TESE
331

COMPENSAÇÃO REATIVA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA, ATRAVÉS DE FATORES DE SENSITIVIDADE

F 3
Bra

Dissertação para o grau de

Mestre em Ciências

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUA
Itajubá

por

Edison Oliveira de Jesus

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

Itajubá - MG

CLASS. 621.319.4:621.316(043.2)
CUTT. J58c
TOMBO 331

A

Marianinha e

Plínio

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Júlio César Tibúrcio, pela orientação e incentivo prestados durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Hector Arango, pela transmissão dos conhecimentos aqui apresentados e pela grande colaboração.

ÍNDICE

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO 01

CAPÍTULO II - COMPENSADORES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA 03

2.1 - Objetivo do Uso de Compensadores 03

2.2 - Formas de se Compensar a Tensão nos Sistemas de Potência 05

2.3 - Tipos de Compensadores de Reativos 20

2.3.1 - Compensador síncrono 20

2.3.2 - Compensador estático 21

2.3.2.1 - Capacitores chaveados mecanicamente 22

2.3.2.2 - Capacitores chaveados e tiristores 23

2.3.2.3 - Reatores 24

2.4 - Conclusões 24

CAPÍTULO III - O MÉTODO DA ALOCAÇÃO DE CAPACITORES 25

3.1 - Introdução 25

3.2 - Definição do Problema 26

3.3 - Método de Solução 28

3.3.1 - Modelo linearizado das tensões 28

3.3.2 - A seleção de barras 32

3.3.3 - A correção dos níveis de tensão 38

3.3.3.1 - Utilização do fluxo de carga 38

3.3.3.2 - Iteração nas barras com tensão baixa 39

3.3.3.3 - Iteração apenas na barra onde foi adicionado o capacitor 40

CAPÍTULO IV - DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL 42

4.1 - Introdução 42

4.2 - Descrição do Programa 42

4.3 - Aspectos Computacionais de Destaque 51

4.3.1 - Técnicas de esparsidade 51

4.3.2 - Descarte dos eixos na matriz de impedância nodal 53

4.3.3 - O cálculo da sensitividade 54

4.4 - Fluxograma 55

CAPÍTULO V - RESULTADOS OBTIDOS 58

5.1 - Introdução 58

5.2 - Resultados 59

5.3 - Conclusões 127

CAPÍTULO VI - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS 129

APÊNDICE I - O FLUXO DE CARGA 132

APÊNDICE II - OBTENÇÃO DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIA NODAL, UTILIZANDO O MÉTODO DE BARRAS DESCARTÁVEIS 139

BIBLIOGRAFIA 177

TABELAS

Tabela 2.1 - Dados de um sistema de potência para exemplificar a necessidade da correção do nível de tensão 07

Tabela 2.2 - Resultados obtidos para o sistema mostrado na Tabela 2.1 08

Tabela 2.3 - Idem a Tabela 2.1 - Sistema agora contém transformadores com taps variados 10

Tabela 2.4 - Resultados obtidos para o sistema mostrado na Tabela 2.3 11

Tabela 2.5 - Idem a Tabela 2.1 - Sistema agora contém capacitores ligados a algumas barras 13

Tabela 2.6 - Resultados obtidos para o sistema mostrado na Tabela 2.5 14

Tabela 2.7 - Idem a Tabela 2.1 - Sistema com tensões nas barras, reespecificadas 17

Tabela 5.1 - Performance computacional do método da alocação de capacitores 124

Tabela 5.2 - Máxima diferença de tensões obtidas nos métodos aproximados 126

Tabela 5.3 - Perdas ativas dos sistemas 127

LISTA DOS SÍMBOLOS PRINCIPAIS

Q_i^C - quantidade total de potência reativa capacitiva adicionada à barra i, na tensão nominal

Q_i^{max} - quantidade máxima de potência reativa capacitiva que pode ser adicionada à barra i, na tensão nominal

Q_T^C - quantidade total de potência reativa capacitiva adicionada ao sistema, na tensão nominal

Q_T^{max} - quantidade máxima de potência reativa capacitiva que pode ser adicionada ao sistema, na tensão nominal

E_i^{min} - tensão mínima na barra i

E_i^{max} - tensão máxima na barra i

E_i - tensão da barra i

ΔE_i - tensão adicional na barra i, devido à adição de capacitores

I_i - corrente injetada na barra i

I_{ik} - corrente na linha ik

Z_{kk} - impedância própria da barra k (driving point impedance)

Z_{ik} - impedância de transferência entre as barras i e k (transfer impedance)

$\bar{E}_r$ - vetor cujos elementos são todos iguais à tensão de barra swing

$\bar{E}_{bus}$ - vetor contendo as tensões complexas das barras do sistema

$\bar{I}_{bus}$ - vetor contendo as correntes injetadas nas barras do sistema

$\bar{I}_{carga}$ - vetor contendo as correntes devido às cargas do sistema

$\bar{Z}_{bus}$ - matriz de impedância nodal do sistema

$\bar{Y}_{cap}$ - vetor contendo as admitâncias dos capacitores do sistema

$\bar{I}_{cap}$ - vetor contendo as correntes devido aos capacitores do sistema

$SENS_k$ - sensitividade da barra k

kl - barra onde o capacitor está sendo alocado

$\bar{E}_{rr}$ - vetor que contém as tensões devido somente às cargas do sistema

$\bar{Y}_{LC}$ - vetor contendo as susceptâncias capacitivas das linhas do sistema

$\bar{I}_{LC}$ - vetor contendo as correntes devido às susceptâncias capacitivas das linhas do sistema

$\bar{B}$ - matriz de susceptância nodal

V_i - módulo da tensão na barra i

θ_i - ângulo de fase da tensão na barra i

$\bar{H}$, $\bar{N}$, $\bar{J}$ e $\bar{L}$ - matrizes componentes da matriz Jacobiana

G_{ik} - termo da fila i e coluna k da matriz de condutância nodal do sistema

B_{ik} - termo da fila i e coluna k da matriz de susceptância nodal do sistema

DESC - vetor que contém a lista ordenada de barras no processo de montagem da matriz $\bar{Z}_N$

LISTREL - lista das barras relevantes do sistema, no processo de montagem da matriz $\bar{Z}_N$

LED - lista de espera das barras descartáveis, no processo de montagem da matriz $\bar{Z}_N$

LER - lista de espera das barras relevantes, no processo de montagem da matriz $\bar{Z}_N$

$\overline{\Delta P}^{k*}$ - vetor formado pelos mismatches de potência ativa de cada barra do sistema, na iteração k, divididos pelos respectivos valores de tensão

$\overline{\Delta Q}^{k*}$ - idem, para a potência reativa

Outros símbolos são definidos onde aparecem no texto.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O trabalho aqui apresentado trata da alocação de capacitores em sistemas elétricos de potência. O método utilizado é adequado para aplicações na área de planejamento.

Num sistema elétrico de potência, baixas tensões podem ocorrer em vários pontos devido a grandes cargas ou linhas de transmissão de grandes comprimentos ou, ainda, a saída de geradores. Bancos de capacitores são frequentemente um meio econômico e eficiente de se manter os níveis de tensão sob condições satisfatórias. Entretanto, estes bancos podem causar excessivo aumento de tensão se conectados erradamente ao sistema. É necessário, então, dispor-se de métodos que permitam alocar esses bancos em forma otimizada.

A determinação da alocação de capacitores para manter-se os níveis de tensão entre limites satisfatórios não é uma tarefa muito fácil, particularmente quando se deseja minimizar os custos dos equipamentos envolvidos, pois isto, matematicamente, constitui um problema de programação não linear e, consequentemente, de resolução iterativa que, por sua vez, pode ser bastante complicada.

O problema é tanto mais difícil quanto mais complicada é a configuração do sistema, pois mais difícil fica

a determinação dos locais prioritários para alocar-se corretamente os capacitores.

Tendo em vista esta dificuldade, necessita-se lançar mão de métodos computacionais, tais como o que é apresentado neste trabalho, onde modernas técnicas foram utilizadas visando a minimização dos gastos computacionais de tempo e memória.

Resume-se este trabalho no desenvolvimento de um programa de alocação de capacitores utilizando um método baseado em modelos lineares do sistema e técnicas de seleção iterativa de barras, que permitem determinar a mais eficiente combinação de alocação de capacitores, com o fim de reduzir-se as perdas do sistema e melhorar o perfil de tensões do mesmo. O método utiliza o fluxo de carga desacoplado para a solução do sistema e a matriz de impedância nodal para a determinação dos fatores de sensitividade para a seleção das barras onde serão instalados os capacitores.

Os resultados apresentados demonstram a aplicação prática do método a vários sistemas em operação no Brasil e no exterior.

CAPÍTULO II

COMPENSADORES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 - OBJETIVO DO USO DE COMPENSADORES

Compensadores controláveis de reativos são usados em sistemas de transmissão para reduzir as perdas do sistema e manter as tensões entre níveis especificados, durante operações normais e de emergência.

Planejamentos a longo prazo para circuitos compensadores são geralmente baseados em estudos de contingências, as quais causam ao sistema saídas da faixa operacional desejada.

Por isso, deve-se ter instalados no sistema equipamentos que injetem correntes de compensação de forma razoavelmente constante, mesmo quando as cargas instaladas não são constantes. Isto quer dizer que estes dispositivos compensadores devem ser projetados de tal forma que, instalados às barras de um sistema, melhorem o perfil do fator de potência do mesmo, melhorando, consequentemente, o nível de tensão deste sistema.

Como as cargas de um sistema possuem formas de operação diversas, correntes muito variáveis são introduzidas

no mesmo. Isto também acontece quando o sistema for submeti do a qualquer tipo de contingência. Por isso necessita-se de um equipamento que produza uma corrente adicional que, soma da à corrente da carga, faça a tensão na barra permanecer dentro de uma faixa operacional razoável, ou seja, produza um nível de tensão na barra, praticamente, constante.

2.2 - FORMAS DE SE COMPENSAR A TENSÃO NOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

A seguir são analisados alguns aspectos relacionados à manutenção da tensão nas barras de um sistema entre limites aceitáveis.

Para isso, será utilizado como exemplo o sistema esquematizado na figura 2.1.

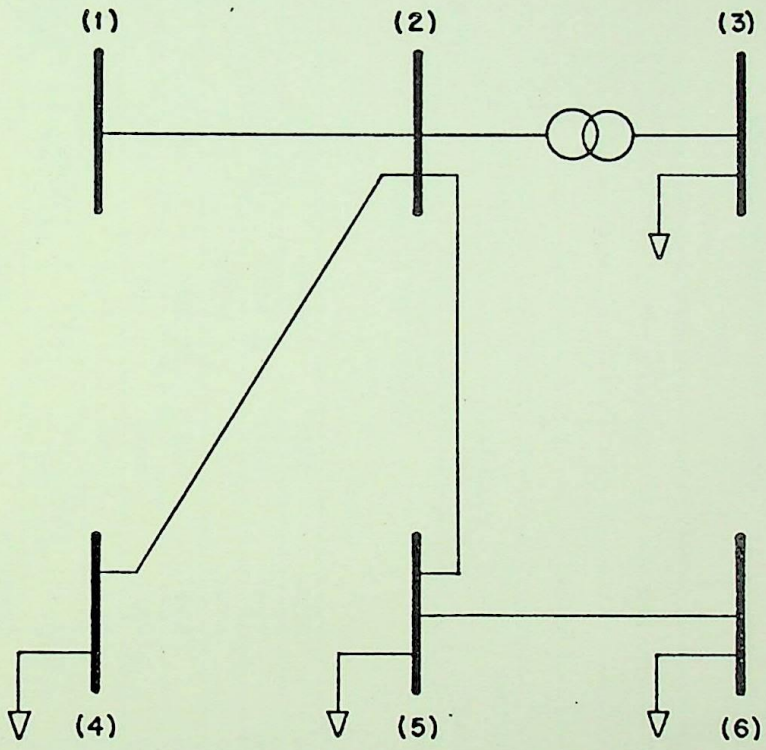


Figura 2.1

Os dados do sistema, assim como os resultados do fluxo de carga, são mostrados nas tabelas 2.1 e 2.2, a seguir.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

DADOS DE BARRAS

NUMERO DA BARRA	NOME DA BARRA	ESPECIFICACAO DE TENSAO EM P.U.	GERACAO ATIVA (MW)	GERACAO REATIVA (MVAR)	CARGA ATIVA (MW)	CARGA REATIVA (MVAR)	LIMITES QMIN (MVAR)	LIMITES QMAX (MVAR)	LIMITES VMIN (PU)	LIMITES VMAX (PU)	SHUNT DA BARRA EM MVAR
1	INFINITO	1.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9000	1.1000	.000
2	OURINHO	.000000	7.500	.000	.000	.000	.000	.000	.9000	1.1000	.000
3	VITORIA	.000000	.000	.000	17.860	11.070	.000	.000	.9000	1.1000	.000
4	BANDEIRA	.000000	.000	.000	1.000	.920	.000	.000	.9000	1.1000	.000
5	TERMIN	.980000	.000	.000	5.000	3.100	.000	.000	.9000	1.1000	.000
6	TRANSMIT	.000000	.000	.000	1.640	1.020	.000	.000	.9000	1.1000	.000

DADOS DE LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U. RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL
1	2	1	.05300	1.02710	.04670
2	4	1	.08790	1.04950	.09200
2	5	1	.01280	.63980	.01760
5	6	1	.08712	1.05610	.05890

DADOS DE TRANSFORMADORES

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U. RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL	TAPS DE TRANSFORMADORES EM P.U. INICIAL	MINIMO	INCREMENTO	MAXIMO	TIPO	TENSAO DESEJADA NA BARRA RECEPTORA
2	3	1	.06700	1.03800	.05400	1.00000	.0000	.00000	.0000	FIXO	.00000

TABELA 2.1

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
1	REF	1.0000000	.0000000	18.646488	1.748633	.000000	.000000	.000000
2	PQ	.9668968	-11.2936001	7.500000	.000000	.000000	.000000	.000000
3	PQ	.8071054	-24.5151825	.000000	.000000	17.860001	11.070000	.000000
4	PQ	1.0048339	-12.1047859	.000000	.000000	1.000000	.920000	.000000
5	PV	.9800000	-13.8802032	.000000	-.132479	5.000000	3.100000	.000000
6	PQ	.9986585	-14.9920273	.000000	.000000	1.640000	1.020000	.000000
TOTAL				26.146488	1.616155	25.500000	16.110001	.000000

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA		POT. RECEBIDA		PERDAS NAS LINHAS		PERDAS NOS SHUNTS				TAP P.U.
			ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	BARRA EMISSORA MW	BARRA EMISSORA MVAR	BARRA RECEPTORA MW	BARRA RECEPTORA MVAR	
1	2	1	18.646	1.749	18.453	2.524	.193	-.776	.000	-2.335	.000	-2.183	.000
2	4	1	1.012	-7.871	.999	.919	.013	-8.790	.000	-4.300	.000	-4.645	.000
2	5	1	6.645	-2.785	6.638	-1.446	.007	-1.339	.000	-.823	.000	-.845	.000
5	6	1	1.646	-4.678	1.640	1.020	.006	-5.698	.000	-2.828	.000	-2.937	.000
2	3	1	18.209	13.178	17.795	11.042	.414	2.136	.000	-2.524	.000	-1.759	1.000

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
SERIE	.63251	-14.46770
SHUNT	.00000	-25.17941
TOTAL	.63251	-39.64710

TABELA 2.2

Os resultados mostram que a tensão da barra 3 está abaixo de seu limite mínimo.

Uma possibilidade para se controlar as tensões seria a variação dos taps dos transformadores, nos pontos mais críticos do sistema.

No sistema mostrado na figura 2.1, o tap do transformador colocado entre as barras 2 e 3 foi variado e os resultados obtidos no fluxo de carga para esta nova condição do sistema são mostrados nas tabelas 2.3 e 2.4, a seguir.

TABELA 2.3

DADOS DE BARRAS

NUMERO DA BARRA	NOME DA BARRA	ESPECIFICACAO DE TENSAO EM P.U.	GERACAO		CARGA		LIMITES				SHUNT DA BARRA EM MVAR
			ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	QMIN (MVAR)	QMAX (MVAR)	VMIN (PU)	VMAX (PU)	
1	INFINITO	1.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9000	1.1000	.000
2	OURINHO	.000000	7.500	.000	.000	.000	.000	.000	.9000	1.1000	.000
3	VITORIA	.000000	.000	.000	17.860	11.070	.000	.000	.9000	1.1000	.000
4	BANDEIRA	.000000	.000	.000	1.000	.920	.000	.000	.9000	1.1000	.000
5	TERMIN	.980000	.000	.000	5.000	3.100	.000	.000	.9000	1.1000	.000
6	TRANSMIT	.000000	.000	.000	1.640	1.020	.000	.000	.9000	1.1000	.000

DADOS DE LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U.		
			RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL
1	2	1	.05300	1.02710	.04670
2	4	1	.08790	1.04950	.09200
2	5	1	.01280	.63980	.01760
5	6	1	.08712	1.05610	.05890

DADOS DE TRANSFORMADORES

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U.			TAPS DE TRANSFORMADORES EM P.U.					TENSAO DESEJADA NA BARRA RECEPTORA
			RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL	INICIAL	MINIMO	INCREMENTO	MAXIMO	TIPO	
2	3	1	.06700	1.03800	.05400	1.15000	.0000	.00000	.0000	FIXO	.00000

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
1	REF	1.0000000	.0000000	18.413986	.041020	.000000	.000000	.000000
2	PQ	.9839388	-11.0074997	7.500000	.000000	.000000	.000000	.000000
3	PQ	1.0219960	-19.9620895	.000000	.000000	17.860001	11.070000	.000000
4	PQ	1.0229356	-11.7958241	.000000	.000000	1.000000	.920000	.000000
5	PV	.9800000	-13.5315495	.000000	-2.747538	5.000000	3.100000	.000000
6	PQ	.9986601	-14.6428757	.000000	.000000	1.640000	1.020000	.000000
TOTAL				25.913986	-2.706518	25.500000	16.110001	.000000

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA		POT. RECEBIDA		PERDAS NAS LINHAS		PERDAS NOS SHUNTS				TAP P.U.
			ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	BARRA EMISSORA MW	BARRA EMISSORA MVAR	BARRA RECEPTORA MW	BARRA RECEPTORA MVAR	
1	2	1	18.414	.041	18.231	1.096	.183	-1.055	.000	-2.335	.000	-2.261	.000
2	4	1	1.007	-8.185	.993	.920	.014	-9.105	.000	-4.453	.000	-4.813	.000
2	5	1	6.650	-.233	6.644	1.169	.006	-1.402	.000	-.852	.000	-.845	.000
5	6	1	1.645	-4.678	1.639	1.020	.006	-5.698	.000	-2.828	.000	-2.937	.000
2	3	1	18.252	8.504	17.966	10.926	.286	-2.422	.000	-2.614	.000	-2.820	1.150

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
SERIE	.49390	-19.68201
SHUNT	.00000	-26.75910
TOTAL	.49390	-46.44112

TABELA 2.4

Nota-se que os objetivos foram alcançados, ou seja, nível de tensão mais alto em relação ao caso original.

Uma segunda solução seria a colocação de capacitores shunts nas barras de menor nível de tensão.

No sistema mostrado na figura 2.1, foi colocado um capacitor shunt de 8.5 MVAR na barra 3, cuja tensão original era de 0.807 p.u.

Os resultados do fluxo de carga para a nova situação do sistema são mostrados nas tabelas 2.5 e 2.6, a seguir.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
B.M

DADOS DE BARRAS

NUMERO DA BARRA	NOME DA BARRA	ESPECIFICACAO DE TENSAO EM P.U.	GERACAO ATIVA (MW)	GERACAO REATIVA (MVAR)	CARGA ATIVA (MW)	CARGA REATIVA (MVAR)	LIMITES QMIN (MVAR)	LIMITES QMAX (MVAR)	LIMITES VMIN (PU)	LIMITES VMAX (PU)	SHUNT DA BARRA EM MVAR
1	INFINITO	1.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9000	1.1000	.000
2	OURINHO	.000000	7.500	.000	.000	.000	.000	.000	.9000	1.1000	.000
3	VITORIA	.000000	.000	.000	17.860	11.070	.000	.000	.9000	1.1000	-8.500
4	BANDEIRA	.000000	.000	.000	1.000	.920	.000	.000	.9000	1.1000	.000
5	TERMIN	.980000	.000	.000	5.000	3.100	.000	.000	.9000	1.1000	.000
6	TRANSMIT	.000000	.000	.000	1.640	1.020	.000	.000	.9000	1.1000	.000

DADOS DE LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U. RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL
1	2	1	.05300	1.02710	.04670
2	4	1	.08790	1.04950	.09200
2	5	1	.01280	.63980	.01760
5	6	1	.08712	1.05610	.05890

DADOS DE TRANSFORMADORES

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U. RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL	TAPS DE TRANSFORMADORES EM P.U. INICIAL	MINIMO	INCREMENTO	MAXIMO	TIPO	TENSAO DESEJADA NA BARRA RECEPTORA
2	3	1	.06700	1.03800	.05400	1.00000	.0000	.00000	.0000	FIXO	.00000

TABELA 2.5

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
1	REF	1.0000000	.0000000	18.403877	-3.773344	.000000	.000000	.000000
2	PQ	1.0227821	-10.6938457	7.500000	.000000	.000000	.000000	.000000
3	PQ	.9938120	-21.1927834	.000000	.000000	17.860001	11.070000	8.395128
4	PQ	1.0641675	-11.4454575	.000000	.000000	1.000000	.920000	.000000
5	PV	.9800000	-13.0767460	.000000	-8.708075	5.000000	3.100000	.000000
6	PQ	.9986601	-14.1880722	.000000	.000000	1.640000	1.020000	.000000
TOTAL				25.903877	-12.481419	25.500000	16.110001	8.395128

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA		POT. RECEBIDA		PERDAS NAS LINHAS		PERDAS NOS SHUNTS				TAP P.U.
			ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	BARRA EMISSORA MW	BARRA EMISSORA MVAR	BARRA RECEPTORA MW	BARRA RECEPTORA MVAR	
1	2	1	18.404	-3.773	18.223	-2.496	.181	-1.278	.000	-2.335	.000	-2.443	.000
2	4	1	1.016	-8.921	1.001	.920	.015	-9.841	.000	-4.812	.000	-5.209	.000
2	5	1	6.651	5.921	6.639	7.130	.011	-1.209	.000	-.921	.000	-.845	.000
5	6	1	1.645	-4.678	1.639	1.020	.006	-5.698	.000	-2.828	.000	-2.937	.000
2	3	1	18.058	.504	17.842	2.649	.216	-2.145	.000	-2.824	.000	-2.667	1.000

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
SERIE	.42832	-20.17142
SHUNT	.00000	-27.82118
TOTAL	.42832	-47.99260

TABELA 2.6

Analisando-se os resultados, vê-se que realmente as tensões aumentaram, enquanto que os ângulos de fase não tiveram significantes mudanças em relação ao sistema original.

Houve também uma diminuição nos fluxos de potência reativa bastante significativa, enquanto que os fluxos de potência ativa foram reduzidos, porém em menor proporção.

Comparando com a solução anterior, é notória a sua superioridade porém, em sistemas cuja estabilidade seja sensível, é preciso um estudo mais cuidadoso ao adotá-la, pois com as variações normais da carga, caracterizadas por período de cargas pesadas, haverá também flutuações de potência reativa no sistema. Quando uma barra de um sistema tem a ela conectado um capacitor, este ajuda a gerar a potência reativa complementar necessária para que a tensão nesta barra esteja dentro dos limites aceitáveis; isto para períodos de carga pesada, aliviando desta forma os geradores do sistema. Em períodos de cargas leves, o consumo de potência reativa é menor, fazendo com que a tensão nas barras seja aumentada. Este aumento causa uma maior produção de potência reativa nos capacitores, e, portanto, representa um efeito de realimentação positiva.

Se o processo não for controlado, o sistema poderá ser levado a um estado em que as tensões se apresentam excessivamente elevadas.

Resta ainda a possibilidade de se controlar o

fluxo de potência reativa através das máquinas geradoras do sistema, de tal forma que se varie o nível de tensão do sistema, dentro de limites de fornecimento e absorção de potência reativa dos geradores. Na prática isto corresponde a re especificação das tensões nas barras de geração do sistema. Um exemplo deste caso é mostrado nas tabelas 2.7 e 2.8, a seguir.

DADOS DE BARRAS

NUMERO DA BARRA	NOME DA BARRA	ESPECIFICACAO DE TENSAO EM P.U.	GERACAO		CARGA		LIMITES				SHUNT DA BARRA EM MVAR
			ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	QMIN (MVAR)	QMAX (MVAR)	VMIN (PU)	VMAX (PU)	
1	INFINITO	1.100000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9000	1.1000	.000
2	OURINHO	.000000	7.500	.000	.000	.000	.000	.000	.9000	1.1000	.000
3	VITORIA	.000000	.000	.000	17.860	11.070	.000	.000	.9000	1.1000	.000
4	BANDEIRA	.000000	.000	.000	1.000	.920	.000	.000	.9000	1.1000	.000
5	TERMIN	1.020000	.000	.000	5.000	3.100	.000	.000	.9000	1.1000	.000
6	TRANSMIT	.000000	.000	.000	1.640	1.020	.000	.000	.9000	1.1000	.000

DADOS DE LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U.		
			RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL
1	2	1	.05300	1.02710	.04670
2	4	1	.08790	1.04950	.09200
2	5	1	.01280	.63980	.01760
5	6	1	.08712	1.05610	.05890

DADOS DE TRANSFORMADORES

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U.			TAPS DE TRANSFORMADORES EM P.U.					TENSAO DESEJADA NA BARRA RECEPTORA
			RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL	INICIAL	MINIMO	INCREMENTO	MAXIMO	TIPO	
2	3	1	.06700	1.03800	.05400	1.00000	.0000	.00000	.0000	FIXO	.00000

TABELA 2.7

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
1	REF	1.0999999	.0000000	18.529285	2.976823	.000000	.000000	.000000
2	PQ	1.0507741	-9.3225613	7.500000	.000000	.000000	.000000	.000000
3	PQ	.9212083	-19.9710541	.000000	.000000	17.860001	11.070000	.000000
4	PQ	1.0938792	-10.0455265	.000000	.000000	1.000000	.920000	.000000
5	PV	1.0200000	-11.5616760	.000000	-7.621029	5.000000	3.100000	.000000
6	PQ	1.0404673	-12.5987549	.000000	.000000	1.640000	1.020000	.000000
	TOTAL			26.029285	-4.644206	25.500000	16.110001	.000000

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA		POT. RECEBIDA		PERDAS NAS LINHAS		PERDAS NOS SHUNTS				TAP P.U.
			ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR	BARRA EMISSORA MW	BARRA EMISSORA MVAR	BARRA RECEPTORA MW	BARRA RECEPTORA MVAR	
1	2	1	18.529	2.977	18.364	5.180	.165	-2.203	.000	-2.825	.000	-2.578	.000
2	4	1	1.014	-9.471	.998	.919	.016	-10.390	.000	-5.079	.000	-5.504	.000
2	5	1	6.646	4.078	6.638	5.561	.008	-1.483	.000	-.972	.000	-.916	.000
5	6	1	1.646	-5.160	1.640	1.020	.006	-6.180	.000	-3.064	.000	-3.188	.000
2	3	1	18.107	10.572	17.796	11.035	.310	-.463	.000	-2.981	.000	-2.291	1.000

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
SERIE	.50574	-20.72038
SHUNT	.00000	-29.39846
TOTAL	.50574	-50.11884

TABELA 2.8

Através da análise da tabela 2.7, nota-se que os geradores das barras 1 e 5 tiveram suas tensões elevadas de tal forma que os níveis de tensão no restante do sistema foram também elevados, devido ao redespacho de potência reativa.

Analisando todos os casos apresentados, verifica se a grande dependência existente entre o fluxo de reativos e o módulo da tensão nos diversos pontos do sistema.

Vê-se também que a colocação de capacitores shunts nas barras cujos níveis de tensão estão baixos, exerce uma influência muito grande nas tensões das próprias barras e pode também beneficiar o resto do sistema, aliviando o transporte de potência reativa pelo mesmo. Daí a denominação de compensadores de reativos dada a estes elementos.

No exemplo onde foi feita a variação no tap do transformador, nota-se que a mesma influenciou somente a área onde o transformador se encontra, ou seja, o resto do sistema é pouco sensível à colocação do transformador.

No redespacho de potência reativa, é preciso considerar os limites de fornecimento das máquinas. Quando tais limites são atingidos, o controle da tensão é perdido, a menos que novas fontes de reativo sejam instaladas.

Estas considerações levam à conclusão que os compensadores de reativo constituem uma forma simples, barata e eficiente de controlar-se os níveis de tensão em um siste

Escola Federal de Engenharia Biblioteca

ma de potência. Justifica-se, portanto, a escolha desta forma de compensação como objeto de estudo, neste trabalho.

2.3 - TIPOS DE COMPENSADORES DE REATIVOS

Existem vários tipos de compensadores de reativos, os quais são divididos em duas classes:

a) compensadores síncronos;
b) compensadores estáticos.

Estes últimos podem ser dos seguintes tipos:

1) capacitor fixo;
2) reator saturado;
3) reator linear.

Os compensadores estáticos ainda podem ser chaveados mecanicamente ou através de tiristores.

2.3.1 - Compensador síncrono

O compensador síncrono constitui-se de uma máquina rotativa, especificamente um motor síncrono superexcitado. Este motor tem a seguinte característica: aumentando-se a excitação, a máquina passa a fornecer energia reativa, que tem em excesso. Nestas condições ela se comporta como se fosse um capacitor, daí a denominação de condensador síncrono.

A principal desvantagem do motor síncrono é a

necessidade de usar corrente contínua para sua excitação, pois os dispositivos necessários à sua obtenção, tornam o motor muito caro.

Outras desvantagens são:

a) uma perturbação no sistema poderá fazer o motor sair do sincronismo e causar sua parada;

b) o controle do motor síncrono é mais difícil de ser realizado em relação aos compensadores estáticos;

c) a manutenção é cara;

d) o motor precisa de instalação em lugares especiais.

2.3.2 - O compensador estático

O compensador estático, ao contrário do compensador síncrono, é um elemento fixo, de construção bastante simples e eficiente. Quando o objetivo é o aumento de tensão do sistema, o compensador estático utilizado é o capacitor.

O capacitor estático é um dispositivo cujo objetivo primário é fornecer energia reativa para o sistema. Quando ligado diretamente às linhas de transmissão ou em subestações, ou mesmo na própria rede de distribuição, constitue uma fonte de corrente reativa usada para suplementar o sistema gerador que não possa, prática e economicamente, suprir toda a carga reativa do sistema. Isto quer dizer que o capa

citor pode ser utilizado para reduzir a sobrecarga existente no sistema, ou, caso não haja sobrecarga, permitir a instalação de cargas adicionais.

Os capacitores podem ser conectados ao sistema em unidades ou através de bancos, os quais são introduzidos ou desconectados do sistema, conforme a solicitação da carga do mesmo; além disto, por serem bastante simples, são utilizados com mais frequência que os compensadores síncronos, pois são estáticos e apresentam outras vantagens, tais como:

a) redução das perdas associadas com o fornecimento de energia reativa no ponto de utilização;

b) redução do investimento necessário em equipamentos para a entrega de energia nos locais de utilização, através de:

1) redução na corrente, para a mesma carga ativa;
2) redução na queda de tensão, para a mesma carga ativa;
3) redução na capacidade em KVA dos equipamentos necessários, para a mesma carga ativa.

c) melhoria do fator de potência do sistema;

d) melhoria do nível de tensão do sistema.

2.3.2.1 - Capacitores chaveados mecanicamente

Quando a quantidade de compensação necessita ser alterada, pode-se empregar disjuntores para colocar ou retirar capacitores.

A idéia é dividir o banco total de capacitores em pequenas unidades, cada uma delas com seu sistema de chaveamento e de acordo com a exigência de reativos do sistema, introduzir a quantidade certa de capacitores.

Em contrapartida, este processo de chaveamento de capacitores apresenta uma tensão de recuperação que pode ser elevada, fazendo surgir arcos voltaicos danosos aos equipamentos mecânicos de chaveamento, podendo ainda introduzir sérios transitórios no sistema.

2.3.2.2 - Capacitores chaveados a tiristores

A diferença básica do compensador com capacitor chaveado a tiristores consiste, com relação aos sistemas chaveados mecanicamente, no tempo de resposta, que é muito mais rápido no caso dos tiristores. Além disso existe a possibilidade de se compensar variações de cargas equilibradas e desequilibradas, mesmo que seja por fase.

O uso crescente deste tipo de chaveamento deve-se ao rápido progresso na tecnologia de tiristores na última década, pois tem-se produzido elementos que conseguem bloquear tensões de até 4 KV e na situação ligada, suportar correntes superiores a 1200 A.

A correção de tensão, utilizando-se capacitores chaveados a tiristores, pode ser aceitável para a ação corretiva e compensação em sistemas sujeitos a flutuações de tensão, como por exemplo aquelas causadas por fornos a arco.

2.3.2.3 - Reatores

Para a compensação de reativos, existem ainda outros equipamentos, tais como os reatores saturados e lineares, os quais ainda podem ser chaveados mecanicamente e a tiristores.

Estes equipamentos têm como característica o consumo da potência reativa em excesso no sistema, e não serão abordados neste trabalho.

2.4 - CONCLUSÕES

Tendo em vista que durante os últimos anos os equipamentos estáticos têm sido desenvolvidos como uma alternativa para os compensadores síncronos, e também que muitas vezes o fator economia prepondera sobre a técnica, optou-se neste trabalho pelo estudo da compensação estática realizada através de capacitores, visto que também já se mostrou sua eficiência técnica.

CAPÍTULO III

O MÉTODO DA ALOCAÇÃO DE CAPACITORES

3.1 - INTRODUÇÃO

No planejamento de sistemas de potência, é importante um estudo da compensação reativa necessária, visando a manutenção dos níveis de tensão, durante períodos normais e também nas emergências.

Durante o período de carga leve, um sistema elétrico de potência pode violar os limites máximos das tensões, problema que pode ser resolvido conectando-se, em algumas barras do sistema, reatores ou compensadores síncronos trabalhando como geradores subexcitados.

Durante o período de carga pesada ou devido à saída de linhas ou geradores, as tensões nas barras podem atingir valores abaixo da faixa operacional mínima permitida. Este problema pode ser resolvido conectando-se a algumas barras do sistema, capacitores ou compensadores síncronos trabalhando como geradores sobreexcitados.

Como o objetivo deste trabalho relaciona-se ao segundo caso, este capítulo é dedicado à alocação de capacitores, utilizando para isto critérios de sensitividade.

3.2 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A inserção de capacitores em um sistema pode ser feita de forma não otimizada ou otimizada.

Na forma não otimizada, a instalação de potência reativa é tratada por métodos que basicamente consistem numa combinação de análises e tentativas. Um dos procedimentos usuais consiste em realizar um estudo de fluxo de potência com o sistema não compensado, determinando-se assim as barras onde as tensões estejam abaixo do valor permitido. A critério do engenheiro, uma quantidade adequada de reativo é alocada em uma ou mais barras, e um novo caso de fluxo de potência é então processado. Dependendo das novas tensões, o valor do reativo será ou não ajustado. O processo é repetido, até que as tensões fiquem dentro de faixas pré-fixadas. A solução encontrada por tal procedimento geralmente apresenta um total de reativo a ser instalado maior do que o necessário realmente.

Por outro lado, estes problemas não devem acontecer quando se utilizam métodos desenvolvidos à luz de técnicas de otimização, os quais devem permitir ao engenheiro a determinação da localização e da quantidade mínima de capacitores a ser adicionada às barras de carga do sistema, tal que as novas tensões obtidas após a adição dos capacitores estejam entre um mínimo e um máximo especificados para cada uma das barras.

Neste trabalho, utiliza-se um método de alocação

baseado em coeficientes de sensitividade das tensões com relação à quantidade de capacitores instalados, que permite determinar os locais onde a instalação de capacitores produza o maior aumento global das tensões para a mesma quantidade instalada, proporcionando, portanto, a utilização ótima do equipamento.

As restrições a serem observadas no processo de alocação são as seguintes:

a) A quantidade total de potência reativa capacitiva adicionada a uma barra, com a finalidade de se aumentar sua tensão, deve ser menor ou igual a um máximo especificado, isto é:

$$Q_i^C \leq Q_i^{max} \qquad (3.2.1)$$

b) A quantidade total de potência reativa capacitiva adicionada ao sistema como um todo deve ser menor ou igual a um máximo especificado, isto é:

$$Q_T^C \leq Q_T^{max} \qquad (3.2.2)$$

c) A tensão obtida numa barra, após a adição de capacitores, deve estar entre limites mínimo e máximo especificados, isto é:

$$E_i^{min} \leq E_i \leq E_i^{max} \qquad (3.2.3)$$

d) A tensão adicional numa barra, devido a adição de capacitores, não deve ser maior que uma determinada percentagem da tensão inicial desta barra, isto é:

$$\Delta E_i \leq p\% \cdot E_i \qquad (3.2.4)$$

Esta restrição refere-se a problemas de chaveamento durante operações normais. Em caso de emergência, o valor de p é maior do que no caso de operação normal.

3.3 - MÉTODO DE SOLUÇÃO

3.3.1 - Modelo Linearizado das Tensões

De acordo com a primeira lei de Kirchoff, a soma de correntes injetadas num nó de um sistema deve ser igual a soma das correntes que saem deste nó. Desta forma, por exemplo, no nó i de um sistema tem-se que:

$$I_i = \sum_{k\eta i} I_{ik} \qquad (3.3.1)$$

onde: I_{ik} é a corrente devido à linha ik, ligada à barra i e $k\eta i$ denota o conjunto de todas as barras k ligadas à barra i.

Se para todas as barras de um sistema de n barras, forem computadas as suas respectivas correntes injeta

das, tem-se um vetor n dimensional, que será chamado de $\bar{I}_{bus}$.

Desta forma, pode-se designar:

$$\bar{I}_{bus} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \qquad (3.3.2)$$

As tensões de todas as barras do sistema também podem ser agrupadas num vetor n dimensional, denominado $\bar{E}_{bus}$, dado por:

$$\bar{E}_{bus} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \qquad (3.3.3)$$

Uma relação entre os vetores $\bar{E}_{bus}$ e $\bar{I}_{bus}$ é dada através da matriz de impedância nodal do sistema, denominada $\bar{Z}_{bus}$, ou seja:

$$\bar{E}_{bus} = \bar{Z}_{bus} \cdot \bar{I}_{bus} \qquad (3.3.4)$$

onde $\bar{Z}_{bus}$ é dada por:

$$\bar{Z}_{bus} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & \cdots\cdots & Z_{1k} & \cdots\cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & \cdots\cdots & Z_{2k} & \cdots\cdots & Z_{2m} \\ \vdots & & & & & & \\ Z_{k1} & Z_{k2} & Z_{k3} & \cdots\cdots & Z_{kk} & \cdots\cdots & Z_{km} \\ \vdots & & & & & & \\ Z_{m1} & Z_{m2} & Z_{m3} & \cdots\cdots & Z_{mk} & \cdots\cdots & Z_{mm} \end{bmatrix} \quad (3.3.5)$$

Onde o termo Z_{mk} representa a impedância de transferência entre as barras m e k do sistema.

Deve-se lembrar que a matriz $\bar{Z}_{bus}$ é não esparsa e desta forma ocupa muita memória de computador se for armazenada na sua totalidade. No método utilizado, apenas parte dela, correspondendo às barras com tensões baixas e suas vizinhanças imediatas, é obtida e armazenada, permitindo dessa forma uma substancial economia de área de memória de computador.

No método, a matriz $\bar{Z}_{bus}$ é construida tomando-se como referência a barra swing do sistema, e excluindo-se todas as suceptâncias das linhas e também todos os capacitores inicialmente ligados às barras [12]. Obtém-se então uma matriz de dimensão m x m, onde m=n-1 e n é o número de barras do sistema. Neste caso o vetor $\bar{E}_{bus}$ é dado por [4]:

$$\bar{E}_{bus} = \bar{Z}_{bus} \cdot \bar{I}_{bus} + \bar{E}_r \quad (3.3.6)$$

onde $\bar{E}_r$ é um vetor cujos elementos são todos iguais à tensão da barra swing.

O capacitor é considerado como uma perturbação do estado de equilíbrio, representado como um acréscimo no vetor de tensões. Portanto, após a inserção de um capacitor, pode-se escrever para o perfil de tensões de um sistema, a seguinte equação:

$$\bar{E}_{bus}^{(nova)} = \bar{E}_{bus}^{(velha)} + \Delta\bar{E}_{bus} \qquad (3.3.7)$$

ou seja, a nova tensão é obtida acrescentando-se à tensão antes da inserção, a parcela referente ao capacitor incluido no sistema.

Substituindo-se (3.3.6) em (3.3.7), tem-se:

$$\bar{E}_{bus}^{(nova)} = (\bar{Z}_{bus} \cdot \bar{I}_{bus} + \bar{E}_r) + \Delta\bar{E}_{bus} \qquad (3.3.8)$$

mas

$$\Delta\bar{E}_{bus} = \bar{Z}_{bus}\Delta\bar{I}_{bus} \qquad (3.3.9)$$

onde:

$\Delta\bar{I}_{bus}$ - acréscimo de corrente devido à inserção do capacitor.

Substituindo (3.3.9) em (3.3.8), tem-se:

$$\bar{E}_{bus}^{(nova)} = (\bar{Z}_{bus} \cdot \bar{I}_{bus} + \bar{E}_r) + \bar{Z}_{bus}\,\Delta\bar{I}_{bus} \qquad (3.3.10)$$

Escola Federal de Engenharia - Itajubá - Biblioteca MAUÁ

A equação (3.3.10) é válida para as perturbações provocadas somente pelos capacitores, em forma de correntes injetadas. Estas correntes, entretanto, dependem das tensões do sistema antes da colocação dos capacitores. Em uma barra k, a relação entre as correntes injetadas pelos capacitores e sua tensão é dada pela expressão:

$$\Delta I_k^{bus} = E_{k\ (velha)}^{bus} \cdot Y_k^{cap} \qquad (3.3.11)$$

Substituindo (3.3.11) em (3.3.10), tem-se:

$$\begin{vmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{vmatrix}_{(nova)} = \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2m} \\ \vdots & & & \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mm} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} Er_1 \\ Er_2 \\ \vdots \\ Er_m \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2m} \\ \vdots & & & \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mm} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} E_1 \cdot Y_1^{cap} \\ E_2 \cdot Y_2^{cap} \\ \vdots \\ E_m \cdot Y_m^{cap} \end{vmatrix}_{(velha)} \qquad (3.3.12)$$

onde:

$$\Delta \bar{E}_{bus} = \bar{Z}_{bus} \cdot \Delta \bar{I}_{bus} \qquad (3.3.13)$$

é o incremento de tensão devido à inclusão do capacitor no sistema, e a equação (3.3.12) representa o modelo linearizado de tensões para o sistema.

Escola Federal de Engenharia - Itajubá - Biblioteca MAUA

3.3.2 - A Seleção de Barras

Como o objetivo da alocação de capacitores é o aumento do nível de tensão do sistema, o critério utilizado na seleção de barras é colocar o capacitor na barra que cau

sa o maior aumento global das tensões nas barras que possuem tensão abaixo do limite mínimo permitido.

A potência complexa injetada na barra k do sistema é dada por:

$$S_k = E_k \cdot I_k^* \qquad (3.3.14)$$

ou

$$P_k + jQ_k = E_k \cdot I_k^* \qquad (3.3.15)$$

Quando um capacitor é adicionado na barra k, haverá um acréscimo ΔQ_k na potência reativa injetada, de tal forma que a expressão da potência (3.3.15) torna-se igual a:

$$P_k + jQ_k + j\Delta Q_k = E_k \cdot (I_k^* + \Delta I_k^*) \qquad (3.3.16)$$

ou

$$P_k + jQ_k + j\Delta Q_k = E_k\, I_k^* + E_k \cdot \Delta I_k^* \qquad (3.3.17)$$

onde o valor de ΔE_k foi desprezado.

Substituindo-se o valor de (3.3.15) em (3.3.17), tem-se que:

$$\Delta I_k = - \frac{j\Delta Q_k}{E_k^*} \qquad (3.3.18)$$

onde ΔI_k é a corrente injetada na barra k devido à colocação do capacitor nesta barra. Esta corrente causa uma variação

nas tensões das outras barras, variações estas que podem ser dadas pela equação (3.3.13), ou seja:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_1 \\ \Delta E_2 \\ \vdots \\ \Delta E_i \\ \vdots \\ \Delta E_k \\ \vdots \\ \Delta E_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1i} & \cdots & Z_{1k} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2i} & \cdots & Z_{2k} & \cdots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{i1} & Z_{i2} & \cdots & Z_{ii} & \cdots & Z_{ik} & \cdots & Z_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{k1} & Z_{k2} & \cdots & Z_{ki} & & Z_{kk} & \cdots & Z_{km} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mi} & \cdots & Z_{mk} & \cdots & Z_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ \Delta I_k \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (3.3.19)$$

ou

$$\Delta E_i = Z_{ik} \cdot \Delta I_k = Z_{ik} \left(\frac{-j\Delta Q_k}{E_k^*} \right) \qquad (3.3.20)$$

onde: ΔE_i é a variação de tensão na barra i, devido à colocação de um capacitor na barra k do sistema.

Analisando-se a equação (3.3.20), pode-se definir uma sensitividade associada à cada barra k do sistema, definida como a soma das mudanças nas tensões de todas as barras com a tensão abaixo do nível mínimo permitido se um capacitor for instalado na barra k, ou seja:

$$SENS_k = \sum_{i\alpha M} \Delta E_i = \sum_{i\alpha M} Z_{ik} \left(\frac{-j\Delta Q_k}{E_{k*}}\right)_{(velha)} \qquad (3.3.21)$$

onde iαM é o conjunto de todas as barras com tensão baixa, inclusive a barra k.

Vê-se que esta medida de sensitividade é dinâmica, pois o número de barras com tensão baixa varia durante o processo de alocação.

O valor do coeficiente de sensitividade SENS é calculado para todas as barras com tensão baixa. Dentre estas barras, aquela que apresentar maior valor de SENS é a barra que irá receber o próximo capacitor. Esta barra será denominada barra K1.

Apenas as barras de carga do sistema são elegíveis para receber capacitores, uma vez que o controle da tensão em barras de geração é, normalmente, feito através do despacho da potência reativa dos geradores conectados a essas barras.

Caso alguma barra de carga não possa receber capacitores em um determinado sistema, a mesma é retirada do conjunto de barras elegíveis.

Ao adicionar-se um capacitor numa barra, todas as restrições do problema são verificadas para detetar-se alguma violação. Caso não aconteça nenhuma violação, o método prossegue, resultando numa otimização da alocação de capacito

res estáticos, através de uma forma dinâmica, obtendo-se um perfil de tensões conveniente ao sistema. Caso contrário, o capacitor é retirado da barra e esta é "marcada" de tal forma, que num próximo passo iterativo do método, ela não receba mais capacitores.

Convém ressaltar neste ponto que a adição de capacitores numa barra é feita através de unidades de tamanho discreto, constituindo bancos. Este "step" de capacitor deve concordar com os modelos normalmente disponíveis no comércio.

O sistema antes da colocação do capacitor está em equilíbrio e a equação (3.3.6) representativa desta situação é repetida aqui:

$$\bar{E}_{bus} = \bar{Z}_{bus}\ \bar{I}_{bus} + \bar{E}_r \qquad (3.3.22)$$

A corrente $\bar{I}_{bus}$ é constituida de duas parcelas; uma corrente referente às impedâncias série das linhas e a outra corrente referente às susceptâncias shunts das linhas, logo:

$$\bar{I}_{bus} = \bar{I}_{carga} + \bar{I}_{LC} \qquad (3.3.23)$$

Pode-se fazer a simplificação de supor as correntes de carga constantes, ou seja, não haver variação de correntes no ramo série ao adicionar-se o capacitor na barra, isto porque a variação desta corrente em PU é muito pequena em re

lação à corrente shunt.

Portanto a equação (3.3.22) fica:

$$\bar{E}_{bus} = \bar{Z}_{bus}\ \bar{I}_{LC} + \bar{E}_{rr} \qquad (3.3.24)$$

onde $\bar{E}_{rr}$ é um vetor contendo as tensões devido às cargas e à tensão de referência, ou seja:

$$\bar{E}_{rr} = \bar{Z}_{bus}\ \bar{I}_{carga} + \bar{E}_{r} \qquad (3.3.25)$$

Este vetor pode ser calculado diretamente do fluxo de carga, da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} E_{rr_1} \\ E_{rr_2} \\ \vdots \\ E_{rr_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 . Y_{LC_1} \\ E_2 . Y_{LC_2} \\ \vdots \\ E_m . Y_{LC_m} \end{bmatrix} \qquad (3.3.26)$$

Com a suposição feita, conclui-se que $\bar{E}_{rr}$ permanecerá constante, independente de mudanças de tensões causadas pelos capacitores. Antes da adição dos capacitores, a equação (3.3.24) indica a tensão do sistema em equilíbrio, onde todos os elementos são conhecidos. Adicionando-se um capacitor no sistema, este só irá afetar o primeiro termo da equação, ou seja:

$$\underset{(\text{nova})}{\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix}} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2m} \\ \vdots & & & \\ Z_{m1} & Z_{m2} & \cdots & Z_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1^{LC} \\ I_2^{LC} \\ \vdots \\ I_m^{LC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_1^{cap} \\ I_2^{cap} \\ \vdots \\ I_m^{cap} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1^{rr} \\ E_2^{rr} \\ \vdots \\ E_m^{rr} \end{bmatrix} \qquad (3.3.27)$$

Entretanto, as injeções de correntes são determinadas através dos níveis de tensão do sistema, ou seja:

$$\begin{bmatrix} I_1^{LC} \\ I_2^{LC} \\ \vdots \\ I_m^{LC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_1^{cap} \\ I_2^{cap} \\ \vdots \\ I_m^{cap} \end{bmatrix} = \underset{(\text{velha})}{\begin{bmatrix} E_1 \ (Y_1^{LC} + Y_1^{cap}) \\ E_2 \ (Y_2^{LC} + Y_2^{cap}) \\ \vdots \\ E_m \ (Y_m^{LC} + Y_m^{cap}) \end{bmatrix}} \qquad (3.3.28)$$

onde $\bar{I}_{cap}$ e $\bar{Y}_{cap}$ são quantidades referentes aos capacitores do sistema.

As equações (3.3.27) e (3.3.28) são utilizadas iterativamente em todas as barras de baixa tensão. A equação (3.3.28) é utilizada para se calcular as correntes e a equação (3.3.27) para se calcular as tensões. Esta nova tensão é usada em (3.3.28) e assim por diante, até a convergência.

3.3.3 - A Correção dos Níveis de Tensão

A determinação do novo perfil de tensões resultante da adição de um capacitor pode ser feita de três manei

ras distintas:

3.3.3.1 - Utilização do fluxo de carga

O novo perfil de tensões pode ser obtido através do processamento de um fluxo de carga, incluindo o capacitor adicionado.

3.3.3.2 - Iteração nas barras com tensão baixa

O processo consiste em iterar as equações (3.3.27) e (3.3.28) simultaneamente com todas as barras do sistema, até se obter o perfil de tensões desejado.

Para uma barra de carga ℓ qualquer do sistema, estas equações ficarão da seguinte forma:

$$E_{\ell\,(nova)} = \sum_{i=1}^{m} \left| Z_{\ell,i} \left(I_{LC_i} + I_{cap_i} \right) \right| + E_{rr_i} \qquad (3.3.29)$$

e:

$$I_{LC_i} + I_{cap_i} = E_{\ell\,(velha)} \left(Y_{LC_i} + Y_{cap_i} \right) \qquad (3.3.30)$$

O processo continua até que:

$$E_{\ell\,(nova)} - E_{\ell\,(velha)} \leq \varepsilon \qquad (3.3.31)$$

para todas as barras do sistema. ε é uma constante pré determinada.

3.3.3.3 - Iteração apenas na barra onde foi adicionado o capacitor

Neste caso é feita a aproximação adicional de iterar-se com as equações (3.3.27) e (3.3.28), apenas na barra onde o capacitor foi colocado.

Desta forma tem-se:

$$E_{k1}^{(nova)} = \sum_{i=1}^{m} [Z_{k1,i} (I_{LC_i} + I_{cap_i})] + E_{rr_{k1}} \qquad (3.3.32)$$

e

$$I_{LC_{k1}} + I_{cap_{k1}} = E_{k1}^{(velha)} (Y_{cap_{k1}} + Y_{LC_{k1}}) \qquad (3.3.33)$$

O processo continua até que:

$$E_{k1}^{(nova)} - E_{k1}^{(velha)} \leq \varepsilon \qquad (3.3.34)$$

Uma vez calculada E_{k1}, todas as outras tensões são calculadas através das equações (3.3.27) e (3.3.28) num único passo.

Neste trabalho, as três alternativas foram implementadas e comparadas, sendo os resultados apresentados no capítulo 5.

Como capacitores estão sendo adicionados, dificilmente ter-se-á decréscimos de tensões, mas é preciso veri

ficar se todas as tensões estão acima do limite mínimo estabelecido, e neste caso, adicionar mais capacitores. Por outro lado, se todos os limites mínimos foram satisfeitos, deve-se verificar se os limites máximos não foram violados, pois neste caso deve-se retirar o capacitor da barra onde isto acontece, e procurar outra barra para se colocar o capacitor de maneira a satisfazer os níveis de tensões e seus limites.

O processo continua, até que todas as tensões do sistema estejam dentro dos limites pré-estabelecidos para elas, sem no entanto violar as outras restrições impostas ao sistema.

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI
Biblioteca
M.A.Á
B.M

CAPÍTULO IV

DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL

4.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é descrito o programa de computador que implementa o método de alocação apresentado no Capítulo III. São dados detalhes do programa principal e das principais subrotinas envolvidas e descritos os dados e resultados.

4.2 - DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

O programa que executa a alocação de capacitores é constituido de um programa principal e dezenove subrotinas, estando incluidas neste número as subrotinas de processamento do fluxo de carga e de obtenção da matriz de impedância nodal do sistema.

O primeiro passo do programa é a solução de um fluxo de carga do sistema.

O método utilizado é o desacoplado rápido [17], que proporciona maior rapidez e economia de memória de computador, em relação aos demais métodos. O método desacoplado

rápido é descrito no Apêndice I.

As seguintes informações devem ser fornecidas a este subprograma:

- nome do sistema em estudo
- barra de referência
- potência base do sistema
- tolerância de mismatch de potência
- dados de barras:
  . número da barra
  . nome da barra
  . tensão especificada para a barra, se for uma barra de geração
  . potência ativa de geração
  . potência reativa de geração
  . potência ativa de carga
  . potência reativa de carga
  . limite mínimo de tensão
  . limite máximo de tensão
  . limite mínimo de potência reativa
  . limite máximo de potência reativa
  . potência reativa do shunt da barra, se houver
- dados de linhas
  . barra emissora
  . barra receptora
  . número do circuito
  . resistência da linha

. reatância da linha

. susceptância total da linha

- dados de transformadores

. barra emissora

. barra receptora

. número do circuito

. resistência do transformador

. reatância do transformador

. susceptância do transformador

. valor inicial do tap em fase (o programa não aceita taps em quadratura).

Estas informações são fornecidas através de cartões de dados, conforme descrito no manual do programa no Apêndice III.

Com os resultados do fluxo de carga, determina-se o perfil de tensões do sistema e verifica-se a necessidade ou não da compensação de reativos no mesmo, através das restrições impostas ao sistema. Estas restrições são as seguintes: tensão mínima, tensão máxima, máxima quantidade de potência reativa permitida a cada barra do sistema, e quais barras de carga podem receber capacitores durante o processo de alocação. Estas informações são prestadas através de cartões de dados, cuja forma é mostrada na Apêndice III.

Neste trabalho, como já foi referido no capítulo anterior, as barras "elegíveis", ou seja, as barras que estão disponíveis para a colocação de capacitores, são as bar

ras de carga do sistema. Inicialmente, a menos que se especifique o contrário, todas as barras de carga são consideradas elegíveis. Caso isto não seja desejado, o programa permite indicar as barras de carga que não devem receber capacitores, já no início do processo de alocação. Isto pode ser feito através de cartões de dados como é mostrado no Apêndice III.

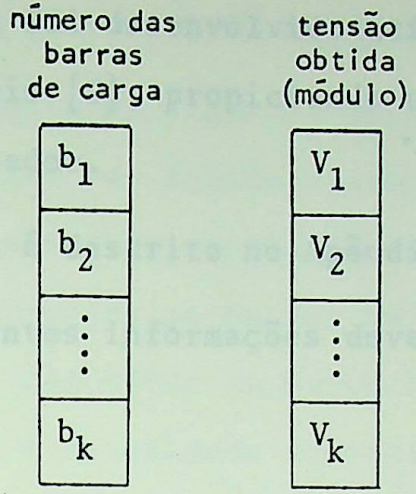
Até este ponto, tem-se a seguinte situação:

a) Os dados de entrada do programa de alocação de capacitores formam os seguintes vetores:

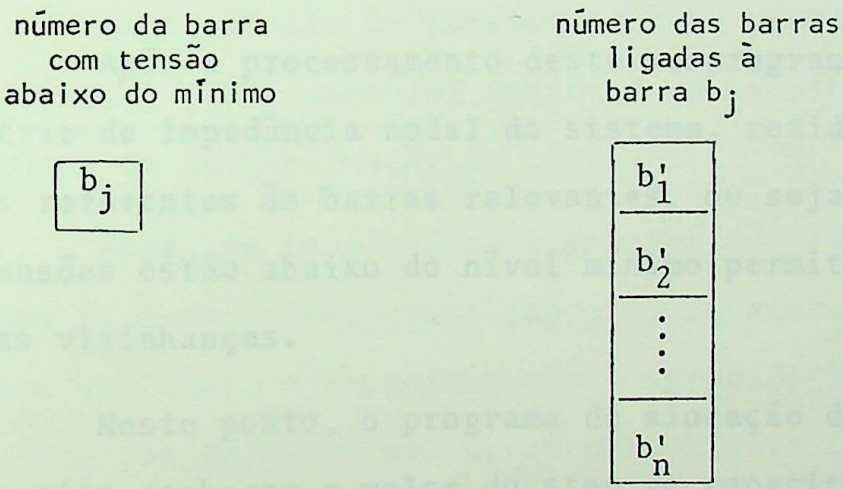
barras de carga	tensão mínima desejada	tensão máxima desejada	máximo de pot. reat. que pode ser inserida através de capacitores	FLAG* da barra
b_1	V_1^{min}	V_1^{max}	Q_1^{max}	F_1
b_2	V_2^{min}	V_2^{max}	Q_2^{max}	F_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
b_k	V_k^{min}	V_k^{max}	Q_k^{max}	F_k

b) Os resultados do programa de fluxo de carga formam os seguintes vetores:

*O FLAG indica se a barra está ou não disponível para alocação de capacitores. É 0 (zero) caso a resposta seja afirmativa e 1 caso contrário.



Através da comparação entre V_k^{min} e V_k, o programa determina quais barras violam a restrição de tensão mínima e, através dos dados de ramos, as suas vizinhas imediatas, de tal forma que se tem para cada barra nesta situação, os seguintes conjuntos:



Esta informação é transmitida ao subprograma de montagem da matriz de impedância nodal do sistema, a fim de dar continuidade ao processo.

O subprograma de montagem da matriz de impedân

cia nodal do sistema foi desenvolvido utilizando-se o método de barras descartáveis [5], propiciando uma grande economia de memória do computador.

O método é descrito no Apêndice II.

As seguintes informações devem ser fornecidas a este subprograma:

- dados de linhas

  Sendo os mesmos já descritos para o fluxo de carga, estes dados são transferidos automaticamente pelo programa.

- número das barras relevantes

  Esta informação é transferida automaticamente, a partir dos resultados anteriores.

Após o processamento deste subprograma, é obtida a matriz de impedância nodal do sistema, retidos apenas os eixos referentes às barras relevantes, ou seja, àquelas cujas tensões estão abaixo do nível mínimo permitido e suas primeiras vizinhanças.

Neste ponto, o programa de alocação de capacitores necessita conhecer o valor do step de capacitor a ser utilizado no sistema. Esta informação é prestada também em cartão de dados, em forma mostrada no Apêndice III.

Conhecendo-se quais barras do sistema possuem tensão baixa e quais entre estas estão disponíveis para receber capacitores, o próximo passo do programa é determinar qual

das barras, efetivamente receberá o capacitor.

Isto é feito da seguinte forma: toma-se uma barra k da lista de barras com tensão baixa. A ela adiciona-se o step de capacitor desejado; verifica-se qual é o acréscimo de tensão sofrida por todas as outras barras com tensão baixa, após a adição do capacitor na barra k; a soma destes acréscimos de tensões é denominada sensitividade da barra k. Após calculada a sensitividade da barra k, o capacitor é retirado dela e é colocado em outra barra da lista de barras com tensão baixa, e o processo é repetido até que se tenha a sensitividade de todas as barras pertencentes à lista.

A barra que possuir o maior valor de sensitividade é a escolhida para receber o step de capacitor.

Este cálculo de sensitividade é executado com grande rapidez, pois, como foi descrito no Capítulo III, trata-se apenas de multiplicação de matrizes.

Antes de se efetivar a escolha, o programa verifica todas as demais restrições impostas ao sistema. Havendo restrições violadas, o capacitor não é agregado à barra escolhida e esta sai da lista de barras disponíveis do sistema. O programa, então, retorna ao processo de escolha de outra barra que poderá receber capacitores. Se não houver mais barras disponíveis, o programa termina com mensagem indicativa do fato.

Caso não haja violação de nenhuma restrição, o

step de capacitor é agregado à barra escolhida.

Entretanto, a adição do capacitor na barra não indica que o processo de alocação está terminado. O próximo passo é a determinação do novo nível de tensão do sistema incluindo o capacitor adicionado. Isto pode ser feito de 3 formas distintas:

a) processamento de um novo fluxo de carga do sistema com o capacitor incluido, obtendo o nível de tensão para esta nova situação;

b) processamento iterativo das equação (3.3.28) e (3.3.30) (entre todas as barras com tensão baixa simultaneamente) até que a convergência seja atingida, e o novo nível de tensão seja obtido;

c) processamento iterativo das equações (3.3.32) e (3.3.33) (somente na barra que recebeu o capacitor) até que a convergência seja atingida. O perfil de tensão do sistema é obtido processando-se as equações (3.3.27) e (3.3.28) para todas as outras barras do sistema, num único passo.

As três formas de se calcular as novas tensões do sistema foram implementadas e testadas neste programa.

Vários sistemas foram utilizados para este teste, e alguns deles são mostrados no Capítulo 5.

Em todos os casos testados, as tensões obtidas pelas três formas descritas eram muito próximas entre si, permitindo com isso concluir que a terceira forma descrita an

Escola Federal
Bibliot
Itajubá

teriormente, ou seja, a iteração de equações somente na barra que recebeu os capacitores é a mais indicada, visto que esta forma é a mais simples de todas e requer menos tempo de computação.

As novas tensões assim calculadas deverão ser novamente testadas, a fim de verificar se ainda há barras com tensão baixa. Caso isto ocorra, o programa deverá retornar ao início do processo para alocar mais capacitores, isto se houver barras e capacitores disponíveis, pois em caso contrário o programa termina com mensagem indicativa do fato.

Caso todas as tensões estejam dentro dos limites estabelecidos, o programa imprime o resultado da alocação, resultado este constituido das seguintes informações:

- sistema antes da alocação
  - . dados do sistema
  - . dados de linhas
  - . dados de barras
  - . dados de transformadores
  - . potência base
  - . barra de referência
  - . tolerância de tensões
  - . identificação do sistema
  - . perfil de tensões do sistema, após o processamento do fluxo de carga
  - . fluxo de potência nas linhas e transformadores
  - . perdas do sistema

. barras com tensão baixa e suas vizinhanças

- dados da alocação
  . step de capacitor utilizado na alocação
  . restrições do sistema
  . limites mínimos e máximos das tensões e potência reativas em cada barra e limite máximo de potência reativa no sistema.
- resultados da alocação
  . localização e potência reativa dos capacitores instalados
  . perfil final de tensões do sistema
  . fluxos de potência nas linhas e transformadores
  . perdas do sistema

4.3 - ASPECTOS COMPUTACIONAIS DE DESTAQUE

Alguns aspectos que contribuem decisivamente para a eficiência computacional do método são destacados a seguir.

4.3.1 - Técnicas de Esparsidade

No caso de grandes matrizes esparsas, ou seja, matrizes em que predominam os elementos nulos, como é o caso em sistemas elétricos, é importante do ponto de vista compu

tacional implementar técnicas de esparsidade que permitam o armazenamento e o manuseio apenas dos elementos não nulos da matriz. Existem, hoje em dia, várias técnicas que exploram computacionalmente a esparsidade de matrizes.

A eficiência do fluxo de carga desacoplado rápido depende da utilização de rotinas também eficientes, que façam a fatoração das matrizes reais, simétricas e esparsas $\bar{B}'$ e $\bar{B}''$, apresentadas nas equações (1.2.12A) e (1.2.13A) do Apêndice I.

A técnica utilizada neste trabalho, a fim de efetivar esta fatoração é a apresentada por Zollenkopf em [3], a qual é denominada "técnica de bifatoração".

As principais características desta técnica são:

- O método permite que uma vez fatorada a matriz, esta pode ser usada várias vezes, em diferentes situações, sem necessidade de nova fatoração, desde que não haja mudança na topologia do sistema.
- O tempo de computação e a memória utilizada pelo método são reduzidos devido ao armazenamento e processamento apenas dos termos não nulos da matriz.
- O procedimento para a seleção pivotal requer pequena memória adicional.
- O método não exige nenhum reordenamento dos termos da matriz para que se possa aplicar a sequência de pivotação ótima encontrada.
- Quando a matriz tem estrutura simétrica de termos não nu

los, este fato pode ser inteiramente explorado pelo método, resultando em economia ainda maior de tempo e memória de computador.

Neste trabalho foram usadas subrotinas de fatoração de matrizes, desenvolvidas com a técnica referida anteriormente, sendo que estas subrotinas se encontram na Biblioteca de Programas do Centro de Processamento de Dados da EFEI.

4.3.2 - Descarte dos Eixos na Matriz de Impedância Nodal

A obtenção da matriz de impedância nodal do sistema poderia ser realizada pela simples inversão da matriz de admitância nodal do mesmo. Apesar de existirem técnicas algoritmicamente bastante simples que permitem fazer esta inversão, as mesmas não são recomendadas, pois o número de operações necessárias à realização desta tarefa é muito elevado, ou seja, é proporcional ao cubo da ordem da matriz de admitância, o que realmente aumenta o tempo de computação dispensado de forma excessiva.

Uma forma de se evitar este gasto de tempo e memória, é fazer a montagem da matriz de impedância nodal na sua forma direta, ou seja, sem inversãoda matriz de admitância.

Esta forma apresenta as seguintes características:

a) exige um número menor de operações aritméticas que o méto

do da inversão, permitindo portanto uma razoável economia de tempo;

b) permite a montagem da matriz de impedância nodal para grandes sistemas, através da retenção apenas dos eixos referentes às barras de interesse ao estudo.

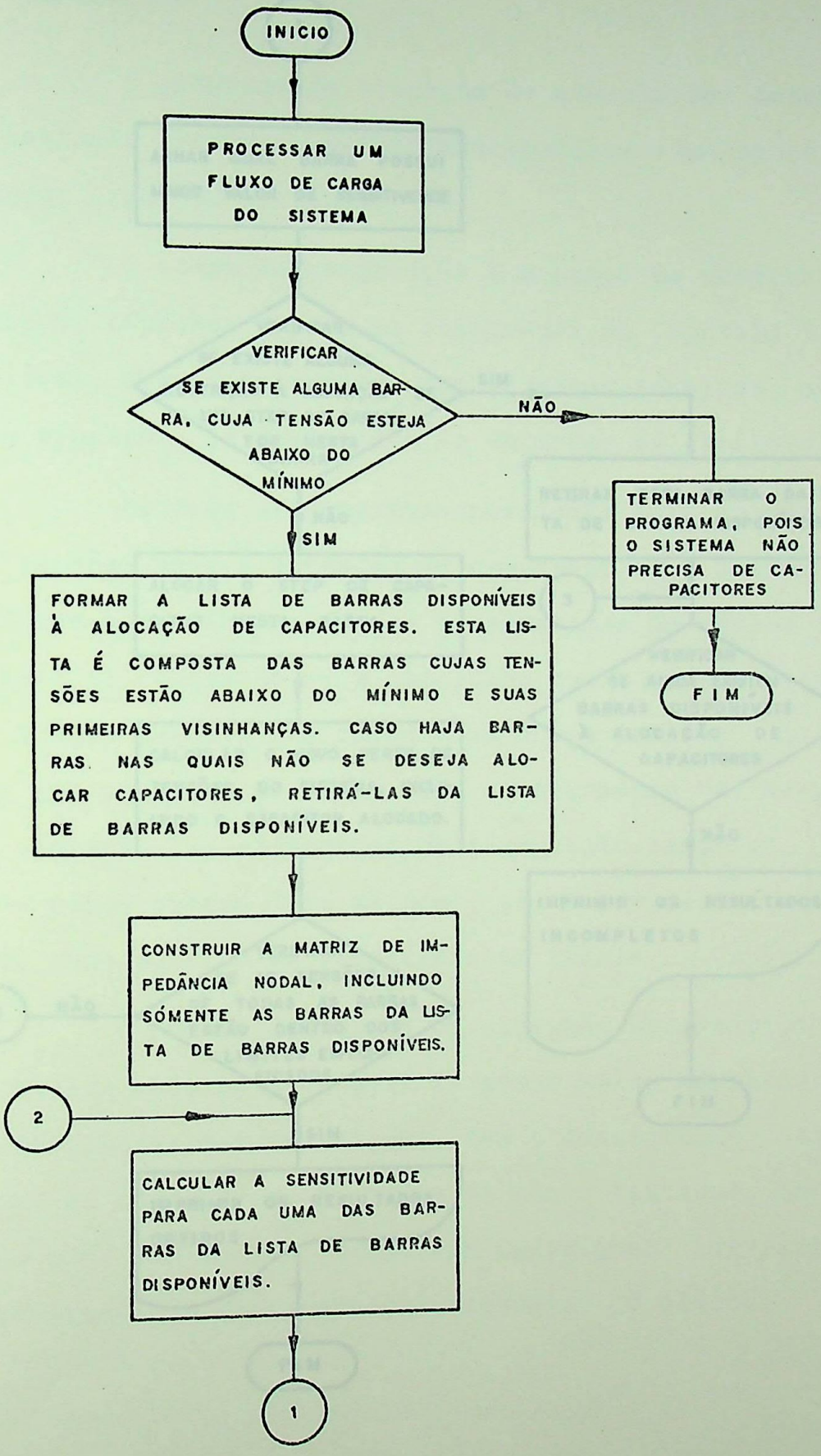
Para este trabalho foi desenvolvido um subprograma de montagem da matriz de impedância nodal utilizando técnicas que abrangem todas estas características, conforme mostrado no Apêndice II e que foram exaustivamente testadas, chegando-se a bons resultados, conforme mostrado no Capítulo 5.

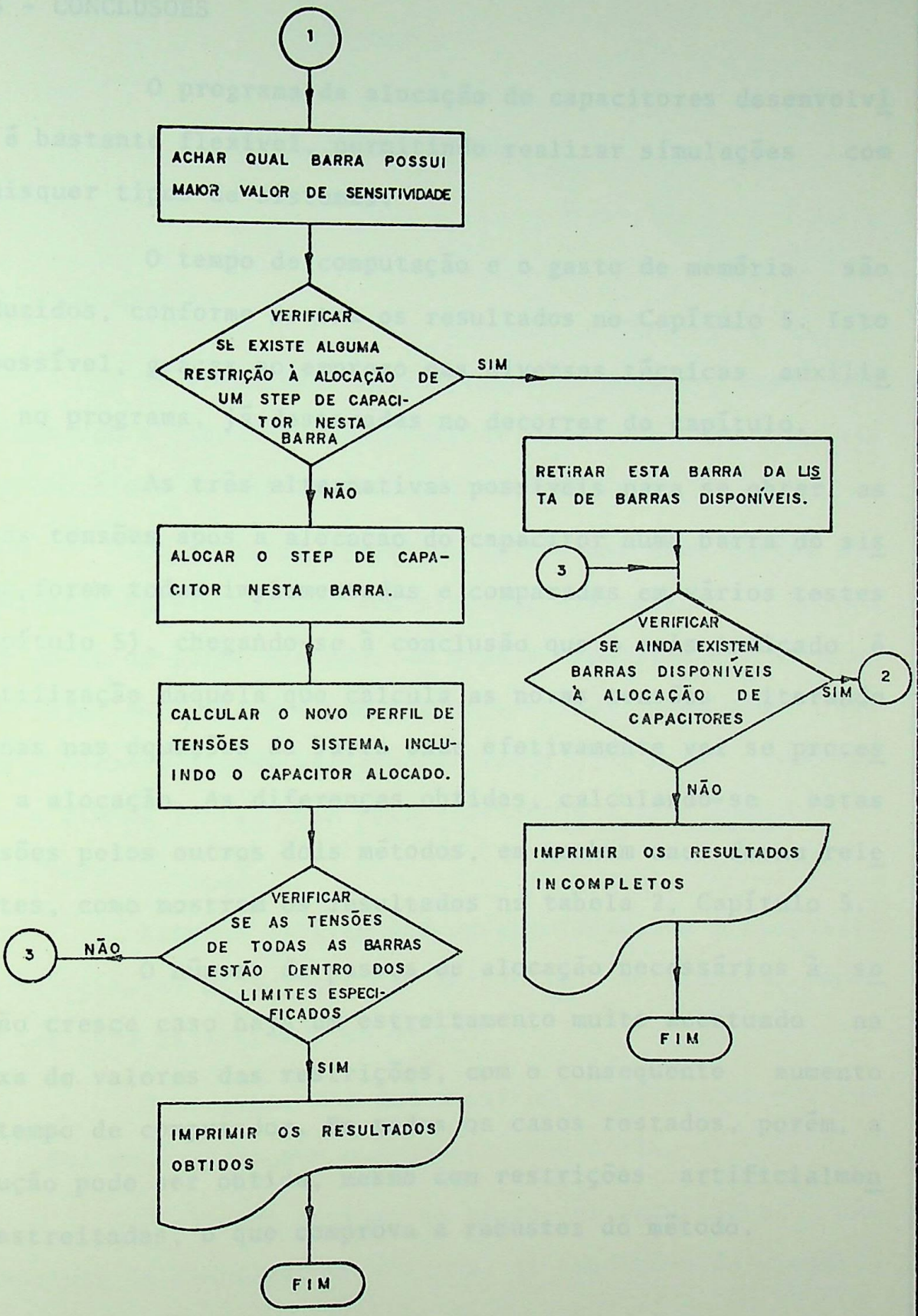
4.3.3 - O Cálculo da Sensitividade

Um outro aspecto importante a ser ressaltado é a forma simples e direta de obter-se os índices de sensitividade para a escolha das barras a terem capacitores alocados. Computacionalmente, a obtenção destes índices resume-se em operações diretas com matrizes de ordem não muito elevada e vetores com apenas um elemento não nulo. Portanto, o produto de matrizes reduz-se ao produto de dois escalares, resultando em grande simplicidade e rapidez de obtenção destes índices.

O método de alocação de capacitores apresentado pode ser resumido no diagrama de blocos, mostrado a seguir.

4.4 - Fluxograma




1
ACHAR QUAL BARRA POSSUI MAIOR VALOR DE SENSITIVIDADE
VERIFICAR SE EXISTE ALGUMA RESTRIÇÃO À ALOCAÇÃO DE UM STEP DE CAPACITOR NESTA BARRA
SIM
NÃO
RETIRAR ESTA BARRA DA LISTA DE BARRAS DISPONÍVEIS.
3
ALOCAR O STEP DE CAPACITOR NESTA BARRA.
VERIFICAR SE AINDA EXISTEM BARRAS DISPONÍVEIS À ALOCAÇÃO DE CAPACITORES
SIM
2
NÃO
CALCULAR O NOVO PERFIL DE TENSÕES DO SISTEMA, INCLUINDO O CAPACITOR ALOCADO.
IMPRIMIR OS RESULTADOS INCOMPLETOS
VERIFICAR SE AS TENSÕES DE TODAS AS BARRAS ESTÃO DENTRO DOS LIMITES ESPECIFICADOS
3
NÃO
SIM
IMPRIMIR OS RESULTADOS OBTIDOS
FIM
FIM

4.5 - CONCLUSÕES

O programa de alocação de capacitores desenvolvido é bastante flexível, permitindo realizar simulações com quaisquer tipos de sistemas.

O tempo de computação e o gasto de memória são reduzidos, conforme mostra os resultados no Capítulo 5. Isto é possível, graças ao emprego das diversas técnicas auxiliares no programa, já destacadas no decorrer do capítulo.

As três alternativas possíveis para se obter as novas tensões, após a alocação do capacitor numa barra do sistema, foram todas implementadas e comparadas em vários testes (Capítulo 5), chegando-se à conclusão que o mais indicado é a utilização daquela que calcula as novas tensões iterando apenas nas equações da barra onde efetivamente vai se processar a alocação. As diferenças obtidas, calculando-se estas tensões pelos outros dois métodos, em nenhum caso foram relevantes, como mostram os resultados na tabela 2, Capítulo 5.

O número de passos de alocação necessários à solução cresce caso haja um estreitamento muito acentuado na faixa de valores das restrições, com o consequente aumento de tempo de computador. Em todos os casos testados, porém, a solução pode ser obtida, mesmo com restrições artificialmente estreitadas, o que comprova a robustez do método.

CAPÍTULO V

RESULTADOS OBTIDOS

5.1 - INTRODUÇÃO

Os resultados apresentados no decorrer deste capítulo têm a finalidade de ilustrar, praticamente, a aplicação do método anteriormente apresentado.

Os sistemas elétricos utilizados como testes são bastante representativos dos sistemas existentes, embora não sejam de porte elevado, de modo a facilitar a análise dos resultados obtidos. Em alguns sistemas, como pode ser visto adiante, foram adicionadas restrições mais severas com o fim de testar mais apropriadamente a performance do programa.

Algumas tabelas são apresentadas com o propósito de se conhecer melhor algumas informações adicionais importantes para os sistemas em estudo.

O programa foi desenvolvido em linguagem Fortran IV e foi processado num computador HP3000/III.

Para cada sistema em teste, os resultados são compostos da descrição do sistema, as condições da alocação e finalmente os resultados obtidos.

5.2 - RESULTADOS

Sistema 1

Este sistema de teste, denominado sistema E1, é constituido de 36 barras e 51 linhas. Possui poucas barras com tensão controlada e é constituído de várias malhas.

Processado o fluxo de carga do sistema, verificou-se que as tensões em algumas barras, mais especificamente nas barras de 25 a 32, estavam muito baixas. Estipulou-se para estas barras valores mínimos de tensões e procedeu-se então a alocação de capacitores no sistema, a fim de se regularizar o mesmo.

Para que estas tensões fossem aumentadas, foi necessária a instalação de capacitores nas barras 25, 27, 28, 31 e 32. Convém notar que também houve melhora nas perdas do sistema.

A seguir, são mostrados com detalhes estes passos de alocação para o sistema em questão.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E1

36 BARRAS - 51 LINHAS

POTENCIA BASE =	100.0000 MVA
TOLERANCIA PARA CONVERGENCIA =	.1000 MVA
NUMERO MAXIMO DE ITERACOES =	50
NUMERO DA BARRA DE REFERENCIA =	1

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E1

36 BARRAS - 51 LINHAS

DADOS DE BARRAS

NUMERO DA BARRA	NOME DA BARRA	ESPECIFICACAO DE TENSAO EM P.U.	GERACAO ATIVA (MW)	GERACAO REATIVA (MVAR)	CARGA ATIVA (MW)	CARGA REATIVA (MVAR)	LIMITES QMIN (MVAR)	LIMITES QMAX (MVAR)	LIMITES VMIN (PU)	LIMITES VMAX (PU)	SHUNT DA BARRA EM MVAR
1	HARK275	1.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
2	HARK132	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
3	SPAD132	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
4	SPAD132B	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
5	SPAD33	.000000	.000	.000	7.000	2.300	.000	.000	.9300	1.1000	.000
6	PENR132B	.000000	.000	.000	15.500	7.510	.000	.000	.9300	1.1000	.000
7	PENR132A	.000000	.000	.000	15.500	7.510	.000	.000	.9300	1.1000	.000
8	PENR33	.000000	.000	.000	36.000	7.310	.000	.000	.9300	1.1000	.000
9	SHAP132	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
10	KEND132	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
11	SHAP33	.000000	.000	.000	13.000	2.640	.000	.000	.9300	1.1000	.000
12	KEND33	.950000	.000	.000	70.000	17.540	.000	.000	.9300	1.1000	.000
13	HATL132	.000000	.000	.000	22.500	10.900	.000	.000	.9300	1.1000	.000
14	ULVE132	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
15	ULVE33	.000000	000	.000	51.000	10.350	.000	.000	.9300	1.1000	.000

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E1

36 BARRAS - 51 LINHAS

DADOS DE BARRAS

NUMERO DA BARRA	NOME DA BARRA	ESPECIFICACAO DE TENSAO EM P.U.	GERACAO ATIVA (MW)	GERACAO REATIVA (MVAR)	CARGA ATIVA (MW)	CARGA REATIVA (MVAR)	LIMITES QMIN (MVAR)	LIMITES QMAX (MVAR)	LIMITES VMIN (PU)	LIMITES VMAX (PU)	SHUNT DA BARRA EM MVAR
16	ROHHE	.980000	120.000	51.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
17	SAND33	.000000	.000	.000	5.000	1.250	.000	.000	.9300	1.1000	.000
18	BARRDR	.000000	.000	.000	42.000	10.530	.000	.000	.9300	1.1000	.000
19	BARRTO	.000000	.000	.000	10.000	2.030	.000	.000	.9300	1.1000	.000
20	BARRST	.000000	.000	.000	9.000	4.360	.000	.000	.9300	1.1000	.000
21	BARRMATN	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
22	WIND132	.000000	132.000	.000	8.000	3.870	.000	.000	.9300	1.1000	.000
23	EGRE132B	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
24	EGRE132A	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
25	EGRE33	.000000	.000	.000	59.000	19.390	.000	.000	.9300	1.1000	.000
26	STAI132	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
27	STAI33	.000000	.000	.000	56.000	16.330	.000	.000	.9300	1.1000	.000
28	MARSH	.000000	.000	.000	13.000	1.850	.000	.000	.9300	1.1000	.000
29	SEC3	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
30	SEC2	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

DADOS DE BARRAS

NUMERO DA BARRA	NOME DA BARRA	ESPECIFICACAO DE TENSAO EM P.U.	GERACAO ATIVA (MW)	GERACAO REATIVA (MVAR)	CARGA ATIVA (MW)	CARGA REATIVA (MVAR)	LIMITES QMIN (MVAR)	LIMITES QMAX (MVAR)	LIMITES VMIN (PU)	LIMITES VMAX (PU)	SHUNT DA BARRA EM MVAR
31	DIST11B	.000000	.000	.000	19.000	10.250	.000	.000	.9300	1.1000	.000
32	DIST11A	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
33	CARL33D	.000000	.000	.000	80.000	16.240	.000	.000	.9300	1.1000	.000
34	CARL33C	.000000	.000	.000	18.000	4.510	.000	.000	.9300	1.1000	.000
35	CARL132A	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000
36	CARL132B	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9300	1.1000	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

DADOS DE LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U. RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL
23	25	1	.01980	.26220	.00000
1	2	1	.00340	.11670	.00000
1	2	2	.00350	.12190	.00000
36	33	1	.01060	.24500	.00000
36	34	1	.01950	.48700	.00000
35	34	1	.01950	.48700	.00000
35	33	1	.10500	.24500	.00000
33	36	2	.01060	.24500	.00000
32	28	1	.05000	1.00000	.00000
31	28	1	.05000	1.00000	.00000
30	32	1	.02080	.40440	.00000
29	31	1	.20400	.40360	.00000
26	27	1	.00450	.12250	.00000
10	12	1	.00800	.25700	.00000
24	25	1	.01980	.26220	.00000

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Biblioteca
M.A.Á
E.M.I
EFEI

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

DADOS DE LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U.		
			RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL
21	20	1	.03520	.51300	.00000
21	19	1	.02910	.47000	.00000
21	18	1	.00770	.13600	.00000
16	17	1	.02180	.33500	.00000
14	15	1	.00540	.11900	.00000
10	12	2	.00800	.25700	.00000
9	11	1	.01400	.27800	.00000
7	8	1	.01390	.27100	.00000
6	8	1	.01390	.27100	.00000
3	5	1	.03060	.63600	.00000
4	5	1	.03060	.63600	.00000
9	10	1	.02210	.05020	.01090
29	36	1	.04710	.10430	.02480
17	18	1	.01080	.00910	.00000
8	11	1	.26000	.49600	.00000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

DADOS DE LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U. RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL
10	13	1	.00450	.01430	.00600
2	36	1	.00570	.01270	.00490
2	35	1	.00760	.01690	.00370
30	35	1	.04720	.10450	.02490
22	29	1	.03090	.06840	.01650
22	24	1	.01180	.02620	.00580
22	23	1	.01180	.02620	.00580
22	21	1	.05700	.12620	.02790
16	21	1	.01790	.03970	.00870
16	22	1	.05620	.12450	.03070
16	14	1	.01300	.02880	.00630
16	13	1	.04310	.09560	.02100
13	14	1	.03090	.06850	.01510
7	9	1	.02640	.05950	.01290
2	7	1	.01880	.05920	.02490

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

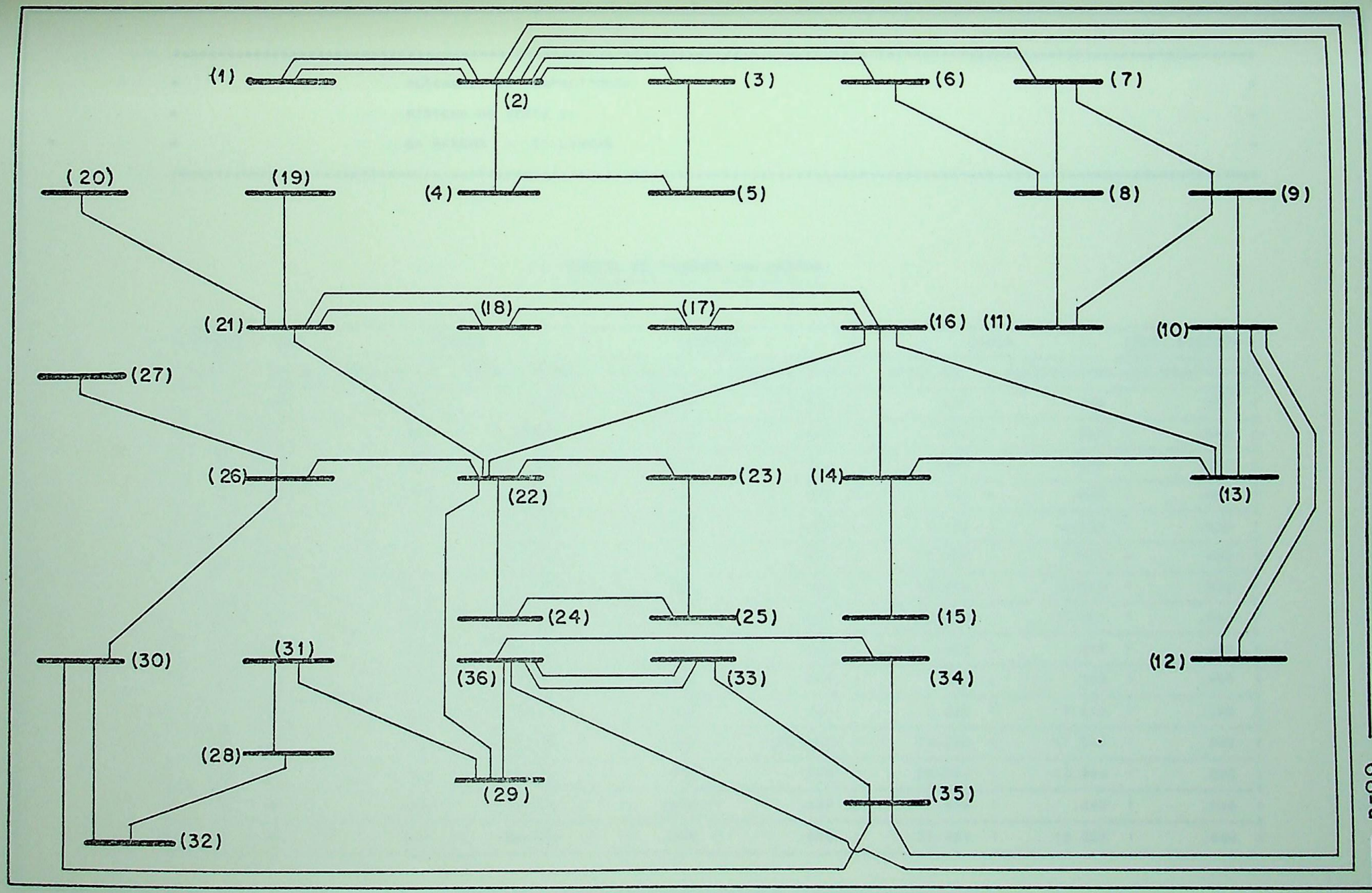
DADOS DE LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U.		
			RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL
2	6	1	.01890	.05940	.02740
2	3	1	.02640	.05840	.01500
2	4	1	.02640	.05840	.00000
13	10	2	.00450	.01430	.00600
22	26	1	.02840	.06280	.01530
26	30	1	.00250	.00560	.00120

```
*****************************************************************************************************************
*                                                                                                               *
*                        ALOCACAO  DE  CAPACITORES                                                              *
*                                                                                                               *
*                        SISTEMA DE TESTE E1                                                                    *
*                                                                                                               *
*                        36 BARRAS  -  51 LINHAS                                                                *
*                                                                                                               *
*****************************************************************************************************************
```

```
     0  SISTEMA  CONTEM  :

 36    BARRAS  ,  SENDO :
     1    BARRAS   V, ANG
     2    BARRAS   P, V
    33    BARRAS   P, Q
 51    LINHAS
  0    IMPEDANCIAS  SHUNT
  0    TRANSFORMADORES, SENDO :
     0    TRANSF. TAP FIXO
     0    TRANSF. TAP AUTOM.
```


(1)
(2)
(3)
(6)
(7)
(20)
(19)
(4)
(5)
(8)
(9)
(18)
(17)
(21)
(16)
(11)
(10)
(27)
(26)
(22)
(23)
(14)
(13)
(24)
(25)
(15)
(30)
(31)
(36)
(33)
(34)
(12)
(28)
(29)
(35)
(32)

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
1	REF	1.000	.000	315.388	99.906	.000	.000	.000
2	PQ	.953	-11.270	.000	.000	.000	.000	.000
3	PQ	.952	-11.389	.000	.000	.000	.000	.000
4	PQ	.952	-11.379	.000	.000	.000	.000	.000
5	PQ	.943	-12.783	.000	.000	7.000	2.300	.000
6	PQ	.938	-12.708	.000	.000	15.500	7.510	.000
7	PQ	.941	-14.676	.000	.000	15.500	7.510	.000
8	PQ	.927	-17.235	.000	.000	36.000	7.310	.000
9	PQ	.940	-17.220	.000	.000	.000	.000	.000
10	PQ	.944	-19.114	.000	.000	.000	.000	.000
11	PQ	.925	-18.844	.000	.000	13.000	2.640	.000
12	PV	.950	-24.897	.000	27.767	70.000	17.540	.000
13	PQ	.946	-19.037	.000	.000	22.500	10.900	.000
14	PQ	.962	-18.644	.000	.000	.000	.000	.000
15	PQ	.944	-22.438	.000	.000	51.000	10.350	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
16	PV	.980	-17.692	120.000	136.085	.000	.000	.000
17	PQ	.950	-20.604	.000	.000	5.000	1.250	.000
18	PQ	.949	-20.620	.000	.000	42.000	10.530	.000
19	PQ	.945	-20.800	.000	.000	10.000	2.030	.000
20	PQ	.930	-20.731	.000	.000	9.000	4.360	.000
21	PQ	.959	-17.864	.000	.000	.000	.000	.000
22	PQ	.941	-14.737	132.000	.000	8.000	3.870	.000
23	PQ	.933	-15.149	.000	.000	.000	.000	.000
24	PQ	.933	-15.149	.000	.000	.000	.000	.000
25	PQ	.895	-20.331	.000	.000	59.000	19.390	.000
26	PQ	.919	-15.181	.000	.000	.000	.000	.000
27	PQ	.890	-19.943	.000	.000	56.000	16.330	.000
28	PQ	.842	-23.712	.000	.000	13.000	1.850	.000
29	PQ	.932	-14.190	.000	.000	.000	.000	.000
30	PQ	.919	-15.044	.000	.000	.000	.000	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
31	PQ	.826	-19.922	.000	.000	19.000	10.250	.000
32	PQ	.895	-17.383	.000	.000	.000	.000	.000
33	PQ	.916	-16.319	.000	.000	80.000	16.240	.000
34	PQ	.930	-14.860	.000	.000	18.000	4.510	.000
35	PQ	.946	-12.096	.000	.000	.000	.000	.000
36	PQ	.945	-11.966	.000	.000	.000	.000	.000
TOTAL				567.388	263.758	549.500	156.670	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
23	25	1	29.739	12.854	29.500	9.695	.239	3.159	.000	.000	.000	-.051	.000
;	2	1	161.141	51.008	160.169	17.669	.97;	33.339	.000	.000	.000	.000	.000
1	2	2	154.248	48.898	153.331	16.981	.916	31.917	.000	.000	.000	.000	.000
36	33	1	27.281	10.934	27.179	8.567	.103	2.371	.000	.000	.000	.000	.000
36	34	1	9.218	2.660	9.198	2.158	.020	.502	.000	.000	.000	.000	.000
35	34	1	8.822	2.819	8.803	2.352	.019	.467	.000	.000	.000	.000	.000
35	33	1	26.474	1.038	25.650	-.885	.824	1.924	.000	.000	.000	.000	.000
36	33	2	27.281	10.934	27.179	8.567	.103	2.371	.000	.000	.000	.000	.000
32	28	1	8.548	4.771	8.488	3.574	.060	1.196	.000	.000	.000	.000	.000
31	28	1	4.529	-1.395	4.513	-1.724	.016	.329	.000	.000	.000	.000	.000
30	32	1	8.573	5.254	8.548	4.771	.025	.484	.000	.000	.000	.000	.000
29	31	1	25.418	12.593	23.529	8.855	1.889	3.738	.000	.000	.000	.000	.000
26	27	1	56.196	21.593	56.003	16.330	.193	5.262	.000	.000	.000	.000	.000
10	12	1	35.111	-1.551	35.000	-5.113	11'	3.563	.000	.000	.000	.000	.000
24	25	1	29.739	12.854	29.500	9.695	.239	3.159	.000	.000	.000	.000	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
21	20	1	9.040	4.953	9.000	4.360	.041	.593	.000	.000	.000	.000	.000
21	19	1	10.034	2.578	10.000	2.030	.034	.548	.000	.000	.000	.000	.000
21	18	1	32.516	6.300	32.424	4.678	.092	1.622	.000	.000	.000	.000	.000
16	17	1	14.654	8.092	14.590	7.115	.064	.977	.000	.000	.000	.000	.000
14	15	1	51.164	13.964	51.000	10.350	.164	3.614	.000	.000	.000	.000	.000
10	12	2	35.111	-1.551	35.000	-5.113	11	3.563	.000	.000	.000	.000	.000
9	11	1	9.095	4.737	9.079	4.406	.017	.331	.000	.000	.000	.000	.000
7	8	1	14.604	4.631	14.567	3.913	.037	.718	.000	.000	.000	.000	.000
6	8	1	25.519	3.787	25.414	1.739	.105	2.048	.000	.000	.000	.000	.000
3	5	1	3.495	1.277	3.491	1.179	.005	.097	.000	.000	.000	.000	.000
4	5	1	3.515	1.218	3.510	1.121	.005	.097	.000	.000	.000	.000	.000
9	10	1	46.346	-27.868	45.620	-28.548	.725	.681	.000	-.481	.000	-.486	.000
36	29	1	31.747	-3.385	31.212	-2.385	.535	-1.000	.000	-1.107	.000	-1.077	.000
17	18	1	9.583	5.865	9.567	5.853	.015	.013	.000	.000	.000	.000	.000
8	11	1	3.980	-1.658	3.924	-1.766	.056	.107	.000	.000	.000	.000	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
13	10	1	12.322	12.238	12.307	12.724	.016	-.487	.000	-.269	.000	-.267	.000
2	36	1	96.136	22.062	95.526	21.143	.610	.919	.000	-.223	.000	-.219	.000
2	35	1	80.694	8.207	80.143	7.316	.550	.891	.000	-.168	.000	-.165	.000
35	30	1	44.845	3.459	43.772	3.249	1.073	.209	.000	-1.113	.000	-1.052	.000
29	22	1	5.793	-14.978	5.709	-13.718	.084	-1.260	.000	-.717	.000	-.730	.000
22	24	1	29.877	12.658	29.736	12.854	.141	-.196	.000	-.257	.000	-.253	.000
22	23	1	29.877	12.658	29.736	12.854	.141	-.196	.000	-.257	.000	-.253	.000
22	21	1	27.648	-26.368	26.749	-25.841	.899	-.527	.000	-1.234	.000	-1.283	.000
16	21	1	25.268	39.785	24.848	39.671	.420	.114	.000	-.418	.000	-.400	.000
22	16	1	20.940	-39.514	19.736	-39.346	1.203	-.168	.000	-1.358	.000	-1.474	.000
16	14	1	67.908	29.553	67.163	28.498	.745	1.056	.000	-.303	.000	-.292	.000
16	13	1	31.944	19.308	31.301	19.830	.643	-.522	.000	-1.008	.000	-.940	.000
14	13	1	15.999	14.534	15.836	15.548	.163	-1.014	.000	-.699	.000	-.676	.000
7	9	1	56.538	-21.822	55.451	-23.131	1.087	1.309	.000	-.571	.000	-.570	.000
2	7	1	88.256	-6.822	86.638	-9.682	1.618	2.860	.000	-1.132	.000	-1.103	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
2	6	1	41.405	10.049	41.022	11.297	.383	-1.248	.000	-1.245	.000	-1.206	.000
2	3	1	3.499	-.077	3.495	1.277	.004	-1.353	.000	-.682	.000	-.680	.000
2	4	1	3.519	1.227	3.515	1.218	.004	.009	.000	.000	.000	.000	.000
13	10	2	12.322	12.238	12.307	12.724	.016	-.487	.000	-.269	.000	-.267	.000
22	26	1	21.352	22.976	21.026	23.577	.326	-.602	.000	-.677	.000	-.645	.000
30	26	1	35.201	-2.002	35.164	-1.982	.037	-.020	.000	-.051	.000	-.051	.000

Escola Federal de Itajubá - Biblioteca - MG

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
SERIE	17.8944	107.0797
SHUNT	.0000	-28.3276
TOTAL	17.8944	78.7521

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

UNIDADE PADRAO DE CAPACITOR EM KVAR : 1200.000
MAXIMO AUMENTO PERCENTUAL EM RELACAO A TENSAO ORIGINAL : 35.000 %
MAXIMO KVAR DE CAPACITOR PERMITIDO AO SISTEMA : 80000.000

RESTRICOES DO SISTEMA

BARRA	TENSAO (PU) MINIMA	TENSAO (PU) MAXIMA	KVAR MAXIMO
1	.9300	1.1000	15000.0000
2	.9300	1.1000	15000.0000
3	.9300	1.1000	15000.0000
4	.9300	1.1000	15000.0000
5	.9300	1.1000	15000.0000
6	.9300	1.1000	15000.0000
7	.9300	1.1000	15000.0000
8	.9300	1.1000	15000.0000
9	.9300	1.1000	15000.0000
10	.9300	1.1000	15000.0000
11	.9300	1.1000	15000.0000
12	.9300	1.1000	15000.0000
13	.9300	1.1000	15000.0000
14	.9300	1.1000	15000.0000
15	.9300	1.1000	15000.0000
16	.9300	1.1000	15000.0000
17	.9300	1.1000	15000.0000
18	.9300	1.1000	15000.0000
19	.9300	1.1000	15000.0000
20	.9300	1.1000	15000.0000
21	.9300	1.1000	15000.0000
22	.9300	1.1000	15000.0000
23	.9300	1.1000	15000.0000
24	.9300	1.1000	15000.0000
25	.9300	1.1000	15000.0000
26	.9300	1.1000	15000.0000
27	.9300	1.1000	15000.0000
28	.9300	1.1000	15000.0000
29	.9300	1.1000	15000.0000
30	.9300	1.1000	15000.0000

31	.9300	1.1000	15000.0000
32	.9300	1.1000	15000.0000
33	.9300	1.1000	15000.0000
34	.9300	1.1000	15000.0000
35	.9300	1.1000	15000.0000
36	.9300	1.1000	15000.0000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

BARRAS COM TENSAO BAIXA,
E QUE PODEM RECEBER CAPACITORES

1.)	8
2.)	11
3.)	25
4.)	26
5.)	27
6.)	28
7.)	30
8.)	31
9.)	32
10.)	33

BARRAS VIZINHAS

1.)	7
2.)	6
3.)	9
4.)	23
5.)	24
6.)	22
7.)	35
8.)	29
9.)	36

RESULTADOS FINAIS OBTIDOS APOS 51 PASSOS DE ALOCACAO

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E1

36 BARRAS - 51 LINHAS

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
1	REF	1.000	.000	312.731	70.276	.000	.000	.000
2	PQ	.971	-11.003	.000	.000	.000	.000	.000
3	PQ	.969	-11.118	.000	.000	.000	.000	.000
4	PQ	.969	-11.109	.000	.000	.000	.000	.000
5	PQ	.960	-12.463	.000	.000	7.000	2.300	.000
6	PQ	.955	-12.370	.000	.000	15.500	7.510	.000
7	PQ	.954	-14.177	.000	.000	15.500	7.510	.000
8	PQ	.941	-16.693	.000	.000	36.000	7.310	.000
9	PQ	.948	-16.485	.000	.000	.000	.000	.000
10	PQ	.948	-18.190	.000	.000	.000	.000	.000
11	PQ	.935	-18.100	.000	.000	13.000	2.640	.000
12	PV	.950	-23.943	.000	24.995	70.000	17.540	.000
13	PQ	.950	-18.099	.000	.000	22.500	10.900	.000
14	PQ	.963	-17.622	.000	.000	.000	.000	.000
15	PQ	.945	-21.409	.000	.000	51.000	10.350	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
16	PV	.980	-16.636	120.000	89.652	.000	.000	.000
17	PQ	.955	-19.621	.000	.000	5.000	1.250	.000
18	PQ	.953	-19.647	.000	.000	42.000	10.530	.000
19	PQ	.951	-19.854	.000	.000	10.000	2.030	.000
20	PQ	.937	-19.786	.000	.000	9.000	4.360	.000
21	PQ	.966	-16.959	.000	.000	.000	.000	.000
22	PQ	.969	-14.500	132.000	.000	8.000	3.870	.000
23	PQ	.962	-14.907	.000	.000	.000	.000	.000
24	PQ	.962	-14.907	.000	.000	.000	.000	.000
25	PQ	.932	-19.760	.000	.000	59.000	19.390	4.800
26	PQ	.960	-15.317	.000	.000	.000	.000	.000
27	PQ	.952	-19.616	.000	.000	56.000	16.330	14.400
28	PQ	1.076	-23.215	.000	.000	13.000	1.850	14.400
29	PQ	.968	-14.151	.000	.000	.000	.000	.000
30	PQ	.961	-15.204	.000	.000	.000	.000	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
31	PQ	.976	-21.374	.000	.000	19.000	10.250	14.400
32	PQ	1.034	-17.823	.000	.000	.000	.000	14.400
33	PQ	.936	-15.894	.000	.000	80.000	16.240	.000
34	PQ	.951	-14.511	.000	.000	18.000	4.510	.000
35	PQ	.966	-11.884	.000	.000	.000	.000	.000
36	PQ	.964	-11.717	.000	.000	.000	.000	.000
TOTAL				564.731	184.922	549.500	156.670	62.400

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
23	25	1	29.710	10.079	29.500	7.293	.210	2.786	.000	.000	.000	-.055	.000
1	2	1	159.780	35.871	158.868	4.576	.912	31.294	.000	.000	.000	.000	.000
1	2	2	152.951	34.405	152.091	4.445	.860	29.960	.000	.000	.000	.000	.000
36	33	1	27.305	10.664	27.207	8.399	.098	2.265	.000	.000	.000	.000	.000
36	34	1	9.276	2.523	9.256	2.039	.019	.484	.000	.000	.000	.000	.000
35	34	1	8.761	2.916	8.744	2.471	.018	.445	.000	.000	.000	.000	.000
35	33	1	26.370	1.271	25.586	-.559	.784	1.829	.000	.000	.000	.000	.000
36	33	2	27.305	10.664	27.207	8.399	.098	2.265	.000	.000	.000	.000	.000
32	28	1	10.228	-4.369	10.170	-5.527	.058	1.158	.000	.000	.000	.000	.000
31	28	1	2.884	-9.789	2.830	-10.882	.055	1.093	.000	.000	.000	.000	.000
30	32	1	10.321	-17.536	10.228	-19.350	.093	1.813	.000	.000	.000	.000	.000
29	31	1	23.393	-11.960	21.890	-14.933	1.503	2.973	.000	.000	.000	.000	.000
26	27	1	56.155	6.012	55.999	1.772	.156	4.240	.000	.000	.000	.000	.000
10	12	1	35.110	-.199	35.000	-3.727	110	3.528	.000	.000	.000	.000	.000
24	25	1	29.710	10.079	29.500	7.293	.210	2.786	.000	.000	.000	.000	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	FLUXO EMITIDA ATIVA MW	FLUXO EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
21	20	1	9.040	4.944	9.000	4.360	.040	.584	.000	.000	.000	.000	.000
21	19	1	10.033	2.571	10.000	2.030	.033	.541	.000	.000	.000	.000	.000
21	18	1	32.182	7.607	32.092	6.012	.090	1.595	.000	.000	.000	.000	.000
16	17	1	14.983	6.721	14.922	5.780	.061	.941	.000	.000	.000	.000	.000
14	15	1	51.164	13.957	51.000	10.350	.164	3.607	.000	.000	.000	.000	.000
10	12	2	35.110	-.199	35.000	-3.727	.110	3.528	.000	.000	.000	.000	.000
9	11	1	9.192	3.970	9.177	3.660	.016	.310	.000	.000	.000	.000	.000
7	8	1	14.762	4.275	14.726	3.572	.036	.703	.000	.000	.000	.000	.000
6	8	1	25.244	4.765	25.144	2.806	.101	1.960	.000	.000	.000	.000	.000
3	5	1	3.494	1.274	3.490	1.181	.005	.094	.000	.000	.000	.000	.000
4	5	1	3.515	1.213	3.510	1.120	.005	.094	.000	.000	.000	.000	.000
9	10	1	45.164	-18.651	44.579	-19.199	.585	.348	.000	-.490	.000	-.489	.000
36	29	1	30.528	-17.716	29.917	-16.755	.61'	-.961	.000	-1.153	.000	-1.162	.000
17	18	1	9.934	4.539	9.920	4.527	.014	.012	.000	.000	.000	.000	.000
8	11	1	3.865	-.939	3.818	-1.028	.046	.089	.000	.000	.000	.000	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 31 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
13	10	1	12.823	8.884	12.811	9.386	.012	-.501	.000	-.271	.000	-.269	.000
2	36	1	94.966	6.901	94.417	6.137	.549	.764	.000	-.231	.000	-.228	.000
2	35	1	80.748	-10.221	80.214	-11.063	.534	.842	.000	-.174	.000	-.173	.000
35	30	1	45.079	-15.250	43.951	-15.436	1.128	.186	.000	-1.162	.000	-1.150	.000
29	22	1	6.518	-4.798	6.499	-3.293	.019	-1.505	.000	-.773	.000	-.774	.000
22	24	1	29.835	9.817	29.711	10.081	.125	-.264	.000	-.272	.000	-.269	.000
22	23	1	29.835	9.817	29.711	10.081	.125	-.264	.000	-.272	.000	-.269	.000
22	21	1	27.567	-10.690	27.052	-9.220	.515	-1.470	.000	-1.309	.000	-1.301	.000
16	21	1	24.420	24.002	24.198	24.333	.222	-.331	.000	-.418	.000	-.406	.000
22	16	1	20.541	-18.919	20.105	-16.969	.436	-1.950	.000	-1.441	.000	-1.474	.000
16	14	1	68.346	26.134	67.619	25.119	.727	1.015	.000	-.303	.000	-.292	.000
16	13	1	32.437	15.825	31.838	16.451	.599	-.626	.000	-1.008	.000	-.947	.000
14	13	1	16.460	11.165	16.323	12.243	.137	-1.077	.000	-.701	.000	-.681	.000
7	9	1	55.295	-13.936	54.356	-14.883	.938	.947	.000	-.587	.000	-.580	.000
2	7	1	87.086	.324	85.572	-2.137	1.514	2.461	.000	-1.173	.000	-1.134	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
2	6	1	41.112	10.889	40.744	12.271	.369	-1.382	.000	-1.290	.000	-1.250	.000
2	3	1	3.498	-.129	3.494	1.274	.004	-1.404	.000	-.706	.000	-.705	.000
2	4	1	3.518	1.222	3.515	1.213	.004	.008	.000	.000	.000	.000	.000
13	10	2	12.823	8.834	12.811	9.386	.012	-.501	.000	-.271	.000	-.269	.000
22	26	1	22.723	2.815	22.563	3.884	.160	-1.069	.000	-.718	.000	-.705	.000
30	26	1	33.624	2.094	33.593	2.133	.031	-.040	.000	-.055	.000	-.055	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E1 *

* 36 BARRAS - 51 LINHAS *

****

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
SERIE	15.2606	96.2030
SHUNT	.0000	-29.3583
TOTAL	15.2606	66.8447

TEMPO DE CPU DO FLUXO DE CARGA INICIAL : 36.623 SEGUNDOS

TEMPO DE CPU DA ALOCACAO : 264.121 SEGUNDOS

FIM DO PROGRAMA

Sistema 2

O sistema de teste E_2 é constituído de 11 barras e 13 linhas. Este sistema já possui um capacitor de 15 MVAR instalado na barra 6, nas condições iniciais.

Também neste sistema, algumas barras apresentam tensões aquém do mínimo permitido. Após a imposição de algumas restrições, foi feita a alocação de capacitores no mesmo. Uma destas restrições constitui-se em não permitir a instalação de capacitor na barra 10. A fim de se conhecer o comportamento do sistema diante destas condições, são mostrados a seguir os resultados completos sobre o mesmo.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

```
**********************************************************************************************************************
*                                                                                                                    *
*                          ALOCACAO DE CAPACITORES                                                                   *
*                          SISTEMA DE TESTE E2                                                                       *
*                          11 BARRAS  -  13 LINHAS                                                                   *
*                                                                                                                    *
**********************************************************************************************************************
```

POTENCIA BASE =	100.0000 MVA
TOLERANCIA PARA CONVERGENCIA =	.1000 MVA
NUMERO MAXIMO DE ITERACOES =	50
NUMERO DA BARRA DE REFERENCIA =	1

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E2

11 BARRAS - 13 LINHAS

DADOS DE BARRAS

NUMERO DA BARRA	NOME DA BARRA	ESPECIFICACAO DE TENSAO EM P.U.	GERACAO ATIVA (MW)	GERACAO REATIVA (MVAR)	CARGA ATIVA (MW)	CARGA REATIVA (MVAR)	LIMITES QMIN (MVAR)	LIMITES QMAX (MVAR)	LIMITES VMIN (PU)	LIMITES VMAX (PU)	SHUNT DA BARRA EM MVAR
1	LIGHT1	1.003000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9800	1.1000	.000
2	LIGHT2	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9800	1.1000	.000
3	USUARIO	1.000000	.000	.000	233.080	9.954	.000	.000	.9800	1.1000	.000
4	LIGHT3	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9800	1.1000	.000
5	LIGHT4	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9800	1.1000	.000
6	NP	.000000	.000	.000	31.541	9.950	.000	.000	.9800	1.1000	-15.000
7	SK	.000000	.000	.000	3.000	1.860	.000	.000	.9800	1.1000	.000
8	TURBINS	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9800	1.1000	.000
9	P2	.000000	.000	.000	9.000	5.000	.000	.000	.9800	1.1000	.000
10	P1	.000000	.000	.000	2.500	1.500	.000	.000	.9800	1.1000	.000
11	P	.000000	.000	.000	19.000	12.000	.000	.000	.9800	1.1000	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E2 *

* 11 BARRAS - 13 LINHAS *

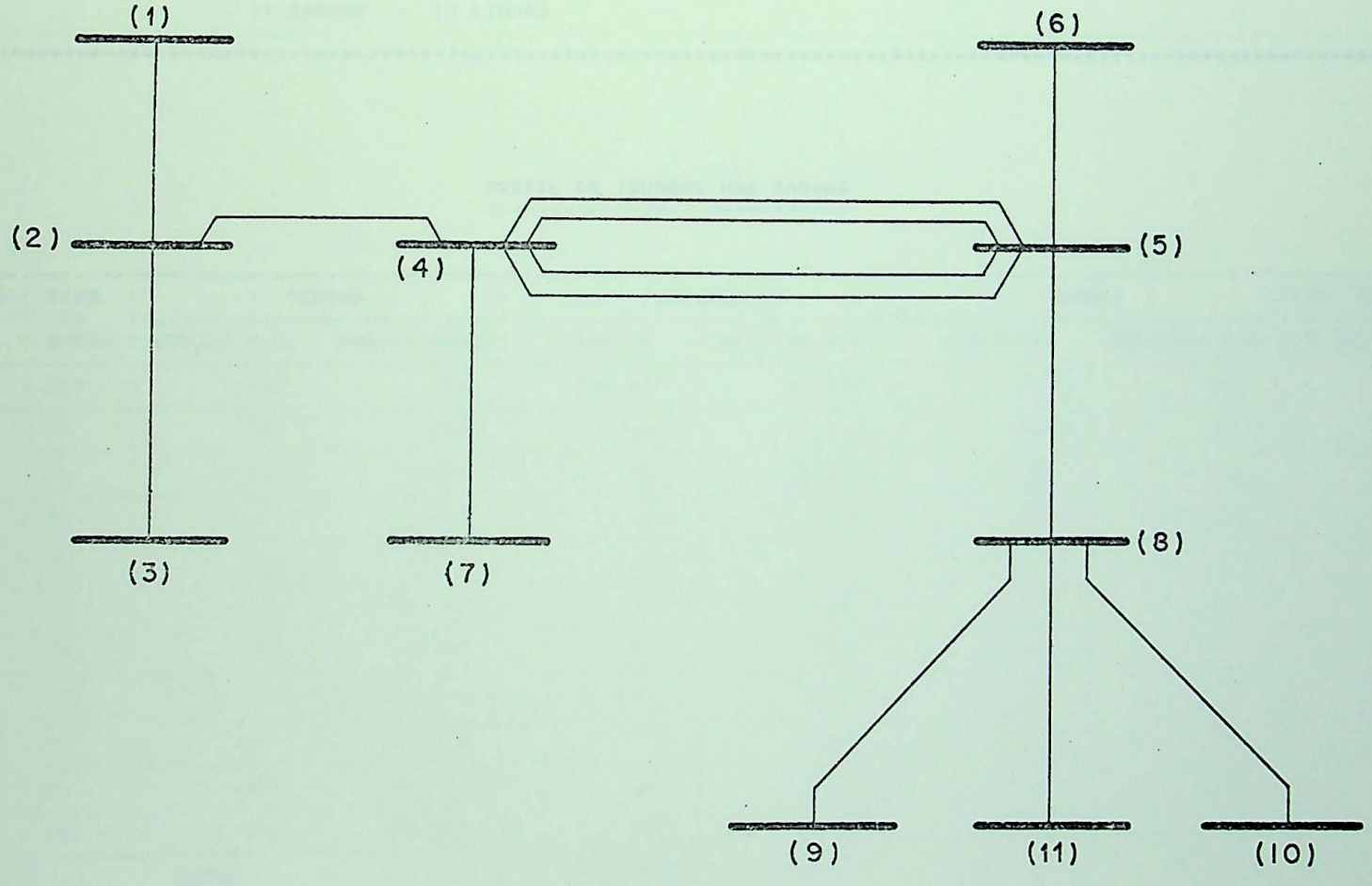
****

DADOS DE LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U.		
			RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL
1	2	1	.00110	.05110	.00000
2	4	1	.00110	.05110	.00000
5	8	1	.00110	.05110	.00000
8	9	1	.00000	.48560	.00000
8	10	1	.00000	1.71500	.00000
8	11	1	.00000	.22250	.00000
5	6	1	.00000	.13400	.00000
4	7	1	.00000	1.78480	.00000
2	3	1	.00000	.02720	.00000
4	5	1	.02820	.50720	.00000
4	5	2	.02840	.51120	.00000
4	5	3	.03580	.64380	.00000
4	5	4	.28200	.50720	.00000

```
*****************************************************************************************************
*                          ALOCACAO DE CAPACITORES                                                  *
*                          SISTEMA DE TESTE E2                                                      *
*                          11 BARRAS  -  13 LINHAS                                                  *
*****************************************************************************************************
```

```
-------------------------------
!                             !
!     O  SISTEMA  CONTEM  :   !
!                             !
!  11    BARRAS  ,  SENDO :   !
!                             !
!      1    BARRAS   V, ANG   !
!                             !
!      1    BARRAS   P, V     !
!                             !
!      9    BARRAS   P, Q     !
!                             !
!  13    LINHAS               !
!                             !
!   1    IMPEDANCIAS  SHUNT   !
!                             !
!   0    TRANSFORMADORES, SENDO : !
!                             !
!      0    TRANSF. TAP FIXO  !
!                             !
!      0    TRANSF. TAP AUTOM.!
!                             !
-------------------------------
```


(1)
(2)
(3)
(4)
(5)
(6)
(7)
(8)
(9)
(11)
(10)

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E2

11 BARRAS - 13 LINHAS

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
1	REF	1.003	.000	300.368	45.008	.000	.000	.000
2	PQ	.989	-8.876	.000	.000	.000	.000	.000
3	PV	1.000	-12.553	.000	59.294	233.080	9.954	.000
4	PQ	.972	-10.875	.000	.000	.000	.000	.000
5	PQ	.922	-16.133	.000	.000	.000	.000	.000
6	PQ	.925	-18.972	.000	.000	31.541	9.950	12.836
7	PQ	.935	-14.253	.000	.000	3.000	1.860	.000
8	PQ	.910	-17.182	.000	.000	.000	.000	.000
9	PQ	.881	-20.305	.000	.000	9.000	5.000	.000
10	PQ	.879	-20.252	.000	.000	2.500	1.500	.000
11	PQ	.878	-20.212	.000	.000	10.000	12.000	.000
TOTAL				300.368	104.303	298.121	40.264	12.836

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E2 *

* 11 BARRAS - 13 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
1	2	1	300.368	45.008	299.360	-1.849	1.009	46.857	.000	.000	.000	.000	.000
2	4	1	66.280	32.060	66.219	29.226	.061	2.834	.000	.000	.000	.000	.000
5	8	1	30.514	21.541	30.496	20.702	.018	.839	.000	.000	.000	.000	.000
8	9	1	8.992	5.639	8.992	4.978	.000	.661	.000	.000	.000	.000	.000
8	10	1	2.498	1.681	2.498	1.493	.000	.188	.000	.000	.000	.000	.000
8	11	1	18.982	13.399	18.982	11.948	.000	1.451	.000	.000	.000	.000	.000
5	6	1	31.520	-1.398	31.520	-2.967	.000	1.569	.000	.000	.000	.000	.000
4	7	1	3.000	2.112	3.000	1.858	.000	.254	.000	.000	.000	.000	.000
2	3	1	233.079	-33.904	233.079	-49.341	.000	15.437	.000	.000	.000	.000	.000
4	5	1	16.712	9.394	16.602	7.421	110	1.973	.000	.000	.000	.000	.000
4	5	2	16.581	9.322	16.472	7.364	.109	1.958	.000	.000	.000	.000	.000
4	5	3	13.166	7.401	13.080	5.846	.086	1.555	.000	.000	.000	.000	.000
4	5	4	16.751	1.010	15.910	-.502	.841	1.512	.000	.000	.000	.000	.000

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E2

11 BARRAS - 13 LINHAS

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
SERIE	2.2334	77.0899
SHUNT	.0000	.0000
TOTAL	2.2334	77.0899

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E2

11 BARRAS - 13 LINHAS

UNIDADE PADRAO DE CAPACITOR EM KVAR : 800.000
MAXIMO AUMENTO PERCENTUAL EM RELACAO A TENSAO ORIGINAL : 30.000 %
MAXIMO KVAR DE CAPACITOR PERMITIDO AO SISTEMA : 60000.000

RESTRICOES DO SISTEMA

BARRA	TENSAO (PU) MINIMA	TENSAO (PU) MAXIMA	KVAR MAXIMO
1	.9800	1.1000	30000.0000
2	.9800	1.1000	30000.0000
3	.9800	1.1000	30000.0000
4	.9800	1.1000	30000.0000
5	.9800	1.1000	30000.0000
6	.9800	1.1000	30000.0000
7	.9800	1.1000	5000.0000
8	.9800	1.1000	30000.0000
9	.9800	1.1000	5000.0000
10	.9800	1.1000	30000.0000
11	.9800	1.1000	30000.0000

```
*****************************************************************************************************************

*                          ALOCACAO DE CAPACITORES                                                              *

*                          SISTEMA DE TESTE E2                                                                  *

*                          11 BARRAS  -  13 LINHAS                                                              *

*****************************************************************************************************************
```

BARRAS COM TENSAO BAIXA,
E QUE PODEM RECEBER CAPACITORES

1.)	4	
2.)	5	
3.)	6	
4.)	7	
5.)	8	
6.)	9	
7.)	10	ESTA BARRA NAO PODE RECEBER CAPACITOR
8.)	11	

BARRAS VIZINHAS

1.)	2

RESULTADOS FINAIS OBTIDOS APOS 49 PASSOS DE ALOCACAO

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E2

11 BARRAS - 13 LINHAS

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
1	REF	1.003	.000	300.172	26.435	.000	.000	.000
2	PQ	.998	-8.798	.000	.000	.000	.000	.000
3	PV	1.000	-12.440	.000	24.781	233.080	9.950	.000
4	PQ	1.008	-10.734	.000	.000	.000	.000	.000
5	PQ	1.024	-15.871	.000	.000	.000	.000	.000
6	PQ	1.030	-18.170	.000	.000	31.540	9.950	15.800
7	PQ	1.067	-13.588	.000	.000	3.000	1.860	4.800
8	PQ	1.034	-16.728	.000	.000	.000	.000	.000
9	PQ	1.043	-19.052	.000	.000	9.000	5.000	4.800
10	PQ	1.008	-19.089	.000	.000	2.500	1.500	.000
11	PQ	1.081	-18.899	.000	.000	19.000	12.000	29.600
TOTAL				300.172	51.216	298.120	40.260	55.000

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E2

11 BARRAS - 13 LINHAS

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
1	2	1	300.172	26.435	299.179	-19.687	.993	46.123	.000	.000	.000	.000	.000
2	4	1	66.095	-19.696	66.043	-22.137	.053	2.441	.000	.000	.000	.000	.000
5	8	1	30.544	-20.856	30.530	-21.523	.014	.667	.000	.000	.000	.000	.000
8	9	1	9.010	-1.801	9.010	-2.185	.000	.383	.000	.000	.000	.000	.000
8	10	1	2.503	1.645	2.503	1.501	.000	.144	.000	.000	.000	.000	.000
8	11	1	19.024	-21.366	19.024	-23.069	.000	1.703	.000	.000	.000	.000	.000
5	6	1	31.570	-3.949	31.570	-5.243	.000	1.294	.000	.000	.000	.000	.000
4	7	1	3.002	-3.288	3.002	-3.636	.000	.348	.000	.000	.000	.000	.000
2	3	1	233.091	.007	233.091	-14.831	.000	14.838	.000	.000	.000	.000	.000
4	5	1	18.030	-3.353	17.936	-5.032	.093	1.679	.000	.000	.000	.000	.000
4	5	2	17.889	-3.326	17.796	-4.992	.093	1.666	.000	.000	.000	.000	.000
4	5	3	14.204	-2.642	14.131	-3.964	.074	1.323	.000	.000	.000	.000	.000
4	5	4	12.916	-9.532	12.201	-10.819	.715	1.287	.000	.000	.000	.000	.000

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E2

11 BARRAS - 13 LINHAS

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
SERIE	2.0345	73.8950
SHUNT	.0000	.0000
TOTAL	2.0345	73.8950

TEMPO DE CPU DO FLUXO DE CARGA INICIAL : 12.591 SEGUNDOS

TEMPO DE CPU DA ALOCACAO : 83.116 SEGUNDOS

FIM DO PROGRAMA

Sistema 3

O sistema de teste E_3 é constituído de 14 barras e 16 linhas e serve para ilustrar o comportamento do método quando empregado em sistemas predominantemente radiais, como é o caso deste, aqui apresentado.

Os dados do sistema, bem como os resultados da alocação de capacitores, são mostrados a seguir.

```
*****************************************************************************************************************
*                                                                                                               *
*                          ALOCACAO  DE  CAPACITORES                                                            *
*                                                                                                               *
*                          SISTEMA DE TESTE E3                                                                  *
*                                                                                                               *
*                          14 BARRAS  -  16 LINHAS                                                              *
*                                                                                                               *
*****************************************************************************************************************
```

POTENCIA BASE =	100.0000 MVA
TOLERANCIA PARA CONVERGENCIA =	.1000 MVA
NUMERO MAXIMO DE ITERACOES =	50
NUMERO DA BARRA DE REFERENCIA =	1

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E3

14 BARRAS - 16 LINHAS

DADOS DE BARRAS

NUMERO DA BARRA	NOME DA BARRA	ESPECIFICACAO DE TENSAO EM P.U.	GERACAO ATIVA (MW)	GERACAO REATIVA (MVAR)	CARGA ATIVA (MW)	CARGA REATIVA (MVAR)	LIMITES QMIN (MVAR)	LIMITES QMAX (MVAR)	LIMITES VMIN (PU)	LIMITES VMAX (PU)	SHUNT DA BARRA EM MVAR
1	A	1.000000	315.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
2	B	.000000	.000	.000	40.000	25.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
3	C	.000000	.000	.000	60.000	30.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
4	D	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
5	E	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
6	F	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
7	G	.000000	50.000	10.000	120.000	55.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
8	H	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
9	I	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
10	J	.980000	400.000	.000	500.000	300.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
11	K	.000000	.000	.000	20.000	10.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
12	L	.980000	70.000	.000	40.000	10.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
13	M	.000000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000
14	N	.980000	26.300	.000	80.000	42.000	.000	.000	.9900	1.1000	.000

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E3

14 BARRAS - 16 LINHAS

DADOS DE LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U.		
			RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL
11	13	1	.01467	.30537	.34074
2	11	1	.01219	.28719	.28652
3	2	1	.01983	.34359	.46368
3	9	1	.00585	.24215	.13648
4	3	1	.01405	.30124	.32718
2	1	1	.02108	.25206	.48980
1	4	1	.01405	.30124	.32718
5	6	1	.03886	.21762	.04856
6	8	1	.03886	.31762	.04856
2	1	2	.02108	.25206	.48980
1	4	2	.01405	.30124	.32718

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E3

14 BARRAS - 16 LINHAS

DADOS DE TRANSFORMADORES

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	VALORES DE LINHA EM P.U. RESISTENCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA TOTAL	TAPS DE TRANSFORMADORES EM P.U. INICIAL	MINIMO	INCREMENTO	MAXIMO	TIPO	TENSAO DESEJADA NA BARRA RECEPTORA
14	13	1	.00000	.12000	.00000	1.00000	.0000	.00000	.0000	FIXO	.00000
10	9	1	.00000	.08000	.00000	1.00000	.0000	.00000	.0000	FIXO	.00000
5	4	1	.00000	.08000	.00000	1.00000	.0000	.00000	.0000	FIXO	.00000
7	6	1	.00000	.08000	.00000	1.00000	.0000	.00000	.0000	FIXO	.00000
12	8	1	.00000	.12000	.00000	1.00000	.0000	.00000	.0000	FIXO	.00000

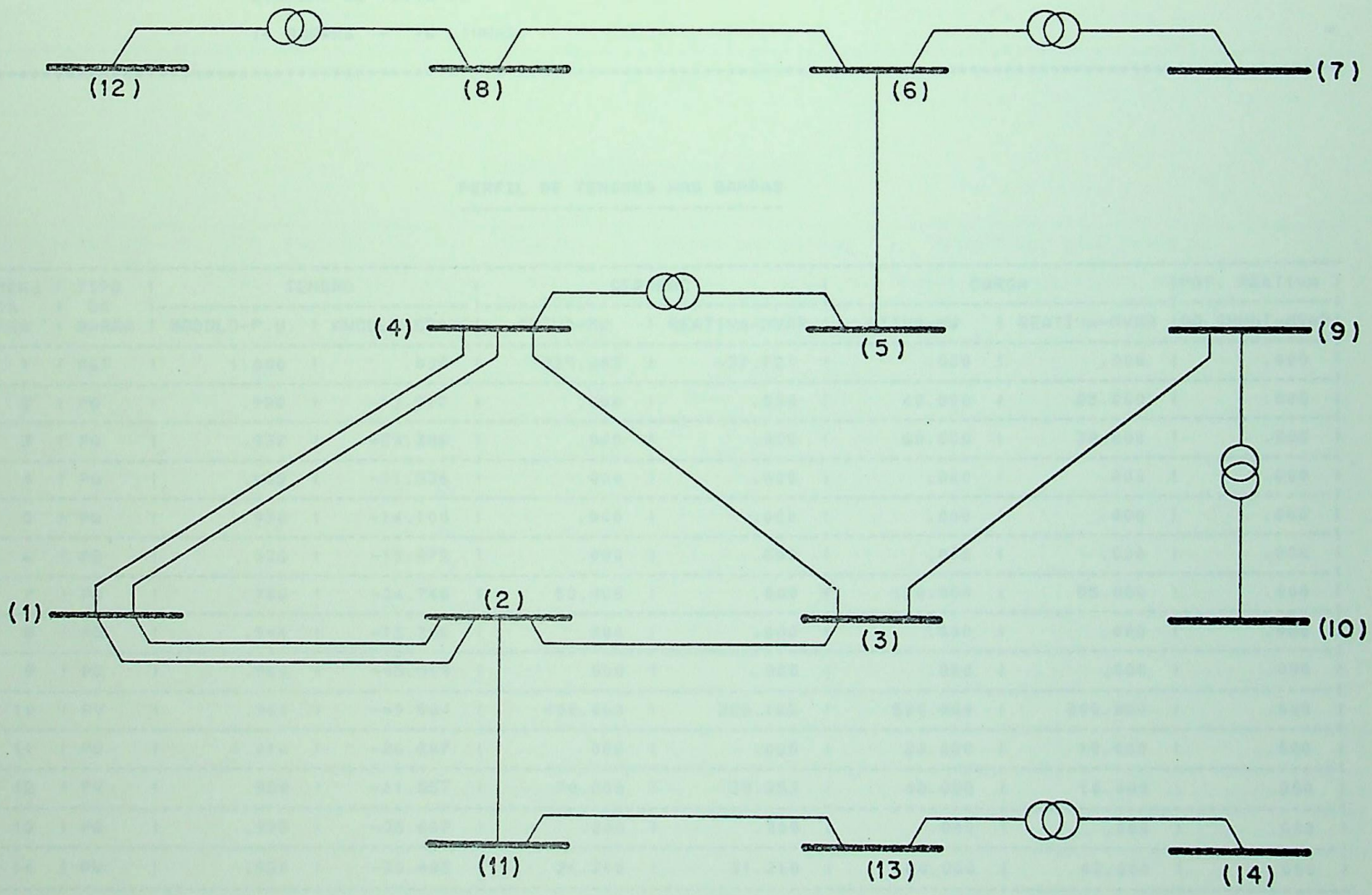
ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E3

14 BARRAS - 16 LINHAS

```
     0 SISTEMA CONTEM :

 14    BARRAS , SENDO :
      1    BARRAS   V, ANG
      3    BARRAS   P, V
     10    BARRAS   P, Q.
 11    LINHAS
  0    IMPEDANCIAS SHUNT
  5    TRANSFORMADORES, SENDO :
      5    TRANSF. TAP FIXO
      0    TRANSF. TAP AUTOM.
```


(12)
(8)
(6)
(7)
(4)
(5)
(9)
(1)
(2)
(3)
(10)
(11)
(13)
(14)

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E3

14 BARRAS - 16 LINHAS

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
1	REF	1.000	.000	325.283	-37.721	.000	.000	.000
2	PQ	.998	-13.977	.000	.000	40.000	25.000	.000
3	PQ	.937	-29.306	.000	.000	60.000	30.000	.000
4	PQ	.959	-11.936	.000	.000	.000	.000	.000
5	PQ	.930	-14.100	.000	.000	.000	.000	.000
6	PQ	.836	-19.872	.000	.000	.000	.000	.000
7	PQ	.788	-24.746	50.000	.000	120.000	55.000	.000
8	PQ	.944	-13.786	.000	.000	.000	.000	.000
9	PQ	.960	-45.009	.000	.000	.000	.000	.000
10	PV	.980	-49.884	400.000	328.185	500.000	300.000	.000
11	PQ	1.010	-26.287	.000	.000	20.000	10.000	.000
12	PV	.980	-11.557	70.000	39.853	40.000	10.000	.000
13	PQ	.995	-35.697	.000	.000	.000	.000	.000
14	PV	.980	-39.485	26.300	31.210	80.000	42.000	.000
TOTAL				871.583	361.527	860.000	472.000	.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E3 *

* 14 BARRAS - 16 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
11	13	1	54.128	-10.808	53.700	14.537	.428	-25.345	.000	-17.369	.000	-16.880	.000
2	11	1	74.813	-13.531	74.127	-.813	.685	-12.718	.000	-14.261	.000	-14.605	.000
2	3	1	73.277	-.062	72.101	23.021	1.175	-23.083	.000	-23.079	.000	-20.365	.000
3	9	1	100.669	-3.541	99.994	-19.205	.675	15.664	.000	-5.994	.000	-6.295	.000
4	3	1	89.837	1.288	88.564	3.391	1.274	-2.103	.000	-15.044	.000	-14.370	.000
1	2	1	95.993	-19.897	94.046	5.692	1.947	-25.589	.000	-24.490	.000	-24.379	.000
1	4	1	66.649	1.036	65.982	18.147	.667	-17.110	.000	-16.359	.000	-15.044	.000
5	6	1	42.126	32.409	40.789	28.756	1.33:	3.654	.000	-2.102	.000	-1.698	.000
8	6	1	29.998	27.616	29.219	25.112	.779	2.503	.000	-2.164	.000	-1.698	.000
1	2	2	95.993	-19.897	94.046	5.692	1.947	-25.589	.000	-24.490	.000	-24.379	.000
1	4	2	66.649	1.036	65.982	18.147	.667	-17.110	.000	-16.359	.000	-15.044	.000
13	14	1	53.700	14.538	53.700	10.790	.000	3.749	.000	.000	.000	.000	1.000
9	10	1	100.000	-19.194	100.000	-28.185	.000	8.991	.000	.000	.000	.000	1.000
4	5	1	42.121	35.018	42.121	32.407	.000	2.611	.000	.000	.000	.000	1.000
6	7	1	69.974	53.878	69.974	44.958	.000	8.920	.000	.000	.000	.000	1.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E3 *

* 14 BARRAS - 16 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
12	8	1	30.000	29.853	30.000	27.615	.000	2.238	.000	.000	.000	.000	1.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E3 *

* 14 BARRAS - 16 LINHAS *

****

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
SERIE	11.5745	-100.3188
SHUNT	.0000	-316.4703
TOTAL	11.5745	-416.7891

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E3

14 BARRAS - 16 LINHAS

UNIDADE PADRAO DE CAPACITOR EM KVAR : 1200.000
MAXIMO AUMENTO PERCENTUAL EM RELACAO A TENSAO ORIGINAL : 50.000 %
MAXIMO KVAR DE CAPACITOR PERMITIDO AO SISTEMA : 150000.000

RESTRICOES DO SISTEMA

BARRA	TENSAO (PU) MINIMA	TENSAO (PU) MAXIMA	KVAR MAXIMO
1	.9900	1.1000	20000.0000
2	.9900	1.1000	20000.0000
3	.9900	1.1000	20000.0000
4	.9900	1.1000	20000.0000
5	.9900	1.1000	20000.0000
6	.9900	1.1000	20000.0000
7	.9900	1.1000	20000.0000
8	.9900	1.1000	20000.0000
9	.9900	1.1000	20000.0000
10	.9900	1.1000	20000.0000
11	.9900	1.1000	20000.0000
12	.9900	1.1000	20000.0000
13	.9900	1.1000	20000.0000
14	.9900	1.1000	20000.0000

```
*****************************************************************************************************************
*                          ALOCACAO  DE  CAPACITORES                                                            *
*                          SISTEMA DE TESTE E3                                                                  *
*                          14 BARRAS  -  16 LINHAS                                                              *
*****************************************************************************************************************
```

BARRAS COM TENSAO BAIXA,
E QUE PODEM RECEBER CAPACITORES

1.)	3
2.)	4
3.)	5
4.)	6
5.)	7
6.)	8
7.)	9

BARRAS VIZINHAS

1.)	2

RESULTADOS FINAIS OBTIDOS APOS 09 PASSOS DE ALOCACAO

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E3 *

* 14 BARRAS - 16 LINHAS *

****

PERFIL DE TENSOES NAS BARRAS

NUMERO DA BARRA	TIPO DA BARRA	TENSAO		GERACAO		CARGA		POT. REATIVA
		MODULO-P.U.	ANGULO-GRAUS	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	ATIVA-MW	REATIVA-MVAR	DO SHUNT-MVAR
1	REF	1.000	.000	323.606	-106.930	.000	.000	.000
2	PQ	1.019	-13.506	.000	.000	40.000	25.000	.000
3	PQ	1.003	-26.941	.000	.000	60.000	30.000	12.000
4	PQ	1.036	-11.423	.000	.000	.000	.000	.000
5	PQ	1.046	-13.158	.000	.000	.000	.000	19.200
6	PQ	1.014	-17.789	.000	.000	.000	.000	19.200
7	PQ	.996	-20.970	50.000	.000	120.000	55.000	19.200
8	PQ	1.011	-12.382	.000	.000	.000	.000	19.200
9	PQ	.990	-41.095	.000	.000	.000	.000	19.200
10	PV	.980	-45.825	400.000	291.709	500.000	300.000	.000
11	PQ	1.025	-25.364	.000	.000	20.000	10.000	.000
12	PV	.980	-10.298	70.000	-14.575	40.000	10.000	.000
13	PQ	1.000	-34.569	.000	.000	.000	.000	.000
14	PV	.980	-38.341	26.300	27.592	80.000	42.000	.000
TOTAL				869.906	197.797	860.000	472.000	108.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E3 *

* 14 BARRAS - 16 LINHAS *

****

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
11	13	1	54.154	-7.826	53.730	18.269	.424	-26.095	.000	-17.888	.000	-17.030	.000
2	11	1	74.830	-12.247	74.172	2.175	.658	-14.422	.000	-14.881	.000	-15.042	.000
2	3	1	69.640	-15.176	68.699	15.927	.941	-31.103	.000	-24.082	.000	-23.326	.000
3	9	1	100.666	8.503	100.063	-2.899	.603	11.402	.000	-6.866	.000	-6.690	.000
4	3	1	93.212	2.026	92.025	10.587	1.187	-8.561	.000	-17.561	.000	-16.459	.000
1	2	1	94.076	-28.784	92.206	-1.210	1.870	-27.574	.000	-24.490	.000	-25.438	.000
1	4	1	67.727	-24.681	67.073	-4.788	.654	-19.893	.000	-16.359	.000	-17.561	.000
5	6	1	40.996	6.572	40.368	8.209	.628	-1.637	.000	-2.654	.000	-2.498	.000
8	6	1	30.005	-5.867	29.658	-3.723	.347	-2.144	.000	-2.481	.000	-2.498	.000
1	2	2	94.076	-28.784	92.206	-1.210	1.870	-27.574	.000	-24.490	.000	-25.438	.000
1	4	2	67.727	-24.681	67.073	-4.788	.654	-19.893	.000	-16.359	.000	-17.561	.000
13	14	1	53.708	18.271	53.708	14.408	.000	3.864	.000	.000	.000	.000	1.000
9	10	1	100.012	16.680	100.012	8.291	.000	8.389	.000	.000	.000	.000	1.000
4	5	1	40.995	-11.598	40.995	-12.951	.000	1.353	.000	.000	.000	.000	1.000
6	7	1	70.071	25.296	70.071	20.981	.000	4.315	.000	.000	.000	.000	1.000

Escola Federal de Engenharia Biblioteca ITAJUBÁ

ALOCACAO DE CAPACITORES

SISTEMA DE TESTE E3

14 BARRAS - 16 LINHAS

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	CIRCUITO	POT. EMITIDA ATIVA MW	POT. EMITIDA REATIVA MVAR	POT. RECEBIDA ATIVA MW	POT. RECEBIDA REATIVA MVAR	PERDAS NAS LINHAS ATIVA MW	PERDAS NAS LINHAS REATIVA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA EMISSORA MVAR	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MW	PERDAS NOS LINE CHARGING BARRA RECEPTORA MVAR	TAP P.U.
12	8	1	30.004	-24.575	30.004	-26.454	.000	1.880	.000	.000	.000	.000	1.000

****

* ALOCACAO DE CAPACITORES *

* SISTEMA DE TESTE E3 *

* 14 BARRAS - 16 LINHAS *

****

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
SERIE	9.8351	-147.6931
SHUNT	.0000	-337.6509
TOTAL	9.8351	-485.3441

TEMPO DE CPU DO FLUXO DE CARGA INICIAL : 16.477 SEGUNDOS

TEMPO DE CPU DA ALOCACAO : 169.073 SEGUNDOS

FIM DO PROGRAMA

COMPARAÇÃO ENTRE AS DIFERENTES ALTERNATIVAS PARA REAVALIAÇÃO DAS TENSÕES

Já foi bastante enfatizado neste trabalho o fato de haver 3 formas de se calcular as tensões das barras do sistema, após estas terem recebido capacitores. No Capítulo 3, são mostrados os detalhes de como isto é realizado.

Com o propósito de mostrar as diferenças existentes entre os valores das tensões calculadas através das 3 formas, é apresentada neste exemplo uma tabela, calculada pelo programa de alocação, na qual são encontrados os valores de tensão para o sistema E2, descrito anteriormente. Esta tabela contém apenas os valores das tensões nas barras de carga, onde houver variação de tensão devido à alocação de capacitores no sistema.

NUMERO DA BARRA	METODO 1: ITERACAO SOMENTE NA BARRA DO CAPACITOR		METODO 2: ITERACAO EM TODAS AS BARRAS DO SISTEMA	
	MODULO - P.U.	ANGULO - GRAUS	MODULO - P.U.	ANGULO - GRAUS
2	.998	-8.817	.998	-8.819
4	1.006	-10.766	1.006	-10.771
5	1.018	-15.931	1.018	-15.942
6	1.021	-18.280	1.021	-18.290
7	1.065	-13.645	1.066	-13.652
8	1.027	-16.805	1.028	-16.816
9	1.036	-19.176	1.036	-19.188
10	1.001	-19.212	1.001	-19.223
11	1.073	-19.021	1.074	-19.036

TABELAS DE DESEMPENHO DO MÉTODO

A seguir, são mostradas algumas tabelas de ordem mais geral, representativas da performance do método da alocação de capacitores, empregado neste trabalho.

A tabela 1 apresenta o desempenho computacional do método. Pode-se observar que o tempo de computador por iteração, por barra, é sensivelmente semelhante para todos os sistemas apresentados na tabela, ou seja, o tempo médio de CPU é proporcional ao número de barras do sistema.

Ela permite também observar-se o comportamento de cada sistema durante a simulação. Este comportamento é dependente de fatores tais como limites de tensão e tamanho do capacitor utilizado no banco de capacitores, os quais fazem parte do conjunto de restrições do sistema em estudo.

TABELA 1 - PERFORMANCE COMPUTACIONAL

S I S T E M A			LIMITES DE TENSÃO (PU)		Número de Passos de Alocação	Tempo total de CPU (segundos)	Tempo médio por iteração (segundos)	Tempo médio por iteração por barra	step de KVAR na alocação
Nome	Nº de barras	Nº de linhas	Mínima	Máxima					
E1	36	51	0.930	1.100	51	268	5.255	0.146	1200
E2	11	13	0.980	1.100	49	83	1.694	0.154	800
E3	14	16	0.990	1.100	89	169	1.899	0.136	1200
T1	5	7	0.985	1.100	41	49	1.183	0.237	800
T2	14	20	0.975	1.100	74	172	2.324	0.166	600
T3	6	7	0.990	1.100	40	49	1.225	0.204	1200
T4	21	32	0.990	1.100	186	670	3.602	0.172	1600
T5	22	31	0.950	1.100	48	161	3.354	0.152	800

A tabela 2 mostra, para todos os sistemas apresentados anteriormente, qual foi a máxima diferença obtida no cálculo dos valores de tensão, utilizando os métodos aproximados citados no Capítulo 3, com relação ao método exato que é o do fluxo de carga.

Com estes resultados, observa-se que os valores de tensão obtidos pelos dois métodos são muito próximos, sendo que a maior diferença acusada está em torno de 2.3%.

Portanto, sendo as tensões obtidas pelas 3 formas, aproximadamente iguais, optou-se pelo cálculo das mesmas utilizando a primeira forma, ou seja, através da iteração apenas na barra onde o capacitor foi alocado, visto que, aí ocorre um menor número de operações e, portanto, menor tempo de computador e memória de CPU também.

Escola Federal de E
Biblioteca
de Itajubá

TABELA 2 - TENSÕES CALCULADAS

NOME DO SISTEMA	Máxima diferença entre os valores de tensão obtidos pelos métodos aproximados, em relação ao método exato (fluxo de carga) em %	
	Iteração numa barra	Iteração em todas as barras
E1	0.214	0.218
E2	0.199	0.201
E3	1.088	1.385
T1	0.203	0.203
T2	0.610	0.615
T3	0.385	0.481
T4	1.670	2.358
T5	0.097	0.097

A tabela 3 tem por objetivo mostrar a diferença entre as perdas ativas do sistema, antes e depois da alocação de capacitores no mesmo.

Pode-se observar, através da análise desta tabela, que para todos os sistemas apresentados, a queda na perda ativa do sistema foi bastante significativa, proporcionando desta forma economia real para o sistema.

TABELA 3 - PERDAS ATIVAS

NOME DO SISTEMA	Diferença dos valores das perdas ativas do sistema em MW		
	Antes da Alocação	Depois da Alocação	Percentagem de queda
E1	17.894	15.261	17.25
E2	2.233	2.018	10.65
E3	11.575	9.835	17.69
T1	5.910	4.900	20.61
T2	7.462	7.304	2.16
T3	15.497	9.626	60.99
T4	12.406	7.250	71.12
T5	3.464	3.014	14.93

5.3 - CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados obtidos na alocação para os sistemas apresentados, verifica-se que o método satisfaz aos objetivos do problema, ou seja, mantém os níveis de tensão nos limites pré-determinados e reduz as perdas do sistema. Pode-se ter uma idéia da ordem de grandeza que determinado sistema gastará com computador, pois o tempo médio de processamento é proporcional ao número de barras do sistema em teste.

O método é de simples implementação computacional, e os resultados do programa são fáceis de serem analisados. Devido à rapidez do programa ao simular o método da alocação, pode-se ter várias simulações do sistema em pouco tempo de computador, auxiliando desta forma o planejamento de futuros sistemas.

Vários sistemas foram testados durante a elaboração deste trabalho e, em todos eles, apesar de todas as restrições impostas, mesmo que propositadamente severas, os resultados foram obtidos com a precisão desejada.

CAPÍTULO VI

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES FINAIS

Um algoritmo para a alocação de capacitores para fins de compensação reativa foi desenvolvido e implementado computacionalmente. Este algoritmo consiste, principalmente, na aplicação de fatores de sensitividade, obtidos através da matriz de impedância nodal do sistema, para a seleção das barras onde serão instalados os capacitores, e na aplicação do fluxo de carga utilizando o método desacoplado.

A utilização destes métodos tornaram o processo de alocação muito atrativo, devido à rapidez da solução e a pouca memória requerida.

O processo de alocação utilizado neste trabalho apresenta ainda as seguintes características:

a) a qualidade da solução obtida, em relação à alocação de capacitores, em termos de local e quantidade, pode ser considerada boa, pois o sistema é analisado do ponto de vista de sensitividade, possibilitando desta forma o melhor aproveitamento do capacitor alocado;

b) o número de operações de processamento é pequeno, proporcionando, desta forma, pequeno tempo total gasto em compu

tador, isto porque técnicas auxiliares foram utilizadas . São elas a exploração da esparsidade do sistema, o desacoplamento na solução do fluxo de carga, a aplicação dos fatores de sensitividade no cálculo da alocação e a montagem da matriz de impedância nodal através da eliminação de eixos;

c) depois de implementado, o método não exige do analista conhecimentos profundos do sistema em análise, pois assim como os dados são os mínimos necessários e fáceis de serem obtidos; os resultados são também muito fáceis de serem analisados;

d) o método é de simples implementação computacional;

e) o método envolve técnicas numéricas simples, porém requer simplificação em algumas expressões, mais especificamente, naquelas onde se calculam as novas tensões de barras após a alocação de capacitores, não influindo este fato de modo marcante na precisão dos resultados obtidos, conforme já mostrado anteriormente.

Uma das grandes vantagens deste método reside no fato de que ele não é desenvolvido sob técnicas de programação não linear, não tendo portanto, problemas de convergência nas soluções. Este fato, além de proporcionar bons resultados, permite também obtê-los de maneira mais rápida e sem complexidade de cálculos.

Obviamente este trabalho não esgota o assunto

tratado, o qual é de dimensão bastante ampla. Vários aspectos não foram abordados e outros o foram, porém de forma não exaustiva. Dentre os temas para futuros estudos que podem ser sugeridos, com o objetivo de aperfeiçoar o trabalho aqui tratado, o mais relevante seria a inclusão de restrições de custos ao conjunto de restrições do problema. Isto porque aqui, a alocação de capacitores foi feita visando principalmente a otimização técnica, sem atentar para os custos desta otimização.

Resumindo, o trabalho aqui desenvolvido pode auxiliar o engenheiro de planejamento de sistemas a fazer estudos iniciais de sistemas, visando a compensação reativa, sem no entanto levar em conta o problema dos custos desta compensação.

APÊNDICE I

O FLUXO DE CARGA

1.1 - INTRODUÇÃO

Um estudo de fluxo de carga (loadflow) representa, na linguagem de sistemas de potência, a resolução de um circuito nas condições de regime permanente. Esta resolução não difere de qualquer outro tipo de resolução de circuitos, exceto por certos vínculos que são peculiares aos sistemas de potência.

Por ser um problema não linear, o fluxo de carga pode apresentar dificuldades tais como: divergência, dificuldade de convergência, etc. Por isso, o método a ser utilizado na sua solução requer uma cuidadosa análise de prós e contras à sua utilização; esta análise pode ser caracterizada pela velocidade de convergência, quantidade de memória utilizada pelo computador e facilidade computacional, para se introduzir o método.

Existem hoje vários métodos de solução de fluxo de carga. Neste trabalho será abordado o método de solução de fluxo de carga desacoplado rápido [17] e [18], um dos mais eficientes métodos, graças ao fato de se utilizar características reais do sistema elétrico de potência.

1.2 - DESACOPLADO RÁPIDO

Este método é derivado do método de Newton-Raphson, onde a matriz jacobiana é calculada em cada iteração.

No método desacoplado, a matriz jacobiana do sistema é modificada desprezando-se as submatrizes $\bar{N}$ e $\bar{J}$, isto porque num sistema de potência, a potência ativa é fortemente dependente dos ângulos de fases de tensão, e a potência reativa, dos módulos das tensões.

De acordo com estas características, um incremento nos ângulos de fases $\Delta\theta$ afeta a potência ativa, mais do que as potências reativas, da mesma forma como um incremento nos módulos de tensão θV afeta mais as potências reativas que as potências ativas.

Em sistemas reais Gij é muito menor que Bij e em condições operacionais θij é pequeno; logo,os valores numéricos dos elementos de J e N são pequenos podendo ser desprezados.

Este ato é chamado de desacoplamento.

Desta forma as equações de Newton-Raphson para o cálculo do fluxo de carga, repetidas aqui em (1.2.1A):

$$\begin{bmatrix} \overline{\Delta\theta}^{k} \\ \overline{\Delta V}^{k} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} \bar{H} & \bar{N} \\ \hline \bar{J} & \bar{L} \end{array}\right]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \overline{\Delta P}^{k} \\ \overline{\Delta Q}^{k} \end{bmatrix} \qquad (1.2.1A)$$

se reduzem a:

$$\begin{bmatrix} \overline{\Delta P}^k \\ \overline{\Delta Q}^k \end{bmatrix} = - \left[\begin{array}{c|c} \bar{H} & 0 \\ \hline 0 & \bar{L} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \overline{\Delta \theta}^k \\ \overline{\Delta V}^{k*} \end{bmatrix} \qquad (1.2.2A)$$

ou seja:

$$\overline{\Delta P}^k = - \bar{H} \cdot \overline{\Delta \theta}^k \qquad (1.2.3A)$$

$$\overline{\Delta Q}^k = - \bar{L} \cdot \overline{\Delta V}^{k*} \qquad (1.2.4A)$$

Mas:

$$Hij = Lij = - ViVj \, (Gij \operatorname{sen} \theta ij - Bij \cos \theta ij) \qquad (1.2.5A)$$

$$Hii = Vi^2 \, Bii + Vi \sum_{k=1}^{m} Vk \, (Gik \operatorname{sen} \theta ik - Bik \cos \theta ik) \qquad (1.2.6A)$$

$$Lii = Vi^2 \, Bii - Vi \sum_{k=1}^{m} Vk \, (Gik \operatorname{sen} \theta ik - Bik \cos \theta ik) \qquad (1.2.7A)$$

Considerando-se que em sistemas elétricos o ângulo θij é muito pequeno, pode-se ainda fazer as seguintes aproximações:

$$\cos \theta ij \cong 1 \qquad (1.2.8A)$$

$$Gij \operatorname{sen} \theta ij \cong 0 \qquad (1.2.9A)$$

Pela substituição de (1.2.8A) e (1.2.9A) em (1.2.5A) e (1.2.6A) tem-se que:

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Biblioteca

$$Hij = Lij \cong ViVj\ Bij \qquad (1.2.10A)$$

$$Hii = Lii \cong Vi\ Vi\ Bii \qquad (1.2.11A)$$

Portanto, substituindo-se (1.2.10A) e (1.2.11A) em (1.2.3A) e (1.2.4A), tem-se:

$$\overline{\Delta P}^{k} = - \overline{VB'V} \cdot \overline{\Delta\theta}^{\,k} \qquad (1.2.12A)$$

$$\overline{\Delta Q}^{k} = - \overline{VB''V} \cdot \overline{\Delta V}^{k*} \qquad (1.2.13A)$$

onde:

$\overline{VB'V}$ e $\overline{VB''V}$ são matrizes onde o elemento ij é dado pela expressão:

$$Vi \cdot Bij \cdot Vj \qquad (1.2.14A)$$

e Bij é o elemento ij da matriz de susceptância nodal $\bar{B}$.

1.2.1 - Considerações sobre o Método

As equações (1.2.12A) e (1.2.13A) podem ainda ser reescritas como:

$$\overline{\Delta P}^{k*} = - \overline{B'V} \cdot \overline{\Delta\theta}^{k} \qquad (1.2.15A)$$

$$\overline{\Delta Q}^{k*} = - \overline{B''} \cdot \overline{\Delta V}^{k} \qquad (1.2.16A)$$

Com o objetivo de desacoplar ainda mais as equações de fluxo de carga, pode-se remover a influência dos elementos de $\bar{V}$ nos fluxos de potência ativa, considerando-se estes elementos iguais a 1.0 pu na equação (1.2.15A). Desta forma, as equações (1.2.15A) e (1.2.16A) ficarão:

$$\overline{\Delta P}^{k*} = - \bar{B}' \cdot \overline{\Delta\theta}^{k} \qquad (1.2.17A)$$

$$\overline{\Delta Q}^{k*} = - \bar{B}'' \cdot \overline{\Delta V}^{k} \qquad (1.2.18A)$$

Na matriz $\bar{B}'$ é omitida a representação de componentes do sistema que afetam predominantemente os fluxos reativos tais como reatâncias shunts e taps em fase de transformadores. São desprezadas também as resistências das linhas, a fim de melhorar a convergência do método.

Da mesma forma, na matriz $\bar{B}''$ é omitida a representação de componentes de sistema que afetam os fluxos ativos, tais como taps em quadratura de transformadores.

Desde que $\bar{B}'$ e $\bar{B}''$ contém apenas admitâncias do sistema e não dependem dos módulos das tensões nem dos ângulos de fases, elas são constantes e precisam ser fatoradas apenas uma vez, no início do processo iterativo.

1.2.2 - Algorítmo de Solução

Pode-se resumir o método desacoplado rápido nos

seguintes passos:

a) Formar a matriz $\bar{Y}$ de admitâncias do sistema.

b) Formar e inverter as matrizes $\bar{B}'$ e $\bar{B}''$.

c) Estimar valores iniciais para as variáveis de controle.

d) Inicializar o conjunto de variáveis de estado, ou seja:

$$\bar{X}^o = \begin{bmatrix} \bar{\theta}^o \\ \hline \bar{V}^o \end{bmatrix}$$

e) Calcular $\bar{P}^{o*}$

f) Calcular $\overline{\Delta\theta}^o$ com a seguinte equação:

$$\overline{\Delta\theta}^o = - \bar{B}'^{-1} \cdot \overline{\Delta P}^{o*}$$

g) Calcular o novo valor de:

$$\bar{\theta}^1 = \bar{\theta}^o + \overline{\Delta\theta}^o$$

h) Calcular $\overline{\Delta Q}^{o*}$

i) Calcular $\overline{\Delta V}$ usando:

$$\overline{\Delta V}^o = - \bar{B}''^{-1} \cdot \overline{\Delta Q}^{o*}$$

j) Calcular o novo valor de $\bar{V}$:

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI Biblioteca

$$\bar{V}^{1} = \bar{V}^{o} + \overline{\Delta V}^{o}$$

k) Testar a convergência:

$$\max(\overline{\Delta P}^{1*}), (\overline{\Delta Q}^{1*}) \leq \varepsilon$$

Se a convergência não for atingida, repetir o processo a partir de f) com os valores de $\bar{V}^{1}$ e $\bar{\theta}^{1}$.

Caso contrário, imprimir os resultados.

APÊNDICE II

OBTENÇÃO DA MATRIZ DE IMPEDÂNCIA NODAL, UTILIZANDO O MÉTODO DE BARRAS DESCARTÁVEIS

2.1 - INTRODUÇÃO

O processo de obtenção da matriz de impedância nodal, descrito em [1], consiste do processamento sucessivo das linhas do sistema.

O método de barras descartáveis, conforme descrito em [5], é assim denominado porque processa todas as linhas do sistema, retendo na matriz de impedância apenas as barras que interessam, as quais serão denominadas aqui de barras relevantes.

A montagem da matriz de impedância nodal é feita de tal forma que os eixos referentes às barras descartáveis, ou seja, as barras que não são relevantes, permanecem na matriz durante a fase de construção desta, somente enquanto elas intervierem na formação de outros eixos. Depois o eixo pode ser eliminado, substituindo-o pelo último eixo formado. Isto é muito conveniente, pois proporciona uma diminuição da área necessária para a formação desta matriz.

2.2 - O MÉTODO

O método é descrito com detalhes em [5], sendo aqui apresentados os pontos mais relevantes do mesmo.

Antes de se iniciar a montagem da matriz de impedância nodal do sistema, é necessário um reordenamento dos dados de linhas. A lista que contém as linhas reordenadas é aqui denominada DESC.

É necessário também a criação de uma lista, contendo as barras relevantes, a qual é obtida neste trabalho pelo programa de alocação de capacitores, após a análise comparativa entre as tensões obtidas no fluxo de carga e as restrições impostas ao problema. Esta lista é denominada LISTREL, e tem dimensão igual ao número de barras do sistema. Os valores desta lista são constituídos de 0 ou 1, respectivamente para as barras descartáveis e relevantes, ou seja, quando LISTREL(K) = 0, K é uma barra descartável.

Neste ponto é iniciada a montagem da matriz de impedância nodal do sistema com o processamento sequencial da lista DESC. Durante a formação desta matriz, ao processar-se a linha ℓ_i, que contém a barra K, é necessário também analisar-se a lista LISTREL, a fim de se proceder ou não a eliminação do eixo referente à barra K, dependendo do seu tipo.

A fim de se reduzir o tempo em que a barra descartável permanece na matriz de impedância, durante a sua

formação, é necessário que o método atenda às seguintes regras:

a) Se a barra K em processo é relevante e chega-se a uma linha ligada a ela, cuja outra barra é descartável, a linha não é agregada, mas a barra descartável é transferida a uma lista de espera LED. Se a outra barra é relevante, agrega-se a linha à matriz de impedância e a barra é transferida a uma lista de espera LER.

b) Se a barra em processo é descartável, todas as linhas ligadas a ela são agregadas, qualquer que seja o tipo da outra barra. Esta outra barra é transferida à lista de espera LED caso seja descartável ou LER caso contrário.

c) O processamento das barras é feito de acordo com a lista LED, isto é, enquanto houver barras na lista LED, estas são processadas em primeiro lugar. Ao esgotar-se as barras da lista LED, a primeira barra da lista LER é processada.

Se, ao esgotarem as barras das listas LED e LER, ainda houver barras não agregadas à matriz de impedância, coloca-se em LER ou LED, conforme o tipo da barra, a primeira barra ligada à referência que ainda não tenha sido agregada. Esta também é a ação inicial do processo. Uma análise prévia acerca da melhor escolha da referência pode otimizar ainda mais o processo.

2.3 - EXEMPLO ILUSTRATIVO

Com o objetivo de se fixar o método, o seu desenvolvimento é aplicado ao sistema da figura 2.1.A a seguir.

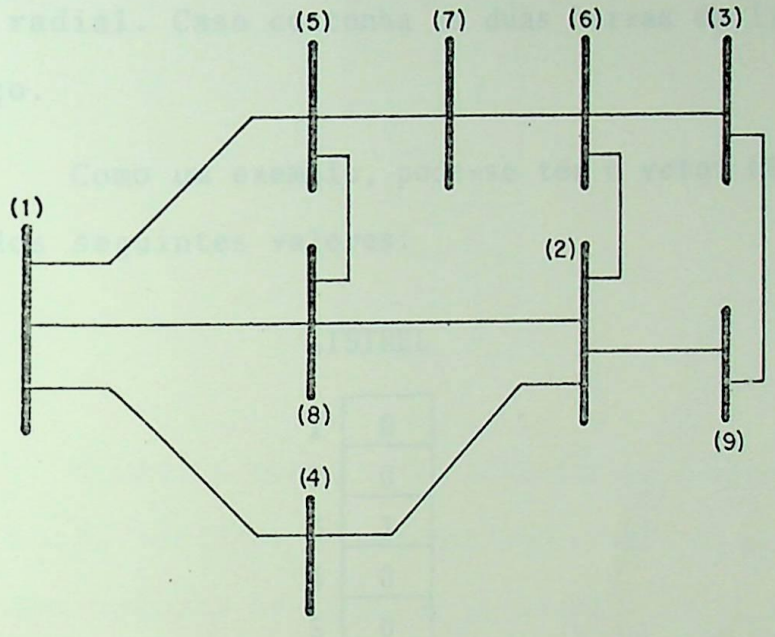


Figura 2.1.A

A lista de linhas é dada pelo seguinte vetor:

I	EMS(I)	REC(I)
1	8	2
2	6	7
3	1	8
4	3	9
5	5	1
6	2	4
7	7	5
8	6	2
9	5	8
10	4	1
11	3	6
12	9	2

Após a obtenção da lista DESC, que contém as linhas reordenadas, é necessário conhecer-se quais os tipos das linhas que constituem esta lista, ou seja, se são radiais ou fecha-laço. Isto pode ser feito, analisando-se a lista DESC de 1 a I-1, onde I é o índice da linha em estudo. Se a sublista analisada tem apenas uma das duas barras da linha I, ela é radial. Caso contenha as duas barras da linha I, é fecha-laço.

Como um exemplo, pode-se ter o vetor LISTREL constituído dos seguintes valores:

LISTREL

1	0
2	0
3	1
4	0
5	0
6	1
7	0
8	0
9	1

Isto significa que as barras 3, 6 e 9 são relevantes.

A primeira linha ligada à referência é a linha 1-8. Portanto, o vetor DESC será constituído da seguinte forma:

DESC

	NEM	NRE
1)	1	8
2)	8	2
3)	5	8
4)	2	4
5)	6	2
6)	9	2
7)	5	1
8)	7	5
9)	4	1
10)	6	7
11)	3	6
12)	3	9

A medida que o vetor DESC for se compondo, em paralelo serão montados os vetores LED e LER, os quais terão os seguintes valores ao final do processo:

LED

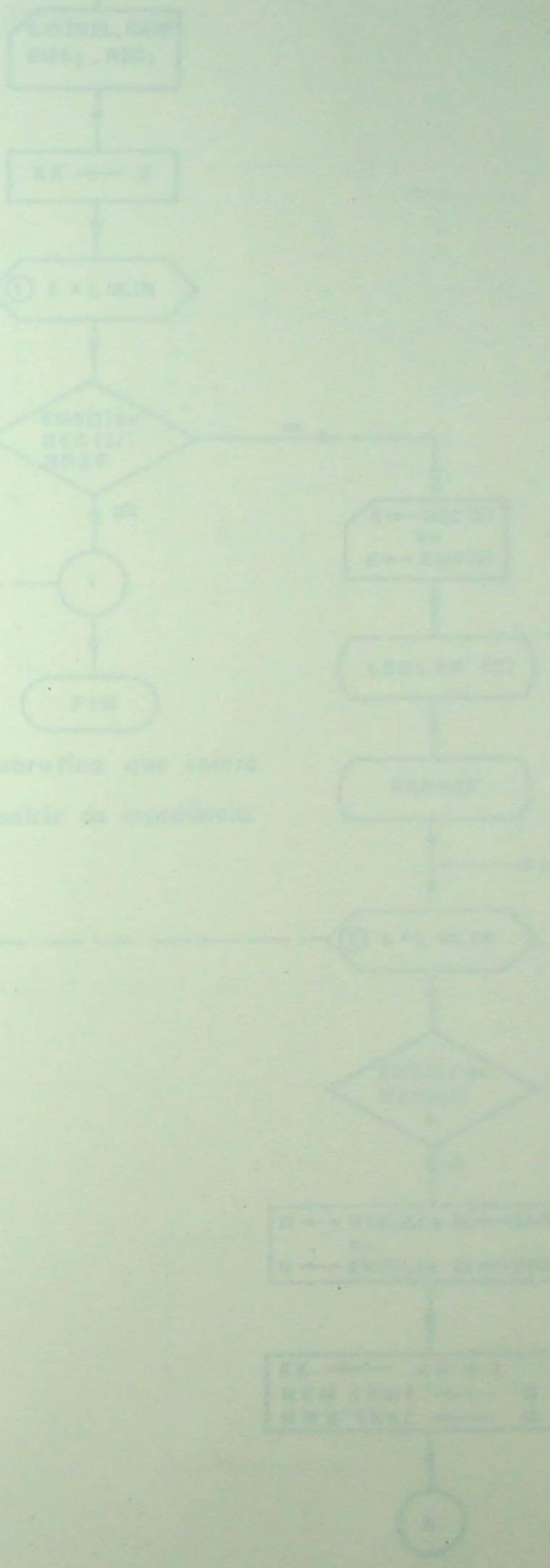
8
2
5
4
7

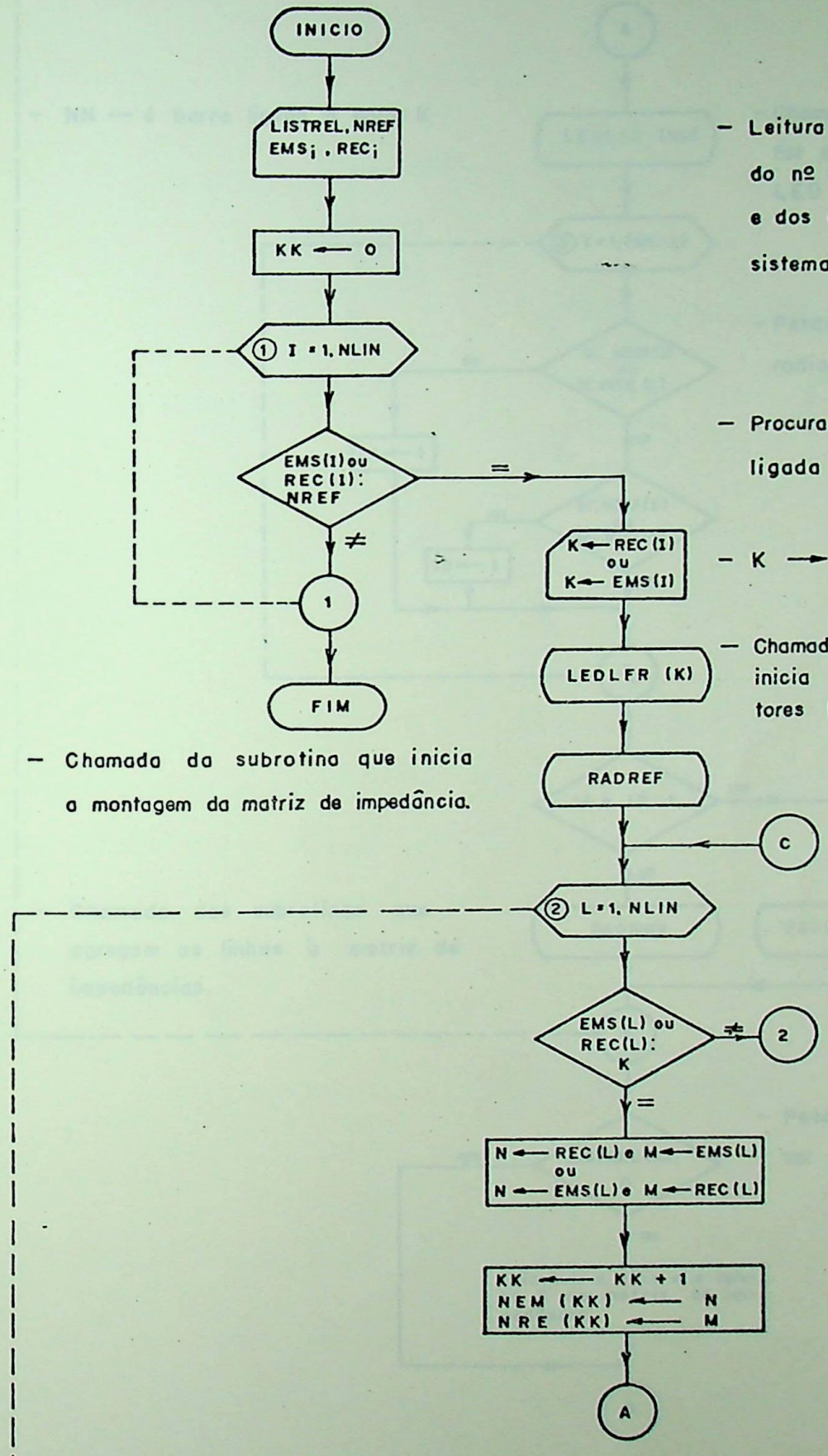
LER

6
9
3

Isto significa que após terminado o processo, as barras 8, 2, 5, 4 e 7 foram descartadas, ficando a matriz de impedância nodal constituída apenas dos eixos correspondentes aos elementos de LER, ou seja, 3, 6 e 9.

A seguir, é mostrado um diagrama de blocos ilustrativo do processo descrito.





— Leitura ao vetor LISTREL; do nº da barra de referencia e dos dados de linhas do sistema

— Procura da primeira linha ligada à referencia.

— K → Barra em estudo

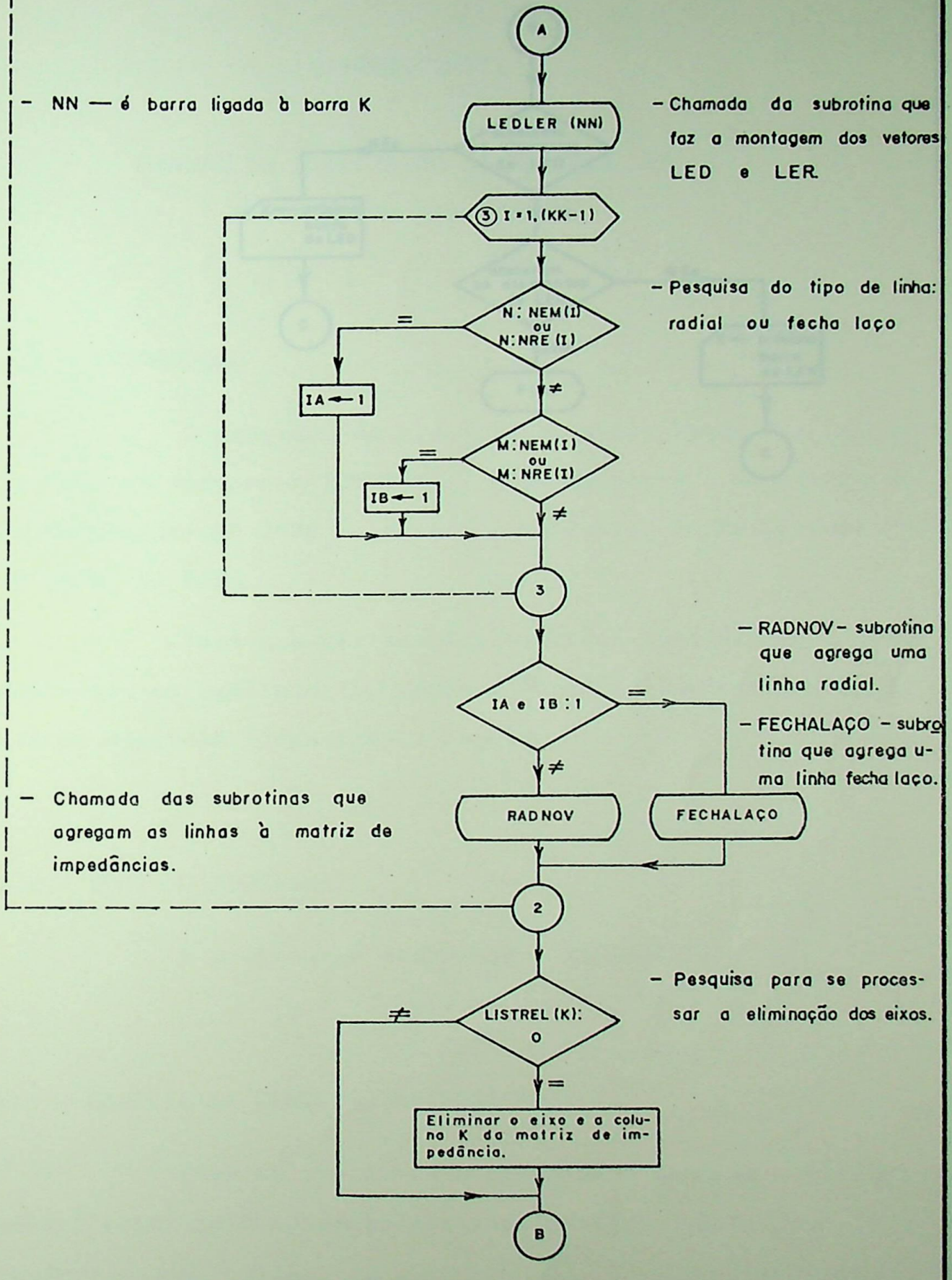
— Chamada da subrotina que inicia a montagem dos vetores LED e LER.

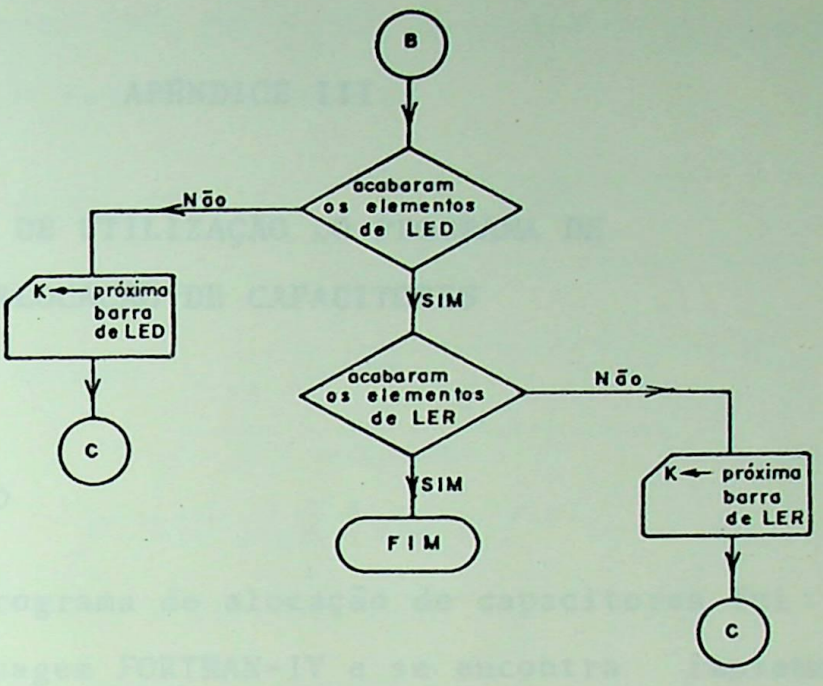
— Chamada da subrotina que inicia a montagem da matriz de impedância.

— Procura das linhas que contém a barra K.

— Montagem do vetor DESC.

KK — indica a posição da linha dentro do vetor DESC.


A
LEDLER (NN)
- Chamada da subrotina que faz a montagem dos vetores LED e LER.
- NN — é barra ligada à barra K
③ I = 1, (KK-1)
- Pesquisa do tipo de linha: radial ou fecha laço
N: NEM(I) ou N: NRE (I)
=
≠
IA ← 1
M: NEM(I) ou M: NRE(I)
=
IB ← 1
≠
3
- RADNOV - subrotina que agrega uma linha radial.
- FECHALAÇO - subrotina que agrega uma linha fecha laço.
IA e IB : 1
=
≠
- Chamada das subrotinas que agregam as linhas à matriz de impedâncias.
RADNOV
FECHALAÇO
2
- Pesquisa para se processar a eliminação dos eixos.
LISTREL (K): 0
≠
=
Eliminar o eixo e a coluna K da matriz de impedância.
B


B
acabaram os elementos de LED
Não
K ← próxima barra de LED
C
SIM
acabaram os elementos de LER
Não
K ← próxima barra de LER
C
SIM
FIM

APÊNDICE III

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO PROGRAMA DE ALOCAÇÃO DE CAPACITORES

3.1 - INTRODUÇÃO

O programa de alocação de capacitores foi desenvolvido na linguagem FORTRAN-IV e se encontra implementado no computador HP 3000 - série III no Centro de Processamento de Dados da EFEI.

Para sua utilização, os dados necessários são descritos no Capítulo IV, porém a forma de fornecer estes dados ao programa é descrita a seguir.

3.2 - NOME DO PROGRAMA

O programa é denominado "ALOCAÇÃO".

3.3 - CARTÕES DE CONTROLE NECESSÁRIOS

Para se processar o programa o deck de cartões deverá estar na disposição mostrada na fig. 3.1.A.

Os cartões de controle servem para se definir os

arquivos auxiliares SRJ, MRJ e PRJ, necessários ao programa e os periféricos de entrada e saída.

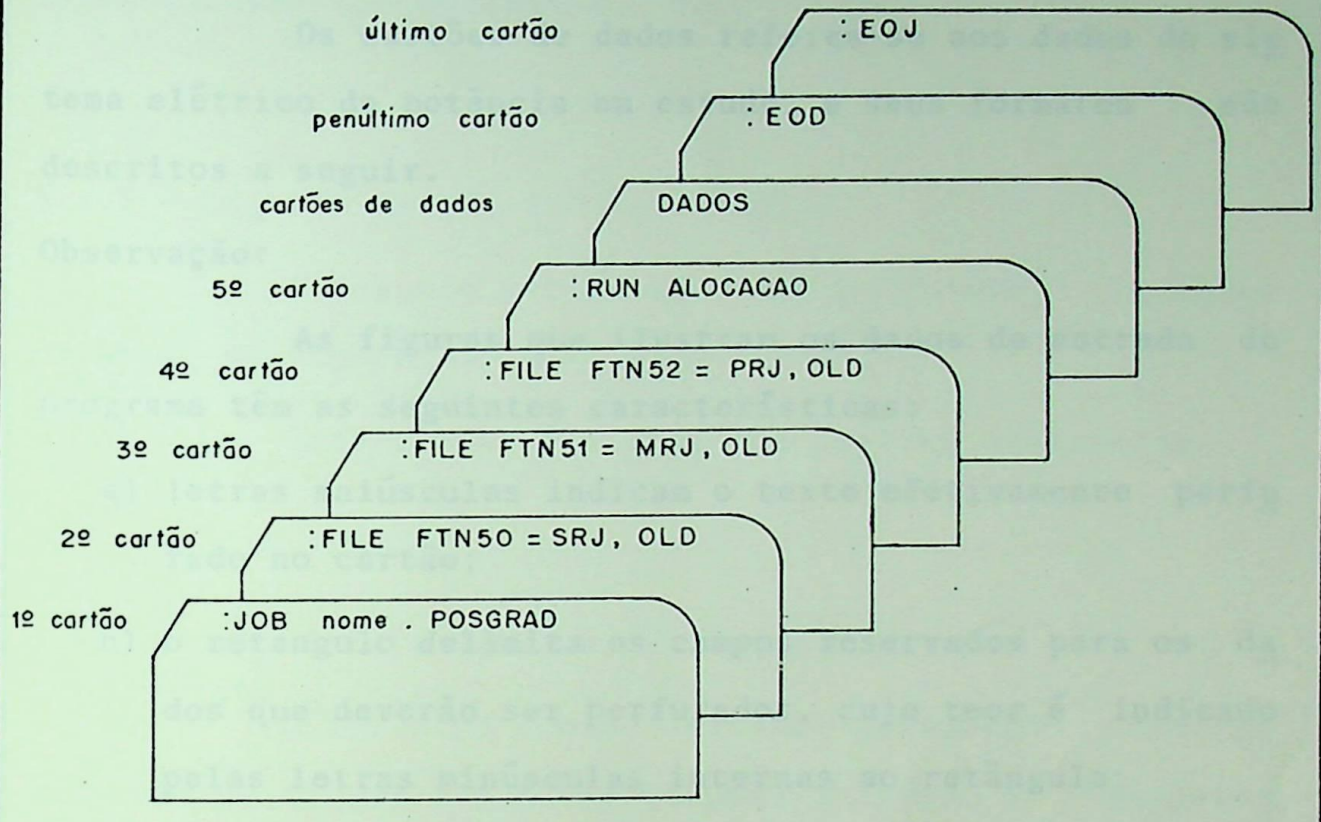


Figura 3.1.A

O nome que aparece na definição do comando do primeiro cartão refere-se ao nome do usuário do programa.

Os 2º, 3º e 4º cartões definem os arquivos auxiliares do programa.

O 5º cartão comanda a execução propriamente dita do programa.

O penúltimo e último cartões encerram o deck e o programa de alocação.

Os cartões de dados referem-se aos dados do sistema elétrico de potência em estudo, e seus formatos são descritos a seguir.

Observação:

As figuras que ilustram os dados de entrada do programa têm as seguintes características:

a) letras maiúsculas indicam o texto efetivamente perfurado no cartão;

b) o retângulo delimita os campos reservados para os dados que deverão ser perfurados, cujo teor é indicado pelas letras minúsculas internas ao retângulo;

c) cada cartão é representado por uma linha das folhas de codificação mostradas adiante.

Escola Federal de Engenharia

3.4 - CARTÕES DE DADOS

3.4.1 - Primeiro Cartão (obrigatório)

O primeiro cartão deve ser perfurado conforme mostrado na figura 3.2.A.

Após este cartão, pode-se colocar até um máximo de 5 cartões, contendo um título para o estudo ou qualquer

outra informação adicional sobre o sistema. O texto escrito nesses cartões será reproduzido na listagem dos resultados. Estes cartões são opcionais.

3.4.2 - Segundo Cartão (obrigatório)

O segundo cartão deve ser perfurado conforme mostrado na figura 3.3.A.

Este cartão é o flag dos cartões anteriores.

3.4.3 - Terceiro Cartão (obrigatório)

O terceiro cartão deve ser perfurado conforme mostrado na figura 3.4.A. Serve para informar ao programa parâmetros importantes do sistema.

Após este cartão deve ser perfurado num único cartão as seguintes informações:

a) número de barra de referência
(inteiro - 1 - 5)

b) número máximo de iterações
(inteiro - 6 - 10)

c) tolerância dos mismatches de potência
(real - 11 - 20)

d) potência base em MVA
(real - 21 - 30)

Observação:

Entre parêntesis é indicado o tipo da variável e as colunas que limitam o campo da variável.

3.4.4 - Quarto Cartão (obrigatório)

Este cartão deve ser perfurado conforme indica a figura 3.5.A. Serve para indicar que após ele, serão lidos os dados de barras do sistema.

Após este cartão, deve-se colocar os cartões contendo as informações referentes às barras do sistema, os quais são divididos da seguinte forma:

a) número da barra
(inteira - 5 - 8)

b) nome da barra (opcional)
(alfanumérica - 9 - 17)

c) tensão da barra em PU
(real - 18 - 24)
Observação: Quando a barra for PQ, este campo pode ser deixado em branco.

d) potência ativa de geração em MW
(real - 25 - 30)

e) potência reativa de geração em MVAR
(real - 31 - 36)

f) potência ativa de carga em MW

(real - 37 - 42)

g) potência reativa de carga em MVAR

(real - 43 - 48)

h) limite mínimo de potência reativa em KVAR

(real - 49 - 54)

i) limite máximo de potência reativa em KVAR

(real - 55 - 60)

j) limite mínimo de tensão em pu

(real - 61 - 66)

k) limite máximo de tensão em pu

(real - 67 - 72)

l) potência reativa do shunt da barra em MVAR

(real - 73 - 80)

Observação:

O programa permite o processamento de um sistema com no máximo 50 barras.

3.4.5 - Quinto Cartão (obrigatório)

Este cartão é o flag dos dados anteriores. Deve ser perfurado como mostrado na figura 3.3.A.

3.4.6 - Sexto Cartão (obrigatório)

Este cartão deve ser perfurado conforme indicado na figura 3.6.A. Serve para indicar que após ele, serão lidos os dados de linhas do sistema.

Após este cartão, deve-se colocar os cartões contendo as informações referentes às linhas do sistema, os quais são divididos da seguinte forma:

a) número da barra emissora
(inteira - 7 - 10)

b) número da barra receptora
(inteira - 13 - 16)

c) número do circuito da linha
(inteira - 19 - 22)
Observação: Este número identifica as linhas paralelas.

d) resistência da linha em pu
(real - 23 - 30)

e) reatância da linha em pu
(real - 31 - 38)

f) susceptância total da linha em pu
(real - 39 - 46)

Observação:

O programa permite o processamento de um sistema, com no máximo 60 linhas.

Escola ... Biblioteca ... Itajubá

3.4.7 - Sétimo Cartão (obrigatório)

Este cartão é o flag dos dados anteriores. Deve ser perfurado como mostrado na figura 3.3.A.

3.4.8 - Oitavo Cartão

Este cartão deve ser perfurado conforme indicado na figura 3.7.A. Serve para indicar que após ele, serão lidos os dados dos transformadores do sistema. Após este cartão, deve-se colocar os cartões contendo as informações referentes aos transformadores do sistema, os quais são divididos da seguinte forma:

a) número da barra emissora
(inteira - 7 - 10)

b) número da barra receptora
(inteira - 13 - 16)

c) número do circuito da linha onde está o transformador
(inteira - 19 - 22)

d) resistência do transformador
(real - 23 - 29)

e) reatância do transformador
(real - 30 - 36)

f) susceptância total do transformador
(real - 37 - 43)

g) tap inicial em pu

(real - 44 - 50)

Observações:

1. Os transformadores são considerados neste programa com o tap do lado da barra receptora.
2. O programa permite o processamento de um sistema com no máximo 10 transformadores.

3.4.9 - Nono Cartão (obrigatório)

Este cartão é o flag dos dados anteriores. Deve ser perfurado como mostrado na figura 3.3.A.

3.4.10 - Décimo Cartão (obrigatório)

Este cartão indica o término dos dados para o cálculo do fluxo de carga. Deve ser perfurado como mostrado na figura 3.8.A.

3.4.11 - Décimo Primeiro Cartão

Este cartão contém as informações sobre:

a) quantidade máxima de potência reativa permitida ao sistema, na alocação de capacitores dada em MVAR

(real - 1 - 10)

b) valor do step de capacitor utilizado no processo de alo

cação, em MVAR

(real - 11 - 20)

c) valor da percentagem máxima de tensão original que pode ser adicionada às barras, após a alocação do capacitor, segundo a equação (3.2.4)

(real - 21 - 30)

d) número máximo de passos de alocação permitido ao programa de alocação

(inteiro - 31 - 35)

Deve ser perfurado conforme mostrado na figura 3.9.A.

3.4.12 - Décimo Segundo Cartão

Este cartão indica quais barras estão disponíveis para receber um capacitor. Contém os valores 0 ou 1 , significando respectivamente barras disponíveis e barras não disponíveis.

Deve ser perfurado, ocupando-se uma coluna do cartão, para cada barra do sistema, e em sequência, conforme mostra a figura 3.10.A.

Exemplo:

Se as barras 3 e 10 do sistema não puderem receber capacitores, nas colunas 3 e 10 do cartão deverão estar perfurados o caracter 1.

Estas são as formas com que os cartões de dados deverão ser fornecidos ao programa de alocação. Duas observações deverão ser atendidas:

1) A ordem dos cartões é sempre a apresentada, isto é, não deverá ser mudada, com risco de obter-se resultados inexatos.

2) Existem sistemas que não possuem transformadores. Quando isto acontecer, o oitavo cartão, e os cartões subsequentes, até o nono cartão inclusive, não deverão ser colocados nos dados.

DADOS DO PROGRAMA

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80

TITULO DO ESTUDO

IDENTIFICAÇÃO

IDENTIFICAÇÃO

IDENTIFICAÇÃO

IDENTIFICAÇÃO

IDENTIFICAÇÃO

Figura 3.2A

Escola Federal de Engenharia - Itajubá
Biblioteca
MAUÁ

DADOS DO PROGRAMA

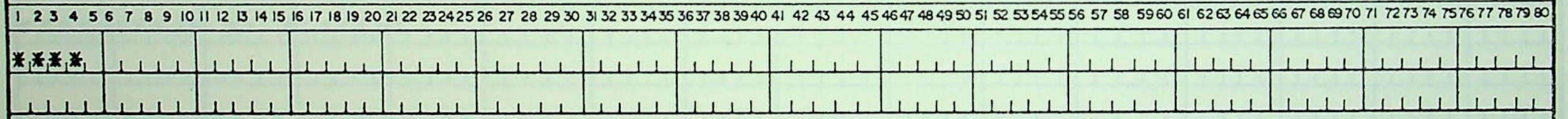


Figura 3.3A

DADOS DO PROGRAMA

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80

PARAMETROS DO SISTEMA

REFERÊNCIA	ITERAÇÕES	TOLERÂNCIA	POTÊNCIA	BASE

Figura 3.4A

DADOS DO PROGRAMA

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80

DADOS DE BARRAS

	NUMERO		NOME		TENSÃO	GERAÇÃO ATIVA	GERAÇÃO REATIVA	CARGA ATIVA	CARGA REATIVA	REATIVO MINIMO	REATIVO MÁXIMO	TENSÃO MINIMA	TENSÃO MÁXIMA	SHUNT DA BARRA

Figura 3.5A

DADOS DO PROGRAMA

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80

DADOS DE LINHAS

	EMISSOR		RECEPTORA		CIR	CUITO	RESISTÊNCIA	REATÂNCIA	SUSCEPTÂNCIA

Figura 3.6A

DADOS DO PROGRAMA

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80

DADOS DE TRANSFORMADORES

EMIS-SORA		RECEP-TORA		CIRCUITO	RESISTÊNCIA	REATANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP INICIAL

Figura 3.7A

DADOS DO PROGRAMA

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80

FIM DOS DADOS DO FC

Figura 3.8A

DADOS DO PROGRAMA

1 2 3 4 5	6 7 8 9 10	11 12 13 14 15	16 17 18 19 20	21 22 23 24 25	26 27 28 29 30	31 32 33 34 35	36 37 38 39 40	41 42 43 44 45	46 47 48 49 50	51 52 53 54 55	56 57 58 59 60	61 62 63 64 65	66 67 68 69 70	71 72 73 74 75	76 77 78 79 80
REATIVO MÁX	SISTEMA	STEP	CAPACITOR	PERCENTAGEM TENSÃO		ITERAÇÕES									

Figura 3.9A

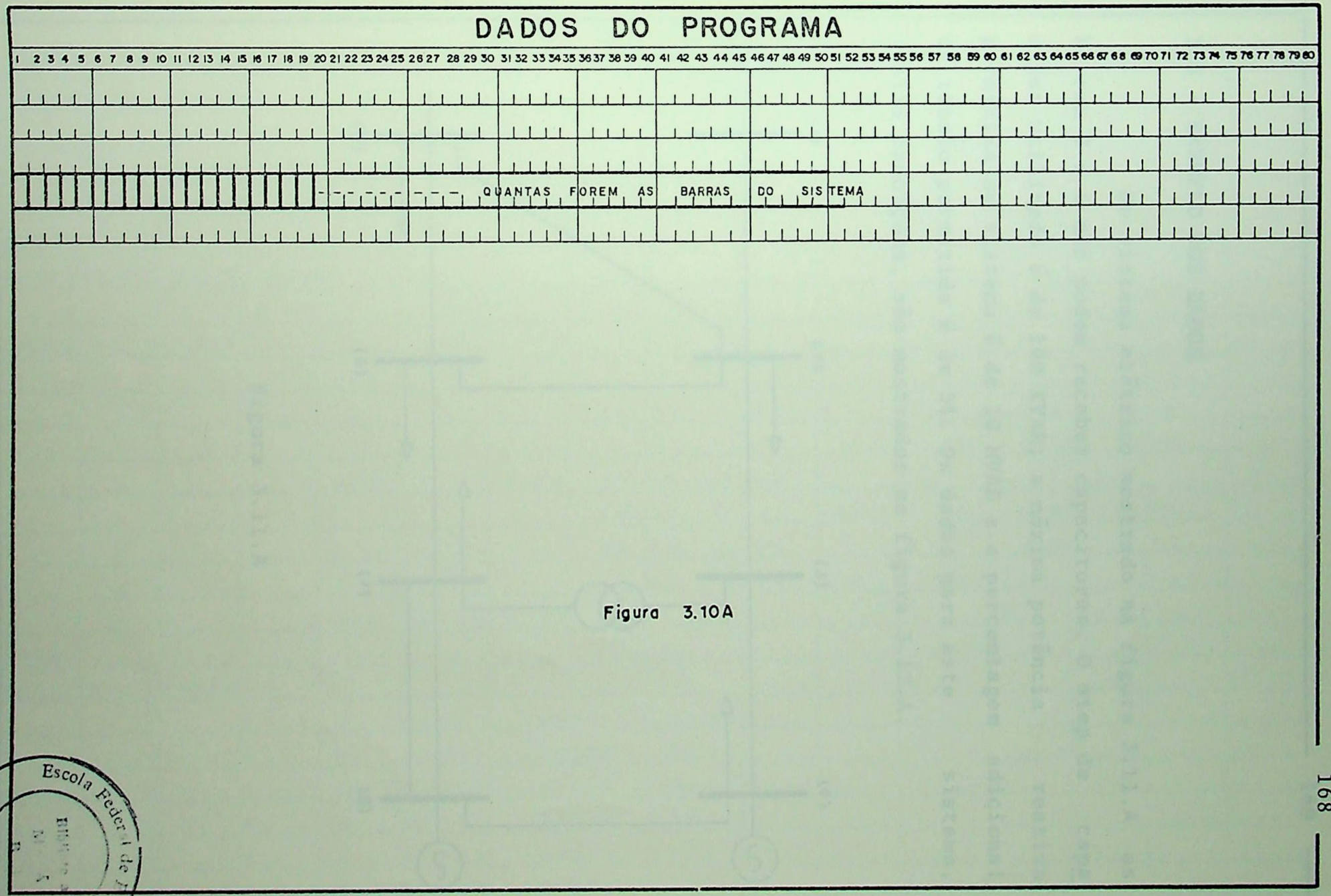


Figura 3.10A

Escola Federal de Iguaba - ETFIT

3.5 - EXEMPLO DOS DADOS

No sistema elétrico mostrado na figura 3.11.A as barras 2 e 6 não podem receber capacitores. O step de capacitor utilizado é de 100 KVAR; a máxima potência reativa permitida ao sistema é de 10 MVAR e a percentagem adicional de tensão permitida é de 3%. Os dados para este sistema, nestas condições, são mostrados na figura 3.12.A.

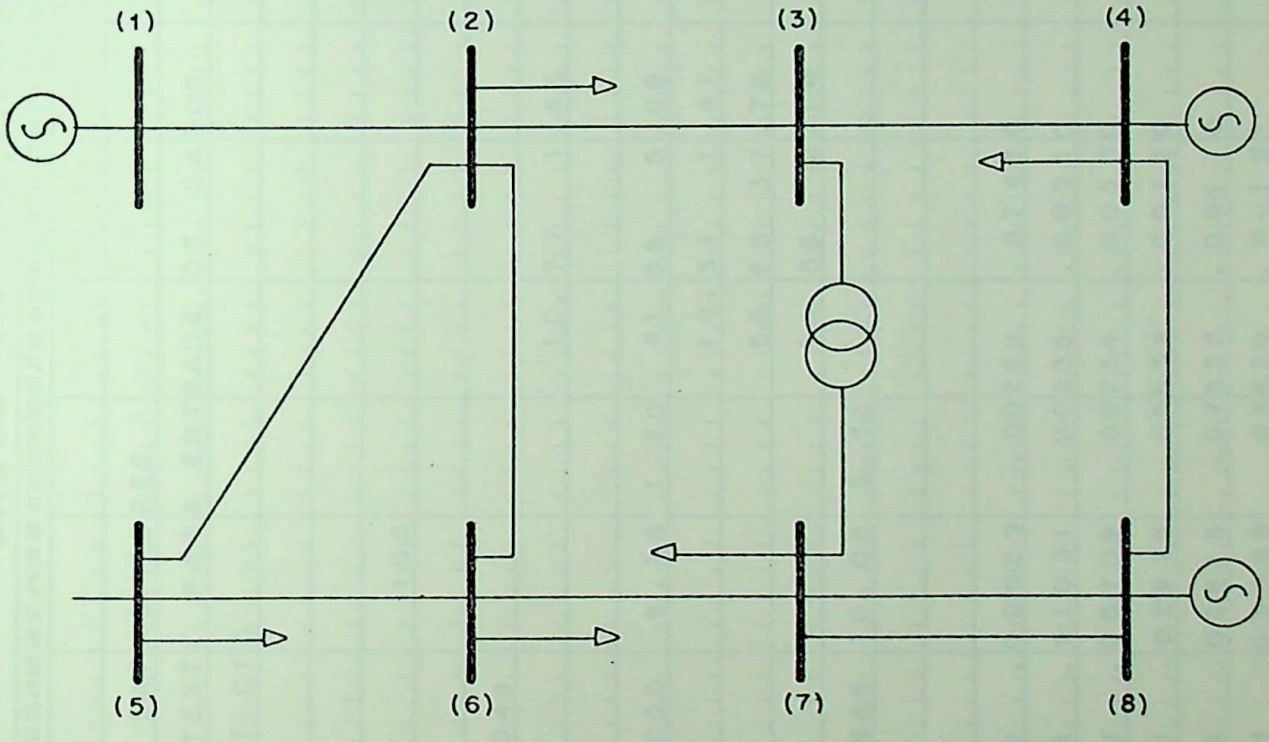


Figura 3.11.A

DADOS DO PROGRAMA

```
TITULO DO ESTUDO
ALOCACÃO DE CAPACITORES
EXEMPLO DE TESTE PARA ENTRADA DE DADOS
SISTEMA FICTICIO
XXXX
PARAMETROS DO SISTEMA
   1  20          0.01          100
DADOS DE BARRAS
       1                1.049
       2                                                10.  77    1.53                0.98    1.10
       3                                                                    10.    30.    0.98    1.10
       4                1.000   6.78    1.70    41.35    5.89
       5                                                10.34    1.47    10.    30.    0.98    1.10
       6                                                58.65  37.79                    0.98    1.10
       7                                                10.55    2.14    10.    30.
       8          0.985 10.05   3.50
XXXX
DADOS DE LINHAS
       1     2    1.  0.00290  .00269  .07460
       2     3    1.  0.01031  .00235  .00510
       4     3    1.  0.00709  .00234  .00500
       5     6    1.  0.02979  .00853  .00120
       7     8    1.  0.02615  .00753  .00110
       6     7    1.  0.03965  .00863  .00121
```

Figura 3.12A

DADOS DO PROGRAMA

```
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80
                 8         4         1 .00071  .00068  .00260
                 8         7         2 .02615  .07532  .00110
                 2         6         1 .00457  .01316  .00019
                 5         2         1 .00312  .03710  .00234
****
DADOS DE TRANSFORMADORES
                 3         7         1         .1100             1.
****
FIM DOS DADOS DO FC
                10.                 0.1                 3.  100
1                1
```

Figura 3.12A (Cont.)

3.6 - MENSAGENS DO PROGRAMA

O programa de alocação de capacitores, com o fim de orientar o usuário, fornece as seguintes mensagens:

1ª.) "HA ERRO NO TITULO DO CASO"

Esta mensagem ocorre quando os grandes títulos dos conjuntos de cartões de dados estão perfurados erradamente. Chama-se de grandes títulos os cartões com os seguintes conteúdos:

TITULO DO ESTUDO, PARAMETROS DO SISTEMA,
DADOS DE BARRAS, DADOS DE LINHAS, DADOS DE
TRANSFORMADORES, FIM DOS DADOS.

2ª.) "HA ERRO NA IDENTIFICAÇÃO DOS DADOS"

Esta mensagem ocorre quando os dados estão fora da ordem indicada no item 3.4.

3ª.) "HA ERRO NA POSIÇAO DE CARTAO DE DADOS DE..."

Esta mensagem ocorre quando os dados de barras, ou linhas ou transformadores, não estão obedecendo os campos designados a eles.

4ª.) "O NUMERO DE BARRAS EXCEDE O LIMITE MAXIMO"

5ª.) "O NUMERO DE LINHAS EXCEDE O LIMITE MAXIMO"

6ª.) "O NUMERO DE TRANSFORMADORES EXCEDE O LIMITE MAXIMO"

Estas mensagens ocorrem quando os limites máximos dos elementos indicados são violados.

7ª.) "ERRO NOS DADOS DE LINHAS - BARRAS COM MESMO NUMERO"

8ª.) "ERRO NOS DADOS DE TRANSFORMADORES - BARRAS COM MESMO NUMERO"

Estas mensagens ocorrem quando, nos dados de linhas ou transformadores, aparece a barra emissora com número igual ao da barra receptora.

9ª.) "O SISTEMA NAO TEM BARRAS COM TENSOES BAIXAS"

Esta mensagem ocorre quando, após processado o fluxo de carga do sistema e terem sido analisadas todas as restrições, o programa concluir que a otimização não é necessária.

10ª.) "A BARRA ... NAO PODERA RECEBER O CAPACITOR, POIS EXCEDE O LIMITE DE KVAR"

Esta mensagem ocorre quando durante o processo de alocação o programa escolher uma barra cujo limite de potência reativa foi violado.

11ª.) " A QUANTIDADE DE KVAR EXCEDE O LIMITE PERMITIDO".

Esta mensagem ocorre quando durante o processo de alocação o programa atingir o limite máximo de potência reativa que é permitida ao sistema.

Escola Federal de Engenharia Biblioteca MAUÁ - Itajubá

12ª.) "O SISTEMA NAO TEM MAIS BARRAS PARA SE COLOCAR CAPACITORES".

Esta mensagem ocorre quando durante o processo de alocação o programa não encontrar mais barras onde possa alocar capacitores, ou seja, as tensões não atingiram os limites desejados, porém não tem mais barras disponíveis.

13ª.) "NAO FOI CONSEGUIDA A CONVERGENCIA APÓS... ITERAÇOES"

Esta mensagem ocorre quando durante o processo de alocação o programa está calculando as novas tensões do sistema e não consegue atingir a convergência estipulada.

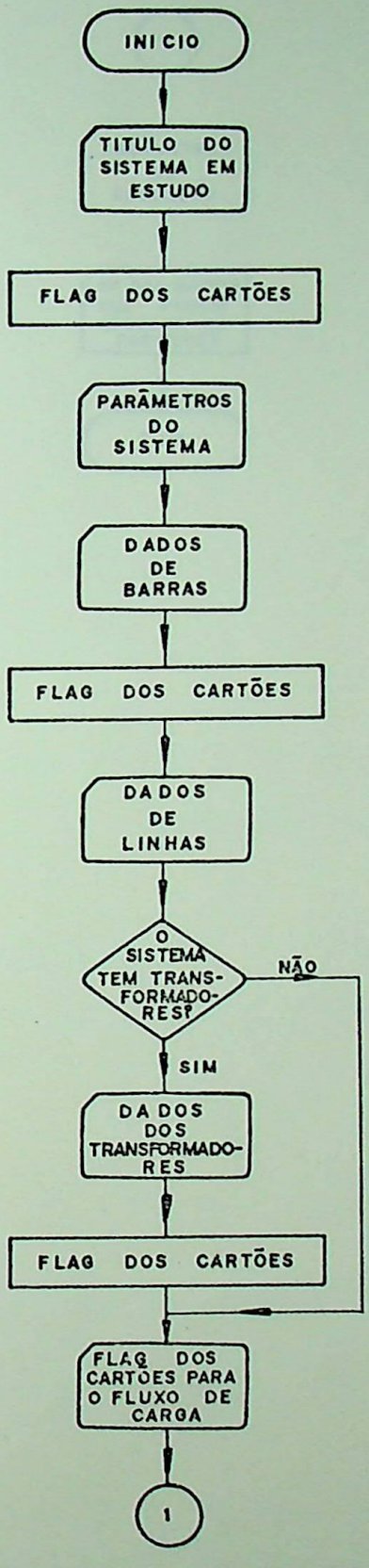
14ª.) "FLUXO DE CARGA DIVERGIU"

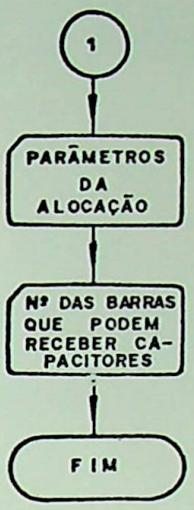
15ª.) "FLUXO DE CARGA NAO CONVERGIU"

Estas mensagens ocorrem durante o processamento do fluxo de carga do sistema.

Todas estas mensagens ocasionam a parada da execução do programa.

3.7 – FLUXOGRAMA PARA A ENTRADA DE DADOS




1
PARÂMETROS DA ALOCAÇÃO
Nº DAS BARRAS QUE PODEM RECEBER CAPACITORES
FIM

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

a) LIVROS

[1] BROWN, E. H - "Solution of Large Networks by Matrix Methods" - Ed. John Wiley & Sons, Inc. New York - New York - 1975.

[2] ELGERD, O.L. - "Electric Energy Systems Theory" - Ed. Mc Graw-Hill - New York - 1971.

[3] REID, J.K. - "Large Sparse Sets of Linear Equations" Ed. Academic Press Inc. (London) Ltd. - London - 1971.

[4] STAGG, S.W. e EL-ABIAD, A.H. - "Computer Methods in Power System Analysis" - Mc Graw-Hill - New York - 1968.

b) ARTIGOS

[5] ARANGO, H. - "Algoritmos EXHAUST" - Notas de Aulas do Curso de Pós-Graduação - EFEI - MG - 1977.

[6] BAILETTI, O.A. - "Optimum Reactive Compensation Planning Using Non-Linear Programming" - Tese de Mestrado - Manchester - Inglaterra - 1976.

[7] BERTIZISS, A.T - "Data Structures - Theory and Practice" 2nd Ed. Academic Press - New York - 1975.

[8] KISHOW, A. e HILL, E.F. - "Static Optimization of Reactive Power Sources by use of Sensitivity Parameters" IEE - PAS - pp. 1166/1173 - julho 1970.

[9] KUPPURAFWIN, A. e RAMAN, N.K. - "Minimization of Reactive Power Instalation in Power System" - Proc. IEE nº 5, vol. 119, pp. 557/563 - 1972.

[10] MALISZEWSKI, R.M.; GARVER, L.L. e WOAD, A.J. - "Linear Programming as an aid in Planning Kilovar Requirements" IEEE Trans., Vol. PAS-87, nº 12, pp. 1963/1968 - dezembro 1968.

[11] OLIVEIRA, J.C. e COGO, J.R. - "Sistemas de Compensação de Reativos" - TRIEL - Eng. El. Especializada - Santos 1980.

[12] PRETELT, A.M. - "Automatic Allocation of Network Capacitors" - IEEE - Vol. PAS-90 - nº 1 - janeiro/fevereiro 1971.

[13] REITAN, D.K. e KRUEMPEL, K.C. - "Modification of the bus Impedance Matrix for System Changes Involving Mutual Coupling" - Proc. IEEE, pp. 1432 - agosto 1969.

Escola Federal de

[14] RIBEIRO, C. - "Um Algoritmo Geral para Faltas e Contingências em Sistemas Elétricos" - Tese de Mestrado - EFEI MG - 1978.

[15] SHIPLEY, R.B. e COLEMAN, D. - "A New Direct Matrix Inversion Method" - Trans. AIEE, Vol. 78 - pp. 568/572- Novembro 1959.

[16] SILVEIRA, J.T.M. e RISCADO, C.A. - "Minimização da Instalação de Reativos em Sistemas de Potência" - Furnas Centrais Elétricas S.A. - RJ - 1979.

[17] STOTT, B. e ALSAÇ, O. - "Fast Decoupled Load Flow" - Trans. IEEE - PAS - pp. 859/869 - julho 1973.

[18] TIBÚRCIO, J.C. - "Análise de Sistemas Elétricos" - Notas de Aulas do curso de Pós-Graduação - EFEI - MG - 1977.

[19] TIBÚRCIO, J.C. - "Non-Linear Programming Methods in Optimal Load-Flow Solutions" - Tese de Doutorado - Manchester - Inglaterra - 1976.

Escola Federal de Engenharia Biblioteca Itajubá

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200331
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA