \mu \Delta \mathbf{x}) = \begin{array}{c} \mathbf{a}_P \\ \mathbf{a}_Q \end{array} + \mu \cdot \begin{array}{c} \mathbf{b}_P \\ \mathbf{b}_Q \end{array} + \mu^2 \cdot \begin{array}{c} \mathbf{c}_P \\ \mathbf{c}_Q \end{array} = 0 \quad (19)$$

O processo de cálculo de μ neste caso, assim como o algoritmo básico de resolução do fluxo de carga, é idêntico ao método de Iwamoto mostrado na seção 2.1. As principais características do método proposto são:

- o método proposto é baseado em uma formulação originalmente em coordenadas polares. Ao contrário do método de Scudder, uma dedução completa das equações é feita com base na metodologia de Iwamoto;
- não são realizadas transformações de coordenadas (polar-retangular) durante o processo de cálculo. A única aproximação se refere à não consideração dos termos de ordem maior que dois na expansão em série de Taylor;
- não há aproximações com relação ao vetor \mathbf{c} , que é diferente daqueles definidos nos métodos de Iwamoto e Scudder. Isto resulta em diferenças fundamentais entre os desempenhos dos métodos proposto e de Scudder;

- os vetores **a** e **b** são definidos da mesma maneira que no método de Iwamoto, não havendo necessidade do cálculo do termo adicional ($\mathbf{J}^p \cdot \Delta \mathbf{x}^p$) no vetor **b** como no método de Scudder;
- o esforço computacional adicional para o cálculo de μ é muito pequeno. Em particular, a obtenção do vetor **c** equivale, em termos de esforço computacional, ao cálculo dos *mismatches* de potência.

3.2 Exemplo ilustrativo

Considerar a rede exemplo de 3 barras mostrada na figura 2.

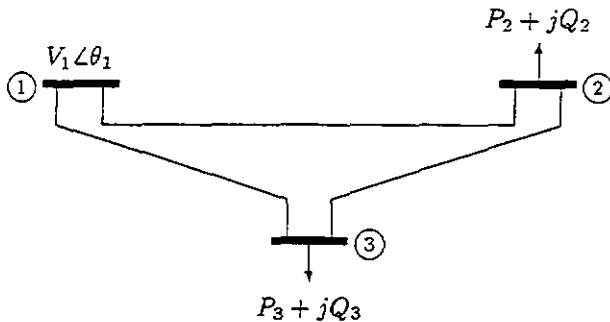


Figura 2: Rede exemplo de 3 barras.

A barra 1 é adotada como referência (V_1 e θ_1 especificados). As barras 2 e 3 são barras de carga (P_2 , Q_2 , P_3 e Q_3 especificados). O sistema de equações de fluxo de carga é composto por quatro equações correspondentes aos *mismatches* de potência ativa e reativa nas barras 2 e 3 e quatro incógnitas (V_2 , θ_2 , V_3 e θ_3). A expansão em série de Taylor da equação de *mismatch* de potência ativa para a barra 2 fica:

$$\begin{aligned} \Delta P_2(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}) = & \Delta P_2(\mathbf{x}) - \frac{\partial}{\partial \theta_2} P_2 \cdot \Delta \theta_2 - \frac{\partial}{\partial \theta_3} P_2 \cdot \Delta \theta_3 - \\ & \frac{\partial}{\partial V_2} P_2 \cdot \Delta V_2 - \frac{\partial}{\partial V_3} P_2 \cdot \Delta V_3 - \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\partial^2}{\partial \theta_2^2} P_2 \cdot \Delta \theta_2^2 + \right. \\ & \frac{\partial^2}{\partial \theta_3^2} P_2 \cdot \Delta \theta_3^2 + \frac{\partial^2}{\partial V_2^2} P_2 \cdot \Delta V_2^2 + \frac{\partial^2}{\partial V_3^2} P_2 \cdot \Delta V_3^2 + \\ & 2 \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial \theta_2 \partial \theta_3} P_2 \cdot \Delta \theta_2 \cdot \Delta \theta_3 + \right. \\ & \frac{\partial^2}{\partial \theta_2 \partial V_2} P_2 \cdot \Delta \theta_2 \cdot \Delta V_2 + \frac{\partial^2}{\partial \theta_2 \partial V_3} P_2 \cdot \Delta \theta_2 \cdot \Delta V_3 + \\ & \frac{\partial^2}{\partial \theta_3 \partial V_2} P_2 \cdot \Delta \theta_3 \cdot \Delta V_2 + \frac{\partial^2}{\partial \theta_3 \partial V_3} P_2 \cdot \Delta \theta_3 \cdot \Delta V_3 + \\ & \left. \left. \frac{\partial^2}{\partial V_2 \partial V_3} P_2 \cdot \Delta V_2 \cdot \Delta V_3 \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Nota-se que o termo constante do *mismatch* (P_2^{esp}) já não aparece nos termos de derivada da equação (20). Os termos da derivada primeira da potência em relação aos ângulos, e que são multiplicados pelas correções de ângulos, são elementos da submatriz **H**. Os termos da derivada primeira da potência em relação às magnitudes das tensões, e que são multiplicados pelas correções de magnitudes de tensão, são elementos da submatriz **N**. O esforço computacional para o cálculo dos termos das derivadas segundas é equivalente ao esforço de cálculo dos *mismatches* de potência. Neste caso, os elementos dos vetores **a**, **b** e **c** são:

$$\begin{aligned} a_2 = & \Delta P_2(\mathbf{x}) \\ b_2 = & -\frac{\partial}{\partial \theta_2} P_2 \cdot \Delta \theta_2 - \frac{\partial}{\partial \theta_3} P_2 \cdot \Delta \theta_3 - \\ & \frac{\partial}{\partial V_2} P_2 \cdot \Delta V_2 - \frac{\partial}{\partial V_3} P_2 \cdot \Delta V_3 \\ = & -H_{22} \cdot \Delta \theta_2 - H_{23} \cdot \Delta \theta_3 - \\ & N_{22} \cdot \Delta V_2 - N_{23} \cdot \Delta V_3 = -\Delta P_2(\mathbf{x}) \\ c_2 = & -\frac{1}{2} \cdot [\dots] \quad \text{— ver equação (20)} \end{aligned} \quad (21)$$

As outras equações de *mismatches* de potência para P_3 , Q_2 e Q_3 assim como os demais elementos dos vetores **a**, **b** e **c** podem, então, ser facilmente obtidos.

4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Nesta seção são apresentados alguns resultados de simulações utilizando o método proposto para várias redes. São feitas comparações com o método de Newton convencional e com o de Scudder (Scudder, 1981; Scudder e Alvarado, 1981).

4.1 Rede exemplo

Na rede exemplo de três barras mostrada na figura 2, seção 3.2, a tensão da barra 1 é igual a 1,06∠0° pu. A potência de carga na barra 2 é de 130+j30 MVA. A potência de carga na barra 3 é de 130+jQ₃ MVA, onde nas simulações variou-se o valor de Q₃. As linhas que conectam as barras são idênticas e representadas pelos seus modelos π . A impedância série é de 0,05 + j0,20 pu e a susceptância *shunt* é de 0,05 pu. A tabela 1 mostra o resultado do processo de resolução do fluxo de carga para alguns valores de Q₃. São mostrados os resultados do método de Newton convencional (sem μ), do método de Scudder e do método proposto neste trabalho.

Tabela 1: Comparação entre os métodos para a rede exemplo: convergência e tensões.

Q ₃ (MVar)	Newton	Scudder	Proposto
0	3 (0,953) ^{(*)1}	3 (0,953)	3 (0,953)
50	3 (0,866)	3 (0,866)	3 (0,866)
100	4 (0,745)	3 (0,745)	3 (0,745)
132	5 (0,571)	4 (0,569)	4 (0,569)
133	NC ^{(*)2}	MR4 (0,546) ^{(*)3}	MR4 (0,544)
150	NC	MR2 (0,557)	MR2 (0,566)
200	NC	MR2 (0,537)	MR1 (0,593)
1000	NC	MR1 (0,529)	MR1 (0,533)

^{(*)1} convergiu em 3 iterações, $V_3 = 0,953$ pu.

^{(*)2} não convergiu.

^{(*)3} melhor resultado em 4 iterações, $V_3 = 0,546$ pu.

Com a otimização de passo obtém-se uma melhor solução quando o fluxo de carga convencional não converge no sentido de minimizar a função *F*. Para situações em que há solução, o comportamento com e sem μ é aproximadamente o mesmo. Para valores maiores que Q₃ = 132 MVar a

tensão final na barra 3 é aproximadamente constante, como será discutido adiante. O método proposto apresenta resultados similares aos obtidos com o método de Scudder. A tabela 2 mostra os valores dos fatores multiplicadores μ para o método de Scudder e para o método proposto neste trabalho.

Tabela 2: Comparação entre os métodos para a rede exemplo: fatores μ .

It \Rightarrow	0	1	2	3	4
$Q_3 \Downarrow$					
0	0,9923 ^(*) (0,9837)	1,0576 (1,0597)	1,0000 (1,0000)		
50	1,0790 (1,0629)	1,0716 (1,0788)	1,0000 (1,0002)		
100	1,1918 (1,1485)	1,1254 (1,1491)	1,0037 (1,0030)		
132	1,2817 (1,2094)	1,2392 (1,3163)	1,2552 (1,1705)	1,0596 (1,1086)	
133	1,2847 (1,2114)	1,2403 (1,3213)	1,3268 (1,2092)	0,7325 (0,8577)	0,0028 (-0,0011)
150	1,3333 (1,2449)	0,9844 (1,1183)	0,0173 (-0,0015)		
200	1,3687 (1,3153)	0,0686 (0,1334)			
1000	0,3191 (0,3226)	0,0000 (0,0000)			

(*) fator do método proposto neste trabalho é 0,9923 e do método de Scudder é 0,9837.

Em geral o método proposto neste trabalho apresenta maiores valores para μ nas primeiras iterações. Isto pode implicar, para certas redes, em uma convergência um pouco mais rápida. Foi definido o valor 0,1 como o limiar para μ , ou seja, o processo é interrompido e a solução corrente é adotada como o melhor resultado possível quando o fator calculado é menor que 0,1 em uma certa iteração.

A figura 3 mostra, em linha contínua, a tensão na barra 3 em função da potência Q_3 quando o fator μ proposto neste trabalho é utilizado. Pode-se notar também uma linha pontilhada que, juntamente com parte da linha contínua à esquerda de $Q_3 = 132$ MVar constituem a curva $Q - V$ da barra 3.

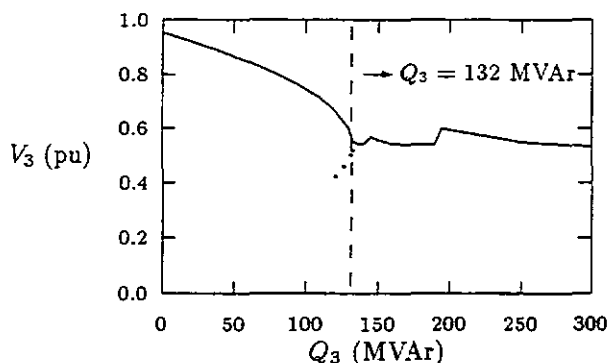


Figura 3: Tensão na barra 3 da rede exemplo.

O fluxo de carga apresenta solução para $Q_3 \leq 132$ MVar. Para $Q_3 > 132$ MVar a tensão se mantém dentro de uma pequena faixa de variação, indicando que, quando não há um ponto de operação (solução das equações de fluxo de carga), o resultado final é aquele mais próximo da fronteira Σ (figura 1), no caso representada pelo ponto correspondente a $Q_3 = 132$ pu. Essa é uma consequência importante da utilização da otimização de passo pois, mesmo que não haja solução para o problema, o processo iterativo não é levado a soluções finais absolutamente sem significado físico. A figura 4 mostra os mismatches de potência reativa da barra 3 no final do processo iterativo quando o fator μ proposto neste trabalho é utilizado.

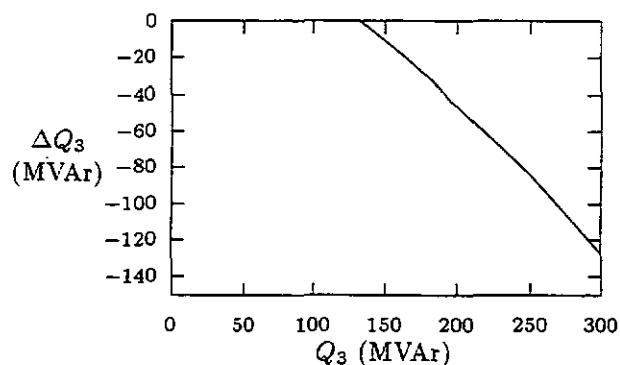


Figura 4: Mismatches na barra 3 da rede exemplo.

Para valores de Q_3 para os quais há solução do fluxo de carga, o mismatch final ΔQ_3 é sempre próximo de zero (nas simulações foi utilizada uma tolerância de 0,1 MW/MVar). Para $Q_3 > 132$ MVar o valor do mismatch final aumenta. Nota-se que a variação é aproximadamente linear. Este fato pode ser de grande importância caso se deseje estabelecer uma estratégia de controle para a volta à região factível através de, por exemplo, rejeição de carga. Os métodos de obtenção de margens de segurança com relação ao colapso de tensão, como por exemplo o proposto por Flatabø et alii (1993), poderiam também se beneficiar desta característica quando o aumento de carga excede o limite e o fluxo de carga passa a não convergir. Naturalmente se o aumento de carga ocorre em mais de uma barra procedimentos mais elaborados de corte de carga devem ser obtidos (Overbye, 1995).

A figura 5 mostra a evolução da função F (equação (7)) para $Q_3 = 132$ MVar quando são utilizados o método de Newton convencional (sem μ) e o método proposto neste trabalho (com μ).

Nota-se que F decresce mais rapidamente quando μ é utilizado. A figura 6 mostra a evolução de F para $Q_3 = 133$ MVar. Neste caso o fluxo de carga Newton convencional (sem o fator μ) não converge. Utilizando μ , chega-se à melhor solução (menor valor de F).

4.2 Outros sistemas elétricos de potência

Simulações foram realizadas para vários sistemas elétricos de potência. Dentre eles os seguintes sistemas foram escolhidos para apresentação dos resultados:

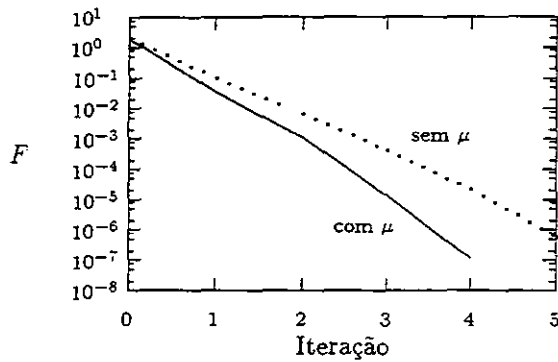


Figura 5: Evolução de F para a rede exemplo com $Q_3 = 132$ MVar.

- **14BARRAS**: rede de 14 barras e 20 ramos cujos dados são apresentados em (Freris e Sasson, 1968);
- **904BARRAS**: rede de 904 barras e 1283 ramos que corresponde ao sistema reduzido da região Sudoeste dos Estados Unidos da América;
- **11BARRAS**: rede de 11 barras e 12 ramos adaptada de (Scudder, 1981) cujos dados são fornecidos no Apêndice A.

A tolerância adotada para convergência em todos os casos foi de 0,1 MW/MVar. O limite mínimo para o fator μ ser considerado não nulo foi adotado igual a 0,1.

4.2.1 Rede 14BARRAS

Esta é uma rede de pequeno porte e bem condicionada. A tabela 3 mostra as características de convergência para o método de Newton convencional, o método de Scudder e o método proposto neste trabalho.

Observa-se que, neste caso, os desempenhos dos três métodos são semelhantes. O método de Scudder realiza uma iteração a mais, atingindo um valor menor da função F . Do ponto de vista do estado de operação final da rede, no entanto, isto não é relevante.

A tabela 4 mostra resultados de simulações obtidos para a rede 14BARRAS alterando-se a potência reativa de carga da barra 14 para 100 MVar (o valor original é 5 MVar).

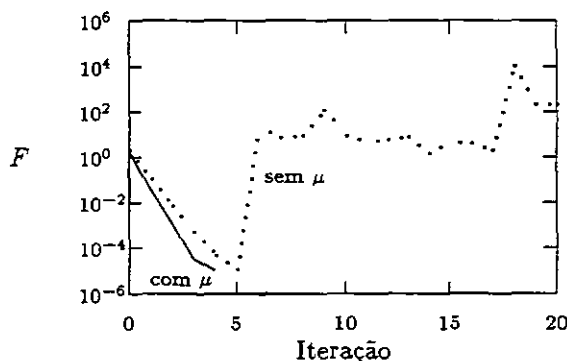


Figura 6: Evolução de F para a rede exemplo com $Q_3 = 133$ MVar.

Tabela 3: Comparação entre os métodos para a rede 14BARRAS: convergência, fatores μ e funções F .

Método \Rightarrow	Newton	Scudder	Proposto
Convergência \Rightarrow	2	3	2
Iteração \Downarrow	Fatores μ		
0		0,9479	0,9431
1		0,8178	1,0072
2		1,0155	
Iteração \Downarrow	Função F		
0	$1,22 \cdot 10^0$	$1,22 \cdot 10^0$	$1,22 \cdot 10^0$
1	$1,33 \cdot 10^{-2}$	$8,31 \cdot 10^{-3}$	$8,27 \cdot 10^{-3}$
2	$7,87 \cdot 10^{-7}$	$2,90 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-7}$
3		$5,63 \cdot 10^{-8}$	

Neste caso, o fluxo de carga Newton convencional não converge.

Tabela 4: Comparação entre os métodos para a rede 14BARRAS com $Q_{14} = 100$ MVar: convergência, fatores μ e funções F .

Método \Rightarrow	Newton	Scudder	Proposto
Convergência \Rightarrow	NC	MR4	MR5
Iteração \Downarrow	Fatores μ		
0		0,9443	0,9986
1		0,1537	0,9273
2		0,9694	0,1318
3		0,0379	0,7514
4		-0,0488	0,2082
5			0,0226

Neste caso há um aspecto importante relacionado com o desempenho dos métodos que deve ser discutido. Durante o processo iterativo é possível que um ou mais geradores atinjam seus limites de fornecimento de potência reativa. Seguindo a idéia tradicionalmente utilizada na resolução do problema de fluxo de carga, tais barras (de geração) são transformadas em barras de carga, com suas injeções de potência reativa iguais aos limites violados e as suas tensões passam a variar. Essa alteração implica no aparecimento de valores não nulos de mismatches de potências reativas nas referidas barras. Estes mismatches aparecem também nos vetores a e b e podem ser grandes ou pequenos dependendo da violação, fazendo com que os valores dos fatores μ possam assumir valores muito baixos. Na tabela 4, verifica-se que:

- na iteração 2 do método proposto aparece um fator baixo (0,1318) devido à violação dos limites de geradores. Continuando o processo iterativo, outros valores baixos voltam a ocorrer nas iterações 4 e 5. Sendo o valor obtido na iteração 5 menor que o limite mínimo pré-estabelecido para as simulações (neste trabalho foi 0,1), o processo de cálculo é interrompido e o estado de operação da rede considerado o melhor resultado pos-

sível. Considera-se que um valor baixo de μ multiplicado por um vetor de correção de estado cujos elementos também apresentam valores baixos não alteram significativamente o resultado final;

- na iteração 1 do método de Scudder aparece também um fator baixo (0,1537) devido a violações dos limites de geradores. Seguindo no processo iterativo, obtém-se outro valor baixo na iteração 3 (0,0379), também devido a violações de limites de geradores. Este valor é menor que o limite mínimo de 0,1 pré-estabelecido, o que implicaria, em princípio, na interrupção do processo iterativo. Porém, outras simulações realizadas (uma delas será mostrada adiante) mostraram que um fator μ pequeno devido a violações dos limites de geradores não implica na ausência de solução para o problema. Por isso, o critério de interrupção do processo é associado à obtenção de um valor baixo para μ , desde que não haja violações dos limites dos geradores envolvidos. Continuando o processo iterativo, obteve-se na iteração 4 um outro valor baixo (-0,0488) sem que qualquer violação de limites de geradores fosse observada. Aí sim o processo foi interrompido.

Foi testado um procedimento alternativo de tratamento de violações de limites de geradores, desconsiderando o valor de μ nas iterações em que estas ocorrerem. Isto equivale de fato a forçar $\mu = 1$ nestes casos. Para a rede 14BARRAS esta opção se mostrou ineficiente, com o método proposto obtendo o melhor resultado em 9 iterações e o método de Scudder em 8.

A figura 7 mostra a evolução da função F para os três métodos quando $Q_{14} = 100$ MVar.

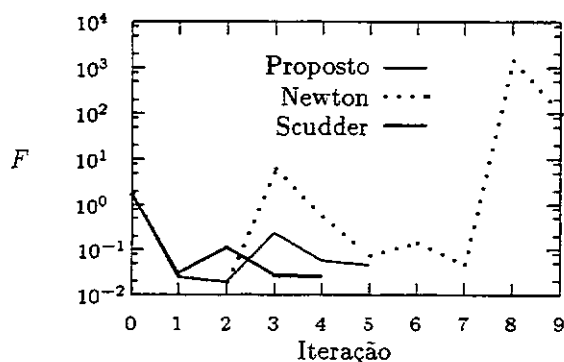


Figura 7: Evolução de F para 14BARRAS com $Q_{14} = 100$ MVar.

A função F do método proposto acompanha a do método convencional nas primeiras iterações, enquanto seus valores diminuíram. A partir da iteração 3 a função F do método convencional começa a sofrer grandes oscilações, que não são acompanhadas pelo método proposto. O aumento das funções F nesta iteração deve-se à violação dos limites de fornecimento de potência reativa por geradores, que passam a se comportar como barras de carga.

O método de Scudder convergiu em um número menor de iterações. Porém, observando o gráfico da figura 7 nota-se que seu caminho de convergência é diferente dos outros dois métodos já a partir da iteração 1. Esta diferença

foi benéfica neste caso, mas prejudicou o processo de convergência na maioria dos outros casos simulados.

4.2.2 Rede 904BARRAS

Esta é uma rede de grande porte bastante carregada. A tabela 5 mostra as características de convergência da rede sob condições normais de operação para o método de Newton convencional, o método de Scudder e o método proposto neste trabalho.

Tabela 5: Comparação entre os métodos para a rede 904BARRAS: convergência e fatores μ .

Método \Rightarrow	Newton	Scudder	Proposto
Convergência \Rightarrow	8	9	7
Iteração \Downarrow	Fatores μ		
0		0,7809	0,9545
1		0,7673	0,9956
2		0,9633	0,9860
3		0,9601	1,0009
4		0,0005 ^(*)	1,0000
5		0,9858	1,0000
6		0,4507	1,0000
7		1,0016	
8		1,0000	

(*) Fator μ calculado foi muito pequeno devido a violações de limites de geradores.

A tabela 5 ilustra um aspecto importante que diferencia o método de Scudder do método proposto. Este se relaciona com a afirmação feita em (Scudder e Alvarado, 1981) que o fator μ do método de Scudder pode assumir valores baixos nas primeiras iterações. Este fato é comprovado na tabela através da comparação com os fatores obtidos pelo método proposto. A razão para tal comportamento é a aproximação no cálculo do vetor c no método de Scudder e que já foi discutida na seção 2.2. Quanto mais longe se está da solução (primeiras iterações), maior é a diferença entre os vetores de correção de estado Δx^p e Δx^r . Conclui-se que os métodos baseados em otimização de passo têm seus comportamentos fortemente baseados em um correto cálculo de c . Nota-se também na tabela 5 que é obtido um valor muito pequeno para μ na iteração 4 do método de Scudder. Como ele foi devido a violações dos limites de geradores, o processo não foi interrompido e o processo iterativo continuou até a obtenção de uma solução. Também ocorreram violações dos limites de geradores na iteração 2 do método proposto. Neste caso, estas não afetaram de maneira significativa o valor do fator μ .

A figura 8 mostra a evolução das funções F para os três métodos implementados.

O gráfico da figura 8 mostra que para casos que têm solução e são ainda bem condicionados, o método proposto tende a fornecer fatores μ próximos de 1,0 e os resultados são semelhantes aos do método de Newton convencional. Já o método de Scudder apresenta um caminho de convergência diferente, o que em certos casos (neste em particular) pode se tornar uma desvantagem em termos de eficiência. A diferença deve-se principalmente aos pequenos valores iniciais

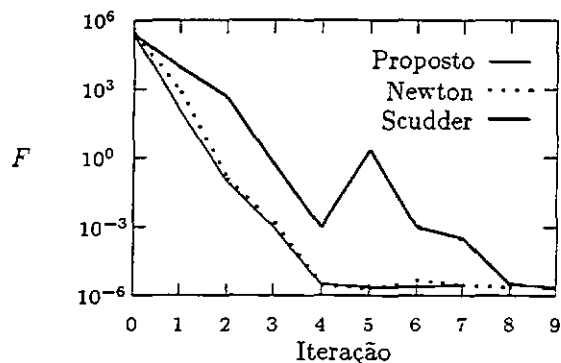


Figura 8: Evolução de F para 904BARRAS.

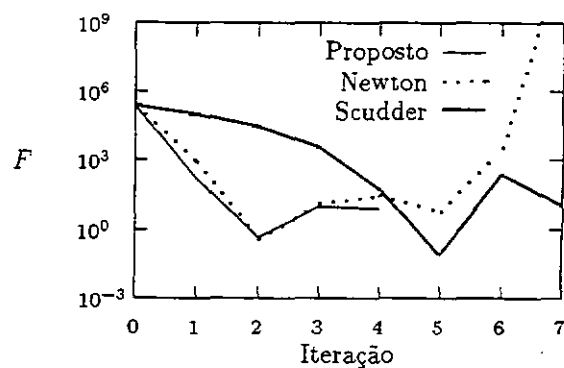


Figura 9: Evolução de F para 904BARRAS com aumento de 6% na carga.

de μ e ao grande impacto das violações dos geradores.

A tabela 6 mostra as características de convergência para 904BARRAS para um aumento de 6% na carga da rede. Neste caso, o método de Newton convencional não converge.

Tabela 6: Comparação entre os métodos para a rede 904BARRAS com acréscimo de 6% na carga: convergência e fatores μ .

Método \Rightarrow	Newton	Scudder	Proposto
Convergência \Rightarrow	NC	MR7	MR4
Iteração \downarrow		Fatores μ	
0		0,3550	0,9541
1		0,4622	1,0169
2		0,6415	1,1023
3		0,8687	0,1292
4		0,9642	0,0016
5		-0,0001(*)	
6		1,0757	
7		0,0008	

(*) Fator μ calculado foi muito pequeno devido a violações de limites de geradores.

Nota-se claramente na tabela 6 a característica do método de Scudder de resultar em pequenos valores de μ nas primeiras iterações. Aparece novamente o problema da violação dos limites de fornecimento de potência reativa, situação em que μ assume valores muito pequenos no método de Scudder. Na iteração 2 do método proposto também ocorrem violações, mas elas não afetam significativamente o fator μ . A figura 9 mostra a evolução das funções F para os três métodos.

Novamente observa-se que o método proposto acompanha o método de Newton convencional nas primeiras iterações, enquanto o método de Scudder segue um caminho diferente, principalmente em função dos pequenos valores de μ nas primeiras iterações. Nota-se também que, utilizando o método proposto, chega-se ao melhor resultado possível com um valor de função F maior que outro valor obtido durante o processo iterativo, especificamente na iteração 2. Acontece, porém, que na iteração 2 o estado obtido é tal que há violação dos limites de geradores, não sendo, portanto, um estado factível.

4.2.3 Rede 11BARRAS

Esta rede é mal-condicionada e a resolução do fluxo de carga pelo método de Newton convencional apresenta os seguintes resultados em função do valor da injeção de potência reativa na barra 8:

- Para $Q_8 \geq 123$ MVar o método converge e a barra 11 (*slack*) consome potência reativa;
- Para $120 < Q_8 < 123$ MVar o método não converge;
- Para $101 < Q_8 \leq 120$ MVar o método converge e a barra 11 (*slack*) fornece reativos;
- Para $Q_8 \leq 101$ MVar o método não converge.

Nesta seção serão apresentados os resultados para quatro valores de Q_8 , um em cada região descrita anteriormente. Para $Q_8 = 123$ MVar, o fluxo de carga de Newton convencional converge em 10 iterações com magnitudes das tensões altas nas barras de carga, variando de 1,33 a 1,44 pu. Para $Q_8 = 122$ MVar não há convergência. Para $Q_8 = 120$ MVar a convergência ocorre em 9 iterações com magnitudes das tensões baixas, variando de 0,87 a 0,94 pu. Finalmente, para $Q_8 = 101$ MVar o processo iterativo não converge. A tabela 7 mostra as características de convergência (número de iterações e fatores μ) para os métodos de Scudder e proposto para os diversos valores de Q_8 .

Nota-se um melhor desempenho do método proposto comparado com o método de Scudder em função de um valor pequeno para o fator μ neste último. Utilizando o fator de otimização de passo todos os casos resultaram em tensões altas nas barras de carga: de 1,33 a 1,44 pu para 123 e 122 MVar, de 1,33 a 1,43 pu para 120 MVar e de 1,30 a 1,41 pu para 101 MVar. Estes resultados são mais coerentes que os obtidos pelo método de Newton convencional, fornecendo tensões próximas para pequenas variações de Q_8 .

As características de convergência apresentadas pelo método de Newton convencional neste caso ilustram a existência de múltiplas soluções para o problema de fluxo de carga, conforme discutido em (Tamura *et alii*, 1980). Para $Q_8 = 120$ MVar foram obtidas duas soluções utilizando-se ou não o fator μ .

O gráfico da figura 10 mostra a evolução da função F para $Q_8 = 123$ MVar. Nota-se claramente o mal-condicionamento da rede através do comportamento de F

Tabela 7: Características de convergência dos métodos de Scudder e proposto para a rede 11BARRAS.

Q_8 (MVar) \Rightarrow	123	122	120	101
Convergência \Rightarrow	5 ^(*)	5	5	5
	(4)	(4)	(4)	(4)
Iteração \downarrow	Fatores μ			
0	0,4517 ^(**) (0,4751)	0,4521 (0,4754)	0,4529 (0,4759)	0,4607 (0,4808)
1	0,1262 (1,0487)	0,1263 (1,0484)	0,1263 (1,0476)	0,1279 (9,0382)
2	0,9599 (1,0375)	0,9592 (1,0382)	0,9579 (1,0396)	0,9449 (1,0556)
3	0,9926 (1,0000)	0,9921 (1,0000)	0,9916 (1,0000)	0,9866 (1,0000)
4	0,9349	0,9369	0,9374	0,9457

(*) método de Scudder convergiu em 5 iterações e o proposto em 4 iterações.

(**) fator do método de Scudder é 0,4517 e do proposto neste trabalho é 0,4751.

para o método de Newton convencional e a superioridade de desempenho do método proposto.

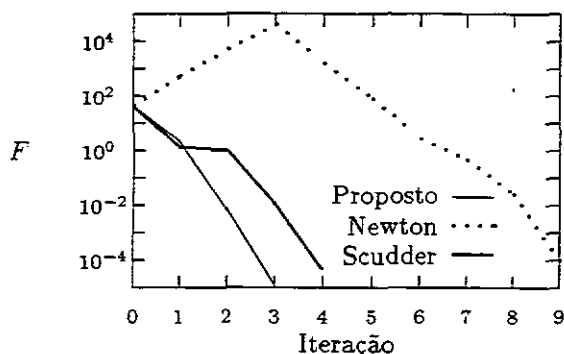


Figura 10: Evolução de F para 11BARRAS para $Q_8 = 123$ MVar.

Finalmente, o gráfico da figura 11 mostra a evolução da função F para $Q_8 = 122$ MVar.

Neste caso o método de Newton convencional não converge e a utilização de fatores de otimização de passo fazem com que um ponto de operação factível possa ser encontrado. Este ponto de operação é logicamente bastante próximo daquele obtido para $Q_8 = 123$ MVar. Novamente o método proposto apresenta um desempenho melhor que o método de Scudder.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um método de resolução do fluxo de carga pelo método de Newton com otimização de passo. O fator de otimização de passo foi obtido a partir das equações básicas de fluxo de carga em que as tensões aparecem em coordenadas polares, que é a situação mais co-

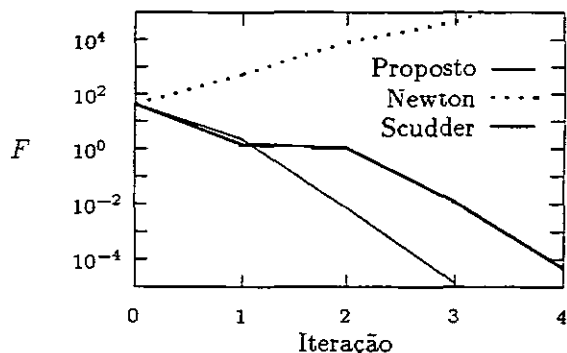


Figura 11: Evolução de F para 11BARRAS para $Q_8 = 122$ MVar.

mun encontrada na prática. As principais características do método proposto são: (a) as equações para o cálculo do fator μ são deduzidas a partir da metodologia de Iwamoto; (b) não são feitas transformações de coordenadas durante o processo de cálculo; (c) não há aproximações com relação ao vetor c ; (d) não há necessidade do cálculo do termo adicional ($J^P \cdot \Delta \Delta x^P$) no vetor b como no método de Scudder; e (e) o esforço computacional adicional é muito pequeno.

Em particular foram comparados o método de Newton convencional, o método de Scudder, baseado em uma adaptação do método de Iwamoto em que as tensões aparecem em coordenadas retangulares, e o método proposto. As muitas simulações realizadas, sendo algumas delas descritas neste trabalho, mostraram que o método proposto pode ser usado de maneira geral, ou seja, para redes bem ou mal condicionadas, pois o esforço adicional de cálculo do fator de otimização de passo μ é muito pequeno. Não foram encontradas situações em que o método proposto não tenha tido sucesso na obtenção dos resultados finais.

A utilização de otimização de passo permite a obtenção de soluções para redes mal-condicionadas, mesmo quando o método convencional falha. Caso não haja solução na região factível, o método proposto fornece resultados importantes para a análise da situação da rede, fornecendo um ponto de operação o mais próximo possível da região de factibilidade. Isso permite a definição de estratégias de retorno da rede à região de factibilidade através de análise de sensibilidade e rejeição de carga, por exemplo.

O método proposto mostrou ser preciso, robusto e não requer um esforço computacional adicional significativo, além de apresentar desempenho geral sempre superior ao método de Scudder. Ele pode ser utilizado como uma ferramenta útil de suporte aos estudos de instabilidade de tensão e colapso de tensão.

No momento estuda-se a possibilidade de se aplicar os princípios da otimização de passo ao método desacoplado rápido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, F., I. Dobson e Y. Hu (1994). Computation of closest bifurcations in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, n. 2, pp. 918-928.
- Dehnel, M. e H.W. Dommel (1989). A method for identifying weak nodes in nonconvergent load flows. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, n. 2, pp. 801-807.
- EPRI (1989). *Proceedings: Bulk power systems voltage phenomena - voltage stability and security*, Report EL-6183.
- EPRI (1991). *Proceedings: Bulk power systems voltage phenomena - voltage stability and security*.
- Flatabø, N., O.B. Fosso, R. Ognedal, T. Carlsen e K.R. Heggland (1993). A method for calculation of margins to voltage instability applied on the Norwegian system for maintaining required security level. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, n. 3, pp. 920-928.
- Freris, L.L. e A.M. Sasso (1968). Investigation of the load flow problem. *Proceedings of the IEE*, vol. 115, n. 10.
- Iba, K., H. Suzuki, M. Egawa e T. Watanabe (1991). Calculation of critical loading condition with nose curve using homotopy continuation method. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, pp. 584-593.
- Iwamoto, S. e Y. Tamura (1978). A fast load flow method retaining nonlinearity. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-97, pp. 1586-1599.
- Iwamoto, S. e Y. Tamura (1981). A load flow calculation method for ill-conditioned power systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, pp. 1736-1743.
- Monticelli, A., A. Garcia e O. Saavedra (1990). Fast decoupled load flow: hypothesis, derivations and testing. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, pp. 1425-1431.
- Overbye, T.J. (1994). A power flow measure for unsolvable cases. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, pp. 1359-1365.
- Overbye, T.J. (1995). Computation of a practical method to restore power flow solvability. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, pp. 280-287.
- Sasso, A.M. (1969). Non-linear programming solutions for the load flow, minimum-loss, and economic dispatching problems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, pp. 399-409.
- Sasso, A.M., C. Trevino e F. Aboytes (1971). Improved Newton's load flow through a minimization technique. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-90, pp. 1974-1981.
- Scudder, J.M. (1981). Step size optimization in a polar Newton power flow. University of Wisconsin, Madison, EUA.
- Scudder, J.M. e F.L. Alvarado (1981). Discussão de (Iwamoto e Tamura, 1981).
- Tamura, Y., K. Iba e S. Iwamoto (1980). A method for finding multiple load-flow solutions for general power systems. *IEEE PES Winter Meeting*, paper A80 043-0, New York.
- Tinney, W.F. e C.E. Hart (1967). Power flow solution by Newton's method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-86, pp. 1449-1456.
- Tinney, W.F. e J.W. Walker (1967). Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorization. *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, pp. 1801-1809.
- Van Amerongen, R.A.M. (1989). A general-purpose version of the fast decoupled load flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, pp. 760-770.
- Van Ness, J.E. (1959). Iteration methods for digital load flow studies. *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 78, pp. 583-588.
- Wallash, Y. (1968). Gradient methods for load flow problems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-87, pp. 1314-1318.
- Ward, J.B. e H.W. Hale (1956). Digital computer solution of power flow problems. *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 75, pp. 398-404.
- Zollenkopf, K. (1971). Bi-factorisation - basic computational algorithm and programming techniques. In J.K. Reid (Ed.), *Large sparse sets of linear equations*, Academic Press.

A APÊNDICE - REDE 11BARRAS

Os dados da rede 11BARRAS foram adaptados de (Scudder, 1981). A figura 12 mostra o diagrama unifilar da rede. As tabelas 8 e 9 fornecem os dados das barras e dos ramos, respectivamente.

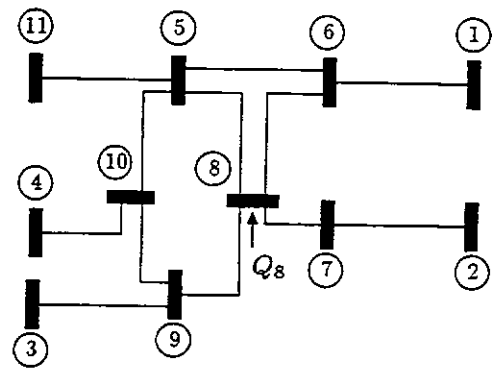


Figura 12: Diagrama unifilar de 11BARRAS.

Tabela 8: Rede 11BARRAS: dados das barras.

Barra	Tipo	V (pu)	θ ($^{\circ}$)	P (MW)	Q (MVar)
1	Carga			400,00 ^(*1)	87,00
2	Carga			500,00	165,00
3	Carga			-75,00	42,00
4	Carga			25,00	81,00
5	Carga			0,00	0,00
6	Carga			-250,00	-11,00
7	Carga			-200,00	-42,00
8	Carga			-250,00	Q_8 ^(*2)
9	Carga			-175,00	-3,00
10	Carga			-375,00	-59,00
11	Slack	1,0400	0,00		

(*1) Potências positivas indicam geração e potências negativas indicam consumo.

(*2) Valor a ser variado nas simulações.

Tabela 9: Rede 11BARRAS: dados dos ramos.

De	Para	r (pu)	x (pu)	b^{sh} (pu) ^(*)
1	6	0,00400	0,08000	0,3500
2	7	0,00000	0,05000	0,0000
3	9	0,00500	0,10000	0,0000
4	10	0,00300	0,05000	0,0200
5	6	0,00100	0,02700	0,2140
5	8	0,00080	0,03300	0,1810
5	10	0,00500	0,10000	0,3000
5	11	0,00200	0,10000	0,4000
6	8	0,00022	0,00500	0,0220
7	8	0,00300	0,05000	0,1400
8	9	0,00230	0,03080	0,1122
9	10	0,00120	0,03200	0,1284

(*) Susceptância shunt total.