

## MÉTODO SIMPLIFICADO DE CÁLCULO DO ESTADO ELÉTRICO DE REDES RADIAIS DE DISTRIBUIÇÃO

C.A. CASTRO Jr.  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP  
Campinas São Paulo Brasil

### RESUMO

Há atualmente uma tendência de se automatizar o controle da distribuição de energia elétrica. Tal fato levou à necessidade de se estudar e desenvolver algoritmos de controle automático de redes, ou seja, algoritmos que definam procedimentos de manobras a serem realizados na rede a fim de que esta opere segundo critérios pré-estabelecidos.

Para que as manobras possam ser realizadas na rede, é necessário assegurar que as limitações elétricas da rede não sejam violadas. Como exemplo, pode-se citar os limites de tensão de fornecimento e de fluxos de corrente nos cabos. Portanto, um algoritmo de cálculo do estado elétrico da rede é um importante suporte nas tomadas de decisão a cerca das manobras que devem ser realizadas. No entanto, deve-se realizar este cálculo de forma precisa, rápida e utilizando o menor espaço de memória possível.

Neste trabalho é proposto um método simplificado para o cálculo do estado elétrico de redes de distribuição, explorando o fato de que normalmente se tem redes primárias radiais. Este método é testado e comparado com o fluxo de carga, que é um método usual, já bastante testado e reconhecidamente preciso e eficiente.

Os resultados obtidos levam a crer que o método simplificado proposto é aplicável, fornecendo resultados bastante satisfatórios.

### INTRODUÇÃO

Um sistema de controle automático da operação de redes de distribuição deve desempenhar eficientemente funções pré-estabelecidas (funções de controle) [1]. Como exemplo de algumas dessas funções pode-se citar a localização de regiões defeituosas da rede, isolamento das regiões defeituosas do restante da rede, restabelecimento do serviço a regiões desenergizadas (escuras), balançamento de carga entre os alimentadores, etc. A execução de tais funções implica na reconfiguração da rede, ou seja, na realização de manobras (operações de chaveamento) para levar a rede a uma condição de operação satisfatória, de acordo com critérios definidos.

Para a realização de algumas funções de controle (por exemplo o restabelecimento do

serviço a regiões escuras) é necessário que se tenha meios de obtenção do estado elétrico da rede para verificação de seus limites de tensão e corrente de operação. Antes de se realizar alguma manobra na rede deve-se verificar se esta manobra causará ou não o surgimento de correntes superiores às máximas permitidas para cada tipo de cabo, ou se resultará em tensão fora dos limites mínimo e máximo estabelecidos em algum ponto da rede.

Com o objetivo de tornar mais rápida a obtenção do estado elétrico da rede, implicando em um processo de reconfiguração da rede mais eficiente, diferentes métodos devem ser estudados, testados e comparados.

Neste trabalho é proposto um método simplificado de cálculo do estado elétrico de redes radiais de distribuição. Este método é testado e comparado com o fluxo de carga desacoplado rápido adaptado para redes de distribuição. O fluxo de carga terá suas características principais apresentadas de forma resumida e o método simplificado será apresentado com maiores detalhes, pois o primeiro já foi objeto de estudos anteriores [2], ao contrário do segundo.

### 1.- FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO ADAPTADO PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO [2],[3]

Em sistemas de distribuição tem-se normalmente uma baixa relação X/R (reatância/resistência) para os trechos de linha. Este fato resulta em problemas de convergência para o método desacoplado rápido, pois a própria hipótese do desacoplamento entre potência ativa-potência reativa (ângulo-tensão) torna-se fraca.

Este problema é resolvido aumentando-se artificialmente a relação X/R dos trechos, através da técnica da rotação de eixos, conforme ilustra a figura 1. A impedância Z representada segundo o par de eixos que apresenta uma rotação de um ângulo  $\theta$  em relação ao original tem as seguintes componentes:

$$\left. \begin{aligned} R' &= R \cdot \cos \theta - X \cdot \sin \theta \\ X' &= R \cdot \sin \theta + X \cdot \cos \theta \end{aligned} \right\} Z' = Z \cdot e^{j\theta}$$

A nova relação X'/R' é maior que X/R. Escolhe-se um ângulo  $\theta$  apropriado de forma a se obter uma relação que satisfaça a hipótese de desacoplamento. Normalmente deve-se ter uma relação X/R maior ou igual a 3,0.

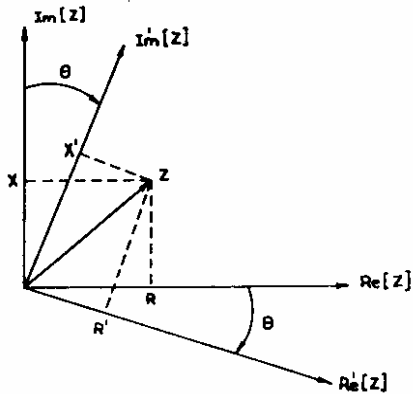


Fig. 1. - Representação gráfica da impedância Z.

Se é feita uma rotação de eixos de um ângulo  $\theta$  nas impedâncias e se quer obter o mesmo valor de tensão  $E$ , ou seja, o estado correto da rede, deve-se aplicar a rotação do mesmo ângulo também às potências  $S$ . Portanto:

$$S' = S \cdot e^{j\theta}$$

Depois de convergido o processo iterativo, deve-se realizar a rotação inversa para se calcular os fluxos nas linhas.

## 2.- MÉTODO SIMPLIFICADO

Considere-se a rede de distribuição representada na figura 2.

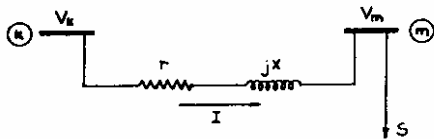


Fig. 2. - Rede de distribuição.

Trata-se de uma rede composta por um trecho de linha interligando dois pontos de carga, onde se pode identificar as seguintes grandezas:

- .  $V_k$  - módulo da tensão de linha do ponto de carga k em [V];
- .  $V_m$  - módulo da tensão de linha do ponto de carga m em [V];
- .  $I$  - módulo da corrente de linha entre os pontos de carga k e m em [A];
- .  $r+jx = Z$  - impedância do trecho de linha em [ $\Omega$ ];
- .  $S$  - potência aparente trifásica da carga em [VA].

O módulo da corrente  $I$  pode ser calculada por:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_m} \quad [A] \quad (1)$$

Considerando-se a tensão  $V_m$  como sendo igual à tensão nominal da rede,  $V_n$ , tom-se que:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_n} \quad [A] \quad (2)$$

Conhecendo-se o valor da corrente  $I$ , pode-se calcular o valor da queda de tensão no trecho de linha:

$$\Delta V = V_k - V_m = |Z| \cdot I = \sqrt{r^2 + x^2} \cdot I \quad [V] \quad (3)$$

Pode-se então calcular o valor aproximado de  $V_m$ , considerando-se agora a tensão no ponto de carga k como sendo a tensão nominal, resultando em:

$$V_m = V_n - \sqrt{r^2 + x^2} \cdot I \quad [V] \quad (4)$$

Considere-se agora o caso de uma rede de distribuição radial gonôrica, como a mostrada na figura 3, onde aparecem as seguintes grandezas:

- .  $Z_i$  - impedância dos trechos de linha [ $\Omega$ ];
- .  $S_i$  - potência aparente trifásica dos pontos de carga [VA].

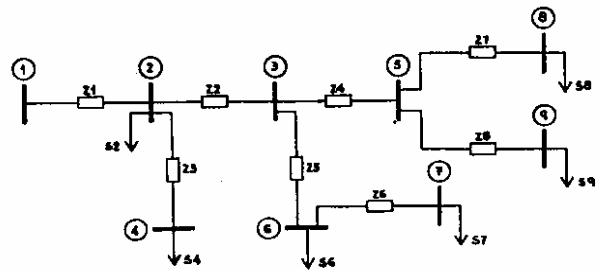


Fig. 3. - Rede de distribuição radial gonôrica.

Rascado no desenvolvimento feito anteriormente, propõe-se o seguinte algoritmo para o cálculo do estado da rede:

- [1] obter, para todo ponto de carga ao qual estiver conectada uma carga, um valor de corrente dados pela equação (2). Atribuir este valor de corrente calculada ao trecho que alimenta o ponto de carga (ver figura 4).

- Ex.: barra 2 - calcular a corrente  $I_1$  devido à carga  $S_2$  e atribuir este valor ao trecho que liga o ponto de carga 1 ao 2.
- barra 3 - corrente  $I_2 = 0$  ( $S_3 = 0$ ).

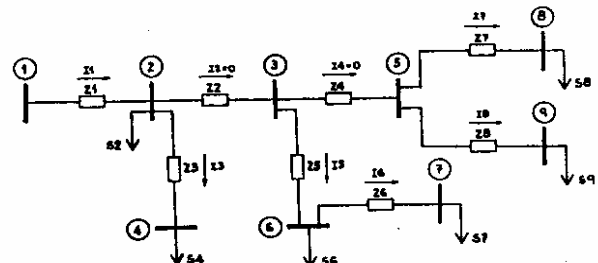


Fig. 4. - Passo [1]: cálculo das correntes dos trechos de linha.

[2] calcular o valor da corrente acumulada para cada trecho de linha da rede. Entende-se por corrente acumulada de um trecho à soma da corrente própria do trecho (calculada no passo [1]) com todas as correntes dos trechos alimentados por ele (ver figura 5).

Ex.:  $I_{4a} = I_4 + I_{7a} + I_{8a} =$   
 $= I_{7a} + I_{8a} = 17 + 18$   
 $I_{5a} = I_5 + I_{6a} = 15 + 16$   
 $I_{1a} = I_1 + I_{2a} + I_{3a} =$   
 $= I_1 + I_3 + I_5 + I_6 + I_7 + I_8$

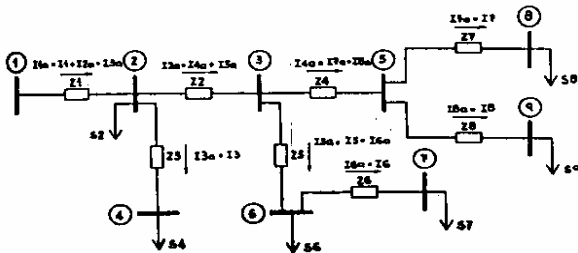


Fig. 5.- Passo [2]: cálculo das correntes acumuladas nos trechos de linha.

[3] calcular a queda de tensão em cada trecho de linha, utilizando a equação (3) (ver figura 6).

Ex.:  $\Delta V_2 = I_{2a} \cdot Z_{21}$   
 $\Delta V_8 = I_{8a} \cdot Z_{81}$

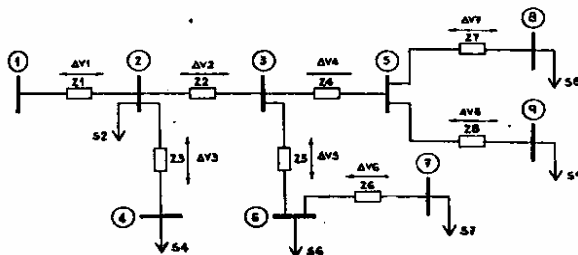


Fig. 6.- Passo [3]: cálculo das quedas de tensão nos trechos de linha.

[4] considerando o valor nominal de tensão no ponto de alimentação, calcular as tensões em cada ponto de carga da rede, utilizando os valores de queda de tensão calculados no passo [3] (ver figura 7).

Ex.:  $V_1 = V_n$  (ponto de alimentação)  
 $V_2 = V_1 - \Delta V_1$   
 $V_8 = V_5 - \Delta V_7$

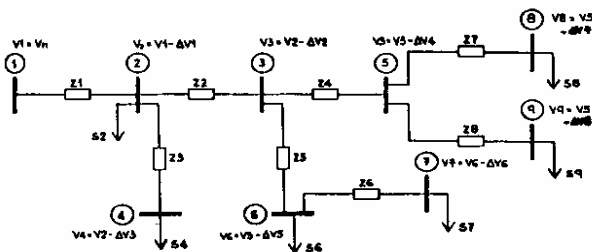


Fig. 7.- Passo [4]: cálculo das tensões nos pontos de carga.

### 3.- RESULTADOS

A rede de distribuição utilizada nos testes realizados é mostrada na figura 8.

As principais características do programa de fluxo de carga adaptado para redes de distribuição são:

- precisão: 5%.  
Este nível de precisão tem-se mostrado razoável em testes realizados, combinando rapidez de convergência e qualidade dos resultados.
- fator de potência das cargas: 90%.  
Por simplicidade, adotou-se o mesmo valor de fator de potência para todas as cargas da rede.
- ângulo de rotação de eixos: 45°.  
Através de testes chegou-se a este valor como sendo adequado para aumentar a relação X/R para valores maiores ou iguais a 3,0 [2].
- fator de carga: 0,6.  
Deve-se fornecer um valor, chamado fator de carga (fc), que é aplicado aos valores nominais das cargas, ou seja:

$$S_p = fc \cdot S_{np}$$

onde:

- $S_p$  - potência aparente trifásica do ponto de carga
- $S_{np}$  - potência aparente trifásica nominal do ponto de carga.

Pode-se variar fc de forma a se obter uma rede pouco carregada (fc pequeno) ou muito carregada (fc grande). Neste trabalho, utilizou-se apenas um valor, definido acima.

Para a aplicação do método simplificado, foi utilizado o mesmo valor de fator de carga (0,6).

Antes de serem apresentados os resultados propriamente ditos são necessárias duas observações:

- os testes foram realizados em um micro-computador ITAUTEC I-7000, de 8 bits.
- o programa de fluxo de carga, assim como o programa do método simplificado, apresentam a seguinte saída de dados:
  - número de iterações necessárias para a convergência (este dado não é fornecido para o método simplificado, pois este não é um método iterativo)
  - tensão nos pontos de carga: número do ponto de carga (PONTO) e tensão em [pu] (TENSÃO)
  - corrente nos trechos de linha: número do ponto de carga inicial (PO IN), número do ponto de carga final (PO FI) e corrente em [A] (CORRENTE)

As figuras 9 e 10 mostram os resultados obtidos com a aplicação dos métodos de fluxo de carga desacoplado rápido adaptado para redes de distribuição (FCDR) e simplificado (MS).

Os métodos serão então comparados com base em três aspectos:

- a) precisão de resultados: serão analisadas as diferenças entre os resultados obtidos com a aplicação dos dois métodos.

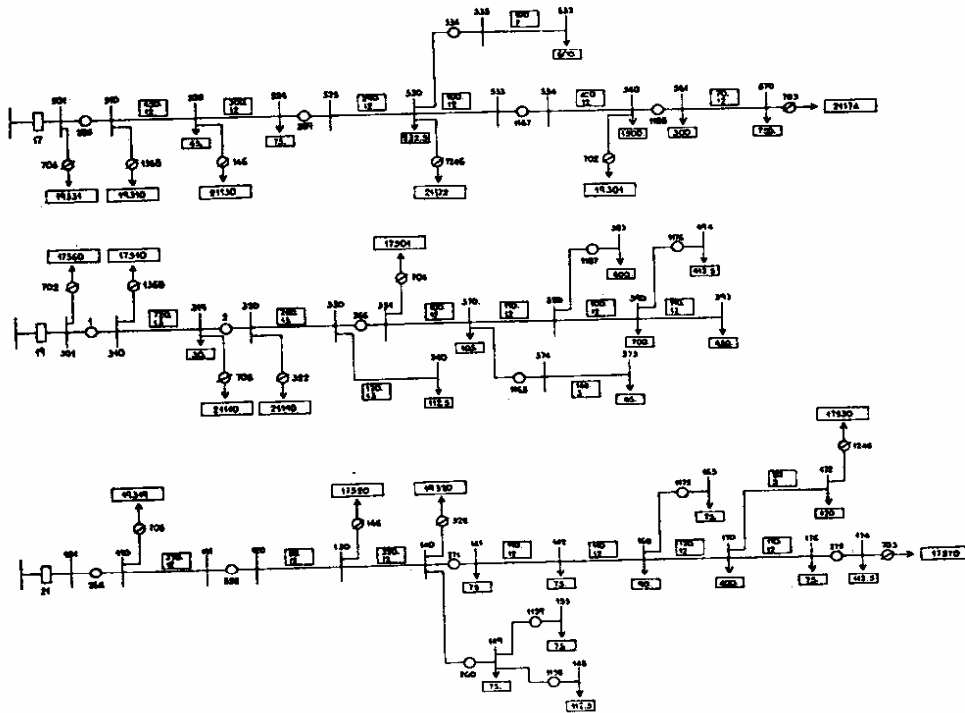


Fig. 8.- Rede de distribuição utilizada nos testes.

=> FCDR convergiu em 2 P e 2 Q iteracoes

| PONTO | TENSÃO [pu] | PO IN | PO FI | CORRENTE [A] |     |
|-------|-------------|-------|-------|--------------|-----|
| 1     | 1.000       | 1     | 17510 | 17520        | 89. |
| 2     | 1.000       | 2     | 17520 | 17524        | 88. |
| 3     | .998        | 3     | 17525 | 17530        | 86. |
| 4     | .997        | 4     | 17535 | 17532        | 15. |
| 5     | .997        | 5     | 17530 | 17533        | 65. |
| 6     | .996        | 6     | 17534 | 17540        | 65. |
| 7     | .996        | 7     | 17561 | 17570        | 19. |
| 8     | .996        | 8     | 17501 | 17510        | 89. |
| 9     | .995        | 9     | 17524 | 17525        | 84. |
| 10    | .995        | 10    | 17530 | 17535        | 15. |
| 11    | .994        | 11    | 17533 | 17534        | 65. |
| 12    | .994        | 12    | 17560 | 17561        | 27. |
| 13    | .994        | 13    | 19310 | 19319        | 62. |
| 14    | 1.000       | 14    | 19320 | 19330        | 61. |
| 15    | 1.000       | 15    | 19330 | 19340        | 3.  |
| 16    | .998        | 16    | 19331 | 19370        | 58. |
| 17    | .998        | 17    | 19374 | 19373        | 1.  |
| 18    | .997        | 18    | 19370 | 19380        | 55. |
| 19    | .997        | 19    | 19380 | 19390        | 39. |
| 20    | .997        | 20    | 19390 | 19393        | 11. |
| 21    | .997        | 21    | 19301 | 19310        | 42. |
| 22    | .997        | 22    | 19319 | 19320        | 61. |
| 23    | .997        | 23    | 19330 | 19331        | 58. |
| 24    | .997        | 24    | 19370 | 19374        | 1.  |
| 25    | .997        | 25    | 19380 | 19383        | 15. |
| 26    | .997        | 26    | 19390 | 19394        | 10. |
| 27    | .997        | 27    | 21110 | 21111        | 32. |
| 28    | .997        | 28    | 21120 | 21130        | 32. |
| 29    | 1.000       | 29    | 21130 | 21140        | 32. |
| 30    | 1.000       | 30    | 21141 | 21142        | 24. |
| 31    | .999        | 31    | 21142 | 21160        | 22. |
| 32    | .999        | 32    | 21160 | 21170        | 18. |
| 33    | .999        | 33    | 21170 | 21172        | 3.  |
| 34    | .999        | 34    | 21170 | 21176        | 5.  |
| 35    | .999        | 35    | 21101 | 21110        | 32. |
| 36    | .999        | 36    | 21111 | 21120        | 32. |
| 37    | .999        | 37    | 21140 | 21149        | 7.  |
| 38    | .999        | 38    | 21149 | 21153        | 2.  |
| 39    | .999        | 39    | 21149 | 21148        | 3.  |
| 40    | .999        | 40    | 21140 | 21141        | 24. |
| 41    | .999        | 41    | 21160 | 21165        | 2.  |
| 42    | .998        | 42    | 21176 | 21174        | 3.  |
| 43    | .998        |       |       |              |     |
| 44    | .998        |       |       |              |     |
| 45    | .998        |       |       |              |     |

Fig. 9.- Aplicação de FCDR.

| PONTO    | TENSAO [pu] | PO IN    | PO FI | CORRENTE [A] |
|----------|-------------|----------|-------|--------------|
| 1 17501  | 1.000       | 1 17510  | 17520 | 88.          |
| 2 17510  | 1.000       | 2 17520  | 17524 | 87.          |
| 3 17520  | .998        | 3 17525  | 17530 | 85.          |
| 4 17524  | .996        | 4 17535  | 17532 | 15.          |
| 5 17525  | .996        | 5 17530  | 17533 | 64.          |
| 6 17530  | .995        | 6 17534  | 17560 | 64.          |
| 7 17535  | .995        | 7 17561  | 17570 | 19.          |
| 8 17532  | .994        | 8 17501  | 17510 | 88.          |
| 9 17533  | .994        | 9 17524  | 17525 | 85.          |
| 10 17534 | .994        | 10 17530 | 17535 | 15.          |
| 11 17560 | .993        | 11 17533 | 17534 | 64.          |
| 12 17561 | .993        | 12 17560 | 17561 | 26.          |
| 13 17570 | .992        | 13 19310 | 19319 | 62.          |
| 14 19301 | 1.000       | 14 19320 | 19330 | 61.          |
| 15 19310 | 1.000       | 15 19330 | 19340 | 3.           |
| 16 19319 | .997        | 16 19331 | 19370 | 58.          |
| 17 19320 | .997        | 17 19374 | 19373 | 1.           |
| 18 19330 | .997        | 18 19370 | 19380 | 54.          |
| 19 19340 | .997        | 19 19380 | 19390 | 39.          |
| 20 19331 | .996        | 20 19390 | 19393 | 11.          |
| 21 19370 | .996        | 21 19301 | 19310 | 62.          |
| 22 19374 | .996        | 22 19319 | 19320 | 61.          |
| 23 19373 | .996        | 23 19330 | 19331 | 58.          |
| 24 19380 | .996        | 24 19370 | 19374 | 1.           |
| 25 19383 | .996        | 25 19380 | 19383 | 15.          |
| 26 19390 | .996        | 26 19390 | 19394 | 10.          |
| 27 19394 | .996        | 27 21110 | 21111 | 32.          |
| 28 19393 | .995        | 28 21120 | 21130 | 32.          |
| 29 21101 | 1.000       | 29 21130 | 21140 | 32.          |
| 30 21110 | 1.000       | 30 21141 | 21142 | 24.          |
| 31 21111 | .999        | 31 21142 | 21160 | 22.          |
| 32 21120 | .999        | 32 21160 | 21170 | 18.          |
| 33 21130 | .999        | 33 21170 | 21172 | 3.           |
| 34 21140 | .998        | 34 21170 | 21176 | 5.           |
| 35 21149 | .998        | 35 21101 | 21110 | 32.          |
| 36 21153 | .998        | 36 21111 | 21120 | 32.          |
| 37 21148 | .998        | 37 21140 | 21149 | 7.           |
| 38 21141 | .998        | 38 21149 | 21153 | 2.           |
| 39 21142 | .998        | 39 21149 | 21148 | 3.           |
| 40 21160 | .998        | 40 21140 | 21141 | 26.          |
| 41 21165 | .998        | 41 21160 | 21165 | 2.           |
| 42 21170 | .998        | 42 21176 | 21174 | 3.           |
| 43 21172 | .998        |          |       |              |
| 44 21174 | .998        |          |       |              |
| 45 21174 | .998        |          |       |              |

Fig. 10.- Aplicação de NS.

b) tempo de execução: pode-se dividir o tempo de execução dos programas em duas parcelas distintas:  
 - leitura e preparação dos dados (LEIT)  
 - cálculo do estado da rede (CALC)  
 Estas parcelas foram medidas e analisadas para o caso testado.

c) espaço de memória ocupado: obviamente, o programa deve ocupar o mínimo espaço de memória possível.

### 3.1.- PRECISÃO DOS RESULTADOS

Comparando-se os resultados apresentados nas figuras 9 e 10, obtidos com a aplicação dos dois métodos, verifica-se que a variação máxima de tensão é de 0,002 pu, enquanto que a variação máxima de corrente é de 1,0 A. Portanto, as diferenças entre os resultados podem ser consideradas desprezíveis.

### 3.2.- TEMPO DE EXECUÇÃO

A tabela 1 mostra os tempos de execução, levando em conta a divisão em dois blocos já discutida anteriormente.

### 3.3.- ESPAÇO DE MEMÓRIA OCUPADO

A tabela 2 mostra uma comparação entre os dois programas no que se refere ao espaço de memória ocupado pelos programas fonte (extensão .FOR) e imagem (extensão .COM).

Tabela 1.- Tempos de execução

|      | LEIT | CALC |
|------|------|------|
| FCDR | 14   | 27   |
| NS   | 11   | 15   |

\* tempos em segundos

Tabela 2.- Espaço de memória ocupado.

|      | .FOR | .COM |
|------|------|------|
| FCDR | 16   | 28   |
| NS   | 8    | 18   |

\* valores em KBytes

Deve-se observar que os dois programas são dimensionados de forma equivalente, ou seja, ambos sempre podem ser aplicados à mesma rede.

### CONCLUSÕES

Com relação aos testes realizados e resultados apresentados, pode-se verificar que:

- em termos de precisão de resultados, o método simplificado apresentou variações muito pequenas em relação ao fluxo de carga. Pode-se considerar os resultados obtidos com o método simplificado como compatíveis com o problema;
- o método simplificado é sempre mais rápido que o fluxo de carga;
- o programa relativo ao método simplificado ocupa um espaço de memória menor que o relativo ao fluxo de carga.

Portanto, é recomendável que se utilize o método simplificado como suporte do processo de reconfiguração automática de redes de distribuição, pois isto torna o processo mais eficiente em termos computacionais

(tempo de execução e ocupação de memória), apresentando resultados numéricos equivalentes aos obtidos com a aplicação do fluxo de carga.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Castro Jr., C.A., França, A.L.N., "Algoritmo de Reconfiguração Automática de Redes Primárias de Distribuição", VII JIEE, p.29/39, Quito, Equador, Maio/86.
- [2] Garcia, A.V. e outros, "Automação da Distribuição: Simulação utilizando o Fluxo de Carga Desacoplado Rápido", 5º Congresso Brasileiro de Automática e 1º Congresso Latino-Americano, vol.1, p.256/261, 1984.
- [3] Stott, B., Alsac, G., "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Trans., vol. PAS-93, p.859/869, 1974.