

---

# FLUXO DE CARGA DESACOPLADO TRIFÁSICO

Ariovaldo Verândio Garcia e Maria Goretti Zago

DSEE/FEE/UNICAMP

Caixa Postal 6101

13081-970 Campinas, SP

---

**RESUMO:** O modelo por fase de sistemas de potência é amplamente conhecido e empregado em estudos de análise e planejamento. Esse modelo tem como hipótese básica que os sistemas de geração, transmissão, e distribuição são perfeitamente equilibrados. A grande vantagem desse modelo é sua simplicidade, quando comparado ao modelo trifásico, e os resultados obtidos são adequados para a maioria das aplicações. Em algumas situações, entretanto, os resultados obtidos com esse modelo não são precisos o bastante, como pode ocorrer na análise de sistemas de distribuição, casos de linhas de transmissão com impedâncias mútuas elevadas, etc. Esses casos requerem um modelo trifásico para sua análise. Este trabalho apresenta uma extensão da teoria apresentada em Monticelli *et alii* (1990) visando a obtenção de um fluxo de carga desacoplado rápido trifásico, para aplicação em redes de distribuição.

**Palavras-Chave:** Fluxo de Carga, Método de Newton, Sistemas Trifásicos

**ABSTRACT:** Power system single-phase model assumes that the generation, transmission and distribution systems are perfectly balanced. The great appeal of this type of model is its simplicity, for all the calculations become quite simple, when compared with the three-phase model, and the results obtained are well suited for most applications. There are cases, however, in which its results may not be accurate enough, as it may happen with distribution system analysis (unbalanced loads), non-transposed transmission lines, large mutual impedances between lines, etc. These problems require a more accurate three-phase model. This paper extends the decoupling theory of Monticelli *et alii* (1990) in order to obtain a fast decoupled three-phase load flow which is suited for distribution power system analysis.

**Keywords:** Load Flow, Newton Method, Three-phase Systems

## 1 INTRODUÇÃO

O modelo por fase, empregado na análise e planejamento de sistemas de energia elétrica, tem por hipótese básica que tanto o sistema de transmissão quanto as cargas são equilibrados. Esse modelo tem como principal vantagem a simplicidade dos cálculos envolvidos e fornece resultados satisfatórios em muitos casos e por essa razão tem sido utilizado em larga escala. Em algumas aplicações, entretanto, os resultados desse modelo podem não ser precisos o bastante, como é o caso de sistemas de distribuição com cargas desequilibradas, sistemas com linhas de transmissão com impedâncias mútuas elevadas, linhas de transmissão sem transposição, etc. Esses problemas requerem um modelo trifásico para sua análise.

Os métodos propostos para a solução do problema do fluxo de carga trifásico podem ser divididos em dois grupos: os que utilizam algoritmos tipo Gauss ou Gauss-Seidel e a matriz impedância nodal ou mesmo a matriz admitância nodal (Chen *et alii* 1990, Chen *et alii* 1991) e os que utilizam algoritmos derivados do método de Newton (Desacoplados – Arrilaga e Arnold (1983), Newton – Birt *et alii* (1976)). Neste trabalho é feita uma análise do método de Newton dando-se ênfase a sua versão desacoplada, que tem a vantagem de exigir menor esforço computacional (principalmente memória necessária). A partir dessa análise é apresentado um novo método para resolução do problema de fluxo de carga trifásico, de forma desacoplada, baseado em teoria publicada recentemente (Monticelli *et alii* 1990). O novo método difere dos anteriores (Arrilaga e Arnold 1983) na obtenção das matrizes envolvidas no cálculo das correções dos ângulos e tensões – matrizes  $B'$  e  $B''$  e seu desempenho é superior nos casos testados. O modelo desenvolvido tem em vista aplicação na análise de sistemas de distribuição para os quais a hipótese de cargas equilibradas não pode ser adotada.

---

<sup>0</sup> Artigo submetido em 07/11/94;

1ª Revisão em 10/05/95; 2ª Revisão em 28/02/96

Aceito por recomendação do Ed.Consultor Prof.Dr.Djalma M. Falcão

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira. Inicialmente são apresentados um resumo do modelo trifásico de componentes do sistema de energia elétrica e também um breve relato dos principais métodos propostos na literatura. O novo modelo desacoplado proposto e resultados comparativos que mostram as vantagens do novo método são mostrados em seguida.

## 2 MODELAGEM TRIFÁSICA DO SISTEMA

Os modelos trifásicos dos componentes dos sistemas de energia elétrica são bem conhecidos estando detalhados em muitas publicações como em Arrilaga e Arnold (1983) e em Chen *et alii* (1974). Por essa razão, neste trabalho só se apresenta um resumo dos modelos trifásicos dos componentes básicos.

### 2.1 Linhas de Transmissão

O modelo  $\pi$  para o circuito de uma linha de transmissão - Fig. (1) é dado por:

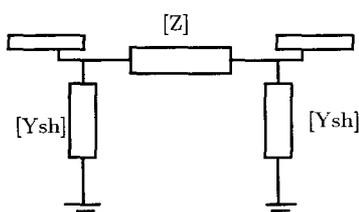


Figura 1 - Modelo  $\pi$

onde  $[Z]$  e  $[Y_{sh}]$  são matrizes de parâmetros, simétricas ( $3 \times 3$ ), cujos elementos são obtidos a partir da configuração do sistema e das características físicas dos condutores, sendo que o método de cálculo utilizado (Chen *et alii* 1974) inclui os efeitos de correntes para a terra.

A matriz  $[Y]$  que relaciona as injeções de correntes com as respectivas tensões é dada por Arrilaga e Arnold (1983):

$$[Y] = \begin{bmatrix} [Z]^{-1} + [Y_{sh}] & -[Z]^{-1} \\ -[Z]^{-1} & [Z]^{-1} + [Y_{sh}] \end{bmatrix} \quad (1)$$

No caso de  $n$  linhas paralelas e mutuamente acopladas, as matrizes  $[Z]$  e  $[Y_{sh}]$  têm dimensão  $3n \times 3n$  (a impedância mútua existente entre elas deve ser considerada). Devem ser previstos tanto o caso de linhas com terminais diferentes quanto o de linhas paralelas com mesmo terminal.

### 2.2 Transformadores

Em geral os transformadores trifásicos podem ser representados pela seguinte equação matricial - ver Chen *et alii* (1974):

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{esp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

Tipo de conexão		Admitâncias Próprias		Admitâncias Mútuas
Barra p	Barra s	$Y_{pp}$	$Y_{ss}$	$Y_{esp}, Y_{ps}$
Y - g	Y - g	$Y_I$	$Y_I$	$-Y_I$
Y - g	Y	$Y_{II}/3$	$Y_{II}/3$	$-Y_{II}/3$
Y - g	$\Delta$	$Y_I$	$Y_{II}$	$Y_{II}$
Y	Y	$Y_{II}/3$	$Y_{II}/3$	$-Y_{II}/3$
Y	$\Delta$	$Y_{II}/3$	$Y_{II}$	$Y_{II}$
$\Delta$	$\Delta$	$Y_{II}$	$Y_{II}$	$-Y_{II}$

Tabela 1 - Submatrizes características usadas na formação das matrizes admitancias de transformadores: Y - ligação estrela; Y - g - ligação estrela com neutro aterrado;  $\Delta$  - ligação  $\Delta$ .

Considerando que as três fases são equilibradas estas submatrizes podem ser escritas em função de três submatrizes básicas (Chen *et alii* 1974) como está mostrado na Tabela 1, onde:

$$[Y_I] = \begin{bmatrix} y_t & & \\ & y_t & \\ & & y_t \end{bmatrix}, [Y_{II}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix}$$

e

$$[Y_{III}] = \frac{\sqrt{3}}{3} \begin{bmatrix} -y_t & y_t & \\ y_t & -y_t & y_t \\ & y_t & -y_t \end{bmatrix}$$

e  $y_t$  é a admitância de dispersão do transformador.

Finalmente, estas submatrizes podem ser modificadas para considerar relações de espiras iguais a  $\alpha$  e  $\beta$  no primário e secundário, como segue:

- Dividem-se as admitâncias próprias do primário por  $\alpha^2$ .
- Dividem-se as admitâncias próprias do secundário por  $\beta^2$ .
- Dividem-se as admitâncias mútuas por  $\alpha\beta$ .

Neste trabalho, no estudo de sistemas com transformadores, estes foram considerados conectados em estrela-aterrado/estrela-aterrado.

### 2.3 Máquinas Síncronas

As máquinas síncronas, devido à simetria entre suas fases, podem ser modeladas a partir das impedâncias de seu circuito de sequência sendo que a matriz impedância em componentes de fase é dada por:

$$[Z] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_0 + Z_1 + Z_2 & Z_0 + aZ_1 + a^2Z_2 & Z_0 + a^2Z_1 + aZ_2 \\ Z_0 + a^2Z_1 + aZ_2 & Z_0 + Z_1 + Z_2 & Z_0 + aZ_1 + a^2Z_2 \\ Z_0 + aZ_1 + a^2Z_2 & Z_0 + a^2Z_1 + aZ_2 & Z_0 + Z_1 + Z_2 \end{bmatrix}$$

onde  $Z_0$ ,  $Z_1$  e  $Z_2$  são, respectivamente, as impedâncias de sequência zero, positiva e negativa e  $a = e^{j2\pi/3}$ .

## 3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Nos estudos até agora desenvolvidos para resolução do problema de fluxo de carga trifásico, foram empregados basicamente os métodos de Gauss e Gauss-Seidel com algumas

variações, e o método de Newton, tanto na versão completa como também sua versão desacoplada.

O método desacoplado trifásico proposto na literatura (Arrilaga e Arnold 1983) baseia-se praticamente nos mesmos critérios utilizados por Stott e Alsac (1974) para o caso monofásico; uma diferença básica do método proposto por Arrilaga em relação ao original está na consideração das resistências das linhas de transmissão na formação das matrizes do processo iterativo (matrizes  $B'$  e  $B''$ ). Na versão original, de Stott, essas resistências são desprezadas na formação da matriz  $B'$ , o que não ocorre na versão trifásica proposta por Arrilaga. Nas matrizes do modelo trifásico as condutâncias aparecem multiplicadas pelos senos dos ângulos entre fases distintas que valem,  $2\pi/3$  ou  $-2\pi/3$ , dependendo da seqüência de fases, e, obviamente não podem ser desprezadas. Este tema é retomado mais adiante neste trabalho onde, com a adaptação da teoria desenvolvida por Monticelli *et alii* (1990) verifica-se que é possível obter uma regra de formação para as matrizes do processo iterativo do método desacoplado aplicado a sistemas trifásicos.

### 3.1 Formulação Básica

Definindo  $n$  como sendo o número total de barras,  $ng$  o número de geradores, e  $nb$  o número de barras sem geradores (incluindo as barras terminais dos próprios), temos que  $n = nb + ng$ .

As equações do fluxo de carga trifásico são (Arrilaga e Arnold 1983):

- Barras de carga e barras terminais dos geradores (barras com potência ativa e reativa especificadas para cada fase):

$$\Delta P_i^p = (P_i^p)^{esp} - P_i^p = 0 \quad (3)$$

$$\Delta Q_i^p = (Q_i^p)^{esp} - Q_i^p = 0 \quad (4)$$

$i = 1, \dots, n$

sendo que

$$P_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m [G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm}]$$

$$Q_i^p = V_i^p \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m [G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm}]$$

são, respectivamente a potência ativa e a potência reativa na fase  $p$  da barra  $i$  e, ainda,  $esp$  representa especificado e  $i$  e  $k$  são índices de barras e  $p$  e  $m$  representam as fases.

- Barras internas dos geradores:

$$\Delta P_{ger_j} = P_{ger_j}^{esp} - P_{ger_j} \quad (5)$$

sendo que

$$P_{ger_j} =$$

$$\sum_{p=1}^3 V_{int_j} \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^3 V_k^m [G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm}]$$

onde  $i = 1, \dots, nb$ ,  $j = nb + 1, \dots, nb + ng$  e  $p = 1, 3$  e  $(V_{int_j})$  é a tensão interna do gerador  $j$ .

Aplicando-se o método de Newton na solução deste sistema de equações resulta em:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & I \\ C & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde

$$[A_{ik}^{pm}] = [\partial P_i^p / \partial \theta_k^m] \quad [I_{ik}^{pm}] = [\partial P_i^p / \partial V_k^m]$$

$$[C_{ik}^{pm}] = [\partial Q_i^p / \partial \theta_k^m] \quad [K_{ik}^{pm}] = [\partial Q_i^p / \partial V_k^m]$$

## 4 MÉTODO PROPOSTO

Em Monticelli *et alii* (1990) mostra-se que desprezar resistências das linhas de transmissão na formação ou da matriz  $B'$  (versão XB) ou da matriz  $B''$  (versão BX) e resolver alternadamente os subproblemas  $P - \theta$  e  $Q - V$  para o fluxo de carga monofásico, fazem parte de uma mesma teoria. A justificativa desses procedimentos quando foram propostos por Stott e Alsac (1974) e, mais recentemente, por van Amerongen (1989) foi heurística. Um resumo da teoria proposta em Monticelli *et alii* (1990) e sua adaptação a sistemas trifásicos é apresentada a seguir.

O sistema de equações (6) pode ser reescrito como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & I \\ 0 & K' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde  $K' = K - CA^{-1}I$  e  $\Delta Q' = \Delta Q - CA^{-1}\Delta P$ . Este novo sistema de equações fornece informação importante. Podem ser obtidos os mesmos resultados da primeira iteração do método de Newton se for utilizada a matriz  $A$  para a 1/2 iteração  $P - \theta$  e a matriz  $[K']$  para a 1/2 iteração  $Q - V$ . Em Monticelli *et alii* (1990) mostra-se que nas iterações subseqüentes o erro cometido por não considerar a atualização de  $\Delta Q$  é compensado, se utilizarmos, na obtenção de  $\Delta Q$  os valores atualizados de  $\theta$  (obtidos na primeira 1/2 iteração). Dessa forma, fica claro que a matriz a ser utilizada no fluxo de carga desacoplado trifásico é a matriz  $[K']$ . Em Monticelli *et alii* (1990) mostra-se que no caso do modelo monofásico a matriz  $[K']$  é obtida simplesmente desprezando-se as resistências das linhas de transmissão nas expressões de  $[K]$ . Este procedimento é exato (para "flat-start") para sistemas radiais e também para sistemas nos quais a relação resistência/reactância dos ramos é uniforme (todos os ramos têm a mesma relação resistência/reactância). Para os demais sistemas, esse procedimento fornece uma excelente aproximação para  $[K']$ . Para sistema trifásicos mostra-se a seguir como montar a matriz  $[K']$  baseando-se na equação (7).

Considerando que  $G_{ik}$  é a parte real e que  $B_{ik}$  é a parte imaginária de  $Y_{ik}$ , e ainda, que  $\theta_i^p$  e  $\theta_k^m$  são os ângulos das tensões das fases  $p$  e  $m$  nas barras  $i$  e  $k$  respectivamente, pode se verificar que os elementos das matrizes  $A$ ,  $I$ ,  $C$  e  $K$  são dados por:

$$A_{ik}^{pm} = V_i^p V_k^m [G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm}] \quad (8)$$

$$A_{kk}^{mm} = -B_{kk}^{mm} (V_k^m)^2 - Q_k^m \quad (9)$$

$$I_{ik}^{pm} = V_i^p [G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm}] \quad (10)$$

$$I_{kk}^{mm} = [G_{kk}^{mm} (V_k^m)^2 + P_k^m] / V_k^m \quad (11)$$

$$C_{ik}^{pm} = -V_i^p V_k^m [G_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm} + B_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm}] \quad (12)$$

$$C_{kk}^{mm} = -G_{kk}^{mm} (V_k^m)^2 + P_k^m \quad (13)$$

$$K_{ik}^{pm} = V_i^p [G_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} - B_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm}] \quad (14)$$

$$K_{kk}^{mm} = [-B_{kk}^{mm} (V_k^m)^2 + Q_k^m] / V_k^m \quad (15)$$

onde

$$\theta_{ik}^{pm} = \theta_i^p - \theta_k^m$$

Considerando "flat-start" (o que significa que todas as magnitudes das tensões são iguais a 1.00 pu e os ângulos das fases iguais a seus valores equilibrados, ou seja, para sequência de fases considerada  $0 -2\pi/3 2\pi/3$ ), pode-se verificar que o sistema de equações (6) pode ser escrito somente em função dos elementos da matriz admitância nodal ( $[Y]$ ) e dos ângulos de defasagem entre as fases (no caso equilibrado).

Neste caso as expressões (8) a (10) podem ser reescritas como:

$$A_{ik}^{pm} = K_{ik}^{pm} = -Im [Y_{ik}^{pm} e^{-j\theta_{ik}^{pm}}] \quad (16)$$

$$I_{ik}^{pm} = -C_{ik}^{pm} = Re [Y_{ik}^{pm} e^{-j\theta_{ik}^{pm}}] \quad (17)$$

onde  $j = \sqrt{-1}$ . No "flat-start" os valores de  $\theta_{ik}^{pm}$ , representados pela matriz  $3 \times 3 \Theta_{ik}$  são, considerando a sequência de fases 1 2 3:

$$\Theta_{ik} = \begin{bmatrix} 0 & 2\pi/3 & -2\pi/3 \\ -2\pi/3 & 0 & 2\pi/3 \\ 2\pi/3 & -2\pi/3 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Definindo a matriz (complexa)  $Y_N$  como sendo

$$Y_{N_{ik}}^{pm} = Y_{ik}^{pm} e^{-j\theta_{ik}^{pm}}$$

e ainda,  $[G_N]$  como sua parte real e  $[B_N]$  como sua parte imaginária e considerando um "sistema" trifásico de duas barras, interligadas por uma linha de transmissão, a equação (6) pode ser reescrita como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_N & G_N \\ -G_N & -B_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (19)$$

Assim, a matriz  $[K']$  para o sistema trifásico é dada por:

$$K' = -B_N - G_N [B_N]^{-1} G_N \quad (20)$$

Pode-se verificar que essa expressão é a mesma obtida quando se inverte  $[Y_N]$  utilizando como submatrizes suas partes real e imaginária:

$$[G_N + jB_N]^{-1} = \dots - j[B_N + G_N B_N^{-1} G_N]^{-1}$$

Definindo-se a matriz  $[Z_N]$  como sendo

$$Z_{N_{ik}}^{pm} = Z_{ik}^{pm} e^{-j\theta_{ik}^{pm}}$$

em Zago (1992) mostra-se que se  $Z = Y^{-1}$ , então:

$$Z_N = Y_N^{-1}$$

Logo a matriz que se procura ( $[K']$ ) para utilizar no fluxo de carga desacoplado é a inversa da parte imaginária da matriz  $[Z_N]$ . Definindo  $[T]$  como sendo a parte imaginária de  $[Z_N]$ :

$$K' = T^{-1}$$

onde

$$T_{ik}^{pm} = Im [Z_{ik}^{pm} e^{-j\theta_{ik}^{pm}}]$$

ou

$$T_{ik}^{pm} = -R_{ik}^{pm} \sin \theta_{ik}^{pm} + X_{ik}^{pm} \cos \theta_{ik}^{pm}$$

Assim, podemos formar diretamente a matriz  $[K']$  a partir das submatrizes  $[R]$  e  $[X]$ , bastando a inversão da matriz  $[T]$  de dimensão  $(3 \times 3)$ . Este procedimento deve ser aplicado a todos os elementos da rede.

Observou-se, ainda, que da mesma forma como ocorre para o caso monofásico e está descrito em Monticelli (1983), no caso de existirem elementos "shunt", melhores resultados são obtidos se forem montados os elementos da diagonal de  $[T]$  da seguinte forma:

$$T_{ii}^{pp} = -R_{ii}^{pp} \sin \theta_{ii}^{pp} + X_{ii}^{pp} \cos \theta_{ii}^{pp} - 2Y_{sh,ii}^{pp}$$

o que resulta em :

$$T_{ii}^{pp} = X_{ii}^{pp} - 2Y_{sh,ii}^{pp}$$

## 4.1 Exemplo Numérico

Para ilustrar os resultados obtidos anteriormente, seja um sistema de duas barras - Fig. 1, onde as matrizes  $[Z]$  e  $[Y_{sh}]$  da linha de transmissão são:

$$[Z] = \begin{bmatrix} .006 + j.045 & .002 + j.015 & .001 + j.017 \\ .002 + j.015 & .006 + j.05 & .002 + j.017 \\ .001 + j.017 & .002 + j.017 & .007 + j.047 \end{bmatrix}$$

e

$$[Y_{sh}] = (1/2) \begin{bmatrix} j.175 & -j.03 & -j.02 \\ -j.03 & j.176 & -j.03 \\ -j.02 & -j.03 & j.170 \end{bmatrix}$$

A comparação entre as matrizes :

- $K' = K - CA^{-1}I$  ( 1ª iteração do método de Newton para inicialização "flat start"):

$$K' = \begin{bmatrix} 23.57 & 5.06 & 4.97 \\ 3.82 & 21.07 & 5.26 \\ 5.28 & 4.08 & 22.70 \end{bmatrix}$$

- $K' = -Im(Z_N)$  ( método desacoplado proposto neste trabalho):

$$K' = \begin{bmatrix} 23.56 & 5.09 & 4.99 \\ 3.85 & 21.07 & 5.29 \\ 5.32 & 4.1 & 22.69 \end{bmatrix}$$

e

- $B''$  (método desacoplado proposto por Arrilaga e Arnold (1983)):

$$B'' = \begin{bmatrix} 26.15 & 2.36 & 5.44 \\ 3.05 & 23.39 & 2.42 \\ 1.85 & 4.07 & 25.53 \end{bmatrix}$$

mostra que a matriz  $[K']$  calculada a partir das equações obtidas neste trabalho está mais próxima de  $[K']$  calculada na 1ª iteração do método de Newton que  $[B'']$ . A seguir são apresentados resultados comparativos obtidos com os três métodos.

## 5 TESTES E RESULTADOS

O programa de fluxo de carga desenvolvido, foi utilizado para analisar os seguintes sistemas:

- Sistema 1: Sistema com sete barras e dois geradores (mostrado na figura 2). A barra 3 é uma barra fictícia e foi incluída neste ponto dadas as mudanças contrutivas na linha. Os dados matriciais das linhas (matrizes  $[Z]$  e  $[Y_{sh}]$ ) não foram incluídos neste trabalho, mas podem ser encontrados em Arrilaga e Arnold (1983). Os dados das barras estão na tabela 2 e os dados dos geradores e transformadores encontram-se nas tabelas 3 e 4, respectivamente.
- Sistema 2: Sistema de distribuição baseado no sistema IEEE 34 barras proposto no artigo "Radial Distribution Test Feeders" (IEEE 1991). É composto por linhas de transmissão aéreas trifásicas e monofásicas, cargas trifásicas (balanceadas e desbalanceadas), cargas monofásicas e bancos de capacitores "shunt". Os dados de barras e de linhas, assim como uma descrição detalhada do sistema podem ser encontrados em Zago (1992). Ressalta-se, no entanto, que o valor da relação  $x/r$  para os parâmetros das linhas é neste caso em média igual a 1,5 e atinge valores máximos iguais a 2,23.

Foram comparados os desempenhos de três métodos: Newton, desacoplado de Arrilaga e Arnold, (1983) e o proposto neste trabalho (Desacoplado "Novo"). As tabelas 5 e 6 apresentam o número de iterações obtidos com cada método para os sistemas 1 e 2, para três tolerâncias. São apresentadas as iterações completas para o método de Newton e para os Desacoplados (as 1/2 iterações estão entre parênteses). Na tabela 7 é feita comparação entre o desempenho do método proposto neste trabalho e o método de Newton tendo como parâmetro o o tempo computacional. Os testes foram executados em estação de trabalho SUN - SPARCstation 2.

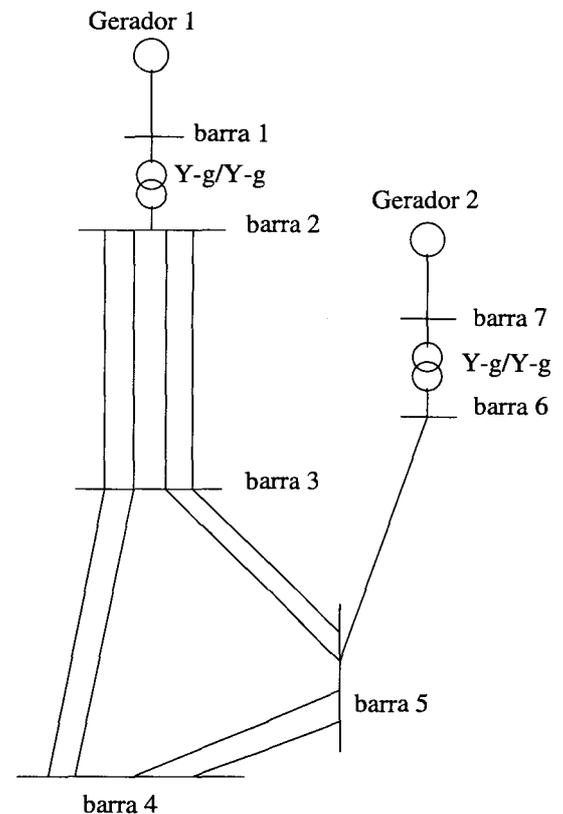


Figura 2 - Sistema 1

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	P	Q	P	Q	P	Q
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	150	80	157	78	173	72
5	50	15	45	14.0	48.3	16.6
6	48	20	47	12	51.3	28.3
7	0	0	0	0	0	0

Tabela 2 - Sistema 1 - Dados das Barras; P em MW e Q em MVar

Barras		
Primário	Secundário	Reatância (yt)
2	1	.0006 + j.0164
6	7	.0020 + j.038

Tabela 3 - Sistema 1 - Dados dos Transformadores

Gerador no	Impedâncias			P(total) MW	Tensão p.u.
	Z0	Z1	Z2		
1	j.08	j.01	j.021	Ref.	1.0669
2	j.15	j.01	j.091	281.27	1.0738

Tabela 4 - Sistema 1 - Dados dos Geradores

Tolerância em p.u.	Newton	Método	
		Desacoplado (Arrilaga e Arnold 1983)	Desacoplado "Novo"
.03	3	4.5 (5/4)	3.5 (4/3)
.003	4	9.5 (10/9)	5.5 (6/5)
.0003	4	14.5 (15/14)	7.5 (8/7)
base p.u. para o sistema = 33.3 MVA			

Tabela 5 - Sistema 1 - Número de Iterações

Tolerância em p.u.	Newton	Método	
		Desacoplado (Arrilaga e Arnold 1983)	Desacoplado "Novo"
.01	2	divergiu	6.0 (6/6)
.001	3	divergiu	9.0 (9/9)
.0001	3	divergiu	12.5 (13/12)
base p.u. para o sistema = 1 MVA			

Tabela 6 - Sistema 2 - Número de Iterações

## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho mostra-se que com algumas deduções complementares, a teoria anteriormente aplicada a sistemas monofásicos que explica o bom desempenho dos métodos desacoplados, pode ser aplicada a sistemas trifásicos para se obter uma nova versão desacoplada para o fluxo de carga trifásico. O desempenho dessa nova versão é superior ao da versão conhecida na literatura nos sistemas até aqui estudados.

O novo método desenvolvido está sendo testado em diversos sistemas, com ênfase para sistemas de distribuição. O enfoque atual da pesquisa está na modelagem de transformadores visando estender sua utilização para outros tipos de ligação, além do caso estrela-aterrado/estrela-aterrado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arrilaga, J. and Arnold, C. P. (1983), "Computer Modelling of Electrical Power Systems", John Wiley, New Zealand.
- Birt, K. A., Graffy, J. J., McDonald, J. D. and El-Abiad, A.H. (1976), "Three Phase Load Flow Program", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 95, pp 59-65.
- Chen, B. K., Chen, M. S., Shoults, R. R. and Liang, C. C. (1990), "Hybrid Three Phase Load Flow", *IEEE Proceedings*, vol. 137, Pt. C, No 3, pp 177-185,

Sistema	Tol. em p.u.	Método	
		Newton	Desacoplado "Novo"
Sistema 1	.003	1.43	0.53
Sistema 2	.001	54.35	11.17

Tabela 7 - Tempo Computacional ( s )

May.

- Chen, T. H., Chen, M. S., Hwang, K. J., Kotas, P. and Chebli, E. A. (1991), "Distribution System Power Flow Analysis - A Rigid Approach", *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1146-1152, July.
- Monticelli, A., Garcia, A. and Saavedra, O. R. (1990), "Fast Decoupled Load Flow: Hypothesis, Derivations, and Testing" *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 1425-1431, November.
- Van Amerongen R. (1989), "A General Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow", *IEEE Transactions on Power Systems*, 760-770, May.
- Chen, M. S. and Dillon, W. E. (1974), "Power System Modeling", *Proc. IEEE*, vol. 62, pp 901-915.
- Stott, B. and Alsac, O. (1974), "Fast Decoupled Load Flow", *IEEE Transaction PAS*, vol 93, pp 859-869.
- Zago, M. G. (1992), *Fluxo de Carga Trifásico*. Tese de Mestrado, FEE/UNICAMP, Dezembro de 1992.
- Monticelli A. (1983), *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Ed. Edgard Blucher, São Paulo.
- IEEE Distribution Planning Working Group Report (1991), "Radial Distribution Test Feeders", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol 6, pp 975-985, August.