

TESE

94



ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

TESE DE MESTRADO



Análise de sensibilidade em sistemas de energia elétrica: aplicação na otimização de fontes de reativos.

Álvaro José Pessoa Ramos

Itajubá, dezembro de 1975

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

*Análise de Sensibilidade em Sistemas de
Energia Elétrica: Aplicação na otimização
de fontes de reativos.*

TESE DE MESTRADO



Alvaro José Pessoa Ramos

Aos meus pais

Agradecimentos:

- Ao Professor Homer Eliot Brown pela orientação e incentivos indispensáveis a elaboração deste trabalho.

- Ao Professor André Dias de Arruda Falcão Filho que nos transmitiu o entusiasmo e os fundamentos da matéria que apresentamos aqui.

- À secretária Rita Maria de Oliveira, pela eficiência e presteza em datilografar os manuscritos.

SINOPSE

O trabalho aqui apresentado trata da análise de sensibilidade aplicada a problemas em sistemas de energia elétrica.

Na Parte I são apresentados os conceitos e a formulação matemática que conduzem à definição da matriz de sensibilidade das variáveis representativas do estado do sistema com relação as variáveis de controle. Ainda são discutidas as limitações e aplicações em diversos problemas em sistemas de potência.

Na Parte II é realizada uma aplicação dos parâmetros de sensibilidade na otimização de fontes de reativos, em particular, capacitores estáticos. A solução fornece os locais e as magnitudes de bancos de capacitores capazes de satisfazerem as condições de tensões estabelecidas, com um custo total mínimo. Programação linear é a técnica de otimização utilizada.

Considerações sobre os erros cometidos devido a linearização das equações do sistema são apresentadas.

Vários exemplos numéricos utilizando 2 sistemas ilustram a aplicação do método.

. P A R T E I

P A R T E I

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE
EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVO GERAL	11
1.2. CONSIDERAÇÃO DAS UNIDADES	11
1.3. SIMBOLOGIA, SIGLAS, FÓRMULAS E NOTACIÃO	11
1.4. INDICADORES, CONSIDERAÇÕES	11
2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	12
2.1. FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	12
2.2. MÉTODOS DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	12
2.3. EXEMPLO ILUSTRATIVO	12
3. CONCLUSÃO FINAL	12

P A R T E I

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE
EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

INDICE

1.	INTRODUÇÃO -----	01
2.	MODELO MATEMÁTICO -----	03
2.1.	Classificação das variáveis -----	03
2.2.	Sensibilidade. Conceito. Formu- lação Matemática -----	05
2.2.1.	Introdução. Conceito -----	05
2.2.2.	Sensibilidade em Sistemas- de Energia Elétrica -----	06
2.3.	Cálculo de $J\vec{x}$ e $J\vec{u}$ -----	10
2.3.1.	Formação de $J\vec{x}$ e $J\vec{u}$ -----	10
2.3.2.	Cálculo dos elementos de $J\vec{x}$ e $J\vec{u}$ --	11
3.	EXEMPLO ILUSTRATIVO -----	20
4.	COMENTÁRIOS FINAIS -----	23



1. INTRODUÇÃO

A utilização da análise de sensibilidade na resolução de problemas em sistemas de energia elétrica é relativamente recente. A primeira publicação sobre o assunto, com aplicação em sistemas de potência, data de 1967, apresentado no PICA e, posteriormente publicado na revista TRANS-PAS do IEEE [6].

O conhecimento das relações de sensibilidade de um sistema, permite determinar quais variações, e em que parâmetros, serão as mais efetivas para produzir um desejado efeito no estado do sistema. Desta forma, vários tipos de sensibilidade podem então ser definidos, relacionando as variáveis de interesse do problema.

Em sistemas de potência, a análise de sensibilidade constitui-se uma ferramenta muito útil na resolução de problemas em diversas áreas de estudo. Aplicações diversas têm sido feitas em problemas de despacho econômico [6], controle de tensão [5] e otimização [9].

A determinação dos parâmetros de sensibilidade tem com hipótese básica a linearidade do sistema. Entretanto, como sabemos, as equações dos sistemas de potência não são lineares, o que pode pôr em dúvida a validade dos resultados obtidos. Assim, restrições deverão ser feitas, uma vez que nossos resultados só serão representativos em problemas que envolvem pequenas variações em torno do ponto de operação.

Uma outra dificuldade que surge, mas que pode ser facilmente contornada, é o cálculo dos próprios parâmetros de sensibilidade, apresentados em forma de matriz (ma

triz sensibilidade). A determinação da matriz sensibilidade requer a inversão do Jacobiano $J\vec{x}$ do sistema com relação ao estado, de ordem $2N$, sendo N o número de barras do sistema. Sendo, porém, $J\vec{x}$ muito esparsa, é possível utilizar técnicas de programação adequadas que reduzem consideravelmente, tempo de computação e memória necessários. [5], [28].

2. MODELO MATEMÁTICO

2.1. Classificação das variáveis

Por simplicidade, principalmente nos problemas ligados a controle em sistemas de potência e despacho econômico, costuma-se classificar as variáveis que definem a condição operacional do sistema em 3 grupos:

- as variáveis de controle ou operacionais, designadas pelo vetor \vec{U} ;
- as variáveis de estado ou dependentes, referidas pelo vetor \vec{X} e
- as variáveis de distúrbio ou perturbação, representadas pelo vetor \vec{P} .

Constituem o primeiro grupo, aquelas variáveis sobre as quais podemos exercer controle, visando manter o estado do sistema dentro de faixas adequadas à operação e previamente estabelecidas, corrigindo em parte ou totalmente, os efeitos de variações normais ou anormais no estado operacional do sistema.

Quais as variáveis que classificamos como operacionais, depende essencialmente do problema em questão, que definirá quais são as disponibilidades de controle existentes no sistema real. Estas são de maneira geral, as potências ativas e reativas geradas nas barras, a potência reativa injetada no sistema através de capacitores e/ou reatores (normais ou saturados) e a posição dos comutadores de "tap" em carga dos transformadores (LTC) ou reguladores série.

O vetor designativo das variáveis operacionais

\vec{U} , tem dimensão M, sendo dado por:

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_M \end{bmatrix}$$

As variáveis de estado ou dependentes (ou ainda controláveis), referidas pelo vetor \vec{X} , são aquelas que desejamos controlar, e, quais grandezas fazem parte deste grupo é também uma questão de como cada problema particular é definido. Entretanto, poderíamos dizer que normalmente são aquelas variáveis incógnitas nos estudos de fluxo de potência, tais como tensões (ângulo e módulo) das barras de carga, potência reativa e ângulo de tensão nas barras de tensão controlada, potências ativas e reativas geradas na barra de *swing* ou ainda fluxo de potência em determinadas linhas do sistema.

Observemos ainda que, a definição da natureza de uma barra, questão que está vinculada a cada problema específico, caracteriza, de certo modo quais as grandezas associadas a esta barra que fazem parte do grupo das variáveis de estado, de controle ou do terceiro grupo que comentaremos a seguir.

As variáveis de perturbação ou distúrbio são aquelas, que são especificadas de antemão e, sobre as quais não temos nenhum poder de controle. Estas são, evidentemente, as potências ativas e reativas solicitadas pelos consumidores, cujos valores são, em princípio, totalmente aleatórios. São representadas pelo vetor \vec{P} .

2.2. Sensibilidade. Conceito. Formulação Matemática

2.2.1. Introdução. Conceito

O conceito de sensibilidade é geral. Em um sistema de natureza qualquer, representado matematicamente por um conjunto de variáveis independentes \vec{Y} e um conjunto de variáveis dependentes \vec{X} , poderíamos definir, a sensibilidade do sistema, para uma certa condição de operação, (\vec{X}^0, \vec{Y}^0) , como a relação entre uma certa variação ocorrida em \vec{X} , devido a uma pequena variação em \vec{Y} , por esta variação em \vec{Y} , ou seja:

$$S_{ij} = \left. \frac{\Delta X_i}{\Delta Y_j} \right|_{(\vec{X}^0, \vec{Y}^0)}$$

onde i e j variam da unidade até a dimensão de X e Y respectivamente.

A matriz sensibilidade S , de ordem (dimensão de X x dimensão de Y), constituída dos elementos S_{ij} acima definidos, medirá os efeitos que variações nas variáveis Y provocam nos valores de X , isto é, nos dará uma idéia quantitativa de como \vec{X} é sensível à variações de \vec{Y} .

Em sistemas de energia elétrica, o conceito de sensibilidade é uma ferramenta muito útil na resolução de vários problemas nas áreas de otimização, controle e despacho.

No parágrafo seguinte desenvolveremos as equações que conduzirão à definição da matriz sensibilidade das variáveis de estado em relação às variáveis de controle e de distúrbio.

2.2.2. Sensibilidade em Sistemas de Energia Elétrica

O comportamento de um sistema de potência, em estado permanente simétrico é perfeitamente representado por um conjunto de $2N$ equações reais.

Este conjunto de equações na forma vetorial é representado por:

$$\vec{f}(\vec{X}, \vec{U}, \vec{P}) = 0 \quad (2.1)$$

Suponhamos que a condição operacional inicial (referida por "0") seja ligeiramente alterada pela operação de dispositivos de controle e/ou variações normais nas variáveis de distúrbio de um valor $\Delta\vec{U}$ e $\Delta\vec{P}$ respectivamente. Ocorrendo um novo estado permanente, teremos:

$$\vec{f}(\vec{X}^0 + \Delta\vec{X}, \vec{U}^0 + \Delta\vec{U}, \vec{P}^0 + \Delta\vec{P}) = 0 \quad (2.2)$$

A equação (2.1) escrita em forma de componentes fica:

$$f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, u_1^0, u_2^0, \dots, p_1^0, p_2^0, \dots) = 0$$

$$i = 1, \dots, 2N$$

Após as variações $\Delta\vec{X}$, $\Delta\vec{U}$ e $\Delta\vec{P}$ teremos:

$$f_i(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, u_1^0 + \Delta u_1, u_2^0 + \Delta u_2, \dots, p_1^0 +$$

$$+\Delta p_1, p_2^0 + \Delta p_2, \dots) = 0$$

Desenvolvendo as $2N$ equações acima em série de Taylor, em torno do estado inicial vem:

$$\begin{aligned} f_i(x_1^0 + \Delta x_1, x_2^0 + \Delta x_2, \dots, u_1^0 + \Delta u_1, u_2^0 + \Delta u_2, \dots, p_1^0 + \\ + \Delta p_1, p_2^0 + \Delta p_2, \dots) = f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, u_1^0, u_2^0, \dots, p_1^0, p_2^0, \dots) + \\ + \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \frac{\partial f_i}{\partial u_2} \Delta u_2 + \dots + \\ + \frac{\partial f_i}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial f_i}{\partial p_2} \Delta p_2 + \dots + \text{termos de ordem superior. (2.3)} \end{aligned}$$

Se $\Delta \vec{U}$ e $\Delta \vec{P}$ são suficientemente pequenos, então $\Delta \vec{X}$ também, normalmente, o será. Assim podemos, sem cometer grandes erros de precisão (ver $\neq 3.5$), desprezar os termos de grau superior a um.

Tendo em vista (2.1) e (2.2), (2.3) fica:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial u_1} \Delta u_1 + \frac{\partial f_i}{\partial u_2} \Delta u_2 + \dots + \\ + \frac{\partial f_i}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial f_i}{\partial p_2} \Delta p_2 + \dots = 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

A equação (2.4) escrita para as $2N$ funções f conduz a um sistema linear que pode ser escrito na forma matricial como:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{2N}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_{2N}}{\partial x_1} & \frac{\partial f_{2N}}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_{2N}}{\partial x_{2N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \dots \\ \Delta x_{2N} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \frac{\partial f_1}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_{2N}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_{2N}}{\partial u_1} & \frac{\partial f_{2N}}{\partial u_2} & \dots & \frac{\partial f_{2N}}{\partial u_{2N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \dots \\ \Delta u_{2N} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial p_1} & \frac{\partial f_1}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial p_{2N}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_{2N}}{\partial p_1} & \frac{\partial f_{2N}}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial f_{2N}}{\partial p_{2N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \dots \\ \Delta p_{2N} \end{bmatrix} = 0$$

Observa-se que os coeficientes dos vetores $\Delta \vec{x}$, $\Delta \vec{u}$ e $\Delta \vec{p}$ na equação acima são os Jacobianos do conjunto de funções f em relação ao conjunto das variáveis componentes dos vetores $\Delta \vec{x}$, $\Delta \vec{u}$ e $\Delta \vec{p}$. Chamando estas matrizes de $J_{\vec{x}}$, $J_{\vec{u}}$ e $J_{\vec{p}}$ vem:

$$J_{\vec{x}} \Delta \vec{x} + J_{\vec{u}} \Delta \vec{u} + J_{\vec{p}} \Delta \vec{p} = 0$$

Premultiplicando por $J_{\vec{x}}^{-1}$ e arrumando convenientemente:

$$\Delta \vec{x} = -J_{\vec{x}}^{-1} J_{\vec{u}} \Delta \vec{u} - J_{\vec{x}}^{-1} J_{\vec{p}} \Delta \vec{p}$$

Fazendo:

$$S_{\vec{u}} = -J_{\vec{x}}^{-1} J_{\vec{u}}$$

$$S_{\vec{p}} = -J_{\vec{x}}^{-1} J_{\vec{p}}$$

Obtemos:

$$\Delta \vec{x} = S_{\vec{u}} \Delta \vec{u} + S_{\vec{p}} \Delta \vec{p} \tag{2,5}$$

onde \vec{S}_u e \vec{S}_p são as matrizes de sensibilidade do estado com relação as variáveis operacionais \vec{U} e de distúrbio \vec{P} . Em forma matricial (2.5) é escrita como:

$$\begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta X_{2N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{u_{1,1}} & S_{u_{1,2}} & \dots & S_{u_{1,M}} \\ S_{u_{2,1}} & S_{u_{2,2}} & \dots & S_{u_{2,M}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{u_{2N,1}} & S_{u_{2N,2}} & \dots & S_{u_{2N,M}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta U_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{p_{1,1}} & S_{p_{1,2}} & \dots & S_{p_{1,2N}} \\ S_{p_{2,1}} & S_{p_{2,2}} & \dots & S_{p_{2,2N}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{p_{2N,1}} & S_{p_{2N,2}} & \dots & S_{p_{2N,2N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta P_{2N} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Algum comentário a respeito da dimensão e da ordem dos valores e matrizes da equação (2.6) deve, neste ponto, ser feito.

A matriz S_u de um modo geral é quadrada de ordem $(2N \times 2N)$ e o vetor ΔU de dimensão $2N$. Isto significa que, para qualquer barra, independentemente da sua natureza, temos sempre associadas 2 variáveis operacionais, podendo ser a potência ativa ou reativa gerada, a potência reativa devido a capacitores ou reatores, a posição do LTC que controla a tensão na barra, ou qualquer outra variável ligada a um dispositivo de controle. Se entretanto, fixamos o valor de uma variável operacional U_i a priori, isto é, não há recursos para fa-

zer variar U_i , então:

$$U_i = \text{constante}$$

$$\Delta U_i = 0$$

U_i sendo um valor fixo igual ou diferente de zero.

Desta forma, \vec{S}_u será:

$$\vec{S}_u = \vec{J}_x^{-1} \vec{J}_u = \begin{bmatrix} S_{u_{1,1}} & S_{u_{1,2}} & \dots & S_{u_{1,i}} & \dots & S_{u_{1,2N}} \\ S_{u_{2,1}} & S_{u_{2,2}} & \dots & S_{u_{2,i}} & \dots & S_{u_{2,2N}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{u_{2N,1}} & S_{u_{2N,2}} & \dots & S_{u_{2N,i}} & \dots & S_{u_{2N,2N}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \dots \\ \Delta U_i = 0 \\ \dots \\ \Delta U_{2N} \end{bmatrix}$$

(2.7)

O fato de $\Delta U_i = 0$ implica que a coluna i de \vec{S}_u pode ser removida juntamente com ΔU_i de $\vec{\Delta u}$, que é nulo. Se apenas M , das $2N$ variáveis de controle são possíveis de variar, realizando a sua função de controle, então $2N-M$ elementos de $\vec{\Delta u}$ serão nulos pois os valores de \vec{u} são constante (ou nulos). Desta forma, $2N-M$ colunas de \vec{S}_u poderão ser removidas, acontecendo o mesmo com $2N-M$ linhas de $\vec{\Delta u}$. Restarão M colunas em \vec{S}_u , sendo sua ordem consequentemente $(2N \times M)$, onde M é o número de variáveis de controle que poderão, efetivamente, atuar com este objetivo. O nome *variáveis de controle* será, doravante usado neste trabalho, para designar todas as variáveis que sejam classificadas neste grupo. O uso do termo *variáveis operacionais* será restringido para aquelas variáveis de controle em que, associadas a estas, existem dispositivos capazes de exer-

cer este controle em um problema particular. Assim, o termo 'variáveis operacionais' está ligado a recursos reais de regulação existente no sistema em que se está trabalhando, dos quais se pode fazer uso, desde que os seus limites operacionais não sejam violados.

Por fim, se não ocorrerem variações nas variáveis \vec{P} , isto é, a condição operacional é modificada apenas devido a atuação de dispositivos de controle, então:

$$\Delta \vec{P} = 0$$

A equação (2.6) ficará:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta x_{2N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{u_{1,1}} & S_{u_{1,2}} & \dots & S_{u_{1,M}} \\ S_{u_{2,1}} & S_{u_{2,2}} & \dots & S_{u_{2,M}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{u_{2N,1}} & S_{u_{2N,2}} & \dots & S_{u_{2N,M}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta U_M \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

2.3. Cálculo de $J_{\vec{x}}$ e $J_{\vec{u}}$

2.3.1. Formação de $J_{\vec{x}}$ e $J_{\vec{u}}$

As matrizes J_x e J_u como vimos, são constituídas das derivadas do conjunto de funções f em relação as componentes de \vec{X} e \vec{U} , calculadas no ponto de operação, em torno do qual as variações representadas por $\Delta \vec{X}$, e $\Delta \vec{U}$ ocorrem.

A definição das grandezas que compõem os vetores \vec{X} e \vec{U} depende de cada problema.

As componentes de \vec{X} são aquelas variáveis que

deseja-se controlar e que, de modo geral, correspondem as in cõgnitas nos estudo de fluxo de potênica. Os elementos de \vec{U} são aquelas variáveis que representam os meios de controlar , ou manter o estado do sistema dentro de limites desejados.

No parágrafo seguinte, estabeleceremos as equações utilizadas para o cálculo das derivadas de \vec{f} em relação as grandezas de barra, que formam $J_{\vec{x}}$ e $J_{\vec{u}}$. Assim montar as matrizes $J_{\vec{x}}$ e $J_{\vec{u}}$ consiste apenas em escolher as expressões apropriadas conforme a definição prévia dos elementos dos ve tores \vec{x} e \vec{u} .

2.3.2. Cálculo dos elementos de $J_{\vec{x}}$ e $J_{\vec{u}}$

a)- Equações de fluxo

A corrente líquida injetada numa barra K do sistema é dada por:

$$\bar{I}_K = \sum_{m=1}^N Y_{Km} \bar{E}_m$$

onde Y_{Km} - elemento da matriz Y do sistema representando a conexão entre as barras K e m.

\bar{E}_m - tensão na barra m.

N -- número de barras do sistema

O símbolo " - " acima da letra denota fasor, e " * ", conjugado.

Em termos de potências

$$S_K = P_K + jQ_K = \bar{E}_K \bar{I}_K^* = \bar{E}_K \sum_{m=1}^N Y_{Km}^* \bar{E}_m^*$$

Expressando Y_{Km} na forma retangular e \bar{E}_m em polar:

$$Y_{Km}^* = G_{Km} - jB_{Km}$$

$$\bar{E}_K = E_k e^{j\delta_K}$$

$$\bar{E}_m^* = E_m e^{-j\delta_m}$$

Assim:

$$\begin{aligned} P_K + jQ_K &= \sum_{m=1}^N \left[E_K E_m e^{j(\delta_K - \delta_m)} (G_{Km} - jB_{Km}) \right] \\ &= \sum_{m=1}^N \left[E_K E_m \cos(\delta_K - \delta_m) + jE_K E_m \sin(\delta_K - \delta_m) \right] (G_{Km} - jB_{Km}) \\ &= \sum_{m=1}^N \left\{ E_K E_m \left[G_{Km} \cos(\delta_K - \delta_m) + B_{Km} \sin(\delta_K - \delta_m) \right] + \right. \\ &\quad \left. + jE_K E_m \left[G_{Km} \sin(\delta_K - \delta_m) - B_{Km} \cos(\delta_K - \delta_m) \right] \right\} \quad (2.9) \end{aligned}$$

Da equação complexa (2.9) obtemos 2 reais, que representam o balanço de potência ativa e reativa nas barras.

$$f_{2K-1} = -P_K + \sum_{m=1}^N E_K E_m \left[G_{Km} \cos(\delta_K - \delta_m) + B_{Km} \sin(\delta_K - \delta_m) \right] = 0$$

$$f_{2K} = -Q_K + \sum_{m=1}^N E_K E_m \left[G_{Km} \sin(\delta_K - \delta_m) - B_{Km} \cos(\delta_K - \delta_m) \right] = 0$$

Mas

$$P_K = P_{GK} - P_{DK}$$

$$Q_K = Q_{GK} - Q_{DK}$$

sendo P_{GK} , Q_{GK} - potências ativas e reativas geradas na barra K.

P_{DK} , Q_{DK} - potências ativas e reativas solicitadas pela carga.

$$f_{2K-1} = P_{DK} - P_{GK} + \sum_{m=1}^N E_K E_m \left[G_{Km} \cos(\delta_K - \delta_m) + B_{Km} \sin(\delta_K - \delta_m) \right] = 0 \quad (2.10)$$

$$f_{2K} = Q_{DK} - Q_{GK} + \sum_{m=1}^N E_K E_m \left[G_{Km} \sin(\delta_K - \delta_m) - B_{Km} \cos(\delta_K - \delta_m) \right] = 0 \quad (2.11)$$

As funções f são indexadas convenientemente com os números ímpares $(2K-1)$ para as equações de balanço de potência ativa e os pares $2K$ para as de potência reativa. O valor de K é o número da barra em relação a qual estas equações se referem.

Conhecidas as funções "f", a determinação dos elementos de \vec{J}_x e \vec{J}_u reduz-se a derivar estas em relação as variáveis.

b)- Termos do tipo $\partial f / \partial \delta$

Tomando a derivada de (2.10) e (2.11) em relação a δ temos:

- para $K \neq m$

$$\frac{\partial f_{2K-1}}{\partial \delta_m} = E_K E_m \left[G_{Km} \sin(\delta_K - \delta_m) - B_{Km} \cos(\delta_K - \delta_m) \right] \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial f_{2K}}{\partial \delta_m} = -E_K E_m \left[G_{Km} \cos(\delta_K - \delta_m) + B_{Km} \sin(\delta_K - \delta_m) \right] \quad (2.13)$$

- para $K = m$

$$\frac{\partial f_{2K-1}}{\partial \delta_K} = Q_{DK} - Q_{GK} - B_{KK} E_K^2 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial f_{2K}}{\partial \delta_K} = P_{GK} - P_{DK} - G_{KK} E_K^2 \quad (2.15)$$

As equações (2.14) e (2.15) são obtidas com ma nipulações algébricas após ter sido tomada as derivadas.

c) - Termos do tipo $\delta f / \delta V$

- para $K \neq m$

$$\frac{\partial f_{2K-1}}{\partial E_m} = E_K \left[G_{Km} \cos(\delta_K - \delta_m) + B_{Km} \sin(\delta_K - \delta_m) \right] \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial f_{2K}}{\partial E_m} = E_K \left[G_{Km} \sin(\delta_K - \delta_m) - B_{Km} \cos(\delta_K - \delta_m) \right] \quad (2.17)$$

- para $K = m$

$$\frac{\partial f_{2K-1}}{\partial E_K} = \frac{\partial P_{DK}}{\partial E_K} + \frac{P_{GK} - P_{DK}}{E_K} + G_{KK} E_K \quad (2.18)$$

Na determinação de (2.18) foi considerado

$$\frac{\partial P_{GK}}{\partial E_K} = 0$$

o que é fisicamente coerente. O termo

$$\frac{\partial P_{DK}}{\partial E_K}$$

entretanto, merece uma análise mais cuidadosa para se decidir em despezá-la ou não. Este, como sabemos é uma característica da carga e sua determinação exige um conhecimento da natureza das cargas simples que compõem o total e das proporções que cada tipo representa em relação ao conjunto. A referência [30] apresenta como determinar $\delta P_D / \delta E$ bem como $\delta Q_D / \delta E$ para uma carga em que se conhece os tipos de carga simples constituintes.

Analogamente:

$$\frac{\partial f_{2K}}{\partial E_K} = \frac{\partial Q_{DK}}{\partial E_K} + \frac{Q_{GK} - Q_{DK}}{E_K} - B_{KK} E_K \quad (2.19)$$

As mesmas considerações feitas para $\partial P_D / \partial E$ são válidas para $\partial Q_D / \partial E$.

d)- Termos do tipo $\partial f / \partial P$, $\partial f / \partial Q$

Da observação de (2.10) e (2.11) verifica-se facilmente que:

$$e \quad \frac{\partial f_{2K}}{\partial Q_{Dm}} = \frac{\partial f_{2K-1}}{\partial P_{Dm}} = \begin{cases} 0 & K \neq m \\ 1 & K = m \end{cases}$$

$$e \quad \frac{\partial f_{2K}}{\partial Q_{Gm}} = \frac{\partial f_{2K-1}}{\partial P_{Gm}} = \begin{cases} 0 & K \neq m \\ -1 & K = m \end{cases}$$

Além disto:

$$\frac{\partial f_{2K-1}}{\partial Q_{Gm}} = \frac{\partial f_{2K-1}}{\partial Q_{Dm}} = 0$$

$$\frac{\partial f_{2K}}{\partial P_{Gm}} = \frac{\partial f_{2K}}{\partial P_{Dm}} = 0$$

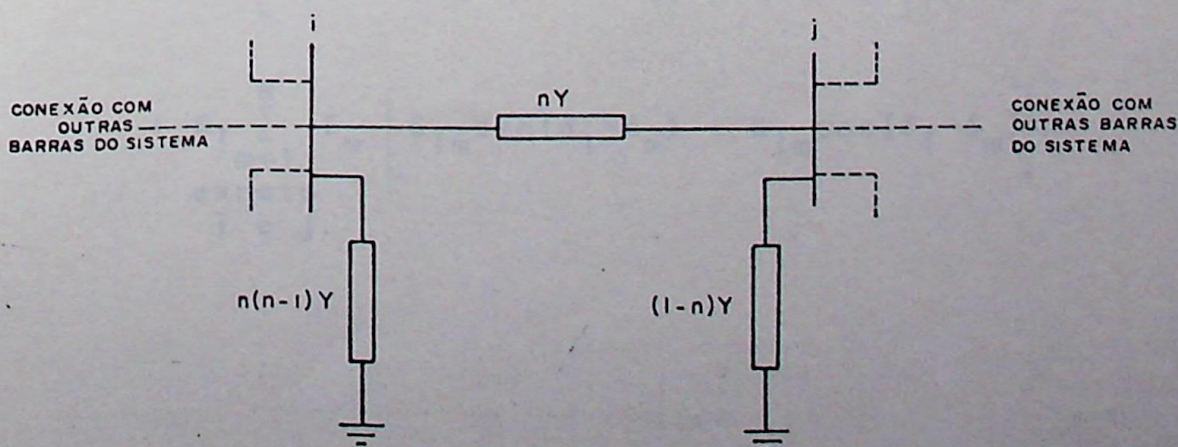
Ou de maneira resumida, todas estas equações podem ser escritas como:

$$\frac{\partial f_i}{\partial u_j} = \begin{matrix} 0 & i \neq j \\ -1 & i = j \end{matrix} \quad (2.20)$$

e)- Termos do tipo $\partial f / \partial n$

A comutação em carga ou, a simples mudança de *tap* de transformadores, constitui um dispositivo de controle largamente utilizado nos sistemas elétricos. Assim, em problemas de controle de tensão e fluxo de potência reativa, a variável n , representativa da posição do *tap* ou LTC de um transformador, faz parte do grupo das variáveis de controle \vec{U} . Aparecerão conseqüentemente, termos do tipo $\partial f / \partial n$ na matriz \vec{J}_U . As expressões para o cálculo destes elementos é objetivo deste parágrafo.

Consideremos um transformador conectado em as barras i e j . O circuito equivalente está mostrado na figura ao lado, onde $Y = G + jB$ é a admitância de dispersão do transformador.



As equações (2.10) e (2.11) escritas para a barra i ficam:

$$f_{2i-1} = P_{Di} - P_{Gi} + E_i \sum_{m=1}^N E_m \left[G_{im} \cos(\delta_i - \delta_m) + B_{im} \sin(\delta_i - \delta_m) \right] \quad (2.21)$$

$$f_{2i} = Q_{Di} - Q_{Gi} + E_i \sum_{m=1}^N \left[G_{im} \sin(\delta_i - \delta_m) - B_{im} \cos(\delta_i - \delta_m) \right] \quad (2.22)$$

Separando as parcelas do somatório relativo às barras i e j vem:

$$f_{2i-1} = P_{Di} - P_{Gi} + E_i E_j \left[G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \right] + E_i^2 \left[G_{ii} \cos(\delta_i - \delta_i) + B_{ii} \sin(\delta_i - \delta_i) \right] + E_i \sum_{m=1}^N E_m \left[G_{im} \cos(\delta_i - \delta_m) + B_{im} \sin(\delta_i - \delta_m) \right] \quad (2.23)$$

exceto
 i e j

$$f_{2i} = Q_{Di} - Q_{Gi} + E_i E_j \left[G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \right] + E_i^2 \left[G_{ii} \sin(\delta_i - \delta_i) - B_{ii} \cos(\delta_i - \delta_i) \right] + E_i \sum_{m=1}^N E_m \left[G_{im} \sin(\delta_i - \delta_m) - B_{im} \cos(\delta_i - \delta_m) \right] \quad (2.24)$$

exceto
 i e j

$$\begin{aligned} \text{Mas, } G_{ii} &= n^2 G + G'_{ii} \\ B_{ii} &= n^2 B + B'_{ii} \end{aligned} \quad (2.25)$$

onde $G'_{ii} + jB'_{ii}$ é a parte da admitância própria da barra devido às conexões com outras barras do sistema;

$n^2 G$ é a parcela de G_{ii} tendo em vista a ligação com j e o ramo $n(n-1)Y$ para terra.

Além disto:

$$\begin{aligned} G_{ij} &= -nG \\ B_{ij} &= -nB \end{aligned} \quad (2.26)$$

Levando (2.25) e (2.26) em (2.23) e (2.24) e derivando com relação a n vem:

$$\frac{\partial f_{2i-1}}{\partial n} = E_i E_j \left[-G \cos(\delta_i - \delta_j) - B \sin(\delta_i - \delta_j) \right] + 2E_i^2 n G$$

$$\frac{\partial f_{2i}}{\partial n} = E_i E_j \left[-G \sin(\delta_i - \delta_j) + B \cos(\delta_i - \delta_j) \right] - 2E_i^2 n B$$

Levando (2.26) nestas duas últimas expressões vem:

$$\frac{\partial f_{2i-1}}{\partial n} = E_i E_j \left[\frac{G_{ij}}{n} \cos(\delta_i - \delta_j) + \frac{B_{ij}}{n} \sin(\delta_i - \delta_j) \right] - 2E_i^2 G_{ij} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial f_{2i}}{\partial n} = E_i E_j \left[\frac{G_{ij}}{n} \sin(\delta_i - \delta_j) - \frac{B_{ij}}{n} \cos(\delta_i - \delta_j) \right] + 2E_i^2 B_{ij} \quad (2.28)$$

Procedendo análogamente, teremos com relação a barra j:

$$\frac{\partial f_{2j-1}}{\partial n} = E_i E_j \left[\frac{G_{ij}}{n} \cos(\delta_i - \delta_j) - \frac{B_{ij}}{n} \operatorname{sen}(\delta_i - \delta_j) \right] \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial f_{2j}}{\partial n} = E_i E_j \left[-\frac{G_{ij}}{n} \operatorname{sen}(\delta_i - \delta_j) - \frac{B_{ij}}{n} \cos(\delta_i - \delta_j) \right] \quad (2.30)$$

Para qualquer outra barra K do sistema, isto é $K \neq i$ e $K \neq j$, têm-se:

$$\frac{\partial f_{2K-1}}{\partial n} = 0$$

$$\frac{\partial f_{2K}}{\partial n} = 0$$

3. EXEMPLO ILUSTRATIVO

Vimos nos parágrafos anteriores que a definição das variáveis de controle e de estado, dependia de como cada problema particular era formulado. Definidos então, os grupos de variáveis, determinar $J_{\vec{x}}$ e $J_{\vec{u}}$ consiste simplesmente em tomar as derivadas parciais de \vec{f} com relação às variáveis de estado e controle respectivamente, calculadas no ponto de operação, em torno do qual, a análise está sendo feita. Resta então, utilizar as correspondentes equações apresentadas no parágrafo anterior.

Para um exemplo ilustrativo tomaremos o sistema da Figura 5 (Ward/Hale) [31].

Para cada barra do sistema serão definidas 2 variáveis de estado num total de $2N$ ($2N=12$). Poderíamos também definir $2N$ variáveis de controle. Porém, supondo que, para apenas M destas variáveis existem recursos para controle, isto é, não temos condições de fazer variar as $2N-M$ variáveis restantes ($\Delta U = 0$ para estas), então $J_{\vec{u}}$ será uma matriz retangular de ordem ($2N \times M$).

Formularemos o problema conforme o quadro abaixo:

Barra	Variáveis	
	estado	controle
1	PG_1, QG_1	E_1
2	δ_2, QG_2	E_2
3	δ_3, E_3	-
4	δ_4, E_4	QG_4
5	δ_5, E_5	$n_{5,6}^{(*)}$
6	δ_6, E_6	QG_6

(*) $n_{5,6}$ - representa o *tap* do transformador que liga a barra 5 à 6.

Isto significa que devemos controlar \vec{x} , variando apenas aquelas variáveis que constituem o vetor \vec{U} .

Será útil, neste ponto, os seguintes comentários:

- a)- a matriz sensibilidade que será obtida neste exemplo, nos informará o quanto as grandezas de \vec{x} serão afetadas por variações em \vec{U} . Assim, seremos capazes de determinar em quais variáveis e em que intensidade deveremos fazer variar \vec{U} para obtermos um desejado efeito em \vec{x} . Existem, evidentemente, inúmeras maneiras de obter-se um determinado efeito em \vec{x} , sendo um problema muito frequente, a escolha da melhor, segundo um certo critério;
- b)- nas aplicações em despacho econômico, deverão constar do vetor \vec{x} , os custos operacionais, e de \vec{U} , as potências ativas de carga e geração do sistema;
- c)- na verdade, a ordem máxima de $J_{\vec{U}}$ é $2N \times (2N-1)$ tendo em vista a necessidade de se ter um ângulo de tensão fixo, em relação ao qual todos os demais são referidos, isto é, sempre teremos $\Delta\delta_1 = 0$ (da barra 1, por exemplo)

Conforme nossa definição, então:

$$\left[\vec{X} \right]^T = \left[PG_1 \quad QG_1 \quad \delta_2 \quad QG_2 \quad \delta_3 \quad E_3 \quad \delta_4 \quad E_4 \quad \delta_5 \quad E_5 \quad \delta_6 \quad E_6 \right]$$

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ QG_4 \\ n_{5,6} \\ QG_6 \end{bmatrix}$$

Da equação (2.7):

$$\Delta \vec{X} = -J_{\vec{X}}^{-1} J_{\vec{U}} \Delta \vec{U} = S_{\vec{U}} \Delta \vec{U} \quad (2.3f.)$$

sendo $S_{\vec{U}}$, para o exemplo em particular, de ordem (12x5).

As estruturas das matrizes $J_{\vec{X}}$ e $J_{\vec{U}}$ estão mostradas abaixo de maneira ilustrativa. Observemos que $J_{\vec{X}}$ é bastante esparsa, e mais ainda $J_{\vec{U}}$.

f*	b →	1	2	3	4	5	6				
f1	1	$\frac{\partial f1}{\partial PG_1}$			$\frac{\partial f1}{\partial \delta_4}$	$\frac{\partial f1}{\partial E_4}$	$\frac{\partial f1}{\partial \delta_6}$	$\frac{\partial f1}{\partial E_6}$			
f2		$\frac{\partial f2}{\partial QG_1}$			$\frac{\partial f2}{\partial \delta_4}$	$\frac{\partial f2}{\partial E_4}$	$\frac{\partial f2}{\partial \delta_6}$	$\frac{\partial f2}{\partial E_6}$			
f3	2		$\frac{\partial f3}{\partial \delta_2}$	$\frac{\partial f3}{\partial \delta_3}$	$\frac{\partial f3}{\partial E_3}$	$\frac{\partial f3}{\partial \delta_5}$	$\frac{\partial f3}{\partial E_5}$				
f4			$\frac{\partial f4}{\partial \delta_2}$	$\frac{\partial f4}{\partial E_2}$	$\frac{\partial f4}{\partial \delta_3}$	$\frac{\partial f4}{\partial E_3}$	$\frac{\partial f4}{\partial \delta_5}$	$\frac{\partial f4}{\partial E_5}$			
f5	3		$\frac{\partial f5}{\partial \delta_2}$	$\frac{\partial f5}{\partial \delta_3}$	$\frac{\partial f5}{\partial E_3}$	$\frac{\partial f5}{\partial \delta_4}$	$\frac{\partial f5}{\partial E_4}$				
f6			$\frac{\partial f6}{\partial \delta_2}$	$\frac{\partial f6}{\partial \delta_3}$	$\frac{\partial f6}{\partial E_3}$	$\frac{\partial f6}{\partial \delta_4}$	$\frac{\partial f6}{\partial E_4}$				
f7	4			$\frac{\partial f7}{\partial \delta_3}$	$\frac{\partial f7}{\partial E_3}$	$\frac{\partial f7}{\partial \delta_4}$	$\frac{\partial f7}{\partial E_4}$	$\frac{\partial f7}{\partial \delta_6}$	$\frac{\partial f7}{\partial E_6}$		
f8					$\frac{\partial f8}{\partial \delta_3}$	$\frac{\partial f8}{\partial E_3}$	$\frac{\partial f8}{\partial \delta_4}$	$\frac{\partial f8}{\partial E_4}$	$\frac{\partial f8}{\partial \delta_6}$	$\frac{\partial f8}{\partial E_6}$	
f9	5		$\frac{\partial f9}{\partial \delta_2}$			$\frac{\partial f9}{\partial \delta_5}$	$\frac{\partial f9}{\partial E_5}$	$\frac{\partial f9}{\partial \delta_6}$	$\frac{\partial f9}{\partial E_6}$		
f10			$\frac{\partial f10}{\partial \delta_2}$				$\frac{\partial f10}{\partial \delta_5}$	$\frac{\partial f10}{\partial \delta E_5}$	$\frac{\partial f10}{\partial \delta_6}$	$\frac{\partial f10}{\partial E_6}$	
f11	6					$\frac{\partial f11}{\partial \delta_4}$	$\frac{\partial f11}{\partial E_4}$	$\frac{\partial f11}{\partial \delta_5}$	$\frac{\partial f11}{\partial \delta_6}$	$\frac{\partial f11}{\partial E_6}$	
f12							$\frac{\partial f12}{\partial \delta_4}$	$\frac{\partial f12}{\partial E_4}$	$\frac{\partial f12}{\partial \delta_5}$	$\frac{\partial f12}{\partial E_5}$	$\frac{\partial f12}{\partial \delta_6}$

(*) f - funções
b - barras

MATRIZ $J\vec{x}$

Os elementos de $\vec{S}\vec{u}$ são calculados através das equações do parágrafo (2.32) para o ponto de operação em estudo.

Então (2.31) terá a forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta PG_1 \\ \Delta QG_1 \\ \Delta \delta_2 \\ \Delta QG_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta E_3 \\ \Delta \delta_4 \\ \Delta E_4 \\ \Delta \delta_5 \\ \Delta E_5 \\ \Delta \delta_6 \\ \Delta E_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \dots & S_{1,5} \\ S_{2,1} & S_{2,2} & \dots & S_{2,5} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{12,1} & S_{12,2} & \dots & S_{12,5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_1 \\ \Delta E_2 \\ \Delta QG_4 \\ \Delta n_{5,6} \\ \Delta QG_6 \end{bmatrix}$$

Observemos que $\vec{S}\vec{u}$, como foi definido neste exemplo, supõe constantes as demais variáveis capazes de modificar o estado do sistema

f	b	1	2	4	5	6
1	1	$\frac{\partial f_1}{\partial E_1}$				
2		$\frac{\partial f_2}{\partial E_1}$				
3	2		$\frac{\partial f_3}{\partial E_2}$			
4			$\frac{\partial f_4}{\partial E_2}$			
5	3		$\frac{\partial f_5}{\partial E_2}$			
6			$\frac{\partial f_6}{\partial E_2}$			
7	4	$\frac{\partial f_7}{\partial E_1}$				
8		$\frac{\partial f_8}{\partial E_1}$		$\frac{\partial f_8}{\partial QG_4}$		
9	5		$\frac{\partial f_9}{\partial E_2}$		$\frac{\partial f_9}{\partial n}$	
10			$\frac{\partial f_{10}}{\partial E_2}$		$\frac{\partial f_{10}}{\partial n}$	
11	6	$\frac{\partial f_{11}}{\partial E_1}$			$\frac{\partial f_{11}}{\partial n}$	
12		$\frac{\partial f_{12}}{\partial E_1}$			$\frac{\partial f_{12}}{\partial n}$	$\frac{\partial f_{12}}{\partial QG_6}$

MATRIZ $J\vec{u}$



4. COMENTÁRIOS FINAIS

A análise de sensibilidade, como vimos, fundamenta-se na linearização das equações do sistema. Assim, as aplicações dos coeficientes de sensibilidade exigem uma análise do grau de linearidade do sistema, a fim de que se possa determinar as variações máximas permitidas em torno da condição de operação em estudo, que não acarretem em erros superiores a um certo valor.

Verifica-se que, em condições normais de operação, os sistemas apresentam-se suficientemente lineares para a maioria das aplicações. Porém, em condições de carga *muito pesada* em relação ao porte do sistema, as funções f tornam-se bastantes não lineares e os coeficientes de sensibilidade variam muito com o ponto de operação. Será necessário nestes casos, calcular a matriz S para várias condições operacionais.

Os parametros de sensibilidade dependem principalmente da configuração do sistema e, em certas condições, do ponto de operação, conforme foi dito no parágrafo anterior. As características das cargas também influenciam a sensibilidade do sistema, como podemos verificar das equações 2.18 e 2.19. Sendo a representação precisa das cargas muito difícil, em vista de seu caráter aleatório, parece razoável desprezar este efeito, pois tal consideração não iria melhorar a precisão dos resultados.

As inúmeras aplicações da análise de sensibilidade em sistemas de potência já foram enumeradas anteriormente. Na Parte II deste trabalho, utilizamos parte da matriz S (apenas os elementos $\Delta V/\Delta Q$) na otimização de fontes de reativos. A técnica de otimização é programação linear e a função objetiva, os custos de instalação.

RELACIONES Y NEGOCIACIONES DE NEGOCIACIONES

DE NEGOCIACIONES ESTABLECIDA EN LA PARTE II DE RELACIONES

P A R T E I C

APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SENSIBILIDADE:
OTIMIZAÇÃO ESTÁTICA DE FONTES DE REATIVOS

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	01
2. APRESENTAÇÃO DO MÉTODO	02
3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	04
3.1. Definição dos dados de entrada	05
3.2. Determinação da função a ser otimizada	06
3.3. Aplicação da Programação Linear	07
3.3.1. Formulação	08
3.3.2. Determinação da Região Viável	10
3.3.3. Determinação dos Pontos Extremos	12
3.3.4. Avaliação da Função Objetivo nos Pontos Extremos	13
3.3.5. Determinação do Ponto Ótimo	14
4. APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SENSIBILIDADE: OTIMIZAÇÃO ESTÁTICA DE FONTES DE REATIVOS	15
4.1. PROGRAMAÇÃO LINEAR	17
4.1.1. Introdução	18
4.1.2. Definição dos dados de entrada	19
4.1.3. Determinação da função a ser otimizada	20
4.1.4. Aplicação da Programação Linear	21
4.1.5. Conclusões	22
4.2. Exemplos	23
4.3. Comentários sobre os exemplos	24
4.4. Conclusões	25
5. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	26
5.1. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	27
5.2. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	28
5.3. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	29
5.4. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	30
5.5. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	31
5.6. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	32
5.7. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	33
5.8. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	34
5.9. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	35
5.10. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	36
5.11. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	37
5.12. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	38
5.13. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	39
5.14. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	40
5.15. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	41
5.16. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	42
5.17. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	43
5.18. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	44
5.19. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	45
5.20. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	46
5.21. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	47
5.22. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	48
5.23. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	49
5.24. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	50
5.25. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	51
5.26. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	52
5.27. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	53
5.28. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	54
5.29. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	55
5.30. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	56
5.31. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	57
5.32. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	58
5.33. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	59
5.34. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	60
5.35. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	61
5.36. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	62
5.37. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	63
5.38. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	64
5.39. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	65
5.40. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	66
5.41. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	67
5.42. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	68
5.43. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	69
5.44. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	70
5.45. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	71
5.46. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	72
5.47. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	73
5.48. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	74
5.49. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	75
5.50. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	76
5.51. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	77
5.52. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	78
5.53. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	79
5.54. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	80
5.55. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	81
5.56. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	82
5.57. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	83
5.58. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	84
5.59. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	85
5.60. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	86
5.61. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	87
5.62. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	88
5.63. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	89
5.64. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	90
5.65. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	91
5.66. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	92
5.67. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	93
5.68. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	94
5.69. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	95
5.70. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	96
5.71. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	97
5.72. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	98
5.73. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	99
5.74. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	100
5.75. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	101
5.76. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	102
5.77. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	103
5.78. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	104
5.79. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	105
5.80. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	106
5.81. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	107
5.82. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	108
5.83. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	109
5.84. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	110
5.85. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	111
5.86. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	112
5.87. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	113
5.88. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	114
5.89. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	115
5.90. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	116
5.91. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	117
5.92. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	118
5.93. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	119
5.94. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	120
5.95. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	121
5.96. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	122
5.97. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	123
5.98. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	124
5.99. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	125
5.100. DIAGRAMA UNITÁRIO DOS SISTEMAS	126

P A R T E II

APLICAÇÃO DOS PARAMETROS DE SENSIBILIDADE:
OTIMIZAÇÃO ESTÁTICA DE FONTES DE REATIVOS

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO -----	01
2.	APRESENTAÇÃO DO MÉTODO -----	03
3.	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA -----	06
3.1.	Relação Linear entre V e Q -----	06
3.2.	Determinação da Matriz S -----	08
3.3.	Aplicação da Programação Linear. Formulação -----	09
3.4.	Determinação da Magnitude dos Capacitores Indicados -----	13
3.5.	Considerações sobre a Linearização das Funções δ -----	15
4.	PROGRAMAÇÃO DIGITAL -----	21
4.1.	Apresentação e Descrição -----	21
4.1.1.	Estrutura -----	21
4.1.2.	Entrada de dados -----	22
4.1.3.	Processamento -----	22
4.1.4.	Saída -----	23
4.2.	Exemplos -----	25
4.3.	Comentários sobre os exemplos -----	26
4.4.	Conclusões -----	26
5.	DIAGRAMA UNIFILAR DOS SISTEMAS UTILIZADOS NOS EXEMPLOS -----	28
6.	RESULTADOS DOS EXEMPLOS -----	31
7.	LISTAGEM DO PROGRAMA PRINCIPAL -----	73
8.	REFERÊNCIAS -----	74

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas na operação de um sistema elétrico está na regulação de tensão, isto é, manter as tensões nos barramentos dentro de limites relativamente estreitos e previamente estabelecidos. Estes problemas apresentam-se consideravelmente penosos nos sistemas predominantemente radiais, onde as tensões variam bastante com as variações, mesmo normais, de carga.

Em sistemas deste tipo são portanto necessários a instalação de fontes de reativos ao longo do sistema a fim de que, o comportamento predominantemente indutivo do sistema em carga pesada, seja devidamente compensado, obtendo-se desta forma um perfil de tensões que atenda as condições necessárias para uma operação satisfatória.

Em suma, nos sistemas de característica predominantemente radial, isto é, nos sistemas ditos *fracos*, a instalação de fontes de reativos em locais estratégicos, sejam capacitores ou compensadores síncronos, é um recurso necessário, mesmo para condições normais de operação.

Em sistemas de muitas malhas, o problema da regulação reduz-se ao ajuste fino das tensões nos barramentos, o que pode ser facilmente realizado mediante a atuação de comutadores em carga dos transformadores ou reguladores série.

Entretanto, mesmo em sistemas malhados, a necessidade de manter níveis de tensão em faixas relativamente estreitas, também em condições de emergência, conduz ao problema de instalar fontes de reativos nos locais adequados.

Assim, seja em sistemas radiais, seja em siste

mas malhados, o problema de instalar fontes de reativos ocorre, e consiste essencialmente em determinar os locais e as magnitudes destas fontes, que atendam às condições estabelecidas, assegurando ao mesmo tempo, um custo mínimo.

2. APRESENTAÇÃO DO MÉTODO

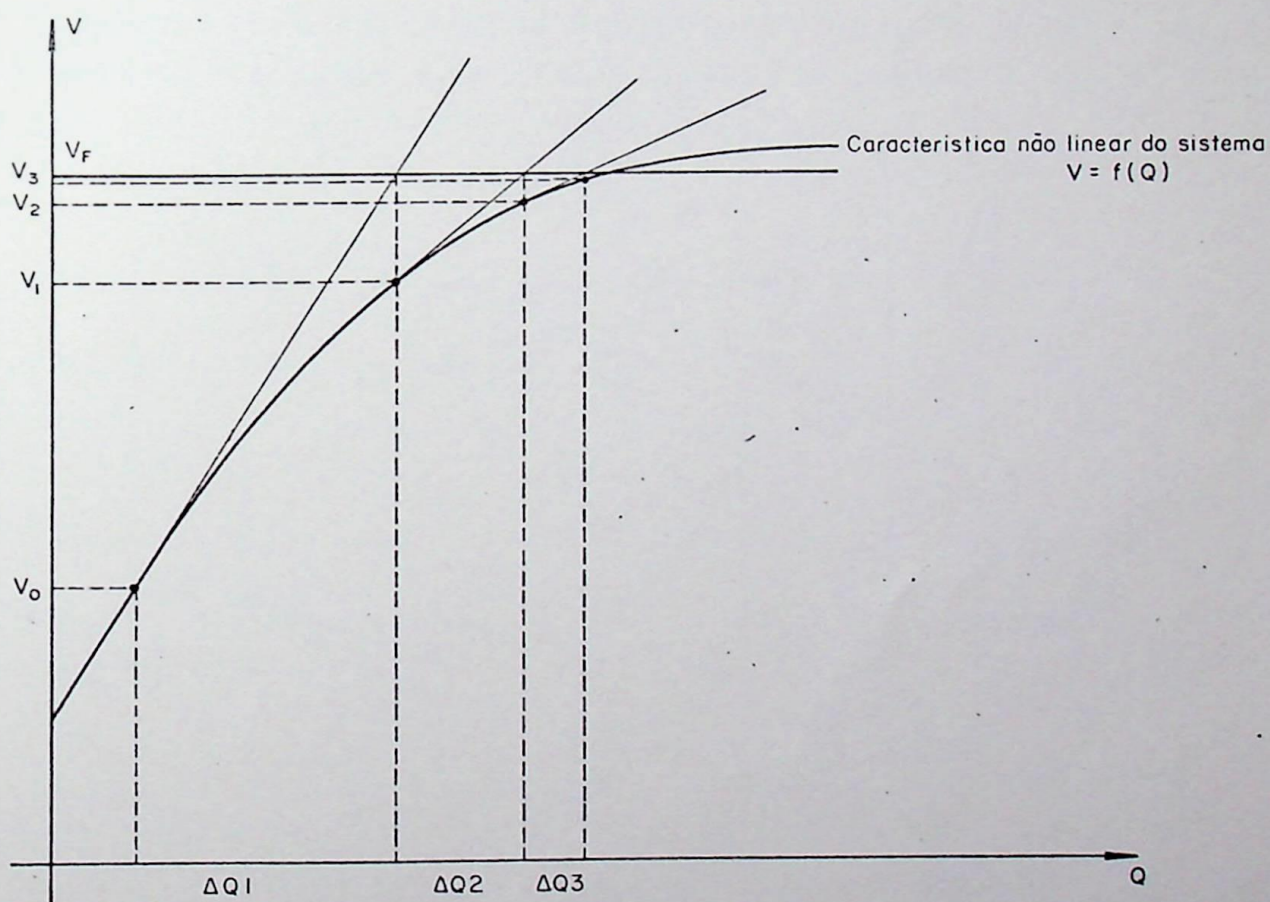
Vários métodos têm sido utilizados nos últimos anos para se determinar a solução ótima do problema em questão. Referências [15] a [22.]

O método aqui apresentado fornece os locais e as quantidades de capacitores que devem ser instalados no sistema para que os limites de tensão pré-estabelecidos, sejam satisfeitos com um custo total mínimo. Este processo de otimização é realizado para uma determinada condição operacional (que deve ser a mais crítica), utilizando aproximações lineares através da matriz sensibilidade (reduzida às barras onde se deseja controlar a tensão) e programação linear. Este método basicamente é aquele apresentado na referência [9.]. Em [9], o processo consiste em determinar os coeficientes de sensibilidade do sistema das barras operacionais e aplicar a programação linear, o que assegura que a solução é a ótima (mínimos custos de instalação). Entretanto, por ser os parâmetros de sensibilidade resultantes de uma aproximação linear de \vec{f} ; o processo apresentado em [9] falha quando a tensão existente no sistema está muito distante do valor mínimo desejado, isto é, as variações em torno do ponto de operação são grandes para que uma linearização possa fornecer bons resultados.

Sendo os sistemas de potência não lineares, parece ser uma boa alternativa, a utilização das técnicas de programação não linear.

Ao nosso ver porém, o tratamento matemático bem mais complexo não compensaria as melhores precisões obtidas nos resultados. Entretanto se, as quantidades de capacitores indicados pelo método acima descrito não conduzirem aos níveis de tensão mínimos desejados (devido a consideração de

linearidade), nada nos impede de repetir o processo para o novo estado do sistema, ainda não considerado satisfatório. Assim, o método aqui utilizado é essencialmente aquele de [9] aplicado quantas vezes for necessário para chegar a solução. Ao se aproximar da solução através das primeiras iterações, as variações nas tensões necessárias para se obter os valores mínimos desejados, vão se tornando pequenas o que implica que as aproximações tornam-se então, bastante precisas. O processo é semelhante à obtenção de raízes de uma equação não linear pelo método de Newton-Raphson, e está ilustrado na Figura 1.



- ΔQ_i → potência reativa indicada na iteração i .
- $\sum Q_i = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3$ - potência reativa total indicada
- V_0 → tensão inicial
- V_i → tensão após iteração i
- V_F → tensão final desejada

Fig. 1
Solução obtida com aproximação lineares

Como veremos nos exemplos apresentados nos parágrafos finais, poucas iterações são necessárias, mesmo para elevar as tensões para valores muito *longe* do valor inicial.

A grande vantagem do método é conduzir o processo diretamente à solução ótima sem serem feitas tentativas e correções que exigem inúmeras iterações antes de se obter a solução ótima.

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

3.1. Relação linear entre V e Q

A equação (2.8) da Parte I, transcrita abaixo, nos informa sobre os efeitos que ocorrem no estado do sistema se pequenas variações nos dispositivos de controle são realizadas:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta x_{2N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{u_{1,1}} & S_{u_{1,2}} & \dots & S_{u_{1,M}} \\ S_{u_{2,1}} & S_{u_{2,2}} & \dots & S_{u_{2,M}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{u_{2N,1}} & S_{u_{2N,2}} & \dots & S_{u_{2N,M}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta u_M \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

O estado do sistema, representado pelo vetor $\vec{\Delta X}$, é constituído de 2 variáveis para cada barra do sistema, que podem ser o ângulo e módulo das tensões. O vetor $\vec{\Delta u}$ pode representar a geração de potência reativa nas M barras tomadas como operacionais. Como estamos interessados em controlar os módulos das tensões, então uma relação entre ΔV e ΔQ satisfará nossa necessidade. Sendo os efeitos da potência reativa sobre os ângulos das tensões muito pequeno, e se desejamos controlar a tensão em somente K barras, a equação (3.1) fica:

$$\begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta v_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{u_{1,1}} & S_{u_{1,2}} & \dots & S_{u_{1,M}} \\ S_{u_{2,1}} & S_{u_{2,2}} & \dots & S_{u_{2,M}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{u_{K,1}} & S_{u_{K,2}} & \dots & S_{u_{K,M}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta QG_1 \\ \Delta QG_2 \\ \dots \\ \dots \\ \Delta QG_M \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Como nem sempre deseja-se controlar as K primeiras barras com geração de reativos nas M primeiras, (3.2) poderia ser escrita com maior clareza como:

$$\Delta v_i = \sum_j S_{u_{i,j}} \Delta QG_j \quad (3.3)$$

onde j = assume a numeração das barras operacionais (M valores)

para i = numeração das barras onde se deseja controlar V (K equações).

Na maioria dos problemas reais de otimização de fontes de reativos, sempre ocorre que $K > M$. Para estes casos podemos fazer $M = K$ e tomar os valores de ΔQG correspondentes as $K - M$ barras adicionais iguais a zero. Isto equivale a acrescentar $K - M$ colunas na matriz S , o que não altera (3.3), visto que, estas colunas serão multiplicadas pelo elemento ΔQG , nulo. Este procedimento é muito útil, como veremos mais adiante, na determinação da matriz \vec{J}_u .

Assim (3.3) fica:

$$\vec{\Delta v} = \vec{S} \vec{\Delta QG}$$

onde S = matriz quadrada de ordem M

$$\Delta \vec{Q}G \text{ e } \Delta \vec{V} = \text{dimensão } M$$

3.2. Determinação da Matriz S

A matriz sensibilidade do estado em relação as variáveis de controle é dado por:

$$S_{\vec{u}} = -J_{\vec{x}}^{-1} \vec{J}_{\vec{u}} \quad (3.4)$$

onde $J_{\vec{x}}^{-1}$ e $\vec{J}_{\vec{u}}$ são as matrizes jacobianas de \vec{f} em relação às variáveis de estado e de controle do sistema.

Em forma, matricial, levando em conta as considerações feitas no parágrafo anterior:

$$S_{\vec{u}} = - \begin{bmatrix} J_{x_{1,1}} & J_{x_{1,2}} & \dots & J_{x_{1,M}} \\ J_{x_{2,1}} & J_{x_{2,2}} & \dots & J_{x_{2,M}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ J_{x_{M,1}} & J_{x_{M,2}} & \dots & J_{x_{M,M}} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} J_{u_{1,1}} & J_{u_{1,2}} & \dots & J_{u_{1,M}} \\ J_{u_{2,1}} & J_{u_{2,2}} & \dots & J_{u_{2,M}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ J_{u_{M,1}} & J_{u_{M,2}} & \dots & J_{u_{M,M}} \end{bmatrix}$$

Mas, devido a equação (2.20):

$$J_{u_{i,j}} = \begin{matrix} 0 & i \neq j \\ -1 & i = j \end{matrix}$$

Desta forma:

$$J\vec{u} = -I, \text{ sendo } I \text{ a matriz identidade:}$$

Assim (3.4) fica:

$$S\vec{u} = -J\vec{x}^{-1} (-I) = J\vec{x}^{-1}$$

$$E \quad \Delta\vec{V} = J\vec{x}^{-1} \Delta\vec{Q}G \quad (3.5)$$

Deve ser observado que a notação conveniente ' do conjunto de funções f e a consideração de $K = M$, tornaram o cálculo de $S\vec{u}$ bastante simples, reduzido ao cálculo de $J\vec{x}^{-1}$. Como $J\vec{x}$ é geralmente muito esparsa, técnicas de programação adequadas devem ser utilizadas, visando reduzir memória e esforço computacional [28].

3.3. Aplicação de programação linear. Formulação.

Seja V_i a tensão obtida do caso base, na barra i antes da instalação de novos capacitores.

Se um certo número de capacitores são conectados nas M barras operacionais do sistema, então as novas tensões serão $V_i + \Delta V_i$. Estas tensões devem estar entre os limites

$$V_i^{\text{MIN}} \quad \text{e} \quad V_i^{\text{MAX}}$$

pré-estabelecidos para a barra i . Assim:

$$V_i^{\text{MIN}} \leq V_i + \Delta V_i \leq V_i^{\text{MAX}}$$

$$\text{ou } \Delta V_i \geq V_i^{\text{MIN}} - V_i \quad (3.6)$$

$$\Delta V_i \leq V_i^{\text{MAX}} - V_i \quad (3.7)$$

Assim nossa solução deve satisfazer as 2M condições impostas em (3.6) e (3.7). Mas, de (3.3)

$$\Delta V_i = \sum_j S_{u_{i,j}} \Delta QG_j$$

para i correspondendo as M barras onde se deseja controlar a tensão e, lembrando, j assume os valores das M barras operacionais. Levando em (3.6) e (3.7):

$$\sum_j S_{ij} \Delta QG_j \geq V_i^{\text{MIN}} - V_i \quad (3.8)$$

$$\sum_j S_{ij} \Delta QG_j \leq V_i^{\text{MAX}} - V_i \quad (3.9)$$

Nossa função objetiva, que devemos minimizar é o custo de instalação dado por:

$$F(\Delta QG) = \sum_j C_j \Delta QG_j \quad (3.10)$$

onde C_j é o custo, por MVAR de instalação na barra j e ΔQG_j é o valor de MVAR a ser instalado em j. A constante C_j inclui o preço dos capacitores (P/MVAR) e todos os custos de instalação (P/MVAR) podendo ser diferente para cada barra.

Podem ocorrer ainda outras limitações como um valor máximo de capacitores que podem ser conectados em uma determinada barra, limitado por exemplo, pela capacidade do transformador através do qual o banco é ligado ao sistema. Estas restrições são estabelecidas como:

$$Q_j + \Delta Q_j \leq Q_j^{\text{MAX}}$$

$$\text{ou } \Delta Q_j \leq Q_j^{\text{MAX}} - Q_j$$

onde Q_j - capacitores já existentes na barra

ΔQ_j - valor a ser instalado

Q_j^{MAX} - valor máximo permissível

Resumindo, nosso problema seria esquematizado como:

$$\text{Minimizar: } F(\Delta QG) = \sum_j C_j \Delta QG_j$$

$$\text{Sujeito a: } \sum_j S_{ij} \Delta QG_j \geq V_i^{\text{MIN}} - V_i$$

$$\sum_j S_{ij} \Delta QG_j \leq V_i^{\text{MAX}} - V_i$$

$$\Delta QG_j \leq QG_j^{\text{MAX}} - Q_j$$

3.4. Determinação da magnitude dos capacitores indicados

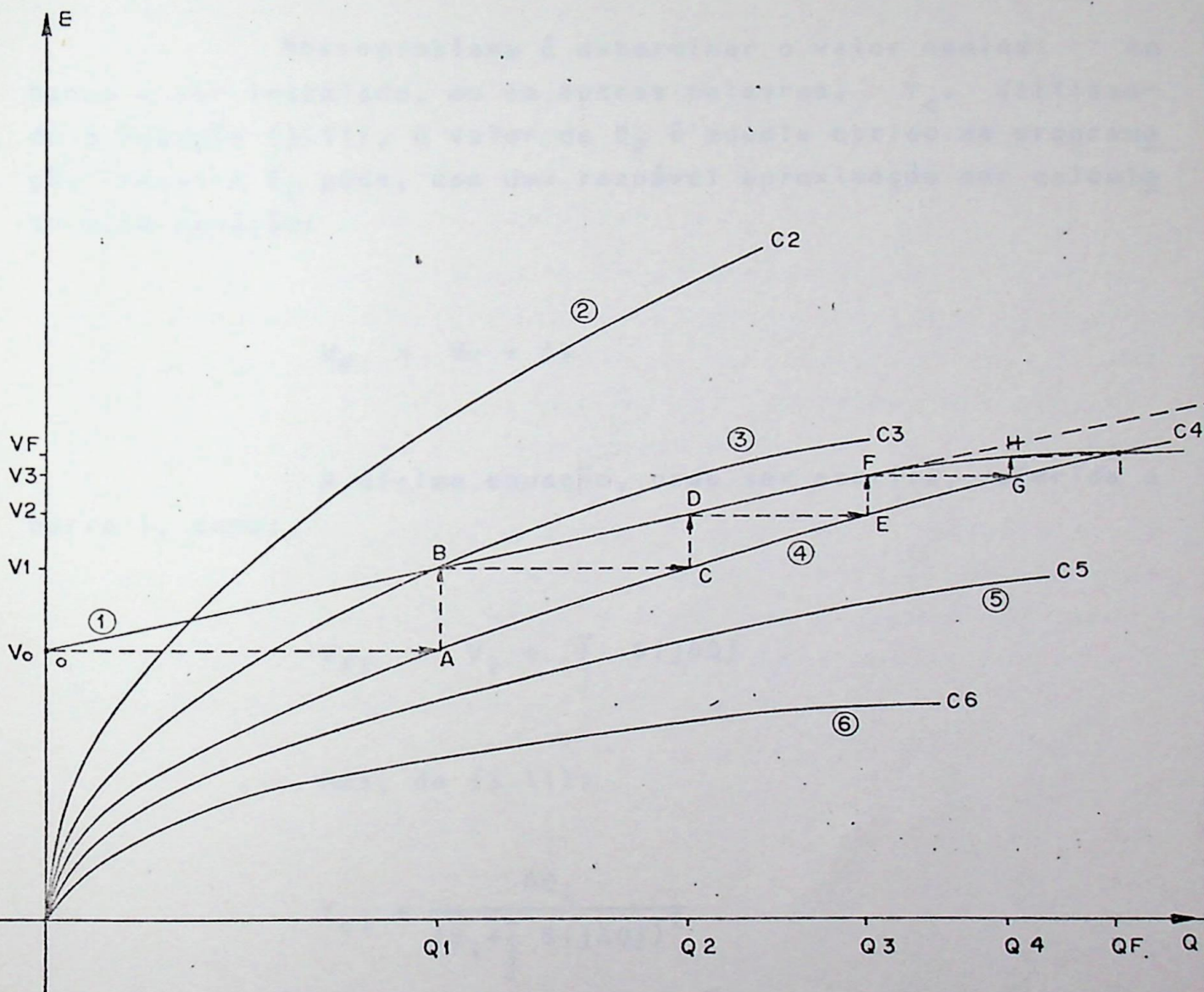
O processo de otimização de fontes de reativos nos informa o valor de ΔQ que deve ser gerado em cada barramento para que as tensões se situem dentro dos limites desejados. Se a fonte de reativos a ser utilizada, fôr capacitores estáticos, cujo valor de potência reativa que é gerada depende da tensão aplicada, surgirá a seguinte questão: que valor em capacitores deveremos instalar? Se ΔQ MVAR de capacitores for utilizado, significa que ΔQ MVAR de reativos serão injetado quando a tensão for 1.0pu e como, nem sempre este é o caso, parece-nos que esta consideração não é razoável. Se, por outro lado, calcularmos o valor em capacitores para fornecer ΔQ MVAR na tensão inicial do sistema, este será excessivo, pois com a elevação da tensão o valor de reativos injetados se tornará maior que o indicado.

A potência reativa Q_0 , que um banco de capacitores fornece imediatamente após o fechamento da chave, depende da tensão inicial do barramento V_0 . Com a injeção de uma potência Q_0 , a tensão na barra aumentará para V_1 . Este aumento na tensão fará aumentar a potência reativa gerada para Q_1 , que novamente elevará a tensão para um valor V_2 . Este processo continuará até atingir o ponto de convergência final V_F , Q_F . O gráfico da figura 2 ilustra o processo. É importante observarmos que, a não linearidade do sistema é o fator que assegura a convergência para um valor final.

Na condição final temos que:

$$V_F = f(Q_F)$$

$$Q_F = Y_C E_F^2 \quad (3.11)$$



- ① CURVA $E = f(Q)$ - EQ. DO SISTEMA
- ② ③ ④ ⑤ ⑥ CURVAS $E = (Q/Y)^{1/2}$, $C_6 > C_5 > C_4 > C_3 > C_2$
- C_i → CAPACITÂNCIA CORRESPONDENTE A CURVA i
- V_0 → TENSÃO INICIAL
- V_i, Q_i → TENSÃO E REATIVO NA ETAPA i
- V_F, Q_F → TENSÃO E REATIVO FINAIS.

FIGURA 2

ou ainda: $V_F = f(Y_c E_F^2)$ (3.12)

Nosso problema é determinar o valor nominal do banco a ser instalado, ou em outras palavras, Y_c . Utilizando a equação (3.11), o valor de Q_F é aquele obtido da programação linear e E_F pode, com uma razoável aproximação ser calculado pela equação:

$$V_F = V_0 + \Delta V$$

A última equação, pode ser escrita, referida a barra i , como:

$$V_{Fi} = V_i + \sum_j S_{ij} \Delta Q_j$$

Mas, de (3.11):

$$Y_{ci} = \frac{\Delta Q_i}{(V_i + \sum_j S_{ij} \Delta Q_j)^2}$$

ou (MVAR nominal do banco) $_i = \frac{\Delta Q_i}{(V_i + \sum_j S_{ij} \Delta Q_j)^2} \times \text{base MVA}$ (3.13)

3.5. Considerações sobre a linearização das funções f

Ao desprezar os termos de grau superior a um, no desenvolvimento em série de Taylor do conjunto de funções f , estamos utilizando estas funções na forma linearizada. O grau de não linearidade de \vec{f} , define os valores máximos das varia-

ções em torno do ponto de operação, para os quais as considerações de linearidade são permissíveis dentro de um limite de erro determinado.

Quando o sistema é razoavelmente não linear, os parâmetros de sensibilidade variam bastante com o ponto de operação, e apenas variações muito pequenas nas variáveis são permitidas na resolução de problemas.

Com o objetivo de obtermos uma idéia quantitativa do grau de linearidade das equações do sistema de energia elétrica, examinemos um exemplo em particular. O sistema utilizado é o da figura 5 (Ward/Hale). Aumentou-se a potência reativa gerada na barra 4 em degraus de 5 MVAR e calculou-se as tensões resultantes, através de fluxo de carga, isto é, com as equações exatas, não lineares. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela I. Para ilustração, ainda são apresentados na Figura 3 os gráficos $\Delta V = f(QG)$ com a escala do eixo V suficientemente ampliada para que possamos contemplar a linearidade destas funções com as variações estudadas.

NOTAÇÃO:

- VALORES CORRETOS
- VALORES APROXIMADOS PARA LINEARIZAÇÃO EM TORNO DE $Q_{64}=0$

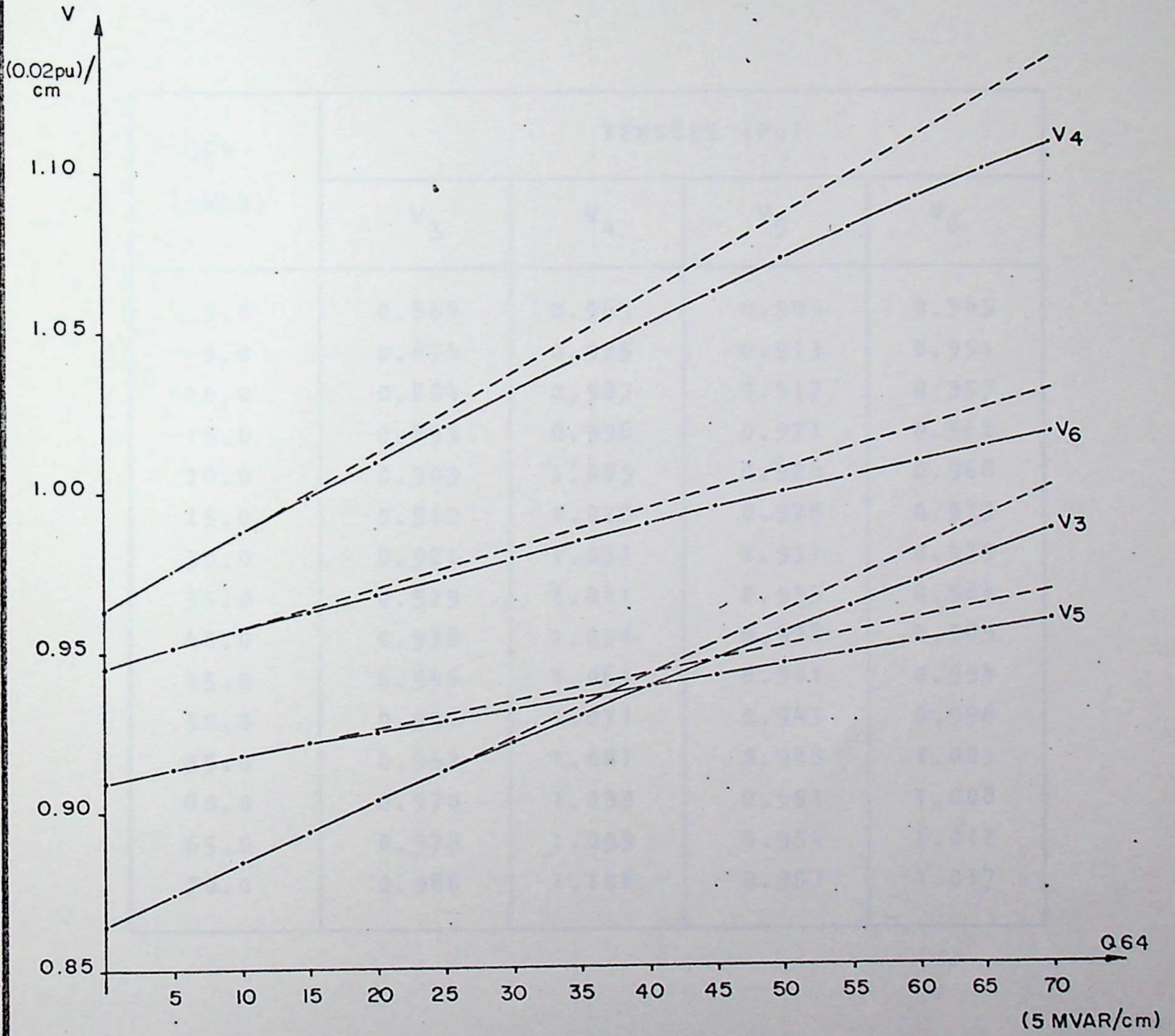


FIG.3 - VERIFICAÇÃO DA LINEARIDADE DE $V=f(Q)$

TABELA I

QG4 (MVAR)	TENSÕES (Pu)			
	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆
0.0	0.864	0.963	0.909	0.945
5.0	0.874	0.975	0.913	0.951
10.0	0.884	0.987	0.917	0.957
15.0	0.893	0.998	0.921	0.962
20.0	0.903	1.009	0.924	0.968
25.0	0.912	1.020	0.928	0.973
30.0	0.921	1.031	0.931	0.979
35.0	0.929	1.041	0.935	0.984
40.0	0.938	1.051	0.938	0.989
45.0	0.946	1.061	0.941	0.994
50.0	0.954	1.071	0.945	0.998
55.0	0.962	1.081	0.948	1.003
60.0	0.970	1.090	0.951	1.008
65.0	0.978	1.099	0.954	1.012
70.0	0.986	1.108	0.957	1.017

O ponto em torno do qual nossa análise será feita é para $QG4 = 0$. Desta forma, a linha pontilhada representa os valores de V obtidos pela aproximação linear feita no ponto de operação, $QG4 = 0$.

T A B E L A II

	Valor exato (Pu)	Valor aprox. (Pu)	Erro relativo %
V_3	0.986	1.000	1.42
V_4	1.108	1.135	2.44
V_5	0.957	0.967	1.04
V_6	1.017	1.031	1.38

A tabela II faz um confronto entre os valores exatos e aproximados. Observamos que o erro máximo obtido, com uma variação em torno do ponto de operação inicial de 70 MVAR em $QG4$, e de 0,145pu em V_4 (de 0.963 a 1.108pu) foi 2,44%. Estes resultados, obtidos do exemplo em pauta, na condição operacional considerada, parece-nos muito significativos quanto a validade da utilização do modelo linear nos estudos de controle de tensão e potência reativa. Esta afirmativa é reforçada pela observação dos exemplos apresentados no parágrafo 4.2, onde a determinação de capacitores necessários para elevar a tensão numa certa barra de 14%, foi necessário apenas duas aproximações lineares (exemplo 2).

Observemos ainda que, a inclinação da reta do gráfico, aproximações lineares para o estado inicial, os coeficientes de sensibilidade apresentados na saída dos exemplos para variações de Q_4 , com $\Delta Q_3 = \Delta Q_5 = \Delta Q_6 = 0$.

4. PROGRAMAÇÃO DIGITAL

4.1. Apresentação e descrição

4.1.1. Estrutura

O programa aplica o método descrito neste trabalho para a determinação da magnitude e localização de capacitores estáticos que devem ser instalados no sistema com o intuito de atender os limites de tensão especificados para diversas barras, assegurando ao mesmo tempo, um custo total mínimo.

Um programa principal controla a sequência de cálculos, chamando as subrotinas que realizam cada etapa do processo.

São utilizadas subrotinas que realizam as seguintes tarefas:

- a)- Cálculo das tensões (fluxo de carga) - utilizada para determinar as tensões do sistema no caso base e para verificar se todas as tensões do sistema satisfazem as condições desejadas após cada iteração. Este procedimento é necessário pois, como vimos, os valores mínimos de tensão podem não ser alcançados na primeira iteração, casos que ocorrem quando as tensões do caso base estão muito "distantes" do valor mínimo desejado. Isto ocorre, devido as considerações de linearidade, em que está baseado o cálculo da matriz sensibilidade.
- b)- Cálculo do Jacobiano $J\vec{x}$ - conforme expressões apresentadas no parágrafo 2.3.
- c)- Cálculo da matriz sensibilidade - (inversão de $J\vec{x}$)
- d)- Programação linear - utiliza o método simplex. Esta subro

tina fornece ao programa principal os valores de MVAR que devem ser injetados em cada barramento do sistema. No programa principal são calculados as grandezas dos capacitores que são necessários para gerar a potência reativa indicada pela programação linear, de acordo com a equação (3.13).

- e)- Impressão de relatórios - são impressas dois tipos de tabelas: uma com os resultados de cada iteração e outra com os resultados finais do cálculo.

A pesquisa das barras cujas tensões ainda não apresentam valores satisfatórios após cada iteração, é realizada no programa principal. Feito isto, o programa principal elimina os eixos da matriz sensibilidade correspondentes as tensões situadas já dentro dos limites desejados, repetindo o processo a partir da programação linear.

4.1.2. Entrada de dados

São fornecidas ao programa os dados de carga e parâmetros do sistema, os limites superiores e inferiores de tensão desejados em cada barra, bem como os custos totais por MVAR em cada barra (melhor dizendo: o preço p/ MVAR dos capacitores acrescido do custo p/ MVAR de instalação).

Observemos que os valores reais dos custos por MVAR nas barras não são fundamentais para a solução, mas sim o valor relativo de cada uma desta grandeza em confronto com as demais. A solução obviamente, será dirigida para aquelas barras de menor custo e maior coeficiente $\Delta V/\Delta QG$, isto é, onde ocorre maior efetividade na elevação da tensão quando é injetado potência reativa, com menor investimentos.

4.1.3. Processamento

A lógica do programa está ilustrada no diagrama

ma de blocos da Figura 4.

Observa-se que a matriz sensibilidade é calculada apenas para o caso base. Verificamos que a conexão de novos capacitores realizada em cada iteração, não altera substancialmente a matriz sensibilidade, o que torna desnecessário o cálculo desta matriz sempre que uma nova iteração seja requerida. Procedendo contrariamente, iríamos obter uma melhoria insignificante em precisão, às custas de maior tempo de processamento.

Como já foi mencionado antes, não obtemos uma solução na primeira iteração apenas nos casos em que grandes variações de tensão são desejadas. Observa-se nos casos estudados, que para variações de até 5% (por exemplo, para elevar a tensão de 0.95pu, para 1.00pu), a solução foi obtida já na 1ª iteração. Por outro lado, variações até 15% (0.85pu a 1.00pu) requereram 2 iterações.

4.1.4. Saída

A saída do programa consta da impressão:

- dos dados de carga;
- dos parametros do sistema;
- do resultado do fluxo de carga;
- da matriz sensibilidade reduzida;
- de relatórios em cada iteração e relatório final.

Os relatórios impressos para cada iteração fornece informações úteis, para acompanhamento do desenvolvimento do processo. O relatório final contém: os valores de capacitores indicados para cada barramento, que são referidos pelo nome, os limites de tensão e os valores obtidos com os novos capacitores. Os custos para cada barra bem como o total são também apresentados.

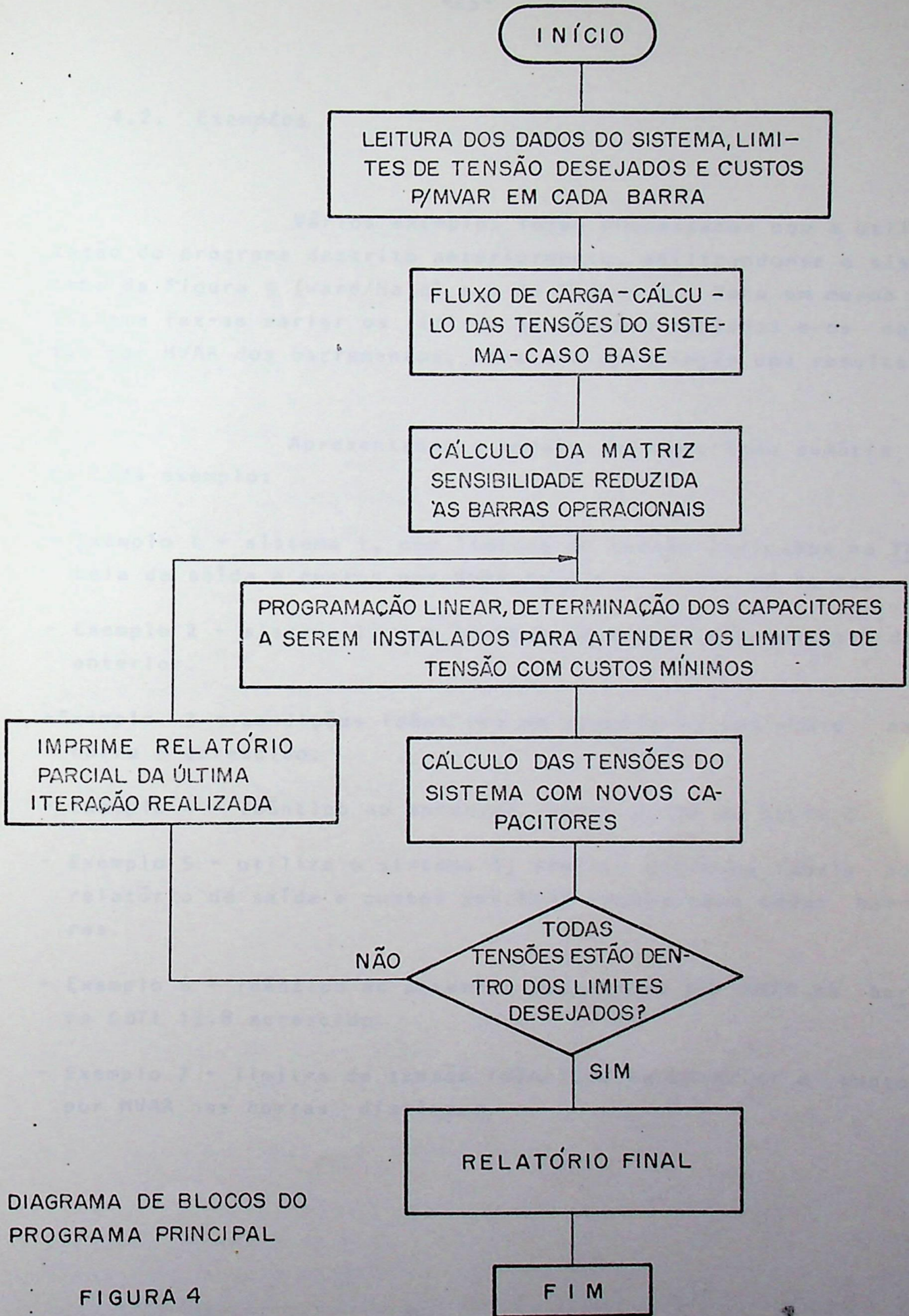


DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA PRINCIPAL

FIGURA 4

4.2. Exemplos

Vários exemplos foram processados com a utilização do programa descrito anteriormente, utilizando-se o sistema da Figura 5 (Ward/Hale) e o da Figura 6. Para um mesmo sistema fez-se variar os limites de tensão desejados e os custos por MVAR dos barramentos, para uma apreciação dos resultados.

Apresentamos a seguir uma descrição sumária de cada exemplo:

- Exemplo 1 - sistema 1, com limites de tensão indicados na Tabela de saída e custos por MVAR iguais em todas as barras.
- Exemplo 2 - sistema 1, com limites de tensão diferentes do anterior.
- Exemplo 3 - condições idênticas ao exemplo 1, com custo na barra 5 acrescido.
- Exemplo 4 - idêntico ao anterior, salvo custo da barra 5.
- Exemplo 5 - utiliza o sistema 2, limites conforme tabela no relatório de saída e custos por MVAR iguais para todas barras.
- Exemplo 6 - idêntico ao anterior com custos por MVAR na barra COT1 13.8 acrescido.
- Exemplo 7 - limites de tensão idênticos ao anterior e custos por MVAR nas barras. distintos.

4.3. Comentários sobre os exemplos

Observamos, comparando os exemplos 1 e 2 com o 3, que um acréscimo no custo por MVAR na barra 5 de 1.0 para 1.6 não alterou a solução no que diz respeito às magnitudes e localizações dos capacitores. Isto significa que, a elevada sensibilidade das tensões do sistema para injeções de potência reativa na barra 5 (ver matriz sensibilidade), ainda predominou sobre o fato de que o custo de instalação nesta barra é superior às demais. Se entretanto, elevamos o custo por MVAR da barra 5, para 2.8, então a solução mais econômica indicará menos capacitores para esta barra, isto é, o fator econômico passou a predominar.

Nos exemplos 5 e 6, utilizando-se o sistema 2, também elevamos o custo em uma determinada barra, no caso COT1 13.8, o que fez a solução ótima, antes indicando 6.53 MVAR, passar a não indicar nenhum capacitor para esta barra, o que tornou o custo total maior. O exemplo 7 apresenta um caso com custos diferentes em todas as barras.

4.4. Conclusões

Conforme observamos nos exemplos, a utilização de aproximações lineares, com precisões muito boas, não exigem um número muito grande de iterações. No exemplo 2, por exemplo, a tensão do caso base era 0.864pu e o valor mínimo desejado 1.0pu. Obteve-se 0.997pu (tolerância de 0.003pu utilizada pelo programa), com apenas 2 aproximações:

Uma grande vantagem do método é conduzir o processo direto à solução ótima, isto é, não são feitas tentativas que, após testadas são algumas delas desfavoráveis. Alguns métodos fazem uso deste recurso, selecionando antes, se-

gundo um certo critério, as tentativas a serem feitas. Ao nos so ver, entretanto, o procedimento, *tentativa-teste* parece exigir maior tempo de computação, dependendo ainda do número de tentativas que forem bem sucedidas.

A aparente desvantagem, do ponto de vista computacional, do método aqui apresentado, parece ser a inversão da matriz Jacobiana, para obter-se a matriz sensibilidade. Como já dissemos entretanto, técnicas de programação especiais permitem tirar vantagem da esparsidade da matriz Jacobiana, com tornando assim esta dificuldade.

Uma alternativa que eliminaria o problema de inversão, seria a utilização da matriz Z que, em princípio, também mede a sensibilidade das tensões no sistema com relação a injeções de correntes nas barras, neste caso aquelas fornecidas pelos capacitores [24].

O método apresentado fornece resultados numéricos quaisquer, sem levar em consideração o fato de que só podemos instalar banco de capacitores de valores múltiplos do menor módulo que os fabricantes fornecem. Deste modo, é necessário aproximar o valor obtido para o múltiplo mais próximo do menor bloco disponível. Uma alternativa é utilizar técnicas de programação discreta [17].

6 - DIAGRAMA UNIFILAR DOS SISTEMAS
UTILIZADOS NOS EXEMPLOS

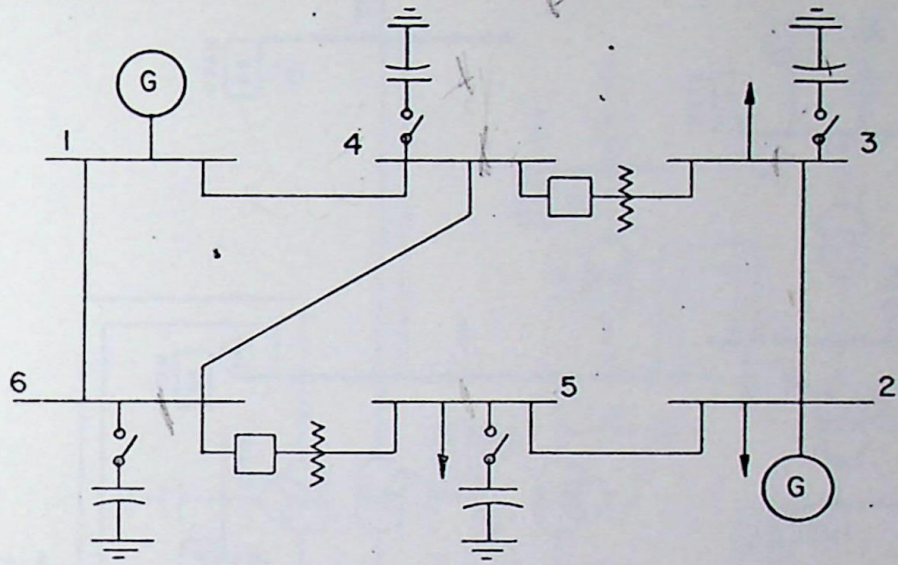


DIAGRAMA UNIFILAR - SISTEMA 1-WARD/HALE

FIG. 5

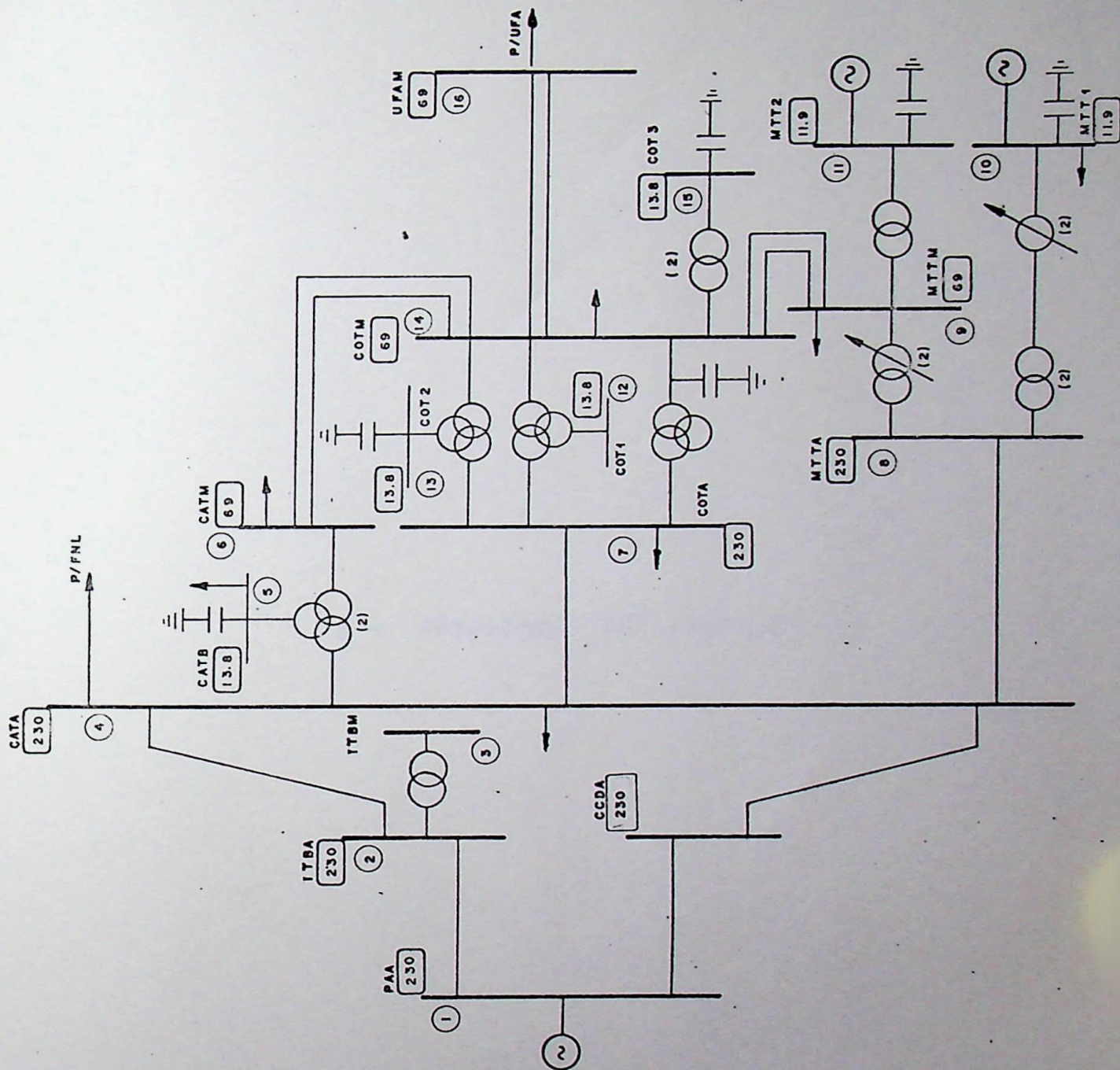


DIAGRAMA UNIFILAR
SISTEMA 2
FIGURA 6

6 - RESULTADO DOS EXEMPLOS

EXEMPLO 1

ESTUDO DE FLUXO DE POTENCIA

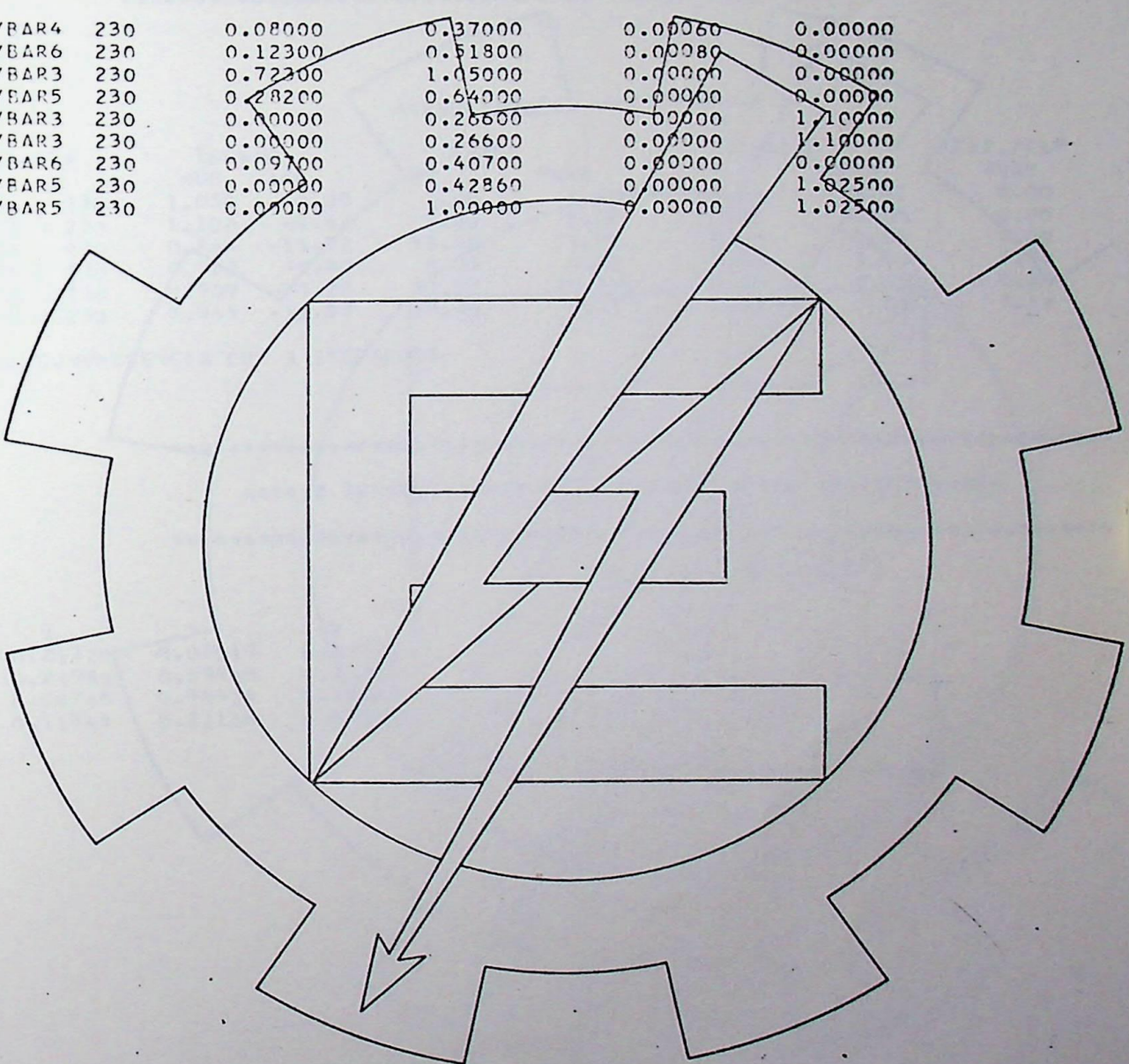
CONDICAO SIMULADA- CASO BASE - SISTEMA WARD/HALE
9 LINHAS E/OU TRANSE. 6 BARRAS
TOLERANCIAS- (P) 0.00010 (Q) 0.00010 (V) 0.00010

DADOS DE BARRA

BARRA		GERACAO		CARGA		REAT/CAP	TENSAO	
		MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	(PII)	
BAR1	230+	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05	
BAR2	230+	50.00	-20.00	40.00	0.00	0.00	1.10	
BAR3	230	0.00	0.00	0.00	55.00	13.00	0.00	1.00
BAR4	230	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.93	1.00
BAR5	230	0.00	0.00	0.00	30.00	18.00	0.00	1.00
BAR6	230	0.00	0.00	0.00	50.00	5.00	3.51	1.00

CARACTERISTICAS DE LINHAS E TRANSF.

LINHAS/TRANSFOS			RESIST.	REAT.	ADMIT.	TAP
BAR1	230/BAR4	230	0.08000	0.37000	0.00060	0.00000
BAR1	230/BAR6	230	0.12300	0.51800	0.00080	0.00000
BAR2	230/BAR3	230	0.72200	1.05000	0.00000	0.00000
BAR2	230/BAR5	230	0.28200	0.64000	0.00000	0.00000
BAR4	230/BAR3	230	0.00000	0.26600	0.00000	1.10000
BAR4	230/BAR6	230	0.00000	0.26600	0.00000	1.10000
BAR4	230/BAR5	230	0.09700	0.40700	0.00000	0.00000
BAR6	230/BAR5	230	0.00000	0.42860	0.00000	1.02500
BAR6	230/BAR3	230	0.00000	1.00000	0.00000	1.02500



CASO BASE

RESULTADOS

BARRA	TENSÃO	TENSÃO		CARGA		GERAÇÃO		REAT./CAP
		MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	
BAR1	230	1.050	0.00	0.00	0.00	96.13	32.81	0.00
BAR2	230	1.100	-5.82	0.00	0.00	50.00	32.65	0.00
BAR3	230	0.864	-13.72	55.00	13.00	0.00	0.00	0.00
BAR4	230	0.903	-9.90	0.00	0.00	0.00	0.00	2.77
BAR5	230	0.909	-13.28	20.00	18.00	0.00	0.00	0.00
BAR6	230	0.945	-12.57	50.00	5.00	0.00	0.00	3.13

OBTIDA CONVERGENCIA COM 3 ITERACOES

MATRIZ SENSIBILIDADE REDUZIDA AS BARRAS OPERACIONAIS*

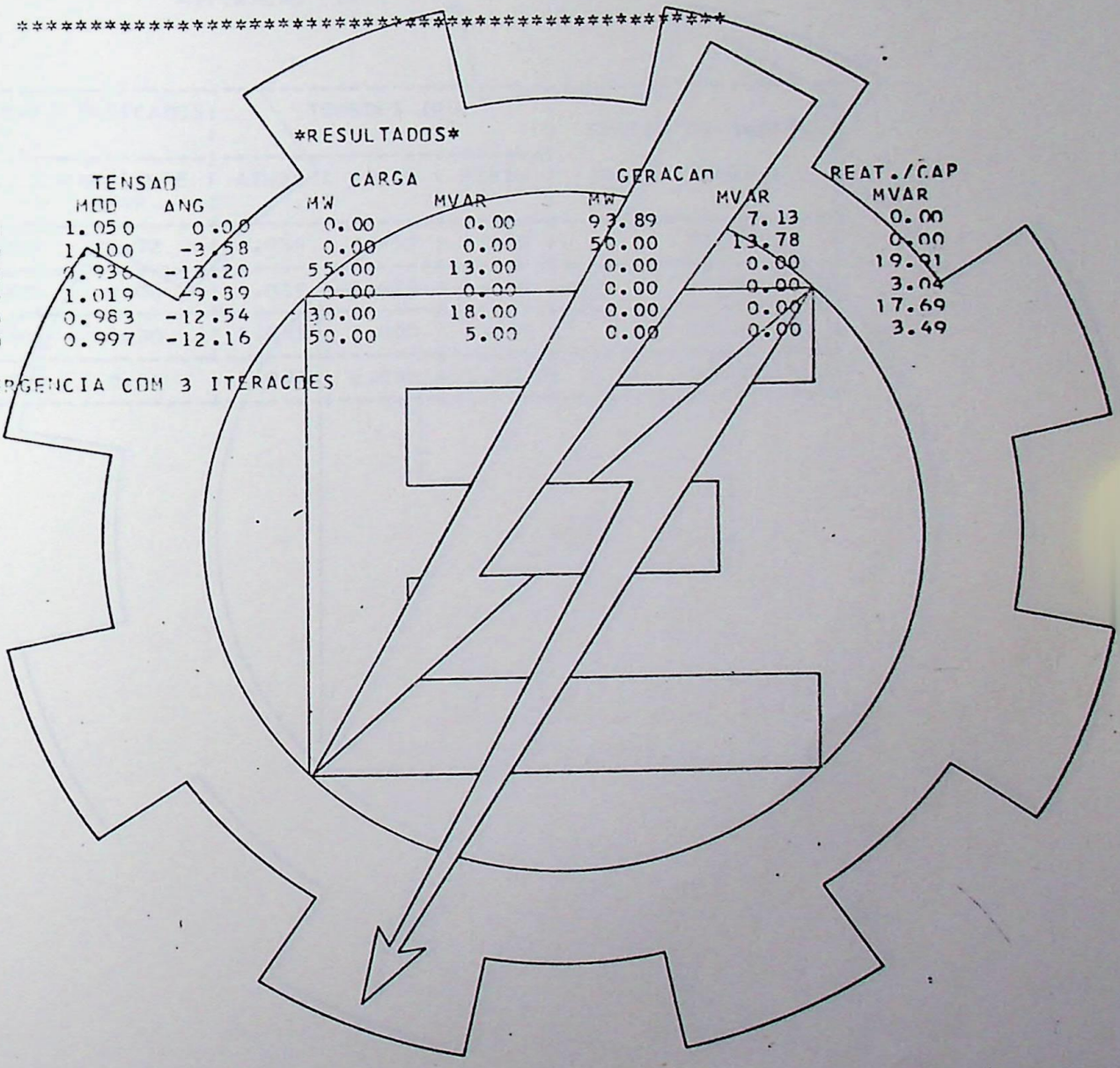
3	4	5	6
0.34767	0.21320	0.08049	0.10534
0.23765	0.24980	0.09430	0.12342
0.08283	0.08706	0.40424	0.20361
0.11268	0.11845	0.21166	0.27701

ITERACAO 1

RESULTADOS

BARRA		TENSÃO		CARGA		GERACAO		REAT./CAP
		MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
BAR1	230	1.050	0.00	0.00	0.00	93.89	7.13	0.00
BAR2	230	1.100	-3.58	0.00	0.00	50.00	13.78	0.00
BAR3	230	0.936	-13.20	55.00	13.00	0.00	0.00	19.91
BAR4	230	1.019	-9.89	0.00	0.00	0.00	0.00	3.04
BAR5	230	0.983	-12.54	30.00	18.00	0.00	0.00	17.69
BAR6	230	0.997	-12.16	50.00	5.00	0.00	0.00	3.49

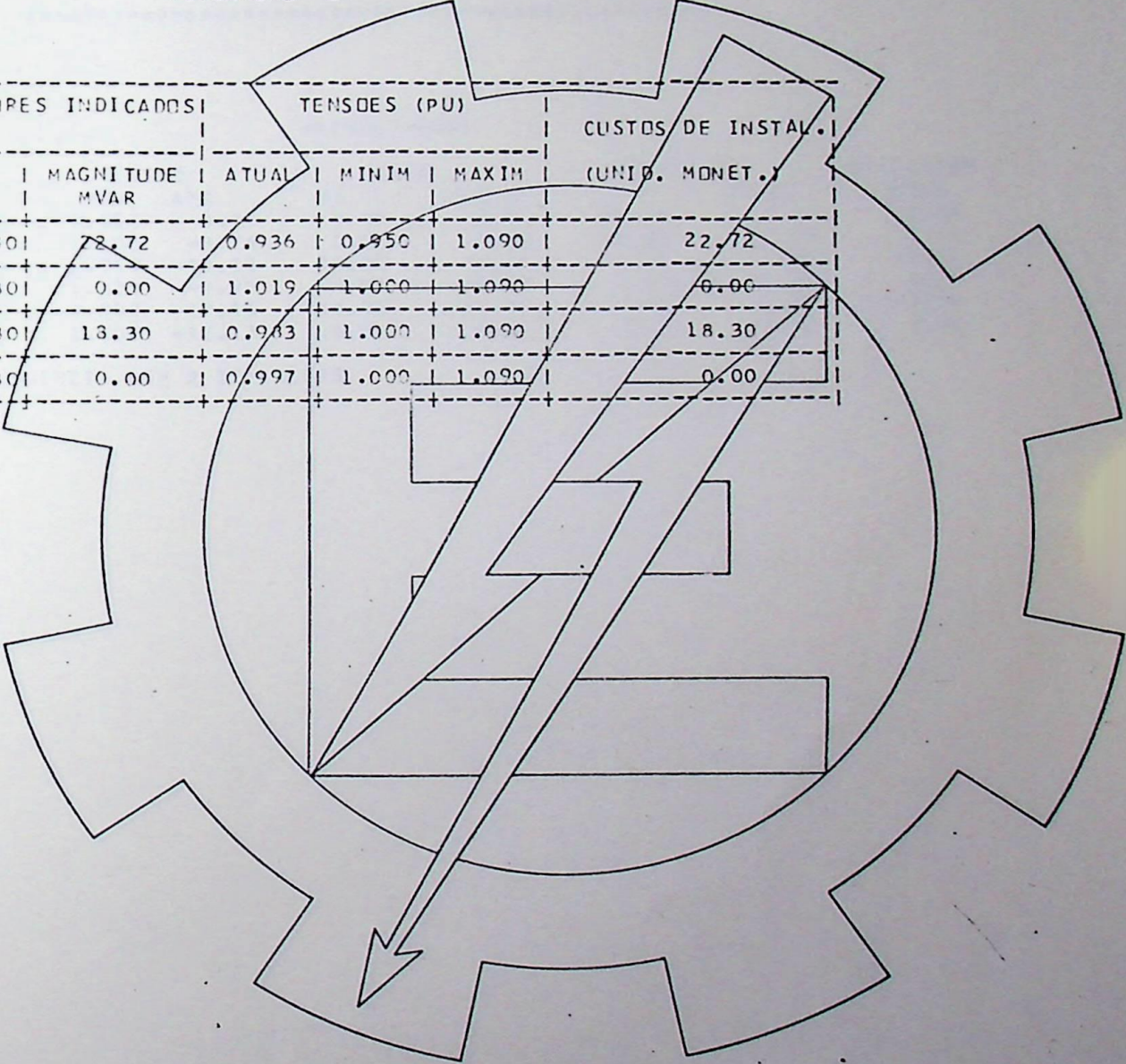
OBTIJA CONVERGENCIA COM 3 ITERACOES



RELATORIO DA PROGRAMACAO LINEAR

ITERACAO 1

CAPACIDADES INDICADAS		TENSOES (PU)			CUSTOS DE INSTAL.	
LOCAL	MAGNITUDE MVAR	ATUAL	MINIM	MAXIM	(UNID. MONET.)	
BAR3	2301	22.72	0.936	0.950	1.090	22.72
BAR4	2301	0.00	1.019	1.000	1.090	0.00
BAR5	2301	18.30	0.983	1.000	1.090	18.30
BAR6	2301	0.00	0.997	1.000	1.090	0.00

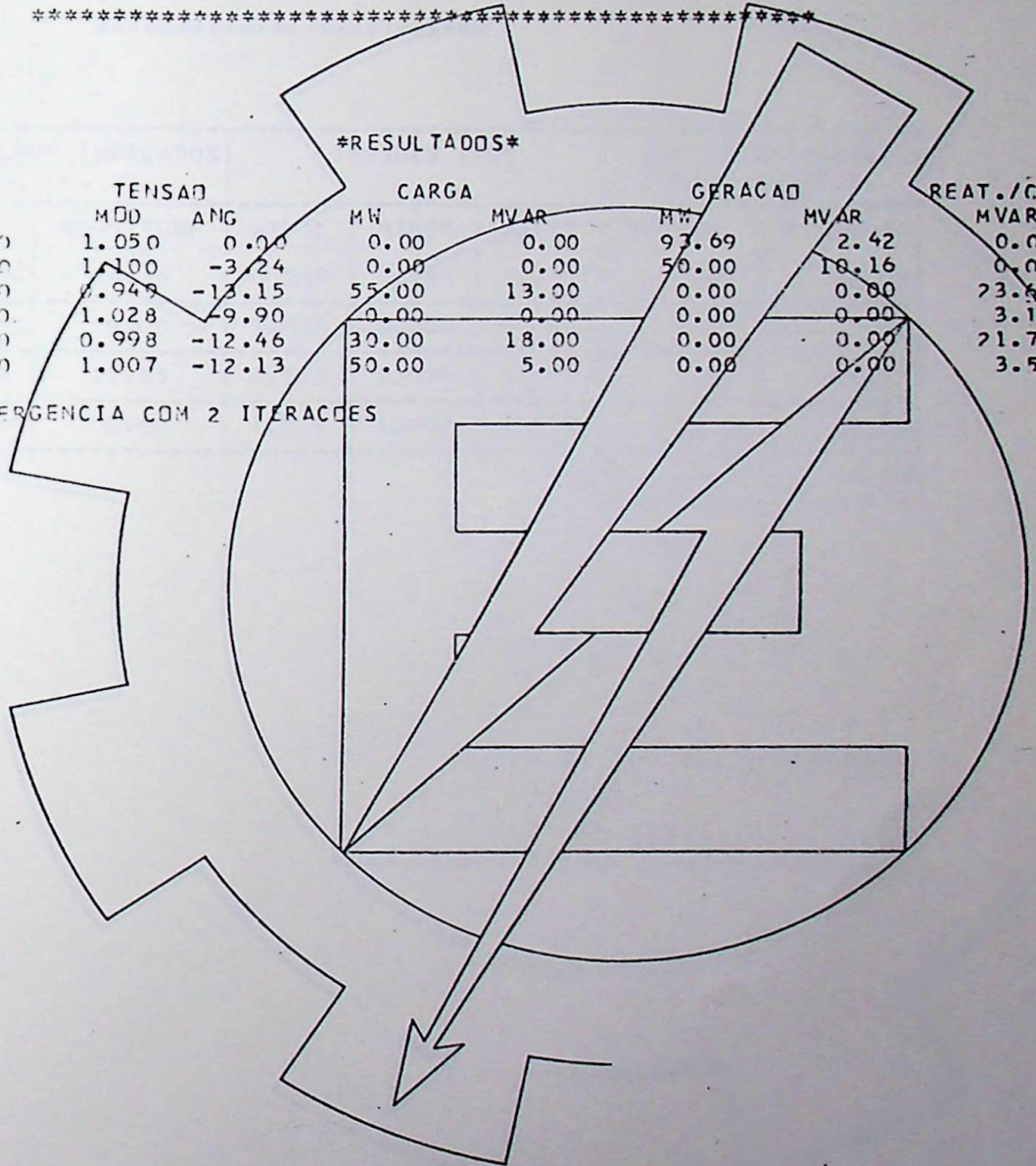


#ITERACAO 2#

#RESULTADOS#

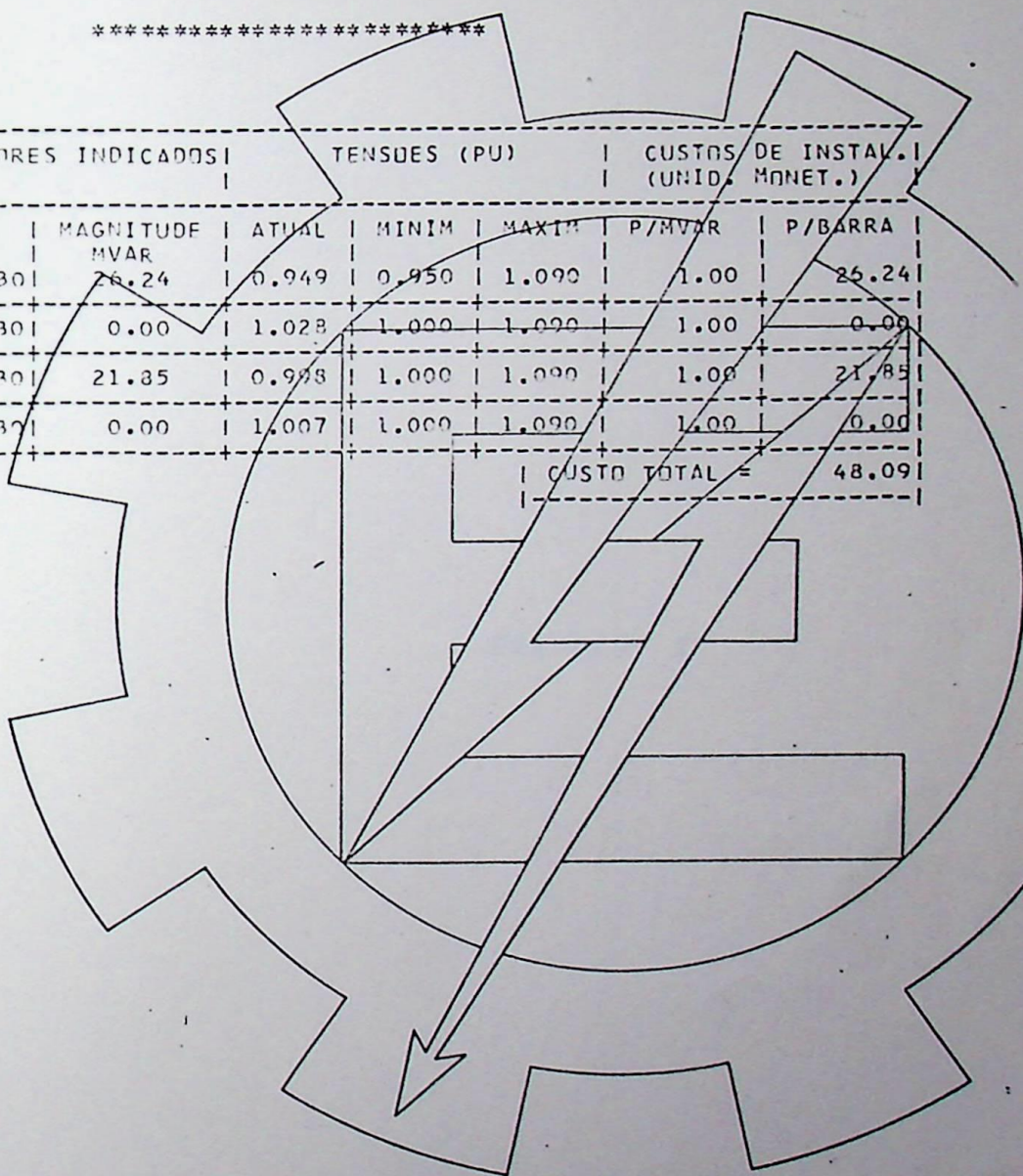
BARRA		TENSÃO		CARGA		GERACAO		REAT./CAP
		MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
BAR1	230	1.050	0.00	0.00	0.00	93.69	2.42	0.00
BAR2	230	1.100	-3.24	0.00	0.00	50.00	18.16	0.00
BAR3	230	0.949	-13.15	55.00	13.00	0.00	0.00	23.62
BAR4	230	1.028	-9.90	0.00	0.00	0.00	0.00	3.10
BAR5	230	0.998	-12.46	30.00	18.00	0.00	0.00	21.76
BAR6	230	1.007	-12.13	50.00	5.00	0.00	0.00	3.56

OBTIDA CONVERGENCIA COM 2 ITERACOES



RELATORIO FINAL

CAPACITORES INDICADOS		TENSÕES (PU)			CUSTOS DE INSTAL. (UNID. MONET.)	
LOCAL	MAGNITUDE MVAR	ATUAL	MINIM	MAXIM	P/MVAR	P/BARRA
BAR3 230	26.24	0.949	0.950	1.090	1.00	26.24
BAR4 230	0.00	1.028	1.000	1.090	1.00	0.00
BAR5 230	21.85	0.998	1.000	1.090	1.00	21.85
BAR6 230	0.00	1.007	1.000	1.090	1.00	0.00
CUSTO TOTAL =						48.09



EXEMPLO 2

F S C O L A F E D E R A L D E E N G E N H A R I A D E I T A J U B A

COORDENACAO DOS CURSOS DE POS GRADUACAO

ESTUDO DE FLUXO DE POTENCIA

CONDICAO SIMULADA- CASO BASE - SISTEMA WARD/HALE
9 LINHAS E/OU TRANSF. 6 BARRAS
TOLERANCIAS- (P) 0.00010 (Q) 0.00010 (V) 0.00010

DADOS DE BARRA

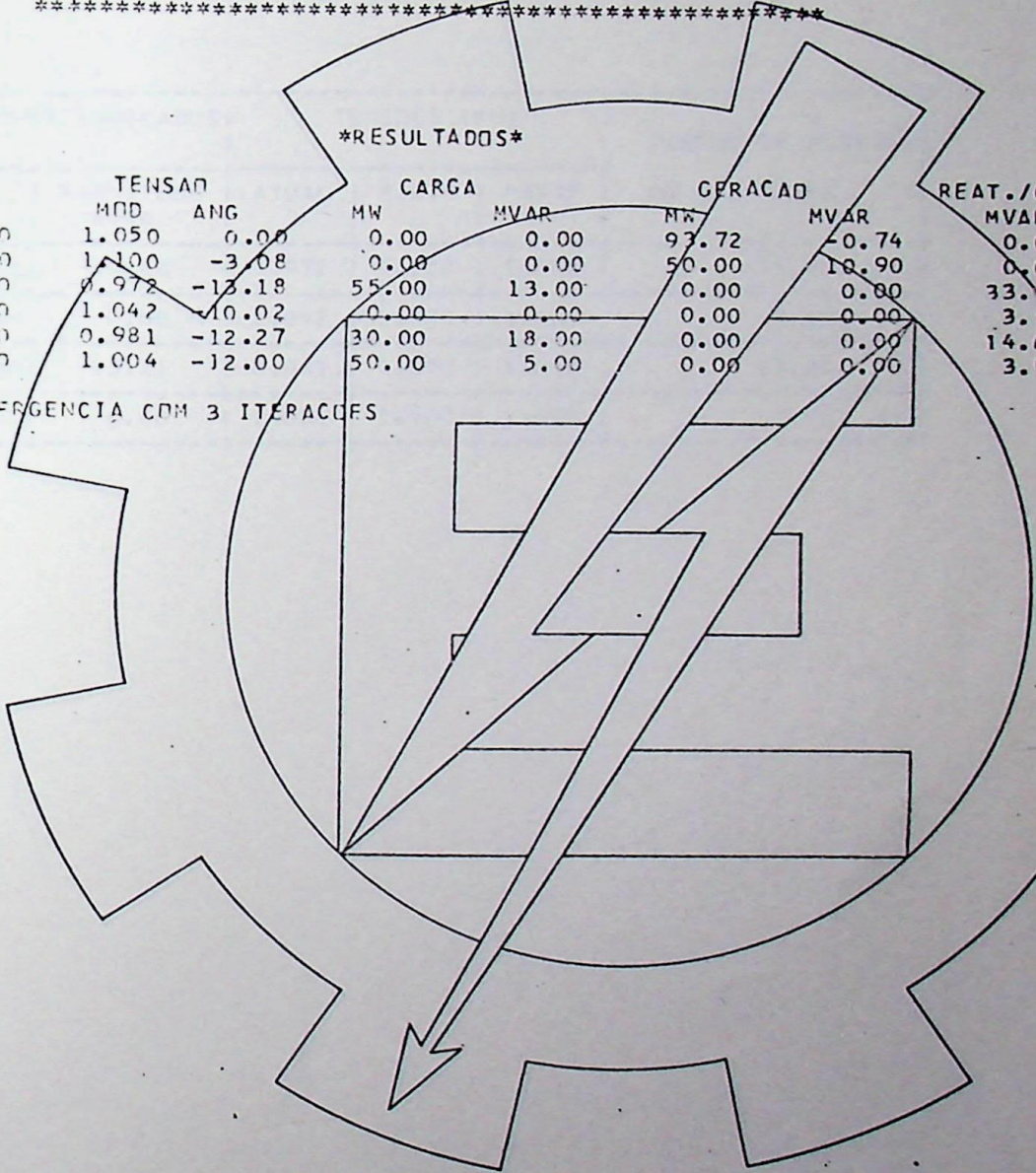
BARRA		GERACAO		CARGA		REAT/CAP		TENSAO (PU)
		MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR		
BAR1	230+	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05	
BAR2	230*	50.00	-20.00	0.00	0.00	0.00	1.10	
BAR3	230	0.00	0.00	55.00	13.00	0.00	1.00	
BAR4	230	0.00	0.00	0.00	0.00	2.93	1.00	
BAR5	230	0.00	0.00	30.00	18.00	0.00	1.00	
BAR6	230	0.00	0.00	50.00	5.00	3.51	1.00	

ITERACAO 1

RESULTADOS

BARRA		TENSÃO		CARGA		GERACAO		REAT./CAP	
		MVD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	
BAR1	230	1.050	0.00	0.00	0.00	93.72	-0.74	0.00	
BAR2	230	1.100	-3.08	0.00	0.00	50.00	10.90	0.00	
BAR3	230	0.972	-13.18	55.00	13.00	0.00	0.00	33.44	
BAR4	230	1.042	-10.02	0.00	0.00	0.00	0.00	3.1	
BAR5	230	0.981	-12.27	30.00	18.00	0.00	0.00	14.62	
BAR6	230	1.004	-12.00	50.00	5.00	0.00	0.00	3.54	

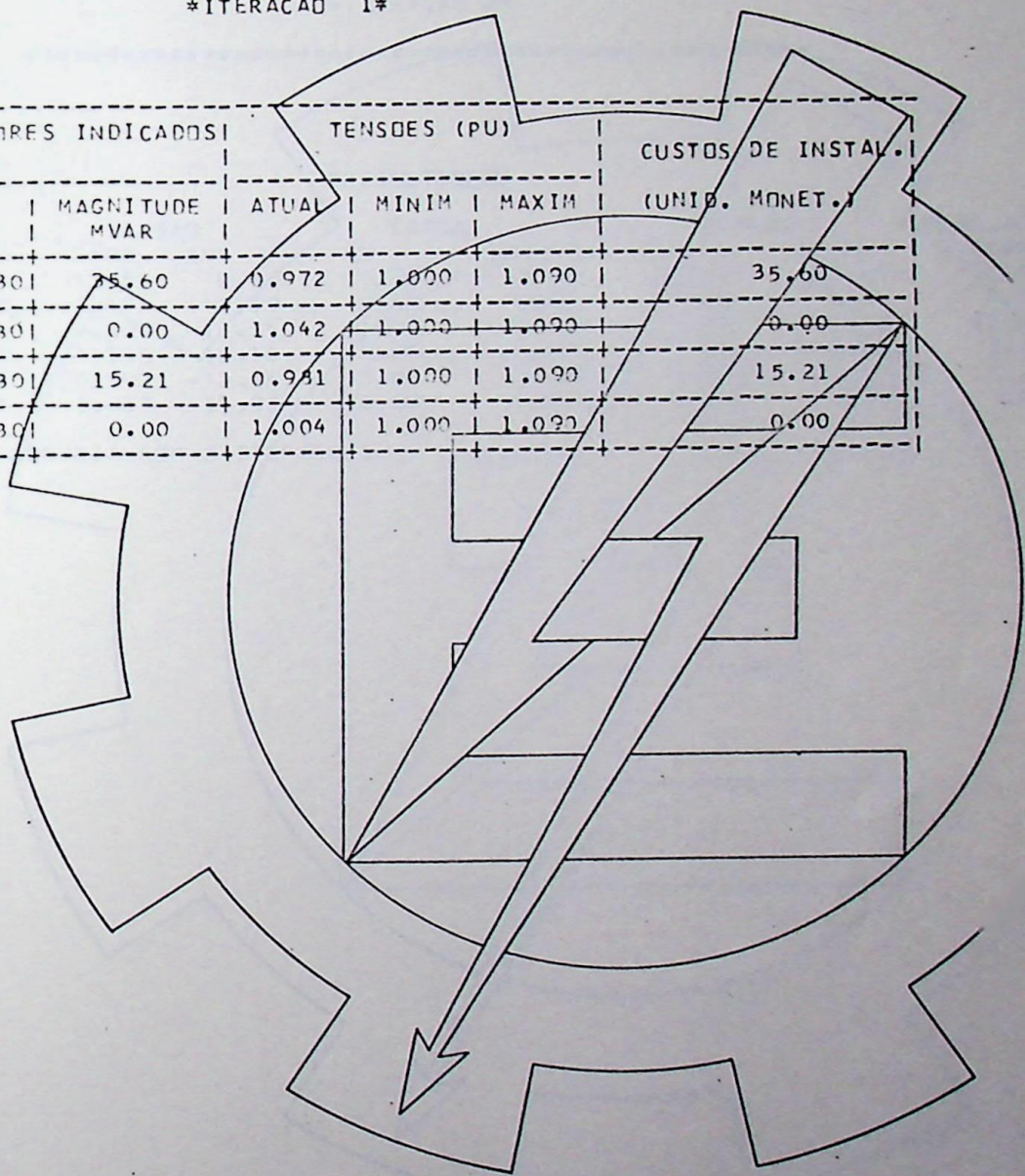
CRITICA CONVERGENCIA COM 3 ITERACOES



RELATORIO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR

ITERAÇÃO 1

CAPACIDADES INDICADAS		TENSÕES (PU)			CUSTOS DE INSTAL.	
LOCAL	MAGNITUDE MVAR	ATUAL	MINIM	MAXIM	(UNID. MONET.)	
BAR3	230	25.60	0.972	1.000	1.090	35.60
BAR4	230	0.00	1.042	1.000	1.090	0.00
BAR5	230	15.21	0.981	1.000	1.090	15.21
BAR6	230	0.00	1.004	1.000	1.090	0.00

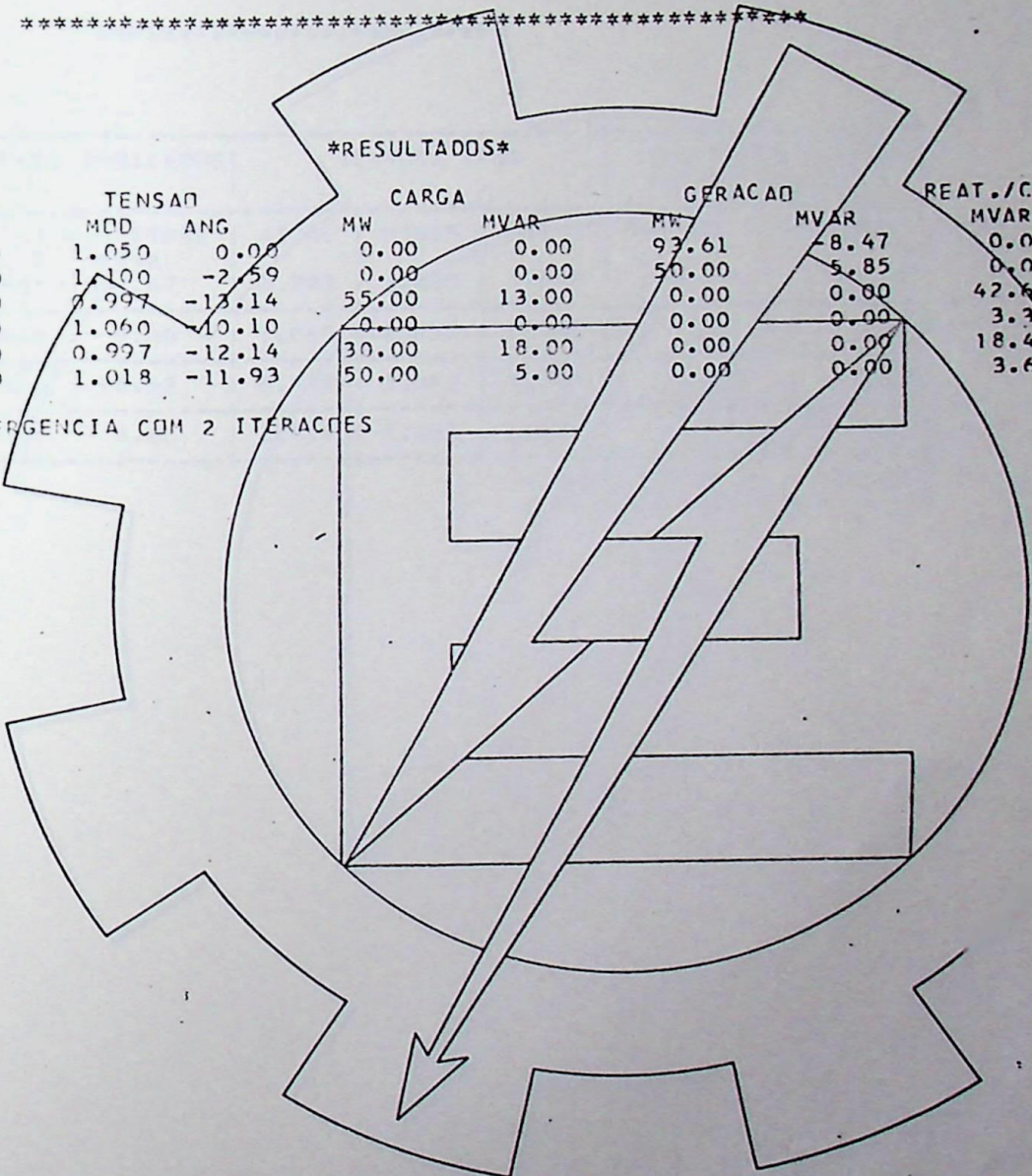


ITERACAO 2

RESULTADOS

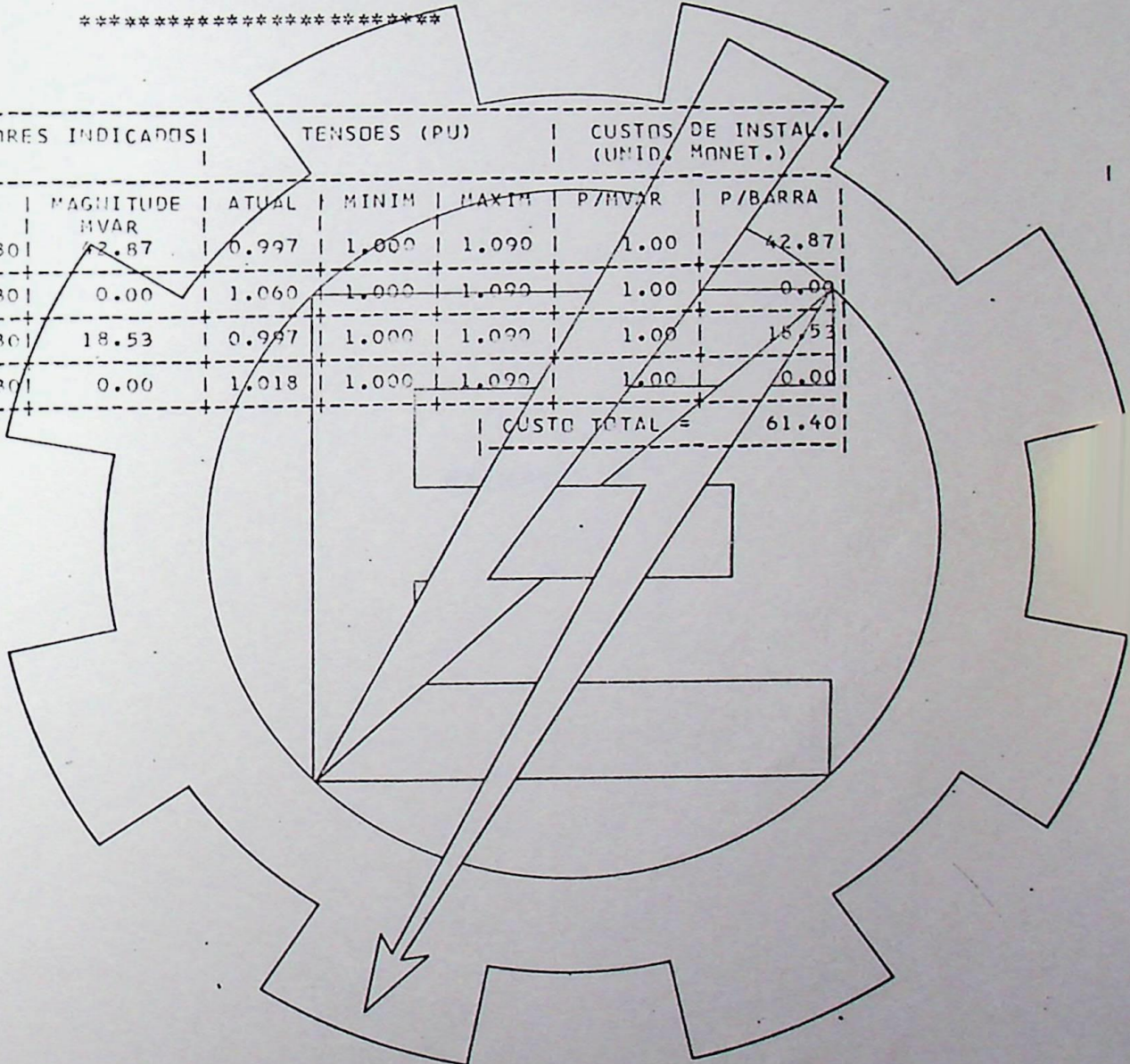
BARRA		TENSÃO		CARGA		GERACAO		REAT./CAP	
		MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	
BAR1	230	1.050	0.00	0.00	0.00	93.61	-8.47	0.00	
BAR2	230	1.100	-2.59	0.00	0.00	50.00	5.85	0.00	
BAR3	230	0.997	-13.14	55.00	13.00	0.00	0.00	42.63	
BAR4	230	1.060	-10.10	0.00	0.00	0.00	0.00	3.30	
BAR5	230	0.997	-12.14	30.00	18.00	0.00	0.00	18.43	
BAR6	230	1.018	-11.93	50.00	5.00	0.00	0.00	3.64	

OBTIDA CONVERGENCIA COM 2 ITERACOES



RELATORIO FINAL

CAPACITORES INDICADOS		TENSOES (PU)			CUSTOS DE INSTAL. (UNID. MONET.)		
LOCAL	MAGNITUDE MVAR	ATUAL	MINIM	MAXIM	P/MVAR	P/BARRA	
BAR3	230	42.87	0.997	1.000	1.090	1.00	42.87
BAR4	230	0.00	1.060	1.000	1.090	1.00	0.00
BAR5	230	18.53	0.997	1.000	1.090	1.00	18.53
BAR6	230	0.00	1.018	1.000	1.090	1.00	0.00
CUSTO TOTAL =						61.40	



EXEMPLO 3

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

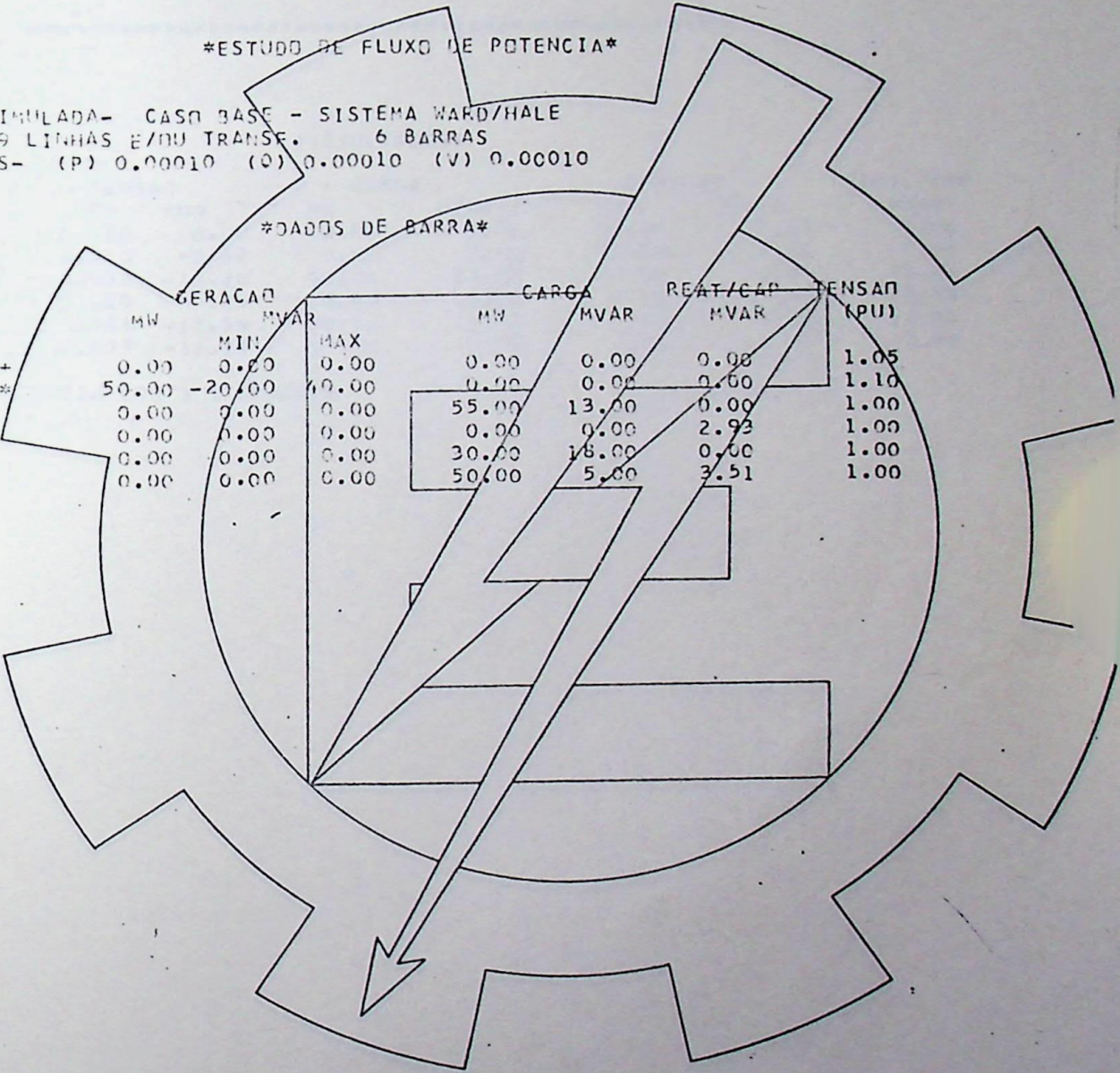
COORDENACAO DOS CURSOS DE POS GRADUACAO

ESTUDO DE FLUXO DE POTENCIA

CONDICAO SIMULADA- CASO BASE - SISTEMA WARD/HALE
9 LINHAS E/DU TRANSE. 6 BARRAS
TOLERANCIAS- (P) 0.00010 (Q) 0.00010 (V) 0.00010

DADOS DE BARRA

BARRA		GERACAO		CARGA		REAT/CAP MVAR	TENSAO (PU)
		MW	MVAR	MW	MVAR		
BAP1	230+	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05
BAP2	230*	50.00	-20.00	0.00	0.00	0.00	1.10
BAP3	230	0.00	0.00	55.00	13.00	0.00	1.00
BAP4	230	0.00	0.00	0.00	0.00	2.93	1.00
BAP5	230	0.00	0.00	30.00	18.00	0.00	1.00
BAP6	230	0.00	0.00	50.00	5.00	3.51	1.00

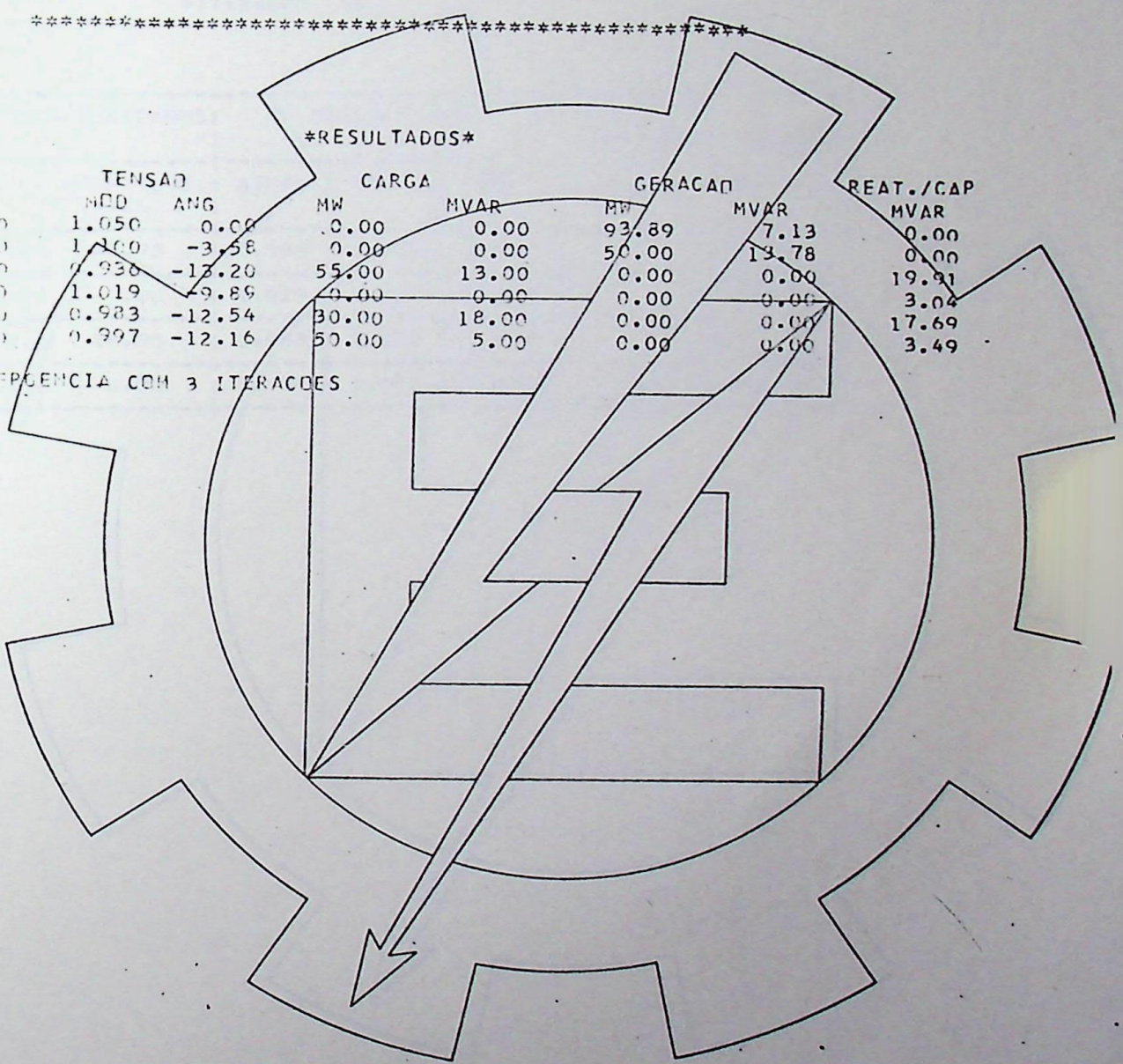


#ITERACAO 1 #

#RESULTADOS*

BARRA		TENSÃO		CARGA		GERACAO		REAT./CAP	
		MED	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	
BAR1	230	1.050	0.00	0.00	0.00	93.89	7.13	0.00	
BAR2	230	1.100	-3.58	0.00	0.00	50.00	13.78	0.00	
BAR3	230	0.930	-12.20	55.00	13.00	0.00	0.00	19.91	
BAR4	230	1.019	-9.89	0.00	0.00	0.00	0.00	3.04	
BAR5	230	0.983	-12.54	30.00	18.00	0.00	0.00	17.69	
BAR6	230	0.997	-12.16	50.00	5.00	0.00	0.00	3.49	

OBJETIVA CONVERGENCIA COM 3 ITERACOES

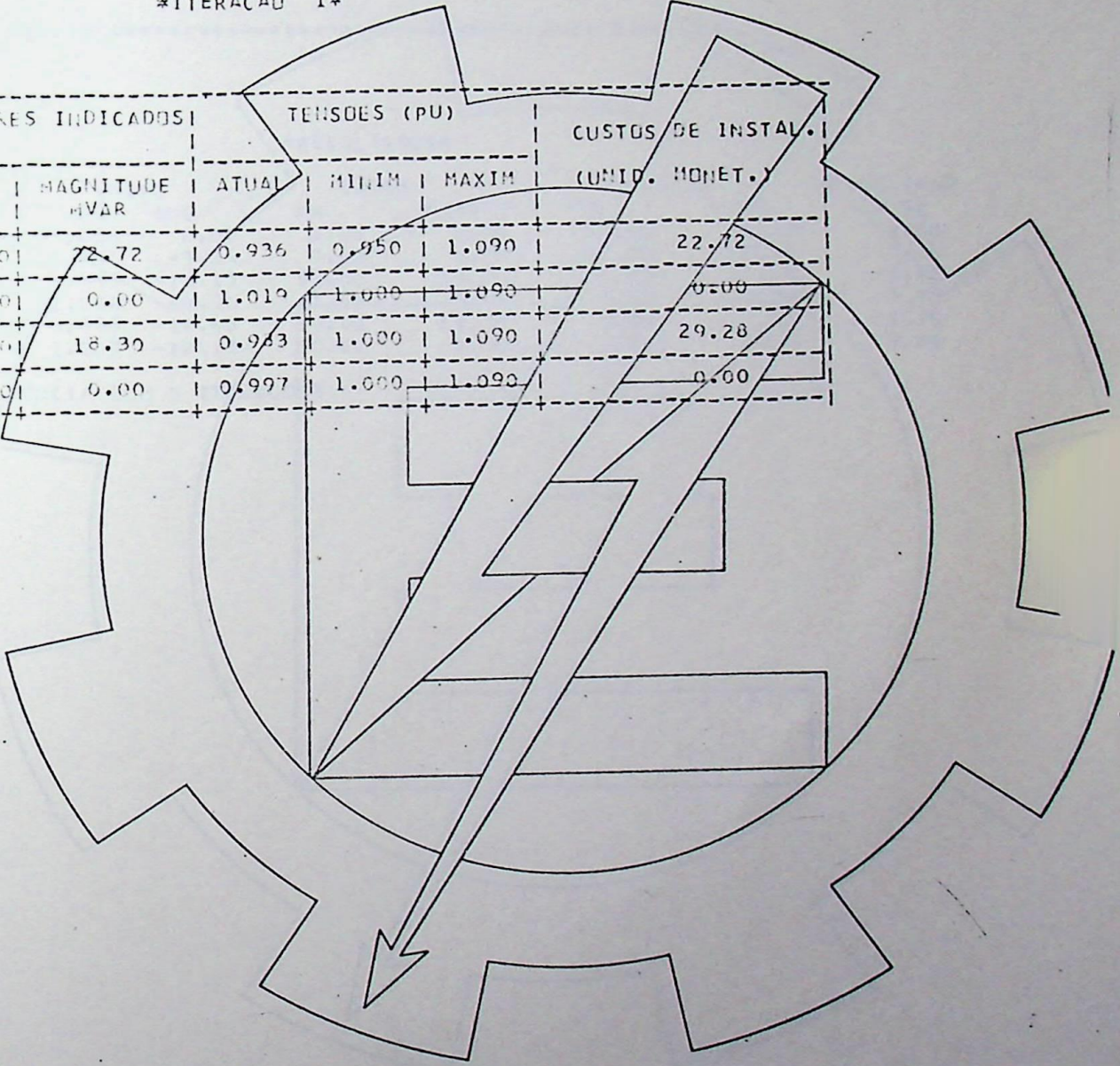




RELATORIO DA PROGRAMACAO LINEAR

ITERACAO 1

CAPACIDADES INDICADAS		TENSOES (PU)			CUSTOS DE INSTAL.	
LOCAL	MAGNITUDE HVAR	ATUAL	MINIM	MAXIM	(UNID. MONET.)	
BAR3	230	72.72	0.936	0.950	1.090	22.72
BAR4	230	0.00	1.019	1.000	1.090	0.00
BAR5	230	18.30	0.963	1.000	1.090	29.28
BAR6	230	0.00	0.997	1.000	1.090	0.00

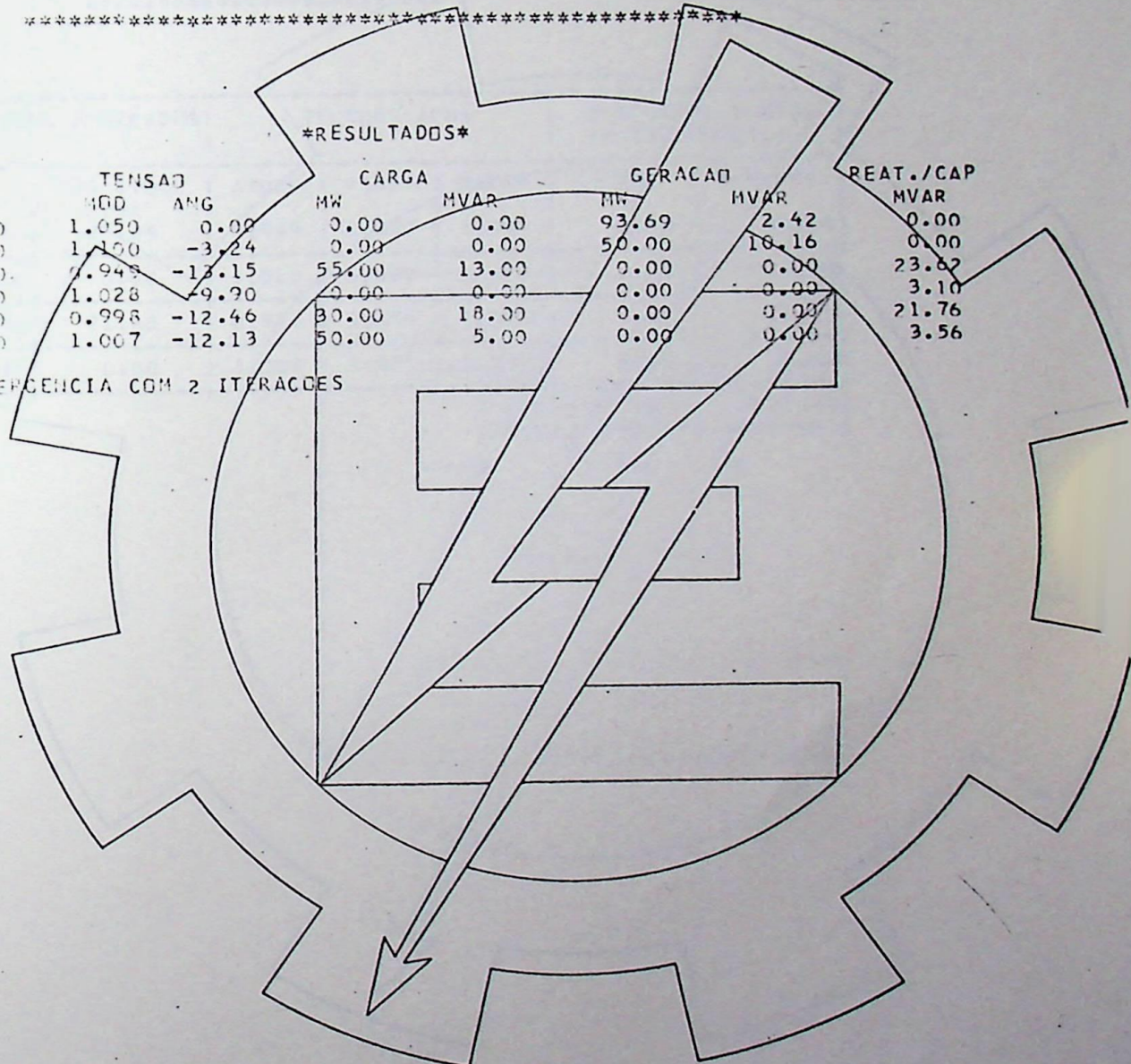


ITERACAO 2

RESULTADOS

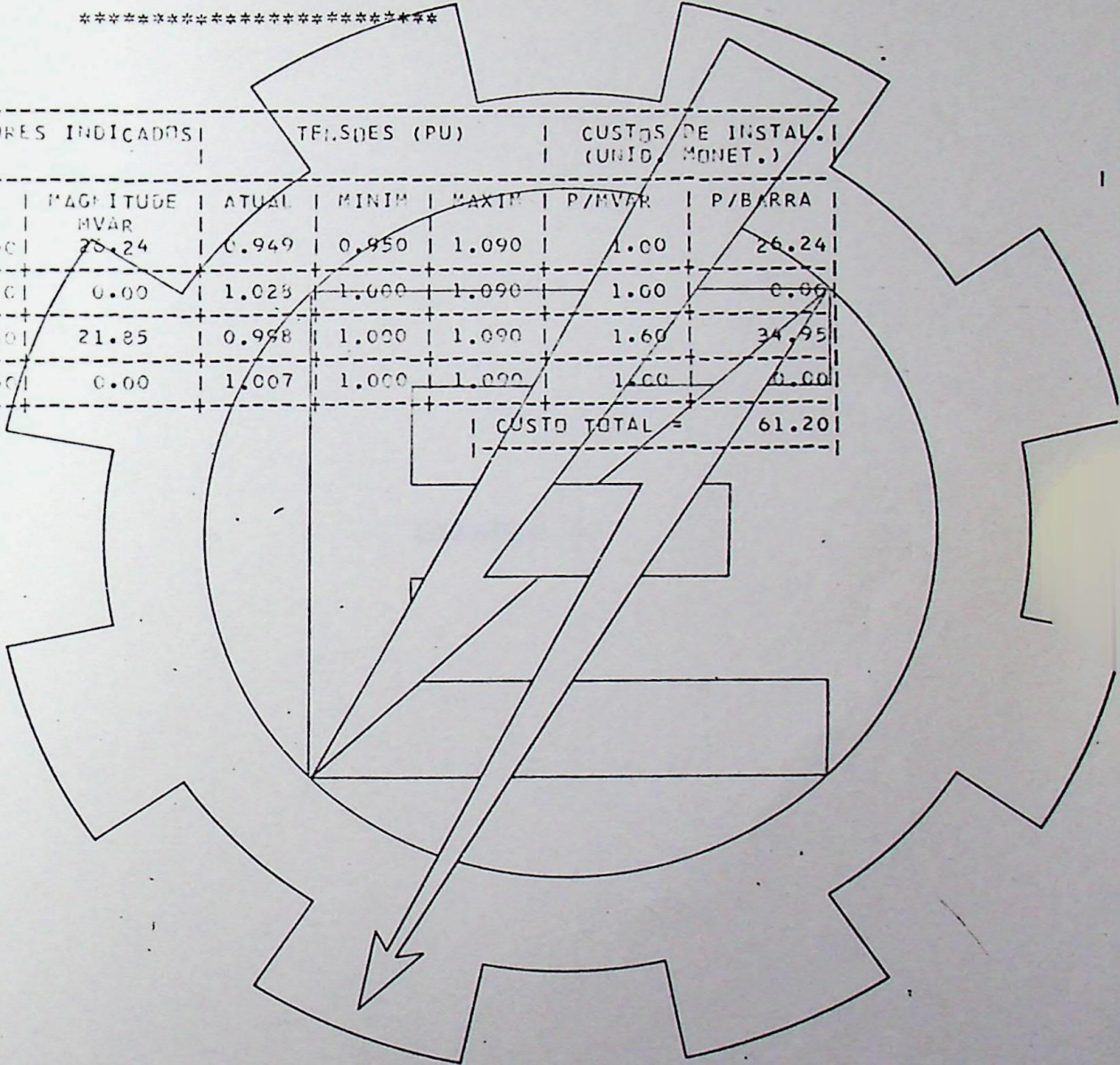
BARRA	TENSÃO	TENSÃO		CARGA		GERACAO		REAT./CAP	
		MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	MVAR
BAR1	230	1.050	0.00	0.00	0.00	93.69	2.42	0.00	0.00
BAR2	230	1.100	-3.24	0.00	0.00	50.00	10.16	0.00	0.00
BAR3	230	0.949	-13.15	55.00	13.00	0.00	0.00	23.62	0.00
BAR4	230	1.028	-9.90	0.00	0.00	0.00	0.00	3.10	0.00
BAR5	230	0.998	-12.46	30.00	18.00	0.00	0.00	21.76	0.00
BAR6	230	1.007	-12.13	50.00	5.00	0.00	0.00	3.56	0.00

OBtida CONVERGENCIA COM 2 ITERACOES



#RELATORIO FINAL#

CAPACIDADES INDICADAS		TENSÕES (PU)			CUSTOS DE INSTAL. (UNID. MONET.)	
LOCAL	MAGNITUDE MVAR	ATUAL	MINIM	MAXIM	P/MVAR	P/BARRA
BAR3	26.24	0.949	0.950	1.090	1.00	26.24
BAR4	0.00	1.023	1.000	1.090	1.00	0.00
BAR5	21.85	0.958	1.000	1.090	1.60	34.95
BAR6	0.00	1.007	1.000	1.090	1.00	0.00
CUSTO TOTAL =						61.20



EXEMPLO 4

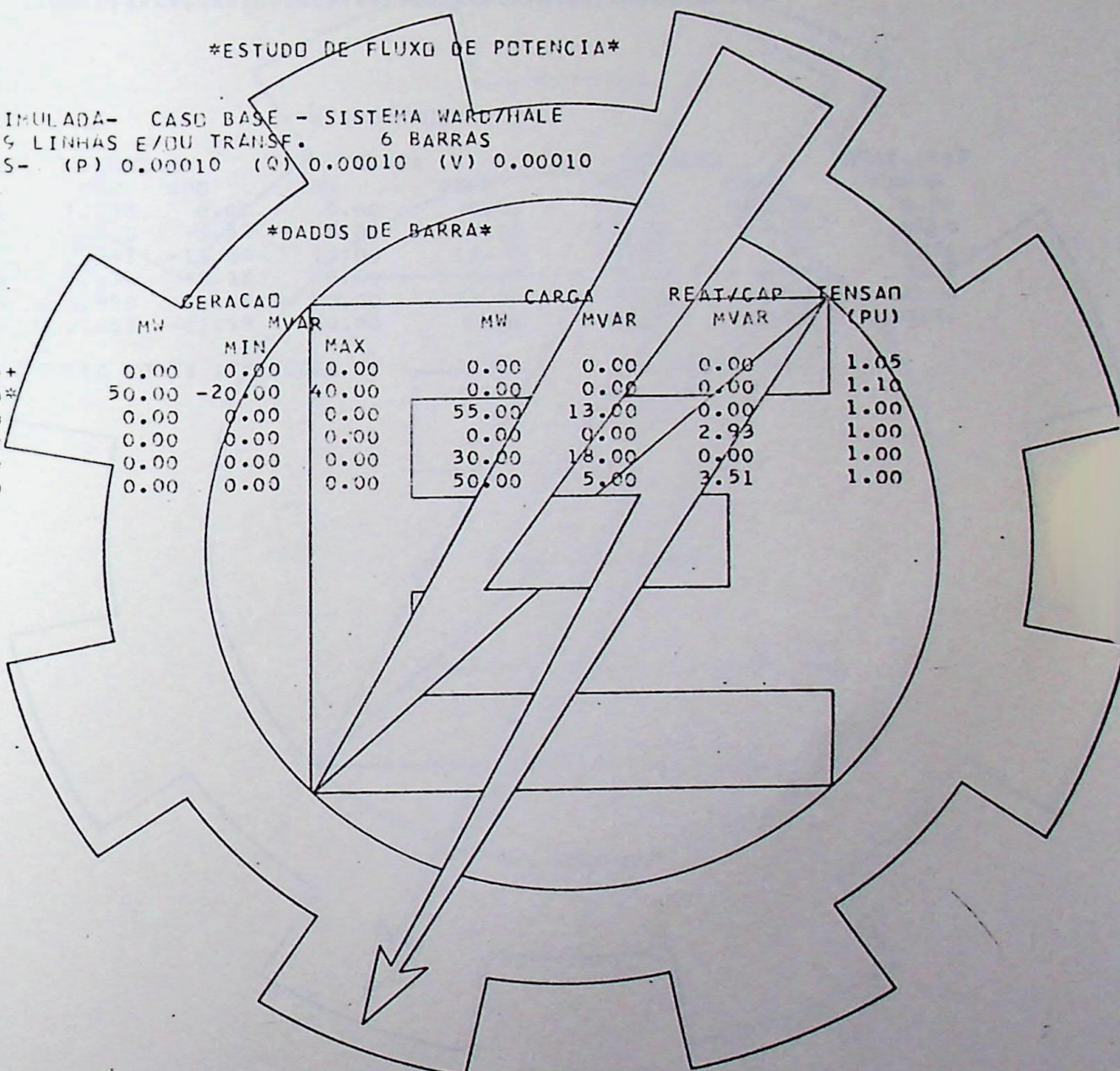
COORDENACAO DOS CURSOS DE POS GRADUACAO

ESTUDO DE FLUXO DE POTENCIA

CONDICAO SIMULADA- CASO BASE - SISTEMA WARD/HALE
9 LINHAS E/DU TRANSF. 6 BARRAS
TOLERANCIAS- (P) 0.00010 (Q) 0.00010 (V) 0.00010

DADOS DE BARRA

BARRA		GERACAO		CARGA		REAT/CAP	TENSAN (PU)
		MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	
BAR1	230+	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05
BAR2	230*	50.00	-20.00	0.00	0.00	0.00	1.10
BAR3	230	0.00	0.00	55.00	13.00	0.00	1.00
BAR4	230	0.00	0.00	0.00	0.00	2.93	1.00
BAR5	230	0.00	0.00	30.00	18.00	0.00	1.00
BAR6	230	0.00	0.00	50.00	5.00	3.51	1.00

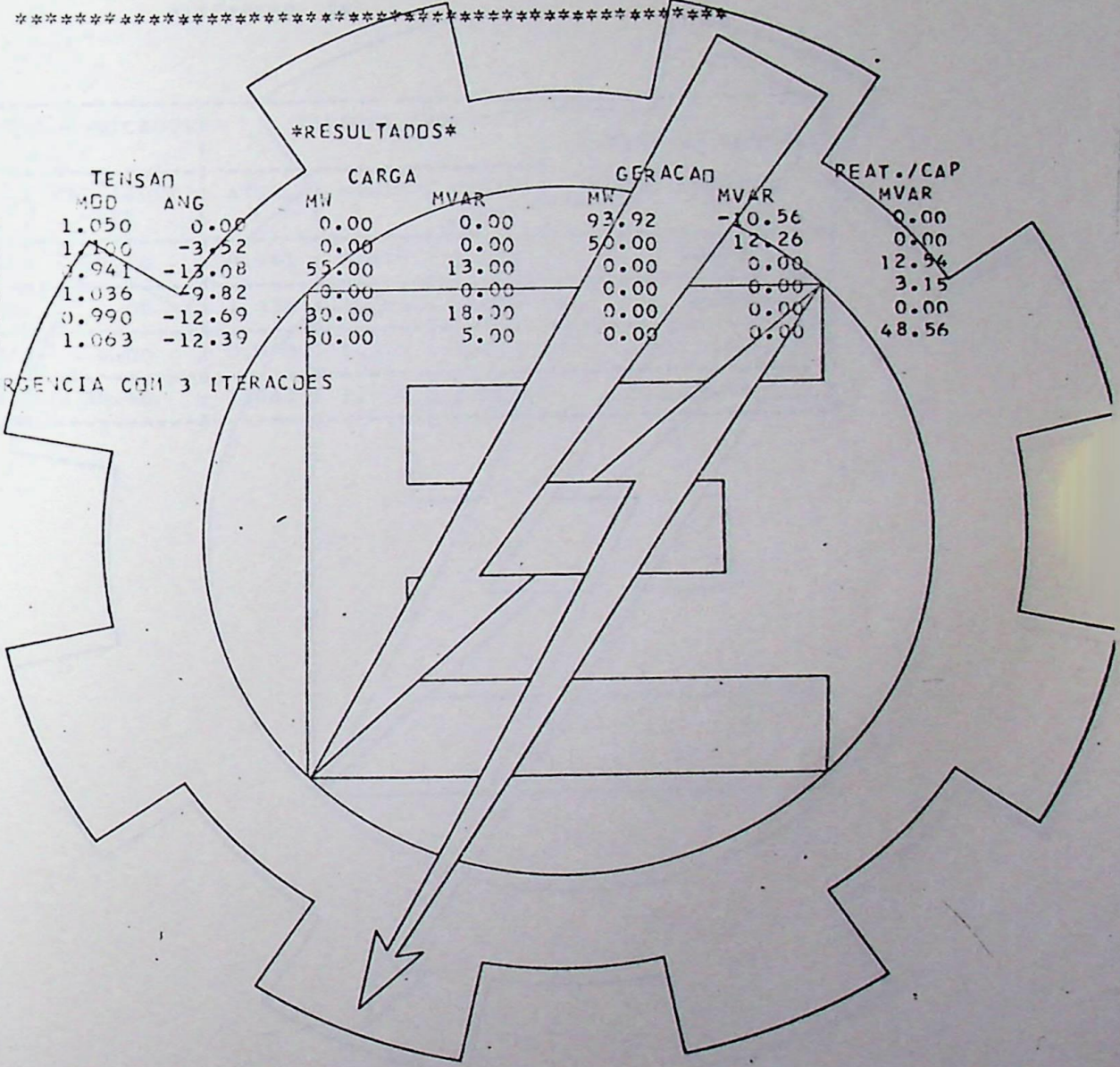


ITERACAO 1

RESULTADOS

BARRA	TENSÃO	TENSÃO		CARGA		GERACAO		REAT./CAP
		MDD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
BAR1	230	1.050	0.00	0.00	0.00	93.92	-10.56	0.00
BAR2	230	1.100	-3.52	0.00	0.00	50.00	12.26	0.00
BAR3	230	1.941	-13.08	55.00	13.00	0.00	0.00	12.94
BAR4	230	1.036	-9.82	0.00	0.00	0.00	0.00	3.15
BAR5	230	0.990	-12.69	30.00	18.00	0.00	0.00	0.00
BAR6	230	1.063	-12.39	50.00	5.00	0.00	0.00	48.56

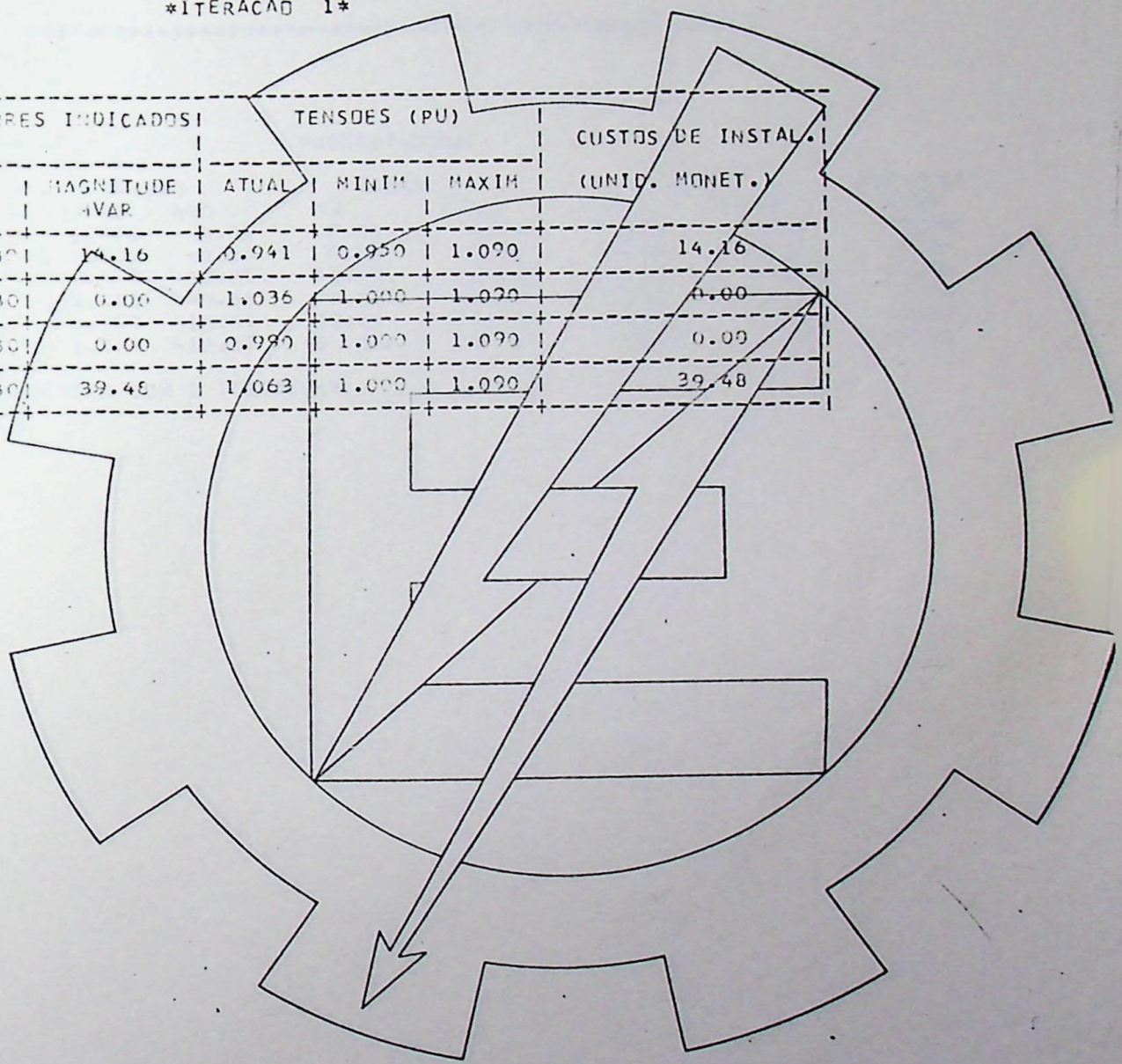
OBtida CONVERGENCIA COM 3 ITERACOES



RELATORIO DA PROGRAMACAO LINEAR

ITERACAO 1

CAPACITORES INDICADOS		TENSOES (PU)			CUSTOS DE INSTAL.	
LOCAL	MAGNITUDE AVAR	ATUAL	MINIM	MAXIM	(UNID. MONET.)	
BAR3	230	14.16	0.941	0.950	1.000	14.16
BAR4	230	0.00	1.036	1.000	1.000	0.00
BAR5	230	0.00	0.990	1.000	1.000	0.00
BAR6	230	39.48	1.063	1.000	1.000	39.48

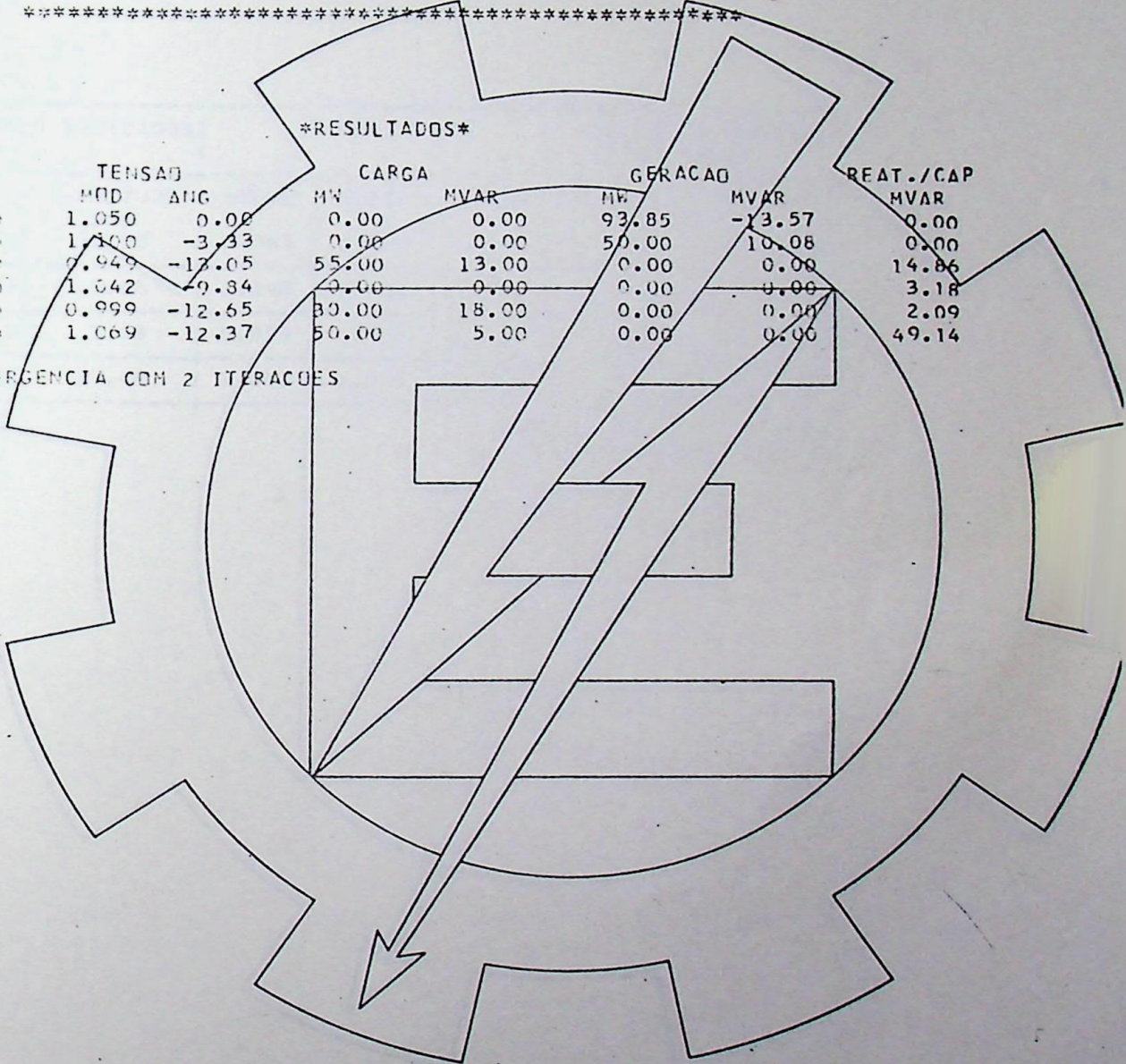


ITERACAO 2

RESULTADOS

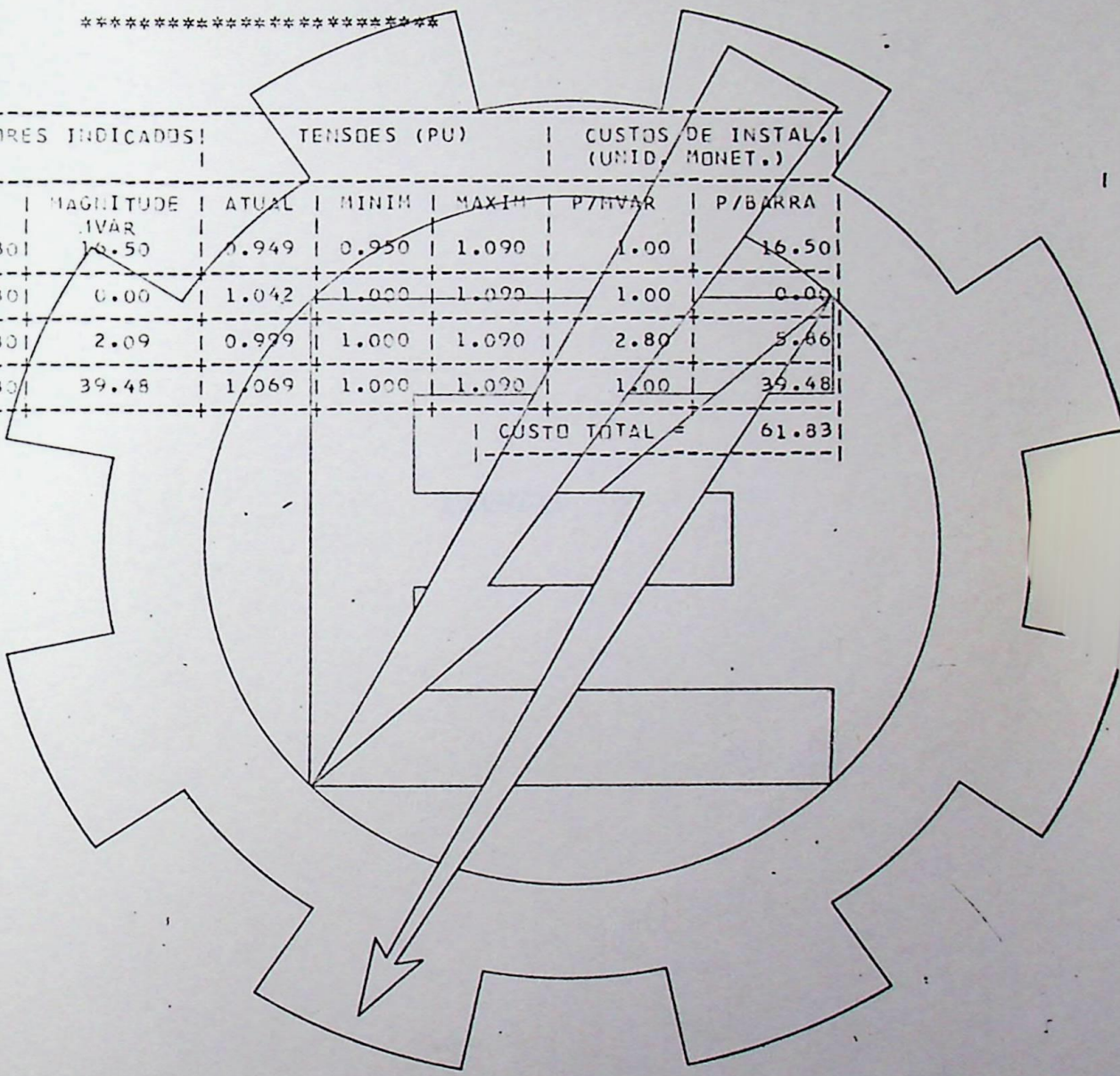
BARRA		TENSÃO		CARGA		GERACAO		REAT./CAP
		MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
BAR1	230	1.050	0.00	0.00	0.00	93.85	-13.57	0.00
BAR2	230	1.100	-3.33	0.00	0.00	50.00	10.08	0.00
BAR3	230	0.949	-13.05	55.00	13.00	0.00	0.00	14.86
BAR4	230	1.042	-9.84	0.00	0.00	0.00	0.00	3.18
BAR5	230	0.999	-12.65	30.00	18.00	0.00	0.00	2.09
BAR6	230	1.069	-12.37	50.00	5.00	0.00	0.00	49.14

OBtida CONVERGENCIA COM 2 ITERACOES



RELATORIO FINAL

CAPACITORES INDICADOS:		TENSÕES (PU)			CUSTOS DE INSTAL.	
LOCAL	MAGNITUDE	ATUAL	MINIM	MAXIM	P/INVAR	P/BARRA
BAR3	230 16.50	0.949	0.950	1.090	1.00	16.50
BAR4	230 0.00	1.042	1.000	1.090	1.00	0.00
BAR5	230 2.09	0.979	1.000	1.090	2.80	5.86
BAR6	230 39.48	1.069	1.000	1.090	1.00	39.48
CUSTO TOTAL =						61.83



EXEMPLO 5

ESTUDO DE FLUXO DE POTENCIA

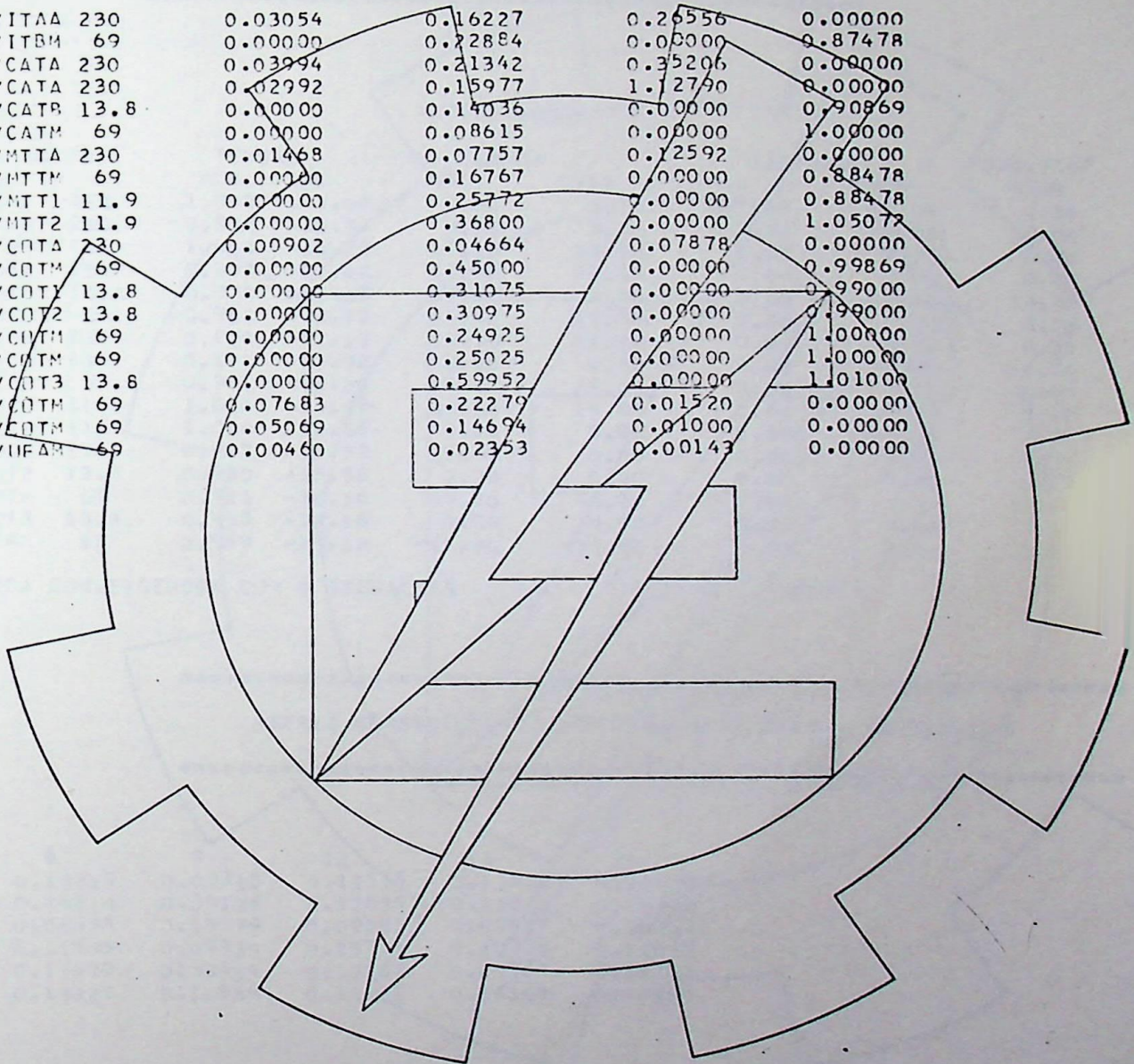
CONDICAO SIMULADA-SISTEMA SUL-CASO BASE-CARGA MAXIMA
 20 LINHAS E/OU TRANSF. 16 BARRAS
 TOLERANCIAS- (P) 0.00010 (Q) 0.00010 (V) 0.00010

DADOS DE BARRA

BARRA	GERACAO MW	MVAR		CARGA		REACT/CAP MVAR	TENSAO (PU)
		MIN	MAX	MW	MVAR		
PAA 230 +	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04
ITAA 230	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92
ITBM 69	0.00	0.00	0.00	47.10	25.10	0.00	0.99
CATA 230	0.00	0.00	0.00	58.40	-5.00	0.00	0.88
CATB 13.8	0.00	0.00	0.00	7.60	7.90	14.40	0.98
CATM 69	0.00	0.00	0.00	24.80	12.50	0.00	0.98
COTA 230	0.00	0.00	0.00	36.30	38.60	0.00	0.87
MTTA 230	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85
MTTM 69	0.00	0.00	0.00	60.10	27.00	0.00	0.95
MTT1 11.9*	0.00	10.00	20.00	40.00	14.00	7.80	1.01
MTT2 11.9*	0.00	10.00	20.00	0.00	0.00	7.00	1.00
COT1 13.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93
COT2 13.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.40	0.94
COTM 69	0.00	0.00	0.00	26.30	40.10	20.40	0.96
COT3 13.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.20	1.01
UFAM 69	0.00	0.00	0.00	-15.00	-53.00	0.00	0.98

CARACTERISTICAS DE LINHAS E TRANSF.

LINHAS/TRAPOS	RESIST.	REAT.	ADMIT.	TAP
PAA 230 /ITAA 230	0.03054	0.16227	0.26556	0.00000
ITAA 230 /ITBM 69	0.00000	0.22884	0.00000	0.87478
ITAA 230 /CATA 230	0.03994	0.21342	0.35206	0.00000
PAA 230 /CATA 230	0.02992	0.15977	1.12790	0.00000
CATA 230 /CATB 13.8	0.00000	0.14036	0.00000	0.90869
CATB 13.8 /CATM 69	0.00000	0.08615	0.00000	1.00000
CATA 230 /MTTA 230	0.01468	0.07757	0.12592	0.00000
MTTA 230 /MTM 69	0.00000	0.16767	0.00000	0.88478
MTTA 230 /MTL 11.9	0.00000	0.25772	0.00000	0.88478
MTM 69 /MTT2 11.9	0.00000	0.36800	0.00000	1.05072
CATA 230 /COTA 230	0.00902	0.04664	0.07878	0.00000
COTA 230 /COTM 69	0.00000	0.45000	0.00000	0.99869
COTA 230 /COT1 13.8	0.00000	0.31075	0.00000	0.99000
COTA 230 /COT2 13.8	0.00000	0.30975	0.00000	0.99000
COT1 13.8 /COTM 69	0.00000	0.24925	0.00000	1.00000
COT2 13.8 /COTM 69	0.00000	0.25025	0.00000	1.00000
COTM 69 /COT3 13.8	0.00000	0.59952	0.00000	1.01000
CATM 69 /COTM 69	0.07683	0.22279	0.01520	0.00000
MTM 69 /COTM 69	0.05069	0.14694	0.01000	0.00000
COTM 69 /UFAB 69	0.00460	0.02353	0.00143	0.00000



CASO BASE

RESULTADOS

BARRA	TENSÃO		CARGA		GERAÇÃO		REAT./CAP MVAR
	MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	
PAA 230	1.039	0.00	0.00	0.00	437.35	86.04	0.00
ITAA 230	0.935	-13.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ITBM 69	1.506	-19.29	47.10	25.10	0.00	0.00	0.00
CATA 230	0.893	-27.42	59.40	-5.00	0.00	0.00	0.00
CATB 13.8	0.978	-32.17	7.60	2.90	0.00	0.00	13.78
CATM 69	0.968	-34.72	24.80	12.50	0.00	0.00	0.00
CUTA 230	0.876	-32.13	36.30	38.30	0.00	0.00	0.00
MTTA 230	0.871	-32.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MTM 69	0.961	-38.68	60.10	27.00	0.00	0.00	0.00
MTT1 11.9	1.014	-38.95	40.00	14.00	0.00	19.83	8.07
MTT2 11.9	1.000	-38.66	0.00	0.00	0.00	16.22	7.00
COT1 13.8	0.923	-35.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
COT2 13.8	0.950	-35.58	0.00	0.00	0.00	0.00	4.67
COTM 69	0.955	-38.16	86.30	40.10	0.00	0.00	18.61
COT3 13.8	0.958	-38.16	0.00	0.00	0.00	0.00	7.03
UFAM 69	0.969	-38.10	-15.00	-53.00	0.00	0.00	0.00

OBtida CONVERGENCIA COM 3 ITERACOES

MATRIZ SENSIBILIDADE REDUZIDA AS BARRAS OPERACIONAIS*

	5	6	9	12	13	14
5	0.20920	0.18815	0.03316	0.11514	0.11512	0.11923
6	0.18639	0.24210	0.09125	0.12635	0.12630	0.13728
9	0.07339	0.08073	0.15379	0.09683	0.09677	0.10967
12	0.10477	0.11595	0.09350	0.28779	0.19785	0.14673
13	0.10553	0.11677	0.09414	0.13867	0.28987	0.14769
14	0.11217	0.13027	0.10958	0.15181	0.15168	0.18160

*ITERACAO 1 *

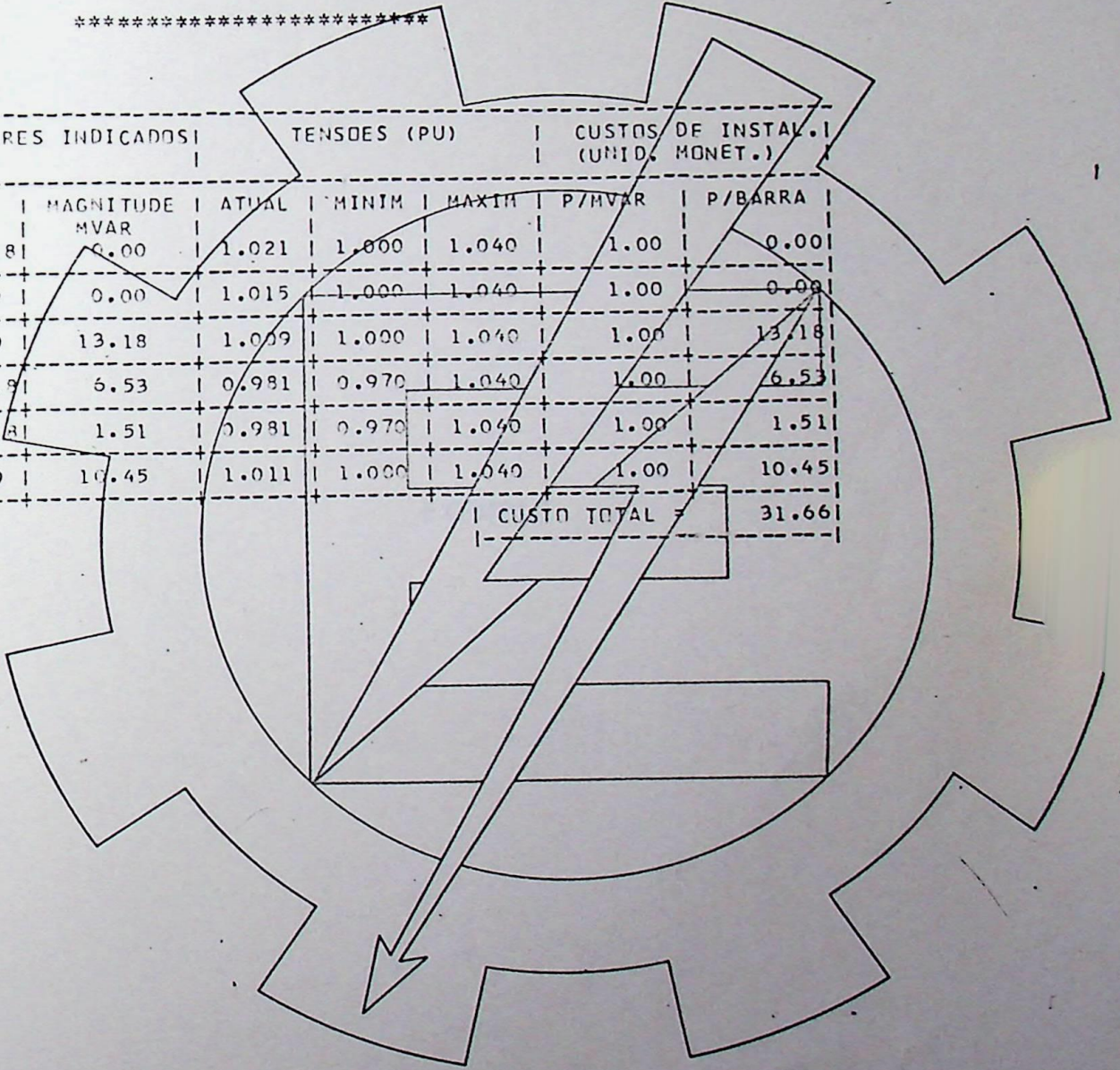
RESULTADOS

BARRA	TENSÃO		CARGA		GERACAO		REAT./CAP
	MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	
PAA 230	1.039	0.00	0.00	0.00	435.47	53.09	0.00
ITAA 230	0.952	-13.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ITRM 69	1.027	-18.94	47.10	25.10	0.00	0.00	0.00
CATA 230	0.926	-26.66	58.40	-5.00	0.00	0.00	0.00
CATB 13.8	1.021	-31.03	7.60	2.90	0.00	0.00	15.02
CATM 69	1.015	-33.36	24.80	12.50	0.00	0.00	0.00
COTA 230	0.917	-31.10	36.30	38.80	0.00	0.00	0.00
MTTA 230	0.901	-31.71	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MTTM 69	1.009	-36.74	60.10	27.00	0.00	0.00	13.41
MTT1 11.9	1.014	-37.43	40.00	14.00	0.00	6.28	8.02
MTT2 11.9	1.000	-36.94	0.00	0.00	0.00	3.80	7.00
COT1 13.8	0.981	-34.26	0.00	0.00	0.00	0.00	6.28
COT2 13.8	0.981	-34.25	0.00	0.00	0.00	0.00	6.65
COTM 69	1.011	-36.59	86.30	40.10	0.00	0.00	31.51
COT3 13.8	1.046	-34.59	0.00	0.00	0.00	0.00	7.87
UFAM 69	1.023	-36.53	-15.00	-53.00	0.00	0.00	0.00

OBTIDA CONVERGENCIA COM 2 ITERACOES

RELATORIO FINAL

CAPACITORES INDICADOS		TENSOES (PU)			CUSTOS DE INSTAL. (UNID. MONET.)	
LOCAL	MAGNITUDE MVAR	ATUAL	MINIM	MAXIM	P/MVAR	P/BARRA
CATB 13.81	0.00	1.021	1.000	1.040	1.00	0.00
CATM 69	0.00	1.015	1.000	1.040	1.00	0.00
MTM 69	13.18	1.009	1.000	1.040	1.00	13.18
COT1 13.81	6.53	0.981	0.970	1.040	1.00	6.53
COT2 13.81	1.51	0.981	0.970	1.040	1.00	1.51
COTM 69	10.45	1.011	1.000	1.040	1.00	10.45
CUSTO TOTAL =						31.66



EXEMPLO 6

ESTUDO DE FLUXO DE POTENCIA

CONDICAO SIMULADA-SISTEMA SIN-CASO BASE-CARGA MAXIMA
 20 LINHAS E/OU TRANSF. 16 BARRAS
 TOLERANCIAS- (P) 0.00010 (Q) 0.00010 (V) 0.00010

DADOS DE BARRA

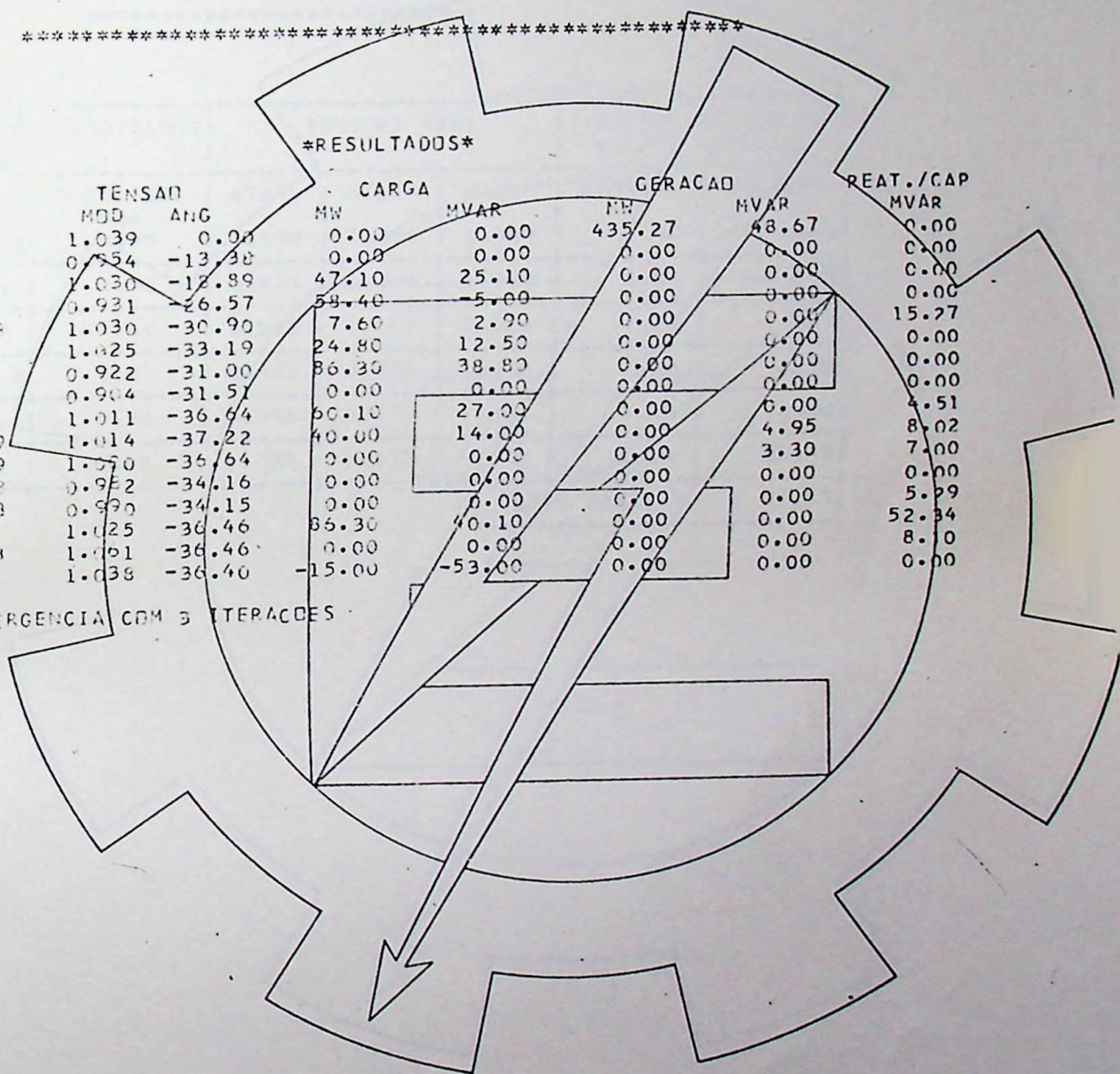
BARRA	GERACAO	GERACAO		CARGA		REAT/CAP		TENSAO (PU)
		MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	MVAR	
		MIN	MAX					
BA2	230 +	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04
ITAA	230	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92
ITEP	69	0.00	0.00	0.00	47.10	25.10	0.00	0.99
CATA	230	0.00	0.00	0.00	58.40	-5.00	0.00	0.88
CATB	13.8	0.00	0.00	0.00	7.50	2.90	14.40	0.98
CATC	69	0.00	0.00	0.00	24.80	12.50	0.00	0.98
CATA	230	0.00	0.00	0.00	55.30	38.87	0.00	0.87
MTTA	230	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85
MTTB	69	0.00	0.00	0.00	60.10	27.00	0.00	0.95
MTT1	11.9*	0.00	-10.00	20.00	40.00	14.00	7.80	1.01
MTT2	11.9*	0.00	-10.00	20.00	0.00	0.00	7.00	1.00
CCT1	13.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93
CCT2	13.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.40	0.94
CCTB	69	0.00	0.00	0.00	85.30	40.10	20.40	0.96
CCTC	13.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.20	1.01
MFAM	69	0.00	0.00	0.00	-15.00	-53.00	0.00	0.98

ITERACAO 1

RESULTADOS

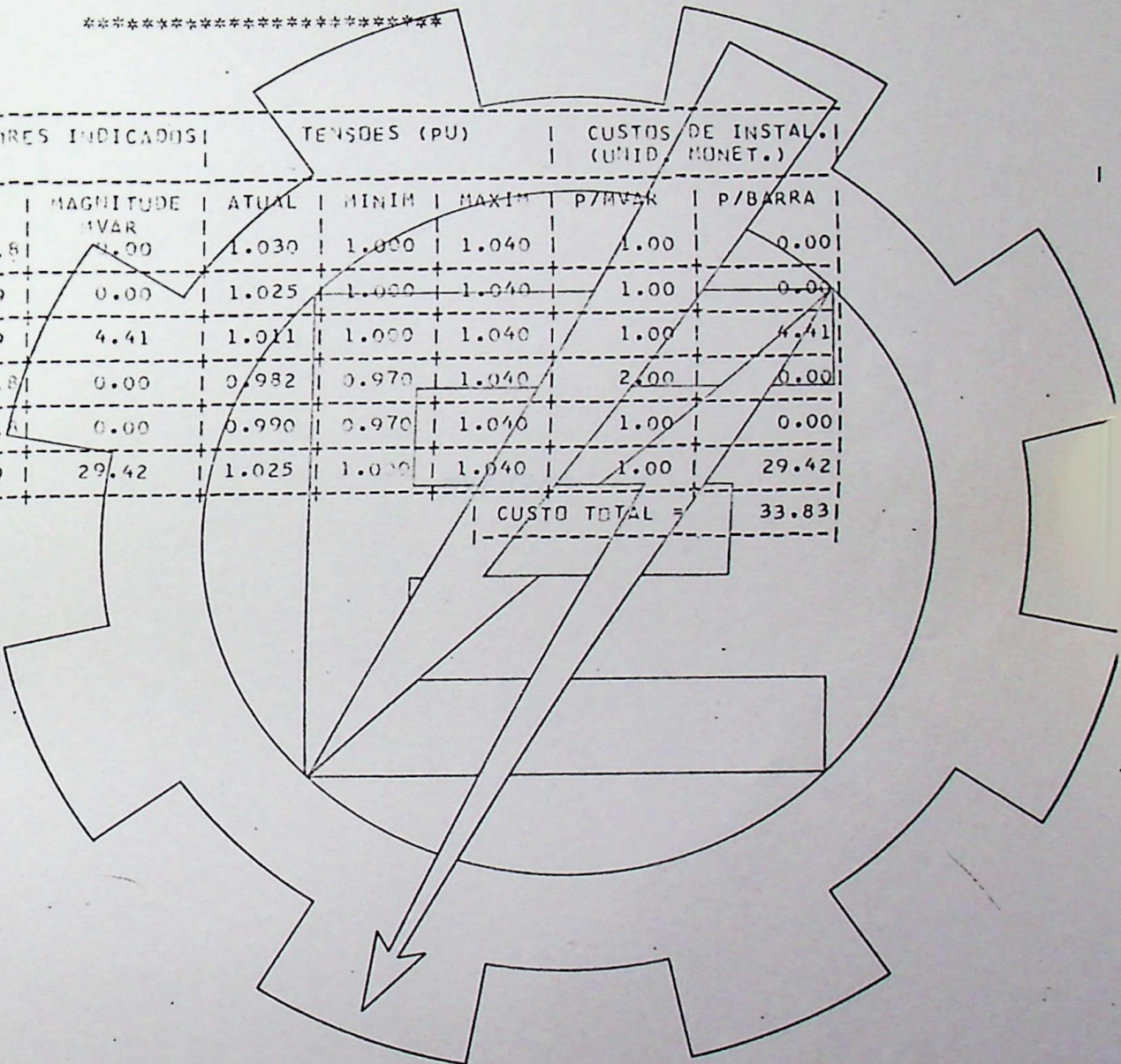
BAPRA	TENSÃO		CARGA		GERACAO		REAT./CAP	
	MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	
PAA 230	1.039	0.00	0.00	0.00	435.27	48.67	0.00	
ITAA 230	0.954	-13.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ITPI 69	1.030	-12.89	47.10	25.10	0.00	0.00	0.00	
CATA 230	0.931	-26.57	58.40	-5.00	0.00	0.00	0.00	
CATB 13.8	1.030	-30.90	7.60	2.90	0.00	0.00	15.27	
CATM 69	1.025	-33.19	24.80	12.50	0.00	0.00	0.00	
CBTA 230	0.922	-31.00	86.30	38.80	0.00	0.00	0.00	
CTTA 230	0.904	-31.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
MTTM 69	1.011	-36.64	60.10	27.00	0.00	0.00	4.51	
MTT1 11.9	1.014	-37.22	40.00	14.00	0.00	4.95	8.02	
MTT2 11.9	1.050	-36.64	0.00	0.00	0.00	3.30	7.00	
CT11 13.8	0.982	-34.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CT2 13.8	0.990	-34.15	0.00	0.00	0.00	0.00	5.99	
CTM 69	1.025	-36.46	86.30	40.10	0.00	0.00	52.34	
CTB 13.8	1.001	-36.46	0.00	0.00	0.00	0.00	8.10	
CTA 69	1.038	-36.40	-15.00	-53.00	0.00	0.00	0.00	

TODIDA CONVERGENCIA COM 3 ITERACOES



RELATORIO FINAL

CAPACIDADES INDICADAS		TENSÕES (PU)			CUSTOS DE INSTAL. (UNID. MONET.)	
LOCAL	MAGNITUDE	ATUAL	MINIM	MAXIM	P/MVAR	P/BARRA
CATB 13.8	0.00	1.030	1.000	1.040	1.00	0.00
CATM 59	0.00	1.025	1.000	1.040	1.00	0.00
FTTM 59	4.41	1.011	1.000	1.040	1.00	4.41
CCT1 13.8	0.00	0.982	0.970	1.040	2.00	0.00
CCT2 13.8	0.00	0.990	0.970	1.040	1.00	0.00
CGTM 59	29.42	1.025	1.000	1.040	1.00	29.42
CUSTO TOTAL =						33.83



EXEMPLO 7

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

COORDENACAO DOS CURSOS DE POS GRADUACAO

ESTUDO DE FLUXO DE POTENCIA

CONDICAO SIMULADA-SISTEMA SUL-CASO BASE-CARGA MAXIMA
20 LINHAS E/OU TRAF. 16 BARRAS
TOLERANCIAS- (P) 0.00010 (Q) 0.00010 (V) 0.00010

DADOS DE BARRA

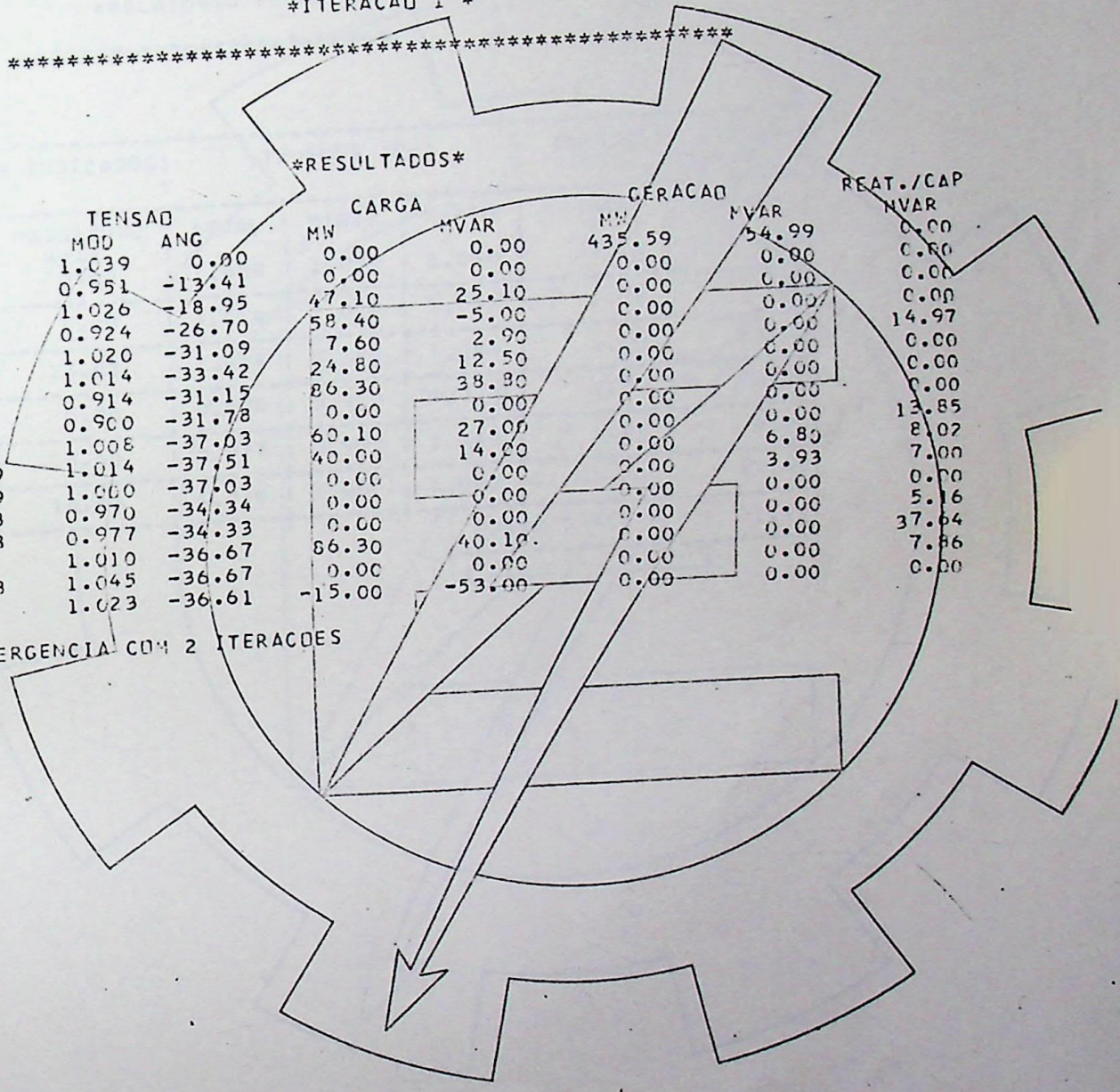
BARRA		GERACAO		CARGA		REAT/CAP MVAR	TENSAO (PU)
		MW	MVAR	MW	MVAR		
PAA	230 +	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04
ITAA	230	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92
ITBM	69	0.00	0.00	47.10	25.10	0.00	0.99
CATA	230	0.00	0.00	58.40	-5.00	0.00	0.88
CATB	13.8	0.00	0.00	7.60	2.90	14.40	0.98
CATM	69	0.00	0.00	24.80	-12.50	0.00	0.98
COTA	230	0.00	0.00	56.30	38.80	0.00	0.87
MTTA	230	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85
MTTM	69	0.00	0.00	60.10	27.00	0.00	0.95
MTT1	11.9*	0.00	-10.00	20.00	40.00	7.80	1.01
MTT2	11.9*	0.00	-10.00	20.00	0.00	7.00	1.00
COT1	13.8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93
COT2	13.8	0.00	0.00	0.00	0.00	5.40	0.94
COTM	69	0.00	0.00	56.30	40.10	20.40	0.96
COT3	13.8	0.00	0.00	0.00	0.00	7.20	1.01
UFAM	69	0.00	0.00	-15.00	-53.00	0.00	0.98

*ITERACAO 1 *

RESULTADOS

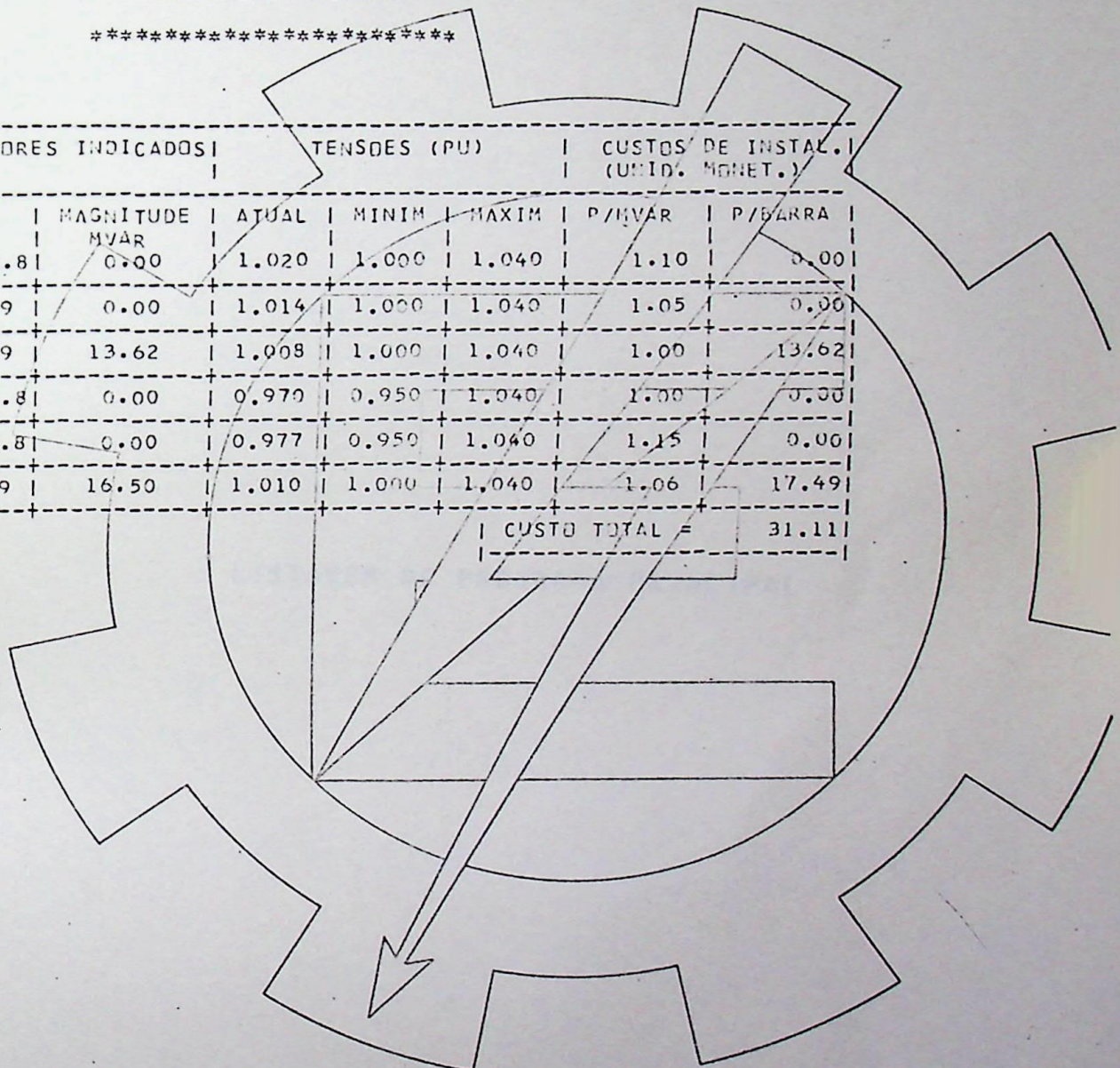
BARRA	TENSÃO		CARGA		GERACAO		REACT./CAP	
	MOD	ANG	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR	
PAA 230	1.039	0.00	0.00	0.00	435.59	54.99	0.00	0.00
ITAA 230	0.951	-13.41	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ITBH 69	1.026	-18.95	47.10	25.10	0.00	0.00	0.00	0.00
CATA 230	0.924	-26.70	58.40	-5.00	0.00	0.00	14.97	0.00
CATB 13.8	1.020	-31.09	7.60	2.90	0.00	0.00	0.00	0.00
CATM 69	1.014	-33.42	24.80	12.50	0.00	0.00	0.00	0.00
COTA 230	0.914	-31.15	86.30	38.30	0.00	0.00	0.00	0.00
MTTA 230	0.900	-31.78	0.00	0.00	0.00	0.00	13.85	0.00
MTTM 69	1.008	-37.03	60.10	27.00	0.00	0.00	6.80	8.02
MTT1 11.9	1.014	-37.51	40.00	14.00	0.00	0.00	3.93	7.00
MTT2 11.9	1.000	-37.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
COT1 13.8	0.970	-34.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.16
COT2 13.8	0.977	-34.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	37.64
COTM 69	1.010	-36.67	86.30	40.10	0.00	0.00	0.00	7.86
COT3 13.8	1.045	-36.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
UFAM 69	1.023	-36.61	-15.00	-53.00	0.00	0.00	0.00	0.00

OBTIDA CONVERGENCIA COM 2 ITERACOES



RELATORIO FINAL

CAPACITORES INDICADOS		TENSOES (PU)			CUSTOS DE INSTAL. (UNID. MONET.)	
LOCAL	MAGNITUDE MVAR	ATUAL	MINIM	MAXIM	P/MVAR	P/BARRA
CATB 13.8	0.00	1.020	1.000	1.040	1.10	0.00
CATM 69	0.00	1.014	1.000	1.040	1.05	0.00
MTM 69	13.62	1.008	1.000	1.040	1.00	13.62
CBT1 13.8	0.00	0.979	0.950	1.040	1.00	0.00
CBT2 13.8	0.00	0.977	0.950	1.040	1.15	0.00
CBTM 69	16.50	1.010	1.000	1.040	1.06	17.49
CUSTO TOTAL =						31.11



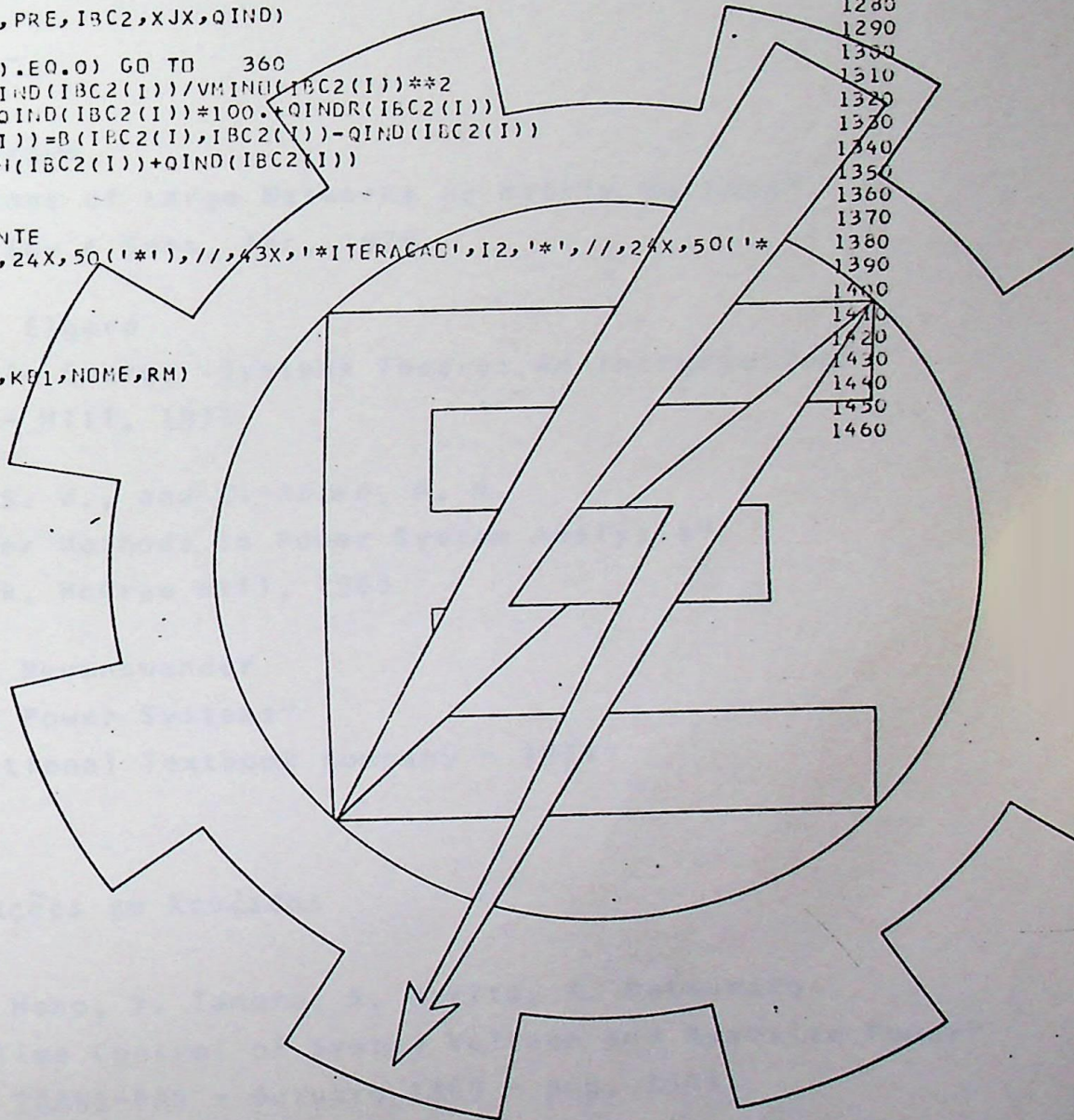
LISTAGEM DE PROGRAMA PRINCIPAL

C		10
C		20
C	OTIMIZACAO ESTATICA DE FONTES DE REATIVOS	30
C	PROCESSO ITERATIVO UTILIZANDO PARAMETROS DE	40
C	SENSIBILIDADE E PROGRAMACAO LINEAR	50
C		60
C		70
C	-----PROGRAMA PRINCIPAL	80
	DIMENSION IBC2(20)	90
	DIMENSION IZ(20),QIND(20),RQ(20)	100
	COMMON G(30,30),B(30,30),RM(30),AG(30),P(30,2),KBA,IBCON(20),XJX(2	110
	10,20),PG1(30),OG1(30),PC1(30),QC1(30),A(30),KT(30),KC(30),TITUL(30	120
	1),RPM(30),RPI(30),VE(30),PA(30,2),OSH(30),NOME(30,2),PL(30,30,2),E	130
	1(30,2),AC(30,30),EJ(79,79),NL,NA,IS,TOR,TDI,TOV,BASE	140
	COMMON/U/ VMIN(20),VMAX(20),QINDR(20),IBC1(20),PRE(20)	150
C		160
	DO 241 I=1,20	170
	241 QINDR(I)=0.0	180
C	-----LEITURA,IMPRESSAO DE DADOS-FORMACAO DA MATRIZ YBUS	190
	CALL RWYBS	200
C	-----CALCULO DAS TENSORES-FLUXO DE CARGA	210
	NINTE=1	220
	WRITE(1,130)	230
	130 FORMAT(1H1,///,2X,50('!'),//,43X,'!CASO BASE!',//,24X,50('!'))	240
	CALL LDFLOW	250
C	-----FORMACAO DA MATRIZ JX	260
C	-----DETERMINACAO DAS BARRAS SUSCEPTIVEIS DE CONTROLE DE TENSAO	270
	KBA=0	280
	IBC=1	290
	DO 100 IW=1,NA	300
	IF(IW.EQ.IS) GO TO 100	310
	IF(KT(IW).EQ.0) GO TO 20	320
	IF(KC(IW).EQ.0) GO TO 100	330
	20 KBA=KBA+1	340
	IBCON(IBC)=IW	350
	IBC=IBC+1	360
	100 CONTINUE	370
C	-----KBA=NUMERO DE BARRAS PARA FORMACAO DE JX	380
C	-----IBCON=NUMERACAO SEQUENCIAL DAS BARRAS DE JX	390
C	-----CALCULO DE JX	400
	CALL XJAX	410
	CALL INV(XJX,KBA,20,0.00001)	420
C	-----FORMACAO DA MATRIZ SENSIBILIDADE REDUZIDA AS BARRAS OPERACIONAIS	430
C	-----LEITURA DO NUMERO DE BARRAS OPERACIONAIS E DESIGNACAO	440
	READ(12,110) KB1	450
	110 FORMAT(15)	460
	DO 250 I=1,KB1	470
C	LEITURA DOS LIMITES DE TENSAO DESEJADOS	480
	READ(12,120) IBC1(I),VMIN,VMAX,PREC	490
	120 FORMAT(15,3F10.5)	500
	ITE=IBC1(I)	510
	RQ(I)=VMIN-RM(ITE)	520
	RQ(I+KB1)=VMAX-RM(ITE)	530
	VMIND(ITE)=VMIN	540
	VMAXD(ITE)=VMAX	550
	PRE(ITE)=-PREC	560
	250 CONTINUE	570
	160 CONTINUE	580
C	-----MONTAGEM DA MATRIZ SENSIBILIDADE COM BARRAS OPERACIONAIS APENAS	590
	IP=1	600
	DO 190 I=1,KB1	610

DO 190 J=1,KB1	620
IF(IBC0N(I).EQ.IBC1(J)) GO TO 170	630
GO TO 190	640
170 IZ(IP)=I	650
IP=IP+1	660
190 CONTINUE	670
DO 200 I=1,KB1	680
DO 200 J=1,KB1	690
IVI=IZ(I)	700
IVJ=IZ(J)	710
XJX(I,J)=XJX(IVI,IVJ)	720
200 CONTINUE	730
C-----IMPRESSAO DA MATRIZ SENSIBILIDADE REDUZIDA	740
WRITE(1,210)	750
210 FORMAT(1H0,///,27X,66('*'),///,32X,'MATRIZ SENSIBILIDADE REDUZIDA AS	760
1 BARRAS (OPERACIONAIS*'),///,27X,66('*'),///)	770
WRITE(1,220) (IBC1(I),I=1,KB1)	780
220 FORMAT(1H0,6X,12,9I10)	790
DO 240 I=1,KB1	800
WRITE(1,230) IBC1(I),(XJX(I,J),J=1,KB1)	810
230 FORMAT(1H ,12,10F10.5)	820
240 CONTINUE	830
C-----CHAMADA DA SUBROTINA DE PROGRAMACAO LINEAR	840
CALL LPS (KB1,RQ,PRE,IBC1,XJX,QIND)	850
C-----DETERMINACAO DO VALOR DOS CAPACITORES QUE CORRESPONDEM A POT. REATIVA	860
C-----INDICADA	870
DO 260 I=1,20	880
IF(QIND(IBC1(I)).EQ.0.) GO TO 260	890
QIND(IBC1(I))=QIND(IBC1(I))/VMIND(IBC1(I))**2	900
QINDR(IBC1(I))=QIND(IBC1(I))*100.+QINDR(IBC1(I))	910
C-----MODIFICACAO NA MATRIZ Y APÓS ADICAO DOS NOVOS CAPACITORES	920
B(IBC1(I),IBC1(I))=B(IBC1(I),IBC1(I))-QIND(IBC1(I))	930
QSH(IBC1(I))=QSH(IBC1(I))+QIND(IBC1(I))	940
260 CONTINUE	950
WRITE(1,261)	960
261 FORMAT(1H1,////,24X,50('*'),///,43X,'*ITERACAO 1 *',///,24X,50('*'))	970
C-----PROCESSAMENTO DE FLUXO DE POTENCIA	980
CALL LOFLOW	990
265 SET=0	1000
KZD=0	1010
C VERIF. DAS BARRAS CUJAS TENSOES NAO ATENDEM AS CONDIC0ES DESEJADAS	1020
DO 270 I=1,KB1	1030
RQ(I)=VMIND(IBC1(I))-RM(IBC1(I))	1040
IF(RQ(I).LT.0.003) GO TO 270	1050
KZD=KZD+1	1060
RQ(KZD)=RQ(I)	1070
IBC2(KZD)=IBC1(I)	1080
SET=1	1090
270 CONTINUE	1100
IF(SET.EQ.0) GO TO 400	1110
C-----SUBROTINA PARA IMPRESSAO DE RELATORIO	1120
CALL WRT1(NINTE,KB1,NOME,RM)	1130
IP=1	1140
DO 290 I=1,KB1	1150
C-----ELIMINACAO DE EIXOS NA MATRIZ SENSIBILIDADE	1160
DO 290 J=1,KZD	1170
IF(IBC1(I).EQ.IBC2(J)) GO TO 280	1180
GO TO 290	1190
280 IZ(IP)=I	1200
IP=IP+1	1210
290 CONTINUE	1220

	DO 300 I=1,KZD	1230
	RQ(I+KZD)=VMAXD(IBC2(I))-RM(IBC2(I))	1240
	DO 300 J=1, KZD	1260
	XJX(I,J)=XJX(IZ(I),IZ(J))	1270
300	CONTINUE	1280
	CALL LPS(KZD,RQ,PRE,IBC2,XJX,QIND)	1290
	DO 360 I=1,20	1300
	IF(QIND(IBC2(I)).EQ.0) GO TO 360	1310
	QIND(IBC2(I))=QIND(IBC2(I))/VMIND(IBC2(I))**2	1320
	QINDR(IBC2(I))=QIND(IBC2(I))*100.+QINDR(IBC2(I))	1330
	B(IBC2(I),IBC2(I))=B(IBC2(I),IBC2(I))-QIND(IBC2(I))	1340
	QSH(IBC2(I))=QSH(IBC2(I))+QIND(IBC2(I))	1350
360	CONTINUE	1360
	NINTE=NINTE+1	1370
	WRITE(1,361) NINTE	1380
361	FORMAT(1H1,////,24X,50(' '),//,43X,'*ITERACAO',I2,' ',//,24X,50(' '	1390
	1'))	1400
	CALL LOFLOW	1410
	GO TO 265	1420
400	CONTINUE	1430
	CALL WRT2(NINTE,KE1,NOME,RM)	1440
	STOP	1450
	END	1460

C



ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

7. REFERÊNCIAS

Livros -

- 1 - H. E. Brown
"Solutions of Large Networks by Matrix Methods"
John Wiley & Sons, Inc, 1975
- 2 - Olle I. Elgerd
"Electric Energy Systems Theory: An Introduction"
McGraw - Hill, 1971
- 3 - Stagg, S. W., and El-Abiad, A. H.
"Computer Methods in Power System Analysis"
New York, McGraw Hill, 1968
- 4 - John R. Neuenswander
"Modern Power Systems"
International Textbook company - 1971

Publicações em Revistas

- 5 - Ichiro Hano, Y. Tamura, S. Narita, K. Matsumoto
"Real Time Control of System Voltage and Reactive Power"
IEEE - TRANS-PAS - Outubro 1969 - pag, 1544.
- 6 - J. Peschon, D. S. Piercy, W. F. Tinney and O. J. Tveit
"Sensitivity in Power Systems"
Apresentado na conferencia PICA 1967, Pittsburg, pag. 209.
- 7 - W. F. Tinney, H. W. Dommel
"Steady-State Sensitivity Analysis"
Conferência PSCC, Vol. I, paper 1.3/10, Grenoble, França,
Setembro, 1972,

- 8 - D. Arsov, M. S. A. A. Hammam
"Sensitivity of Load Flow"
Conference Paper C74018-8-IEEE
- 9 - A. Kishore, E. F. Hill
"Static Optimization of Reactive Power Sources by use of
Sensitivity Parameters"
IEEE, TRANS, Vol. PAS-90, pag. 1166, 1971
- 10 - R. Fischl, W. R. Puntel
"Efficient Method for Computing Electric Power Transmission
Network Sensitivities"
Conference Paper C72 167-0-IEEE
- 11 - M. V. Bhat, H. K. Kesavan
"Z Diakoptics in Sensitivity Studies"
Conferece paper C-73082-5-IEEE
- 12 - S. Narita e outros
"Determination of System Characteristic Constants for
Voltage and reactive Power Control Based Upon Sensitivity
Matrices"
J. IEEE (Japan)
- 13 - Savulescu, C.
"La sensibilit  des pertes de transport dans les R seaux
d' nergie"
Revue E, Vol. VI, n  6, 1970, pag. 197, Bruxelles.
- 14 - A. J. P. Ramos, F. L. Alves, I. V. Pedrosa, N. R. França
e S. J. N. Cysneiros
"Sensibilidade em Sistemas de Energia Elétrica"
Publica o da Diretoria de Opera o/CHESF, Recife, 1973
- 15 - A. M. Pretelt
"Automatic Allocation of Network Capacitors"
IEEE, PAS, Jan/Fevereiro, 1971, pag. 54

- 16 - Raymond M. Maliszewski, Len L. Garver e Allen J. Wood
"Linear Programming as an Aid in Planning Kilovar Requirements"
IEEE, Pas, Dezembro, 1968, pag. 1963
- 17 - James Barton Young
"Optimal Static Capacitor Allocation by Discrete Programming: Development of Theory"
IEEE, PAS, Setembro/Outubro, 1970, pag. 1499.
- 18 - J. M. Henderson, H. O. Simmons Jr., J. B. Tice
"Kilovar Supply in Bulk-Power Transmission System"
IEEE, PAS, Fevereiro, 1958, pag. 1344.
- 19 - R. F. Cook
"Optimizing the Application of Shunt Capacitors for Reactive - Volt - Ampere Control and Loss Reduction"
IEEE, PAS, Agosto, 1961, pag. 430.
- 20 - John Peschon, D. S. Piercy, W. F. Tinney, ODD J. Tveit and M. Cuénod.
"Optimim Control of Reactive Power Flow"
IEEE - TRANS, PAS - Janeiro, 1968, pag. 40.
- 21 - James H. Sosinski
"Optimized Capacitor Allocation Utilizing Generator Compensation Through Z bus"
Conference paper, C 73458-7, IEEE
- 22 - G. T. Heydt, W. M. Grady
"A matrix Method for Optimal Var Siting"
IEEE, TRANS, PAS, Julho/Agosto, 1975, pag. 1214.
- 23 - André Arruda Falcão
"Regulação de tensão em Sistemas Radiais"
Publicação da Diretoria de Operação/CHESF, Recife, 1972