



CCPgEE/CCT-UFPb

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

FLUXO DE CARGA COM ELO DE CORRENTE CONTÍNUA EM MICROCOMPUTADOR

AILSON PEREIRA DE MOURA
1986

CAMPINA GRANDE - PB

AILSON PEREIRA DE MOURA

FLUXO DE CARGA COM ELO DE CORRENTE
CONTÍNUA EM MICROCOMPUTADOR

Dissertação apresentada à Coordenação do Curso de MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO DA ENERGIA

MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR

Orientador

ELIANE MARISE RAPOSO DE CARVALHO

Co-Orientadora

CAMPINA GRANDE
OUTUBRO - 1986



M929f Moura, Ailson Pereira de.
Fluxo de carga com elo de corrente contínua em microcomputador. / Ailson Pereira de Moura. - Campina Grande. - PB: [s.n.], 1986.

94 f.

Orientador: Professor Dr. Manoel Afonso de Carvalho Júnior.

Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal da Paraíba; Centro de Ciências e Tecnologia; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

1. Simulação de sistemas elétricos. 2. Corrente alternada. 3. Corrente contínua. 4. Método desacoplado - equações. 5. Sistemas de potência. 6. Microcomputador cp-700 - Prológica. 8. Fluxo de carga desacoplado rápido.. I. Título.

CDU: 621.311(043)

FLUXO DE CARGA COM ELO DE CORRENTE
CONTÍNUA EM MICROCOMPUTADOR

CAMPINA GRANDE
OUTUBRO - 1986

A meus pais

Aluiz̃io e Maria

A minha esposa

Edilene e ao meu

filho Adriano

Agradecimentos a todos aqueles que contribuíram na realização deste trabalho. Uma especial gratidão ao professor Manoel Afonso de Carvalho Júnior, cuja compreensão humana e orientação técnica dadas ao trabalho contribuiu significativamente para a realização do mesmo. Também um agradecimento especial a professora Eliane Marise Raposo de Carvalho da UFPb.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é validar um meio alternativo para a simulação de sistemas elétricos de corrente alternada/corrente contínua (CA/CC) através de um microcomputador de uso comercial, tipo o CP-700 da Prológica, o qual é constituído por 64 Kbytes de memória principal RAM e palavra de 8 bits.

Inicialmente é feita a dedução das equações do método desacoplado rápido, o qual foi utilizado explorando-se a esparsidade dos sistemas de potência.

Resultados de sistemas elétricos de distribuição e transmissão CA, obtidos no microcomputador são comparados com resultados dos mesmos sistemas obtidos no computador DEC-10 da UFC e com resultados do Philadelphia Power Flow Program, implantado no computador IBM-4341 da UFPb.

A seguir consideram-se os fundamentos operacionais de um elo em corrente contínua, assim como, sua técnica de controle.

Usando a técnica que considera o elo em CC como carga constante nos barramentos CA ligados ao mesmo, é feita a sua incorporação ao programa de fluxo de carga CA.

Na parte final do trabalho, resultados de sistemas de transmissão CA/CC obtidos no microcomputador são comparados com resultados dos mesmos sistemas obtidos no computador DEC-10.

Os resultados conseguidos nas simulações realizadas, comprovam a viabilidade do uso de um microcomputador de 8 bits na análise de fluxo de carga CA/CC em sistemas de potência de pequeno e médio porte.

S U M Á R I O

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	01
1.1 - Generalidades	01
1.2 - Características do microcomputador CP-700 da Prológica	02
1.3 - Contribuições do trabalho	03
1.4 - Descrição de cada capítulo	04
CAPÍTULO II - FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO CA .	05
2.1 - Introdução	05
2.2 - Dedução do algoritmo básico	05
2.3 - Aspectos computacionais do método	10
2.4 - Análise de resultados	13
2.5 - Conclusões	35
CAPÍTULO III - MODELAGEM E INTEGRAÇÃO DE UM ELO DE CORRENTE CONTÍNUA COM A SOLUÇÃO DO FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO	37
3.1 - Introdução	37
3.2 - Características do sistema CA - CC	38
3.3 - Análise da ponte conversora não considerado o ângulo de comutação	41
3.4 - Análise da ponte conversora com ângulo de comutação menor que 60°	47
3.5 - Modo de controle de um elo em corrente contínua	54

3.6 - Integração das rotinas CC, no programa de fluxo de carga CA	56
3.7 - Análise de resultados	60
3.8 - Conclusões	66
CAPÍTULO IV - CONCLUSÕES	68
APÊNDICE I - BI-FATORAÇÃO ALGORITMO COMPUTACIONAL BÁSICO E ASPECTOS DE PROGRAMAÇÃO	71
APÊNDICE II - DADOS DOS PRINCIPAIS SISTEMAS SIMULADOS	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

PRINCIPAIS SÍMBOLOS

$\Delta P_i + j\Delta Q_i$	- resíduo da potência complexa na barra i .
P_i^t	- potência ativa transferida da barra i para as demais barras através do sistema de transmissão.
Q_i^t	- potência reativa transferida da barra i para as demais barras através do sistema de transmissão.
V_i	- módulo de tensão na barra i .
θ_i	- ângulo de fase de tensão na barra i .
θ_{ik}	= $\theta_i - \theta_k$
$\Delta\theta$	- correção dos ângulos de fase das tensões.
Δv	- correção dos módulos das tensões.
$G_{ik} + jB_{ik}$	- elementos da matriz admitância de barra $[Y_n]$
$[\quad]$	- vetor ou matriz
L_{cr}	- indutância de comutação do retificador.
L_{ci}	- indutância de comutação do inversor.
L_d	- reator de alisamento.
V_{dr}	- valor médio da tensão CC do retificador na saída do reator de alisamento.

- V_{di} - valor médio de tensão CC do inversor na saída do reator de alisamento.
- δ - ângulo de extinção.
- α - ângulo de disparo do retificador.
- μ - ângulo de comutação.
- R_c - resistência equivalente de comutação.
- R_d - resistência da linha CC.
- I_d - corrente contínua na entrada ou saída dos conversores.
- E_m - valor máximo da tensão CA.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades

Antes de iniciar as discussões de carácter específico de cada unidade neste trabalho, é conveniente ressaltar as razões básicas que nortearam a idéia desta linha de desenvolvimento. Conforme destacado pelo próprio título da dissertação o estudo envolve análises de fluxo de carga de corrente alternada/corrente contínua (CA/CC), inter-relacionando técnicas tradicionais de solução de fluxo de potência com os recursos e a flexibilidade de um microcomputador.

De fato, ao se estudar sistemas elétricos com tais objetivos, consegue-se que sejam obtidos não apenas as respostas clássicas fornecidas pelos estudos de fluxo de carga CA/CC, quais sejam, tensões, ângulos de fase, potências geradas, fluxos de potência nas linhas, consumo de reativos nos conversores etc., mas também, a obtenção destas grandezas através de um equipamento de baixo custo e dedicado a solução específica das equações de fluxo de carga CA/CC.

Pois, como é de conhecimento dos engenheiros de sistemas de potência, as equações de fluxo de carga CA/CC são eficientemente solucionadas nos computadores de grande porte, mas levados por suas características de uma máquina de múltiplos usuários, não estão dimensionados para resolver um problema específico e nem disponíveis para atender um único usuário. No caso em que um computador de grande porte esteja disponível para atender um único usuário o custo da

solução obtida será muito alto, pois o sistema de computação estará sendo subutilizado.

Microcomputadores, e neste caso, um microcomputador de 8 bits, é uma máquina que dispõe de uma melhor interação homem-máquina e devido ao seu baixo custo é um equipamento que pode ser utilizado, com elevado grau de eficiência, na solução específica dos modelos matemáticos de fluxo de carga CA/CC de sistemas de potência, onde é necessário resolver um grande número de casos e a interação homem-máquina é um fator importante.

A partir destas idéias resultou a origem deste trabalho, onde desenvolveu-se um programa computacional em linguagem FORTRANIV para o estudo de fluxo de carga CA/CC de sistemas elétricos de pequeno e médio porte no microcomputador CP-700 da Prológica.

1.2 - Características do microcomputador CP-700 da Prológica.

O microcomputador utilizado nesse trabalho é o sistema 700 da Prológica⁷. Este é um microcomputador de 8 bits com clock de 2 MHz, contendo dois microprocessadores Z 80 A, um deles considerado processador principal para a execução de todas as funções relacionadas com o processamento e tratamento do vídeo, enquanto que o outro executa, de forma independente, o controle de operações de entrada/saída do disco.

A memória do sistema 700 é composta de memória principal RAM com 64 Kbytes (sendo 52 Kbytes disponíveis para o usuário); memória RAM para comunicação entre os dois microprocessadores com 1 Kbyte e memória ROM para controle de periféricos com 2 Kbytes.

O sistema 700 traz incorporado no próprio equipamento, duas unidades de disco flexíveis de 5 $\frac{1}{4}$ " , com capacidade

de de 350 Kbytes (face simples) ou 700 Kbytes (face dupla) e trabalha com o sistema operacional DOS 700 que é compatível com o CP/M.

1.3 - Contribuições do trabalho

A principal contribuição desse trabalho é validar um meio alternativo para a simulação de sistema elétricos CA/CC de pequeno e médio porte, através de um microcomputador de 8 bits. Com essa alternativa pode-se realizar simulações dos sistemas citados, de uma maneira eficiente e com baixo custo, substituindo o uso de computadores de grande porte.

Para realizar estudos de fluxo de carga CA/CC no microcomputador CP-700 foi desenvolvido o algoritmo de fluxo de carga desacoplado rápido, explorando a esparsidade dos sistemas de potência e considerando o elo em corrente contínua (ECC) como carga constante nos barramentos de corrente alternada ligados ao mesmo.

Os principais sistemas simulados (apêndice II) foram duas redes de sistemas reais, uma rede teste do Institute of Electrical and Electronic Engineering (IEEE) e duas redes com elos em corrente contínua, conforme segue:

- 1º Caso - Rede típica de sistema de transmissão da Região Nordeste do Brasil (simplificada) com vinte e oito barras e trinta e uma ligações.
- 2º Caso - Rede típica de sistema de distribuição regional da Região Nordeste do Brasil (simplificada) com vinte e oito barras e vinte e sete ligações.
- 3º Caso - Rede teste do IEEE com quatorze barras e vinte ligações.

4º Caso - Rede usada no 1º caso com a substituição de um ramo por um ECC.

5º Caso - Rede usada no 3º caso com a substituição de uma ligação por um ECC.

Os resultados obtidos no microcomputador foram comparados com resultados obtidos no computador DEC-10 da Universidade Federal do Ceará (UFC), com resultados do Philadelphia Electric Company Power Flow Program (PECO), implantado no computador IBM-4341 da Universidade Federal da Paraíba (UFPb) e viabilizam o uso de um microcomputador de 8 bits na análise de fluxo de carga CA/CC em sistemas de potência de pequeno e médio porte.

1.4 - Descrição de cada capítulo

A primeira parte do estudo é feita ao longo do capítulo II, quando descreve-se detalhadamente a teoria do método do desacoplado rápido e analisa-se os resultados de fluxo de carga CA obtidos com o microcomputador.

No capítulo III, descreve-se resumidamente a teoria básica da conversão CA/CC e vice-versa, culminando-se com uma explanação sobre a filosofia de controle de um ECC. Utilizando esta modelagem, descreve-se o algoritmo computacional utilizado na simulação e discutem-se os resultados obtidos.

As conclusões finais do trabalho são apresentadas no capítulo IV.

No apêndice I apresenta-se o algoritmo da bi-fatoração e no apêndice II os dados dos principais sistemas simulados.

CAPÍTULO II

FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO CA

2.1 - Introdução

O método desacoplado rápido^{1,2,3} o qual passamos a analisar com detalhes, deve-se a Stott e Alçac, que publicaram um artigo a respeito em 1974.

O desenvolvimento analítico do mesmo é bastante simples, e é derivado do método de Newton-Raphson, onde ao invés do Jacobiano são usadas duas matrizes simétricas e constantes como instrumento de iteração.

2.2 - Dedução do algoritmo básico

Métodos numéricos são em sua maioria mais eficientes quando tiram vantagem das propriedades físicas do sistema a ser solucionado.

O método desacoplado rápido utiliza uma propriedade bastante conhecida dos sistemas elétricos, que é o fraco acoplamento existente entre os fluxos de potência ativa e reativa nos mesmos. Os fluxos de potência ativa são fortemente influenciados pelos ângulos de fase das tensões (e vice-versa) e praticamente independentes dos módulos das tensões (e vice-versa).

Por outro lado, os fluxos de potência reativa são

fortemente dependentes dos módulos das tensões (e vice-versa) e apenas fracamente influenciados pelos ângulos de fase das tensões (e vice-versa).

Para a dedução das equações do método desacoplado rápido, partimos das equações do método de Newton-Raphson, na forma polar, que são:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^j \\ \Delta Q^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta^j \\ \Delta V/V^j \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

e

$$\begin{bmatrix} \theta^{j+1} \\ V^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^j \\ V^j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \theta^j \\ \Delta V/V^j \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Em termos das equações de iteração do método de Newton-Raphson (2.1) e (2.2), o desacoplamento mencionado anteriormente traduz-se nos valores numéricos dos elementos das submatrizes $[J]$ e $[N]$ que são pequenos (em magnitude) com relação aos dos elementos das submatrizes $[H]$ e $[L]$.

Isto é fácil de ser verificado, recordando que:

$$H_{ik} = -V_i V_k (G_{ik} \text{sen} \theta_{ik} + B_{ik} \text{cos} \theta_{ik})$$

$$H_{ii} = -V_i^2 B_{ii} - Q_i^t$$

$$J_{ik} = V_i V_k (-G_{ik} \text{cos} \theta_{ik} + B_{ik} \text{sen} \theta_{ik})$$

$$J_{ii} = -V_i^2 G_{ii} + P_i^t$$

$$N_{ik} = V_i V_k (G_{ik} \text{cos} \theta_{ik} - B_{ik} \text{sen} \theta_{ik})$$

$$N_{ii} = V_i^2 G_{ii} + P_i^t$$

$$L_{ik} = -V_i V_k (G_{ik} \text{sen} \theta_{ik} + B_{ik} \text{cos} \theta_{ik})$$

$$L_{ii} = -V_i^2 B_{ii} + Q_i^t$$

onde

$$P_i^t = V_i \sum_{k \in K_{ni}} V_k (G_{ik} \text{cos} \theta_{ik} - B_{ik} \text{sen} \theta_{ik})$$

$$Q_i^t = -V_i \sum_{k \in K_{ni}} V_k (G_{ik} \text{sen} \theta_{ik} + B_{ik} \text{cos} \theta_{ik})$$

K_{ni} - indica o conjunto de todas as barras k diretamente ligadas a barra i , incluindo o caso $k=i$.

Para sistemas elétricos, em geral tem-se: $G_{ik} \ll B_{ik}$ e $\theta_{ik} \cong 0$. Logo a afirmativa anterior é correta.

Assim o primeiro passo no desacoplamento consiste em desprezar as submatrizes $[J]$ e $[N]$ que traduzem o acoplamento entre $[P]$ e $[V]$ e entre $[Q]$ e $[\theta]$. Com isso obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^j \\ \Delta Q^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & | \\ \hline & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^j \\ \Delta V/V^j \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

A equação (2.3) já é evidentemente, uma equação desacoplada e pode ser separada em duas:

$$[\Delta P^j] = [H] [\Delta \theta^j] \quad (2.4)$$

$$[\Delta Q^j] = [L] [\Delta V/V^j] \quad (2.5)$$

Em relação aos elementos das submatrizes $[H]$ $[L]$ tem-se:

$$H_{ik} = L_{ik} = -V_i V_k (G_{ik} \text{sen} \theta_{ik} + B_{ik} \text{cos} \theta_{ik}) \quad (2.6)$$

$$H_{ii} = -V_i^2 B_{ii} - Q_i^t \quad (2.7)$$

$$L_{ii} = -V_i^2 B_{ii} + Q_i^t \quad (2.8)$$

como $\theta_{ik} \cong 0$ as seguintes aproximações são válidas.

$$\begin{aligned} \text{cos} \theta_{ik} &\cong 1 \\ G_{ik} \text{sen} \theta_{ik} &\cong 0 \end{aligned}$$

Também, quando expressos em valores por unidade, os termos $V_i^2 B_{ii}$ são muito maiores, em valor absoluto que os termos Q_i^t . As equações (2.6), (2.7) e (2.8) podem, portanto, ser escritas:

$$H_{ik} = L_{ik} \cong V_i V_k B_{ik} \quad (2.9)$$

$$H_{ii} = L_{ii} \cong V_i^2 B_{ii} \quad (2.10)$$

As equações desacopladas (2.4) e (2.5) podem, então, ser escritas como:

$$[\Delta P_i^j] = [V_i] [B'] [V_k] [\Delta \theta_k^j] \quad (2.11)$$

$$[\Delta Q_i^j] = [V_i] [B''] [V_k] [\Delta V_k^j / V_k^j] \quad (2.12)$$

Dividindo as equações (2.11) e (2.12) por V_i vem:

$$[\Delta P_i^j / V_i] = [B'] [V_k] [\Delta \theta_k^j] \quad (2.13)$$

$$[\Delta Q_i^j / V_i] = [B''] [\Delta V_k^j / V_k^j] \quad (2.14)$$

Os termos à direita de $[B']$ em (2.13) ainda representam um fator de acoplamento, pois eles influenciam os fluxos de potência reativa. Esta influência é removida considerando os termos $[V_k]$ como sendo fixos no valor 1,0 p.u. Ficam então as equações:

$$\left[\frac{\Delta P_i^j}{V_i} \right] = [B'] \left[\Delta \theta^j \right] \quad (2.15)$$

$$\left[\frac{\Delta Q_i^j}{V_i} \right] = [B''] \left[\Delta V^j \right] \quad (2.16)$$

que são as equações do método desacoplado rápido.

A essa altura os elementos de $[B']$ e $[B'']$ são obtidos do negativo da matriz de susceptância nodal $[B_n]$ (parte imaginária de $[Y_n]$ do sistema. O processo de desacoplamento é completado da seguinte forma:

- (i) Omite-se de $[B']$ a representação de componentes do sistema que afetam predominantemente os fluxos reativos, tais como reatâncias shunt e tapes em fase de transformadores controladores.
- (ii) Omite-se de $[B'']$ a representação de componentes do sistema que afetam os fluxos ativos, tais como tapes em quadratura de transformadores defasadores.
- (iii) Despreza-se as resistências das linhas no cálculo dos elementos de $[B']$.

Com isso os elementos das matrizes $[B']$ e $[B'']$ são dados respectivamente por:

$$B'_{ik} = - \frac{1}{X_{ik}} \quad , \quad \text{para } k \neq i \quad (2.17)$$

$$B'_{ii} = \sum_{k \neq i} \frac{1}{X_{ik}} \quad (2.18)$$

$$B''_{ik} = - B_{ik} , \text{ para } k \neq i \quad (2.19)$$

$$B''_{ii} = \sum_{k \in \text{kai}} B_{ik} \quad (2.20)$$

onde

X_{ik} = reatância série de uma linha ou transformador.

B_{ik} e B_{ii} são os elementos da matriz de susceptância nodal $[B_n]$.

kai indica o conjunto de todas as barras k diretamente conectadas à barra i , excluindo o caso $k=i$.

2.3 - Aspectos computacionais do método

A preferência pelo método desacoplado rápido nesse trabalho deve-se às vantagens computacionais do mesmo sobre os demais métodos².

De acordo com as considerações feitas no parágrafo 2.2, vê-se que tanto $[B']$ como $[B'']$ são matrizes reais, esparsas, simétricas e constantes, portanto, somente o triângulo superior dessas matrizes, necessita ser fatorado uma vez no começo da solução do fluxo de carga.

A introdução das matrizes $[B']$ e $[B'']$ no lugar da matriz Jacobiana do método de Newton-Raphson, altera o processo de convergência do fluxo de carga. Isto é, muda o caminho percorrido entre o ponto inicial e a solução, mas não altera a solução final pois o problema resolvido permanece o mesmo ($\Delta P(V, \theta) = 0$; $\Delta Q(V, \theta) = 0$). O desacoplamento é introduzido apenas no algoritmo de resolução, sem afetar o modelo da rede².

As soluções para os vetores $[\Delta\theta]$ e $[\Delta V]$ em (2.15) e (2.16) são extremamente rápidas usando os fatores constantes de $[B']$ e $[B'']$. Estas soluções são alternadas dentro de um certo esquema que leva à solução quando $[\Delta P]$ e $[\Delta Q]$ se anulam a menos de uma constante.

A convergência do método é bastante confiável e funciona bem com sistemas difíceis devido a sua não sensibilidade com a forma das funções envolvidas.

O fluxograma que serviu de base para o desenvolvimento do programa de fluxo de carga CA é mostrado na Figura 2.1.

Além de rotinas para explorar a esparsidade dos sistemas de potência⁸, também foi incorporado ao programa fonte CA o controle através de LTC, o qual permite controlar o módulo de tensão em barras com carga constante.

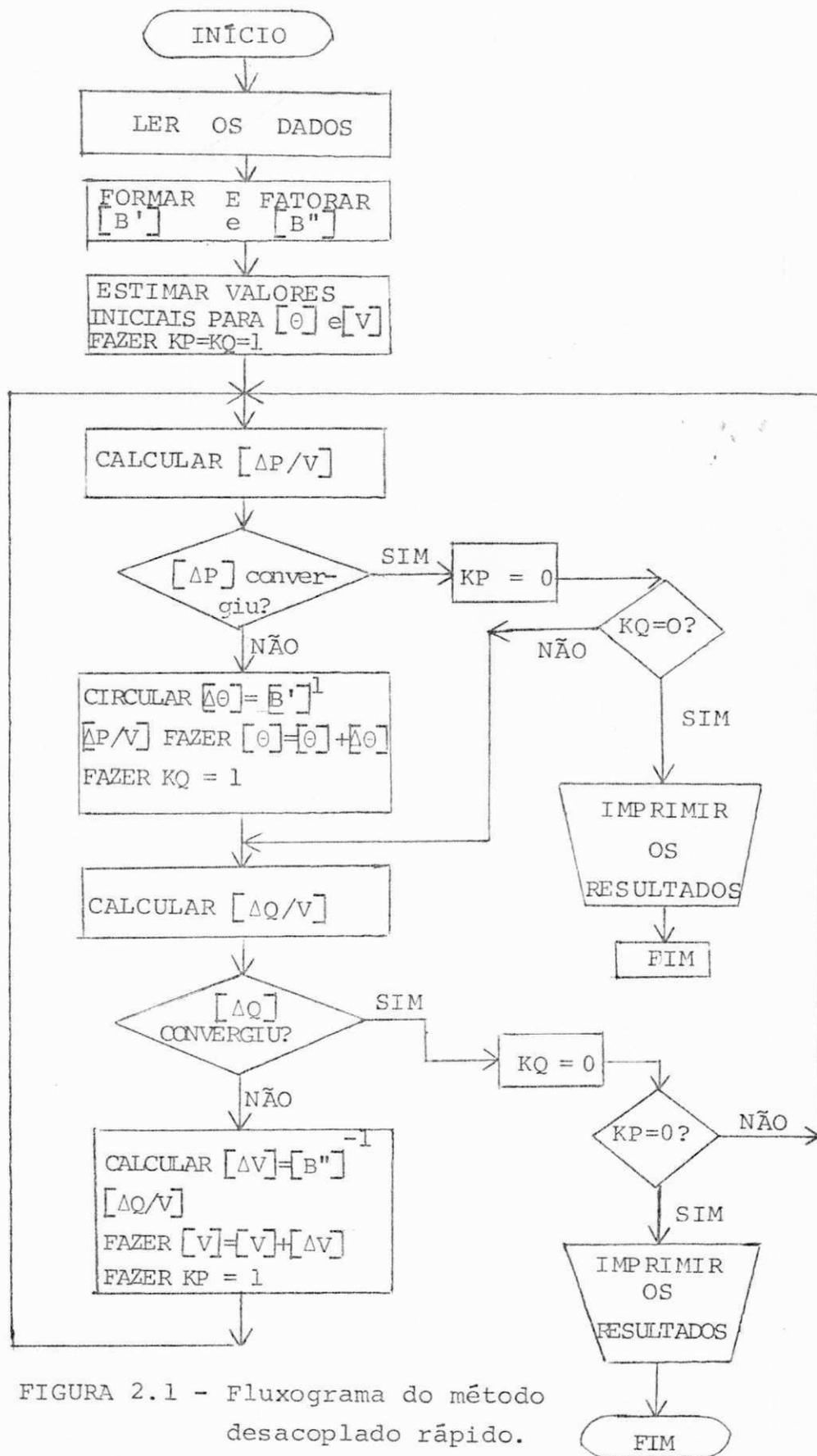


FIGURA 2.1 - Fluxograma do método desacoplado rápido.

2.4 - Análise de resultados

Para viabilizar o uso do microcomputador na análise de fluxo de carga CA é necessário atingir os seguintes objetivos:

- 1º - Determinar qual é o tamanho máximo de um sistema de potência (SP) que pode ser simulado no microcomputador.
- 2º - Verificar se o tempo de simulação de sistemas de potência é muito elevado, a ponto de inviabilizar a sua prática.
- 3º - Averiguar se os recursos de que dispõe o microcomputador permitem realmente uma rápida interação homem-máquina.
- 4º - Provar que os resultados de módulos de tensões, ângulos de fase e fluxos de potências ativa e reativa nas linhas de um SP, obtidos com o microcomputador, são compatíveis com resultados obtidos através de um computador de grande porte.

Para atingir os objetivos acima descritos, foram simuladas várias redes, sendo as principais: 2 redes básicas de sistemas reais e 1 rede teste do IEEE (apêndice II).

A estrutura do programa fonte CA no microcomputador, permite simulações de sistemas de potência com até sessenta barras e cem ramos.

No entanto, usando a técnica de dividir o programa fonte CA em duas partes como mostradas nas Figuras 2.2 e 2.3, aumenta-se o tamanho de SP simulados para noventa barras e cento e doze ramos.

A desvantagem introduzida com essa divisão do programa é o acréscimo do tempo de simulação como mostrado nos gráficos das Figuras 2.6 e 2.7.

É importante ressaltar, que a técnica empregada, mesmo apresentando somente um pequeno aumento no tamanho das redes simuladas, só foi conseguida devido a estrutura do método desacoplado rápido, o qual utiliza os fatores constantes $[B']$ e $[B'']$.

Assim, define-se módulo, nesse trabalho, como sendo uma parte do programa fonte.

O diagrama de blocos da Figura 2.2 representa o primeiro módulo do programa fonte CA, onde temos as rotinas de montagem e fatoração das matrizes $[B']$ e $[B'']$. O segundo módulo do mesmo programa é representado na Figura 2.3, onde aparecem as rotinas de solução de fluxo de carga CA.

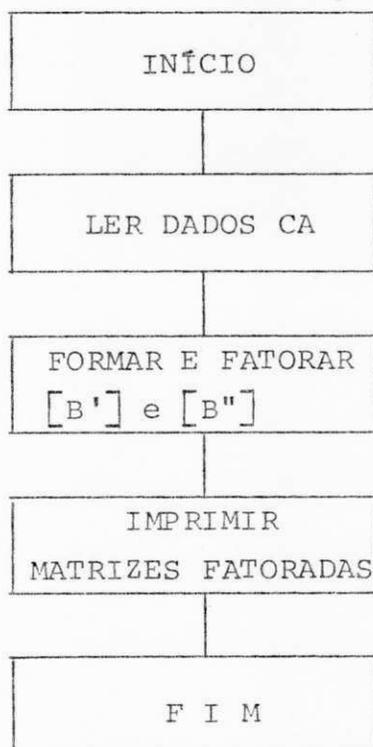


FIGURA 2.2 - Diagrama de blocos do programa Fonte CA - módulo um.

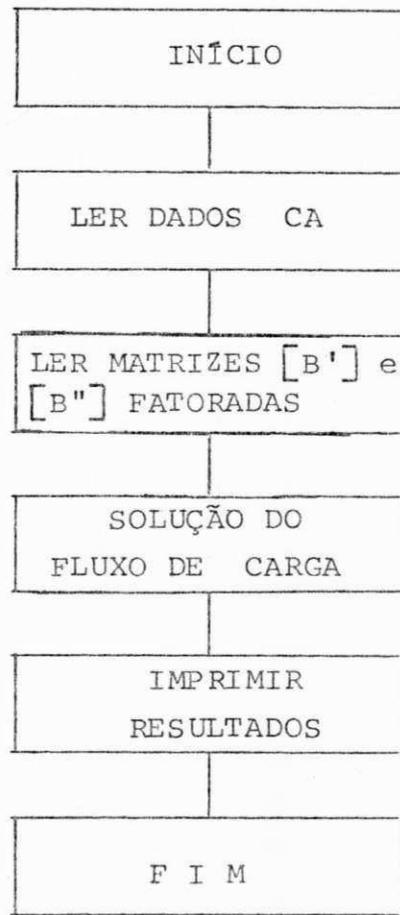


FIGURA 2.3 - Diagrama de blocos do programa Fonte CA - módulo dois.

O tempo para cada um dos sistemas, radiais e malhados, simulados no microcomputador, com o programa de fluxo de carga CA, é mostrado nos gráficos das Figuras 2.4 e 2.5.

Nestes gráficos podemos observar que o tempo máximo de simulação para as redes estudadas foi de 2 minutos e 32 segundos. Este valor não inviabiliza a execução das simulações no microcomputador.

Um fator importante a registrar é o seguinte: o tempo de simulação das redes de potência no microcomputador com as características já descritas no parágrafo 1.2 - Cap. I, nem sempre é maior quanto maior for o número de barras

do SP. Isto é, o tempo de simulação não é diretamente proporcional ao número de barras do SP, mas depende dos parâmetros físicos de cada sistema.

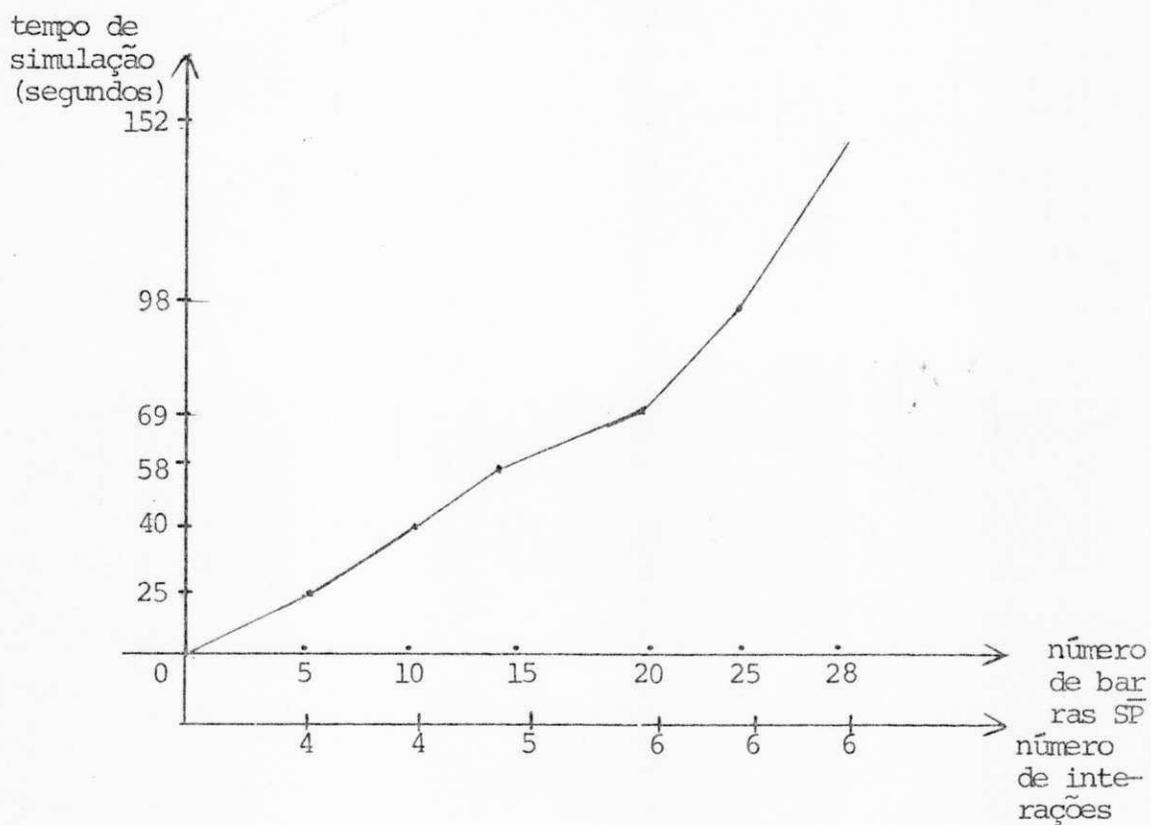


FIGURA 2.3 - Tempos de simulação SP radiais.

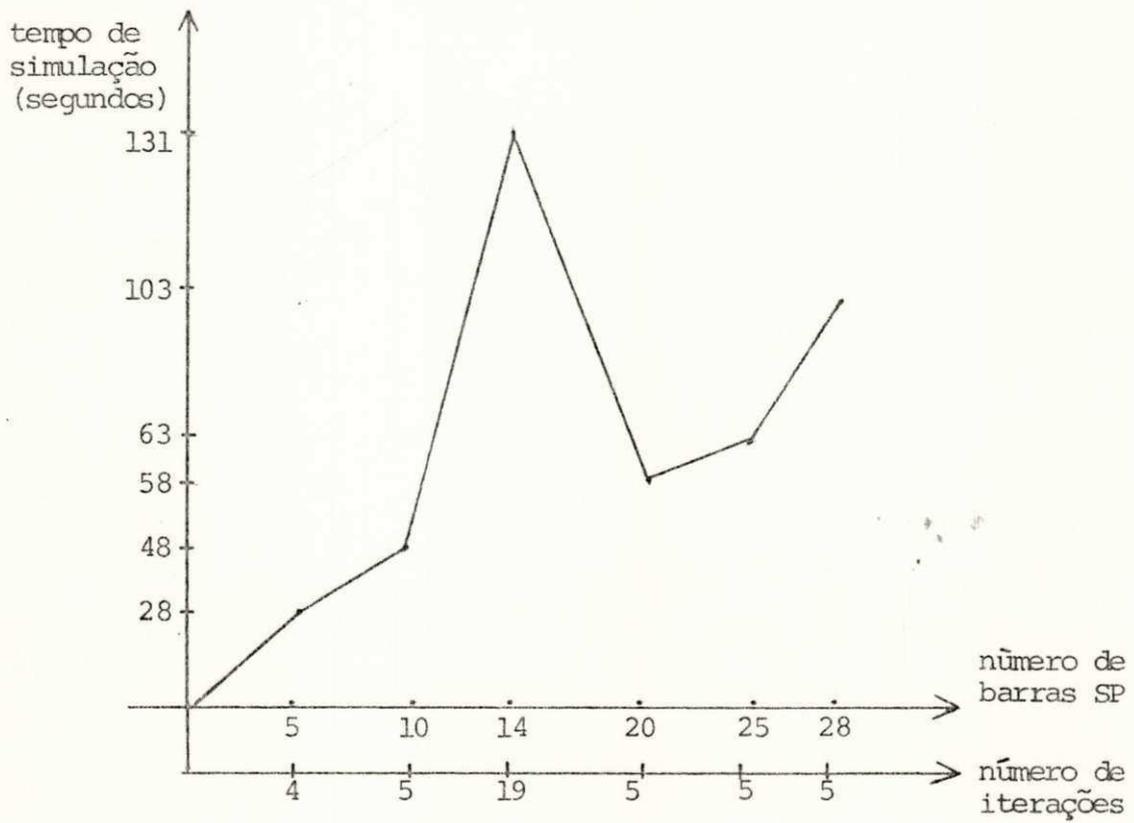


FIGURA 2.5 - Tempos de simulação SP malhados.

As figuras 2.6 e 2.7 mostram o tempo de simulação x números de barras do SP, para cada sistema simulado, radial e malhado, com o programa fonte CA executado em dois módulos.

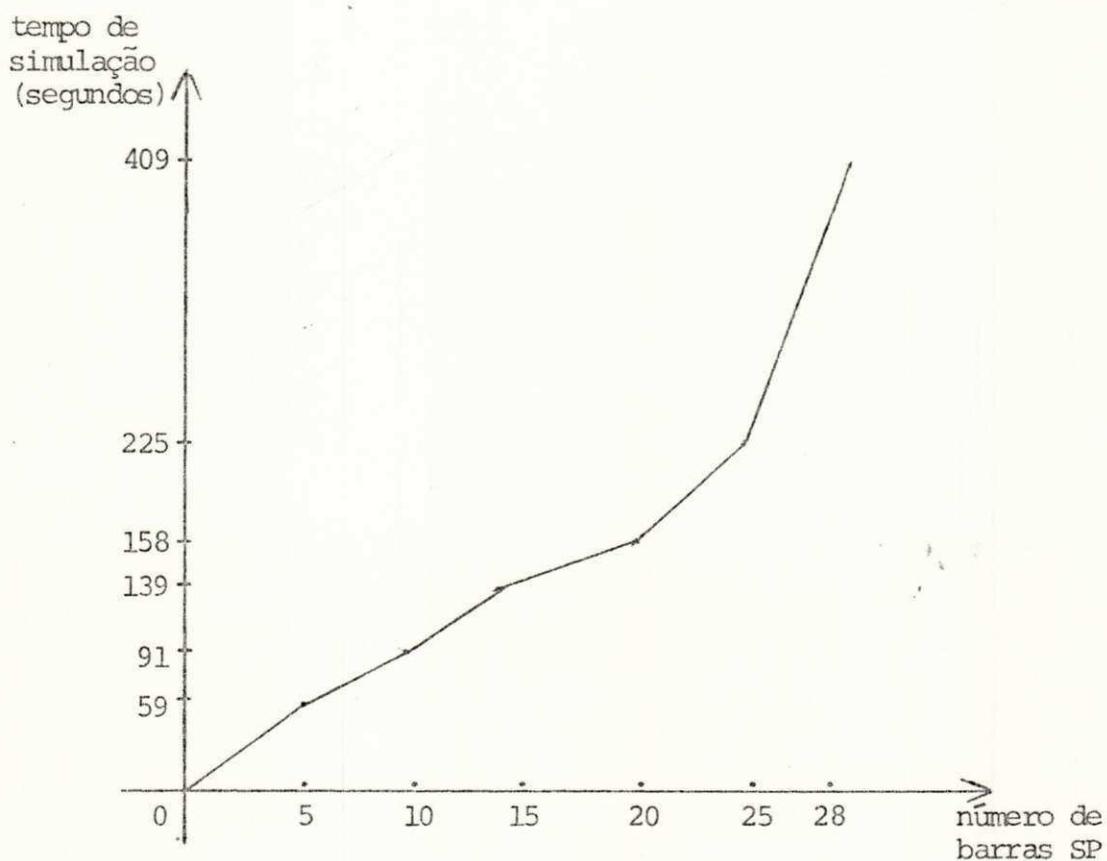


FIGURA 2.6 - Tempos para SP radiais simulados com o programa CA em dois módulos.

Podemos observar que o tempo máximo de simulação aumentou para 6 minutos e 49 segundos. Este tempo é obtido somando entre si, os tempos de simulação em cada um dos módulos.

Assim, o acréscimo registrado no tempo de simulação é devido à divisão do programa fonte CA em dois módulos.

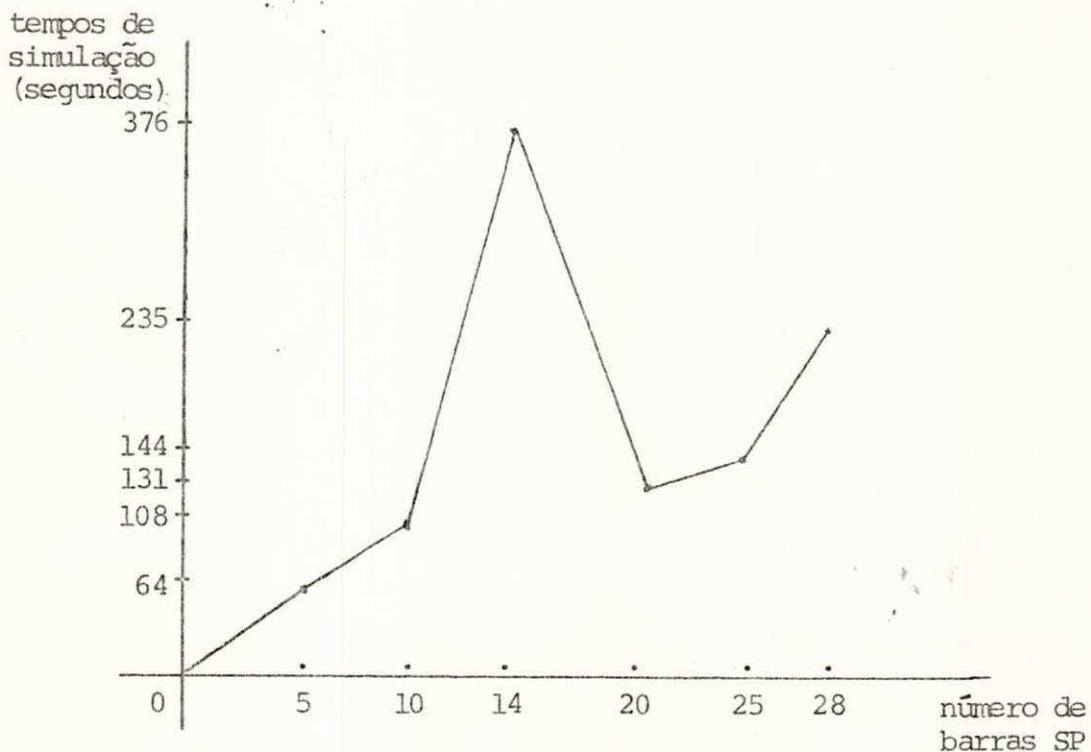


FIGURA 2.7 - Tempos para SP malhados simulados com o programa CA em dois módulos.

Os recursos do sistema operacional DOS-700, permitem modificações rápidas nos arquivos de entrada para processamento de novos casos, garantindo uma ótima interação homem-máquina, e atingindo assim, o terceiro objetivo proposto no começo do parágrafo 2.4.

Para a verificação dos módulos de tensões, ângulos de fase e fluxos de potência nas linhas, os resultados dos principais sistemas simulados, estão comparados com resultados do computador DEC-10 da UFC e com resultados do programa da PECO nas tabelas a seguir.

No caso número um, usamos os dados de um sistema de transmissão de energia, típico da Região Nordeste do Brasil. Este sistema apresenta configuração em anel, como pode ser visto no diagrama unifilar da Figura 2.8.

Os resultados em ambos, computador DEC-10 e microcomputador CP-700, foram obtidos com resíduos de potência

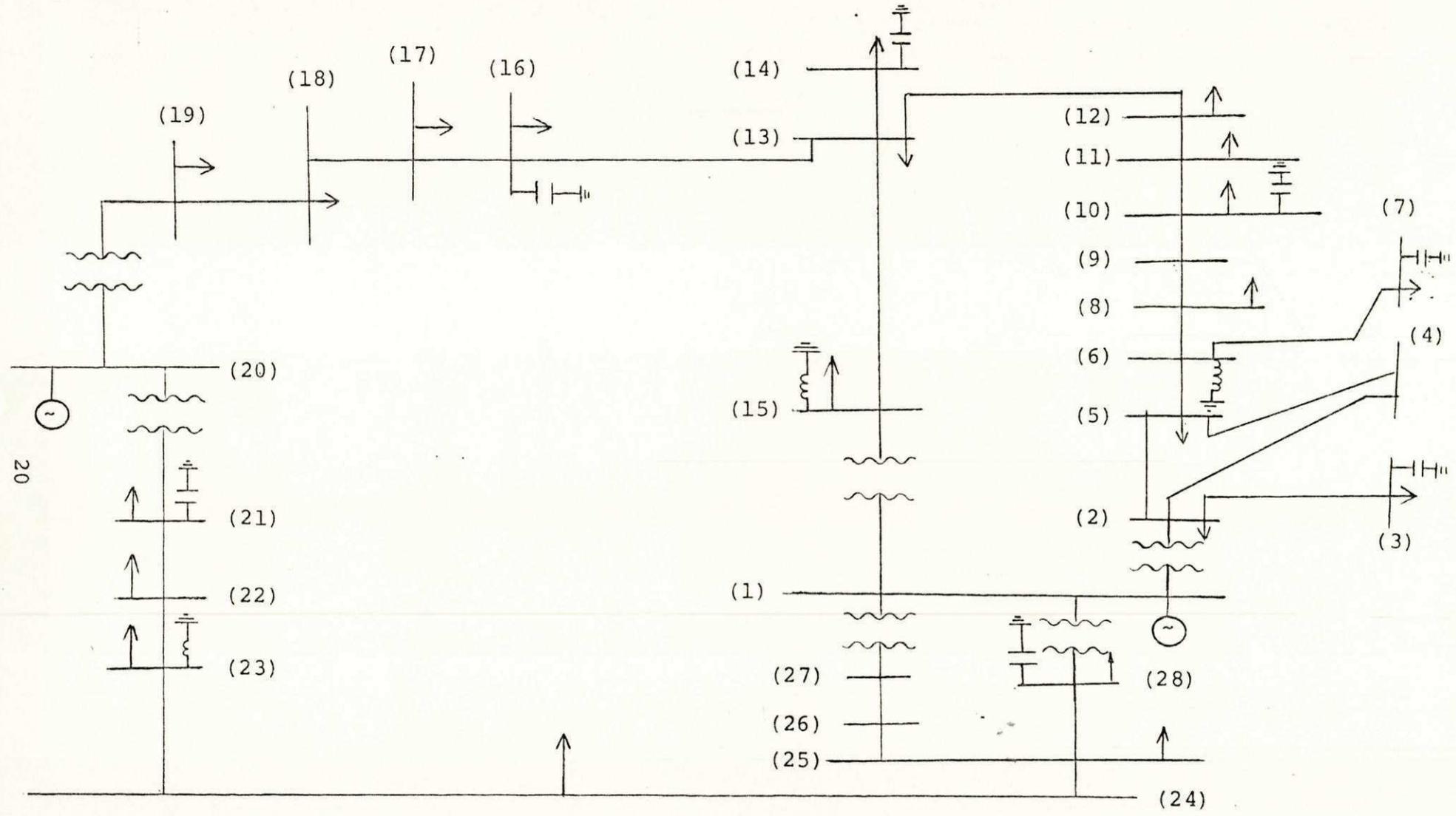


FIGURA 2.8 - Diagrama Unifilar - Sistema de Transmissão.

ativa e reativa de 10^{-3} MW/MVAR. Desta forma, o erro em cada barra do sistema é minimizado, visto que, para esse sistema a menor carga ativa é de 9,6 MW e a menor carga reativa é de 2,5 MVAR (apêndice II).

O número de iterações necessárias para a convergência, com os resíduos especificados foi o seguinte: no computador DEC-10, 6 (seis) e no microcomputador CP-700, também 6 (seis).

Os resultados são mostrados nas tabelas 2.1 e 2.2.

Na tabela 2.1 podemos observar que somente o ângulo de fase da barra nº 16, apresenta diferença entre os resultados dos dois computadores. Esta diferença é na terceira casa decimal, e assim sendo é da ordem de milésimos de graus, não representando valor de ordem prática.

As causas da diferença já mencionada são as seguintes: 1) os cálculos são efetuados no microcomputador com uma palavra de 8 bits, enquanto no DEC-10 a palavra utilizada é de 36 bits; 2) as variáveis envolvidas nos cálculos do ângulo de fase da barra nº 16, através da equação (2.15). Estas variáveis são as resistências, reatâncias, susceptâncias totais das linhas 16 para 13 e 16 para 17, diferenças angulares entre as barras 16 e 13 e entre 16 e 17, e módulos de tensões nas barras de números 13, 16 e 17.

SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Nº da Barra	Resultados de módulos de tensões (P.U.)		Resultados de ângulos de fase (graus)	
	DEC-10	CP-700	DEC-10	CP-700
1	1.0600	1.0600	0.000	0.000
2	1.0200	1.0200	-14.576	-14.576
3	1.0100	1.0100	-22.117	-22.117
4	1.0129	1.0129	-19.943	-19.943
5	1.0100	1.0100	-26.518	-26.518
6	1.0200	1.0200	-33.510	-33.510
7	1.0000	1.0000	-41.803	-41.803
8	1.0100	1.0100	-36.834	-36.834
9	1.0122	1.0122	-38.706	-38.706
10	1.0161	1.0161	-41.094	-41.094
11	1.0200	1.0200	-41.608	-41.608
12	1.0211	1.0211	-39.948	-39.948
13	1.0300	1.0300	-36.436	-36.436
14	1.0000	1.0000	-42.976	-42.976
15	1.0400	1.0400	-8.676	-8.676
16	0.9925	0.9925	-41.995	-41.994
17	1.0000	1.0000	-41.154	-41.154
18	1.0200	1.0200	-38.879	-38.879
19	1.0492	1.0492	-26.806	-26.806
20	1.0500	1.0500	-24.073	-24.073
21	1.0433	1.0433	-26.557	-26.557
22	1.0324	1.0324	-27.912	-27.912
23	1.0200	1.0200	-28.085	-28.085
24	0.9968	0.9968	-17.291	-17.291
25	1.0000	1.0000	-15.843	-15.843
26	1.0115	1.0115	-11.913	-11.913
27	1.0532	1.0532	-2.578	-2.578
28	1.0480	1.0480	-4.958	-4.958

Tabela 2.1

Na tabela anterior pode ser observado que os ângulos de fase e os módulos das tensões são truncados respectivamente na terceira e quarta casa decimal. Isto foi feito porque quando ocorre diferença de dígitos na terceira casa dos módulos de tensões o erro já é da ordem de volts, com as tensões em k volts, sendo o algarismo duvidoso aquele da quarta casa decimal. E no caso dos ângulos a diferença nos resultados da segunda casa decimal já é da ordem de centésimos de graus com o terceiro algarismo aparecendo como o duvidoso.

Portanto a partir da quarta casa decimal dos módulos de tensões e da terceira casa decimal dos ângulos de fase, os valores não possuem mais significado prático.

A diferença entre dígitos no DEC-10 no CP-700 deve ser maior a partir das casas decimais não mostradas na tabela 2.1.

Os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos que apresentaram diferença nos resultados entre o DEC-10 e o CP-700 são mostrados na tabela 2.2. Nesta podemos observar diferenças na terceira casa decimal dos fluxos de potência, sendo estas diferenças da ordem de 10^{-3} MW/MVAR e portanto não representam valores de ordem prática para esse caso.

O tamanho das palavras utilizadas pelos dois computadores e também as variáveis envolvidas nos cálculos dos fluxos de potência ativa e reativa, como mostram as equações (2.21) e (2.22), são responsáveis pelas diferenças já comentadas.

$$P_{ij} = \frac{1}{R^2 + X^2} (R|V_i|^2 - R|V_i||V_j|\cos\phi + X|V_i||V_j|\sin\phi) \quad (2.21)$$

$$Q_{ij} = \frac{1}{R^2 + X^2} (X|V_i|^2 - X|V_i||V_j|\cos\phi - R|V_i||V_j|\sin\phi) \quad (2.22)$$

onde:

$$P_{ij} = \text{fluxo de potência ativa no ramo } i-j$$

SISTEMA DE TRANSMISSÃO					
Barra		Resultados de fluxos de potência nos ramos que apresentaram diferença de resultados entre os dois computadores.			
Emisora	Receptora	DEC-10		CP-700	
		MW	MVAR	MW	MVAR
10	11	13.053	-9.010	13.053	-9.009
11	10	-13.026	8.021	-13.026	8.020
13	12	59.664	-1.779	59.664	-1.778
16	17	-9.424	-4.137	-9.423	-4.137
17	16	9.453	1.488	9.453	1.487
17	18	-28.253	-8.581	-28.253	-8.582
20	21	118.682	20.165	118.682	20.164
1	27	91.286	15.195	91.286	15.198
26	27	-88.520	0.272	-88.520	0.273
24	25	-101.022	7.057	-101.021	7.057
1	28	174.579	30.624	174.579	30.623
1	15	302.357	61.482	302.356	61.482
15	1	-302.357	-14.882	-302.356	-14.882

Tabela 2.2

P_{ij} = fluxo de potência reativa no ramo i-j

$|V_i|$ = módulo da tensão na barra i

$|V_j|$ = módulo da tensão na barra j

ϕ = ângulo de fase entre as duas tensões de barra V_i e V_j

R = resistência do ramo

X = reatância do ramo

Fazendo a resistência R igual a zero, simplifica-se as equações anteriores que tomam a seguinte forma:

$$P_{ij} = \frac{|V_i||V_j|}{X} \sin\phi \quad (2.23)$$

$$Q_{ij} = \frac{1}{X} (|V_i|^2 - |V_i||V_j|\cos\phi) \quad (2.24)$$

Usando essas equações é possível enfatizar a dependência dos cálculos dos fluxos de potência com a reatância dos ramos e com a palavra do microcomputador.

Seja por exemplo o ramo da barra 1 para a 15 (tabela 2.2), que é um transformador (apêndice II), Utilizando a equação (2.23), e sabendo que a representação no microcomputador é de seis casas decimais, teremos no numerador um ΔV com a última casa decimal representada por 10^{-6} .

No denominador da mesma equação (2.23), a última casa decimal da reatância é representada como 10^{-3} . Logo, teremos a última casa decimal do fluxo de potência ativa P_{ij} representada pelo quociente $10^{-6}/10^{-3}$ cujo valor é 10^{-3} .

Portanto a diferença entre resultados de fluxos de potência no DEC-10 e no CP-700 acontece na terceira casa decimal.

É importante destacar que o truncamento no terceiro dígito, após a vírgula, dos fluxos de potência, possibilita avaliar melhor as diferenças nos resultados dos computadores no caso de sistemas de potência onde aparecem cargas com valores em Kwatts.

Os resultados para os casos número dois e número três, estão nas tabelas 2.3, 2.5 (módulos de tensões e ângulos de fase), 2.4 e 2.6 (fluxos de potência ativa e reativa).

Os diagramas unifilar dos sistema testados nos casos citados, encontram-se nas figuras 2.9 e 2.10.

Como pode-se observar nas mesmas, o sistema de distribuição é radial e o sistema teste do IEEE tem uma configuração em anel.

Para o sistema de distribuição, com um valor da menor carga ativa de 1 Kw e da menor carga reativa de 0,6 MVAR, especificou-se resíduos de potência ativa e reativa de 10^{-3} MW/MVAR.

No sistema do IEEE a menor carga ativa é de 3,5 MW e a menor carga reativa é de 1,6 MW, e os resíduos especificados foram de 10^{-2} MW/MVAR. Isto em virtude da não convergência para este sistema (IEEE) com resíduos de 10^{-3} MW/MVAR no microcomputador. No DEC-10 obteve-se convergência para esse mesmo sistema com resíduos de até 10^{-4} MW/MVAR em 30 iterações.

O número de iterações que satisfizeram as tolerâncias especificadas nos sistemas citados foi o seguinte: 1) caso número dois - sistema de distribuição, no computador DEC-10, 6 (seis) e no microcomputador, 6 (seis); 2) caso número três - sistema do IEEE, no DEC-10, 19 (dezenove) e no microcomputador CP-700, também 19 (dezenove).

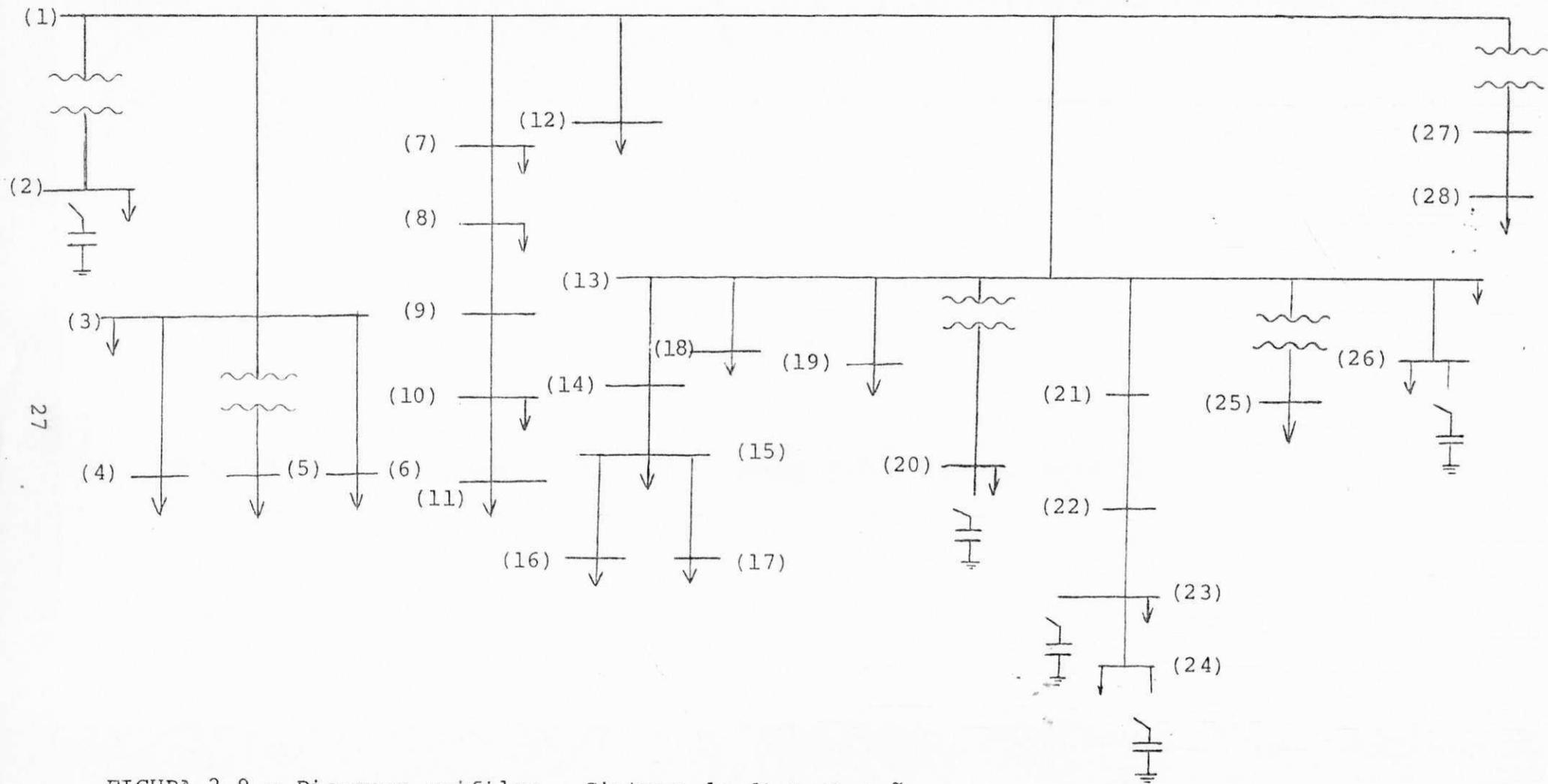


FIGURA 2.9 - Diagrama unifilar - Sistema de distribuição.

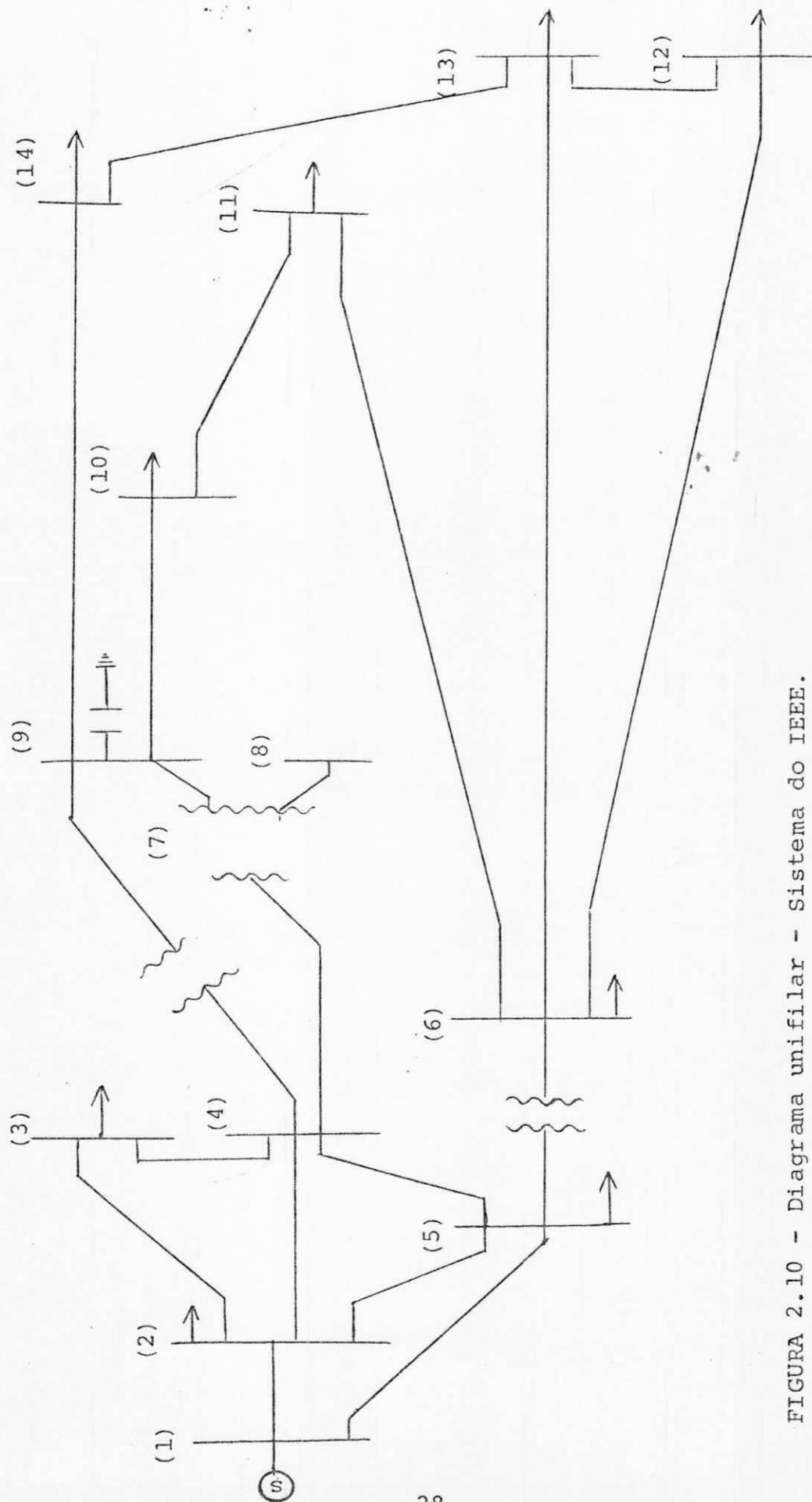


FIGURA 2.10 - Diagrama unifilar - Sistema do IEEE.

Na tabela 2.3 podemos observar diferença na terceira casa decimal do ângulo de fase da barra nº 16 e na tabela 2.4, diferenças nas terceiras casas decimais dos fluxos de potência ativa e reativa entre os resultados do computador DEC-10 e do CP-700.

As causas dessas diferenças são idênticas as já analisadas no caso número um.

SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO				
Nº de Barra	Resultados de módulos de tensões (P.U.)		Resultados de ângulos de fase (graus)	
	DEC-10	CP-700	DEC-10	CP-700
1	1.0140	1.0140	0.000	0.000
2	1.0037	1.0037	-2.486	-2.486
3	1.0001	1.0001	-1.550	-1.550
4	0.9992	0.9992	-1.666	-1.666
5	0.9911	0.9911	-4.789	-4.789
6	0.9939	0.9939	-1.980	-1.980
7	1.0011	1.0011	-1.445	-1.445
8	0.9986	0.9986	-1.545	-1.545
9	1.0012	1.0012	-1.676	-1.676
10	0.9868	0.9868	-3.073	-3.073
11	0.9857	0.9857	-3.706	-3.706
12	1.0093	1.0093	-0.338	-0.338
13	1.0090	1.0090	-1.198	-1.198
14	1.0135	1.0135	-3.109	-3.109
15	0.9905	0.9905	-8.599	-8.599
16	0.9792	0.9792	-9.428	-9.427
17	0.9547	0.9547	-9.664	-9.664
18	1.0055	1.0055	-1.394	-1.394
19	1.0089	1.0089	-1.207	-1.207
20	1.0041	1.0041	-5.299	-5.299
21	1.0095	1.0095	-1.444	-1.444
22	1.0078	1.0078	-1.831	-1.831
23	0.9773	0.9773	-3.559	-3.559
24	0.9614	0.9614	-4.413	-4.413
25	0.9885	0.9885	-3.090	-3.090
26	0.9977	0.9977	-2.071	-2.071
27	1.0137	1.0137	-0.018	-0.018
28	1.0031	1.0031	-0.974	-0.974

Tabela 2.3

SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO					
Barra		Resultados de fluxos de potência nos ramos que apresentaram diferença de resultados entre os dois computadores.			
Emisora	Receptora	DEC-10		CP-700	
		MW	MVAR	MW	MVAR
1	2	11.200	2.891	11.200	2.890
1	3	62.565	11.846	62.565	11.845
3	1	-62.053	-13.957	-62.053	-13.956
3	4	19.011	3.047	19.011	3.046
4	3	-19.000	-3.100	-18.999	-3.100
1	7	20.075	-0.980	20.075	-0.981
9	7	-7.793	4.033	-7.792	4.033
15	14	-13.145	-1.445	-13.145	-1.444
13	19	1.000	0.224	1.000	0.222
13	21	6.294	-2.451	6.294	-2.452
22	21	-6.266	0.678	-6.265	0.678
23	22	-6.062	0.297	-6.061	0.297
1	27	4.401	2.786	4.400	2.785
27	1	-4.400	-2.802	-4.399	-2.803

Tabela 2.4

Os resultados obtidos com o sistema do IEEE encontram-se nas tabelas 2.5 e 2.6.

No caso dos módulos de tensões e ângulos de fase, não foi detectada nenhuma diferença entre os resultados do DEC-10 e do CP-700 (tabela 2.5).

SISTEMA TESTE DO I.E.E.E.				
Nº da Barra	Resultados de módulos de tensões (P.U.)		Resultados de ângulos de fase (graus)	
	DEC-10	CP-700	DEC-10	CP-700
1	1.0600	1.0600	0.000	0.000
2	1.0450	1.0450	-4.983	-4.983
3	1.0100	1.0100	-12.726	-12.726
4	1.0187	1.0187	-10.342	-10.342
5	1.0208	1.0208	-8.776	-8.776
6	1.0700	1.0700	-14.829	-14.829
7	1.0625	1.0625	-13.666	-13.666
8	1.0900	1.0900	-13.666	-13.666
9	1.0572	1.0572	-15.314	-15.314
10	1.0521	1.0521	-15.313	-15.313
11	1.0575	1.0575	-15.302	-15.302
12	1.0552	1.0552	-15.666	-15.666
13	1.0506	1.0506	-15.731	-15.731
14	1.0364	1.0364	-16.494	-16.494

Tabela 2.5

Nos fluxos de potência ativa e reativa (tabela 2.6), novamente, as diferenças aparecem na terceira casa decimal e as causas das mesmas são idênticas às do caso número um.

Para validar os resultados obtidos no microcomputador frente a um computador de grande porte, usando um programa comercial do porte do Philadelphia Electric Company Power Flow Program são comparados nas tabelas 2.7 e 2.8 resultados obtidos nos mesmos.

SISTEMA TESTE DO I.E.E.E.

Barra		Resultados de fluxos de potência nos ramos que apresentaram diferença de resultados entre os dois computadores.			
Emis_sora	Recep_tora	DEC-10		CP-700	
		MW	MVAR	MW	MVAR
2	1	-152.587	27.677	-152.586	27.677
2	3	73.249	3.559	73.248	3.559
4	2	-54.593	3.520	-54.594	3.520
5	1	-72.723	2.784	-72.723	2.785
5	4	63.003	-14.774	63.003	-14.775
6	5	-42.591	-7.064	-42.590	-7.064
5	6	42.591	11.787	42.590	11.787
6	11	6.443	3.664	6.443	3.663

Tabela 2.6

Deve-se ressaltar que o programa da PECO utiliza o método de solução de Newton-Raphson, e possui três critérios de convergência:

- 1º) O resíduo absoluto por barra é menor que uma determinada tolerância.
CONVERGENCE CRITERION-BUS ABSOLUTE MISMATCH.
- 2º) O resíduo absoluto total (soma dos resíduos das barras) é menor que determinada tolerância.
CONVERGENCE CRITERION- TOTAL ABSOLUTE MISMATCH.
- 3º) Os valores das correções nas tensões e ângulos de todas as barras são muito pequenos (10^{-5} p.u, para os módulos de tensões e 10^{-4} p.u, para os ângulos de fase. Esses valores não podem ser alterados pelo usuário.
CONVERGENCE CRITERION - VOLTAGE CORRECTION SIGNIFICANCE

Ao fim de cada iteração o programa examina os três critérios, considerando o caso convergido assim que qualquer um deles for atingido.

O sistema de transmissão - caso número um, foi utilizado na comparação entre os resultados do CP-700 e do Philadelphia Power Flow Program.

Os resíduos de potência ativa e reativa especificados como tolerância para os dois programas utilizados foram de 10^{-3} MW/MVAR.

O Programa da PECO convergiu pelo critério da volta ge correction significance.

Na tabela de resíduos emitida no relatório de saída do referido programa, as barras de números 12, 21, 26, 27 e 28 apresentaram resíduos de potência reativa maiores que 10^{-3} MVAR, e a barra número 12 apresentou resíduo de potência ativa maior que 10^{-3} MW.

Podemos observar na tabela 2.7, que os resultados de módulos de tensões e ângulos de fase, não diferem em nenhuma casa decimal mostrada na referida tabela.

SISTEMA DE TRANSMISSÃO				
Nº de Barra	Resultados de módulos de tensões (P.U.)		Resultados de ângulos de fase (graus)	
	PECO	CP-700	PECO	CP-700
1	1.060	1.060	0.0	0.0
2	1.020	1.020	-14.6	-14.6
3	1.010	1.010	-22.1	-22.1
4	1.013	1.013	-19.9	-19.9
5	1.010	1.010	-26.5	-26.5
6	1.020	1.020	-33.5	-33.5
7	1.000	1.000	-41.8	-41.8
8	1.010	1.010	-36.8	-36.8
9	1.012	1.012	-38.7	-38.7
10	1.016	1.016	-41.1	-41.1
11	1.020	1.020	-41.6	-41.6
12	1.021	1.021	-39.9	-39.9

Tabela 2.7

SISTEMA DE TRANSMISSÃO				
Nº de Barra	Resultados de módulos de tensões (P.U.)		Resultados de ângulos de fase (graus)	
	PECO	CP-700	PECO	CP-700
13	1.030	1.030	-36.4	-36.4
14	1.000	1.000	-43.0	-43.0
15	1.040	1.040	-8.7	-8.7
16	0.992	0.992	-42.0	-42.0
17	1.000	1.000	-41.2	-41.2
18	1.020	1.020	-38.9	-38.9
19	1.049	1.049	-26.8	-26.8
20	1.050	1.050	-24.1	-24.1
21	1.043	1.043	-26.6	-26.6
22	1.032	1.032	-27.9	-27.9
23	1.020	1.020	-28.1	-28.1
24	0.997	0.997	-17.3	-17.3
25	1.000	1.000	-15.8	-15.8
26	1.011	1.011	-11.9	-11.9
27	1.053	1.053	-2.6	-2.6
28	1.048	1.048	-5.0	-5.0

Continuação da tabela 2.7

Na tabela 2.8 observa-se diferenças na segunda casa decimal dos fluxos de potência. Essas diferenças são devido aos diferentes tamanhos das palavras dos dois computadores (IBM-4341, 32 bits; CP-700, 8 bits), como também devido a maneira distinta de convergência obtidos nos programas utilizados e das variáveis envolvidas nos cálculos dos fluxos de potência ativa e reativa.

SISTEMA DE TRANSMISSÃO					
Barra		Resultados de fluxos de potência nos ramos que apresentaram diferença de resultados entre os dois computadores			
Emisora	Receptora	PECO		CP-700	
		MW	MVAR	MW	MVAR
2	1	-494.72	-10.92	-494.72	-10.91
5	6	111.87	-36.92	111.87	-36.91
11	12	-39.78	5.86	-39.77	5.86
21	20	-118.68	-14.90	-118.68	-14.91
27	1	-91.29	-11.00	-91.29	-11.01
28	1	-174.58	-15.24	-174.58	-15.25

Tabela 2.8

É importante destacar que os resultados obtidos no microcomputador, para esse caso, são mais precisos que os da Philadelphia Power Flow Program em virtude de que no microcomputador todos os resíduos nas barras satisfizeram a tolerância de 10^{-3} MW/MVAR, e no programa da PECO, esta tolerância em todas as barras não foi alcançada.

Para os sistemas estudados nos casos números dois e três, os resultados também mostraram-se compatíveis com os do programa da Philadelphia e não foram incluídos no trabalho.

2.5 - Conclusões

Este capítulo teve por meta a apresentação das equações clássicas do método desacoplado rápido e a discussão dos resultados de fluxo de carga CA obtidos com um microcomputador de 8 bits e 64 kbytes de memória principal RAM (52 kbytes disponíveis para o usuário).

A estrutura do programa fonte CA no microcomputador, permite somente simulações de sistemas elétricos com até noventa barras e cento e doze ramos.

Os valores de tempo, para os sistemas simulados no microcomputador, não inviabilizam a execução do programa CA no mesmo.

A comparação dos resultados obtidos no CP-700 e no computador DEC-10, e o confronto entre os resultados do programa da PECO e do CP-700, mostraram que as diferenças, nesses resultados não são de ordem prática, e portanto, está provada, a viabilidade do uso de um microcomputador de 8 bits na análise de fluxo de carga CA em sistemas de potência de pequeno e médio porte.

CAPÍTULO III

MODELAGEM E INTEGRAÇÃO DE UM ELO DE CORRENTE CONTÍNUA COM A SOLUÇÃO DO FLUXO DE CARGA DESACOPLADO RÁPIDO.

3.1 - Introdução

Embora a teoria básica dos sistemas trifásicos de retificação e inversão^{5,6} já seja amplamente conhecida nos dias atuais, este capítulo tem por objetivo apresentar os conceitos e equações fundamentais que regem o comportamento dos conversores estáticos, adequando-os à operação de um elo em corrente contínua (ECC).

Uma vez obtida a modelagem dos conversores procede-se à análise operacional do sistema utilizando-se um modo de controle considerado padrão, o qual consiste em controlar corrente no retificador e tensão no inversor. Assim, os subsídios necessários à formulação digital são conhecidos e implementados no sentido de se obter as características operacionais do elo, que são: as potências ativas em ambas as extremidades do elo; as necessidades de potência reativa do sistema CC; tensões contínuas do retificador e inversor; ângulos de disparo dos conversores; ajustes de tapes dos transformadores conversores e ângulos de comutação. Estes resultados não só permitem avaliar a operação do elo, como também fornecem dados necessários à incorporação do ECC no sistema CA.

3.2 - Características do sistema CA-CC

O circuito simplificado de um sistema de transmissão em corrente contínua e dos sistemas CA adjacentes são mostrados na Figura 3.1.

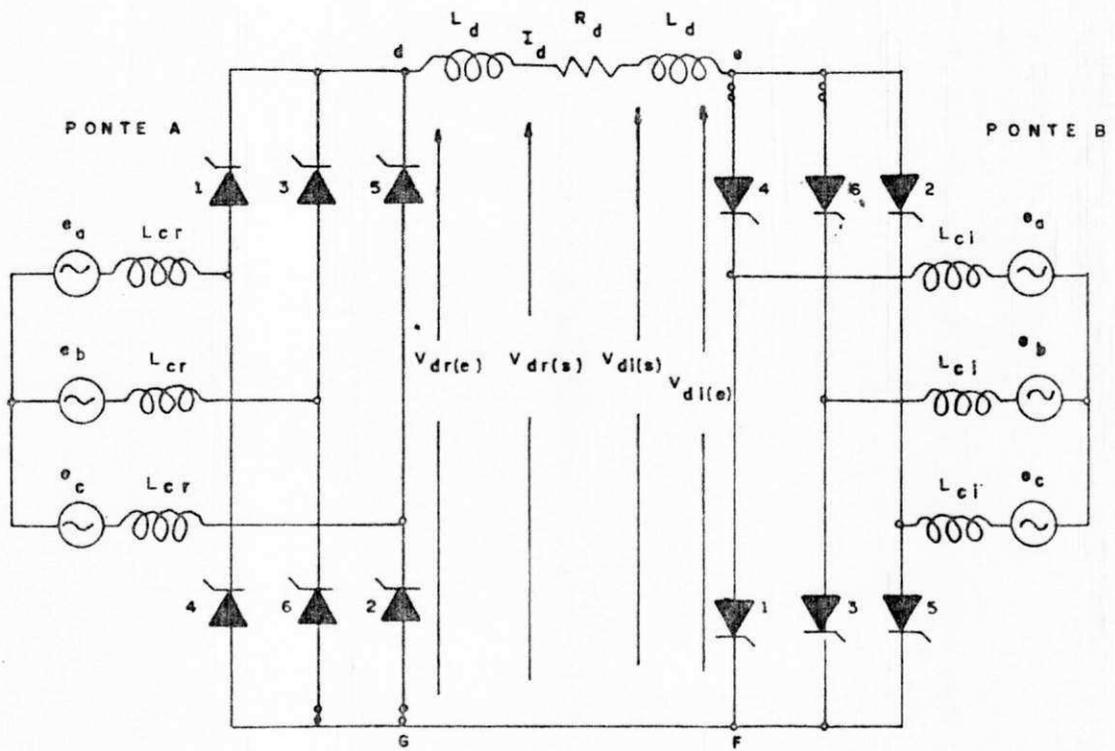


FIGURA 3.1 - Circuito simplificado de um sistema de transmissão CC.

onde:

e_a, e_b, e_c - são as tensões trifásicas do sistema CA adjacentes ao retificador.

e'_a, e'_b, e'_c - são as tensões trifásicas do sistema CA adjacente ao inversor.

O circuito CC, em sua estrutura básica, é estabelecido pelas pontes conversoras A e B, de 6 pulsos, e linha

CC. As pontes A e B são idênticas, apresentando um sentido único para a corrente I_d , de (d) para (e) e de (f) para (g).

As pontes conversoras podem ser ligadas em série (Figura 3.2), ou em paralelo (Figura 3.3), formando pontes de 12 pulsos.

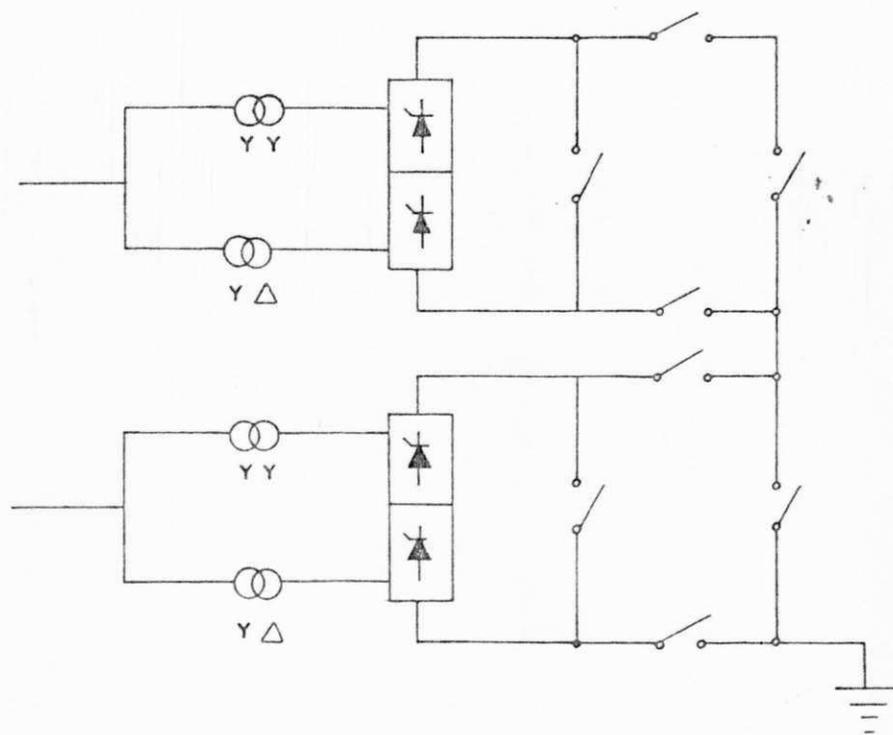


FIGURA 3.2 - Conexão de conversores de 12 pulsos em série.

Se o sistema de transmissão for ainda constituído de duas linhas, um terminal positivo e outro negativo, com o ponto central aterrado, ele é dito bipolar (Figura 3.4).

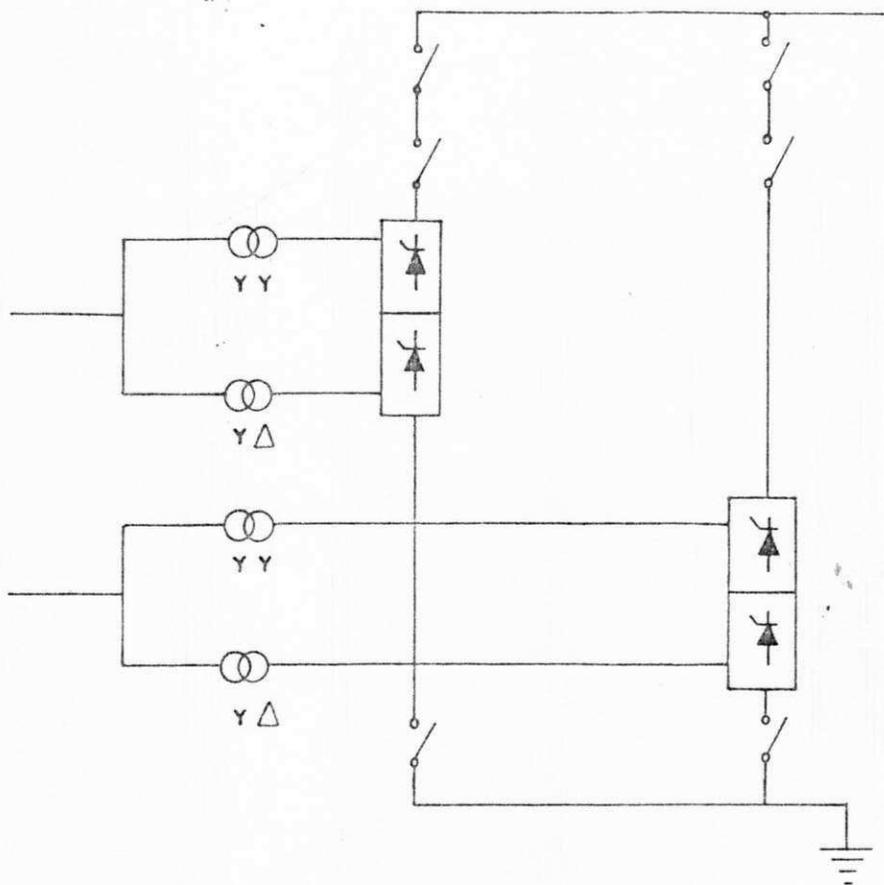


FIGURA 3.3 - Conexão de conversores de 12 pulsos em paralelo.

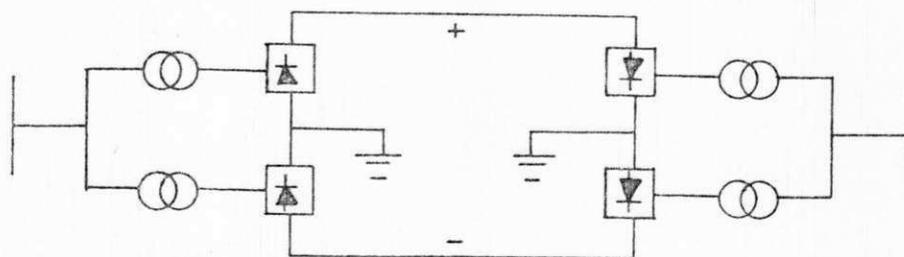


FIGURA 3.4 - Sistema bipolar

A corrente nos dois condutores do sistema bipolar é igual e, neste caso, o solo não conduz energia. Se, no entanto, um dos condutores falhar, o solo será usado como condutor.

A maioria das linhas de transmissão CC em operação no mundo são do tipo bipolar⁴.

As equações desenvolvidas neste trabalho, que definem o comportamento do sistema de transmissão em corrente contínua, são baseadas nas seguintes hipóteses simplificativas:

- (i) A alimentação CA dos conversores, é feita na frequência fundamental através de F.e.m's senoidais e balanceadas.
- (ii) As tensões e correntes CC são perfeitamente filtradas.
- (iii) A ignição dos tiristores ocorre em intervalos iguais a $1/6$ de ciclo.
- (iv) A impedância que representa o sistema CA visto dos terminais dos conversores é considerada como uma indutância L_c , e é, admitida igual a indutância de dispersão dos transformadores que alimentam os conversores.

Assim, desprezam-se os harmônicos existentes, tanto do lado CA, como do lado CC, e, conseqüentemente, os distúrbios por eles ocasionados, tais como instabilidade e ressonâncias harmônicas. Não é objetivo deste trabalho equacionar e estudar tais fenômenos que poderão, entretanto, ser objeto de outros estudos.

3.3 - Análise da ponte conversora não considerando o ângulo de comutação (μ).

A Figura 3.5 mostra o circuito da ponte conversora

e sua conexão ao sistema CA. O circuito CC é estabelecido pelo retificador, linha CC e inversor.

O inversor é também constituído por uma ponte semelhante a do retificador, porém a título de simplificação foi representado (Figura 3.5) em forma de um bloco no centro do qual coloca-se o símbolo do tiristor. Os números colocados junto às válvulas representam a seqüência com que as mesmas são disparadas (início da condução).

As Fems e_a , e_b e e_c (fase-neutro) são dadas por equações do tipo:

$$\begin{aligned} e_a &= E_m \cos (wt + 60^\circ) \\ e_b &= E_m \cos (wt - 60^\circ) \\ e_c &= E_m \cos (wt - 180^\circ) \end{aligned} \quad (3.1)$$

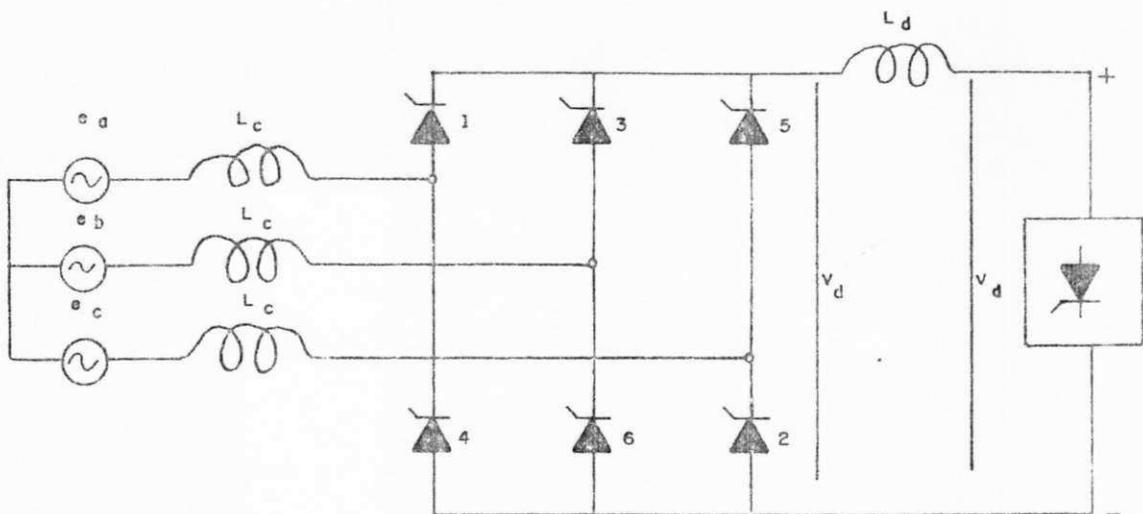


FIGURA 3.5 - Circuito equivalente para a ponte conversora.

As tensões das equações 3.1 correspondem as seguintes tensões entre fases:

$$\begin{aligned}
 e_{ac} &= \sqrt{3} \quad \text{Em } \cos (wt + 30^\circ) \\
 e_{ba} &= \sqrt{3} \quad \text{Em } \cos (wt - 90^\circ) \\
 e_{cb} &= \sqrt{3} \quad \text{Em } \cos (wt + 150^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Estas tensões são representadas na Figura 3.6.

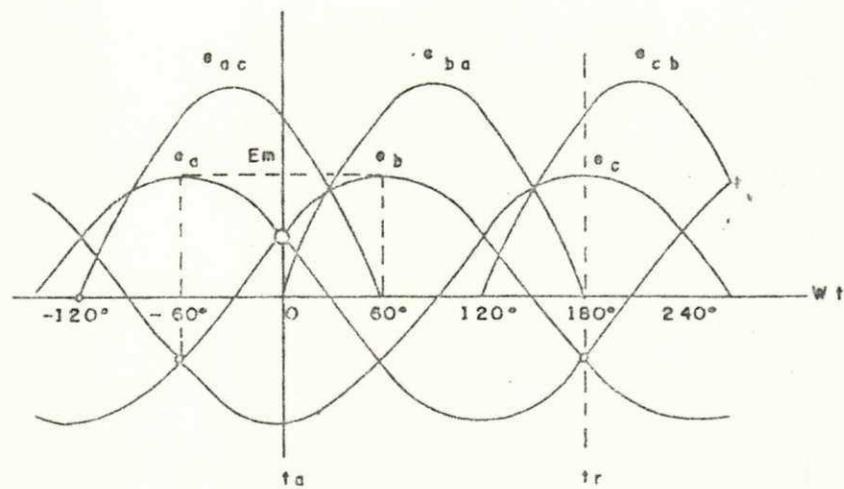


FIGURA 3.6 - Representação das Fems.

Considere as Figuras 3.5 e 3.6 com a análise iniciando-se em um certo instante anterior a t_a . Imediatamente antes de t_a , a válvula nº 1 está conduzindo, isto é, a válvula nº 1 comporta-se como um curto-circuito. Quando t_a é atingido, o anodo da válvula nº 3 tornar-se-á positivo com relação ao anodo da válvula 1. Se as válvulas fossem diodos, a válvula 3 iniciaria a condução quando $t = t_a$, e assumiria a corrente da válvula 1, isto é, a válvula 3 retiraria a válvula 1 de operação. Entretanto, devido ao fato que as válvulas utilizadas são tiristores é possível atrasar o instante do início da comutação. Este efeito é mostrado na Figura 3.7.

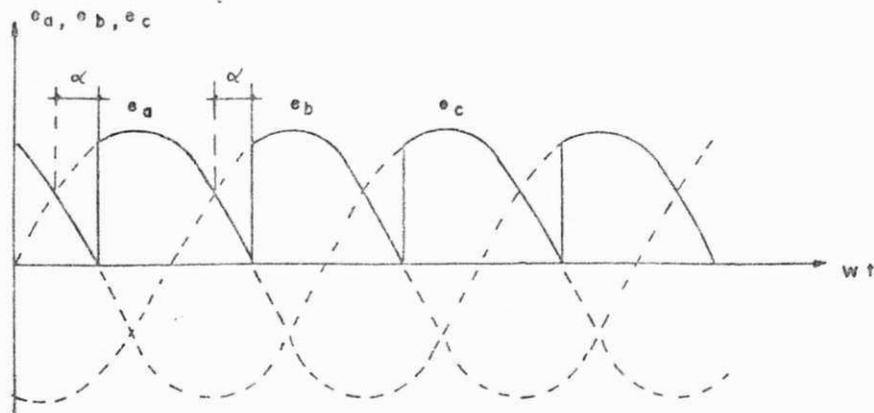


Figura 3.7 - Tensão de saída v_d do conversor para um ângulo de disparo α .

O valor médio da tensão v_d , representado por V_d , para um ângulo de atraso α , pode ser calculado como segue⁶.

$$V_d = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{60^\circ + \alpha}^{120^\circ + \alpha} \sqrt{3} E_m \sin \theta d\theta$$

cujo resultado é:

$$V_d = V_{do} \cos \alpha \quad (3.3)$$

onde:

$$V_{do} = \frac{3 \sqrt{3}}{\pi} E_m \quad (3.4)$$

A tensão CC (V_d) é ilustrada na figura 3.8, mostrando o tipo de onda V_d para diferentes valores de α .

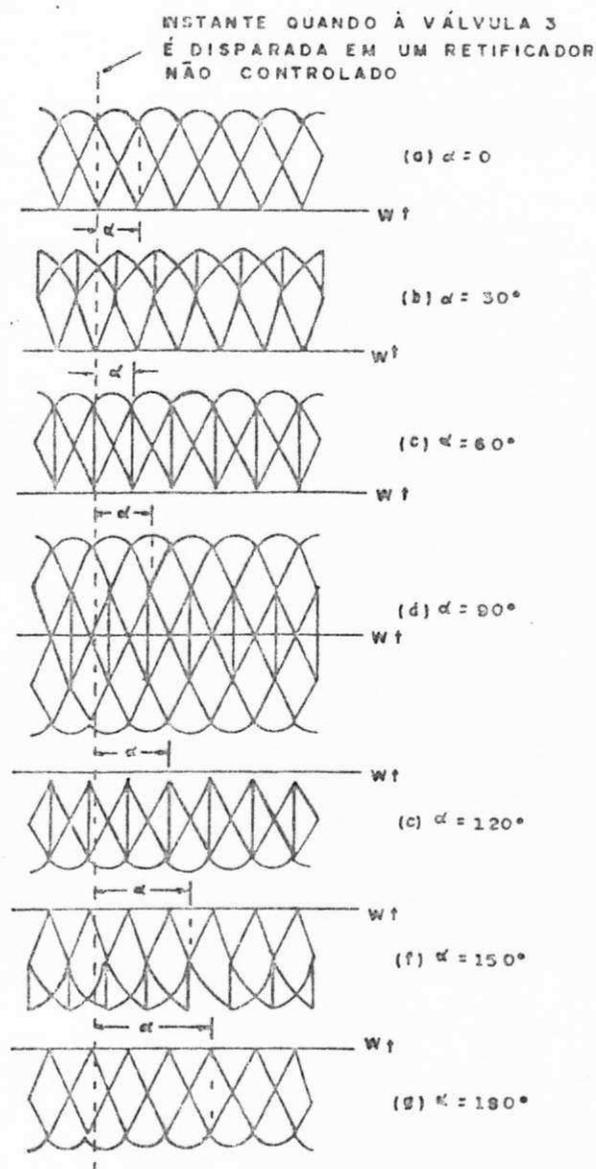


FIGURA 3.8 - Tensão V_d para diferentes α .

Na Figura 3.8 pode-se verificar que o efeito do ângulo de atraso é reduzir o valor da tensão média (V_d), uma vez que $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ o valor de V_d pode variar de V_{do} a $-V_{do}$. Isto é de suma importância quando da necessidade de operar o conversor como um inversor, uma vez que a corrente I_d não pode ter sua direção em sentido oposto ao daquele definido pelas válvulas, uma tensão (V_d) negativa em conjunto com uma corrente (I_d) positiva representam reversão de potência, em outras palavras, existe uma conversão de CC para CA e

não de CA para CC (como ocorre com os retificadores). Obviamente um conversor não pode operar como inversor sem o auxílio de um sistema de controle de ignição das válvulas.

As correntes CA são constituídas por blocos de correntes, como é mostrado na Figura 3.9.

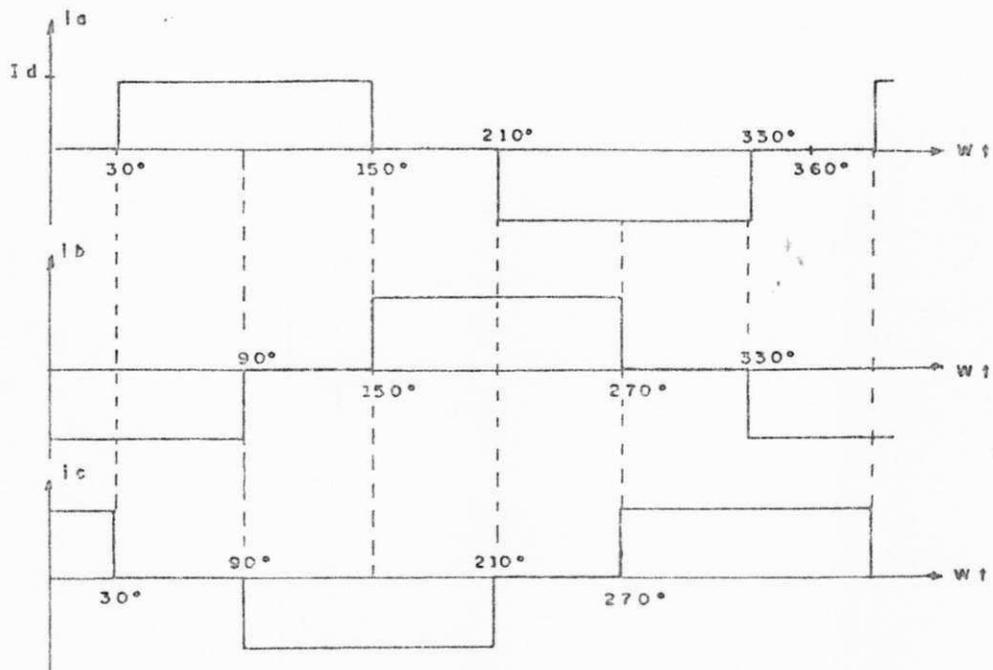


FIGURA 3.9 - Correntes secundárias, de linha de alimentação dos conversores ($\mu=0^\circ$)

Utilizando análise de Fourier, a corrente i_a apresentará a componente fundamental (I_{a1}) com um valor eficaz igual a⁶:

$$I_{a1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (3.5)$$

Utilizando-se as expressões 3.4 e 3.5 e considerando que a potência CA trifásica fornecida a um retificador ou recebida de um inversor, desprezando-se as perdas, é igual à potência CC, obtêm-se:

$$\cos\phi = \cos\alpha$$

Assim, o valor do ângulo entre as tensões e as respectivas componentes fundamentais das correntes, chamado de ângulo de deslocamento de fase (ϕ), será igual ao ângulo de atraso (α).

Observe-se que, embora as potências ativas para $\alpha < 90^\circ$ (retificador) e $\alpha > 90^\circ$ (inversor) tenham sinais contrários, as potências reativas supridas aos conversores possuem o mesmo sinal, isto é, são sempre reativas indutivas.

3.4 - Análise da ponte conversora com ângulo de comutação menor que 60° ($\mu < 60^\circ$).

Devido às indutâncias de comutação inerentes aos sistemas de corrente alternada conectados aos conversores, as correntes não se transferem de um tiristor ao outro instantaneamente, processando-se dentro de um tempo finito, denominado "tempo de comutação", ou por vezes definido em termos de um "ângulo de comutação (μ)".

Em situações normais, μ situa-se entre 10° e 25° mas, em condições de distúrbio, o valor deste ângulo pode ultrapassar 60° , fazendo com que possam existir intervalos em que mais de 3 válvulas estejam conduzindo simultaneamente.

Para a ponte retificadora e a ponte inversora com $\mu < 60^\circ$, as equações matemáticas são mostradas a seguir:

3.4.1 - Análise da ponte conversora, operando como retificador considerando $\mu < 60^\circ$.

Durante a comutação do tiristor 1 para o tiristor 3, por exemplo, o circuito equivalente para uma das pontes é mostrado na Figura 3.10.

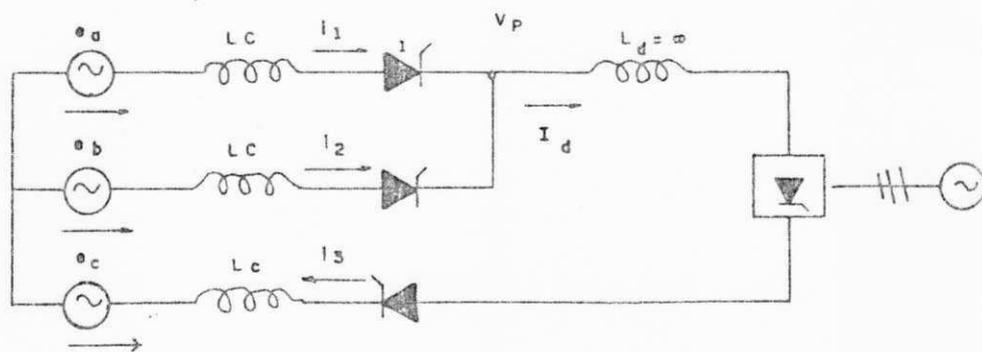


FIGURA 3.10 - Circuito da ponte conversora durante a comutação da válvula 1 para 3.

As tensões pólo-neutro que produzem a tensão V_d durante a comutação são mostradas na Figura 3.11 e na Figura 3.12 é mostrada a tensão pólo-pólo V_d .

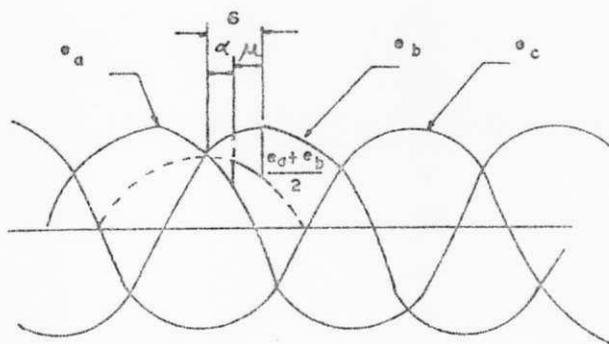


FIGURA 3.11 - Tensões pólo-neutro durante a comutação da válvula 1 para 3.

onde:

$$V_p = \frac{e_a + e_b}{2}$$

$\delta = \alpha + \mu = \text{ângulo de extinção.}$

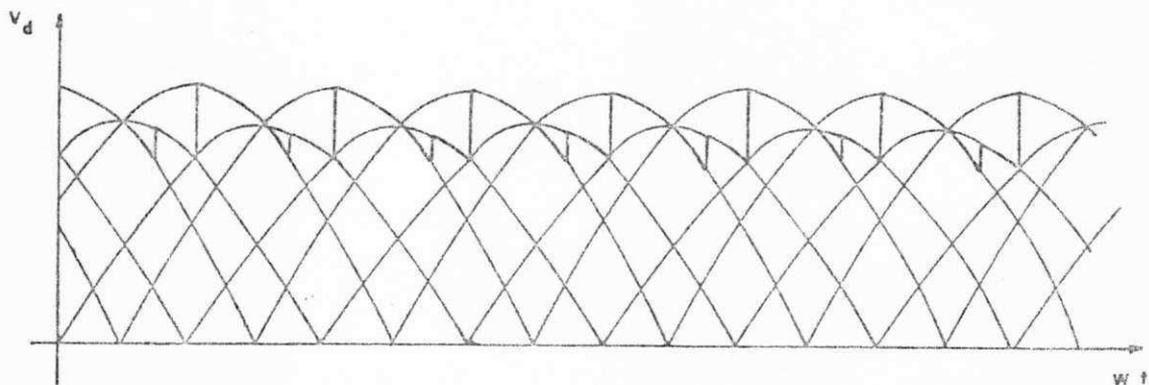


FIGURA 3.12 - Tensão pólo-pólo V_d .

Devido ao efeito das indutâncias, as formas de onda das correntes nas fases não são mais formadas pelos blocos retangulares da Figura 3.9, mas são alteradas com a consideração da indutância de comutação como mostra a Figura 3.13.

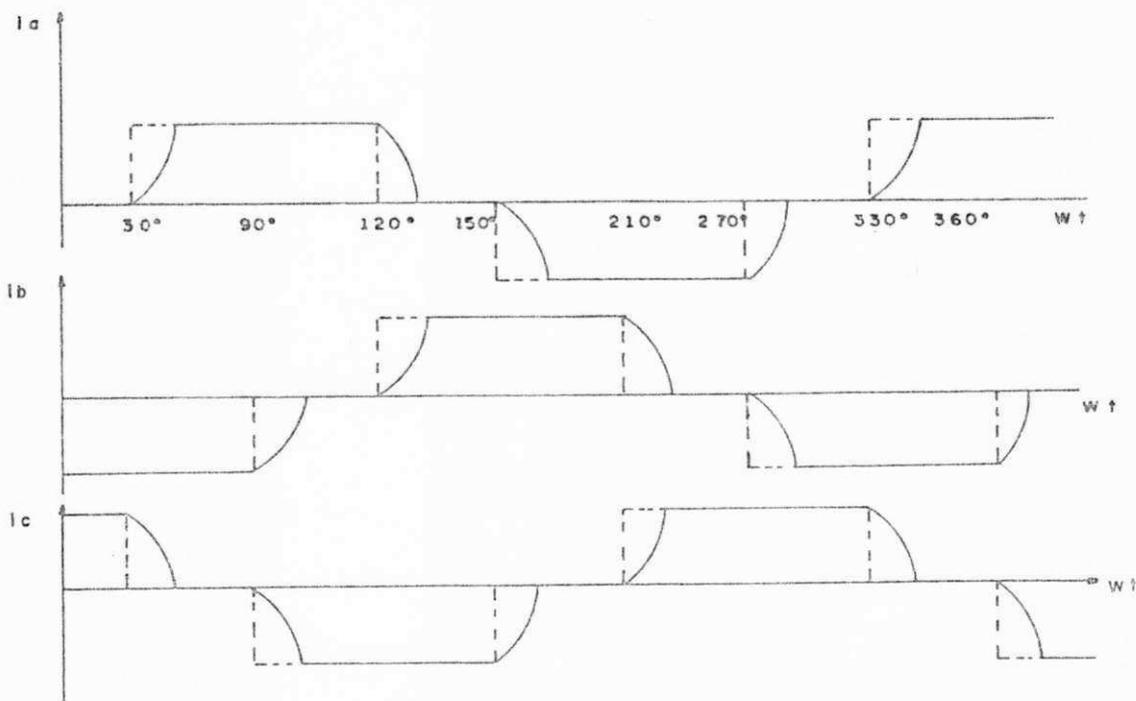


FIGURA 3.13 - Correntes secundárias, de linha de alimentação dos conversores ($\mu > 0^\circ$).

Nota-se, através da Figura 3.11, que, devido à perda de área introduzida pela comutação, há um decréscimo no

valor médio V_d , o qual pode ser determinado através da expressão^{5,6}

$$V_d = V_{do} \cos \alpha - R_c I_d \quad (3.6)$$

onde:

$$R_c = \frac{3\omega L_c}{\pi} = \frac{3X_c}{\pi}$$

O termo R_c , denominado "resistência equivalente de comutação", representa o efeito da reatância de comutação do sistema CA refletido no sistema CC. Como, no sistema de corrente contínua, uma reatância não produziria queda de tensão, esta é representada como resistência, sem no entanto consumir potência.

Assim, a equação (3.6) sugere um circuito equivalente para a ponte conversora operando como retificador, que é mostrado na Figura 3.14.

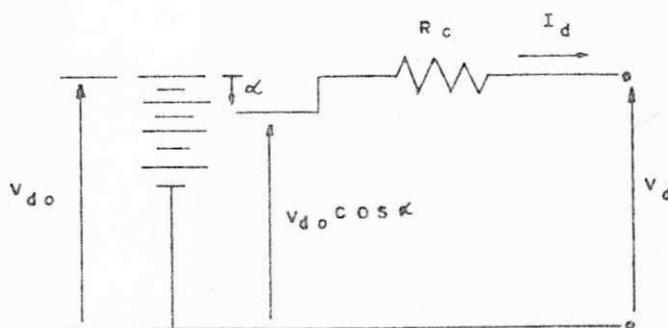


FIGURA 3.14 - Circuito equivalente para o retificador.

A expressão (3.5) relaciona a componente fundamental da corrente CA de linha quando se idealiza a comutação. Se este efeito (comutação) é considerado, a presença do ângulo de comutação (μ) afeta a tensão CC e a forma de onda da corrente CA de linha, o que tende a afetar a relação dada pela expressão (3.5). Todavia, cálculos efetuados atra-

vés de tratamento matemático exato, mostram que para $\mu < 30^\circ$ os erros cometidos em continuar empregando a expressão 3.5, seriam da ordem de 1,1% e da ordem de 4,3% para $30^\circ < \mu < 60^\circ$. Assim, a utilização da expressão (3.5) pode ser mantida sem sacrifício significativo de precisão⁶.

O fator de potência no retificador pode ser calculado através da expressão^{5,6}

$$\cos \phi_r = \frac{\cos \alpha + \cos \delta}{2} \quad (3.7)$$

3.4.2 - Análise da ponte conversora operando como inversor considerando $\mu < 60^\circ$.

Para o retificador, o ângulo de atraso foi definido como o ângulo pelo qual a ignição é atrasada, a partir do ângulo de comutação natural. O ângulo δ , de extinção, é também medido a partir deste instante, até o ponto em que a comutação termina. Tal convenção poderia ser utilizada para o caso do inversor mas, na prática, definem-se para o inversor dois novos ângulos:

$$\beta = \pi - \alpha = \text{ângulo de ignição do inversor}$$

$$\gamma = \pi - \delta = \text{ângulo de extinção do inversor.}$$

A Figura 3.15 ilustra estes ângulos, para retificador e inversor, quando da comutação da válvula 1 para a válvula 3.

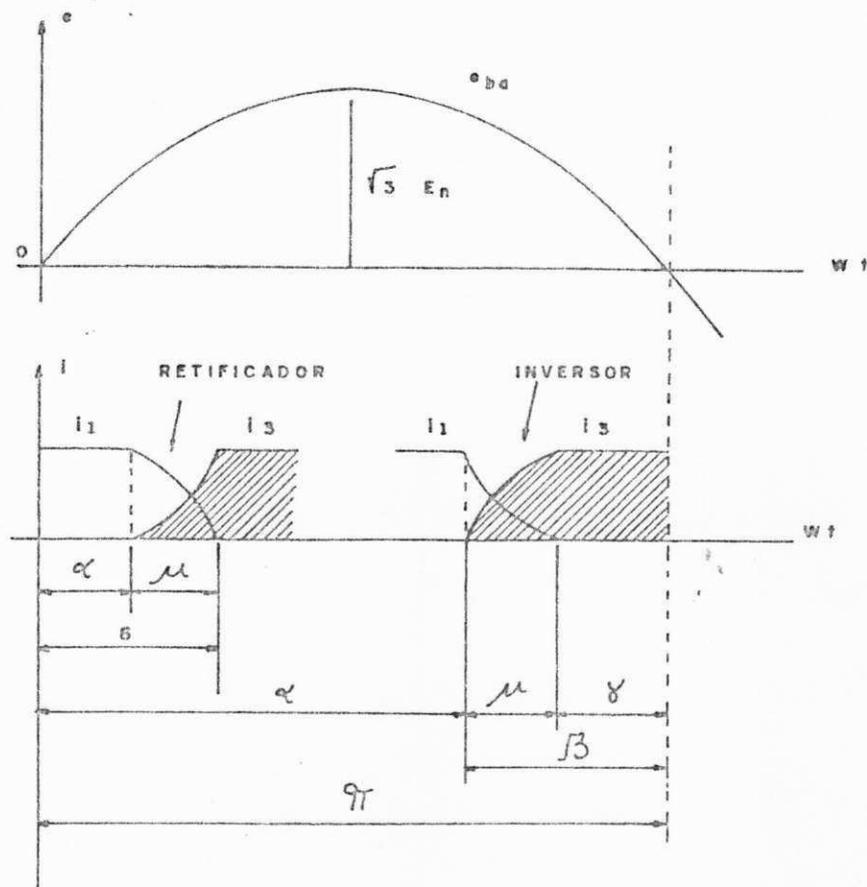


FIGURA 3.15 - Convenção dos ângulos do retificador e do inversor (comutação da válvula 1 para válvula 3).

A equação para o cálculo de V_d de um conversor operando como inversor é dada por ^{5,6}:

$$V_d = - V_{do} \cos\beta - R_c I_d \quad (3.8)$$

O sinal (-) indica a operação como inversor, podendo ser omitido, desde que se considere a tensão V_{di} se oposto à corrente I_d .

$$V_d = V_{do} \cos\beta + R_c I_d \quad (3.9)$$

Em termos de $\cos\gamma$ a expressão anterior aparece como ^{5,6}:

$$V_d = V_{do} \cos \gamma - R_c I_d \quad (3.10)$$

Pode-se obter, de forma similar, a expressão (3.7), a seguinte expressão para o fator de potência no inversor^{5,6}:

$$\cos \phi_i = \frac{\cos \gamma + \cos \beta}{2} \quad (3.11)$$

Um circuito equivalente para o inversor é apresentado na figura 3.16, e o circuito equivalente total para o sistema de transmissão CC é representado na figura 3.17. É conveniente ressaltar que todo o equacionamento prévio refere-se à operação dos conversores sob regime permanente. Assim sendo, o circuito equivalente da figura 3.17 refere-se a esta condição de funcionamento.

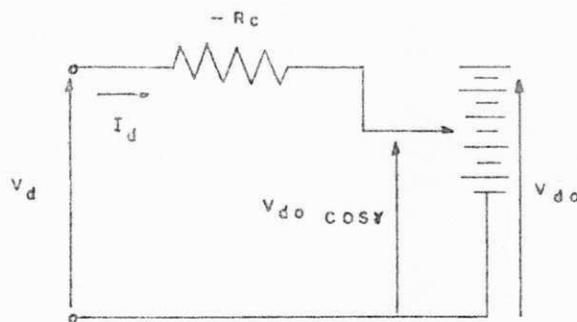


Figura 3.16 - Circuito equivalente para o inversor.

Assim, o retificador transforma tensão alternada em contínua positiva, variável com o ângulo de ignição α , se comportando, visto do inversor, como um gerador em corrente contínua. O inversor também transforma tensão alternada em contínua, mas oposta em sentido à corrente CC, se comportando, visto do retificador, como uma f.c.e.m.

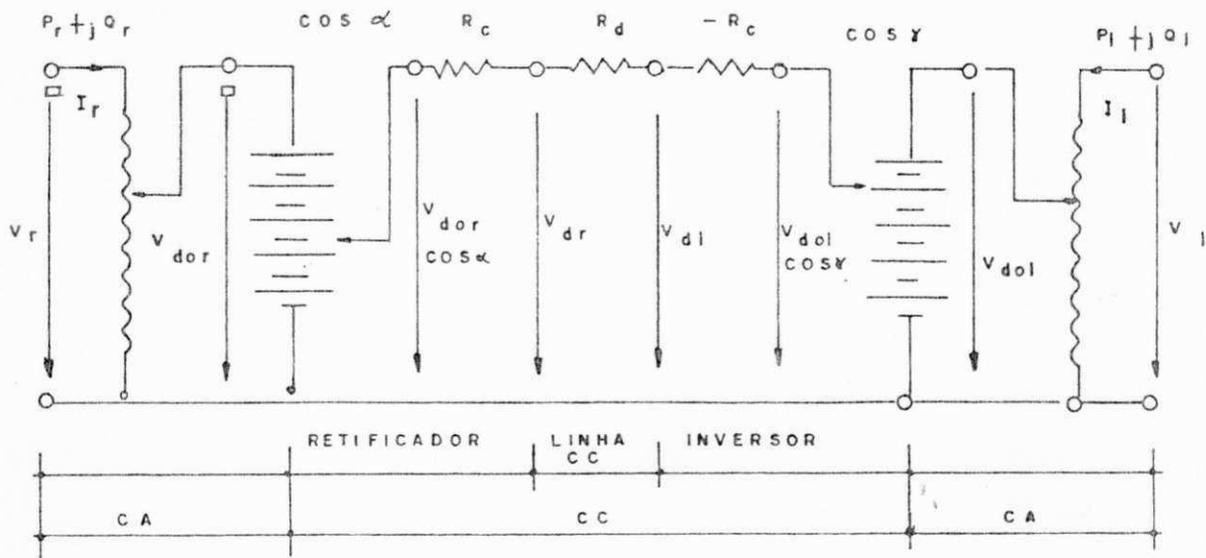


FIGURA 3.17 - Circuito equivalente para o sistema de transmissão CC.

A potência CC é sempre transmitida de retificador para inversor, podendo se efetuar em qualquer dos dois sentidos, através da alteração do ângulo de ignição das pontes, transformando a ponte retificadora em inversora e vice-versa. No entanto, mesmo que o sentido da potência se inverta, invertendo-se as tensões contínuas, o sentido da corrente CC sempre se mantém o mesmo.

3.5 - Modo de controle de um elo em corrente contínua.

O circuito básico de um sistema de transmissão CC é mostrado na Figura 3.18. O conversor representado pelo número 1 é considerado como sendo o retificador e o número 2 como o inversor.

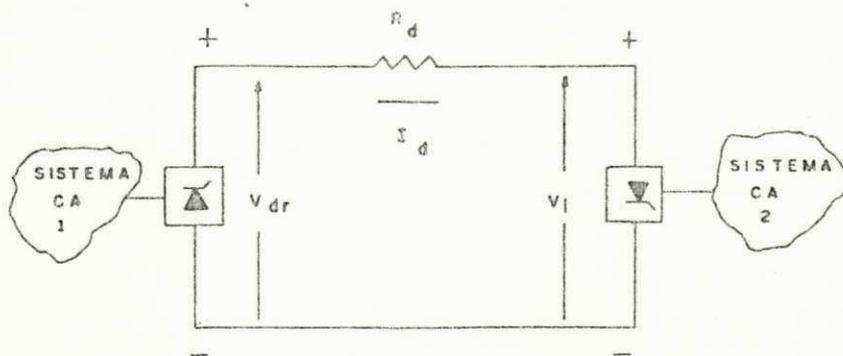


FIGURA 3.18 - Circuito básico de um sistema de transmissão CC.

A corrente na linha CC, durante o regime permanente é dada pela diferença entre a tensão do retificador e a tensão do inversor, dividida pela resistência R_d .

$$I_d = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_d} = \frac{V_{dor} \cos \alpha - V_{doi} \cos \gamma}{R_d} \quad (3.12)$$

A corrente I_d e a tensão em qualquer ponto da linha poderão ser controlados unicamente por variações em V_{dr} e V_{di} , uma vez que R_d é fixa.

Considerando as expressões de V_{dr} e V_{di} , verifica-se a possibilidade de controlar estes valores utilizando dois métodos:

- alterando os valores das tensões CA de alimentação, as quais definem os valores de V_{dor} e V_{doi} , respectivamente;
- alterando-se o ângulo de ignição (α) para o retificador e o ângulo de extinção (γ) para o inversor.

Um modo de controle considerado padrão, consiste em controlar corrente no retificador e tensão no inversor.

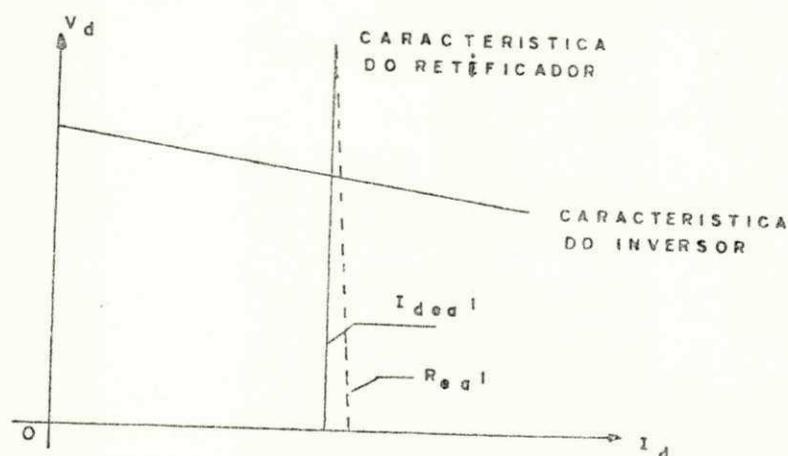


FIGURA 3.19 - Características ideais de controle.

Se o valor medido de I_d é menor que a corrente de referência o ângulo de ignição α é, então, diminuído. Diminuindo α , a tensão do retificador ($V_{dr} = V_{dor} \cos \alpha$) aumenta e em consequência a corrente I_d também aumentará até atingir um valor igual ao de referência. Se a corrente medida é maior que a de referência, então, aumenta-se α e em consequência diminui-se V_{dr} e a corrente seria reduzida até o valor de referência.

A tensão no inversor pode ser deslocada para cima ou para baixo, por meio da mudança de tape do transformador conectado ao inversor. Isto é feito de modo a variar a tensão CA de alimentação do inversor.

Conforme ilustrado pela Figura 3.19, esta operação é feita de modo a controlar a tensão contínua.

3.6 - Integração das rotinas CC, no programa de fluxo de carga CA.

Reconhecendo a aceitação geral do método desacoplado rápido foi feita a integração do elo em corrente contínua com a solução do fluxo de carga CA.

O diagrama unifilar de um sistema CA-CC é mostrado na Figura 3.20, e o elo CC é considerado como uma carga constante para as barras de interface CA como mostra a Figura 3.21.

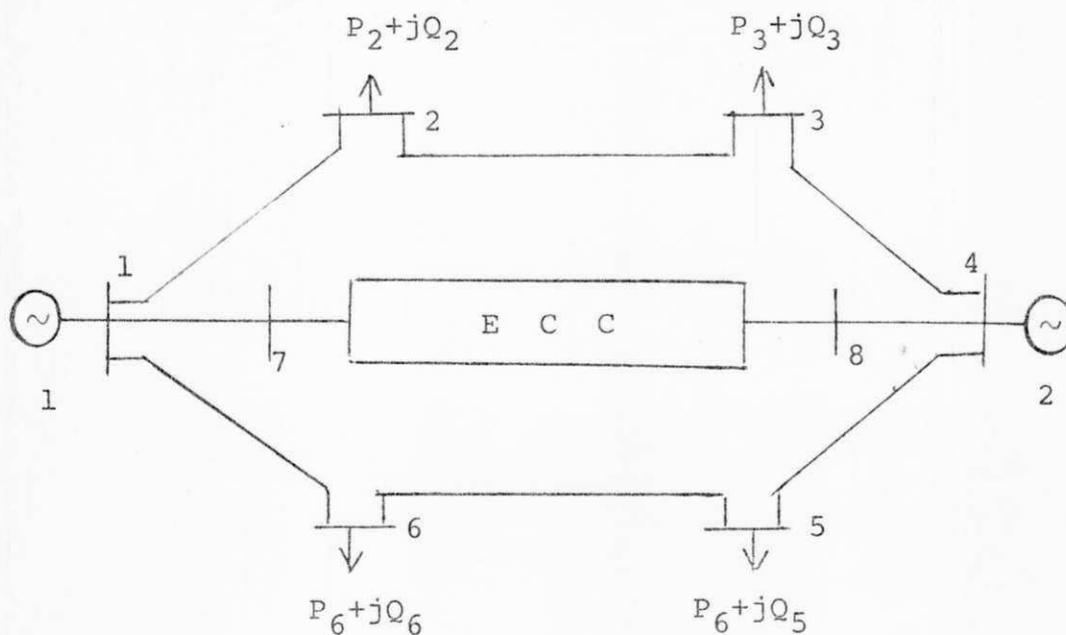


FIGURA 3.20 - Diagrama unifilar de um sistema CA/CC.

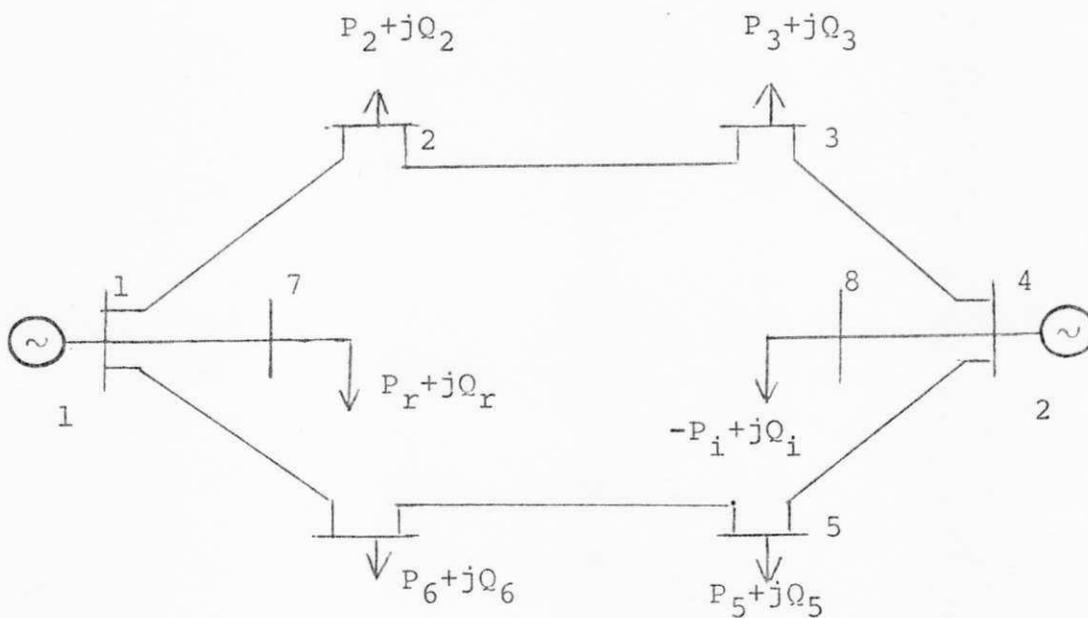


FIGURA 3.21 - Diagrama unifilar equivalente do sistema CA/CC da Figura 3.20.

A este método denomina-se aqui de método PQ.

O método PQ adota uma técnica na qual as tensões das barras de interface são calculadas a cada iteração CA e utilizadas na resolução das equações CC.

O sistema CC, uma vez convergido, determina os fluxos de potências ativas e consumo de reativos, através dos conversores, que são introduzidos no sistema CA, como cargas, ligadas ao barramento de interface. Realiza-se uma iteração CA e novos valores de tensões das barras de interface são calculadas.

Com estes novos valores de tensões, processa-se outro ciclo interativo para o sistema CC. O processo continua até que ambos os sistemas convirjam.

Para a integração das rotinas de corrente contínua ao fluxo de carga desacoplado rápido, no microcomputador CP-700, foi necessário a divisão do programa fonte CA/CC em dois módulos. Isto devido a pequena memória (52 Kbytes) disponível no CP-700, que não permitiu a link-edição do programa fonte CA/CC.

Dividindo o programa em dois módulos como mostrados nas Figuras 3.22 e 3.23, conseguiu-se simular somente um sistema com dez barras, quinze ramos e um elo em corrente contínua.

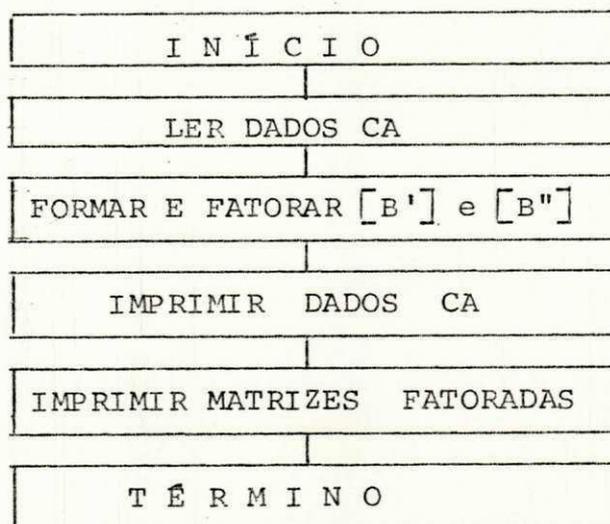


FIGURA 3.22 - Diagrama de blocos - fluxo de carga CA/CC - módulo um.

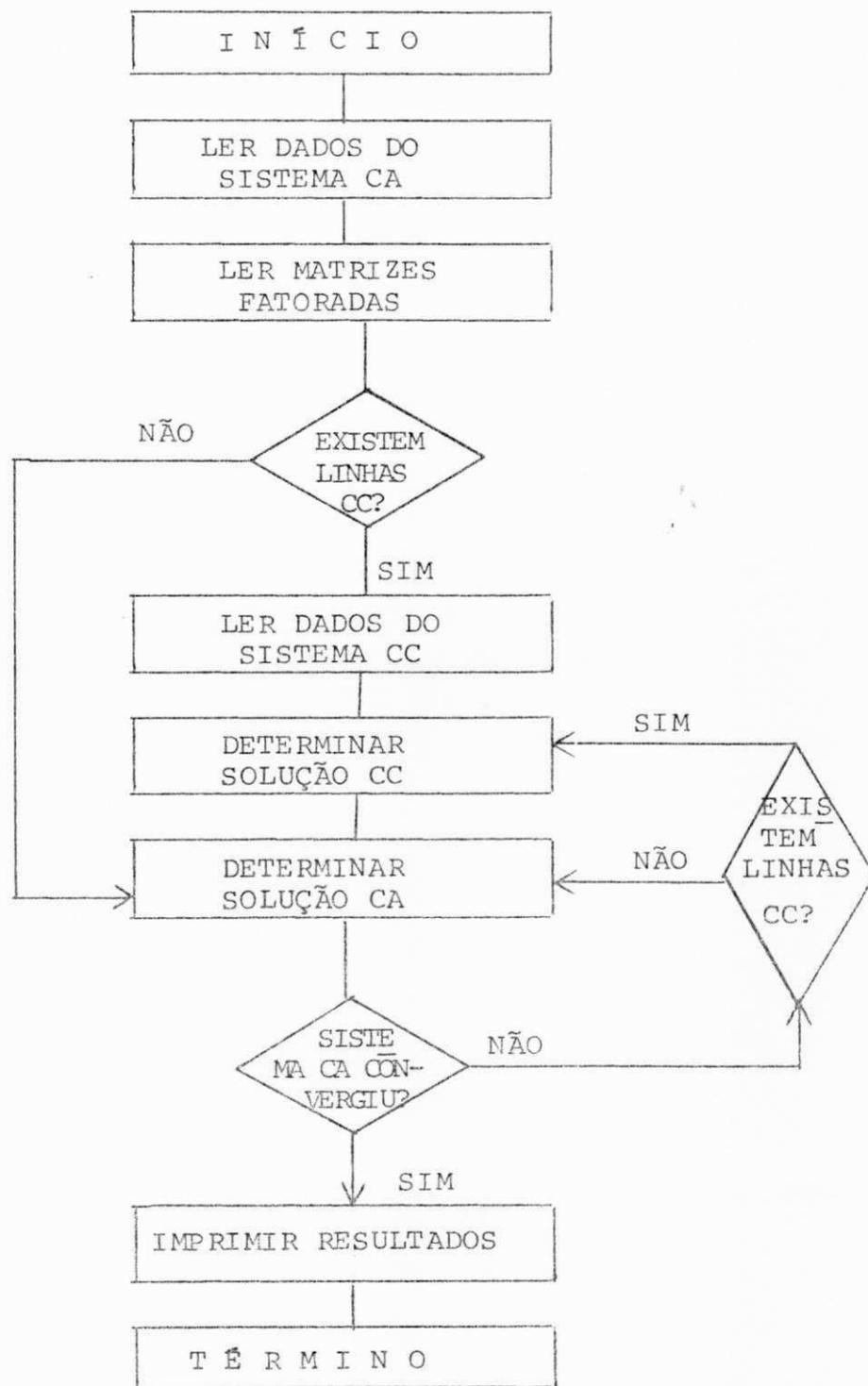


FIGURA 3.23 - Diagrama de blocos - fluxo de carga CA/CC - módulo dois.

Devido a este fato, engendrou-se um esquema de modularização do programa fonte CA/CC, como mostram as figuras 3.24 e 3.25, no qual a interação entre o sistema CA e o sistema CC é feita através de arquivos de dados.

Isto é, a cada iteração CC lê-se as tensões CA nas barras ligadas aos transformadores conversores (barras de interface), e a cada iteração CA são lidas as cargas dos conversores, ligadas nos barramentos de interface.

A grande vantagem introduzida com essa divisão do programa em dois módulos é o aumento no tamanho dos sistemas simulados para sessenta barras, cem ramos e mais de dez elos em corrente contínua.

A desvantagem é o acréscimo no tempo de simulação como mostrado no parágrafo 3.7 a seguir.

3.7 - Análise de resultados

De maneira similar àquela feita para o fluxo de carga CA, no parágrafo 2.4, a viabilização do fluxo de carga CA/CC no microcomputador, exige que os seguintes objetivos sejam atingidos: a determinação do tamanho máximo de um SP CA/CC que pode ser simulado no microcomputador; a verificação do tempo de simulação e a comparação de resultados obtidos no microcomputador e em um computador de grande porte.

Para atingir estes objetivos foram simuladas as seguintes redes: 1) rede usada no primeiro caso de fluxo de carga CA (sistema de transmissão), com a substituição do ramo 1-2 por um ECC. Esta rede fica aqui denominada sistema de transmissão CA/CC; 2) Rede usada no terceiro caso de fluxo de carga CA (sistema do IEEE), com a substituição do ramo 4-5 por um ECC. Esta rede é então chamada sistema do IEEE CA/CC.

O espaço da memória principal disponível no microcomputador CP-700 foi melhor utilizado na forma já descrita no parágrafo 3.6.

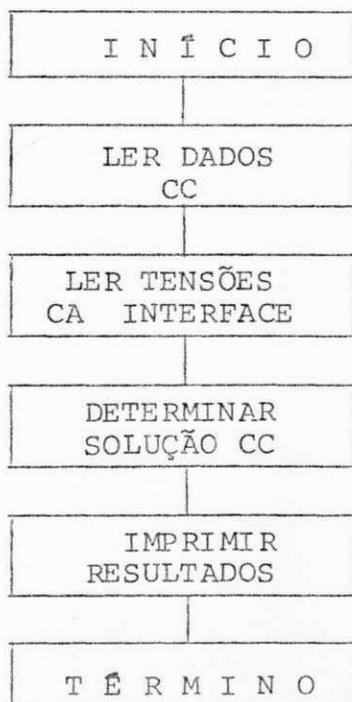


FIGURA 3.24 - Diagrama de blocos - Fluxo de carga CA/CC - módulo um.

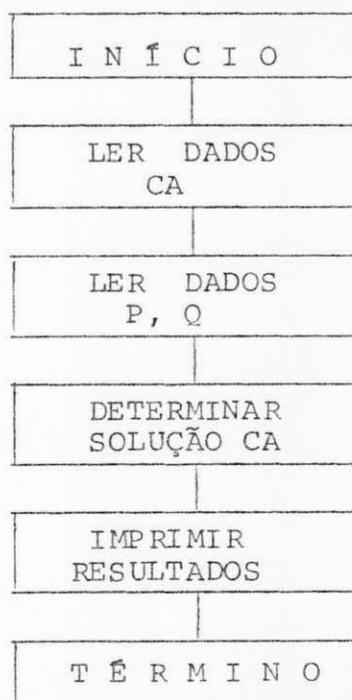


FIGURA 3.25 - Diagrama de blocos - Fluxo de carga CA/CC - módulo dois.

Pode-se simular, então, um sistema CA/CC com até sessenta barras, cem ramos e mais de dez elos CC.

O tempo de simulação, o número de iterações para convergência e a tolerância especificada para cada sistema no microcomputador, foram os seguintes:

Sistema de transmissão CA/CC

tempo de simulação	- 3 min e 53 seg.
número de iterações CA	- 5
resíduos de potência ativa e reativa	- 10^{-3} MW/MVAR
número de iterações CC	- 2

Sistema do IEEE CA/CC

tempo de simulação	- 13min e 55 seg.
número de iterações CA	- 21
resíduos de potência ativa e reativa	- 10^{-2} MW/MVAR
número de iterações CC	- 2

A soma dos tempos de simulação em cada módulo, dá como resultado o tempo de simulação total para cada sistema estudado.

A execução do programa CA/CC em dois módulos, embora, aumente o tempo das simulações, não inviabiliza o uso do microcomputador na análise de fluxo de carga CA/CC.

Os resultados obtidos com o CP-700 e com o DEC-10 estão comparados nas tabelas a seguir e nos dois casos simulados, as diferenças quando presentes, são idênticas às que já observadas nos casos de fluxo de carga CA e portanto, não possuem significado prático.

Destacam-se os resultados obtidos com o sistema do IEEE CA/CC, os quais são idênticos aos obtidos com o mesmo sistema, na referência bibliográfica número 9 (nove).

SISTEMA DE TRANSMISSÃO CA/CC

Nº da Barra	Resultados de módulos de tensões (P.U.)		Resultados de ângulos de fase (graus)	
	DEC-10	CP-700	DEC-10	CP-700
1	1.0600	1.0600	0.000	0.000
2	1.0200	1.0200	-26.631	-26.631
3	1.0100	1.0100	-34.173	-34.173
4	1.0142	1.0142	-31.347	-31.347
5	1.0100	1.0100	-37.116	-37.115
6	1.0200	1.0200	-42.908	-42.908
7	1.0000	1.0000	-51.202	-51.202
8	1.0126	1.0126	-44.649	-44.649
9	1.0152	1.0152	-45.404	-45.404
10	1.0183	1.0183	-46.363	-46.363
11	1.0200	1.0200	-46.219	-46.218
12	1.0203	1.0203	-43.810	-43.810
13	1.0300	1.0300	-39.211	-39.211
14	1.0000	1.0000	-45.751	-45.751
15	1.0400	1.0400	-9.217	-9.217
16	0.9927	0.9927	-44.480	-44.480
17	1.0000	1.0000	-43.344	-43.344
18	1.0200	1.0200	-40.801	-40.801
19	1.0491	1.0491	-28.377	-28.377
20	1.0500	1.0500	-25.575	-25.575
21	1.0432	1.0432	-27.989	-27.989
22	1.0324	1.0324	-29.227	-29.227
23	1.0200	1.0200	-29.014	-29.014
24	0.9966	0.9966	-17.660	-17.660
25	1.0000	1.0000	-16.162	-16.162
26	1.0113	1.0113	-12.152	-12.152
27	1.0531	1.0531	-2.628	-2.628
28	1.0479	1.0479	-5.019	-5.019

Tabela 3.1

SISTEMA DE TRANSMISSÃO CA/CC

Barra		Resultados de fluxos de potência nos ramos que apresentaram diferença de resultados entre os dois computadores			
Emis-sora	Recep-tora	DEC-10		CP-700	
		MW	MVAR	MW	MVAR
11	10	4.448	1.310	4.448	1.309
13	12	77.850	-3.062	77.849	-3.062
19	20	-134.646	1.000	-134.646	1.001
21	20	-115.354	-15.353	-115.354	-15.352
22	21	-37.874	-10.143	-37.875	-10.143
1	27	93.052	15.414	93.052	15.418
27	1	-93.052	-11.064	-93.053	-11.064
1	28	176.691	30.985	176.691	30.984

Tabela 3.2

SISTEMA DE TRANSMISSÃO CA/CC

DESCRIÇÃO DE VARIÁVEIS	RESULTADOS CC			
	DEC-10		CP-700	
	Terminal Retificador Barra 1	Terminal Inversor Barra 2	Terminal Retificador Barra 1	Terminal Inversor Barra 2
Tensão CC(P.U.)	1.047	1.020	1.047	1.020
Ângulo de disparo e extinção (graus)	12.0	18.0	12.0	18.0
Ângulo de comutação (graus)	13.8	10.8	13.8	10.8
Tape dos transformadores conversores	1.049	1.018	1.049	1.018
Potência CC(MW)	486,04	-473,28	486,04	-473,28
Consumo de reativos (MVAR)	177,65	210,34	177,65	210,34

Tabela 3.3

SISTEMA DO IEEE CA/CC				
Nº da Barra	Resultados de módulos de tensões (P.U.)		Resultados de ângulos de fase (graus)	
	DEC-10	CP-700	DEC-10	CP-700
1	1.0600	1.0600	0.000	0.000
2	1.0450	1.0450	-5.027	-5.027
3	1.0100	1.0100	-12.733	-12.733
4	1.0608	1.0608	-11.311	-11.311
5	1.0288	1.0288	-8.682	-8.682
6	1.0700	1.0700	-14.830	-14.830
7	1.0807	1.0807	-14.371	-14.371
8	1.0900	1.0900	-14.371	-14.371
9	1.0741	1.0741	-15.926	-15.926
10	1.0661	1.0661	-16.022	-16.022
11	1.0646	1.0646	-15.572	-15.572
12	1.0566	1.0566	-15.698	-15.698
13	1.0530	1.0530	-15.823	-15.822
14	1.0472	1.0472	-16.864	-16.864

Tabela 3.4

SISTEMA DO IEEE CA/CC					
Barra		Resultados de fluxos de potência nos ramos que apresentaram diferença de resultados entre os dois computadores			
Emis- sora	Recep- tora	DEC-10		CP-700	
		MW	MVAR	MW	MVAR
2	1	-153.865	28.223	-153.864	28.223
2	3	72.903	3.593	72.902	3.593
4	3	24.238	20.239	24.238	20.238
6	5	-43.598	-10.134	-43.597	-10.134
6	11	7.186	-0.467	7.186	-0.466

Tabela 3.5

SISTEMA DO IEEE CA/CC				
Descrição de Variáveis	RESULTADOS CC			
	DEC-10		CP-700	
	Terminal Retificador Barra 5	Terminal Inversor Barra 4	Terminal Retificador Barra 5	Terminal Inversor Barra 4
Tensão CC (PU)	1.286	1.284	1.286	1.284
Ângulo de dis- paro e extin- ção (graus)	9.0	10.0	9.0	10.0
Ângulo de co- mutação (graus)	10.5	6.7	10.5	6.7
Tape dos trans- formadores con- versores	1.273	1.267	1.273	1.267
Potência CC (MW)	58,55	-58,47	58,55	-58,47
Consumo de rea- tivos (MVAR)	15.89	14.32	15.89	14.32

Tabela 3.6

3.8 - Conclusões

Este capítulo teve por meta a apresentação e discussão das equações de regime permanente que definem a operação de um sistema de corrente contínua, e a discussão dos resultados de fluxo de carga CA/CC obtidos com um microcomputador de 8 bits e 52 kbytes de memória principal RAM disponíveis para o usuário.

A divisão do programa CA/C em dois módulos, permitiu uma melhor utilização da pequena memória disponível no CP-700.

Ressalta-se que sem a modularização, não é possível link-editar o programa CA/CC no referido equipamento.

A estrutura do programa fonte CA/CC no CP-700, permite a simulação de sistemas de potência com sessenta barras, cem ramos e mais de dez elos CC.

O tempo de simulação é um fator em desvantagem, embora não inviabilize o uso do microcomputador nas simulações.

A comparação dos resultados entre CP-700 e DEC-10, mostraram que as diferenças quando existentes não são valores de ordem prática.

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES

Embora várias conclusões específicas já tenham sido consideradas nos capítulos correspondentes, as discussões aqui realizadas tem por meta tecer comentários mais abrangentes sobre os principais pontos desenvolvidos e da significância dos resultados alcançados.

No capítulo II abordou-se o algoritmo do método desacoplado rápido. Com base na formulação apresentada, obteve-se um programa digital que foi usado para obter resultados de fluxo de carga CA, em um microcomputador de oito bits e sessenta e quatro kbytes de memória principal RAM.

A técnica de modular o programa desenvolvido, em dois blocos, permitiu utilizar da melhor maneira possível, toda a memória disponível (52 kbytes) do microcomputador.

Constatou-se que apesar do microcomputador CP-700, possuir um clock de 2 MHz, o tempo máximo de simulação dos sistemas CA estudados não ultrapassou seis minutos e quarenta e nove segundos, mesmo com o programa sendo executado em dois módulos. Portanto, o tempo de simulação não representa um fator que inviabilize o uso do microcomputador na análise de fluxo de carga CA.

A validade dos resultados obtidos no microcomputador foi comprovada por estudos isolados de vários sistemas típicos, através da comparação com resultados do programa desenvolvido implantado em um computador de grande porte (no caso o computador DEC-10 da UFC), e da comparação com resultados do Philadelphia Electric Company Power Flow Program.

Através das tabelas apresentadas pode-se verificar que todas as variáveis determinadas no estudo de fluxo de carga CA, que servem como informações operacionais para um SP, foram validadas no estudo realizado no microcomputador.

Quanto ao fluxo de carga CA/CC, considerado no capítulo III, abordou-se resumidamente, a teoria básica de um elo em corrente contínua, com vistas, fundamentalmente, à estrutura de sua operação em regime permanente.

Com base na formulação desenvolvida, obteve-se um programa digital que foi usado para obter resultados de fluxo de carga CA/CC no microcomputador com as características já citadas.

Um fato importante que deve ser ressaltado, em relação à implantação do programa CA/CC no microcomputador é o seguinte: sem a modularização do programa CA/CC, em dois blocos, não é possível conseguir a sua link-edição. Conseqüentemente, sem a modularização não é possível conseguir resultados de um programa CA/CC usando o método desacoplado rápido com rotinas de esparsidade, e considerando o elo CC como cargas constantes para os barramentos de interface, em um microcomputador com 52 kbytes de memória disponível.

Com relação ao tempo de simulação máximo dos sistemas CA/CC estudados, o mesmo foi de 13 minutos e 55 segundos. Este valor de tempo é uma desvantagem na execução do programa CA/CC no CP-700 e decorre da divisão do referido programa em dois módulos e também da inclusão das rotinas CC no programa CA.

Através das tabelas apresentadas pode-se verificar que todas as variáveis determinadas no estudo de fluxo de carga CA/CC, que servem como informações operacionais para um SP, foram validadas no estudo realizado no microcomputador, através da comparação com resultados de um computador de grande porte.

De acordo com tudo o que foi exposto nesse trabalho, conclui-se finalmente, que um microcomputador de 8 bits pode ser utilizado para fazer estudos de fluxo de carga CA/CC em sistemas elétricos de potência.

Para estudos futuros, ou prosseguindo esta linha de trabalho, sugere-se que o estudo aqui realizado, tenha continuidade em um microcomputador de 16 bits, onde o programa desenvolvido poderá ser aperfeiçoado, não só aumentando a sua potencialidade de simulação, como também usando uma linguagem do porte do Fortran 77 possibilitando a estruturação do Software.

Além disso, poderar-se ainda testar grandes sistemas, os quais também são de interesse das companhias de energia elétrica.

Devido ao maior clock do microcomputador de 16 bits, estudos de contingências poderão ser realizados rapidamente.

Estamos certos de que conseguimos atingir as metas a que nos propuzemos na realização deste trabalho, fornecendo informações à respeito da análise de fluxo de carga CA/CC em um microcomputador de 8 bits e 64 kbytes de memória RAM.

APÊNDICE I

BI - FATORAÇÃO - ALGORITMO COMPUTACIONAL BÁSICO E ASPECTOS DE PROGRAMAÇÃO.

1.1 - Introdução

Neste apêndice será examinada a maneira de resolver sistemas da forma (I.1), utilizando o método da bi - fatora⁸ção como ferramenta auxiliar, onde $[A]$ é uma matriz quadrada $n \times n$ não singular e $[x]$ e $[b]$ são os vetores de incógnitas e de segundos membros, respectivamente.

$$[A] [x] = [b] \quad (I.1)$$

O método da bi - fatora⁸ção pode ser usado para matrizes de coeficientes esparsos que têm termos na diagonal não nulos e são também estritamente simétricas ou assimétricas em valores dos elementos mas com uma estrutura de esparsidade simétrica. Além disso, é assumido que estas matrizes são diagonalmente dominantes (nós dizemos que uma matriz é diagonalmente dominante por linhas se cada elemento da diagonal não é menor que a soma dos módulos dos outros elementos naquela linha; uma definição similar pode ser feita para dominância da diagonal por colunas).

1.2 - Algoritmo computacional básico

O método da bi - fatora⁸ção foi desenvolvido por Zollenkopf a partir do método da inversa na forma de produto.

Esse método busca obter $2n$ matrizes fatores que transformem a matriz dada na matriz unidade, como mostra a

equação (I.2), onde as matrizes fatores à esquerda são denotadas por $[L]$ e as matrizes fatores à direita por $[R]$. Pré-multiplicando ambos os lados de (I.2) sucessivamente pelas inversas das matrizes fatores à esquerda, vem (I.3), que, sendo por sua vez pós multiplicada sucessivamente pelas próprias matrizes fatores à esquerda, dá (I.4), donde se vê que a inversa de $[A]$ é dada por (I.5), ou seja, as matrizes fatores, conforme a ordem em que são multiplicadas, representam a matriz $[A]$ ou sua inversa.

$$[L_n][L_{n-1}] \cdots [L_2][L_1][A][R_1][R_2] \cdots [R_{n-1}][R_n] = [I] \quad (I.2)$$

$$[A][R_1][R_2] \cdots [R_{n-1}][R_n] = [L_1^{-1}][L_2^{-1}] \cdots [L_{n-1}^{-1}][L_n^{-1}] \quad (I.3)$$

$$[A][R_1][R_2] \cdots [R_{n-1}][R_n][L_n][L_{n-1}] \cdots [L_2][L_1] = [I] \quad (I.4)$$

$$[R_1][R_2] \cdots [R_{n-1}][R_n][L_n][L_{n-1}] \cdots [L_2][L_1][L_1] = [A^{-1}] \quad (I.5)$$

A determinação das matrizes fatores é feita aos pares $[L]$ e $[R]$ de cada vez, cada um destes pares transformando uma fila e a correspondente coluna de $[A]$ nas da matriz unidade $[I]$. O processo é melhor mostrado considerando-se uma matriz de baixa ordem, tal como (I.6).

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (I.6)$$

A primeira redução usa as matrizes fatores (I.7) e (I.8) e é mostrada em (I.9). A segunda redução usa (I.10) e (I.11) e é mostrada em (I.12).

$$[L_1] = \begin{bmatrix} 1/a_{11} & \cdot & \cdot \\ -a_{21}/a_{11} & 1 & \cdot \\ -a_{31}/a_{11} & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.7})$$

$$[R_1] = \begin{bmatrix} 1 & -a_{12}/a_{11} & -a_{13}/a_{11} \\ \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.8})$$

$$[A^1] = [L_1] [R_1] = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & a_{22}^1 & a_{23}^1 \\ \cdot & a_{32}^1 & a_{33}^1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.9})$$

$$[L_2] = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1/a_{22}^1 & \cdot \\ \cdot & -a_{32}^1/a_{22}^1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{I.10})$$

$$[R_2] = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & -a_{23}^1/a_{22}^1 \\ \cdot & \cdot & 1 \end{bmatrix} \quad (I.11)$$

$$[A^2] = [L_2][A^1][R_2] = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & a_{33}^2 \end{bmatrix} \quad (I.12)$$

A terceira e última redução usa as matrizes fatores (I.13) e (I.14) e é mostrada em (I.15), que mostra a matriz dada $[A]$ transformada na matriz unidade. Observe que, sendo a última matriz fator à direita igual à matriz unidade, ela não é efetivamente necessária, sendo usualmente incluída para fazer com que todas as reduções tenham o mesmo aspecto.

$$[L_3] = \begin{bmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot & 1/a_{33}^2 \end{bmatrix} \quad (I.13)$$

$$[R_3] = [I] \quad (I.14)$$

$$[L_3][A^2][R_3] = [I] \quad (I.15)$$

As seguintes regras gerais são usadas para calcular $[A^j]$, $[L^j]$, e $[R^j]$ com os elementos de $[A^{j-1}]$.

$$r_{jk}^j = l_{ij}^j \quad \text{para } i = k \neq j \quad (I.22)$$

I.3 - Aspectos de programação

No caso de aplicação a sistemas elétricos de potência que apresentam matrizes esparsas, significativo tempo de computação e economia de memória pode ser obtido se é usado um esquema de programação, o qual armazena e processa somente os termos não nulos.

A matriz $[B']$ que é obtida, por exemplo, do sistema de distribuição estudado no capítulo 2, o qual possui 28 barras e 27 ligações, tem 729 termos.

Usando-se as técnicas de esparsidade baseadas no algoritmo da bi-fatoração pode-se armazenar somente os elementos não nulos do triângulo superior dessa matriz, o que corresponde a 54 termos. Este número equivale a 7,4% da quantidade de termos totais da matriz. Isso corresponde a uma economia de memória de 92,6%, o que sem dúvida, em termos de memória para um microcomputador é extremamente significativo.

APÊNDICE II

DADOS DOS PRINCIPAIS SISTEMAS SIMULADOS

Apresenta-se neste apêndice os dados dos principais sistemas simulados nesse trabalho.

A convenção utilizada para o tipo de barra é a seguinte:

- 0 - barra de carga (PQ)
- 1 - barra de tensão controlada (PV)
- 2 - barra de referência.

CASO NÚMERO UM - SISTEMA DE TRANSMISSÃO

DADOS DE CORRENTE ALTERNADA

A barra de referência é	1
Número máximo de iterações	20
Tolerância de potência(P.U.)	0.00001
Número de barras	28
Número de linhas	25
Número de transformadores	6

DADOS DE BARRA

BARRA	TIPO	VOLTS (P.U.)	CARGA		GERAÇÃO		SUSCEP- TÂNCIA SHUNT (MVAR)
			MW	MVAR	MW	MVAR	
1	2	1.060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1	1.020	158.6	52.3	0.0	0.0	0.0
3	1	1.010	156.0	99.9	0.0	0.0	20.4
4	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1	1.010	57.5	32.1	0.0	0.0	0.0
6	1	1.020	0.0	0.0	0.0	0.0	-10.0
7	1	1.000	66.0	17.3	0.0	0.0	15.8
8	0	1.000	9.6	4.6	0.0	0.0	0.0
9	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0	1.000	15.8	4.0	0.0	0.0	7.2
11	1	1.020	52.8	7.0	0.0	0.0	0.0
12	0	1.000	19.0	2.6	0.0	0.0	0.0
13	1	1.030	27.6	3.7	0.0	0.0	0.0
14	1	1.000	68.0	31.0	0.0	0.0	20.4
15	1	1.040	60.2	8.8	0.0	0.0	-30.0
16	0	1.000	71.6	20.9	0.0	0.0	7.2
17	1	1.000	18.8	10.3	0.0	0.0	3.2
18	1	1.020	84.5	22.8	0.0	0.0	0.0
19	0	1.000	13.8	-5.5	0.0	0.0	0.0
20	1	1.050	0.0	0.0	250.0	0.0	0.0
21	0	1.000	77.3	27.8	0.0	0.0	20.4
22	0	1.000	38.6	5.8	0.0	0.0	0.0
23	1	1.020	67.2	36.2	0.0	0.0	-15.0
24	0	1.000	34.0	9.6	0.0	0.0	0.0
25	1	1.000	76.0	38.6	0.0	0.0	0.0
26	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0	1.000	81.2	24.9	0.0	0.0	20.4

DADOS DE TRANSFORMADORES

BARRA PARA BARRA		REATÂNCIA (P.U.)	TAPE (%)
1	2	0.055	100
19	20	0.040	100
20	21	0.040	100
1	27	0.055	100
1	28	0.055	100
1	15	0.055	100

DADOS DE LINHAS

BARRA PARA BARRA		RESISTÊNCIA (P.U.)	REATÂNCIA (P.U.)	SUSCEPTÂNCIA TOTAL (P.U.)
2	3	0.01640	0.08360	0.01564
2	4	0.03100	0.16910	0.02822
2	5	0.03360	0.17710	0.03206
4	5	0.03710	0.20730	0.03652
5	6	0.03130	0.10180	0.00240
6	7	0.04030	0.21810	0.03820
6	8	0.04470	0.14540	0.00344
8	9	0.03130	0.10180	0.00240
9	10	0.04030	0.13090	0.00310
10	11	0.01140	0.06380	0.01098
11	12	0.03180	0.07360	0.01276
12	13	0.02010	0.10770	0.01858
13	14	0.03220	0.17290	0.03016
13	16	0.03040	0.16330	0.02830
16	17	0.03040	0.16330	0.02830
17	18	0.02910	0.15080	0.02608
18	19	0.03590	0.19240	0.03376
21	22	0.1255	0.06459	0.01220
22	23	0.03850	0.20820	0.03642
27	26	0.03610	0.19440	0.03392
26	25	0.01540	0.07840	0.01470
25	24	0.00460	0.02460	0.00426
25	28	0.03960	0.21820	0.03664
13	15	0.04040	0.20890	0.03978
24	23	0.05040	0.27340	0.04884

CASO NÚMERO DOIS - SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

DADOS DE CORRENTE ALTERNADA

A barra de referência é 1
 Número máximo de iterações 20
 Tolerância de potência (P.U.) 0.00001
 Número de barras 28
 Número de linhas 22
 Número de transformadores 5

DADOS DE BARRA

BARRA	TIPO	VOLTS (P.U.)	CARGA		GERAÇÃO		SUSCEPTAN CIA SHUNT (MVAR)
			MW	MVAR	MW	MVAR	
1	2	1.014	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0	1.000	11.2	5.4	0.0	0.0	3.0
3	0	1.000	12.0	1.6	0.0	0.0	0.0
4	0	1.000	19.0	3.1	0.0	0.0	0.0
5	0	1.000	16.0	2.1	0.0	0.0	0.0
6	0	1.000	15.0	7.3	0.0	0.0	0.0
7	0	1.000	7.7	3.7	0.0	0.0	0.0
8	0	1.000	4.3	2.7	0.0	0.0	0.0
9	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0	1.000	4.7	2.3	0.0	0.0	0.0
11	0	1.000	2.9	1.4	0.0	0.0	0.0
12	0	1.000	11.9	5.7	0.0	0.0	0.0
13	0	1.000	10.0	4.8	0.0	0.0	0.0
14	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0	1.000	3.5	1.7	0.0	0.0	0.0
16	0	1.000	6.8	3.2	0.0	0.0	0.0
17	0	1.000	2.7	1.3	0.0	0.0	0.0
18	0	1.000	4.3	2.1	0.0	0.0	0.0
19	0	1.000	1.0	0.6	0.0	0.0	0.0
20	0	1.000	5.5	2.6	0.0	0.0	2.4
21	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0	1.000	2.4	1.2	0.0	0.0	1.2
24	0	1.000	3.6	1.7	0.0	0.0	1.8
25	0	1.000	2.5	1.5	0.0	0.0	0.0
26	0	1.000	14.9	7.2	0.0	0.0	1.2
27	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0	1.000	4.4	2.7	0.0	0.0	0.0

DADOS DE TRANSFORMADORES

BARRA PARA	BARRA	REATÊNCIA (P.U.)	TAPE (%)
1	2	0.39410	100
3	5	0.35000	100
13	20	1.31750	100
13	25	1.31750	100
27	28	0.38580	100

DADOS DE LINHAS

BARRA PARA	BARRA	RESISTÊNCIA (P.U.)	REATÊNCIA (P.U.)	SUSCEPTÂNCIA TOTAL (P.U.)
1	3	0.01282	0.04669	0.03920
3	4	0.00305	0.01115	0.00094
3	6	0.01540	0.05660	0.01180
1	7	0.06600	0.12800	0.02210
7	8	0.02870	0.05550	0.00960
7	9	0.02080	0.04020	0.00690
9	10	0.26310	0.22040	0.02800
10	11	0.15820	0.30670	0.05290
1	12	0.01480	0.05710	0.01080
1	13	0.00988	0.03603	0.06820
13	14	0.09260	0.18130	0.03090
14	15	0.32650	0.63380	0.10900
15	16	0.11810	0.22880	0.03950
15	17	0.99710	0.93140	0.01183
13	18	0.05020	0.09750	0.01290
13	19	0.00490	0.01780	0.00370
13	21	0.01700	0.06300	0.00130
21	22	0.05030	0.09750	0.01680
22	23	0.52590	0.44090	0.00560
23	24	0.43840	0.36740	0.00467
13	26	0.02980	0.11470	0.00215
1	27	0.00240	0.00870	0.00018

CASO NÚMERO TRÊS - SISTEMA TESTE IEEE
 DADOS DE CORRENTE ALTERNADA

A barra de referência é 1
 Número máximo de iterações 20
 Tolerância de potência (P.U.) 0.0001
 Número de barras 14
 Número de linhas 15
 Número de transformadores 5

DADOS DE BARRA

BARRA	TIPO	VOLTS (P.U.)	CARGA		GERAÇÃO		SUSCEPTÂNCIA SHUNT (MVAR)
			MW	MVAR	MW	MVAR	
1	2	1.060	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	1	0.045	21.7	12.7	40.0	0.0	0.0
3	1	0.010	94.2	19.0	0.0	0.0	0.0
4	0	1.000	47.8	-3.9	0.0	0.0	0.0
5	0	1.000	7.6	1.6	0.0	0.0	0.0
6	1	1.070	11.2	7.5	0.0	0.0	0.0
7	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	1	1.090	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0	1.000	29.5	16.6	0.0	0.0	19.0
10	0	1.000	9.0	5.8	0.0	0.0	0.0
11	0	1.000	3.5	1.8	0.0	0.0	0.0
12	0	1.000	6.1	1.6	0.0	0.0	0.0
13	0	1.000	13.5	5.8	0.0	0.0	0.0
14	0	1.000	14.9	5.0	0.0	0.0	0.0

DADOS DE TRANSFORMADORES

BARRA PARA BARRA		REATÂNCIA (P.U.)	TAPE (%)
6	5	0.25202	93.2
7	4	0.20912	97.8
7	8	0.17615	100,0
9	4	0.55618	96.9
7	9	0.11001	100.0

DADOS DE LINHAS

BARRA PARA BARRA		RESISTÊNCIA (P.U.)	REATÂNCIA (P.U.)	SUSCEPTÂNCIA TOTAL (P.U.)
1	2	0.01938	0.05917	0.05280
2	3	0.04699	0.19797	0.04380
2	4	0.05811	0.17632	0.03740
1	5	0.05403	0.22304	0.04920
2	5	0.05695	0.17388	0.03400
3	4	0.06701	0.17103	0.03460
4	5	0.01335	0.04211	0.01280
9	10	0.03181	0.08450	0.00000
6	11	0.09498	0.19890	0.00000
6	12	0.12291	0.25581	0.00000
6	13	0.06615	0.13027	0.00000
9	14	0.12711	0.27038	0.00000
10	11	0.08205	0.19207	0.00000
12	13	0.22092	0.19988	0.00000
13	14	0.17093	0.34802	0.00000

CASO NÚMERO QUATRO - REDE USADA NO PRIMEIRO CASO COM A SUBSTITUIÇÃO DO RAMO 1-2 POR UM ELO EM CORRENTE CONTÍNUA.

DADOS DO ELO EM CORRENTE CONTÍNUA

	CONVERTOR BARRA 1	CONVERTOR BARRA 2
Reatância de Comutação (P.U.)	0.1	0.1
Ângulo Mínimo de Disparo	10°	-
Ângulo Mínimo de Extinção	-	15°
Resistência da Linha CC (P.U.)		0.0054
Número de Pontes em série		2
Número de linhas em série		2
Número de Transformadores		2
Potência Base (MVA)		100

CASO NÚMERO CINCO - REDE USADA NO TERCEIRO CASO COM A SUBSTITUIÇÃO DO RAMO 5-4 POR UM ELO EM CORRENTE CONTÍNUA.

DADOS DO ELO EM CORRENTE CONTÍNUA

	CONVERTOR BARRA 5	CONVERTOR BARRA 4
Reatância de Comutação (P.U.)	0.0126	0.07275
Ângulo Mínimo de Disparo	7°	-
Ângulo Mínimo de Extinção	-	10°
Resistência da Linha CC (P.U.)		0.00334
Número de Pontes em Série		2
Número de Linhas em Série		2
Número de Transformadores		2
Potência Base (MVA)		100

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - STOTT, B.; ALÇAC, O. Fast Decoupled Load Flow. IEEE-PAS vol. 93. Maio/junho de 1974.
- (2) - MONTICELI, Alcir José. Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. SP, 1983. Edgard Blücher.
- (3) - PAI, M.A. Computer Techniques in Power System Analysis, 1983. Wiley Eastern Limited.
- (4) - DE CARVALHO, Eliane Marise R. Simulação de Fluxo de Cargas AC/DC. Abril 1983. UFPb.
- (5) - JOSÉ C. de Oliveira e JOÃO R. COGO. Transmissão em Corrente Contínua V-1. EFEI.
- (6) - KIMBARK, Edward Wilson. Direct Current Transmission. V-1. 1971. John Wiley Sons.
- (7) - MANUAIS da Prológica - Microcomputadores, Sistema 700.
- (8) - ZOLLENXOPF, K. - "Bi-Factorization-Basic Computational Algorithm and Programming Techniques", em Reid., J.K. (Editor) - "Large Sparse Sets of Linear Equations", Academic Press, Londres, GB, 1971.
- (9) - SATO, H.; ARRILLAGA, J. Improved Load-Flow techniques for integrated a.c-d.c. systems. IEE - Proc. Vol. 116, No. 4, April 1969.