



**CCPgEE/CCT-UFPb**

COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

ESTUDOS SOBRE A PRECISÃO DO FLUXO DE CARGA  
LINEARIZADO E SUA APLICAÇÃO NA ANÁLISE  
DE CONTINGÊNCIAS

ANTONIO DO NASCIMENTO EPAMINONDAS

1986

CAMPINA GRANDE - PB

ANTONIO DO NASCIMENTO EPAMINONDAS

ESTUDOS SOBRE A PRECISÃO DO FLUXO DE CARGA  
LINEARIZADO E SUA APLICAÇÃO NA ANALISE  
DE CONTIGENCIAS

Dissertação apresentada à Coordenação dos  
Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal da Paraíba, em  
cumprimento parcial às exigências para obten-  
ção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica

AREA DE CONCENTRAÇÃO : Processamento da energia

ORIENTADOR : WASHINGTON EVANGELISTA DE MACEDO

CO-ORIENTADOR : DAGOBERTO LOURENÇO RIBEIRO

CAMPINA GRANDE

ABRIL - 1986



E63e Epaminondas, Antonio do Nascimento  
Estudos sobre a precisao do fluxo de carga linearizado e sua aplicacao na analise de contingencias / Antonio do Nascimento Epaminondas. - Campina Grande, 1986.  
121 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

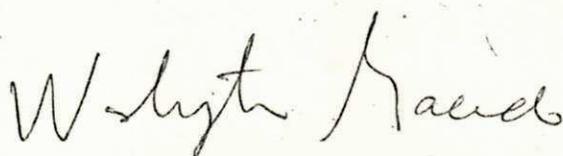
1. Fluxo Eletrico 2. Carga 3. Potencia Linearizada - 4. Sistemas de Potencia - 5. Processamento da Energia 6. Engenharia Eletrica 7. Dissertacao I. Macedo, Washington Evangelista de II. Ribeiro, Dagoberto Lourenco III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 621.3.013.1(043)

ESTUDOS SOBRE A PRECISÃO DO FLUXO DE CARGA LINEARIZADO  
E SUA APLICAÇÃO NA ANÁLISE DE CONTINGÊNCIAS

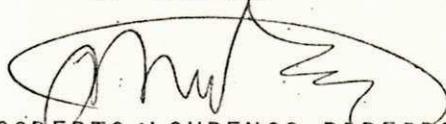
ANTONIO DO NASCIMENTO EPAMINONDAS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 01/04/86



WASHINGTON EVANGELISTA DE MACEDO

Orientador



DAGOBERTO LOURENÇO RIBEIRO

Co-Orientador



MANOEL AFONSO DE CARVALHO JUNIOR

Componente da Banca



SREERAMULU RAGHURAM NAIDU

Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB

ABRIL - 1986

A minha esposa e filhos

Eliane

Vanessa, Fabricio e Patricia

## AGRADECIMENTOS

A Fundação Universidade Federal do Mato Grosso pela oportunidade de realização deste trabalho através de seu programa de capacitação de docentes.

Ao professor Washington Evangelista de Macedo pelo apoio e orientação.

Ao professor Dagoberto Lourenço Ribeiro pela co-orientação e valiosa colaboração na revisão dos originais e pelas sugestões na organização final do texto.

Ao professor Benemar Alencar de Souza pelo auxílio na implementação computacional das subrotinas para solução de sistemas explorando a esparsidade.

Ao professor Manoel Afonso de Carvalho Jr. pelas discussões durante a análise dos resultados e sugestões no direcionamento do trabalho.

Estendo meus agradecimentos aos demais professores, funcionários dos órgãos de apoio e amigos pela colaboração e incentivo na realização deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivos o desenvolvimento e implementação computacional de programas para o estudo de fluxo de carga, incluindo a análise de contingências, com base nos principais modelos de fluxo de potência linearizado, a análise da precisão destes modelos e estudar a utilização de microcomputadores na simulação estática de sistemas de potência.

## INDICE

	PAGINA
1 INTRODUÇÃO .....	02
2 FLUXO DE CARGA LINEARIZADO .....	06
2.1 Introdução .....	06
2.2 Equações do fluxo de carga na forma geral ...	06
2.3 Equações do fluxo de carga linearizado .....	11
2.4 Solução das equações do fluxo de carga linearizado .....	18
2.4.1 Solução por processos iterativos .....	18
2.4.2 Solução por métodos diretos .....	19
2.5 Inclusão das perdas no MODELO DC .....	20
2.5.1 MODELO DC com perdas estimadas .....	21

2.5.2 MODELO DC DUPLO .....	21
2.5.3 MODELO DC DUPLO com perdas estimadas .....	23
2.6 Formas alternativas para linearização .....	24
3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL .....	28
3.1 Introdução .....	28
3.2 Características gerais .....	28
3.3 Características próprias .....	30
3.3.1 Do MODELO DC .....	30
3.3.2 Do MODELO DC DUPLO.....	31
3.3.3 Do MODELO DC com perdas estimadas .....	32
3.3.4 Do MODELO DC DUPLO com perdas estimadas .....	32
3.3.5 Do MODELO DC por processo iterativo .....	32
3.4 Area de memória requerida .....	34
3.5 Implementação em microcomputador .....	34

4 DESEMPENHO DO FLUXO DE CARGA LINEARIZADO .....	42
4.1 Introdução .....	42
4.2 Quanto à precisão dos resultados .....	43
4.2.1 Sistema teste de 14 barras .....	43
4.2.2 Sistema teste de 30 barras .....	48
4.2.3 Sistema regional de 248 barras .....	53
4.3 Quanto ao tempo de processamento .....	69
5 ANALISE DE CONTIGENCIAS .....	70
5.1 Introdução .....	70
5.2 Método da compensação .....	71
5.3 Verificação do desempenho do método da com- pensação .....	78
6 CONCLUSOES .....	82
6.1 Sobre os modelos linearizados .....	82
6.2 Sobre a simulação em microcomputadores .....	83
6.3 Sobre a análise de contingências .....	84

## APENDICES

A METODO DA BIFATORAÇÃO .....	85
B DADOS DOS SISTEMAS .....	93
B.1 IEEE 14 BUS TEST SYSTEM .....	94
B.2 IEEE 30 BUS TEST SYSTEM .....	97
B.3 SISTEMA REGIONAL DE 248 BARRAS .....	101
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	122

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA	PAGINA
2.1 - Rede genérica .....	07
2.2 - Modelo "pi" equivalente .....	10
2.3 - Curva $P_x\theta$ para os modelos AC e DC. ....	16
2.4 - Formas alternativas de linearização para ....	26
$P_{kl} = g_{kl}(1 - \cos\theta_{kl}) - b_{kl}\sin\theta_{kl}$	
2.5 - (a) Quadrado dos resíduos x abertura angular	27
(b) Soma dos quadrados dos resíduos x relação r/x .....	27
3.1 - Fluxograma para o MODELO DC .....	37
3.2 - Fluxograma para o MODELO DC DUPLO .....	38
3.3 - Fluxograma para o MODELO DC com perdas estimadas .....	39
3.4 - Fluxograma para o MODELO DC DUPLO com perdas estimadas' .....	40

FIGURA

PAGINA

3.5 - Fluxograma para solução do MODELO DC pelo método interativo de Gauss-Seidel. ....	41
4.1 - Frequência da relação r/x para o sistema teste de 14 barras. ....	44
4.2 - Frequência da abertura angular para o sistema teste de 14 barras. ....	45
4.3 - Frequência dos fluxos de potência para o sistema teste de 14 barras. ....	45
4.4 - Comparação entre o MODELO DC e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 14 barras. ....	46
4.5 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 14 barras. ....	46
4.6 - Comparação entre o MODELO DC com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 14 barras. ....	47
4.7 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO com inclusão de perdas estimadas e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 14 barras. ..	47
4.8 - Frequência da relação r/x para o sistema teste de 30 barras. ....	48

FIGURA

PAGINA

4.9 - Frequência da abertura angular para o sistema teste de 30 barras. ....	49
4.10 - Frequência dos fluxos de potência para o sistema teste de 30 barras. ....	49
4.11 - Comparação entre o MODELO DC e o resultados do PECO/AC para o sistema de 30 barras. ....	51
4.12 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 30 barras. ....	51
4.13 - Comparação entre o MODELO DC com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 30 barras. ....	52
4.14 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO com inclusão de perdas estimadas e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 30 barras. ...	52
4.15 - Frequência da relação r/x para o sistema regional de 248 barras. ....	54
4.16 - Frequência da abertura angular para o sistema regional de 248 barras. ....	54
4.17 - Frequência dos fluxos de potência no sistema regional de 248 barras. ....	55

FIGURA

PAGINA

4.18 - Comparação entre o MODELO DC e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras considerando todos os fluxos. ....	56
4.19 - Comparação entre o MODELO DC e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.	
( a ) Fluxos de 0 a 50 MW .....	57
( b ) Fluxos de 50 a 100 MW .....	57
4.20 - Comparação entre o MODELO DC e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.	
( a ) Fluxos de 100 a 500 MW .....	58
( b ) Fluxos superiores a 500 MW .....	58
4.21 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras considerando todos os fluxos. ...	59
4.22 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.	
( a -) Fluxos de 0 a 50 MW .....	60
( b ) Fluxos de 50 a 100 MW .....	60
4.23 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.	
( a ) Fluxos de 100 a 500 MW .....	61
( b ) Fluxos superiores a 500 MW .....	61

4.24 - Comparação entre o MODELO DC com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras considerando todos os fluxos. ....	63
4.25 - Comparação entre o MODELO DC com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.	
( a ) Fluxos de 0 a 50 MW .....	64
( b ) Fluxos de 50 a 100 MW .....	64
4.26 - Comparação entre o MODELO DC com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.	
( a ) Fluxos de 100 a 500 MW .....	65
( b ) Fluxos superiores a 500 MW .....	65
4.27 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras considerando todos os fluxos. ....	66
4.28 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.	
( a ) Fluxos de 0 a 50 MW .....	67
( b ) Fluxos de 50 a 100 MW .....	67

**FIGURA**

**PAGINA**

4.29 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.	
( a ) Fluxos de 100 a 500 MW .....	68
( b ) Fluxos superiores a 500 MW .....	68
5.1 - Método da compensação. ....	72
5.2 - Método da compensação para múltiplas alterações na rede. ....	75
5.3 - Desempenho do método da compensação .....	79
( a ) Para o sistema teste de 14 barras	
( b ) Para o sistema teste de 30 barras	
5.4 - Desempenho do método da compensação para o sistema regional de 248 barras. ....	80

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Considerações gerais

O estudo de fluxo de carga em sistemas de potência tem sido feito há vários anos através da modelagem estática do sistema, representando-o por um conjunto de equações e inequações algébricas [12]. Podendo a solução destas equações, não-lineares, ser obtida utilizando-se métodos numéricos apropriados tais como: Gauss, Gauss-Seidel e Newton-Raphson, que embora sejam diferentes em sua formulação e apresentem variações em sua eficiência, conduzem a resultados bastantes precisos.

A precisão a que se refere o parágrafo anterior é a precisão numérica dos métodos para um determinado conjunto de dados (informações sobre as gerações, cargas, parâmetros das linhas de transmissão, etc.), uma vez que os resultados do fluxo de carga são bastante sensíveis a variações nos dados fornecidos [7], as informações obtidas podem ter pouco

significado se os valores utilizados na simulação não forem uma boa estimativa de seus valores reais, como ocorre, por exemplo, no planejamento de sistemas a longo prazo quando as informações sobre o comportamento de algumas cargas são insuficientes para uma estimativa razoável de seus valores em uma data futura.

Devido à natureza não linear das equações do modelo tradicional (MODELO AC), os métodos numéricos para sua solução baseiam-se em processos iterativos, tornando-o muito lento na simulação de sistemas para certas aplicações, tais como: controle em tempo real, planejamento de redes de transmissão<sup>[3]</sup>, estudo de confiabilidade<sup>[11]</sup>, etc., onde é necessário simular um mesmo sistema várias vezes em um pequeno espaço de tempo, ou simular um grande número de casos considerando várias configurações de um mesmo sistema, para averiguar as consequências de adições ou retiradas de elementos da rede (análise de contingência). Surge, portanto, a necessidade de se desenvolver modelos de rápida solução. Para atingir este objetivo, mesmo as técnicas de solução mais rápidas aplicadas ao modelo tradicional, não o tornaram tão rápido quanto era desejado. Mostrou-se necessária a adoção de algumas hipóteses simplificadoras, baseadas em propriedades físicas do sistema de potência, visando a linearização do modelo tradicional, tornando possível a sua simulação através de um conjunto de equações lineares de fácil solução.

O modelo linearizado (MODELO DC) considera apenas as potências ativas e as fases das tensões nas barras e, portanto, não pode substituir por completo o modelo tradicional, notadamente nos estudos em que o conhecimento de variáveis como o módulo das tensões, os fluxos de potência reativa, derivações dos transformadores, etc., sejam indispensáveis.

Por se tratar de um modelo simplificado, os resultados obtidos com o MODELO DC apresentam desvios em relação aos calculados com o MODELO AC. Todavia, observa-se que estes desvios são menores para as ligações mais sobrecarregadas, e estas são as ligações de maior interesse quando se pretende verificar as condições de segurança do sistema, como ocorre frequentemente nos estudos de expansão e na monitoração da segurança através de centros de supervisão e controle.

## 1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Implementar programas computacionais utilizando os principais modelos de fluxo de potência linearizado.
- Comparar a precisão dos resultados obtidos com a utilização dos modelos linearizados com aqueles obtidos com o modelo tradicional.
- Implementar um programa computacional de análise de contingências, usando modelos de fluxo de potência linearizado e simulando as contingências com base no Teorema da Compensação.
- Analisar a utilização de microcomputadores para simulação de redes elétricas através dos modelos linearizados.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

No capítulo inicial é feita uma descrição dos objetivos e das aplicações dos modelos linearizados na simulação de sistemas de potência.

No capítulo 2 são desenvolvidos os modelos de fluxo de potência linearizado, apresentando em detalhes as sim-

plificações feitas no modelo tradicional para se obter o modelo linearizado. São também apresentadas e discutidas três formas de linearização do modelo tradicional.

No capítulo 3 são apresentadas considerações sobre a implementação computacional dos modelos.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados da aplicação dos modelos na simulação de sistemas testes e de um sistema real.

No capítulo 5 é apresentado o método de análise de contingências baseado no Teorema da Compensação e analisado seu desempenho para contingências simples e múltiplas.

As conclusões são apresentadas no capítulo 6.

## 2. FLUXO DE CARGA LINEARIZADO

### 2.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se inicialmente a formulação das equações gerais para o estudo do fluxo de carga. Em seguida adotam-se algumas hipóteses simplificadoras para a linearização destas equações e a consequente obtenção do modelo em corrente contínua (MODELO DC). Após a linearização, propõe-se a inclusão das perdas no modelo linearizado visando torná-lo mais próximo do sistema real, não linear. Finalmente, são apresentadas formas alternativas para a linearização do modelo original.

### 2.2 Equações do fluxo de carga na forma geral

O problema do fluxo de carga consiste na determinação do estado de um sistema de potência em regime permanente. Usualmente, o estado do sistema é obtido a partir da solução das equações do circuito representativo do sis-

tema em sua forma nodal. As variáveis de interesse no problema são as tensões nodais, em módulo e fase, com relação a uma referência geralmente a terra.

Para efeito de obtenção das equações do fluxo de carga, considere-se a rede genérica apresentada na figura 2.1, onde  $\hat{y}_{kl}$  é a admitância entre os nós  $k$  e  $l$ , e  $\hat{y}_{ko}$  é a admitância do ramo entre o nó  $k$  e a referência.

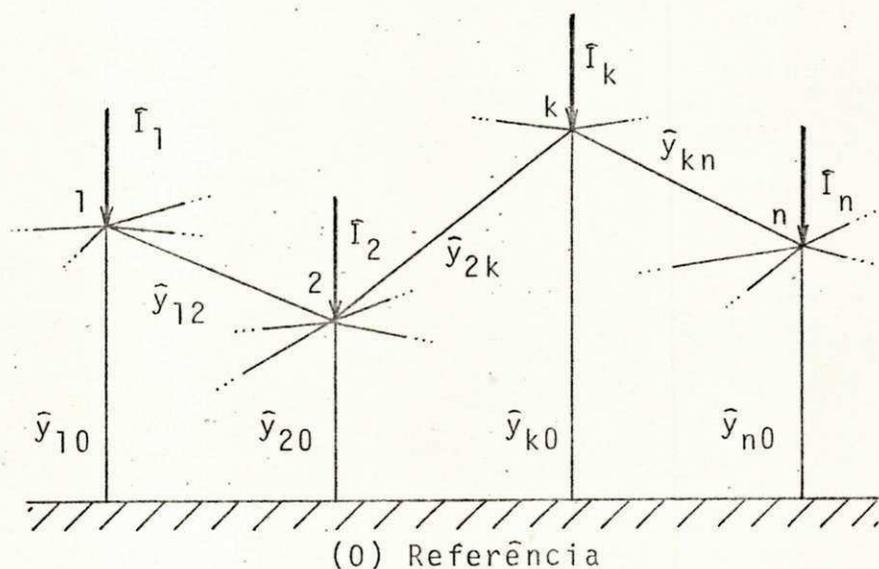


Figura 2.1 - Rede genérica

A corrente injetada em um nó  $k$ ,  $\hat{I}_k$ , é igual a soma de todas as correntes dos ramos ligados ao nó  $k$ . Portanto:

$$\hat{I}_k = \hat{I}_{ko} + \hat{I}_{k1} + \hat{I}_{k2} + \dots + \hat{I}_{kn}$$

$$\hat{I}_k = \hat{V}_k \hat{y}_{ko} + (\hat{V}_k - \hat{V}_1) \hat{y}_{k1} + (\hat{V}_k - \hat{V}_2) \hat{y}_{k2} + \dots + (\hat{V}_k - \hat{V}_n) \hat{y}_{kn}$$

$$\hat{I}_k = -\hat{y}_{k1} \hat{V}_1 - \hat{y}_{k2} \hat{V}_2 + \dots + (\hat{y}_{ko} + \hat{y}_{k1} + \dots + \hat{y}_{kn}) \hat{V}_k + \dots - \hat{y}_{kn} \hat{V}_n$$

$$\hat{I}_k = \sum_{l=1}^n \hat{Y}_{kl} \hat{V}_l \quad (2.1)$$

Onde:  $\hat{Y}_{kk} = ( \hat{y}_{ko} + \hat{y}_{k1} + \dots + \hat{y}_{kn} ) \quad (2.2a)$

$$\hat{Y}_{kl} = - \hat{y}_{kl} \quad (2.2b)$$

A equação 2.1 pode ser escrita na forma matricial

$$\bar{I} = [Y] \bar{V} \quad (2.3)$$

Onde:

$\bar{I}$  - Vetor das injeções de corrente cujas componentes são  $\hat{I}_k$ .

$\bar{V}$  - Vetor das tensões nodais de componentes  $\hat{V}_k$ .

[Y] - Matriz admitância nodal, cujos elementos diagonais  $\hat{Y}_{kk}$  são obtidos pela soma das admitâncias de todos os ramos incidentes no nó  $k$ , e os elementos não diagonais,  $\hat{Y}_{kl}$ , obtidos pelo negativo da admitância do ramo que liga os nós  $k$  e  $l$ .

Usualmente são especificadas as potências injetadas nas barras,  $\hat{S}_k$ , ao invés das correntes,  $\hat{I}_k$  e, assim, a partir da relação  $\hat{S}_k^* = \hat{V}_k^* \hat{I}_k$  a equação 2.1 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\hat{S}_k^* = \hat{V}_k^* \sum_{l=1}^n \hat{Y}_{kl} \hat{V}_l \quad (2.4)$$

Explicitando a potência injetada em suas componentes retangulares, tem-se:

$$P_k - jQ_k = \hat{V}_k^* \sum_{l=1}^n \hat{Y}_{kl} \hat{V}_l \quad ( 2.5 )$$

Esta é uma das equações básicas para o estudo do fluxo de carga, e nela, os valores de  $P_k$  e  $Q_k$  serão positivos quando forem potências injetadas na barra, e negativas quando forem potências absorvidas.

A equação 2.5, por ser complexa, pode ser decomposta em duas equações reais envolvendo quatro grandezas associadas a cada barra:  $P_k$ ,  $Q_k$ ,  $V_k = |\hat{V}_k|$  e a fase da tensão,  $\theta_k$ . A sua solução, portanto, só é possível se duas destas quatro variáveis forem fixadas. Usualmente, as barra são classificadas em função das variáveis que nela são fixadas:

**BARRA DE CARGA (PQ)** - São fixadas a potência ativa e reativa líquida (geração menos a carga) injetada na barra (nó), ficando o módulo,  $V_k$ , e a fase,  $\theta_k$ , da tensão como incógnitas.

**BARRA DE TENSÃO CONTROLADA (PV)** - São especificadas o módulo da tensão,  $V_k$ , e a potência ativa gerada,  $P_{gk}$ , restando como incógnitas a fase da tensão e a potência reativa gerada na barra.

**BARRA DE BALANÇO ("SWING")** - Nesta são fixadas o módulo e a fase da tensão (tomada como referência), ficando como incógnitas a potência, ativa e reativa, a ser gerada na barra.

A existência de uma barra deste tipo é necessária para solucionar as equações do fluxo de carga, uma vez que as perdas no sistema também são uma incógnita, não sendo possível, portanto, especificar a potência gerada em todas as barras.

Após a solução do sistema de equações resultante da aplicação da equação 2.5 a todas as barras do sistema, o fluxo de potência em todas as linhas (ramos) pode ser determinado a partir das tensões nodais. Para isto, considere-se o modelo "pi" para as linhas e transformadores mostrado na figura 2.2.

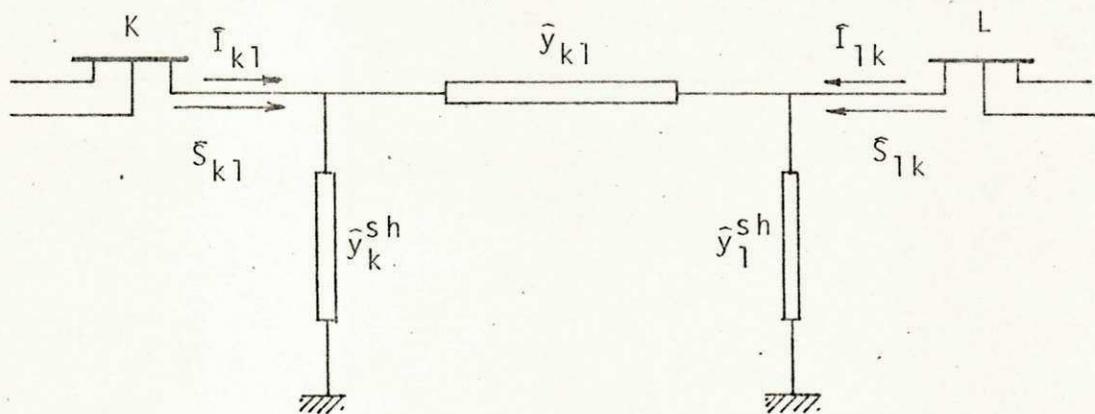


Figura 2.2 Modelo "pi" equivalente

A corrente  $\hat{I}_{kl}$  calculada em  $\underline{k}$  e considerada positiva no sentido de  $\underline{k}$  para  $\underline{l}$ , é dada por:

$$\hat{I}_{kl} = (\hat{V}_k - \hat{V}_l) \hat{y}_{kl} + \hat{V}_k \hat{y}_k^{sh} \quad (2.6)$$

O fluxo de potência na linha k-l calculado em  $\underline{k}$  e considerado positivo no sentido de  $\underline{k}$  para  $\underline{l}$  é, portanto, igual a :

$$\hat{S}_{kl} = P_{kl} + jQ_{kl} = \hat{V}_k \hat{I}_{kl} = \hat{V}_k (\hat{V}_k^* - \hat{V}_l^*) \hat{y}_{kl} + \hat{V}_k \hat{V}_k^* \hat{y}_k^{sh} \quad (2.7)$$

O fluxo de potência de  $\underline{l}$  para  $\underline{k}$  é obtido de maneira análoga;

$$\hat{I}_{lk} = (\hat{V}_l - \hat{V}_k) \hat{y}_{lk} + \hat{V}_l \hat{y}_l^{sh} \quad (2.8)$$

$$\hat{S}_{lk} = P_{lk} + jQ_{lk} = \hat{V}_l \hat{I}_{lk} = \hat{V}_l (\hat{V}_l^* - \hat{V}_k^*) \hat{y}_{lk} + \hat{V}_l \hat{V}_l^* \hat{y}_l^{sh} \quad (2.9)$$

As perdas na linha k-l são calculadas a partir de:

$$\hat{S}_{kl}^p = \hat{S}_{kl} + \hat{S}_{lk} \quad (2.10)$$

Substituindo as equações 2.7 e 2.9 em 2.10 e sabendo que no modelo "pi"  $\hat{y}_k^{sh} = \hat{y}_l^{sh}$ , resulta:

$$\hat{S}_{kl}^p = (\hat{V}_k - \hat{V}_l) (\hat{V}_k^* - \hat{V}_l^*) \hat{y}_{kl} + (\hat{V}_k \hat{V}_k^* + \hat{V}_l \hat{V}_l^*) \hat{y}_k^{sh} \quad (2.11)$$

As equações 2.5 e 2.7 constituem o conjunto de equações fundamentais para o estudo formal do fluxo de carga em sistemas de potência, e será referido neste trabalho como MODELO AC.

### 2.3 Equações do fluxo de carga linearizado (MODELO DC)

As equações do fluxo de carga desenvolvidas na seção anterior envolvem os elementos da matriz admitância

nodal e para efeito da linearização é conveniente escrevê-las em função dos parâmetros do modelo "pi-equivalente" representado na figura 2.2, o que será feito a seguir.

A admitância série do circuito "pi" em função da resistência e da reatância série, é dada por:

$$\hat{y}_{kl} = g_{kl} + jb_{kl} = \frac{1}{z_{kl}} = \frac{r_{kl}}{r_{kl}^2 + x_{kl}^2} - j \frac{x_{kl}}{r_{kl}^2 + x_{kl}^2} \quad ( 2.12 )$$

Ou seja, a condutância  $g_{kl}$  e a susceptância série  $b_{kl}$  são dadas, respectivamente, pelas expressões:

$$g_{kl} = \frac{r_{kl}}{r_{kl}^2 + x_{kl}^2} \quad ( 2.13 )$$

$$b_{kl} = \frac{-x_{kl}}{r_{kl}^2 + x_{kl}^2} \quad ( 2.14 )$$

e a admitância em paralelo em função da metade da susceptância da linha é:

$$\hat{y}_{ko} = j b_{kl}^{sh} \quad ( 2.15 )$$

Escrevendo os elementos da matriz admitância nodal em função destes parâmetros, obtem-se:

$$\hat{Y}_{kk} = j b_k^{sh} + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n ( j b_{kl}^{sh} + g_{kl} + j b_{kl} ) \quad ( 2.16 )$$

$$\hat{Y}_{kl} = - ( g_{kl} + j b_{kl} ) \quad ( 2.17 )$$

Fazendo  $\hat{V}_k = V_k e^{j\theta_k}$ , substituindo as equações 2.16 e

2.17 nas equações 2.5 e 2.7, determina-se as expressões para:

Potência injetada nas barras;

$$P_k = V_k \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n ( V_k g_{kl} - V_l g_{kl} \cos \theta_{kl} - V_l b_{kl} \sin \theta_{kl} ) \quad ( 2.18 )$$

$$Q_k = -b_k^{sh} V_k^2 + V_k \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n ( -V_k b_{kl} - V_k b_{kl}^{sh} + V_l b_{kl} \cos \theta_{kl} - V_l g_{kl} \sin \theta_{kl} ) \quad ( 2.19 )$$

Fluxo de potência na linha k-l;

$$P_{kl} = V_k^2 g_{kl} - V_k V_l g_{kl} \cos \theta_{kl} - V_k V_l b_{kl} \sin \theta_{kl} \quad ( 2.20 )$$

$$Q_{kl} = -V_k^2 (b_{kl} + b_{kl}^{sh}) + V_k V_l b_{kl} \cos \theta_{kl} - V_k V_l g_{kl} \sin \theta_{kl} \quad ( 2.21 )$$

Perdas na linha k-l;

$$P_{kl}^P = g_{kl} ( V_k^2 + V_l^2 - 2V_k V_l \cos \theta_{kl} ) \quad ( 2.23 )$$

$$Q_{kl}^P = -b_{kl}^{sh} ( V_k^2 + V_l^2 ) - b_{kl} ( V_k^2 + V_l^2 - 2V_k V_l \cos \theta_{kl} ) \quad ( 2.24 )$$

Onde:  $\theta_{kl} = \theta_k - \theta_l$  - Abertura angular da ligação k-l.

As equações acima correspondem às equações do fluxo de carga em função dos parâmetros do modelo "pi"-equivalente, e constituem um conjunto de equações não lineares envolvendo as variáveis  $V_k$ ,  $V_l$  e  $\theta_{kl}$ .

A linearização das equações do fluxo de carga é obtida aplicando-se as seguintes hipóteses simplificadoras:

1 - As perdas ativas do sistema podem ser desprezadas.

- 2 - Todas as barras são de tensão controlada (PV) e os módulos das tensões são especificados em 1 pu.
- 3 - As aberturas angulares nas linhas são tais que é possível aproximar-se  $\text{sen}\theta_{kl} = \theta_{kl} = \theta_k - \theta_l$ .
- 4 - A reatância e a resistência das linhas de transmissão são tais que:  $x_{kl} \gg r_{kl}$ .

Se os termos correspondentes às perdas ativas, equação 2.22, forem desprezados nas expressões 2.18 e 2.20, ter-se-á:

$$P_k = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n -V_k V_l b_{kl} \text{sen}\theta_{kl} \quad (2.25)$$

$$P_{kl} = -V_k V_l b_{kl} \text{sen}\theta_{kl} \quad (2.26)$$

Com as hipóteses 2 e 3, as equações acima são reduzidas à forma;

$$P_k = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n -b_{kl} (\theta_k - \theta_l) \quad (2.27)$$

$$P_{kl} = -b_{kl} (\theta_k - \theta_l) \quad (2.28)$$

A equação 2.27 pode ser escrita na forma matricial como:

$$\bar{P} = [B] \bar{\theta} \quad (2.29)$$

Onde:  $\bar{P}$  - Vetor das injeções de potência ativa,  $P_k$ .

$\bar{\theta}$  - Vetor das fases das tensões nodais,  $\theta_k$ .

[B] - Matriz susceptância nodal, cujos elementos são:

$$B_{kk} = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n -b_{kl} \quad ( 2.30a )$$

$$B_{kl} = b_{kl} \quad ( 2.30b )$$

Considerando a hipótese 4, a equação 2.14 pode ser aproximada para:

$$b_{kl} = \frac{-x_{kl}}{r_{kl}^2 + x_{kl}^2} \cong \frac{-1}{x_{kl}} \quad ( 2.31 )$$

e a equação 2.27 se reduz a;

$$P_{kl} = \frac{\theta_k - \theta_l}{x_{kl}} \quad ( 2.32 )$$

O sistema de equações 2.29 corresponde ao modelo linearizado para a rede e ao que se convencionou chamar de MODELO EM CORRENTE CONTINUA, (MODELO DC), decorrente da analogia que pode ser feita entre a equação 2.32 e a lei de Ohm, sendo  $P_{kl}$  a corrente,  $x_{kl}$  a resistência e  $(\theta_k - \theta_l)$  a tensão.

A matriz [B] definida por 2.30a e 2.30b é singular, pois, qualquer uma de suas linhas (ou colunas) pode ser obtida por uma combinação linear das demais. Para proceder a solução do sistema 2.29 é necessário a adoção de uma

referência na rede, abandonando-se a referência usual que é a terra, e eliminando-se da matriz [B] a linha e a coluna correspondentes à barra adotada como referência, possibilitando, portanto, a sua inversão para determinar as fases das tensões nas barra a partir de:

$$\bar{\theta} = [B]^{-1} \bar{P} \quad ( 2.33 )$$

Obtendo-se os fluxos nas linhas, em seguida, através da equação 2.32.

Este modelo simplificado, proporciona a simulação do sistema através de um conjunto de equações lineares, cuja solução é bem mais rápida que o processo iterativo requerido pelas equações não lineares do modelo tradicional, ( 2.5 ). Além da redução do esforço computacional para simulação do sistema, o MODELO DC apresenta outra vantagem decorrente da linearização do MODELO AC. Considere-se a figura 2.3.

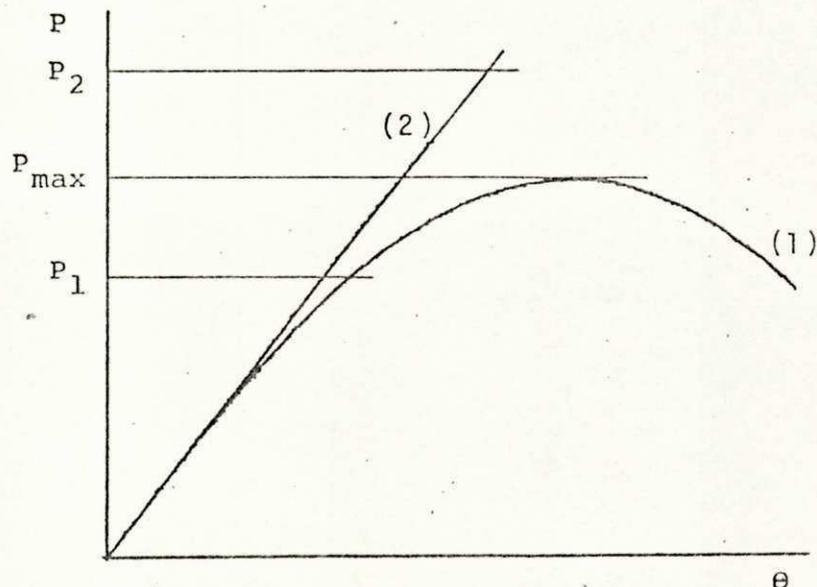


Figura 2.3 - Curva  $P \times \theta$  para os modelos AC e DC.

A curva 1 representa a potência que flui através de uma linha de reatância  $x_{kl}$  com uma abertura angular  $(\theta_k - \theta_l)$  segundo o MODELO AC. A curva 2 representa o fluxo na linha segundo o MODELO DC.

Observe-se que, para um nível de carga  $P_1$  ambos os modelos fornecem uma solução. Já para um nível de carga mais elevado  $P_2$  ( $P_2 > P_{max}$ ), o MODELO AC não apresentará solução e a simulação terminará com a não convergência do método, sem que seja fornecida qualquer informação sobre a linha cuja capacidade de transmissão está sendo excedida. O MODELO DC, por sua vez, apresentará uma solução, que embora esteja fora da realidade, fornece, pelo menos, uma estimativa do excesso de potência ativa que passa pela linha.

O MODELO DC possibilita ainda, que a simulação de modificações na topologia da rede (retiradas ou adições de linhas), que implicam em alterações na matriz  $[B]$ , seja feita diretamente, com baixo custo computacional, através de métodos que forneçam a nova solução em função da matriz inversa, ou seus fatores, do sistema original e da solução do caso base, tornando-o particularmente adequado para o estudo de contingências.

## 2.4 Solução das equações do fluxo de carga linearizado

A solução do sistema de equações 2.29 pode ser obtida através de processos iterativos ou de métodos de solução direta.

### 2.4.1 Por processos iterativos

Dentre os vários métodos iterativos existentes para a solução de sistemas de equações lineares, o método de Gauss-Seidel apresenta-se como o mais difundido pela simplicidade de sua formulação e por ser de fácil implementação computacional. A aplicação deste método na solução do sistema 2.29 será mostrado a seguir.

Inicialmente, é preciso escrever as equações do sistema  $\bar{P}=[B]\bar{\theta}$  numa forma recursiva. Isolando-se a equação de cada nó:

$$P_k = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n -b_{kl} (\theta_k - \theta_l)$$

expandindo-se o somatório e resolvendo para  $\theta_k$ :

$$\theta_k = \frac{P_k + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n b_{kl} \theta_l}{\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n -b_{kl}} \quad ( 2.34 )$$

A solução do sistema ,  $\bar{\theta}$ , é obtida executando-se os seguintes passos:

- 1 - Estima-se uma solução inicial  $\bar{\theta}^{(i)}$ ,  $i=0$ .
- 2 - Para cada nó, calcula-se o valor de  $\theta_k$  através da equação 2.34. Sendo este novo valor utilizado no cálculo de  $\theta_k$  para os nós seguintes.
- 3 - Após o cálculo em todos os nós, esta nova solução,  $\bar{\theta}^{(i+1)}$ , é comparada com a solução anterior  $\bar{\theta}^{(i)}$ , calculando-se as correções efetuadas em cada nó:  $\theta_k^{(i+1)} - \theta_k^{(i)}$ .  
Se a maior destas correções for menor que uma tolerância pré-determinada,  $\bar{\theta}^{(i+1)}$  é tomado como a solução. Caso contrário, os passos 2 e 3 devem ser repetidos até que esta condição seja satisfeita.

A velocidade de convergencia deste processo pode ser aumentada adicionando-se a  $\bar{\theta}^{(i)}$  as correções,  $\theta_k^{(i+1)} - \theta_k^{(i)}$ , multiplicadas por um fator de aceleração  $\alpha > 1$ . Devendo este fator ser escolhido em função da ordem do sistema a ser resolvido [2].

#### 2.4.2 Por métodos de solução direta

Os métodos de solução direta baseiam-se na eliminação de Gauss para determinar a inversa da matriz dos coefi-

cientes,  $[B]$ , ou na sua decomposição em fatores triangulares. Sendo a solução do sistema obtida multiplicando-se a matriz inversa, ou seus fatores, pelo vetor independente.

Para sistemas com pequeno número de barras é possível inverter a matriz  $[B]$ , de forma que a solução do sistema 2.29 pode ser obtida diretamente da equação 2.33. Para sistemas com grandes dimensões, torna-se inviável determinar explicitamente a matriz  $[B]^{-1}$ , pois esta em geral é cheia, ao contrário da matriz  $[B]$  que é altamente esparsa. Nestes casos é conveniente utilizar técnicas de esparsidade, pelas quais apenas os elementos não nulos são armazenado e processados, e obter a solução do sistema 2.29 através de métodos de fatoração da matriz  $[B]$ . No presente trabalho foi utilizado o método da bifatoração<sup>[15]</sup> apresentado no apêndice A.

## 2.5 Inclusão das perdas no MODELO DC

Em redes de grandes dimensões, as perdas no sistema de transmissão podem assumir uma parcela significativa da potência gerada na barra de referência. Em consequência, os fluxos calculados pelo MODELO DC para as linhas que se ligam diretamente, ou estão próximas, à barra de balanço diferem substancialmente daqueles calculados pelo MODELO AC, devido a não consideração das perdas do sistema e da consequente redução da geração nesta barra.

O desempenho do MODELO DC pode ser melhorado com a inclusão das perdas, de forma aproximada, com um pequeno esforço de cálculo adicional, como descrito nas seções seguintes.

### 2.5.1 MODELO DC com perdas estimadas

Neste modelo, o vetor de injeções nodais é definido como:

$$\bar{P} = \bar{P}_g - ( 1 + E/100 ) \bar{P}_c \quad ( 2.35 )$$

Onde:  $\bar{P}$  - Vetor da potência líquida injetada.

$\bar{P}_g$  - Vetor de geração.

$\bar{P}_c$  - Vetor de carga.

E - Valor estimado para as perdas em percentagem da carga total do sistema.

Ou seja, o montante estimado para as perdas do sistema é distribuído nas barras proporcionalmente ao valor da carga em cada uma delas. Com este procedimento, de baixo custo computacional, os resultados fornecidos por este modelo são mais significativos que aqueles obtidos com o MODELO DC sem inclusão das perdas.

### 2.5.2 MODELO DC DUPLO

Com as mesmas hipóteses simplificadoras feitas para

obtenção do MODELO DC, porém sem desprezar as perdas, a equação 2.18 pode ser reescrita na forma:

$$P_k - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n g_{kl} (1 - \cos \theta_{kl}) = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n -b_{kl} \theta_{kl} \quad (2.36)$$

Considerando os dois primeiros termos da expansão de Taylor para a função cosseno, o termo  $\cos \theta_{kl}$  pode ser aproximado para:

$$\cos \theta_{kl} \cong 1 - \theta_{kl}^2 / 2 \quad (2.37)$$

que levado a equação 2.36 resulta:

$$P_k - (1/2) \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n g_{kl} \theta_{kl}^2 = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n -b_{kl} \theta_{kl} \quad (2.38)$$

A equação acima é idêntica à equação 2.27 obtida para o MODELO DC, exceto que o termo correspondente as perdas aparece explicitamente no primeiro membro, que é dado pela potência ativa injetada na barra  $k$  menos a metade das perdas ativas de todas as linhas que estão ligadas a esta barra.

Para solução do sistema de equações, não lineares, definido por 2.38 pode ser adotado um procedimento dividido em três passos ou iterações:

- 1 - Utilizar o MODELO DC para determinar uma solução temporária  $\bar{\theta}'$  resolvendo o sistema;

$$\bar{P} = [B] \bar{\theta}' \quad (2.39)$$

2 - A partir da solução temporária  $\bar{\theta}'$ , calcular as novas injeções nas barras,  $\bar{P}'$ , considerando as perdas;

$$P'_k = P_k - (1/2) \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n g_{kl} \theta_{kl}'^2 \quad (2.40)$$

3 - Obter a solução final,  $\bar{\theta}$ , resolvendo o sistema:

$$\bar{P}' = [B] \bar{\theta} \quad (2.41)$$

A denominação MODELO DC DUPLO decorre do fato do MODELO DC ser executado duas vezes, passos 1 e 3.

O cálculo das cargas adicionais, utilizando a solução temporária  $\bar{\theta}'$ , consiste em uma forma mais precisa para inclusão das perdas no modelo linearizado, e os resultados obtidos apresentam uma melhoria significativa em comparação com aqueles do MODELO DC sem perdas, e são também melhores que o do MODELO DC COM PERDAS ESTIMADAS.

### 2.5.3 MODELO DC DUPLO com perdas estimadas

A formulação deste modelo é idêntica à do MODELO DC DUPLO, exceto que no primeiro passo para a solução do sistema de equações 2.39, utiliza-se o MODELO DC com uma estimativa das perdas para obter a solução temporária  $\bar{\theta}'$ , como descrito na seção 2.5.1.

Os resultados obtidos com este modelo apresentam uma pequena melhoria em relação àqueles do MODELO DC DUPLO.

## 2.6 Formas alternativas para linearização

Considere a ligação k-l mostrada na figura 2.4a. O fluxo de potência de k para l considerando as tensões terminais iguais a 1 pu é, pela equação 2.20, dado por:

$$P_{kl} = g_{kl}(1 - \cos\theta_{kl}) - b_{kl}\sin\theta_{kl} \quad (2.42)$$

O gráfico de  $P_{kl} \times \theta_{kl}$  é a curva não linear mostrada na figura 2.4b, onde também são apresentadas três formas possíveis de linearização da equação 2.42.

### LINEARIZAÇÃO - 1

Reta tangente no ponto de origem com inclinação:

$$\frac{dP_{kl}}{d\theta_{kl}} = -b_{kl} = \frac{x_{kl}}{r_{kl}^2 + x_{kl}^2} \quad (2.43)$$

### LINEARIZAÇÃO - 2

Reta secante passando pela origem com inclinação:

$$\frac{dP_{kl}}{d\theta_{kl}} = \frac{1}{x_{kl}} \quad (2.44)$$

### LINEARIZAÇÃO - 3

Reta secante passando pela origem com inclinação igual a da tangente no ponto de inflexão da curva:

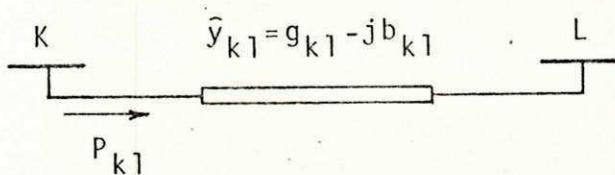
$$\frac{dP_{kl}}{d\theta_{kl}} = (g_{kl}^2 + b_{kl}^2)^{1/2} = |y_{kl}| \quad (2.45)$$

Esta é uma inclinação intermediária entre as duas apresentadas anteriormente.

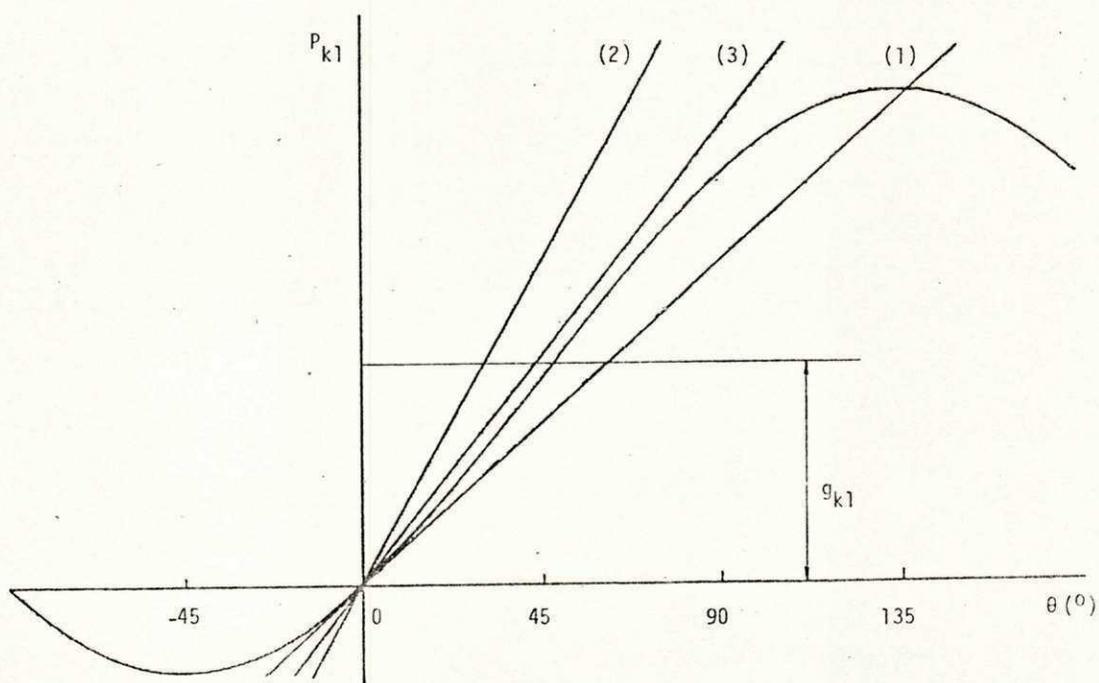
A figura 2.5a mostra o quadrado dos resíduos para cada tipo de linearização em função da abertura angular  $\theta_{kl}$ , para uma linha com a relação  $r/x$  igual a 1, sendo esta uma situação extrema para as linhas em sistemas de EAT e UAT.

Pela figura 2.5a vê-se que todas as linearizações apresentam maiores erros para valores negativos de  $\theta_{kl}$  e a LINEARIZAÇÃO-1 é uma melhor aproximação tanto para valores negativos de  $\theta_{kl}$  como para valores positivos.

A figura 2.5b mostra a soma dos quadrados dos resíduos (SQR) calculada para  $-30^\circ < \theta_{kl} < +30^\circ$  em função da relação  $r/x$  da linha. Verifica-se que a LINEARIZAÇÃO-1 apresenta sempre a menor soma dos quadrados de seus resíduos e, portanto, é uma melhor aproximação que as linearizações 2 e 3.



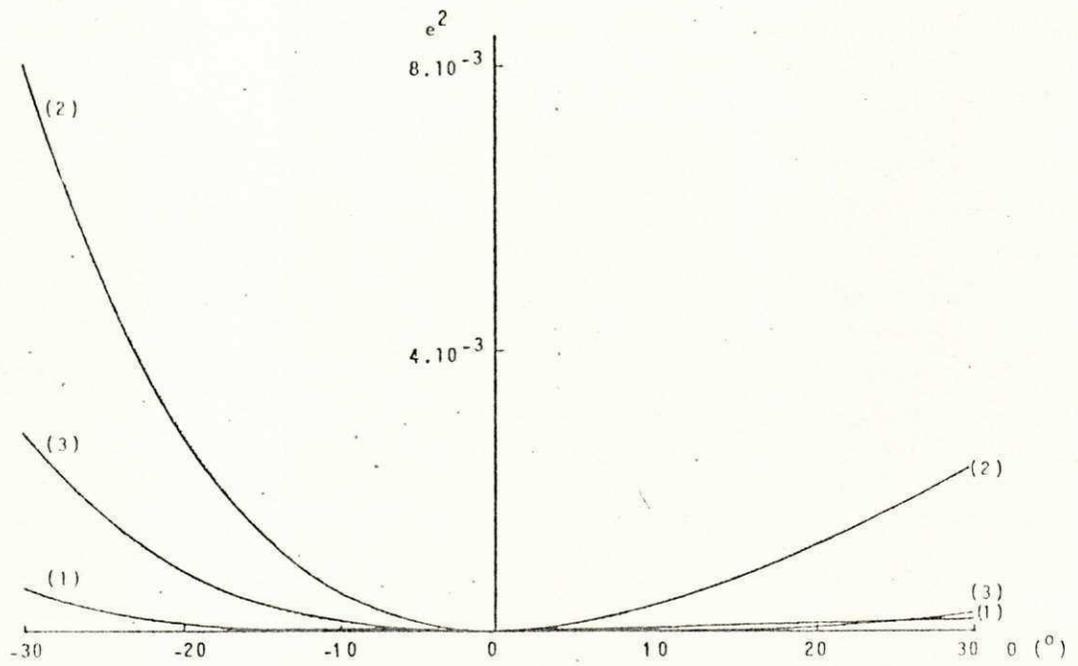
( a )



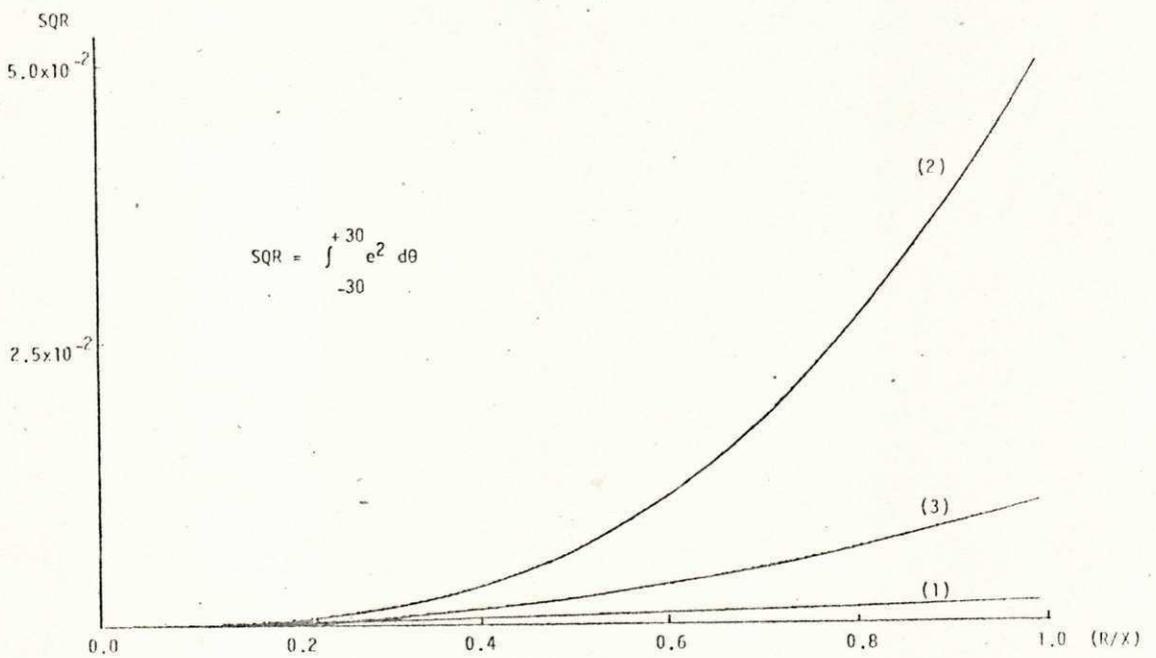
( b )

Figura 2.4 - Formas alternativas de linearização para

$$P_{kl} = g_{kl}(1 - \cos\theta_{kl}) - b_{kl}\sin\theta_{kl}$$



( a )



( b )

Figura 2.5 - ( a ) Quadrado dos resíduos x abertura angular

( b.) Soma dos quadrados dos resíduos x relação  $r/x$ .

### 3. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se a implementação computacional dos programas desenvolvidos para a solução do fluxo de carga linearizado pelos quatro métodos apresentados no capítulo anterior.

Inicialmente são apresentadas as características comuns a todos os programas. Os aspectos particulares a cada um deles serão descritos em separado.

#### 3.2 Características gerais

A programação dos quatro métodos apresentados no capítulo anterior envolve características comuns a todos eles tanto na entrada e manipulação dos dados quanto na própria resolução do sistema de equações algébricas. A enumeração destas características é feita a seguir:

determinados no caso base.

No caso de alterações na configuração do sistema, a retirada ou adição de um novo elemento é representada por injeções nodais extras, calculadas pelo método da compensação, definindo-se um novo vetor de injeções. A solução para a rede modificada é obtida por substituição direta. O fluxograma para este método é apresentado na figura 3.1 .

### 3.3.2 Do MODELO DC DUPLO

A inclusão das perdas no método DC é feita partindo-se da potência líquida injetada nas barras, ( $\bar{P}$ ), e obtendo-se a solução do sistema  $\bar{P}=[B]\bar{\theta}$ , que é considerada como uma solução inicial. A partir deste estado inicial, a potência dissipada em cada elemento é calculada e a metade de seu valor é adicionada em seus nós terminais como cargas fictícias, definindo-se um novo vetor de injeções nodais ( $\bar{P}'$ ). O estado da rede é obtido por substituição deste novo vetor.

Desejando-se uma nova solução em virtude de alterações das cargas ou geração nas barras, bem como modificações na rede, esta será obtida considerando que as perdas no sistema permanecem constantes, computando-se as injeções modificadas diretamente no vetor ( $\bar{P}'$ ) e fazendo a substituição direta. A figura 3.2 mostra o fluxograma para este método.

### 3.3.3 Do MODELO DC com perdas estimadas

A implementação deste método é idêntica a do método DC simples, exceto que a potência líquida injetada nas barras é calculada considerando as cargas acrescidas do valor percentual estimado para as perdas do sistema. Seu fluxograma é mostrado na figura 3.3 .

### 3.3.4 Do MODELO DC DUPLO com perdas estimadas

O fluxograma para este método é apresentado na figura 3.4 e sua implementação é semelhante a do método DC duplo, sendo o cálculo da potência dissipada em cada elemento feito a partir do estado da rede calculado com a potência absorvida pelas cargas, nelas incluído o percentual estimado para as perdas, como no item anterior.

### 3.3.5 Do MODELO DC por processo iterativo

O método de gauss-seidel, descrito na seção 2.4.1, foi implementado segundo o fluxograma apresentado na figura 3.5.

Observa-se que para alterações das injeções nas

barras ou na topologia da rede, todo o processo iterativo para a solução do sistema de equações precisa ser repetido em cada caso. Isto torna o programa pouco eficiente em algumas aplicações para as quais o modelo linearizado foi originalmente desenvolvido.

Pode-se apontar, pelo menos, uma outra restrição ao uso do processo iterativo. Em alguns casos, é necessário um grande número de iterações (aumentando o tempo de processamento) para que a convergência seja alcançada, a depender da ordem do sistema e da tolerância especificada.

A tabela abaixo mostra o desempenho deste processo na solução de sistemas de 14, 30 e 248 barras.

Num. de barras	Média resid. pot. ativa	Número de iterações	Tempo de processamento (s)
14	$0.422 \times 10^{-3}$	23	1.36
30	$0.782 \times 10^{-3}$	71	3.18
248	$0.172 \times 10^{-2}$	244	47.15

Tendo em vista a reduzida eficiência deste programa, ele não foi utilizado nos estudos subsequentes deste trabalho.

### 3.4 Area de memória requerida

Os programas implementados possuem a capacidade de processar sistemas de até 500 barras e 1000 linhas, reque-  
rendo para tanto as áreas de memória apresentadas na tabela  
abaixo.

PROGRAMA	Area requerida em Kbytes
MODELO DC	163,720
MODELO DC DUPLO	166,592
MODELO DC com perdas estimadas	163,720
MODELO DC DUPLO com perdas estimadas	166,592

### 3.5 Implementação em microcomputador

Os programas desenvolvidos nas seções anteriores foram implementados com pleno êxito no microcomputador NEXUS-1600 da Scopus (compatível com o IBM-PC) possuindo a seguinte configuração:

- Frequência de "clock": 4,77 MHz
- 256 Kbytes de memória
- 2 acionadores de discos flexíveis de 5 1/4"
- Dotado do processador de ponto flutuante 8087
- Impressora de matriz de pontos de 200 cps.

A solução obtida no microcomputador apresentou uma excelente precisão numérica (exatidão nos cálculos) e melhor que aqueles fornecidos, utilizando-se os mesmos programas, pelo computador IBM/4341. Como mostra a tabela abaixo para o MODELO DC simples.

Sistema	Média dos resíduos na potência ativa por barra (MW)	
	IBM/4341	NEXUS 1600
14 Barras	$0.122 \times 10^{-5}$	$0.180 \times 10^{-6}$
30 Barras	$0.231 \times 10^{-5}$	$0.234 \times 10^{-6}$
244 Barras	$0.108 \times 10^{-4}$	$0.685 \times 10^{-6}$

O tempo de processamento dos programas para simulação dos sistemas de 14, 30 e 248 barras através do modelo linearizado, utilizando o NEXUS 1600 estão relacionados na tabela abaixo.

Modelo	S I S T E M A		
	14 barras	30 barras	248 barras
DC simples	11.82 s	21.15 s	2 min 56.97 s
DC DUPLO	11.91 s	21.65 s	2 min 58.17 s
DC c/perdas estimadas	11.89 s	21.28 s	2 min 57.08 s
DC DUPLO com perdas estim.	11.97 s	22.08 s	2 min 59.12 s

A primeira vista os tempos apresentados podem parecer muito grande, entretanto, deve-se lembrar a grande quantidade de dados que são necessários para a simulação dos sistemas e que a maior parte do tempo é empregada na leitura dos mesmos, e no armazenamento dos resultados em disquete, devido a baixa velocidade de acesso dos acionadores.

De maneira geral, dada a facilidade de manuseio e a comodidade oferecida pelos microcomputadores, um tempo de processamento desta ordem é perfeitamente aceitável.

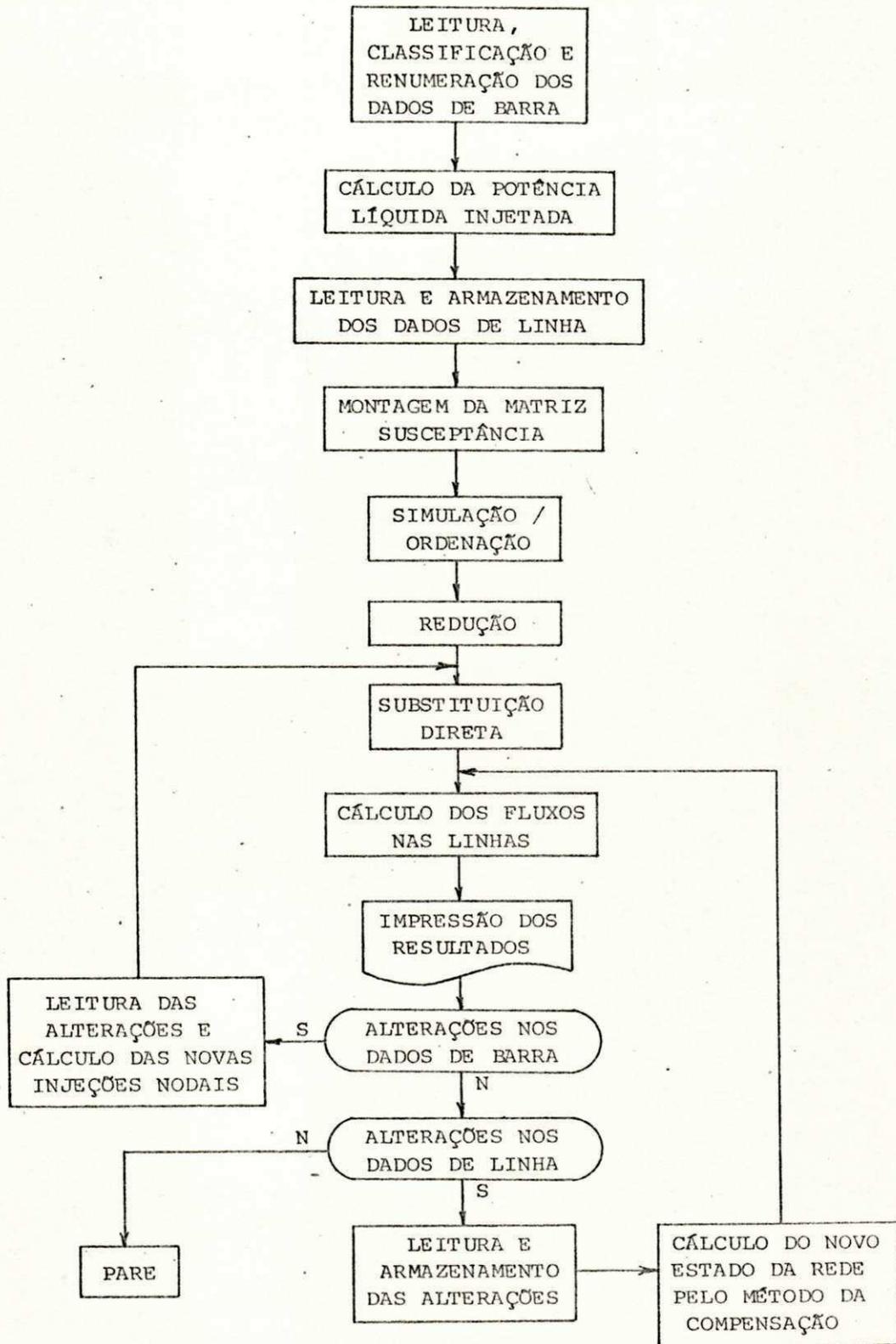


Figura 3.1 - Fluxograma para o MODELO DC

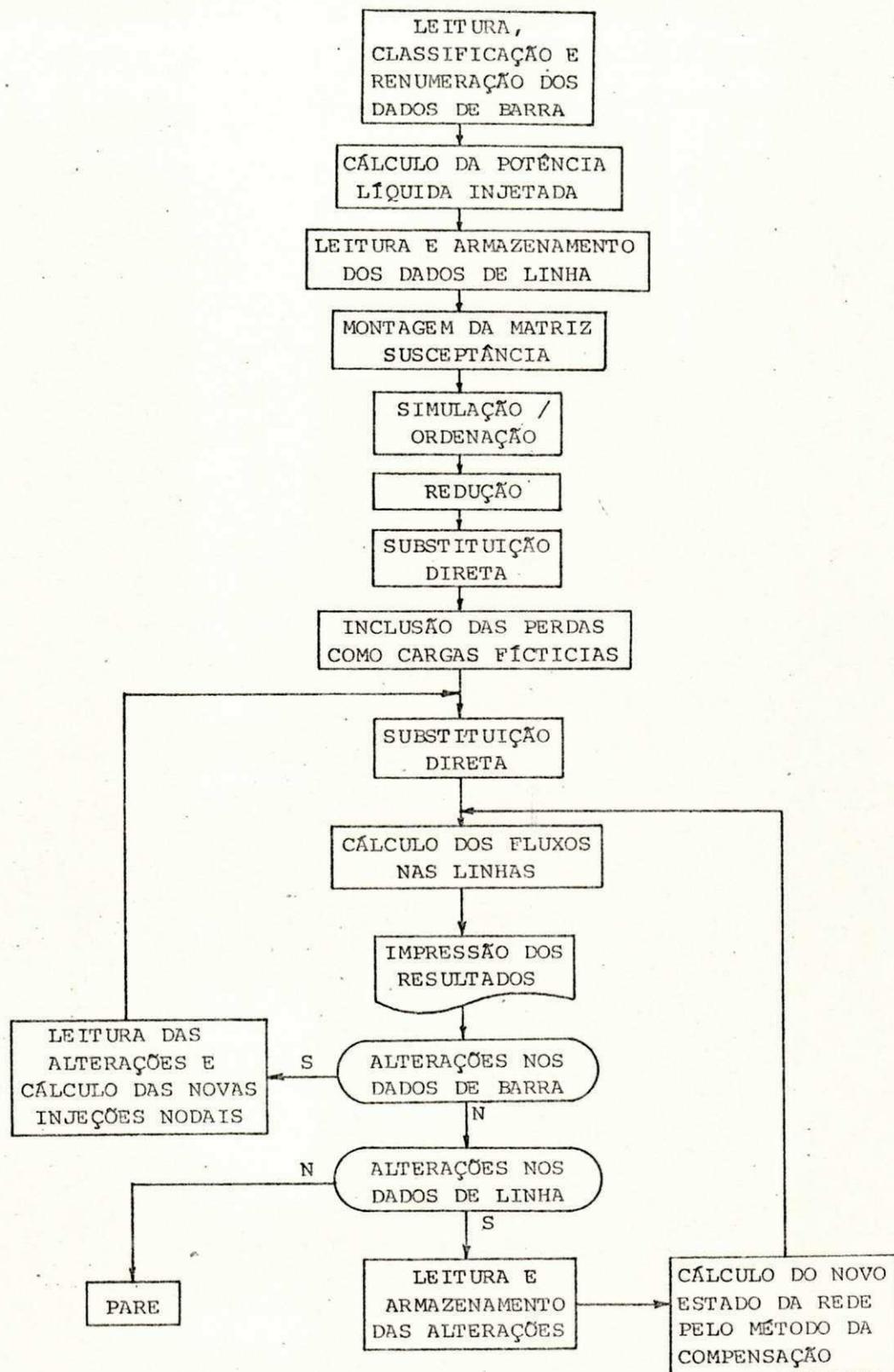


Figura 3.2 - Fluxograma para o MODELO DC DUPLO

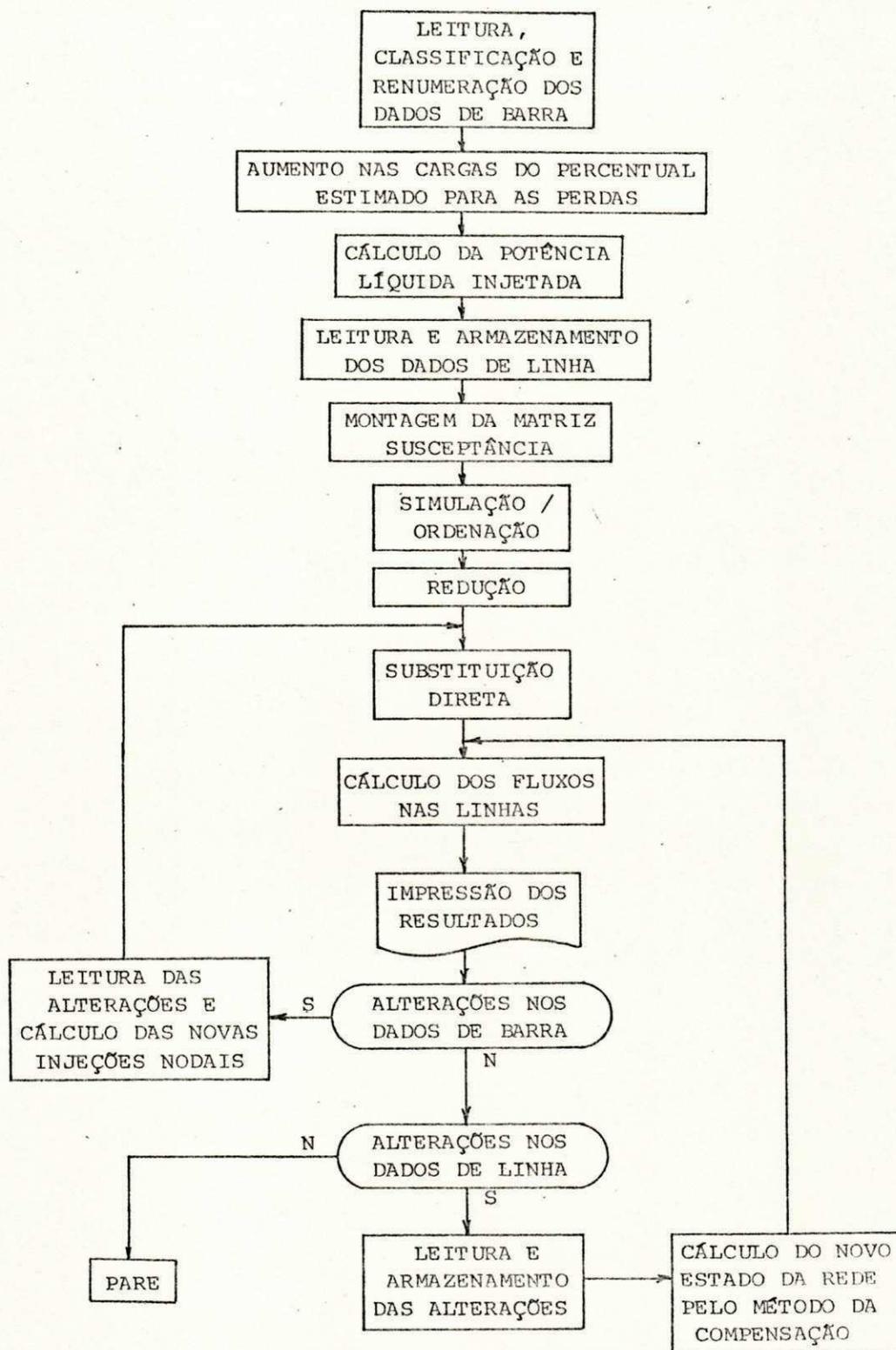


Figura 3.3 - Fluxograma para o MODELO DC com perdas estimadas

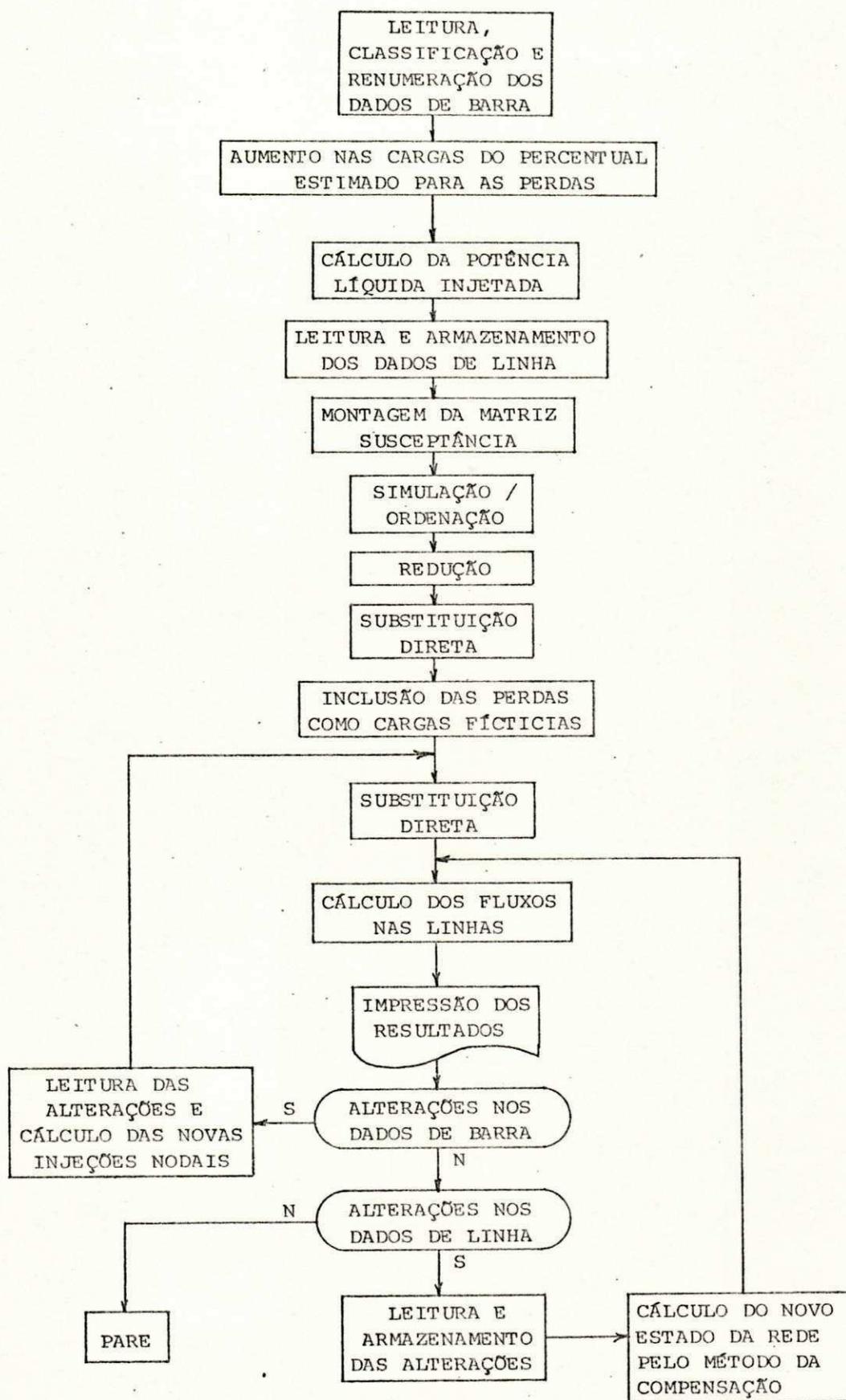


Figura 3.4 - Fluxograma para o MODELO DC DUPLO com perdas estimadas

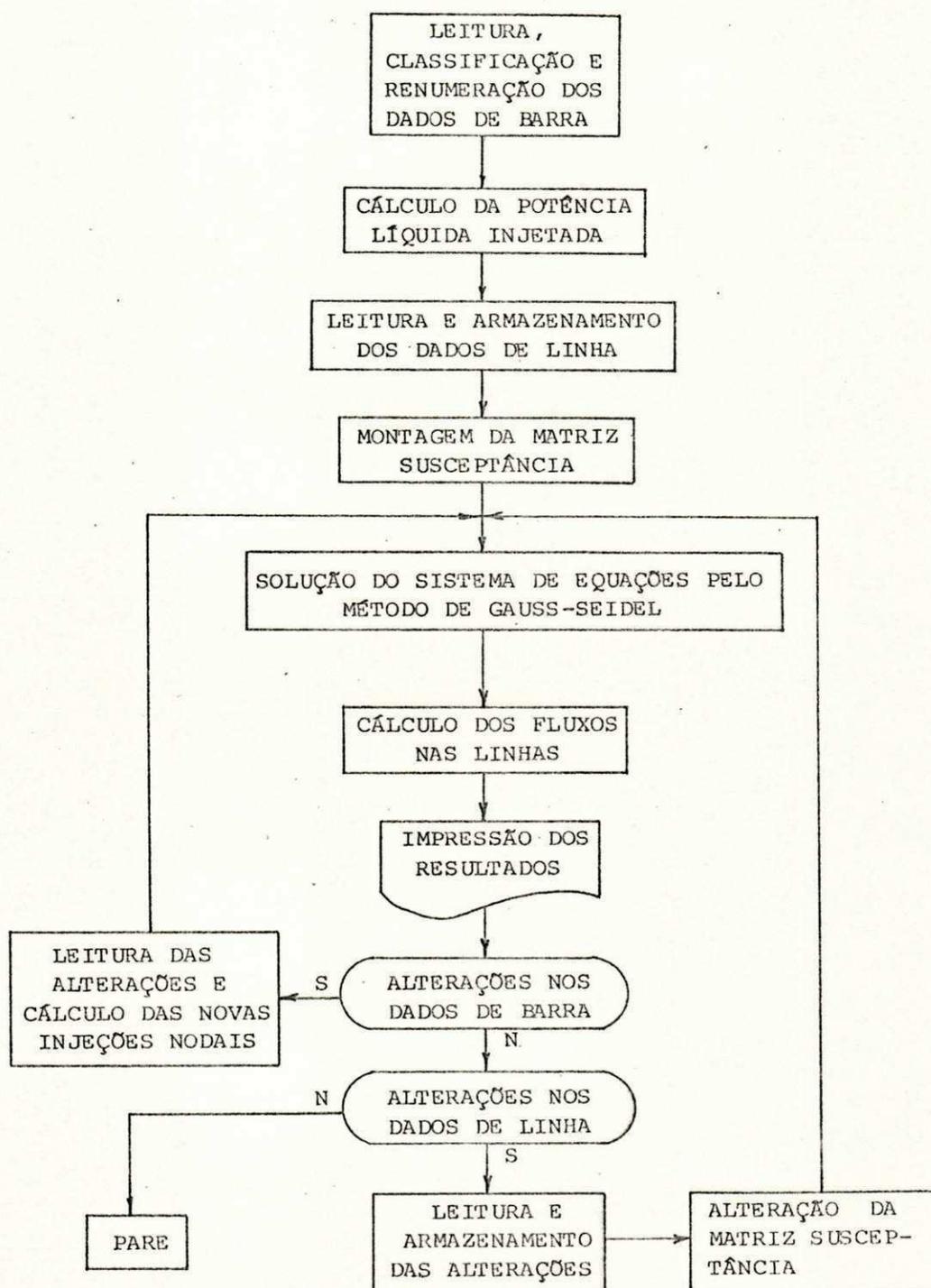


Figura 3.5 - Fluxograma para solução do MODELO DC pelo método iterativo de Gauss-Seidel.

## 4 DESEMPENHO DO FLUXO DE CARGA LINEARIZADO

### 4.1 Introdução

Este capítulo tem como objetivo avaliar o desempenho dos modelos linearizados, comparando seus resultados com aqueles obtidos pelo programa de fluxo de potência da Philadelphia Electric Power Company (PECO).

Para cada sistema testado são apresentados, inicialmente, os histogramas da frequência da relação  $r/x$  e da abertura angular  $\theta_{kl}$  para verificar a validade das considerações feitas para linearização das equações do fluxo de carga. Em seguida, o histograma da frequência do fluxo de potência nas linhas mostra a ordem de grandeza dos fluxos presentes no sistema.

A precisão dos resultados fornecidos pelos quatro modelos linearizados é avaliada calculando-se o erro percentual entre os fluxos fornecidos por cada modelo e aqueles obtidos pelo modelo AC do programa da PECO. Os erros são percentuais em relação ao fluxo na barra emitente do caso AC, e sua frequência, numa faixa pré-fixada, dis-

posta em forma de histograma para análise da precisão de cada modelo com relação ao MODELO AC, bem como o desempenho relativo entre eles.

#### 4.2 Quanto à precisão dos resultados

##### 4.2.1 Sistema teste de 14 barras

Este sistema de 14 barras e 20 linhas tem seus dados apresentados no apêndice B.1 e as figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram a frequência da relação  $r/x$ , a frequência da abertura angular  $\theta_{kl}$  e a frequência dos fluxos de potência nas linhas, respectivamente.

A figura 4.1 mostra que a maioria das linhas do sistema possui uma relação  $r/x$  superior a 0.2, portanto a hipótese de que  $x \gg r$  não é perfeitamente válida. A figura 4.2 mostra que todas as aberturas angulares são inferiores a  $14^\circ$ , portanto o erro introduzido pela aproximação  $\text{sen}x \approx x$  é inferior a 1% tornando esta hipótese perfeitamente aceitável. A figura 4.3 mostra que o sistema em pauta é um sistema de fluxos baixos, já que 95% de suas linhas transportam uma potência inferior a 80 MW.

A frequência de erros na simulação do sistema utilizando os modelos linearizados são apresentadas nas figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7.

Observa-se que os modelos DC simples, DC DUPLO e DC

DUPLO com estimativa de perdas, apresentam erros inferiores a 6% no cálculo de 75% dos fluxos presentes no sistema, sendo o modelo DC DUPLO o mais preciso como mostra a figura 4.5. Neste, 70% dos fluxos são calculados com erros inferiores a 4%, e a introdução da estimativa de perdas não trouxe nenhuma melhora ao modelo DC DUPLO como mostra a figura 4.7.

A figura 4.6 mostra que a introdução das perdas por estimativa no modelo DC aumenta o número de fluxos calculados com erros inferiores a 2%. Entretanto, os erros são mais distribuídos na faixa 0-30%, com um aumento na faixa 20-30%, apresentando, portanto, um desempenho inferior aos outros modelos.

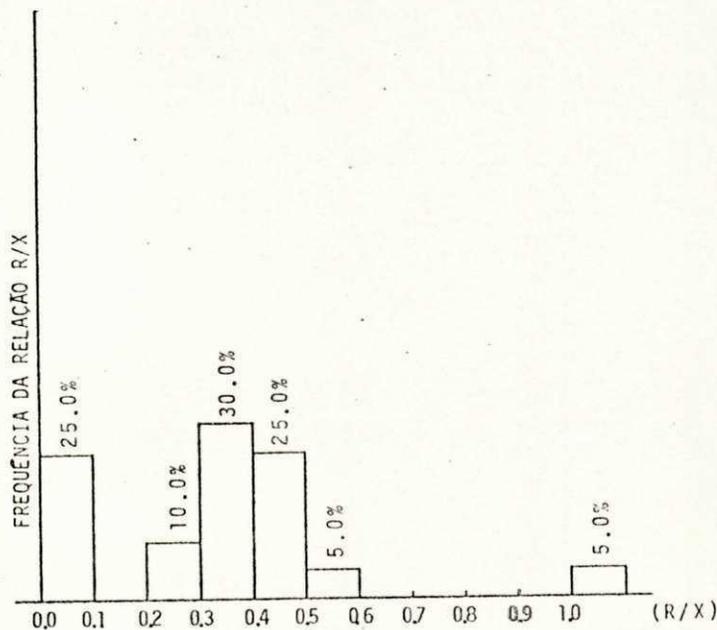


Figura 4.1 - Frequência da relação  $r/x$  para o sistema teste de 14 barras.

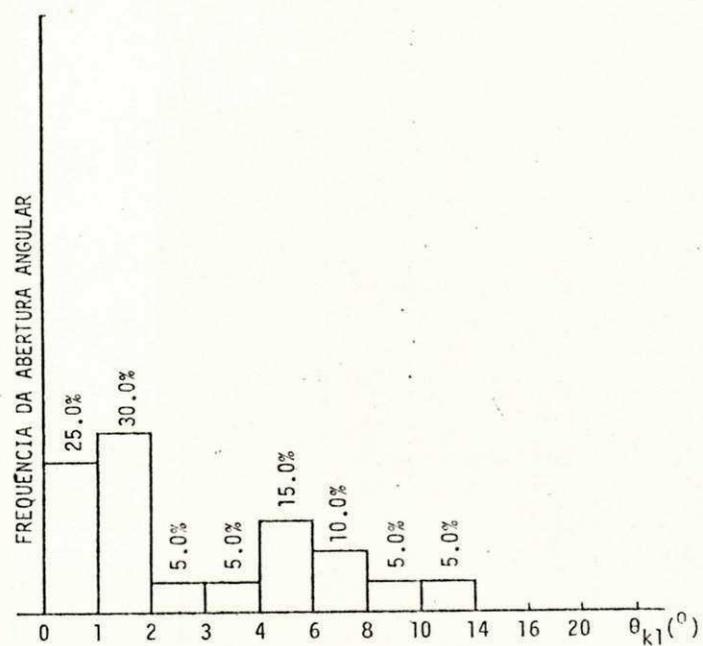


Figura 4.2 - Frequência da abertura angular para o sistema teste de 14 barras.

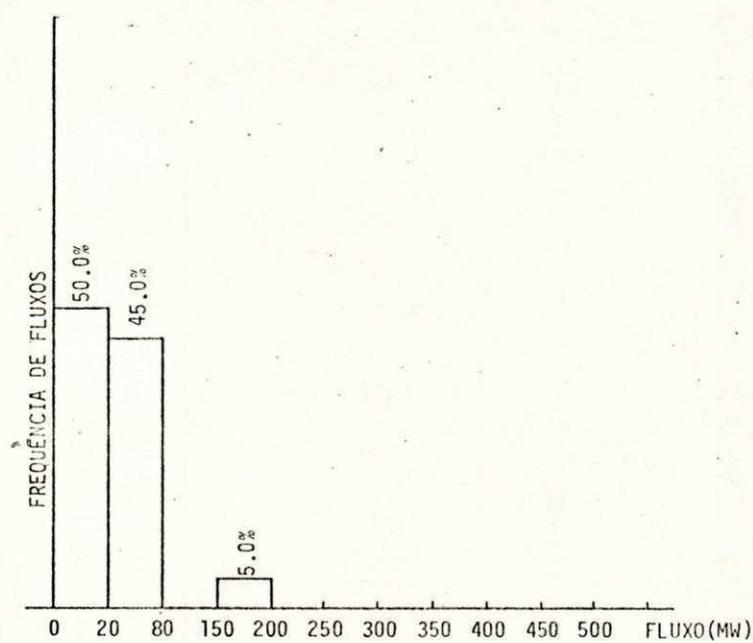


Figura 4.3 - Frequência dos fluxos de potência para o sistema teste de 14 barras.

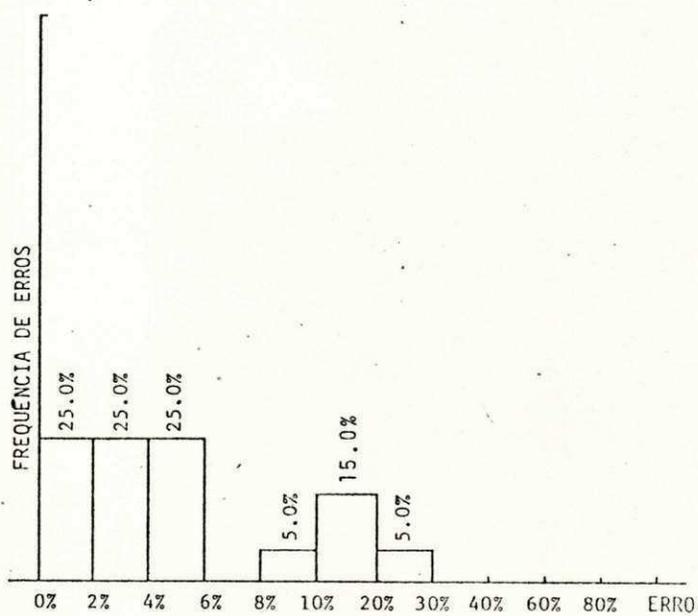


Figura 4.4 - Comparação entre o MODELO DC e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 14 barras.

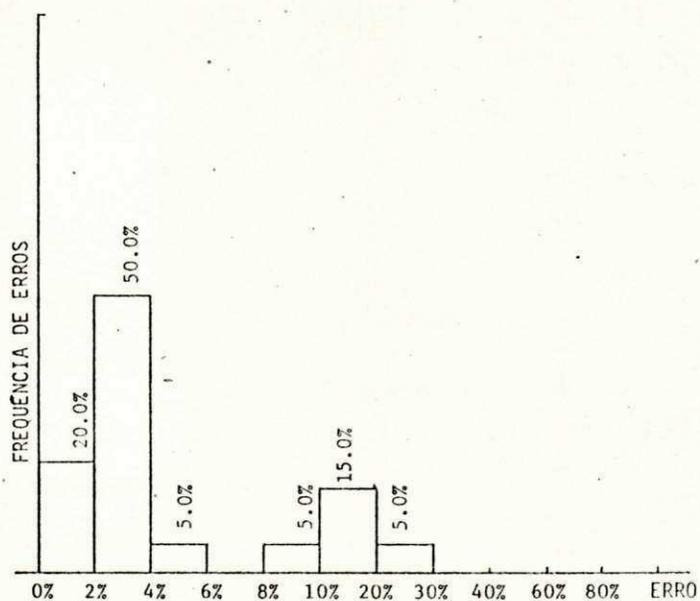


Figura 4.5 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 14 barras.

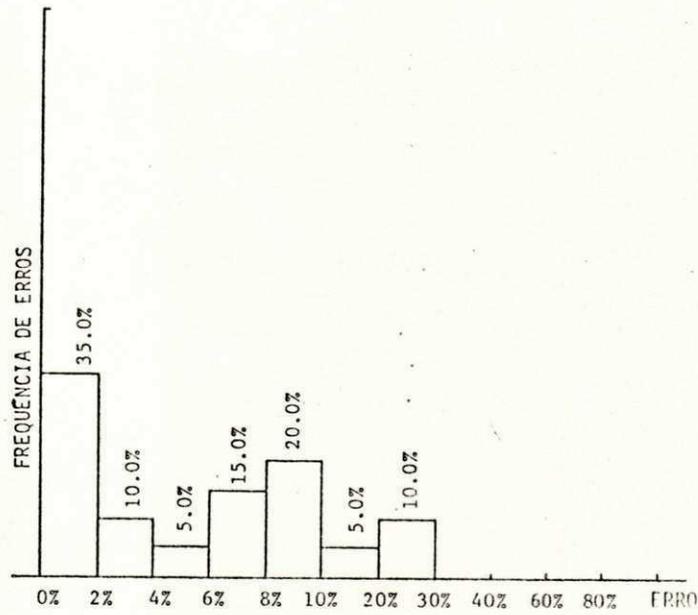


Figura 4.6 - Comparação entre o MODELO DC com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 14 barras.

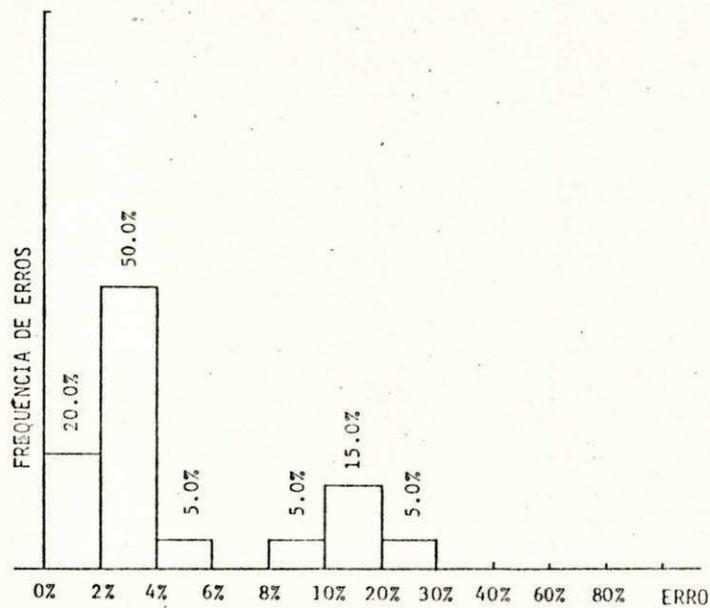


Figura 4.7 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO com inclusão de perdas estimadas e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 14 barras.

#### 4.2.2 Sistema teste de 30 barras

Os dados deste sistema de 30 barras e 41 linhas são apresentados no apêndice B.2.

As figuras 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam algumas características gerais do sistema. A figura 4.8 mostra que grande parte das linhas possui uma relação  $r/x$  elevada, tornando a aproximação  $b_{kl} \approx 1/x_{kl}$  pouco confiável, e a figura 4.9 mostra que todas as aberturas angulares são inferiores a  $8^\circ$ , logo a aproximação  $\text{sen}x \approx x$  é plenamente aceitável para este sistema.

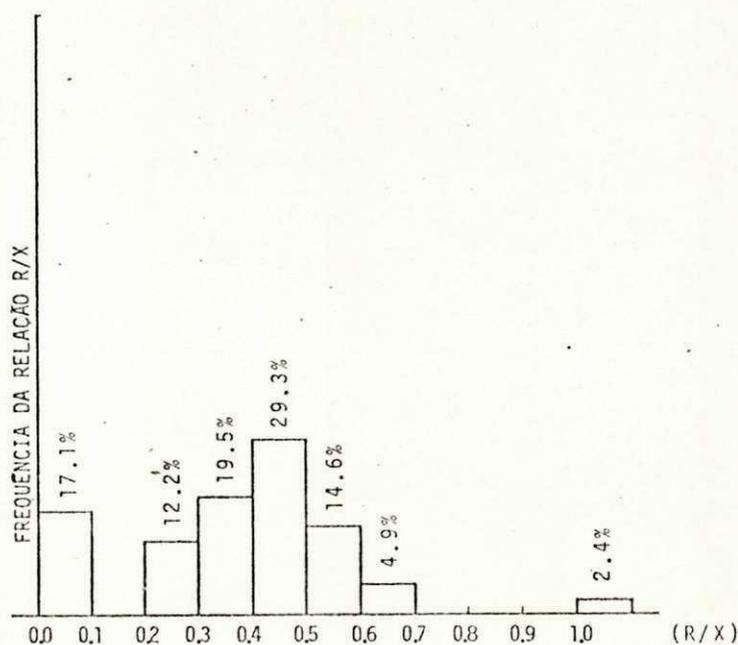


Figura 4.8 - Frequência da relação  $r/x$  para o sistema teste de 30 barras.

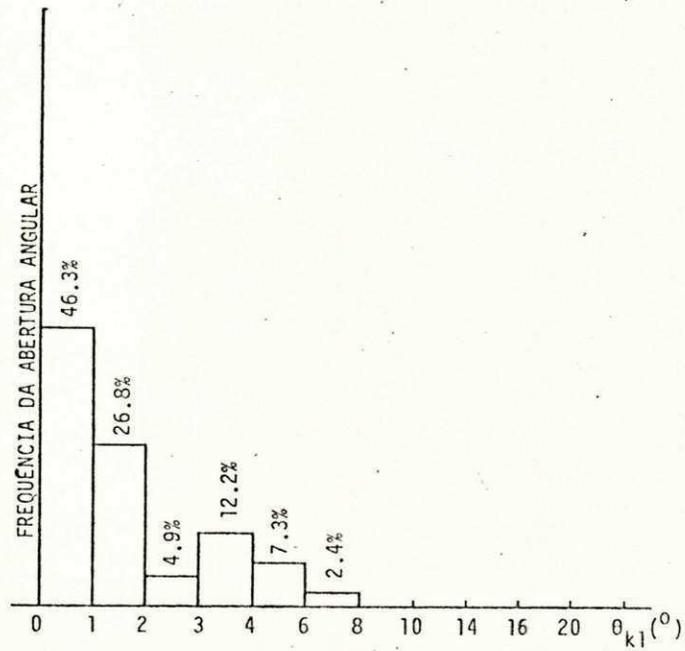


Figura 4.9 - Frequência da abertura angular para o sistema teste de 30 barras.

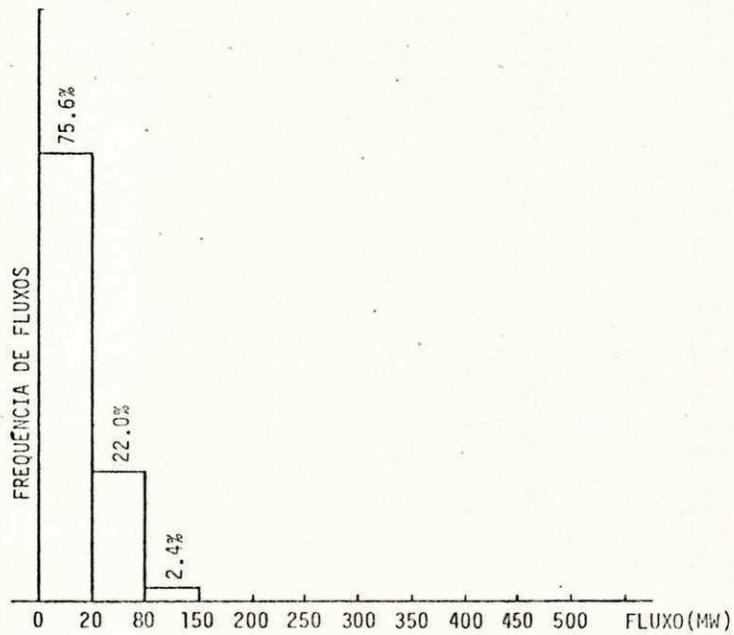


Figura 4.10 - Frequência dos fluxos de potência para o sistema teste de 30 barras.

A simulação do sistema com o modelo DC simples apresentou, como mostra a figura 4.11, cerca de 88% dos fluxos calculados com erros inferiores a 6%, ficando a maior parte deles na faixa 0-2%, sendo, portanto, razoáveis os seus resultados.

O modelo DC duplo e o modelo DC duplo com inclusão das perdas estimadas na primeira iteração apresentaram bons resultados como mostram as figuras 4.12 e 4.14. Nestes, cerca de 93% dos fluxos apresentam erros inferiores a 6% e mais de 90% possuem erros menores que 4%. Coube ao modelo DC duplo com inclusão das perdas estimadas o melhor desempenho, por apresentar a maior frequência de erro, 66%, na faixa 0-2%, enquanto o modelo DC com inclusão de perdas de forma estimada apresentou-se como sendo o menos preciso como mostra a figura 4.13.

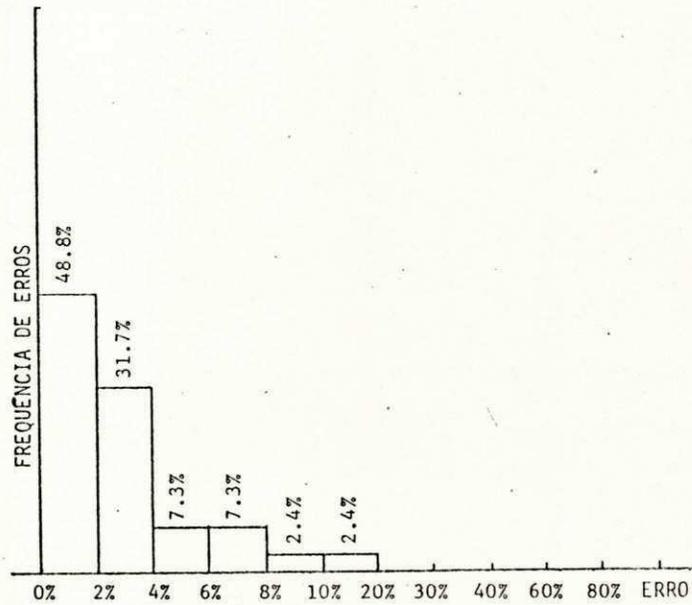


Figura 4.11 - Comparação entre o MODELO DC e o resultados do PECO/AC para o sistema de 30 barras.

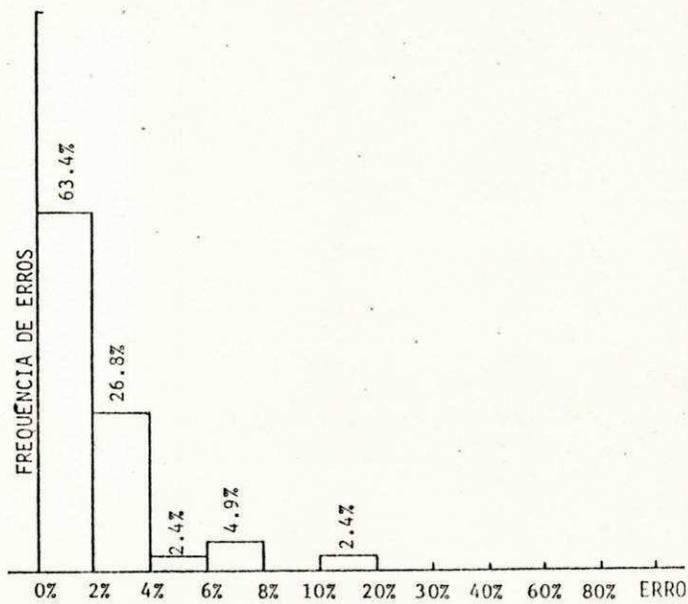


Figura 4.12 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 30 barras.

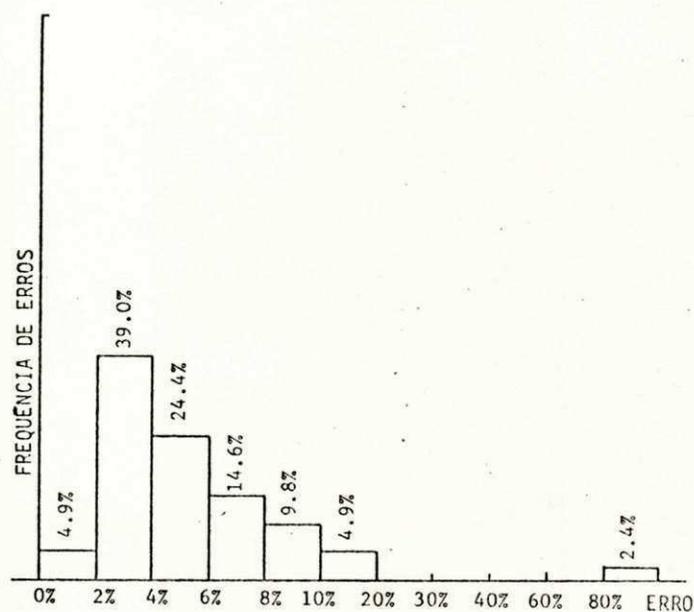


Figura 4.13 - Comparação entre o MODELO DC com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 30 barras.

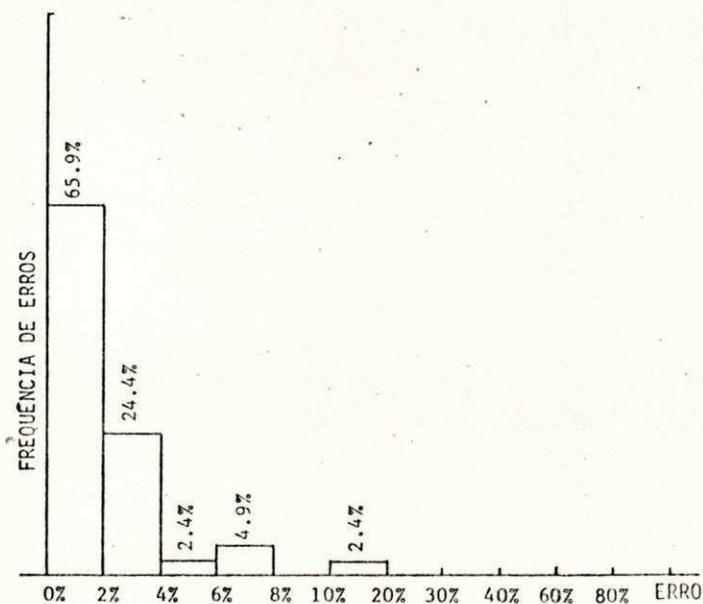


Figura 4.14 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO com inclusão de perdas estimadas e os resultados do PECO/AC para o sistema teste de 30 barras.

#### 4.2.3 Sistema regional de 248 barras

Este sistema é parte integrante do sistema elétrico brasileiro e atende aos estados da região nordeste, cobrindo uma vasta área territorial, caracterizando-se por possuir seus principais centros de geração muito distantes dos grande centros consumidores.

A configuração utilizada para exame é aquela que foi projetada para o ano de 1985 cujos dados encontram-se relacionados no apêndice B.3 .

As figuras 4.15 e 4.16 mostram a frequência da relação  $r/x$  e da abertura angular  $\theta_{kl}$ , respectivamente. Como se vê, quase a totalidade das linhas possuem uma baixa relação  $r/x$  e apresentam uma abertura angular inferior a  $14^\circ$ , tornando perfeitamente aceitáveis as hipóteses  $b_{kl} \cong 1/x_{kl}$  e  $\text{sen}x \cong x$ , adotadas na linearização do modelo AC.

A figura 4.17 mostra que o sistema possui fluxos de potência de ordem elevada, portanto é conveniente analisar não só o desempenho de cada modelo linearizado através do histograma da frequência de erros para todos os fluxos no sistema, como também analisar seu desempenho para faixas intermediárias de fluxo.

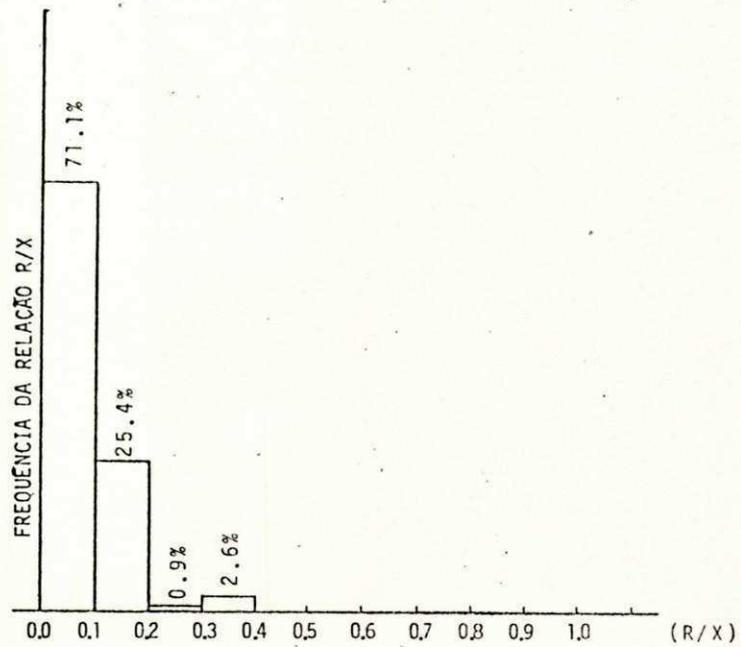


Figura 4.15 - Frequencia da relação r/x para o sistema regional de 248 barras.

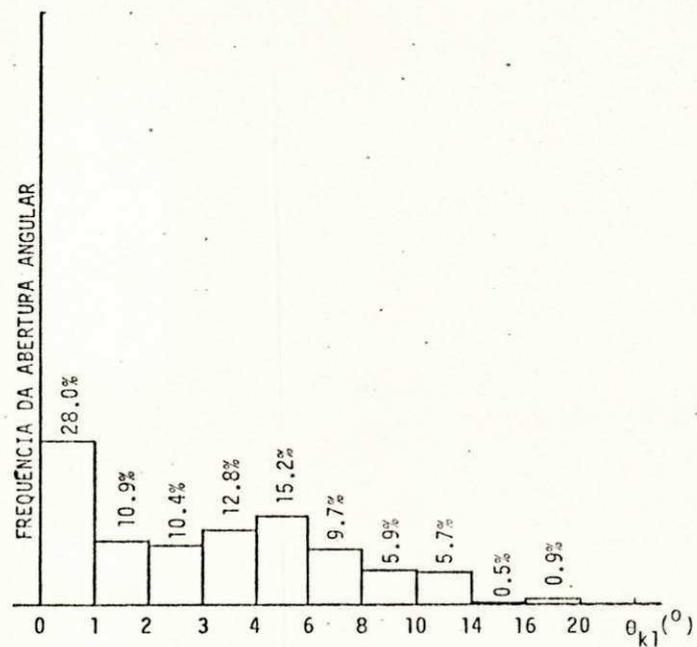


Figura 4.16 - Frequência da abertura angular para o sistema regional de 248 barras.

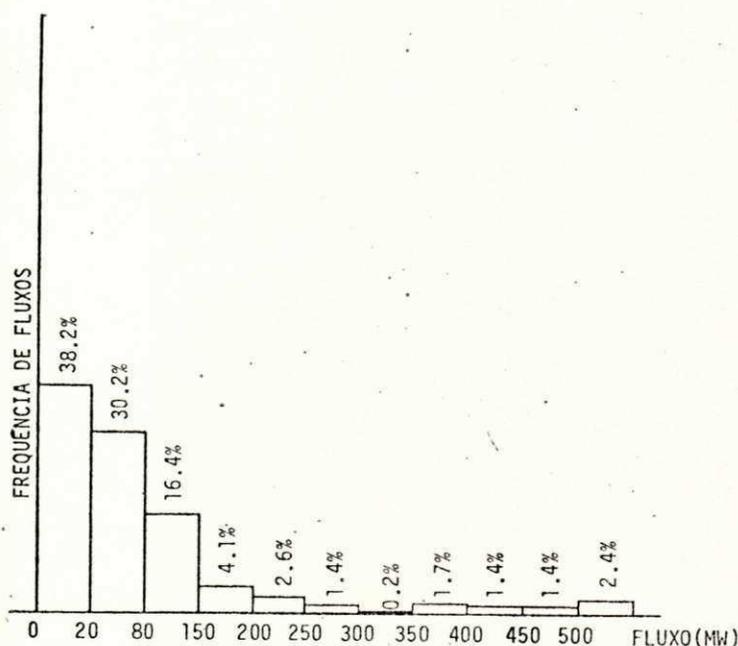


Figura 4.17 - Frequência dos fluxos de potência no sistema regional de 248 barras.

A frequência de erros na simulação do sistema com o modelo DC sem perdas, considerando todos os fluxos, é mostrada na figura 4.18. Observa-se que cerca de 82% dos fluxos são calculados com erros menores que 8%, mantendo aproximadamente a mesma precisão em todas as faixas de fluxos analisadas, figuras 4.19a, 4.19b, 4.20a e 4.20b.

O modelo DC duplo apresenta resultados satisfatórios como mostra a figura 4.21, onde mais de 90% dos fluxos foram determinados com erros menores de 8%, sendo melhor seu desempenho nas faixas mais elevadas de fluxos: na figura 4.23a, 94,4% dos erros são inferiores a 8% e na figura 4.23b, todos os erros são menores que 4%.

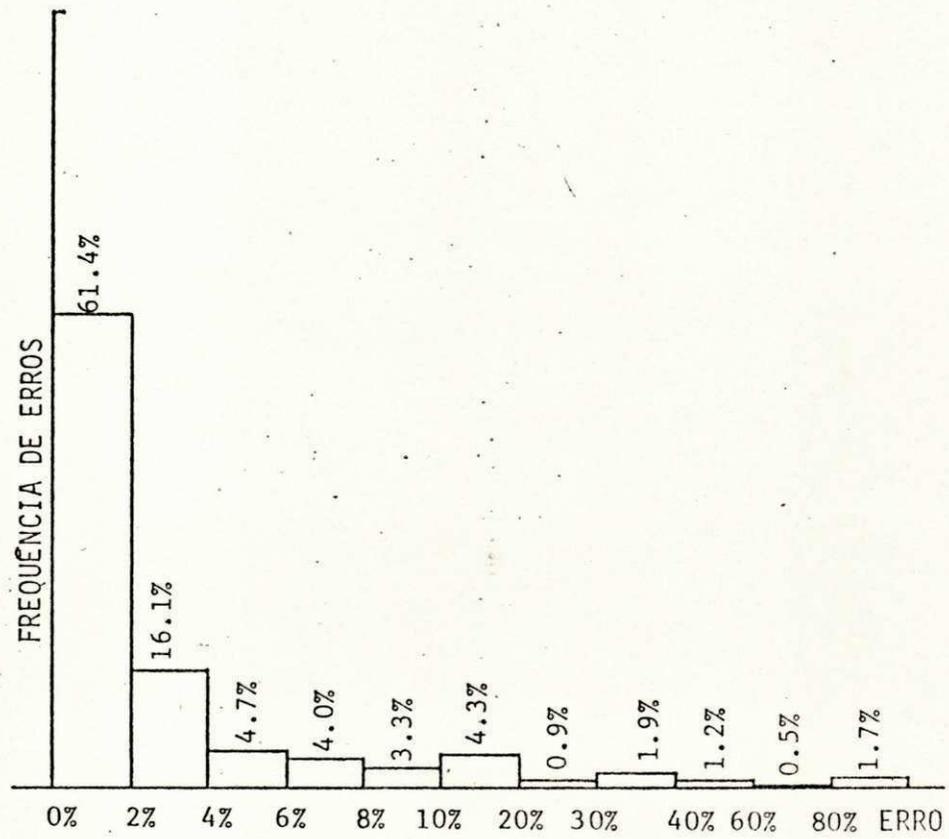
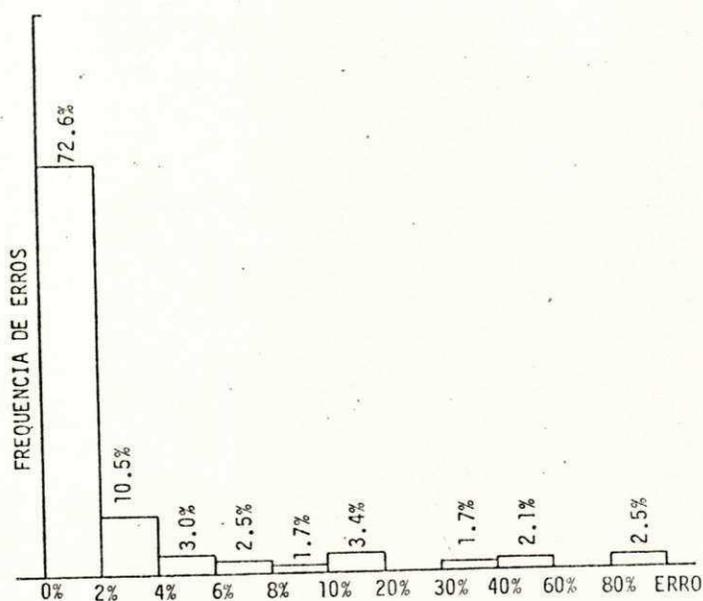


Figura 4.18 - Comparação entre o MODELO DC e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras considerando todos os fluxos.

( a )



FLUXOS DE 50 A 100 MW

( b )

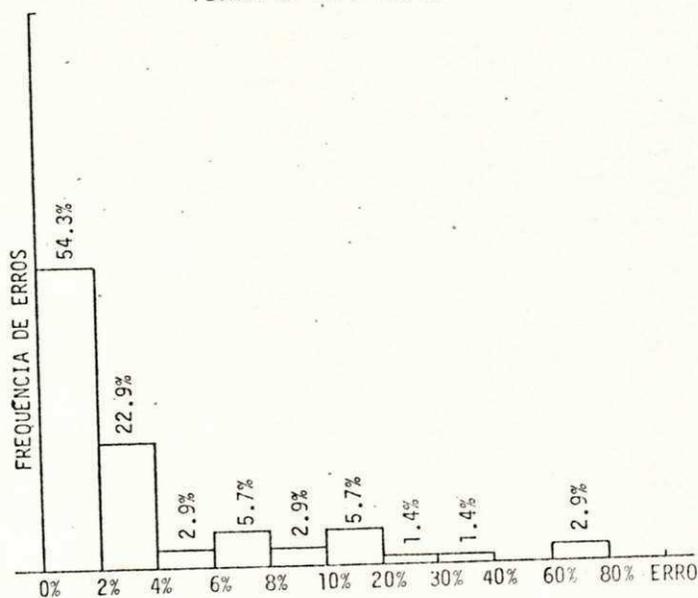


Figura 4.19 - Comparação entre o MODELO DC e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.

( a ) Fluxos de 0 a 50 MW  
 ( b ) Fluxos de 50 a 100 MW

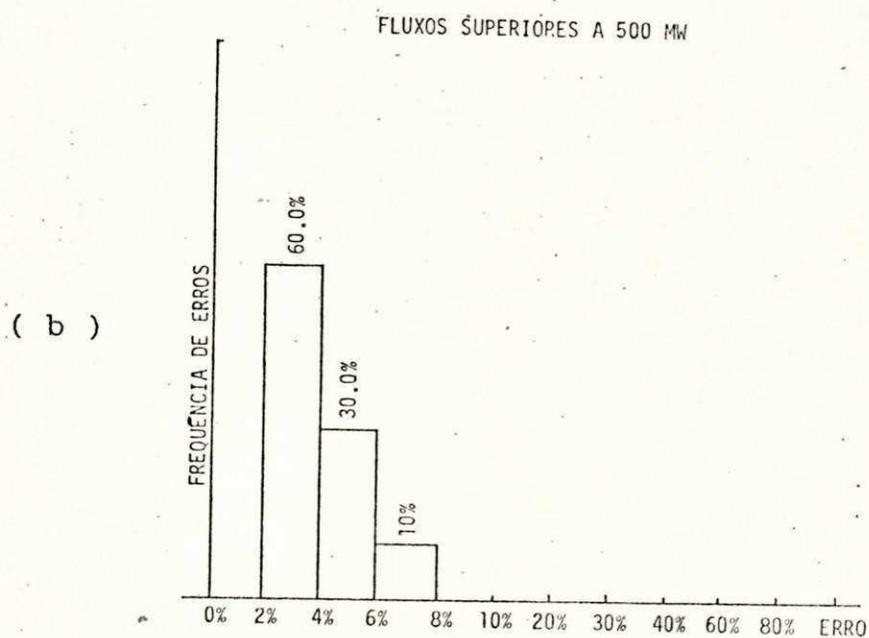
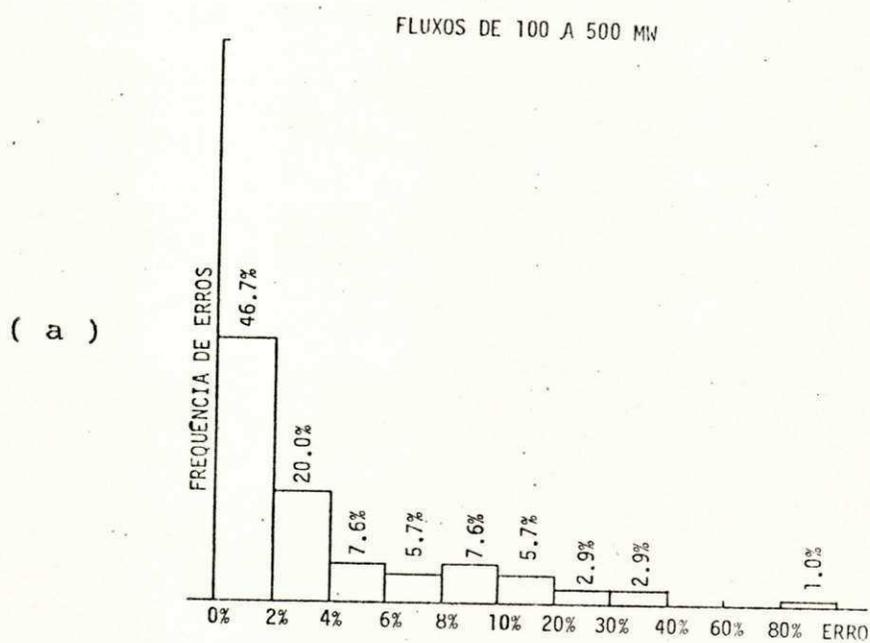


Figura 4.20 - Comparação entre o MODELO DC e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.

( a ) Fluxos de 100 a 500 MW

( b ) Fluxos superiores a 500 MW

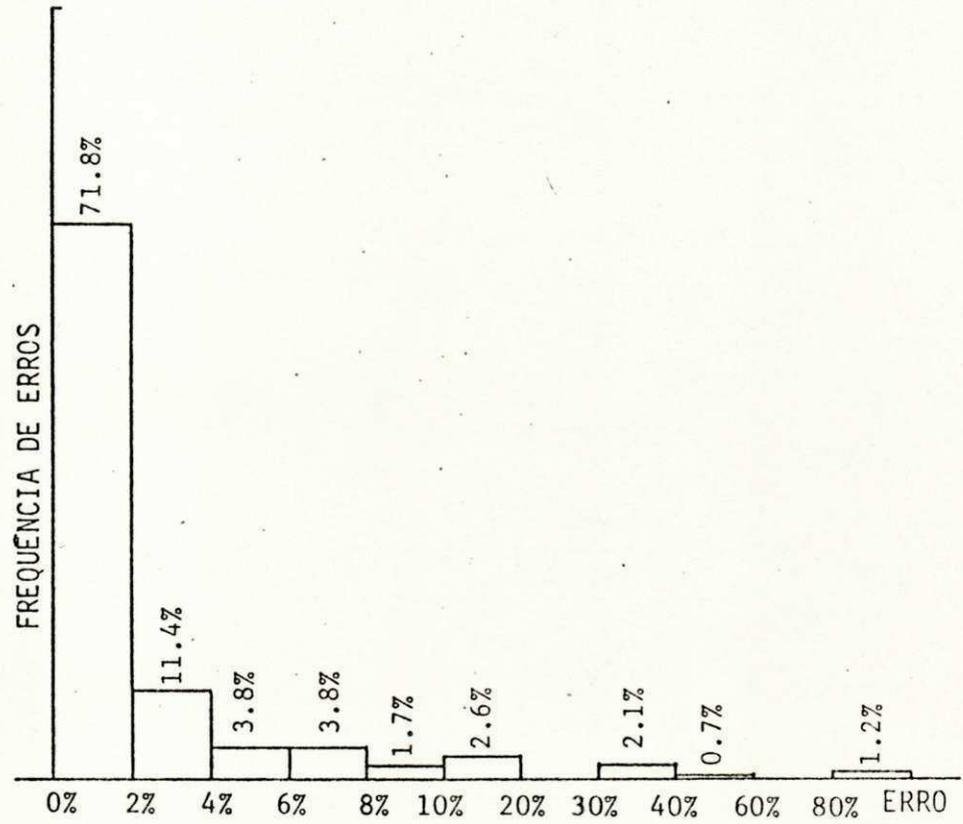


Figura 4.21 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras considerando todos os fluxos.

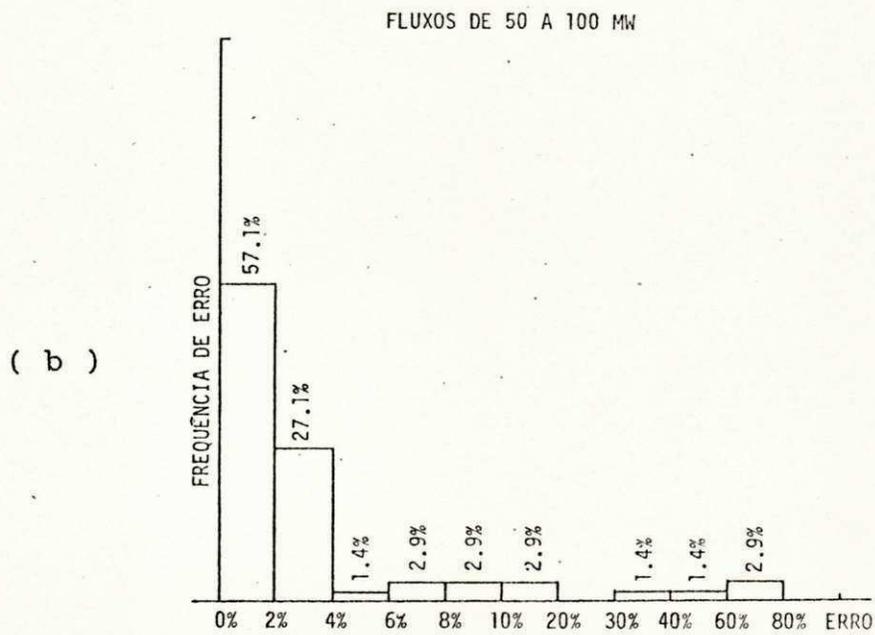
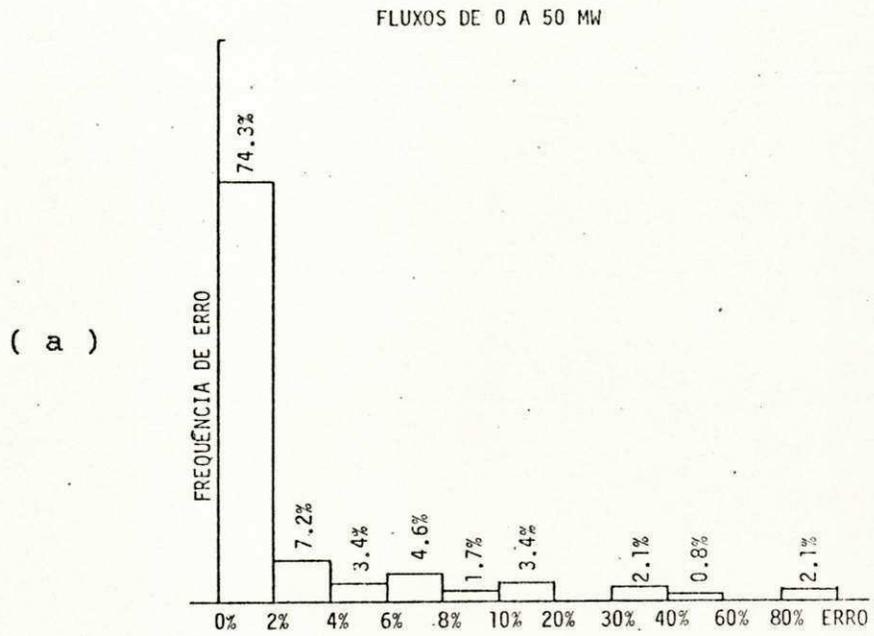


Figura 4.22 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.

( a ) Fluxos de 0 a 50 MW

( b ) Fluxos de 50 a 100 MW

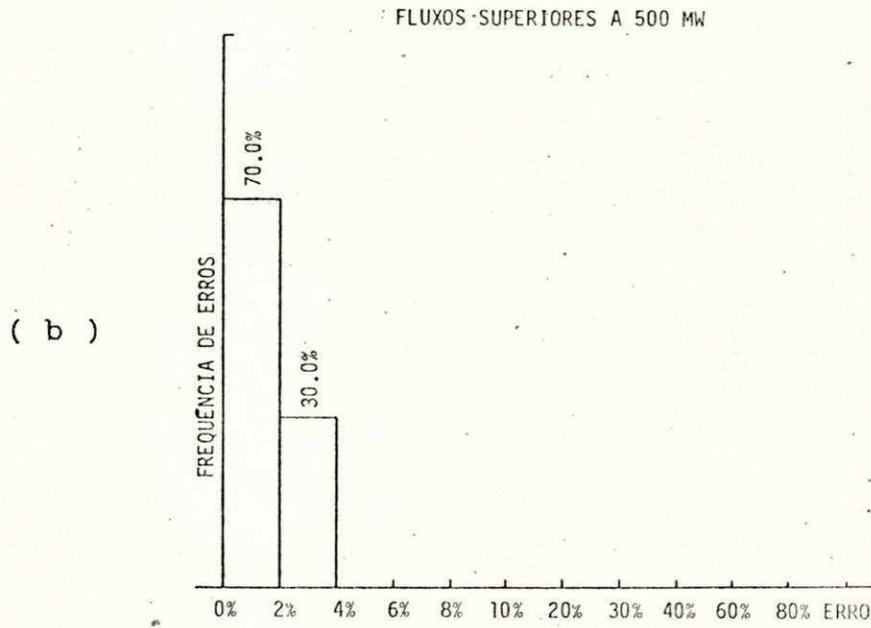
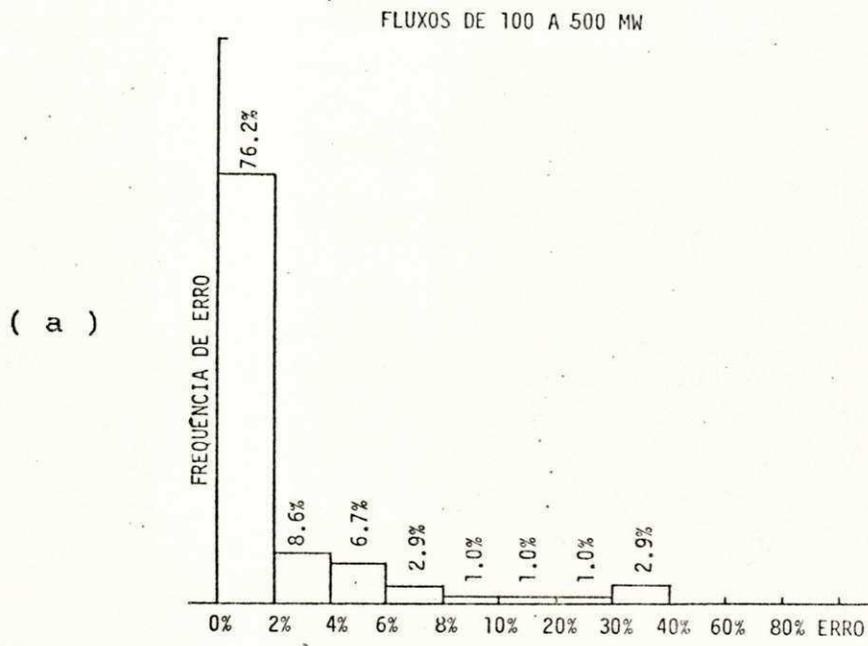


Figura 4.23 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.

( a ) Fluxos de 100 a 500 MW

( b ) Fluxos superiores a 500 MW

Os resultados obtidos com o modelo DC com inclusão de perdas quando todos os fluxos são analisados, figura 4.24, mostram que 84% dos erros são menores que 8%, apenas um pouco maior que os 82% obtidos com o modelo DC simples, entretanto este percentual aumenta para faixas de fluxos mais elevadas, como mostram as figuras 4.25b, 4.26a e 4.26b, sendo: 84.6% para os fluxos na faixa 50-100 MW; 91% para a faixa 100-500 MW e para os fluxos superiores a 500 MW todos os erros são inferiores a 4%, apresentando, portanto, melhores resultados que o modelo DC simples.

A simulação com o modelo DC duplo com inclusão de perdas na primeira iteração, forneceu resultados muito próximos aos obtidos com o modelo DC duplo, como mostram os histogramas apresentados nas figuras 4.27, 4.28a, 4.28b, 4.29a e 4.29b, apresentando um desempenho apenas um pouco melhor que este, por aumentar o número de erros inferiores a 2% para todas as faixas de fluxos consideradas.

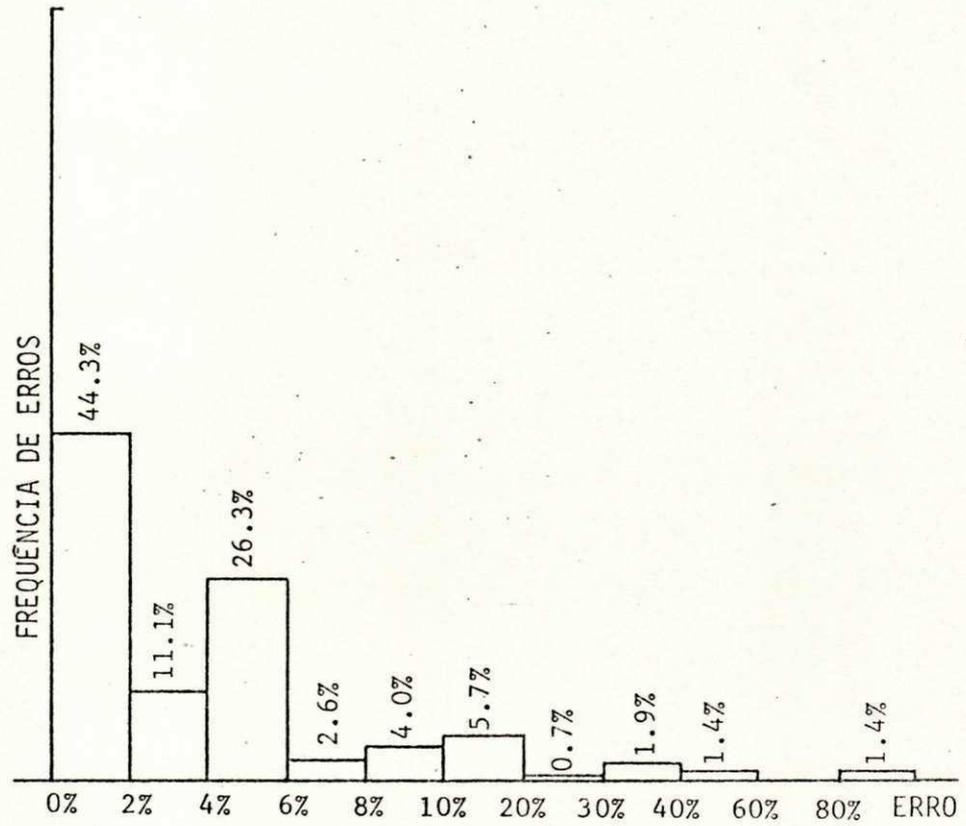


Figura 4.24 - Comparação entre o MODELO DC com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras considerando todos os fluxos.

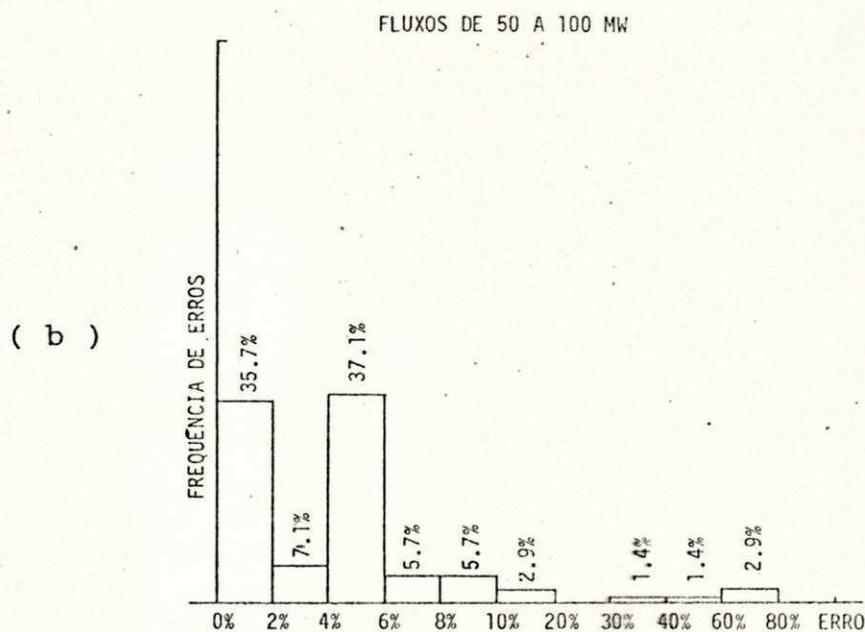
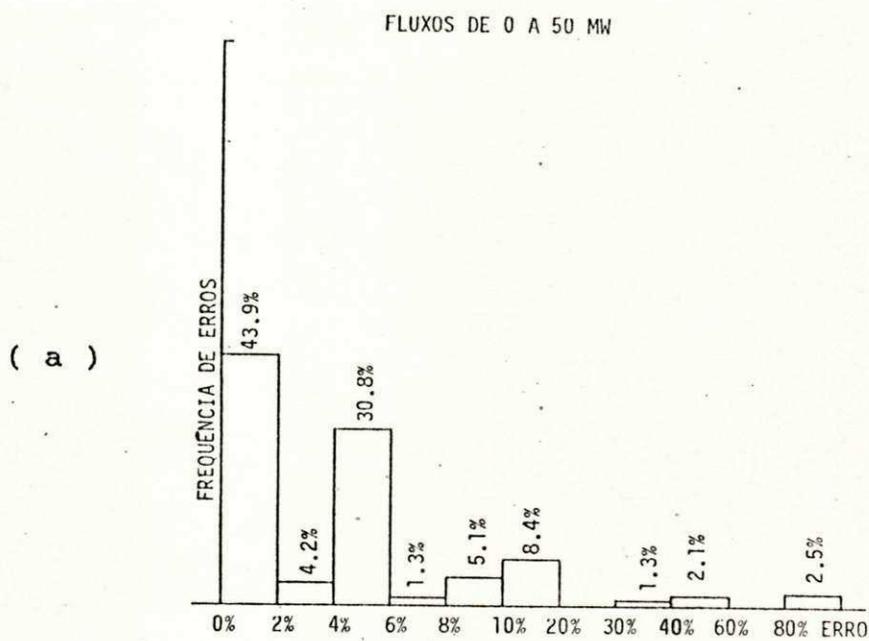


Figura 4.25 - Comparação entre o MODELO DC com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.

( a ) Fluxos de 0 a 50 MW

( b ) Fluxos de 50 a 100 MW

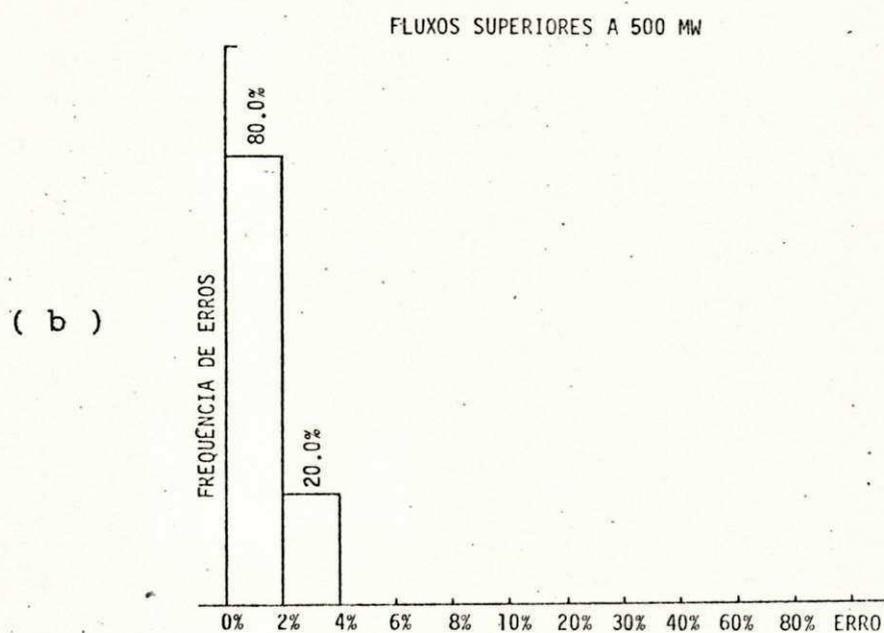
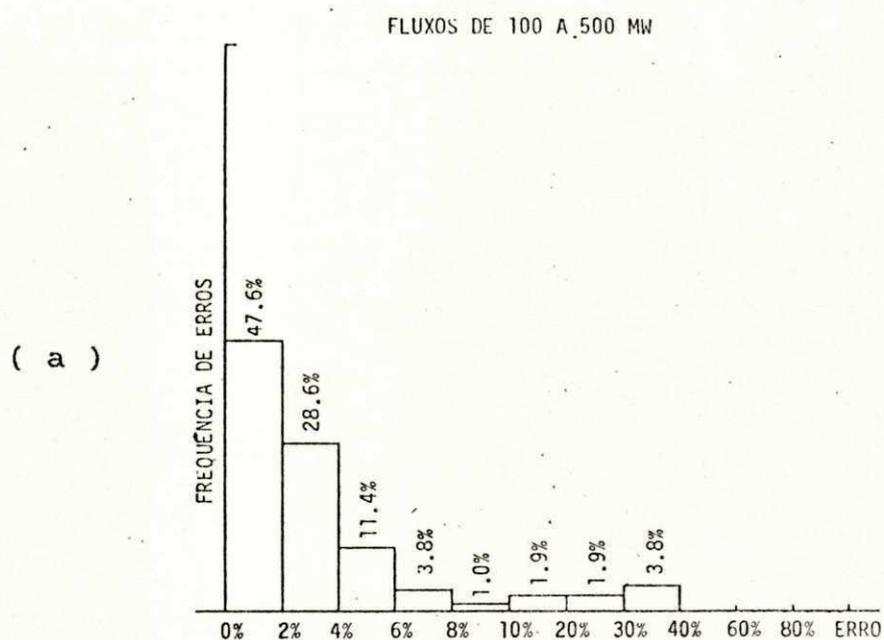


Figura 4.26 - Comparação entre o MODELO DC com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.

( a ) Fluxos de 100 a 500 MW

( b ) Fluxos superiores a 500 MW

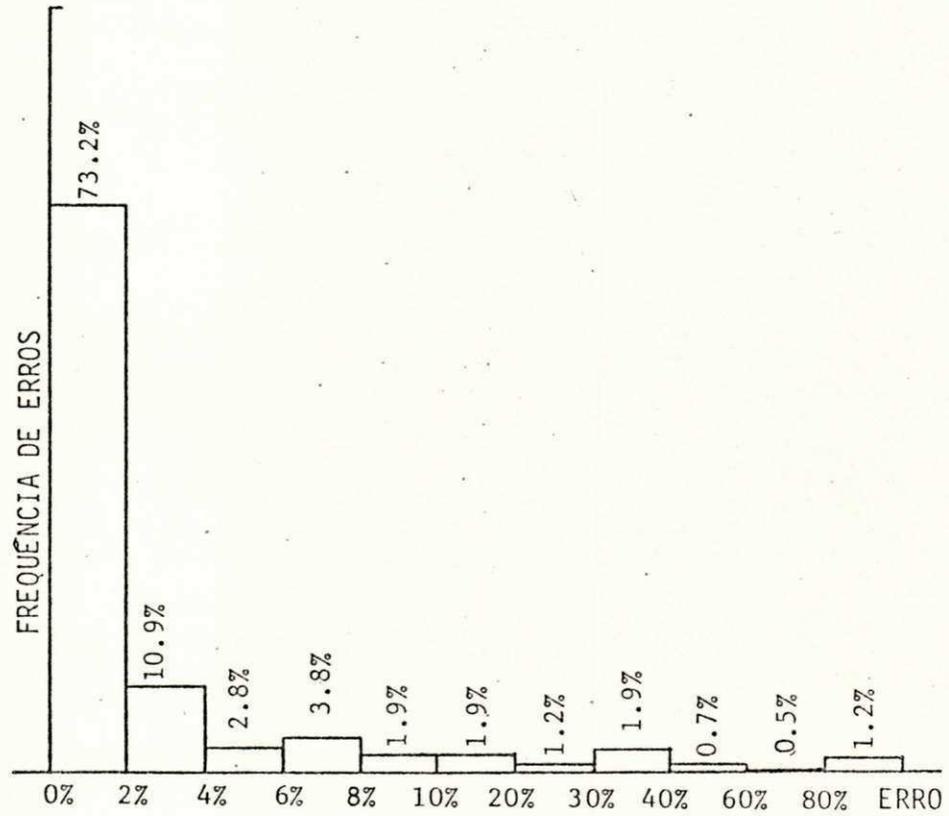


Figura 4.27 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras considerando todos os fluxos.

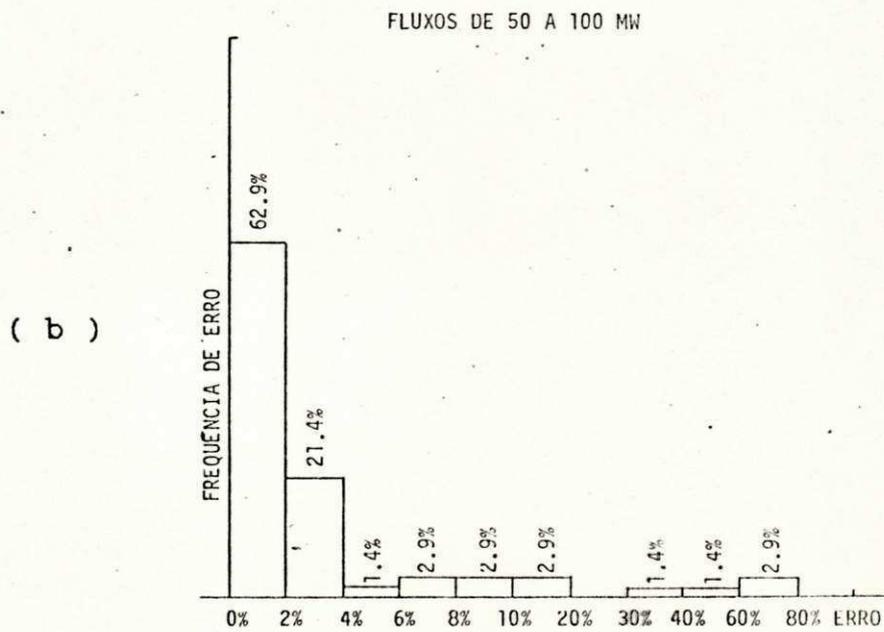
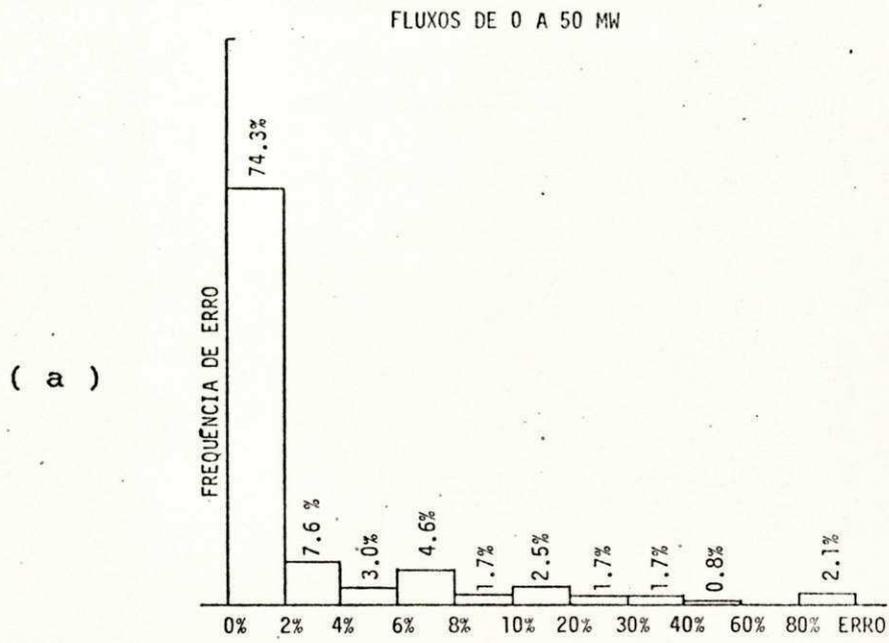


Figura 4.28 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.

( a ) Fluxos de 0 a 50 MW

( b ) Fluxos de 50 a 100 MW

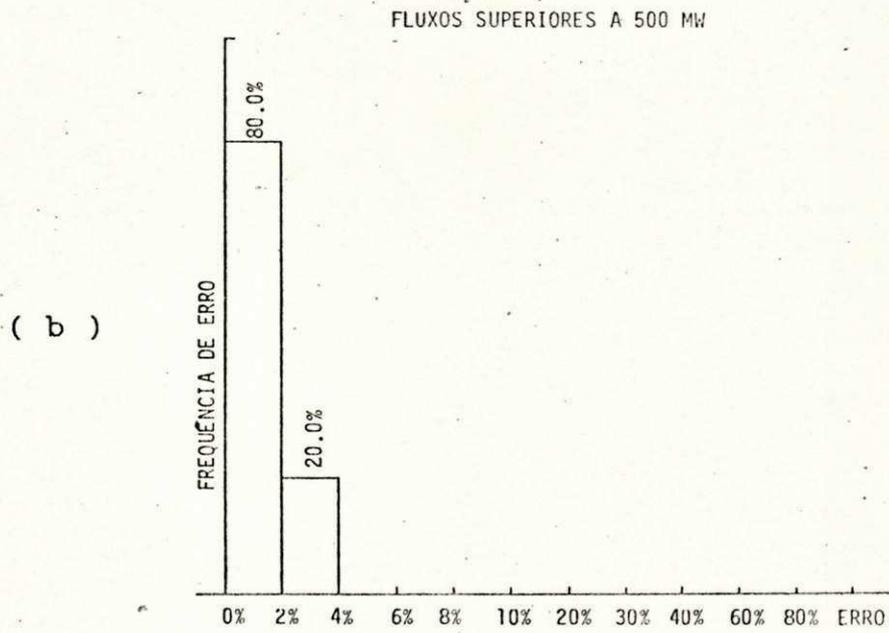
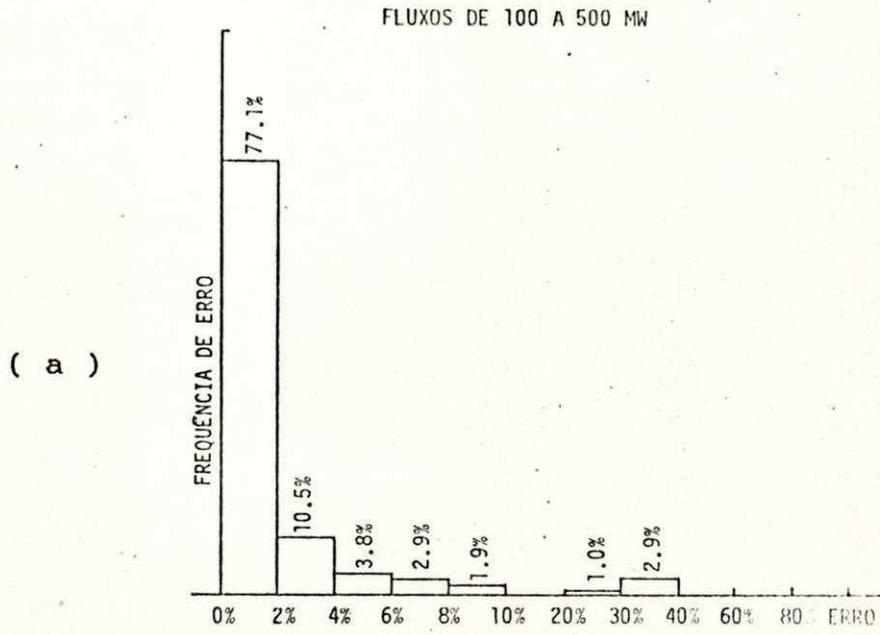


Figura 4.29 - Comparação entre o MODELO DC DUPLO com inclusão de perdas e os resultados do PECO/AC para o sistema regional de 248 barras.

( a ) Fluxos de 100 a 500 MW

( b ) Fluxos superiores a 500 MW

### 4.3 Quanto ao tempo de execução

O tempo de execução dos programas descritos no capítulo 3, utilizando o computador IBM/4341 é mostrado na tabela abaixo.

Modelo	S I S T E M A		
	14 barras	30 barras	248 barras
DC simples	1.13 s	2.09 s	17.18 s
DC DUPLO	1.26 s	2.16 s	18.50 s
DC c/perdas estimadas	1.20 s	2.12 s	17.64 s
DC DUPLO com perdas estim.	1.27 s	2.25 s	18.60 s
AC do progr. da PECO	2.73 s	3.37 s	23.09 s

Observa-se que o tempo de execução dos programas com os modelos linearizados são menores que o tempo de simulação utilizando o programa da PECO para a solução completa (modelo AC). Todavia, não há uma redução substancial no tempo de execução. Este fato parece a primeira vista contradizer as expectativas quanto a rapidez do fluxo de carga linearizado. Entretanto, deve-se mencionar que os programas desenvolvidos foram dotados de recursos extras para o tratamento dos dados de entrada e confecção dos relatórios de saída, e que em muitas aplicações do fluxo DC estes recursos não são necessários. A eliminação dos esfor-

ços adicionais de classificação dos dados de entrada, renumeração das barras e a emissão de relatórios simplificados, fará com que a diferença entre o tempo de simulação com os modelos linearizados e o modelo AC seja mais acentuada.

## 5. ANÁLISE DE CONTIGÊNCIAS

### 5.1 Introdução

A análise de contingência consiste em determinar os fluxos de potência no sistema em regime permanente quando a sua configuração é alterada pela remoção ou adição de algum equipamento, ou linha de transmissão. O seu objetivo é a verificação dos limites de operação do sistema para que em caso de violação novas decisões sejam tomadas.

Nos estudos de planejamento, onde é feita a análise do sistema em regime de contingência para várias configurações, necessita-se de um processo rápido para determinação do novo ponto de operação do sistema. A obtenção deste novo ponto de operação pode ser feita partindo-se do estado inicial da rede já obtido e na seção seguinte será apresentado um método com esta característica considerando o modelo linearizado para as equações do fluxo de carga.

## 5.2 Método da compensação [5]

O teorema da compensação estabelece que qualquer alteração no valor da admitância de um ramo de um circuito elétrico pode ser representada por uma fonte de corrente de valor apropriado conectada entre os nós terminais da admitância.

Para a aplicação deste teorema ao estudo de contingências, considere-se o ramo genérico  $i-j$  de uma rede modelada pela equação  $[B]\bar{\theta}=\bar{P}$  mostrada na figura 5.1a. Qualquer alteração no valor da susceptância do ramo  $i-j$  pode ser feita conectando-se em paralelo a ele um elemento fictício de susceptância  $b_{ij}$  de tal forma que a associação deles resulte no valor desejado para a susceptância do ramo como mostrado na figura 5.1b.

Note-se que a introdução do elemento fictício altera os elementos da matriz  $[B]$ , o que exigiria a sua reinversão ou refatoração para a determinação do novo estado da rede. Entretanto, ao se representar a introdução deste elemento por fontes de corrente, como mostrado na figura 5.1c, apenas o vetor de injeções nodais sofre modificações e a solução para a rede modificada pode ser obtida com um menor esforço a partir dos fatores da matriz  $[B]$  determinados na configuração básica.

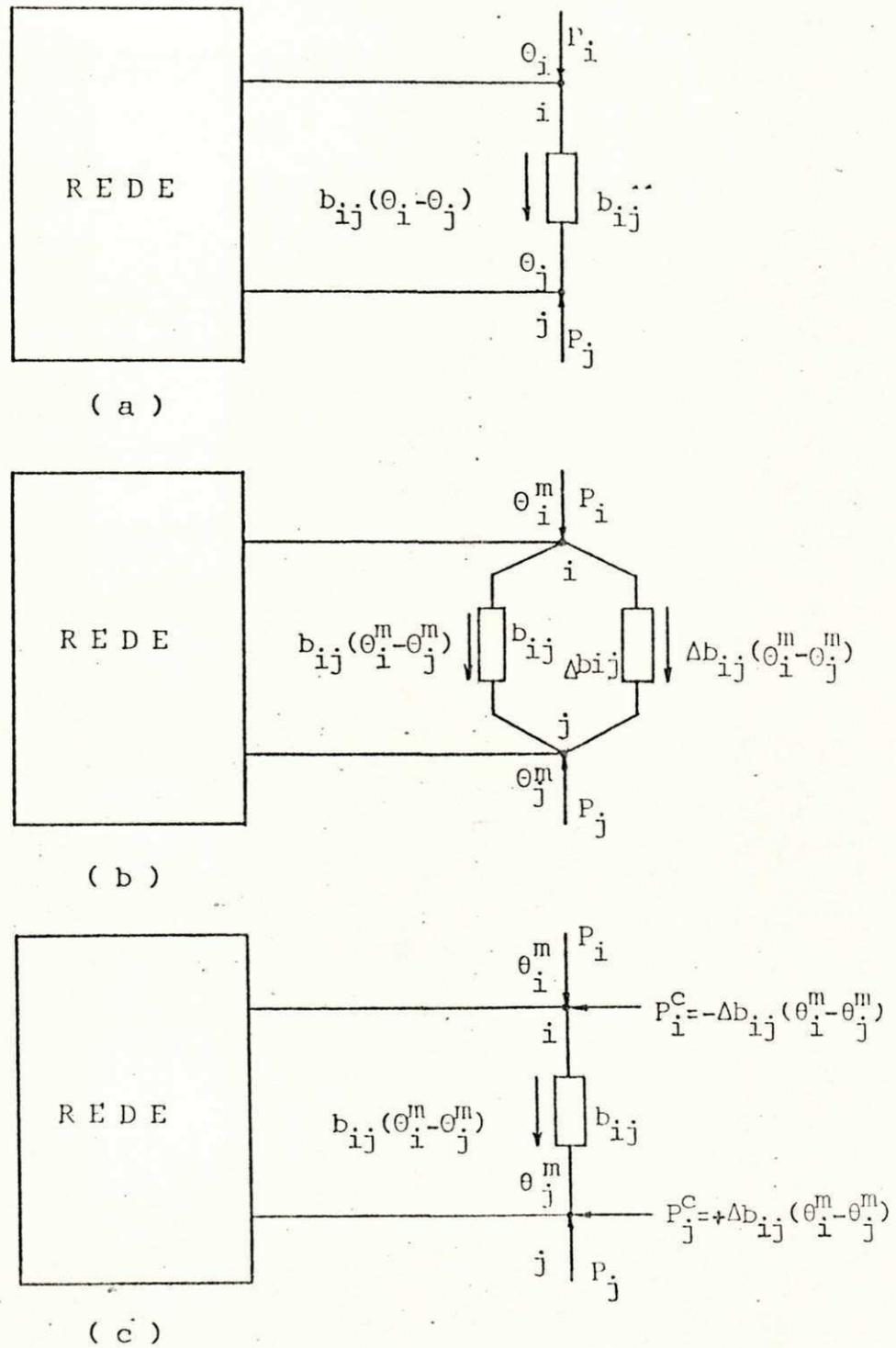


Figura 5.1 Método da compensação.

- ( a ) Situação inicial
- ( b ) Situação final
- ( c ) Situação final compensada

O cálculo das injeções a serem introduzidas nos nós terminais do elemento considerado é feito a partir do circuito equivalente da rede mostrada em 5.1c cuja equação é:

$$[B] \bar{\theta}^m = \bar{P} + \bar{P}^c \quad ( 5.1 )$$

Onde,  $[B]$  - matriz susceptância da rede

$\bar{\theta}^m$  - solução da rede modificada

$\bar{P}$  - Vetor de injeções nodais na situação inicial

$\bar{P}^c$  - injeções compensadoras

Da equação 5.1

$$\bar{\theta}^m = [B]^{-1} \bar{P} + [B]^{-1} \bar{P}^c$$

Sendo a solução no caso básico dado por  $\bar{\theta} = [B]^{-1} \bar{P}$  tem-se

$$\bar{\theta}^m = \bar{\theta} + [B]^{-1} \bar{P}^c \quad ( 5.2 )$$

O vetor  $\bar{P}^c$  é definido como:

$$\bar{P}^c = [ 0 \dots P_i^c \dots P_j^c \dots 0 ]^t$$

ou de outra forma

$$\bar{P}^c = P_i^c [ 0 \dots +1 \dots -1 \dots 0 ]^t$$

$\begin{matrix} i & & j \end{matrix}$

assim,

$$\begin{aligned} [B]^{-1} \bar{P}^c &= P_i^c [B]^{-1} [ 0 \dots +1 \dots -1 \dots 0 ]^t \\ &= P_i^c \bar{X}^{ij} \end{aligned} \quad ( 5.3 )$$

Onde  $\bar{X}^{ij}$  é um vetor cujos elementos são a diferença entre

os elementos das colunas  $i$  e  $j$  da inversa da matriz  $[B]$ . Este vetor pode ser determinado através da solução do sistema:

$$[B] \bar{X}^{ij} = [ 0 \dots +1 \dots -1 \dots 0 ]^t$$

$\begin{matrix} i & & j \end{matrix}$

A solução deste sistema, e a conseqüente obtenção de  $\bar{X}^{ij}$ , é enormemente simplificada uma vez que já se conhecem os fatores da matriz  $[B]$  utilizados na solução do caso básico.

Substituindo a eq. 5.3 na eq. 5.2

$$\bar{\theta}^m = \bar{\theta} + P_i^c \bar{X}^{ij} \quad ( 5.4 )$$

Explicitando a  $i$ -ésima e  $j$ -ésima linhas da equação 5.4 resulta

$$\theta_i^m = \theta_i + P_i^c X_i^{ij} \quad ( 5.5a )$$

$$\theta_j^m = \theta_j + P_i^c X_j^{ij} \quad ( 5.5b )$$

Subtraindo a eq. 5.5b da eq. 5.5a temos

$$(\theta_i^m - \theta_j^m) = (\theta_i - \theta_j) + P_i^c (X_i^{ij} - X_j^{ij}) \quad ( 5.6 )$$

Substituindo  $(\theta_i^m - \theta_j^m) = -P_i^c / \Delta b_{ij}$  na eq. 5.6 e resolvendo-a para  $P_i^c$  obtém-se

$$P_i^c = -(\theta_i - \theta_j) / d_{ij} \quad ( 5.7 )$$

Onde,

$$d_{ij} = 1/\Delta b_{ij} + (X_i^{ij} - X_j^{ij})$$

Substituindo a eq. 5.7 na eq. 5.4

$$\bar{\theta}^m = \bar{\theta} - (\theta_i - \theta_j) \cdot d_{ij}^{-1} \bar{X}^{ij} \quad (5.8)$$

A equação 5.8 mostra que a solução para a rede modificada ( $\bar{\theta}^m$ ) pode ser obtida diretamente da solução do caso básico ( $\bar{\theta}$ ) e da diferença entre as colunas  $i$  e  $j$  da inversa da matriz [B].

Pode-se estender este método para o caso onde ocorrem alterações simultâneas em mais de um elemento da rede. Considere-se o caso em que a susceptância do ramo  $i-j$  e a do ramo  $k-l$  são modificadas simultaneamente, como mostrado na fig 5.2 na situação final com as injeções compensadoras indicadas.

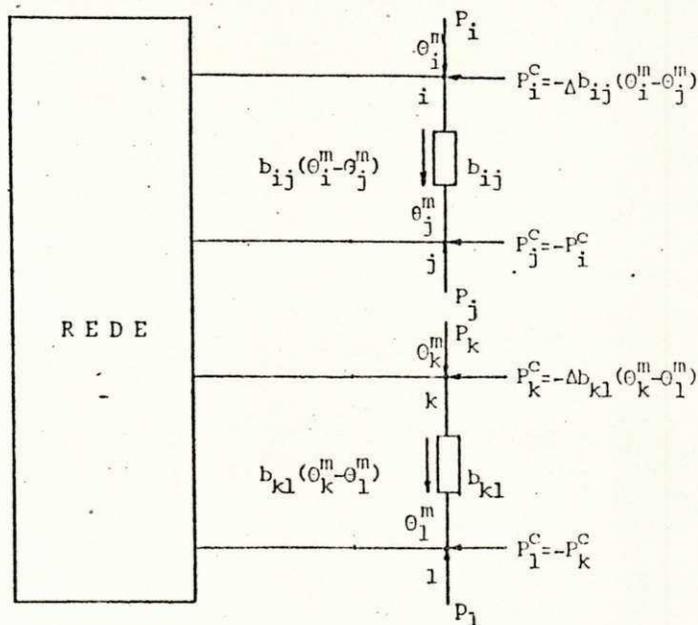


Figura 5.2. Método da compensação para múltiplas alterações na rede.

Nesta situação o vetor de injeções compensadoras é dado por:

$$P^C = P_i^C [ 0 \dots +1 \dots -1 \dots 0 ]^t + P_k^C [ 0 \dots +1 \dots -1 \dots 0 ]^t \quad ( 5.9 )$$

Substituindo a eq. 5.9 na eq. 5.1 e seguindo o mesmo processo que conduziu à eq. 5.4, obtêm-se

$$\bar{\theta}^m = \bar{\theta} + P_i^C \bar{X}^{ij} + P_k^C \bar{X}^{kl} \quad ( 5.10 )$$

Explicitando as linhas i, j, k e l da equação 5.10

$$\theta_i^m = \theta_i + P_i^C X_i^{ij} + P_k^C X_i^{kl} \quad ( 5.11a )$$

$$\theta_j^m = \theta_j + P_i^C X_j^{ij} + P_k^C X_j^{kl} \quad ( 5.11b )$$

$$\theta_k^m = \theta_k + P_i^C X_k^{ij} + P_k^C X_k^{kl} \quad ( 5.11c )$$

$$\theta_l^m = \theta_l + P_i^C X_l^{ij} + P_k^C X_l^{kl} \quad ( 5.11d )$$

Subtraindo a equação 5.11b da equação 5.11a e sabendo que  $P_i^C = -\Delta b_{ij}(\theta_i^m - \theta_j^m)$  obtém-se

$$P_i^C d_{ij} + P_k^C a_{kl} = -(\theta_i - \theta_j) \quad ( 5.12 )$$

Onde:

$$d_{ij} = 1/\Delta b_{ij} + (X_i^{ij} - X_j^{ij})$$

$$a_{kl} = X_i^{kl} - X_j^{kl}$$

Fazendo o mesmo para as equações 5.11c e 5.11d com  $P_k^C = -\Delta b_{kl}(\theta_k^m - \theta_l^m)$  tem-se,

$$P_i^C a_{ij} + P_k^C d_{kl} = -(\theta_k - \theta_l) \quad ( 5.13 )$$

Sendo:

$$d_{kl} = 1/\Delta b_{kl} + (X_k^{kl} - X_l^{kl})$$

$$a_{ij} = X_k^{ij} - X_l^{ij}$$

As equações 5.12 e 5.13 podem ser escritas na forma matricial

$$\begin{bmatrix} d_{ij} & a_{kl} \\ a_{ij} & d_{kl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i^C \\ P_k^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\theta_i - \theta_j) \\ -(\theta_k - \theta_l) \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

As injeções  $P_i^C$  e  $P_k^C$  podem ser obtidas solucionando-se o sistema de equações 5.14 e seus valores levados à equação 5.10 para obtenção do novo estado da rede.

Este processo pode ser resumido nos seguintes passos:

1 - Solucionar o sistema de equações  $[B]\bar{X}^{ij} = \bar{b}$  sendo o vetor  $\bar{b}$  definido como:

$$b_k = +1 \quad p/k = i$$

$$= -1 \quad p/k = j$$

$$= 0 \quad p/k \neq i \text{ e } k \neq j$$

o que permite obter a diferença entre as colunas  $i$  e  $j$  da inversa da matriz  $[B]$ . Este passo deve ser repetido para tantos ramos quanto se deseje alterar simultaneamente.

2 - Determinar as injeções compensadoras nos nós

terminais dos ramos modificados, através da solução do sistema de ordem  $m$ , onde  $m$  é o número de alterações simultâneas. A matriz dos coeficientes é determinada através de operações elementares entre as componentes dos vetores obtidos no passo anterior, e o vetor segundo membro a partir da solução no caso base.

- 3 - Obter a nova solução, substituindo as injeções encontradas no passo anterior na equação para a rede modificada do tipo 5.10.

### 5.3 Verificação do desempenho do método da compensação

O desempenho do método pode ser avaliado pelo tempo de processamento requerido para a determinação do novo estado da rede, uma vez que a área de armazenamento adicional para sua implementação é insignificante quando comparada à área total necessária para a solução do fluxo de carga linearizado.

O método foi aplicado na obtenção do estado final da rede, após a ocorrência de 2, 4, 6, 8 e 10 alterações simultâneas, nos sistemas testes de 14 e 30 barras e no sistema regional de 248 barras cujos dados são apresentados no apêndice B. O tempo de processamento para estes casos, utilizando o microcomputador NEXUS 1600, são mostrados nas figuras 5.3a, 5.3b e 5.4 .

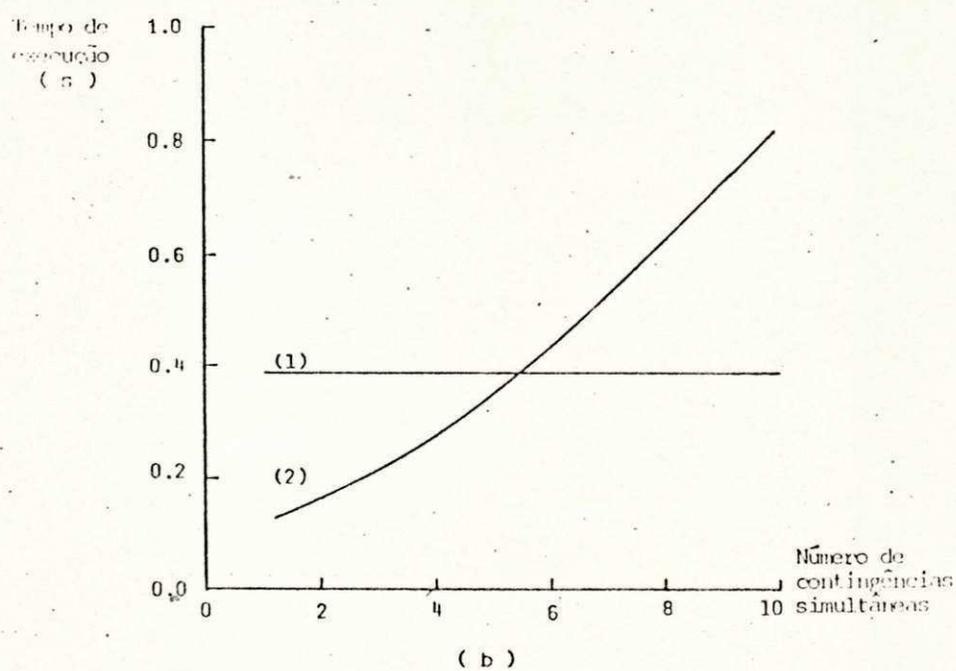
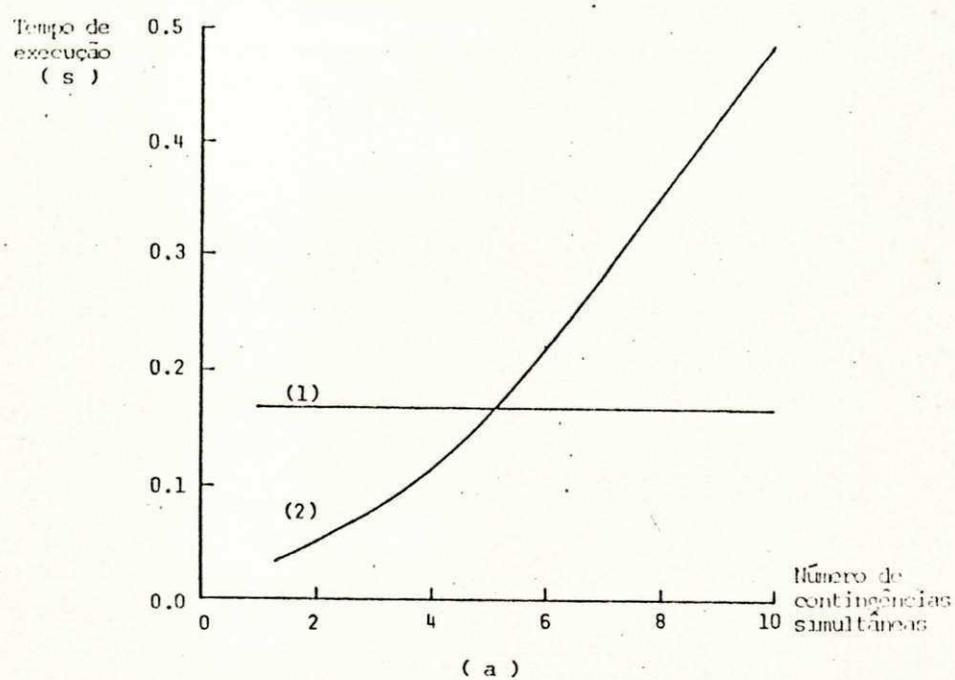


Figura 5.3 Desempenho do método da compensação

- ( 1 ) Utilizando a refatoração da matriz [B]
- ( 2 ) Utilizando o método da compensação
- ( a ) Para o sistema teste de 14 barras
- ( b ) Para o sistema teste de 30 barras

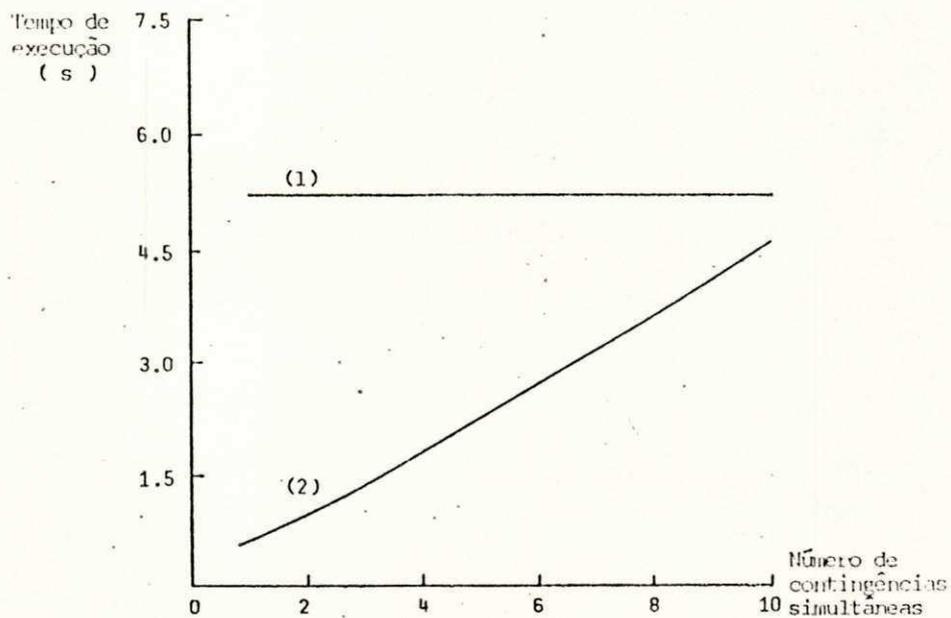


Figura 5.4 Desempenho do método da compensação para o sistema regional de 248 barras.

- ( 1 ) Utilizando a refatoração da matriz [B]  
 ( 2 ) Utilizando o método da compensação

Na solução das equações do fluxo de carga linearizado para sistemas de potência com grande número de barras e elevado grau de esparsidade, o maior esforço de cálculo é dirigido à fatoração da matriz susceptância, concluída a sua fatoração, a solução para determinado vetor de injeções nodais pode ser obtido com um esforço bastante reduzido. Portanto, no caso de alterações simples na rede, onde as injeções compensadoras são obtidas diretamente como mostra a equação 5.7, o método da compensação é bastante vantajo-

so. Entretanto quando há alterações simultâneas, a determinação das injeções envolve a solução de um sistema de equações que, embora seja de ordem bem inferior ao número de barras do sistema e sua matriz de coeficientes seja simétrica, o esforço necessário cresce com o cubo do número de alterações e torna o método da compensação menos eficiente como mostra as figuras 5.3a, 5.3b, 5.4a e 5.4b.

## 6. CONCLUSOES

Este capítulo relaciona as principais conclusões obtidas no decorrer deste trabalho.

### 6.1 Sobre os modelos linearizados:

- O MODELO DC sem inclusão de perdas é o menos preciso enquanto que o MODELO DC DUPLO com inclusão de perdas na primeira iteração é o mais preciso.
- O MODELO DC DUPLO incluindo a estimativa de perdas na primeira iteração, apresenta-se como uma alternativa bastante atrativa para diversos tipos de estudos onde o tempo de simulação seja fator determinante e não se exija uma grande precisão nos cálculos da distribuição dos fluxos de potência no sistema.
- Em todos os modelos analisados, a incidência de erros maiores está concentrada nas linhas com baixo fluxo, que em geral não necessitam de grande atenção.

- Na solução dos modelos linearizados, os métodos diretos são mais eficientes que os métodos iterativos com respeito a precisão e ao tempo de simulação.

## 6.2 Sobre a simulação em microcomputadores:

Objetivando analisar a utilização de microcomputadores na simulação estática de sistemas de potência, os programas foram implementados no computador IBM/4341 e no microcomputador NEXUS 1600 da Scopus (compatível com IBM-PC). Podendo-se concluir:

- A precisão numérica do microcomputador utilizado, dotado de processador de ponto flutuante 8087, é superior a do computador IBM/4341.
- O tempo de simulação no microcomputador é relativamente pequeno. É importante notar que mesmo este tempo sendo superior ao tempo de processamento em máquinas do tipo IBM/4341, isto torna-se irrelevante devido a natural facilidade de acesso aos microcomputadores.
- Atualmente os microcomputadores possuem uma capacidade de memória suficiente para muitas aplicações. No equipamento examinado, de 256 Kbytes, foram implementados programas para a simulação de até 500 barras e 1000 linhas.

- Do exposto, fica evidenciado que a utilização de microcomputadores do tipo IBM-PC, e seus compatíveis, na simulação de sistemas de potência apresenta-se como uma alternativa tecnicamente adequada e bastante econômica.

### 6.3 Sobre os métodos para análise de contingências:

Complementando o trabalho foram desenvolvidos dois sub-programas de análise de contingências: um deles efetuando-se a refatoração da matriz susceptância e o outro com base no teorema da compensação. Dos resultados obtidos com os dois métodos conclui-se que:

- Ambos apresentam os mesmos resultados numéricos.
- Para o caso de contingências simples ou para um pequeno número de alterações simultâneas na rede, que é o caso mais frequente, o método da compensação apresenta um tempo de processamento inferior ao método que utiliza a refatoração da matriz susceptância.

A P E N D I C E - A

## METODO DA BIFATORAÇÃO

Um sistema de  $n$  equações pode ser expresso em notação matricial como:

$$[A] \bar{X} = \bar{b} \quad ( A.1 )$$

onde:

[A] - Matriz dos coeficientes de ordem  $n \times n$

$\bar{X}$  - Vetor das  $n$  incógnitas dos sistema

$\bar{b}$  - Vetor segundo membro de ordem  $n$

Podendo sua solução ser obtida diretamente de:

$$\bar{X} = [A]^{-1} \bar{b} \quad ( A.2 )$$

Embora a inversão da matriz [A] possibilite a solução do sistema para vários vetores segundo membro, o que é necessário em muitas aplicações práticas, a sua determinação requer um número de operações de aproximadamente  $n^3$ , o que torna este processo desaconselhável, notadamente para sistemas de ordem elevada. Dois métodos tem sido usualmen-

te aplicados na solução de sistemas para diferentes vetores segundo membro, sem a determinação da inversa da matriz dos coeficientes. Em um destes métodos a matriz  $[A]$  é fatorada no produto de duas matrizes triangulares por um processo comumente conhecido como "decomposição triangular". No outro método, a matriz inversa é fatorada no produto de  $n$  matrizes conhecido como "fatores da inversa", em ambos, o número de operações necessárias são reduzidas a  $n^3/3$ .

O método da bifatoração combina as principais características destes dois métodos, e consiste na determinação de  $2n$  matrizes elementares  $[L]^{(k)}$  e  $[R]^{(k)}$ , de forma a reduzir a matriz original  $[A]=[A]^{(0)}$ , através de  $n$  transformações do tipo  $[L]^{(k)}[A]^{(k-1)}[R]^{(k)}$ , em uma matriz identidade de ordem  $n$ , como mostrado abaixo.

$$\begin{aligned} [A]^{(0)} &= [A] \\ [A]^{(1)} &= [L]^{(1)}[A]^{(0)}[R]^{(1)} \\ [A]^{(2)} &= [L]^{(2)}[A]^{(1)}[R]^{(2)} \\ &\dots\dots\dots \\ [A]^{(n)} &= [L]^{(n)}[A]^{(n-1)}[R]^{(n)} = [I] \end{aligned}$$

As transformações sucessivas sofridas pela matriz  $[A]$  podem ser sintetizadas pela equação:

$$\begin{aligned} [L]^{(n)}[L]^{(n-1)}\dots[L]^{(2)}[L]^{(1)}[A][R]^{(1)}[R]^{(2)}\dots[R]^{(n-1)}[R]^{(n)} \\ = [I] \end{aligned} \quad (A.3)$$

Pré-multiplicando sucessivamente a equação A.3 pela inversa de  $[L]^{(n)}, [L]^{(n-1)}, \dots, [L]^{(2)}, [L]^{(1)}$ , resulta:

$$[A][R]^{(1)}[R]^{(2)} \dots [R]^{(n-1)}[R]^{(n)} = ([L]^{(1)})^{-1}([L]^{(2)})^{-1} \dots ([L]^{(n-1)})^{-1}([L]^{(n)})^{-1} \quad (A.4)$$

Pós-multiplicando a equação A.4 por  $[L]^{(n)}, [L]^{(n-1)}, \dots, [L]^{(2)}$  e  $[L]^{(1)}$  de forma consecutiva, tem-se:

$$[A][R]^{(1)}[R]^{(2)} \dots [R]^{(n-1)}[R]^{(n)}[L]^{(n)}[L]^{(n-1)} \dots [L]^{(2)}[L]^{(1)} = [I] \quad (A.5)$$

Pré-multiplicando a equação A.5 por  $[A]^{-1}$ , tem-se finalmente que:

$$[R]^{(1)}[R]^{(2)} \dots [R]^{(n-1)}[R]^{(n)}[L]^{(n)}[L]^{(n-1)} \dots [L]^{(2)}[L]^{(1)} = [A]^{-1} \quad (A.6)$$

Ou seja, a inversa da matriz dos coeficientes é determinada implicitamente pelo produto das  $2n$  matrizes elementares na sequência indicada pela equação A.6. Portanto, a solução do sistema de equações  $[A]\bar{X}=\bar{b}$  pode ser expressa como:

$$\bar{X} = [A]^{-1} \bar{b}$$

$$\bar{X} = [R]^{(1)}[R]^{(2)} \dots [R]^{(n-1)}[R]^{(n)}[L]^{(n)}[L]^{(n-1)} \dots [L]^{(2)}[L]^{(1)}\bar{b}$$

Desta forma, a determinação do vetor  $\bar{X}$  pode ser feita a partir do produto sucessivo de uma matriz elementar por um vetor, sendo este cálculo enormemente simplificado já que nestas matrizes os elementos não nulos, ou constituem uma linha ou uma coluna ou são iguais a 1.





matriz dos coeficientes em cada passo da redução, o método torna-se especialmente vantajoso para solução de matrizes esparsas com esta característica, ficando a manutenção da esparsidade dependente do critério de ordenação escolhido [4].

No caso em que a matriz dos coeficientes não possui simetria, é mais vantajoso sob o aspecto computacional, decompor as matrizes elementares  $[L]^{(k)}$  no produto de uma matriz diagonal  $[D]^{(k)}$  por uma matriz modificada  $[C]^{(k)}$ :

$$[L]^{(k)} = [C]^{(k)} [D]^{(k)}$$

Sendo todos os elementos da diagonal de  $[D]^{(k)}$  iguais a 1, exceto o termo:

$$d_{kk}^{(k)} = 1 / a_{kk}^{(k-1)} = l_{kk}^{(k)}$$

E, a matriz modificada  $[C]^{(k)}$  de estrutura idêntica a  $[L]^{(k)}$  sendo a coluna k é definida por:

$$[ 0 \dots 0 \quad 1 \quad c_{k+1,k}^{(k)} \quad c_{k+2,k}^{(k)} \quad \dots \quad c_{n,k}^{(k)} ]^t$$

$$\text{com: } c_{ik}^{(k)} = - a_{ik}^{(k-1)} = l_{ik}^{(k)} / l_{kk}^{(k)} \quad i = (k+1), \dots, n.$$

É apresentado a seguir a implementação computacional deste método de forma simplificada, podendo ser encontrada na referência<sup>[15]</sup> uma implementação mais elaborada, levando em consideração a esparsidade e utilizando uma estratégia de ordenação adequada a maior parte das aplicações.

C SUB-ROTINA PARA SOLUCIONAR EQUACOES ALGEBRICAS SI-  
 C MULTANEAS COM COEFICIENTES REAIS UTILIZANDO O METO-  
 C DO DA BIFATORACAO, A SUA CHAMADA E A SEGUINTE:

C CALL BIFATO ( N, A, B )

C SENDO:

C N - NUMERO DE EQUACOES A RESOLVER

C A - VETOR REAL DE DUPLA INDEXACAO E DIMENSAO N CON-  
 C TENDO OS COEFICIENTES DAS ICIGNITAS

C B - VETOR REAL DE INDEXACAO SIMPLES E DE DIMENSAO N  
 C CONTENDO OS TERMOS INDEPENDENTES

C APOS RETORNAR DE "BIFATO", "A" CONTEM OS ELEMENTOS  
 C DAS MATRIZES ELEMENTARES L(K) E R(K), E "B" CONTEM  
 C A SOLUCAO DO SISTEMA.

C A INSTRUCAO: CALL BISUBS ( N, A, B )

C FORNECE A SOLUCAO PARA UM NOVO VETOR SEGUNDO MEMBRO  
 C SEM A NECESSIDADE DE OBTER NOVA FATORACAO DE "A"

C SUBROUTINE BIFATO ( N, A, B )  
 C DIMENSION A(N,N), B(N)  
 C KMAX = N-1  
 C DO 3 K = 1, KMAX  
 C A(K,K) = 1./A(K,K)  
 C----- FATORES L(K)  
 C IMIN = K + 1  
 C DO 1 I = IMIN, N  
 1 A(I,K) = - A(I,K) \* A(K,K)  
 C----- MATRIZ REDUZIDA A(K)  
 C DO 2 I = IMIN, N  
 C DO 2 J = IMIN, N  
 2 A(I,J) = A(I,J) + A(I,K)\*A(K,J)  
 C----- FATORES R(K)  
 C DO 3 J = IMIN, N  
 3 A(K,J) = - A(K,J) \* A(K,K)  
 C A(N,N) = 1./A(N,N)  
 C ENTRY BISUBS ( N, A, B )  
 C KMAX = N - 1  
 C----- PRODUTO L(N)L(N-1)...L(2)L(1)B  
 C DO 5 K = 1, KMAX  
 C IMIN = K + 1  
 C DO 4 I = IMIN, N  
 4 B(I) = A(I,K) \* B(K) + B(I)  
 5 B(K) = A(K,K) \* B(K)  
 C B(N) = A(N,N) \* B(N)  
 C----- PRODUTO R(1)R(2)...R(N-1)B  
 C DO 6 K = KMAX, 1, -1  
 C IMIN = K + 1  
 C DO 6 I = IMIN, N  
 6 B(K) = B(K) + A (K,I) \* B(I)  
 C RETURN  
 C END

## A P E N D I C E - B

### DADOS DOS SISTEMAS UTILIZADOS PARA TESTE

Neste apêndice são apresentados os dados dos sistemas de 14, 30, e 248 barras, que foram utilizados para a análise do desempenho dos métodos do fluxo de carga linearizado. Os dados são apresentados da seguinte maneira:

- ( i ) Dados de barra
- ( ii ) Dados de linha
- ( iii ) Dados dos transformadores
- ( iv ) Capacitores/reatores em derivação
- ( v ) Dados das barras de tensão controlada

B.1 SISTEMA TESTE DE 14 BARRAS

## D A D O S D E B A R R A

BARRA NUM.	GERAÇÃO		CARGA	
	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	40.00	0.00	21.70	12.70
3	0.00	0.00	94.20	19.00
4	0.00	0.00	47.80	-3.90
5	0.00	0.00	7.60	1.60
6	0.00	0.00	11.20	7.50
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	29.50	16.60
10	0.00	0.00	9.00	5.80
11	0.00	0.00	3.50	1.80
12	0.00	0.00	6.10	1.60
13	0.00	0.00	13.50	5.80
14	0.00	0.00	14.90	5.00

## D A D O S D E L I N H A

LINHA NUM.	ENTRE AS BARRAS	IMPEDANCIA DA LINHA		SUSCEPTANCIA ( PU )
		R (PU)	X (PU)	
1	1 - 2	0.01938	0.05917	0.05280
2	2 - 3	0.04699	0.19797	0.04380
3	2 - 4	0.05811	0.17632	0.03740
4	1 - 5	0.05403	0.22304	0.04920
5	2 - 5	0.05695	0.17388	0.03400
6	3 - 4	0.06701	0.17103	0.03460
7	4 - 5	0.01335	0.04211	0.01280
8	5 - 6	0.00000	0.25202	0.00000
9	4 - 7	0.00000	0.20912	0.00000
10	7 - 8	0.00000	0.17615	0.00000
11	4 - 9	0.00000	0.55618	0.00000
12	7 - 9	0.00000	0.11001	0.00000
13	9 - 10	0.03181	0.08450	0.00000
14	6 - 11	0.09498	0.19890	0.00000
15	6 - 12	0.12291	0.25581	0.00000
16	6 - 13	0.06615	0.13027	0.00000
17	9 - 14	0.12711	0.27038	0.00000
18	10 - 11	0.08205	0.19207	0.00000
19	12 - 13	0.22092	0.19988	0.00000
20	13 - 14	0.17093	0.34802	0.00000

## DADOS DOS TRANSFORMADORES

TRANSFORMADOR NUMERO	ENTRE AS BARRAS	TAP
1	5 - 6	0.932
2	4 - 7	0.978
3	4 - 9	0.969

## CAPACITORES/RETORES EM DERIVAÇÃO

BARRA NUM.	CAPACITOR ( MVAR )	REATOR (MVAR)
9	19.00	

## BARRAS DE TENSÃO CONTROLADA

BARRA NUM.	MÓDULO DA TENSÃO (PU)	LIMITES DA POT. REATIVA (MVAR)	
		MINIMO	MAXIMO
2	1.0450	-40.0	50.0
3	1.0100	0.0	40.0
6	1.0700	-6.0	24.0
8	1.0900	-6.0	24.0

B.2 SISTEMA TESTE DE 30 BARRAS

## D A D O S   D E   B A R R A

BARRA NUM.	GERAÇÃO		CARGA	
	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	57.56	0.00	21.70	12.70
3	0.00	0.00	2.40	1.20
4	0.00	0.00	7.60	1.60
5	24.56	0.00	94.20	19.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	22.80	10.90
8	35.00	0.00	30.00	30.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	5.80	2.00
11	17.93	0.00	0.00	0.00
12	0.00	0.00	11.20	7.50
13	16.91	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	6.20	1.60
15	0.00	0.00	8.20	2.50
16	0.00	0.00	3.50	1.80
17	0.00	0.00	9.00	5.80
18	0.00	0.00	3.20	0.90
19	0.00	0.00	9.50	3.40
20	0.00	0.00	2.20	0.70
21	0.00	0.00	17.50	11.20
22	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	3.20	1.60
24	0.00	0.00	8.70	6.70
25	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.00	0.00	3.50	2.30
27	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	2.40	0.90
30	0.00	0.00	10.60	1.90

## D A D O S D E L I N H A

LINHA NUM.	ENTRE AS BARRAS	IMPEDANCIA DA LINHA		SUSCEPTANCIA ( PU )
		R (PU)	X (PU)	
1	1 - 2	0.01920	0.05750	0.05280
2	1 - 3	0.04520	0.18520	0.04080
3	2 - 4	0.05700	0.17370	0.03680
4	3 - 4	0.01320	0.03790	0.00840
5	2 - 5	0.04720	0.19830	0.04180
6	2 - 6	0.05810	0.17630	0.03740
7	4 - 6	0.01190	0.04140	0.00900
8	5 - 7	0.04600	0.11600	0.02040
9	6 - 7	0.02670	0.08200	0.01700
10	6 - 8	0.01200	0.04200	0.00900
11	6 - 9	0.00000	0.20800	0.00000
12	6 - 10	0.00000	0.55600	0.00000
13	9 - 11	0.00000	0.20800	0.00000
14	9 - 10	0.00000	0.11000	0.00000
15	4 - 12	0.00000	0.25600	0.00000
16	12 - 13	0.00000	0.14000	0.00000
17	12 - 14	0.12310	0.25590	0.00000
18	12 - 15	0.06620	0.13040	0.00000
19	12 - 16	0.09450	0.19870	0.00000
20	14 - 15	0.22100	0.19970	0.00000
21	16 - 17	0.08240	0.19230	0.00000
22	15 - 18	0.10730	0.21850	0.00000
23	18 - 19	0.06390	0.12920	0.00000
24	19 - 20	0.03400	0.06800	0.00000
25	10 - 20	0.09360	0.20900	0.00000
26	10 - 17	0.03240	0.08450	0.00000
27	10 - 21	0.03480	0.07490	0.00000
28	10 - 22	0.07270	0.14990	0.00000
29	21 - 22	0.01160	0.02360	0.00000
30	15 - 23	0.10000	0.20200	0.00000
31	22 - 24	0.11500	0.17900	0.00000
32	23 - 24	0.13200	0.27000	0.00000
33	24 - 25	0.18850	0.32920	0.00000
34	25 - 26	0.25440	0.38000	0.00000
35	25 - 27	0.10930	0.20870	0.00000
36	28 - 27	0.00000	0.39600	0.00000
37	27 - 29	0.21980	0.41530	0.00000
38	27 - 30	0.32020	0.60270	0.00000
39	29 - 30	0.23990	0.45330	0.00000
40	8 - 28	0.06360	0.20000	0.04280
41	6 - 28	0.01690	0.05990	0.01300

## DADOS DOS TRANSFORMADORES

TRANSFORMADOR NÚMERO	ENTRE AS BARRAS	TAP
1	6 - 9	1.015
2	6 - 10	0.963
3	4 - 12	1.013
4	28 - 27	0.958

## CAPACITORES/RETORES EM DERIVAÇÃO

BARRA NUM.	CAPACITOR ( MVAR )	REATOR (MVAR)
10	19.00	
24	4.00	

## BARRAS DE TENSÃO CONTROLADA

BARRA NUM.	MÓDULO DA TENSÃO (PU)	LIMITES DA POT. REATIVA (MVAR)	
		MAXIMO	MINIMO
2	1.0340	-20.0	60.0
5	1.0060	-15.0	62.5
8	1.0230	-15.0	50.0
11	1.0910	-10.0	40.0
13	1.0880	-15.0	45.0

B.3 SISTEMA REGIONAL DE 248 BARRAS

## D A D O S   D E   B A R R A

BARRA NUM.	GERAÇÃO		CARGA	
	ATIVA MW	REATIVA MVAR.	ATIVA MW	REATIVA MVAR
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	75.00	-2.00	0.00	0.00
5	75.00	-2.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00
7	80.00	-4.20	0.00	0.00
8	80.00	-4.20	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
10	210.00	4.69	0.00	0.00
11	210.00	4.69	0.00	0.00
12	210.00	4.69	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	18.60	0.00	0.00
15	400.00	18.40	0.00	0.00
16	400.00	18.40	0.00	0.00
17	400.00	18.40	0.00	0.00
18	400.00	18.40	0.00	0.00
19	0.00	0.00	0.00	0.00
20	161.00	-5.55	0.00	0.00
21	161.00	-5.55	0.00	0.00
22	161.00	-5.55	0.00	0.00
23	161.00	-5.55	0.00	0.00
24	161.00	-5.55	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00	0.00
26	89.50	9.96	0.00	0.00
27	89.50	9.96	0.00	0.00
28	89.50	9.96	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.00	0.00
30	245.00	7.84	0.00	0.00
31	245.00	7.84	0.00	0.00
32	245.00	7.84	0.00	0.00
33	245.00	7.84	0.00	0.00
34	245.00	7.84	0.00	0.00
35	245.00	7.84	0.00	0.00
36	33.00	-9.74	0.00	0.00
37	33.00	-9.74	0.00	0.00
38	50.00	-11.40	0.00	0.00
39	50.00	-11.40	0.00	0.00
40	271.00	30.00	0.00	0.00
41	270.00	29.90	0.00	0.00
42	270.00	29.90	0.00	0.00
43	270.00	29.90	0.00	0.00
44	270.00	29.90	0.00	0.00
45	0.00	0.00	0.00	0.00
46	3.00	-1.19	0.00	0.00
47	3.00	-1.19	0.00	0.00
48	3.00	-1.19	0.00	0.00

BARRA NUM.	GERAÇÃO		CARGA	
	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR
49	0.00	9.30	0.00	0.00
50	0.00	9.30	0.00	0.00
51	0.00	9.30	0.00	0.00
52	0.00	9.30	0.00	0.00
53	0.00	10.70	0.00	0.00
54	0.00	16.80	0.00	0.00
55	0.00	16.80	0.00	0.00
56	0.00	16.80	0.00	0.00
57	0.00	16.80	0.00	0.00
58	0.00	16.80	0.00	0.00
59	0.00	-0.10	0.00	0.00
60	0.00	-0.10	0.00	0.00
61	0.00	0.00	0.00	0.00
62	0.00	0.00	0.00	0.00
63	0.00	0.00	0.00	0.00
64	0.00	0.00	0.00	0.00
65	0.00	0.00	0.00	0.00
66	0.00	0.00	0.00	0.00
67	0.00	0.00	0.00	0.00
68	0.00	0.00	0.00	0.00
69	0.00	0.00	0.00	0.00
70	0.00	0.00	18.00	8.70
71	0.00	0.00	60.70	29.40
72	0.00	0.00	0.00	0.00
73	0.00	0.00	0.00	0.00
74	0.00	0.00	0.00	0.00
75	0.00	0.00	86.40	28.40
76	0.00	0.00	0.00	0.00
77	0.00	0.00	0.00	0.00
78	0.00	0.00	0.00	0.00
79	0.00	0.00	0.00	0.00
80	0.00	0.00	0.00	0.00
81	0.00	0.00	0.00	0.00
82	0.00	0.00	0.00	0.00
83	0.00	0.00	0.00	0.00
84	0.00	0.00	0.00	0.00
85	0.00	0.00	0.00	0.00
86	0.00	0.00	0.00	0.00
87	0.00	0.00	0.00	0.00
88	0.00	0.00	11.20	8.39
89	0.00	0.00	0.00	0.00
90	0.00	0.00	30.00	9.90
91	0.00	0.00	0.00	0.00
92	0.00	0.00	16.00	7.70
93	0.00	0.00	0.00	0.00
94	0.00	0.00	0.00	0.00
95	0.00	0.00	190.00	62.40
96	0.00	0.00	30.00	9.90
97	0.00	0.00	0.00	0.00

BARRA NUM.	GERAÇÃO		CARGA	
	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR
98	0.00	43.10	40.00	13.10
99	0.00	0.00	0.00	0.00
100	0.00	0.00	0.00	0.00
101	0.00	0.00	0.00	0.00
102	0.00	0.00	0.00	0.00
103	0.00	0.00	0.00	0.00
104	0.00	0.00	0.00	0.00
105	0.00	0.00	0.00	0.00
106	0.00	0.00	0.00	0.00
107	0.00	0.00	85.50	28.10
108	0.00	0.00	58.00	19.10
109	0.00	0.00	90.00	29.60
110	0.00	0.00	0.00	0.00
111	0.00	0.00	0.00	0.00
112	0.00	0.00	0.00	0.00
113	0.00	0.00	0.00	0.00
114	0.00	0.00	145.00	47.70
115	0.00	0.00	430.00	141.00
116	0.00	0.00	0.00	0.00
117	0.00	24.70	0.00	0.00
118	0.00	0.00	12.10	9.06
119	0.00	0.00	11.00	8.24
120	0.00	0.00	11.90	8.96
121	0.00	0.00	13.50	10.20
122	0.00	0.00	12.90	9.69
123	0.00	0.00	11.30	8.49
124	0.00	0.00	11.70	8.80
125	0.00	0.00	29.30	14.40
126	0.00	0.00	903.00	343.00
127	0.00	0.00	112.00	36.80
128	0.00	0.00	0.00	0.00
129	0.00	0.00	0.00	0.00
130	0.00	0.00	0.00	0.00
131	0.00	0.00	0.00	0.00
132	0.00	0.00	0.00	0.00
133	0.00	0.00	0.00	0.00
134	0.00	0.00	0.00	0.00
135	0.00	0.00	0.00	0.00
136	0.00	0.00	0.00	0.00
137	0.00	0.00	0.00	0.00
138	0.00	0.00	0.00	0.00
139	0.00	0.00	0.00	0.00
140	0.00	0.00	0.00	0.00
141	0.00	0.00	0.00	0.00
142	0.00	0.00	0.00	0.00
143	0.00	0.00	0.00	0.00
144	0.00	0.00	0.00	0.00
145	0.00	0.00	0.00	0.00
146	0.00	0.00	0.00	0.00

BARRA NUM.	GERAÇÃO		CARGA	
	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR
147	0.00	0.00	0.00	0.00
148	0.00	0.00	0.00	0.00
149	0.00	0.00	0.00	0.00
150	0.00	0.00	0.00	0.00
151	0.00	0.00	28.20	13.70
152	0.00	0.00	74.10	35.90
153	0.00	0.00	0.00	0.00
154	0.00	0.00	17.80	8.60
155	0.00	0.00	46.10	15.10
156	0.00	0.00	100.00	32.90
157	0.00	0.00	9.40	3.10
158	0.00	0.00	11.20	3.70
159	0.00	13.80	35.60	11.70
160	0.00	0.00	373.00	123.00
161	0.00	0.00	38.20	18.50
162	0.00	0.00	24.20	11.70
163	0.00	0.00	41.20	20.00
164	0.00	0.00	37.10	18.00
165	0.00	0.00	33.00	16.00
166	0.00	0.00	19.30	9.30
167	0.00	0.00	63.60	30.80
168	0.00	0.00	29.00	14.00
169	0.00	0.00	140.00	46.20
170	0.00	24.70	232.00	76.40
171	0.00	0.00	175.00	57.60
172	0.00	0.00	66.50	21.90
173	0.00	0.00	6.60	2.20
174	0.00	40.00	147.00	48.30
175	0.00	0.00	125.00	41.20
176	0.00	0.00	136.00	44.80
177	0.00	0.00	240.00	78.80
178	0.00	0.00	298.00	98.10
179	0.00	0.00	15.30	5.00
180	0.00	0.00	2.40	0.80
181	0.00	0.00	18.60	6.10
182	0.00	0.00	160.00	52.70
183	0.00	0.00	93.00	45.00
184	0.00	0.00	49.90	24.20
185	0.00	0.00	149.00	72.30
186	0.00	0.00	84.00	40.70
187	0.00	0.00	80.00	38.70
188	0.00	0.00	0.00	0.00
189	0.00	0.00	144.00	47.40
190	0.00	0.00	224.00	73.80
191	0.00	0.00	87.00	42.10
192	0.00	0.00	129.00	62.30
193	0.00	0.00	10.20	4.90
194	0.00	0.00	26.80	13.00
195	0.00	0.00	44.20	21.40

BARRA NUM.	GERAÇÃO		CARGA	
	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR
196	0.00	0.00	133.00	0.00
197	0.00	0.00	0.00	0.00
198	0.00	0.00	0.00	0.00
199	0.00	0.00	1.80	0.90
200	0.00	0.00	0.00	0.00
201	0.00	0.00	0.00	0.00
202	0.00	0.00	0.00	0.00
203	0.00	19.80	0.00	0.00
204	0.00	0.00	0.00	0.00
205	0.00	0.00	0.00	0.00
206	0.00	0.00	66.00	32.00
207	0.00	0.00	0.00	0.00
208	0.00	0.00	0.00	0.00
209	0.00	0.00	31.40	15.20
210	0.00	179.00	0.00	0.00
211	0.00	0.00	0.00	0.00
212	0.00	9.79	0.00	0.00
213	0.00	-1.81	0.00	0.00
214	0.00	20.00	0.00	0.00
215	0.00	0.00	0.00	0.00
216	0.00	0.00	0.00	0.00
217	0.00	0.00	0.00	0.00
218	0.00	0.00	0.00	0.00
219	0.00	0.00	0.00	0.00
220	0.00	6.88	0.00	0.00
221	0.00	0.00	0.00	0.00
222	0.00	0.00	0.00	0.00
223	0.00	0.00	0.00	0.00
224	0.00	189.00	0.00	0.00
225	0.00	0.00	0.00	0.00
226	0.00	0.00	0.00	0.00
227	0.00	10.10	60.00	29.10
228	0.00	0.00	0.00	0.00
229	0.00	30.00	0.00	0.00
230	0.00	0.00	0.00	0.00
231	0.00	0.00	0.00	0.00
232	0.00	0.00	0.00	0.00
233	0.00	0.00	0.00	0.00
234	0.00	0.00	0.00	0.00
235	0.00	65.70	0.00	0.00
236	0.00	-3.56	0.00	0.00
237	0.00	-3.45	0.00	0.00
238	0.00	14.90	33.00	10.80
239	0.00	0.00	0.00	0.00
240	0.00	0.00	0.00	0.00
241	0.00	15.30	0.00	0.00
242	0.00	0.00	0.00	0.00
243	0.00	0.00	0.00	0.00
244	0.00	0.00	0.00	0.00

BARRA NUM.	GERAÇÃO		CARGA	
	ATIVA MW	REATIVA MVAR	ATIVA MW	REATIVA MVAR
245	0.00	43.50	0.00	0.00
246	0.00	14.90	33.00	10.80
247	0.00	0.00	33.00	10.80
248	0.00	0.00	0.00	0.00

LINHA NUM.	ENTRE AS BARRAS	IMPEDANCIA DA LINHA		SUSCEPTANCIA ( PU )
		-----		
		R (PU)	X (PU)	
1	72 - 1	0.00000	0.21230	0.00000
2	72 - 2	0.00000	0.21230	0.00000
3	72 - 3	0.00000	0.20860	0.00000
4	72 - 4	0.00000	0.19560	0.00000
5	72 - 5	0.00000	0.19560	0.00000
6	72 - 6	0.00000	0.19850	0.00000
7	72 - 7	0.00000	0.15670	0.00000
8	72 - 8	0.00000	0.15670	0.00000
9	72 - 9	0.00000	0.16740	0.00000
10	72 - 10	0.00000	0.06030	0.00000
11	72 - 11	0.00000	0.06030	0.00000
12	72 - 12	0.00000	0.06030	0.00000
13	72 - 13	0.00000	0.06030	0.00000
14	14 - 137	0.00000	0.02670	0.00000
15	137 - 15	0.00000	0.02670	0.00000
16	16 - 137	0.00000	0.02670	0.00000
17	17 - 137	0.00000	0.02670	0.00000
18	18 - 137	0.00000	0.02670	0.00000
19	19 - 137	0.00000	0.02670	0.00000
20	20 - 139	0.00000	0.06000	0.00000
21	21 - 139	0.00000	0.06000	0.00000
22	22 - 139	0.00000	0.06000	0.00000
23	23 - 139	0.00000	0.06000	0.00000
24	24 - 139	0.00000	0.06000	0.00000
25	25 - 139	0.00000	0.06000	0.00000
26	26 - 73	0.00000	0.11670	0.00000
27	27 - 73	0.00000	0.11670	0.00000
28	28 - 73	0.00000	0.11670	0.00000
29	29 - 73	0.00000	0.11670	0.00000
30	30 - 138	0.00000	0.04360	0.00000
31	31 - 138	0.00000	0.04360	0.00000
32	32 - 138	0.00000	0.04360	0.00000
33	33 - 138	0.00000	0.04360	0.00000
34	34 - 138	0.00000	0.04360	0.00000
35	35 - 138	0.00000	0.04360	0.00000
36	36 - 86	0.00000	0.21280	0.00000

LINHA NUM.	ENTRE AS BARRAS	IMPEDANCIA DA LINHA		SUSCEPTANCIA ( PU )
		R (PU)	X (PU)	
37	37 - 86	0.00000	0.21280	0.00000
38	38 - 86	0.00000	0.17140	0.00000
39	39 - 86	0.00000	0.17140	0.00000
40	40 - 148	0.00000	0.03430	0.00000
41	41 - 148	0.00000	0.03430	0.00000
42	42 - 148	0.00000	0.03430	0.00000
43	43 - 148	0.00000	0.03430	0.00000
44	44 - 148	0.00000	0.03430	0.00000
45	45 - 148	0.00000	0.03430	0.00000
46	46 - 69	0.00000	0.68610	0.00000
47	47 - 69	0.00000	0.68610	0.00000
48	48 - 69	0.00000	0.68610	0.00000
49	49 - 131	0.00000	0.13750	0.00000
50	50 - 131	0.00000	0.13750	0.00000
51	51 - 132	0.00000	0.13750	0.00000
52	52 - 132	0.00000	0.13750	0.00000
53	53 - 133	0.00000	0.13750	0.00000
54	54 - 109	0.00000	0.17600	0.00000
55	55 - 109	0.00000	0.17600	0.00000
56	56 - 109	0.00000	0.17600	0.00000
57	57 - 109	0.00000	0.17600	0.00000
58	58 - 109	0.00000	0.17600	0.00000
59	59 - 127	0.00000	0.17600	0.00000
60	60 - 127	0.00000	0.17600	0.00000
61	61 - 63	0.00440	0.01530	0.00367
62	61 - 72	0.00000	0.33630	0.00000
63	61 - 197	0.00000	0.21130	0.00000
64	62 - 63	0.13810	0.47750	0.11454
65	62 - 130	0.00000	1.74170	0.00000
66	63 - 154	0.00000	0.99800	0.00000
67	64 - 65	0.09860	0.29560	0.07623
68	64 - 65	0.09860	0.29560	0.07623
69	64 - 128	0.00000	0.13470	0.00000
70	64 - 129	0.00000	0.13470	0.00000
71	65 - 68	0.04600	0.14410	0.03362
72	65 - 173	0.00000	0.25330	0.00000
73	66 - 67	0.04180	0.13090	0.03053
74	103 - 66	0.00000	0.33630	0.00000
75	66 - 218	0.00000	0.33550	0.00000
76	66 - 240	0.00000	0.21130	0.00000
77	67 - 68	0.03250	0.10190	0.02375
78	67 - 219	0.00000	1.33670	0.00000
79	68 - 220	0.00000	0.44430	0.00000
80	69 - 196	0.00000	0.03500	0.00000
81	70 - 135	0.00000	0.14650	0.00000
82	71 - 136	0.00000	0.14650	0.00000
83	71 - 136	0.00000	0.14650	0.00000
84	72 - 73	0.00110	0.00550	0.00961
85	72 - 73	0.00110	0.00550	0.00961
86	72 - 77	0.03160	0.16460	0.28659

LINHA NUM.	ENTRE AS BARRAS	IMPEDANCIA DA LINHA		SUSCEPTANCIA ( PU )
		R (PU)	X (PU)	
87	72 - 77	0.03110	0.16310	0.28670
88	72 - 77	0.03160	0.16460	0.28659
89	72 - 78	0.02190	0.16760	0.60299
90	72 - 78	0.02190	0.16710	0.60578
91	72 - 93	0.04180	0.21920	0.36291
92	72 - 93	0.04210	0.21720	0.38573
93	72 - 93	0.04220	0.21840	0.38544
94	72 - 93	0.02120	0.16150	0.49770
95	72 - 105	0.02490	0.13010	0.22590
96	72 - 105	0.02490	0.13010	0.22590
97	72 - 106	0.03110	0.16350	0.26739
98	72 - 106	0.03110	0.16350	0.26739
99	72 - 106	0.03110	0.16350	0.26739
100	72 - 137	0.00000	0.01170	0.00000
101	72 - 137	0.00000	0.01170	0.00000
102	151 - 72	0.00000	0.38940	0.00000
103	151 - 72	0.00000	0.38090	0.00000
104	74 - 75	0.02290	0.12030	0.19685
105	74 - 75	0.02280	0.11790	0.20222
106	74 - 76	0.00880	0.04210	0.07709
107	74 - 76	0.00880	0.04210	0.07709
108	74 - 76	0.00750	0.04110	0.07280
109	74 - 198	0.00000	0.31850	0.00000
110	74 - 198	0.00000	0.31850	0.00000
111	74 - 198	0.00000	0.31850	0.00000
112	75 - 116	0.03400	0.19450	0.34060
113	195 - 75	0.00000	0.44210	0.00000
114	195 - 75	0.00000	0.47400	0.00000
115	76 - 139	0.00000	0.02870	0.00000
116	76 - 139	0.00000	0.02870	0.00000
117	77 - 78	0.01560	0.08130	0.14161
118	77 - 78	0.01530	0.08060	0.14166
119	77 - 78	0.01560	0.08130	0.14161
120	77 - 155	0.00000	0.36700	0.00000
121	77 - 155	0.00000	0.36700	0.00000
122	78 - 79	0.04180	0.21790	0.37932
123	78 - 79	0.04110	0.21000	0.39000
124	78 - 79	0.04180	0.21790	0.37932
125	78 - 79	0.01940	0.14850	0.53415
126	78 - 79	0.01940	0.14810	0.53415
127	78 - 156	0.00000	0.37640	0.00000
128	78 - 201	0.00000	0.24240	0.00000
129	78 - 201	0.00000	0.24240	0.00000
130	79 - 80	0.02100	0.11030	0.18045
131	79 - 82	0.02940	0.16770	0.29100
132	79 - 82	0.02940	0.16360	0.28520
133	79 - 82	0.02940	0.16360	0.28660
134	79 - 157	0.00000	1.46000	0.00000
135	79 - 157	0.00000	1.46000	0.00000
136	80 - 81	0.01330	0.07020	0.11483

LINHA NUM.	ENTRE AS BARRAS	IMPEDANCIA DA LINHA		SUSCEPTANCIA ( PU )
		R (PU)	X (PU)	
137	80 - 158	0.00000	1.32000	0.00000
138	80 - 158	0.00000	1.32000	0.00000
139	81 - 103	0.01130	0.06380	0.10980
140	81 - 159	0.00000	0.37630	0.00000
141	81 - 159	0.00000	0.37630	0.00000
142	82 - 83	0.03720	0.21250	0.36820
143	82 - 160	0.00000	0.13500	0.00000
144	82 - 160	0.00000	0.13500	0.00000
145	82 - 160	0.00000	0.13500	0.00000
146	82 - 160	0.00000	0.13000	0.00000
147	82 - 235	0.00000	0.04000	0.00000
148	83 - 84	0.02870	0.16340	0.28080
149	83 - 161	0.00000	0.32090	0.00000
150	83 - 161	0.00000	0.29530	0.00000
151	84 - 85	0.02950	0.15540	0.25426
152	84 - 162	0.00000	0.29530	0.00000
153	84 - 162	0.00000	0.29530	0.00000
154	85 - 86	0.03820	0.19900	0.34560
155	85 - 86	0.03820	0.19900	0.34560
156	85 - 87	0.03620	0.19050	0.31168
157	85 - 163	0.00000	0.32110	0.00000
158	85 - 163	0.00000	0.33290	0.00000
159	85 - 163	0.00000	0.33440	0.00000
160	86 - 140	0.00000	0.02870	0.00000
161	164 - 86	0.00000	0.61050	0.00000
162	164 - 86	0.00000	0.61050	0.00000
163	87 - 88	0.01810	0.09530	0.15584
164	87 - 165	0.00000	0.65500	0.00000
165	87 - 165	0.00000	0.65500	0.00000
166	88 - 91	0.01800	0.15120	0.46161
167	88 - 91	0.01800	0.15120	0.46161
168	88 - 118	0.01820	0.10500	0.17260
169	88 - 119	0.01850	0.10700	0.17600
170	88 - 127	0.01810	0.10280	0.17580
171	88 - 127	0.01100	0.09240	0.28197
172	88 - 127	0.01100	0.09240	0.28197
173	88 - 166	0.00000	0.80700	0.00000
174	88 - 166	0.00000	0.80700	0.00000
175	88 - 166	0.00000	0.80700	0.00000
176	89 - 127	0.00330	0.01860	0.03180
177	89 - 127	0.00330	0.01860	0.03180
178	89 - 167	0.00000	0.13500	0.00000
179	89 - 167	0.00000	0.13500	0.00000
180	89 - 167	0.00000	0.13000	0.00000
181	90 - 141	0.00000	0.02870	0.00000
182	91 - 142	0.00000	0.01170	0.00000
183	91 - 236	0.00000	0.06000	0.00000
184	92 - 122	0.01130	0.06520	0.10860
185	92 - 122	0.01130	0.06520	0.10860
186	92 - 143	0.00000	0.02870	0.00000

LINHA NUM.	ENTRE AS BARRAS	IMPEDANCIA DA LINHA		SUSCEPTANCIA ( PU )
		R (PU)	X (PU)	
187	92 - 168	0.00000	0.13000	0.00000
188	92 - 168	0.00000	0.13000	0.00000
189	92 - 237	0.00000	0.06000	0.00000
190	93 - 94	0.02910	0.16930	0.28500
191	93 - 94	0.02910	0.16170	0.28280
192	93 - 94	0.02910	0.16170	0.28220
193	93 - 95	0.01690	0.08750	0.15534
194	93 - 95	0.01690	0.08830	0.14615
195	93 - 95	0.01700	0.08780	0.15522
196	93 - 97	0.03460	0.18010	0.31357
197	93 - 97	0.03400	0.17840	0.31368
198	93 - 144	0.00000	0.09000	0.00000
199	93 - 169	0.00000	0.13000	0.00000
200	93 - 169	0.00000	0.13000	0.00000
201	94 - 96	0.00260	0.01340	0.02217
202	94 - 96	0.00260	0.01330	0.02356
203	94 - 96	0.00260	0.01330	0.02355
204	94 - 99	0.01260	0.06540	0.11507
205	94 - 99	0.01260	0.06540	0.11507
206	94 - 101	0.00540	0.02780	0.04882
207	94 - 101	0.00540	0.02780	0.04882
208	94 - 102	0.00630	0.03260	0.05755
209	94 - 102	0.00630	0.03260	0.05755
210	94 - 104	0.00190	0.01080	0.01880
211	94 - 145	0.00000	0.01170	0.00000
212	94 - 145	0.00000	0.01170	0.00000
213	94 - 145	0.00000	0.01170	0.00000
214	94 - 210	0.00000	0.04480	0.00000
215	95 - 170	0.00000	0.13500	0.00000
216	95 - 170	0.00000	0.13500	0.00000
217	95 - 170	0.00000	0.13000	0.00000
218	96 - 131	0.00000	0.02500	0.00000
219	96 - 132	0.00000	0.02500	0.00000
220	96 - 133	0.00000	0.02500	0.00000
221	96 - 171	0.00000	0.13200	0.00000
222	96 - 171	0.00000	0.13220	0.00000
223	96 - 171	0.00000	0.35630	0.00000
224	96 - 171	0.00000	0.35630	0.00000
225	96 - 238	0.00000	0.27000	0.00000
226	96 - 246	0.00000	0.27000	0.00000
227	96 - 247	0.00000	0.27000	0.00000
228	97 - 98	0.03710	0.20730	0.36520
229	97 - 98	0.03710	0.20730	0.36520
230	97 - 99	0.01880	0.09730	0.16683
231	97 - 128	0.00000	0.18070	0.00000
232	97 - 129	0.00000	0.18070	0.00000
233	97 - 172	0.00000	0.13500	0.00000
234	97 - 172	0.00000	0.13200	0.00000
235	98 - 174	0.00000	0.13000	0.00000
236	98 - 174	0.00000	0.13000	0.00000

LINHA NUM.	ENTRE AS BARRAS	IMPEDANCIA DA LINHA		SUSCEPTANCIA ( PU )
		R (PU)	X (PU)	
237	98 - 174	0.00000	0.13000	0.00000
238	99 - 100	0.00970	0.05010	0.08594
239	99 - 100	0.00970	0.05010	0.08594
240	99 - 175	0.00000	0.14960	0.00000
241	99 - 175	0.00000	0.14960	0.00000
242	100 - 176	0.00000	0.13500	0.00000
243	100 - 176	0.00000	0.13500	0.00000
244	100 - 176	0.00000	0.13000	0.00000
245	101 - 177	0.00000	0.13500	0.00000
246	101 - 177	0.00000	0.13500	0.00000
247	101 - 177	0.00000	0.13000	0.00000
248	102 - 178	0.00000	0.13500	0.00000
249	102 - 178	0.00000	0.13500	0.00000
250	102 - 178	0.00000	0.13500	0.00000
251	102 - 178	0.00000	0.13000	0.00000
252	104 - 182	0.00000	0.13500	0.00000
253	104 - 182	0.00000	0.13500	0.00000
254	105 - 107	0.03750	0.19520	0.33886
255	105 - 107	0.03750	0.19520	0.33886
256	106 - 107	0.04200	0.22110	0.36171
257	106 - 108	0.01060	0.05530	0.09609
258	106 - 108	0.01060	0.05530	0.09609
259	106 - 183	0.00000	0.13500	0.00000
260	106 - 183	0.00000	0.13000	0.00000
261	107 - 109	0.00480	0.02510	0.04349
262	107 - 109	0.00490	0.02560	0.04238
263	107 - 110	0.01460	0.07520	0.12891
264	107 - 223	0.00000	0.29330	0.00000
265	107 - 223	0.00000	0.29330	0.00000
266	107 - 223	0.00000	0.31670	0.00000
267	108 - 185	0.00000	0.13000	0.00000
268	108 - 185	0.00000	0.13000	0.00000
269	108 - 185	0.00000	0.13000	0.00000
270	109 - 110	0.01470	0.08130	0.14620
271	109 - 110	0.01470	0.08130	0.14620
272	109 - 112	0.00800	0.04610	0.07580
273	109 - 113	0.00330	0.02560	0.07882
274	109 - 114	0.00190	0.01640	0.05020
275	109 - 114	0.00190	0.01640	0.05020
276	109 - 115	0.00640	0.03570	0.06425
277	109 - 115	0.00440	0.02390	0.04240
278	109 - 115	0.00440	0.02390	0.04240
279	109 - 115	0.00440	0.02460	0.04260
280	109 - 115	0.00640	0.03570	0.06425
281	109 - 146	0.00000	0.01170	0.00000
282	109 - 146	0.00000	0.01170	0.00000
283	109 - 146	0.00000	0.01170	0.00000
284	109 - 186	0.00000	0.13000	0.00000
285	109 - 186	0.00000	0.13000	0.00000
286	109 - 224	0.00000	0.04480	0.00000

LINHA NUM.	ENTRE AS BARRAS	IMPEDANCIA DA LINHA		SUSCEPTANCIA ( PU )
		R (PU)	X (PU)	
287	110 - 111	0.04090	0.21170	0.36315
288	110 - 111	0.01860	0.14230	0.51160
289	110 - 111	0.01860	0.14180	0.51396
290	110 - 187	0.00000	0.13500	0.00000
291	110 - 187	0.00000	0.13500	0.00000
292	111 - 196	0.00000	0.13000	0.00000
293	111 - 196	0.00000	0.13000	0.00000
294	112 - 113	0.00210	0.01100	0.01804
295	112 - 189	0.00000	0.13000	0.00000
296	112 - 189	0.00000	0.13000	0.00000
297	112 - 227	0.00000	0.49730	0.00000
298	112 - 227	0.00000	0.49730	0.00000
299	113 - 114	0.00360	0.01910	0.03117
300	113 - 190	0.00000	0.13500	0.00000
301	113 - 190	0.00000	0.13000	0.00000
302	113 - 190	0.00000	0.13000	0.00000
303	114 - 115	0.00260	0.01470	0.02540
304	114 - 191	0.00000	0.14140	0.00000
305	114 - 191	0.00000	0.14140	0.00000
306	115 - 192	0.00000	0.13500	0.00000
307	115 - 192	0.00000	0.13500	0.00000
308	115 - 192	0.00000	0.13000	0.00000
309	116 - 117	0.04660	0.26950	0.47940
310	116 - 135	0.00000	0.16880	0.00000
311	116 - 231	0.00000	0.31080	0.00000
312	117 - 136	0.00000	0.16880	0.00000
313	117 - 136	0.00000	0.16880	0.00000
314	117 - 194	0.00000	0.36700	0.00000
315	117 - 194	0.00000	0.36700	0.00000
316	119 - 120	0.01890	0.10900	0.17940
317	120 - 121	0.02110	0.12190	0.20080
318	121 - 122	0.01580	0.09110	0.14960
319	122 - 123	0.01510	0.08710	0.14300
320	123 - 124	0.01840	0.10600	0.17440
321	124 - 125	0.01800	0.10400	0.17100
322	126 - 149	0.00000	0.01530	0.00000
323	126 - 149	0.00000	0.01530	0.00000
324	126 - 233	0.00000	0.19400	0.00000
325	126 - 233	0.00000	0.19400	0.00000
326	126 - 245	0.00000	0.06250	0.00000
327	128 - 213	0.00000	0.07420	0.00000
328	129 - 213	0.00000	0.07420	0.00000
329	130 - 153	0.00000	0.92500	0.00000
330	130 - 199	0.00000	0.82500	0.00000
331	134 - 188	0.00000	1.00000	0.00000
332	196 - 134	0.00000	1.66670	0.00000
333	134 - 226	0.00000	0.75000	0.00000
334	135 - 243	0.00000	0.07420	0.00000
335	136 - 244	0.00000	0.07420	0.00000
336	136 - 244	0.00000	0.07420	0.00000

LINHA NUM.	ENTRE AS BARRAS	IMPEDANCIA DA LINHA		SUSCEPTANCIA ( PU )
		R (PU)	X (PU)	
337	137 - 138	0.00030	0.00450	0.45420
338	137 - 138	0.00030	0.00450	0.45420
339	137 - 144	0.00230	0.02830	2.86306
340	137 - 144	0.00290	0.02810	2.92708
341	137 - 147	0.00280	0.02700	2.80788
342	137 - 147	0.00220	0.02720	2.74646
343	138 - 139	0.00260	0.03760	3.89640
344	139 - 141	0.00180	0.02560	2.60560
345	140 - 141	0.00220	0.03130	3.20820
346	140 - 142	0.00190	0.02640	2.68400
347	142 - 143	0.00310	0.04540	4.79660
348	143 - 150	0.00150	0.02120	2.49480
349	144 - 145	0.00220	0.02160	2.25160
350	144 - 145	0.00170	0.02180	2.20235
351	146 - 147	0.00150	0.01890	1.92994
352	146 - 147	0.00150	0.01890	1.90439
353	148 - 149	0.00240	0.03470	4.19140
354	148 - 149	0.00260	0.03830	3.84500
355	148 - 150	0.00150	0.02120	2.49480
356	152 - 198	0.00000	0.25650	0.00000
357	152 - 198	0.00000	0.25650	0.00000
358	152 - 198	0.00000	0.25650	0.00000
359	155 - 200	0.00000	0.15120	0.00000
360	155 - 200	0.00000	0.15120	0.00000
361	156 - 201	0.00000	0.15150	0.00000
362	156 - 201	0.00000	0.15150	0.00000
363	156 - 234	0.00000	0.15870	0.00000
364	159 - 202	0.00000	0.15870	0.00000
365	159 - 202	0.00000	0.15870	0.00000
366	160 - 203	0.00000	0.06500	0.00000
367	160 - 203	0.00000	0.06500	0.00000
368	160 - 203	0.00000	0.06500	0.00000
369	161 - 204	0.00000	0.14040	0.00000
370	161 - 204	0.00000	0.10850	0.00000
371	162 - 205	0.00000	0.10850	0.00000
372	162 - 205	0.00000	0.10850	0.00000
373	163 - 206	0.00000	0.13200	0.00000
374	163 - 206	0.00000	0.13620	0.00000
375	163 - 206	0.00000	0.13050	0.00000
376	165 - 207	0.00000	0.49100	0.00000
377	165 - 207	0.00000	0.49100	0.00000
378	166 - 208	0.00000	0.46700	0.00000
379	166 - 208	0.00000	0.46700	0.00000
380	166 - 208	0.00000	0.46700	0.00000
381	167 - 209	0.00000	0.06500	0.00000
382	167 - 209	0.00000	0.06500	0.00000
383	170 - 211	0.00000	0.06500	0.00000
384	170 - 211	0.00000	0.06500	0.00000
385	171 - 212	0.00000	0.32450	0.00000
386	171 - 248	0.00000	0.30130	0.00000

LINHA NUM.	ENTRE AS BARRAS	IMPEDANCIA DA LINHA		SUSCEPTANCIA ( PU )
		R (PU)	X (PU)	
387	172 - 239	0.00000	0.06500	0.00000
388	175 - 214	0.00000	0.06740	0.00000
389	175 - 214	0.00000	0.06740	0.00000
390	176 - 215	0.00000	0.06500	0.00000
391	176 - 215	0.00000	0.06500	0.00000
392	177 - 216	0.00000	0.06500	0.00000
393	177 - 216	0.00000	0.06500	0.00000
394	178 - 217	0.00000	0.06500	0.00000
395	178 - 217	0.00000	0.06500	0.00000
396	178 - 217	0.00000	0.06500	0.00000
397	179 - 218	0.00000	0.19250	0.00000
398	180 - 219	0.00000	0.75510	0.00000
399	181 - 220	0.00000	0.07880	0.00000
400	182 - 221	0.00000	0.06500	0.00000
401	182 - 221	0.00000	0.06500	0.00000
402	183 - 222	0.00000	0.06500	0.00000
403	184 - 191	0.15370	0.44560	0.00760
404	184 - 191	0.15370	0.44560	0.00760
405	184 - 223	0.00000	0.18000	0.00000
406	184 - 223	0.00000	0.18000	0.00000
407	184 - 223	0.00000	0.13670	0.00000
408	187 - 225	0.00000	0.06500	0.00000
409	187 - 225	0.00000	0.06500	0.00000
410	189 - 190	0.02800	0.08130	0.00139
411	189 - 190	0.02800	0.08130	0.00139
412	189 - 241	0.00000	0.36800	0.00000
413	190 - 191	0.07330	0.21260	0.00362
414	190 - 191	0.07330	0.21260	0.00362
415	190 - 228	0.00000	0.06500	0.00000
416	191 - 229	0.00000	0.06610	0.00000
417	191 - 242	0.00000	0.06610	0.00000
418	192 - 230	0.00000	0.06500	0.00000
419	192 - 230	0.00000	0.06500	0.00000
420	193 - 231	0.00000	0.24930	0.00000
421	194 - 232	0.00000	0.15120	0.00000
422	194 - 232	0.00000	0.15120	0.00000

## DADOS DOS TRANSFORMADORES

TRANSFORMADOR NUMERO	ENTRE AS BARRAS	TAP
1	72 - 1	0.980
2	72 - 2	0.980
3	72 - 3	0.980
4	72 - 4	0.980
5	72 - 5	0.980
6	72 - 6	0.980

TRANSFOMADOR NUMERO	ENTRE AS BARRAS	TAP
7	72 - 7	0.980
8	72 - 8	0.980
9	72 - 9	0.980
10	72 - 10	0.980
11	72 - 11	0.980
12	72 - 12	0.980
13	72 - 13	0.980
14	14 - 137	1.000
15	137 - 15	1.000
16	61 - 72	0.980
17	63 - 154	0.950
18	65 - 173	1.029
19	103 - 66	0.980
20	72 - 137	0.979
21	72 - 137	0.979
22	151 - 72	0.995
23	151 - 72	0.995
24	195 - 75	1.037
25	195 - 75	1.037
26	76 - 139	0.945
27	76 - 139	0.945
28	77 - 155	1.012
29	77 - 155	1.012
30	78 - 156	0.920
31	78 - 201	1.041
32	78 - 201	1.041
33	79 - 157	1.020
34	79 - 157	1.020
35	80 - 158	1.013
36	80 - 158	1.013
37	81 - 159	0.992
38	81 - 159	0.992
39	82 - 160	0.991
40	82 - 160	0.991
41	82 - 160	0.991
42	82 - 160	0.991
43	83 - 161	0.946
44	83 - 161	0.946
45	84 - 162	0.934
46	84 - 162	0.934
47	85 - 163	0.970
48	85 - 163	0.970
49	85 - 163	0.970
50	86 - 140	1.000
51	164 - 86	1.032
52	164 - 86	1.032
53	87 - 165	0.950
54	87 - 165	0.950
55	88 - 166	0.997
56	88 - 166	0.997
57	88 - 166	0.997

TRANSFORMADOR NUMERO	ENTRE AS BARRAS	TAP
58	89 - 167	0.987
59	89 - 167	0.987
60	89 - 167	0.987
61	90 - 141	0.968
62	91 - 142	0.969
63	91 - 236	1.000
64	92 - 143	1.000
65	92 - 168	0.999
66	92 - 168	0.999
67	92 - 237	1.000
68	93 - 144	1.100
69	93 - 169	0.974
70	93 - 169	0.974
71	94 - 145	1.000
72	94 - 145	1.000
73	94 - 145	1.000
74	94 - 210	1.000
75	95 - 170	1.100
76	95 - 170	1.100
77	95 - 170	1.100
78	96 - 171	0.994
79	96 - 171	0.994
80	96 - 171	0.994
81	96 - 171	0.994
82	96 - 238	1.000
83	96 - 246	1.000
84	96 - 247	0.971
85	97 - 172	1.003
86	97 - 172	1.003
87	98 - 174	0.976
88	98 - 174	0.976
89	98 - 174	0.976
90	99 - 175	0.994
91	99 - 175	0.994
92	100 - 176	0.974
93	100 - 176	0.974
94	100 - 176	0.974
95	101 - 177	0.969
96	101 - 177	0.969
97	101 - 177	0.969
98	102 - 178	0.958
99	102 - 178	0.958
100	102 - 178	0.958
101	102 - 178	0.958
102	104 - 182	0.955
103	104 - 182	0.955
104	106 - 183	0.942
105	106 - 183	0.942
106	107 - 223	1.046
107	107 - 223	1.046
108	107 - 223	1.046

TRANSFORMADOR NUMERO	ENTRE AS BARRAS	TAP
109	108 - 185	0.949
110	108 - 185	0.949
111	108 - 185	0.949
112	109 - 146	1.000
113	109 - 146	1.000
114	109 - 146	1.000
115	109 - 186	0.969
116	109 - 186	0.969
117	110 - 187	0.984
118	110 - 187	0.984
119	111 - 196	1.000
120	111 - 196	1.000
121	112 - 189	0.942
122	112 - 189	0.942
123	112 - 227	0.914
124	112 - 227	0.914
125	113 - 190	0.931
126	113 - 190	0.931
127	113 - 190	0.931
128	114 - 191	1.020
129	114 - 191	1.020
130	115 - 192	0.972
131	115 - 192	0.972
132	115 - 192	0.972
133	116 - 135	0.945
134	116 - 231	0.944
135	117 - 136	1.100
136	117 - 136	1.100
137	117 - 194	1.000
138	117 - 194	1.000
139	126 - 149	1.053
140	126 - 149	1.053
141	126 - 245	1.000
142	196 - 134	1.000
143	152 - 198	1.071
144	152 - 198	1.071

## CAPACITORES/RETORES EM DERIVAÇÃO

BARRA NUM.	CAPACITOR ( MVAR )	REATOR (MVAR)
78		30.00
79		30.00
82		40.00
83		20.00
84		20.00
85		10.00
86		20.00

BARRA NUM.	CAPACITOR ( MVAR )	REATOR (MVAR)
95	50.00	
126	100.00	
138		150.00
139		250.00
140		200.00
141		200.00
142		350.00
143		400.00
144		300.00
147		300.00
148		163.00
149		325.00
150		272.00
152	20.40	
160	81.60	
163	20.40	
167	20.40	
170	81.60	
171	20.40	
172	18.40	
175	31.20	
176	20.40	
177	20.40	
178	20.40	
183	20.40	
185	61.20	
191	40.80	
192	20.40	
194	30.60	
195	30.60	
198	10.20	
202		10.00
203	21.60	
204	10.80	
206	21.60	
215	14.40	
216	21.60	
217	21.60	
223	28.80	
227	16.20	
230	21.60	
242	21.60	
244	21.60	
248	14.40	

## BARRAS DE TENSÃO CONTROLADA

BARRA NUM.	MÓDULO DA TENSÃO (PU)	LIMITES DA POT. REATIVA (MVAR)	
		MINIMO	MAXIMO
4	1.0400	-1000.0	1000.0
5	1.0400	-1000.0	1000.0
7	1.0400	-1000.0	1000.0
8	1.0400	-1000.0	1000.0
10	1.0490	-1000.0	1000.0
11	1.0490	-1000.0	1000.0
12	1.0490	-1000.0	1000.0
15	1.0490	-1000.0	1000.0
16	1.0490	-1000.0	1000.0
17	1.0490	-1000.0	1000.0
18	1.0490	-1000.0	1000.0
20	1.0490	-1000.0	1000.0
21	1.0490	-1000.0	1000.0
22	1.0490	-1000.0	1000.0
23	1.0490	-1000.0	1000.0
24	1.0490	-1000.0	1000.0
26	1.0400	-1000.0	1000.0
27	1.0400	-1000.0	1000.0
28	1.0400	-1000.0	1000.0
30	1.0490	-1000.0	1000.0
31	1.0490	-1000.0	1000.0
32	1.0490	-1000.0	1000.0
33	1.0490	-1000.0	1000.0
34	1.0490	-1000.0	1000.0
35	1.0490	-1000.0	1000.0
36	1.0100	-1000.0	1000.0
37	1.0100	-1000.0	1000.0
38	1.0100	-1000.0	1000.0
39	1.0100	-1000.0	1000.0
40	1.0400	-1000.0	1000.0
41	1.0400	-1000.0	1000.0
42	1.0400	-1000.0	1000.0
43	1.0400	-1000.0	1000.0
44	1.0400	-1000.0	1000.0
46	1.0100	-1000.0	1000.0
47	1.0100	-1000.0	1000.0
48	1.0100	-1000.0	1000.0
49	1.0200	-500.0	500.0
50	1.0200	-500.0	500.0
51	1.0200	-500.0	500.0
52	1.0200	-500.0	500.0
53	1.0200	-500.0	500.0
54	1.0200	-500.0	500.0
55	1.0200	-500.0	500.0
56	1.0200	-500.0	500.0
57	1.0200	-500.0	500.0
58	1.0200	-500.0	500.0
59	1.0000	-500.0	500.0
60	1.0000	-500.0	500.0

BARRA NUM.	MÓDULO DA TENSÃO (PU)	LIMITES DA POT. REATIVA (MVAR)	
		MINIMO	MAXIMO
98	1.0000	-1000.0	1000.0
117	1.0100	-1000.0	1000.0
159	1.0200	0.0	20.0
170	1.0100	0.0	60.0
174	1.0200	0.0	40.0
203	1.0100	-1000.0	1000.0
210	1.0800	-150.0	300.0
212	1.0300	-15.0	30.0
213	1.0300	-12.0	20.0
214	1.0350	-12.0	20.0
220	1.0300	-6.0	10.0
224	1.0700	-150.0	300.0
227	1.0400	-15.0	20.0
229	1.0300	-15.0	30.0
235	1.0260	-100.0	200.0
236	1.0200	-140.0	200.0
237	1.0200	-140.0	200.0
238	1.0100	-15.0	30.0
241	1.0500	-15.0	20.0
245	1.0300	-75.0	150.0
246	1.0100	-15.0	30.0

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] ALSAÇ, O. Et alii. Sparsity - oriented compensation methods for modified network solutions. IEEE Transaction PAS. New York, 102 (5): 1050-60, maio 1972.
- [2] BONAPARTE, J E. & MASLIN W. W. Simplified load flow, AIEE transactions, volume 76, pp 385-394, 1957.
- [3] BAPTISTA, M. M. Utilização de índices de desempenho no planejamento de redes de transmissão de energia elétrica. 5º Congr. Bras. Automática / 1º Congr. Lat. Americ. Automática. Campina Grande, vol. 1, pp 219-24, 1984.
- [4] BRAMELLER, A. Et alii. Sparsity - its practical applications to power system, pp 40-47, Pitman publishing, 1976.
- [5] BRAMELLER, A. Op. Cit, pp 101-104.

- [6] BRAMELLER, A. Op. Cit, pp 107-110.
- [7] DOPAZO, J. F. & VANSLYCK, L. S. Conventinal load flow not suited for real time power system monitoring. Proceedings of 8<sup>th</sup> IEE PICA Conference, june, 1973.
- [8] ELETROBRAS, Precisão do modelo linearizado de fluxo de potência para a simulação do sistema elétrico brasileiro, Rio de janeiro, 1980.
- [9] KNIGHT, U. G. Power system engineering and mathematics, pp 36-41. Pergamon press, 1972.
- [10] MONTICELLI, A. Métodos de análise e sintese aplicados ao planejamento a longo prazo de sistemas de transmissão de energia elétrica, UNICAMP, 1979.
- [11] ROBBA, E. J. Et alii. Metodologia de avaliação estatística da confiabilidade de sistemas elétricos. VI SNPTE, 1981.
- [12] STAGG, G. W. & EL-ABIAD, A. H. Computer methods in power system analysis. McGraw-Hill, 1968.
- [13] SULLIVAN, R. L. Power system planning, pp 223-237, McGraw-Hill, 1977.

[14] TINNEY, W. F. Compensation methods for network solutions by optimal ordered triangular factorization. IEEE Transactions PAS. New York, 91 (1): 123-27, 1972.

[15] ZOLLENKOPF, K. Bi-factorisation - basic computational algorithm and programing techniques, In Large sparse sets or linear equations. pp 75-96. Academic Press, 1971.