

## DETERMINAÇÃO DE PONTO ÓTIMO PARA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

A . C. Zambroni de Souza, R. Coradi Leme, L. Carlos Pereira,

B. Isaias Lopes, O. A. Salgado Carpinteiro

Universidade Federal de Itajubá/GEIS – Grupo de Engenharia de Sistemas

BRASIL

### RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para determinação de pontos para compensação de potência reativa em sistemas de distribuição. São consideradas as possibilidades de compensar para evitar problemas de colapso de tensão e também para reduzir perdas elétricas. Testes executados com sistemas reais validam a metodologia proposta.

### PALAVRAS CHAVE

#### 1 INTRODUÇÃO

A compensação de potência reativa em sistemas de distribuição é tarefa bastante importante em sistemas de potência, dado que parte da carga consumida depende diretamente do nível de tensão. Quando o sistema de transmissão é analisado, o nível de compensação é obviamente maior, e a literatura está fartamente documentada neste aspecto [[1] - [5]]. No entanto, se sistemas de distribuição são o foco, o problema torna-se mais grave. Isto porque, muitas vezes, a compensação de potência é feita, ou através da experiência dos Engenheiros envolvidos ou através da escolha das barras com menor nível de tensão. A escolha de barras com baixo nível de tensão pode parecer uma escolha bastante interessante, visto que a compensação de potência reativa tende a fornecer uma melhoria no perfil de tensão do sistema. No entanto, a literatura mostra que problemas de estabilidade de tensão devem também ser abordados, além do problema das perdas elétricas [[7]].

Se a política de compensação de potência reativa levar em consideração aspectos de estabilidade de tensão, alguns pontos importantes devem ser definidos, como descrito a seguir:

Instabilidade de tensão é uma condição em que ações de controle podem apresentar resultados opostos ao esperado, o que pode levar o sistema, ou parte dele, a um colapso de tensão. Ao contrário do problema de instabilidade angular, onde as características transitórias são determinantes, a escala de tempo associada ao colapso de tensão pode levar até mesmo alguns minutos, dado que a carga desempenha papel preponderante, além das fontes de potência reativa [[8]-[10]]. Assim, um cálculo interessante consiste em determinar o montante de carga que o sistema pode suportar enquanto estável sob o ponto de vista de tensão, o que é chamado de margem de carga. Em geral, utiliza-se o método da continuação para este fim. Este método depende de um passo previsor e um corretor. O passo previsor possui a importante característica de determinar as barras do sistema que o levam ao colapso de tensão. Estas barras são denominadas barras críticas do sistema. É mostrado que controlar o nível de tensão nestas barras pode melhorar sensivelmente o perfil de tensão do sistema.

A análise de perdas elétricas também desempenha um papel bastante importante na operação de sistemas de potência. Neste caso, a idéia é injetar potência reativa em pontos do sistema reduzam de forma mais efetiva as perdas globais do sistema. Neste aspecto, no entanto, o leitor deve estar atento ao fato de que, como mostrado na literatura, a redução de perdas elétricas pode estar desacoplada do problema de estabilidade de tensão. No entanto, se a redução de perdas elétricas for o foco, as barras devem ser corretamente identificadas para este fim. Neste trabalho, a técnica do vetor tangente é empregada, o que permite determinar corretamente as barras sujeitas à compensação de potência reativa.

Os pontos abordados acima são facilmente manipuláveis em sistemas de transmissão, cujos pontos de equilíbrio podem ser obtidos a partir de um programa de fluxo de carga com o auxílio do método de Newton. No entanto, sistemas de distribuição apresentam características bastante distintas de sistemas de transmissão. As mais importantes referem-se aos dados de linhas de ligação entre as barras e as características radiais dos sistemas de distribuição. Isto pode fazer com que o método de Newton encontre problemas de convergência, o que pode até mesmo inviabilizar sua aplicação. Neste caso, os métodos descritos nos parágrafos acima não funcionariam, já que as matrizes de sensibilidade obtidas a partir do método de Newton não podem ser calculadas. Este problema pode ser resolvido através de uma rotação no eixo das variáveis das linhas de interligação. O uso desta rotação permite o cálculo pelo método de Newton, o que é feito neste trabalho.

Em função do exposto acima, este trabalho é organizado como segue: A Seção II apresenta a técnica de rotação de eixos, enquanto a Seção III descreve o vetor tangente, utilizado para identificação de barras críticas. A Seção IV mostra a identificação das barras candidatas a compensação para redução de perdas. De forma a ajudar o leitor a compreender a complexidade do projeto, uma seção de metodologia é apresentada (Seção V), e finalmente, a Seção VI discute os resultados obtidos.

## 2 ROTAÇÃO DE EIXOS

O cálculo de fluxo de carga em redes de transmissão apresenta-se bem sedimentado na literatura, como mostrado em [[6]]. Em geral, o método de Newton é empregado, e resultados satisfatórios são obtidos. Uma aproximação ao método completo é obtida quando o método desacoplado é proposto. Tal método baseia-se na fraca interação entre as derivadas parciais de potência ativa em relação ao módulo da tensão e entre as derivadas parciais de potência reativa em relação aos ângulos de fase. Este desacoplamento é função das características das linhas de transmissão, cuja relação X/R (reatância/resistência) é alta.

Para os sistemas de distribuição, esta relação X/R não apresenta os mesmos valores. Ao contrário, muitas vezes, a relação R/X é que apresenta valores elevados, o que inviabiliza não apenas a execução do método desacoplado, mas também a utilização do método de Newton completo. Para contornar este problema, um interessante método baseado na rotação de eixos é proposto, conforme descrito a seguir:

Dada uma impedância  $Z = R + jX$ , a mesma pode ser representada em outro sistema de referência, defasado do primeiro de um ângulo  $\phi$ . Chamando este novo número de  $Z'$ , pode-se escrever:

$$Z' = Z e^{j\phi}$$

$$\text{Ou, } Z' = Z(\cos \phi + j \sin \phi)$$

$$\text{Definindo } Z' = R' + jX'$$

$$R' = R \cos \phi - X \sin \phi$$

$$X' = R \sin \phi + X \cos \phi$$

Desta maneira, a relação X/R será: Para barras de 66 kV: La máxima capacidad que podría ser instalada debe ser acorde a la capacidad de los bancos de transformadores 220/66 kV conectados a la barra.

Desta maneira, a relação X/R será:

$$\frac{X'}{R'} = \frac{R \cdot \sin\phi + X \cdot \cos\phi}{R \cdot \cos\phi - X \cdot \sin\phi}$$

E, variando-se  $\phi$ , pode-se obter o valor desejado de X'/R'. Como exemplo ilustrativo, é suposto:

$$R = 4 \text{ e } X = 2$$

A relação X/R é dada por 0,5.

Para um ângulo  $\phi$  de  $45^\circ$ , tem-se:

$$R' = 2 * 1.41/2 - 1.41/2 = 0.707$$

$$X' = 2 * 1.41/2 + 1.41/2 = 3 * 0.707$$

O que fornece uma relação X'/R' = 3.

Note que ao alterar a rede e manter constantes as injeções, o estado obtido da rede não será real. Assim, deve-se rotacionar também os valores de potência injetada nas barras, o que é feito com descrito a seguir:

$$P' = P \cos\phi - Q \sin\phi$$

$$Q' = Q \sin\phi + P \cos\phi$$

As modificações descritas acima são suficientes para executar, em um sistema de distribuição, até mesmo o método desacoplado. No entanto, o interesse deste trabalho é a obtenção das matrizes de sensibilidade completas. Assim, propõe-se utilizar a rotação proposta acima para emprego do método de Newton em sua forma completa.

### 3 CÁLCULO DO VETOR TANGENTE

O modelo de fluxo de carga usado neste trabalho é representado pelo conjunto de equações:

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (1)$$

Onde  $\lambda$  é o parâmetro que leva o sistema de um ponto de equilíbrio a outro e  $x$  representa as variáveis de estado. O vetor tangente mostra como as variáveis de estado mudam com o carregamento do sistema, e pode ser obtido a partir da matriz Jacobiana de fluxo de carga. Assumindo um ponto de operação conhecido:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde  $g$  representa os geradores e  $l$  representa as barras de carga. A inversa é dada por:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_l \\ \Delta Q_l \end{bmatrix} \quad (3)$$

A carga é incrementada como segue:

$$P_i = P_{io} (1 + \Delta \lambda)$$

(4)

$$Q_i = Q_{io} (1 + \Delta \lambda)$$

Onde  $P_i$  e  $Q_i$  são as cargas ativas e reativas após a variação do parâmetro  $\lambda$ ,  $P_{io}$  e  $Q_{io}$  são as cargas ativa e reativa inicialmente conectadas à barra  $i$ . A potência ativa gerada é incrementada da mesma forma: Portanto:

$$\Delta P_i = P_{io} \Delta \lambda \text{ e}$$

(5)

$$\Delta Q_i = Q_{io} \Delta \lambda$$

Substituindo a equação (5) na equação (3) obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_g \\ \Delta \theta_l \\ \Delta V_l \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta \lambda} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_{go} \\ P_{lo} \\ Q_{lo} \end{bmatrix} \quad (6)$$

A literatura mostra que este vetor pode identificar com facilidade e antecedência a barra crítica do sistema [[11], [12]], em contraste com outras técnicas disseminadas na literatura, que tendem a identificar estas barras somente no ponto de equilíbrio imediatamente anterior ao ponto de colapso de tensão.

#### 4 SENSIBILIDADE DE PERDAS ELÉTRICAS

As perdas elétricas ativas de um sistema elétrico são dadas por:

$$P_{sistema} = \sum_{k=1}^{nl} V_{ik} V_{jk} ( G_k ( \cos(\delta_{(ij)k}) + \cos(\delta_{(ji)k}) ) - G_k ( V_{ik}^2 + V_{jk}^2 ) ) \quad (7)$$

onde

$nl$  é o número de linhas de transmissão,

$V_{ik}$  e  $V_{jk}$  são os níveis de tensão nas barras ( $i$ ) e ( $j$ ) conectadas à linha de transmissão  $k$ .

$G_k$  é a susceptância da linha de transmissão  $k$ .

$\delta_{(ij)k}$  representa o ângulo de fase entre as barras  $i$  e  $j$ .

Se a equação (6.1) for derivada em relação ao parâmetro do sistema  $\lambda$ , obtêm-se:

$$\frac{d P_{system}}{d\lambda} = \sum_{k=1}^{nl} G_k \left( \frac{d V_{ik}}{d\lambda} V_{jk} + \frac{d V_{jk}}{d\lambda} V_{ik} \right) A + V_{ik} V_{jk} \frac{dA}{d\lambda} - 2 G_k \left( V_{ik} \frac{d V_{ik}}{d\lambda} + \frac{d V_{jk}}{d\lambda} V_{jk} \right) \quad (8)$$

onde

$$A = G_k ( \cos(\delta_{(ij)k}) + \cos(\delta_{(ji)k}) )$$

$$dA/d\lambda = G_k ( 2 \sin(\delta_{(ij)k}) ( d\delta_{(i)k}/d\lambda - d\delta_{(j)k}/d\lambda ) )$$

A equação (8) mostra como as perdas ativas variam em função do parâmetro  $\lambda$ . Note que todas as derivadas parciais da equação (8) são conhecidas do cálculo do vetor tangente. Portanto, calcular a equação (8) não requer um grande esforço computacional.

Assuma que o lado direito da equação (8) seja levemente perturbado através da instalação de um capacitor em uma barra de carga genérica "l". O novo vetor tangente pode ser obtido sem a necessidade de se calcular o novo ponto de operação. Se a equação (8) for então calculada, a variação das perdas elétricas ativas em função do parâmetro  $\lambda$  será conhecida. Se "l" representar cada barra de carga, uma a uma, o cálculo das equações (6) e (8) indica a barra de carga cuja instalação de um capacitor reduza de forma mais efetiva as perdas do sistema. Note que o fluxo de carga é executado somente uma vez, quando o caso base é analisado. Além desta característica, a aplicação para sensibilidade de perdas de potência reativa segue a mesma metodologia.

## 5 METODOLOGIA

As ferramentas descritas nas seções anteriores são escolhidas para determinação das barras sujeitas à compensação. Note que três grupos de barras são fornecidos ao usuário: barras críticas sob o ponto de vista de estabilidade de tensão e barras recomendadas para redução de perdas ativas e reativas, respectivamente. Outro aspecto importante refere-se à flexibilidade do usuário. Os dados fornecidos pela Concessionária devem ser convertidos a um formato mais amigável, dado que inicialmente são disponibilizados em um confuso arquivo em formato texto. Após a conversão, diversos arquivos são gerados para o usuário, de forma a permitir alteração nos dados de entrada. Portanto, a execução completa de um caso requer o uso de dois programas computacionais, ambos em um mesmo pacote desenvolvido especificamente para o projeto. A execução do fluxo de carga se dá em função de um valor de carga lido. No entanto, o usuário é convidado a manter ou alterar este valor através de uma janela gráfica. A potência reativa é calculada em função dos dados de fator de potência fornecidos.

Após a execução do programa de fluxo de carga e sensibilidade, uma interface gráfica é disponibilizada. Esta interface contém a diagramação do sistema analisado. Como este sistema pode ficar confuso na tela, existe a possibilidade do usuário utilizar um zoom, ampliando a área de interesse. Esta interface permite ao usuário visualizar:

- Visualizar as 5 barras críticas de cada grupo.
- Visualizar, do sub-grupo acima, as barras efetivamente sujeitas à compensação. Isto é feito em função do número de bancos de capacitores disponíveis.
- Visualização das barras já associadas a bancos de capacitores.
- Através da utilização mouse, dados de barras e linhas são disponibilizados em uma janela inferior da interface.
- As entradas primárias e estações transformadoras são também identificadas.

Caso os bancos de capacitores considerados sejam suficientes para tornar a carga total capacitiva, um aviso é disponibilizado no arquivo de saída, de forma a alertar o usuário. O arquivo de saída contém os dados de tensão de cada barra, além da potência consumida em cada uma delas. A corrente e potência transmitidas nas linhas são também disponibilizadas, além do fator de potência de cada barra e o fator de potência total do sistema.

## 6 RESULTADOS

Os testes são executados com auxílio de um sistema radial real. Tal sistema de distribuição contém 5102 linhas e 5104 barras, com carga total de 1500 kW. O sistema tem 3 capacitores móveis: um de 800 kVAR e 2 de 400 kVAR. As barras com mais baixo perfil de tensão são mostradas na Tabela I.

**Tabela I – Nível de tensão para o caso base**

BUS	Voltage	Bus	Voltage	Bus	Voltage
1	0.94779	6	0.94840	11	0.94789
2	0.94778	7	0.94840	12	0.94787
3	0.94778	8	0.94840	13	0.94785
4	0.94777	9	0.94839	14	0.94782
5	0.94776	10	0.94839	15	0.94780

Este ponto operativo tem os seguintes valores de perdas:

ATIVA (kW)	REATIVA (kVAr)
101.40970	37.83902

De forma a melhorar o perfil de tensão e reduzir as perdas, as capacitores móveis são considerados para serem instalados. Os grupos indicados para redução de perdas ativas e reativas são dados por:

PERDAS REATIVAS	PERDAS ATIVAS
338, 334, 279, 249, 248	5, 15, 47, 164, 208

Quanto às barras críticas sob o ponto de vista de estabilidade de tensão, identifica-se como: 1800, 1798, 1793, 1788, 1850.

Inicialmente, considera-se o capacitor de 800 kVAR instalado na Barra 5, que é a barra com menor nível de tensão, enquanto que as Barras 3 e 4 experimentam uma compensação de 400 kVAR cada. Os menores níveis de tensão são agora mostrados na Tabela II.

**Tabela II – Nível de Tensão para Compensação nas Barras 3, 4 e 5**

Bus	Voltage	Bus	Voltage	Bus	Voltage
1	0.94075	6	0.94137	11	0.94084
2	0.94073	7	0.94136	12	0.94082
3	0.94073	8	0.94136	13	0.94080
4	0.94073	9	0.94136	14	0.94077
5	0.94072	10	0.94135	15	0.94076

Para esta condição, as perdas são dadas por  $56.99965 + j30.69267$

Agora, o mesmo montante de compensação é aplicado às barras críticas. Desta vez, a Barra 1800 leva 800 kVAR, enquanto as Barras 1798 e 1793 recebem 400 kVAR cada. Os resultados são mostrados abaixo:

**Tabela III – Resultado para Compensação nas Barras Críticas**

Bus	Voltage	Bus	Voltage	Bus	Voltage
1	0.94806	6	0.94869	11	0.94816
2	0.94805	7	0.94869	12	0.94814
3	0.94805	8	0.94868	13	0.94812
4	0.94804	9	0.94868	14	0.94809
5	0.94804	10	0.94868	15	0.94808

Para esta condição as perdas são dadas por  $152.13280 + j 126.62380$

Note que para a condição acima que o nível de tensão é melhor, mas as perdas elétricas são maiores.

Para o terceiro caso, as barras indicadas para redução de perdas reativas são analisadas. A Barra 338 tem uma compensação indicada de 800 kVAR, enquanto 400 kVAR são alocados para as Barras 334 e 279, com resultados dados por:

**Tabela IV – Resultados para Compensação nas Barras Candidatas à Redução de Perdas Reativas**

Bus	Voltage	Bus	Voltage	Bus	Voltage
1	0.95276	6	0.95339	11	0.95286
2	0.95275	7	0.95339	12	0.95284
3	0.95274	8	0.95339	13	0.95282
4	0.95274	9	0.95338	14	0.95279
5	0.95273	10	0.95338	15	0.95277

Para esta condição as perdas são dadas por  $70.09954 + j 8.08826$

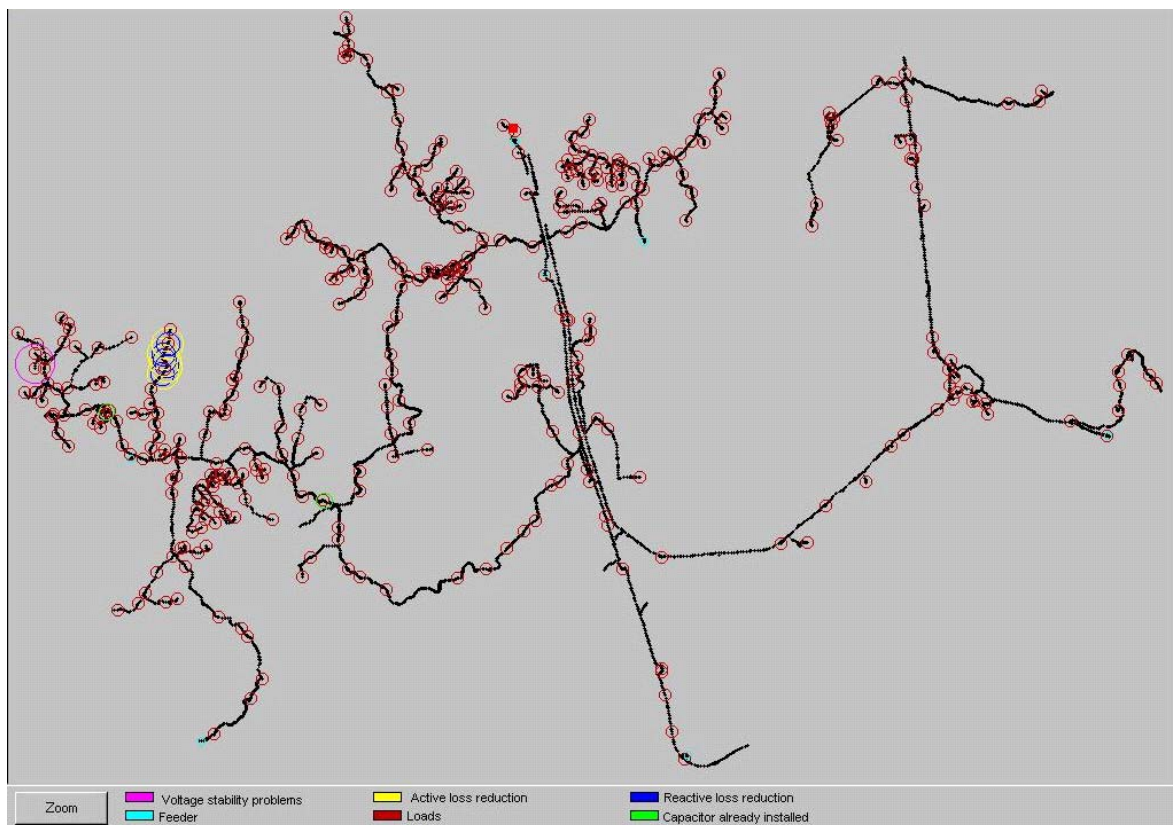
Finalmente, as barras recomendadas para redução de perdas ativas são consideradas. A Barra 5 tem 800 kVAR de compensação e as Barras 15 e 47, 400 kVAR cada. Os resultados são dados por:

**Tabela V – Resultados para Compensação nas Barras Candidatas à Redução de Perdas Ativas**

Bus	Voltage	Bus	Voltage	Bus	Voltage
1	0.95383	6	0.95444	11	0.95392
2	0.95382	7	0.95444	12	0.95391
3	0.95382	8	0.95444	13	0.95389
4	0.95381	9	0.95444	14	0.95386
5	0.95381	10	0.95443	15	0.95384

Para esta condição operativa as perdas são dadas por  $17.91149 + j 18.64537$

A Figura 1 mostra o diagrama do sistema real analisado. Note que a dimensão do sistema analisado mostra a robustez da metodologia empregada.



**Figura 1– Sistema de Distribuição Real**

## BIBLIOGRAFIA

- [1] TORRES, G.L. , **Nonlinear Optimal Power Flow by Interior and Non-Interior Point Methods**, PhD Thesis, Waterloo, Ontario, Canada, 1998.
- [2] PAPALEXOPOULOS, A. D., **Challenges to On-Line OPF Implementation**, IEEE Tutorial Course, 96 TP 111-0, 1996
- [3] PIKE, R.W., **Optimization for Engineering Systems**, CAP 2, pg 22-35, Van Nostrand Reinhold Company, NY, 1985
- [4] GRANVILLE, S., MELLO, J. C. O., MELO, A. C. G., **Application of Interior Point Method to Power Flow Unsolvability**, IEEE/PES Summer Meeting, paper No. 95 SM 599-1 PWRS, Portland, June 1995.
- [5] DOMMEL, H. W., TINNEY, W. F., **Optimal Power Flow Solutions**, IEEE Transactions on PAS, vol.87, pp. 1876-1886, 1968.
- [6] MONTICELLI, A., **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**, São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1983.
- [7] L. C. ARAUJO FERREIRA, A . C. ZAMBRONI DE SOUZA, S. GRANVILLE, J. W. MARANGON DE LIMA, **Interior Point Method Applied to Voltage Collapse Problems and Losses Reduction**, IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, Vol. 149, No. 2, March 2002, pp. 165-170.
- [8] KUNDUR, P., **General Introduction and Basic Concepts of Voltage Stability Analysis**, In: IEEE PES Summer Meeting, IEEE Special Tutorial Course: Voltage Stability, San Diego, 1998.
- [9] TAYLOR, C. W. et al., **Modelling of voltage collapse including dynamic phenomena**, CIGRE Task Force 38-02-10, 1992.
- [10] TAYLOR, C. W., **Power system voltage stability**. Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- [11] A. C. Zambroni de Souza, **Identifying a Vanishing Eigenvalue in Voltage Collapse Analysis with Limits Consideration**, IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, Vol. 148, No. 3, May 2001, pp. 263-267.
- [12] A . C. ZAMBRONI DE SOUZA, **DISCUSSION ON SOME VOLTAGE COLLAPSE INDICES**, **ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH**, VOL. 53, NO. 1, PP. 53-58, JANUARY 2000.