TESE
413

ADÉLIO JOSÉ DE MORAIS

MODELAGEM DE CARGAS PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

ntador : Prof. Dr. José Carlos de Oliveira

Orientador: Prof. João Roberto Cogo

Trabalho de dissertação apresentado a comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos para a obtenção do título de "Mestre em Engenharia Elétrica".

1984

ADÉLIO JOSÉ DE MORAIS

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

MODELAGEM DE CARGAS PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Orientador: Profº Dr. José Carlos de Oliveira

Co-Orientador: Profº João Roberto Cogo

Trabalho de dissertação apresentado a comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos para a obtenção do título de "Mestre em Engenharia Elétrica".

1984

CLASS. 621.3.016.35:621.311.1(043.2)
CUTT. M 827 m.
TOMBO 413

À Márcia, minha esposa, sem cujo incentivo teria sido impossível.

Aos meus pais, Joaquim e Joana, pelo apoio e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Carlos de Oliveira pela inestimável amizade e orientação.

Ao professor João Roberto Cogo pela ajuda na criação da idéia original e discussões.

Ao colega Sebastião Vidigal, meu companheiro de tese pela amizade, discussões e companhia.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFU, em especial ao professor Júlio Cesar Portella Silveira, à Kátia Mara Daud e ao José Maria Filho.

Aos funcionários do Núcleo de Processamento de Dados da UFU, em especial ao professor Mauro Guimarães.

Ao João Carlos Horta da Silva e Douglas Andreani Júnior, pela datilografia e desenhos.

À Escola Federal de Engenharia de Itajubá pelo apoio técnico e à Universidade Federal de Uberlândia, CAPES e ELETROBRÁS, pelo apoio financeiro.

Í N D I C E

Pág.

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO..... 01

CAPÍTULO II - REPRESENTAÇÃO DE CARGAS ELÉTRICAS PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE..... 05

2.1 - Introdução..... 05

2.2 - Variação das Cargas com Tensão e Frequência..... 08

2.2.1 - Potência Ativa x tensão..... 10

2.2.2 - Potência Reativa x tensão..... 11

2.2.3 - Efeitos da Frequência..... 11

2.3 - Classificação das Cargas Elétricas..... 14

2.3.1 - Características Estáticas..... 14

2.3.2 - Características Dinâmicas..... 15

2.4 - Representações de Cargas por: Impedância Constante, Potência Constante e Corrente Constante... 16

2.4.1 - Representação de Carga por Impedância Constante..... 16

2.4.2 - Representação de Carga por Potência Constante..... 17

2.4.3 - Representação de Carga por Corrente Constante..... 18

2.5 - Identificação e Classificação das Cargas..... 20

2.6 - Composição da Carga Elétrica..... 27

Pág.

2.7 - Outro Processo para a Distribuição da Carga..... 35

2.8 - Conclusões..... 37

CAPÍTULO III - IMPLEMENTAÇÃO DIGITAL DA MODELAGEM DE CARGAS POR CORRENTE E POTÊNCIA CONSTANTE..... 39

3.1 - Introdução..... 39

3.2 - Estrutura Geral para Modelagens das Cargas..... 40

3.3 - Conceituação Física das Implementações de Cargas por Potência e Corrente Constante..... 42

3.4 - Subrotinas Modificadas..... 46

3.4.1 - Subrotina "SHUNT"..... 47

3.4.2 - Subrotina "SOL"..... 49

3.5 - Subrotinas Implantadas..... 53

3.5.1 - Subrotina "LOADIP"..... 53

3.5.2 - Subrotina "SHUNT1"..... 56

3.5.3 - Subrotina "POTSOL"..... 58

3.5.4 - Subrotina "CORSOL"..... 61

3.5.5 - Subrotina "IMPSOL"..... 63

CAPÍTULO IV - MODELAGEM DE CARGAS RETIFICADORAS PARA ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA..... 65

4.1 - Introdução..... 65

4.2 - Modelo Simplificado de uma Carga Retificadora.... 66

Pág.

4.2.1 - Sistema de Controle..... 69

4.3 - Modelo Completo de uma Carga Retificadora com Controle para I_d Constante..... 72

4.4 - Modos Normais e Anormais de Operação de um Retificador..... 84

4.4.1 - Modo A 85

4.4.2 - Modo B 87

4.4.3 - Modo C 89

4.4.4 - Modo D 92

4.5 - Interação entre os Retificadores e o Sistema CA de Alimentação..... 95

4.5.1 - Relação entre as Correntes do lado CC e CA 96

4.5.2 - Correntes Absorvidas pelos Conversores em Relação à Barra de Referência..... 99

4.6 - Implementação Digital da Modelagem Dinâmica de Cargas Retificadoras..... 101

4.6.1 - Subrotina "CONVIP"..... 101

4.6.2 - Subrotina "CONVIN"..... 103

4.6.3 - Subrotina "CONVOP"..... 105

4.6.4 - Subrotina "CONSOL"..... 107

4.6.5 - Subrotina "CONCON"..... 113

4.6.6 - Subrotina "CONTRA"..... 115

4.6.7 - Subrotina "CONVEX"..... 116

4.6.8 - Subrotina "CONOUT"..... 117

Pág.

CAPÍTULO V - ESTUDOS PROCESSADOS EM UM SISTEMA INTERLIGADO DE GRANDE PORTE..... 119

5.1 - Introdução..... 119

5.2 - Características do Sistema Simulado..... 120

5.2.1 - Diagrama Unifilar..... 120

5.2.2 - Parâmetros do Sistema..... 120

5.2.3 - Resultados do Fluxo de Carga para a Situação Ilustrada no Unifilar..... 120

5.3 - Estudos Processados para Modelagens de Carga através de Z constante, P constante, I constante e por Motores de Indução..... 127

5.4 - Estudos Processados Utilizando Modelagem Dinâmica de Conversores e outras Representações..... 134

5.4.1 - Diagrama Unifilar..... 135

5.4.2 - Parâmetros do Sistema..... 135

5.4.3 - Resultados do Fluxo de Carga para a Situação Ilustrada no Unifilar..... 135

5.5 - Conclusões..... 142

CAPÍTULO VI - ESTUDOS PROCESSADOS EM UM SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL..... 145

6.1 - Introdução..... 145

6.2 - Características do Sistema Simulado..... 146

Pág.

6.2.1 - Diagrama Unifilar..... 146

6.2.2 - Parâmetros do Sistema..... 146

6.2.3 - Resultados do Fluxo de Carga para a Situação Ilustrada no Unifilar..... 149

6.3 - Resultados dos Casos Processados..... 149

6.3.1 - Comparações entre Soluções Utilizando a Totalidade das Cargas Modeladas por: Motores de Indução, Z, P e I constantes..... 150

6.3.2 - Comparações entre Soluções Utilizando o Retificador Modelado: dinâmicamente, Z, P e I Constantes..... 153

6.4 - Conclusões..... 156

CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES GERAIS..... 158

BIBLIOGRAFIA 161

APÊNDICE A 163

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Atualmente, os estudos de estabilidade de grandes sistemas elétricos de potencia dependem, quase que inteiramente, da simulação digital do comportamento dinâmico do sistema.

A simulação implica na existência de modelos matemáticos de uma grande variedade de componentes, do conhecimento de dados dos diversos parametros que constituem um sistema de potência, e, finalmente, de um bom programa para computador.

O procedimento básico seguido para os estudos de estabilidade se fundamenta em cálculos repetitivos das características elétricas das componentes dinamicos, tais como, geradores, motores, reguladores, etc. Para tanto são necessários modelos dos sistemas de transmissão, das cargas e finalmente dos geradores. O sistema de transmissão é representado pelo seu circuito equivalente de sequencia positiva. Geradores, eram, até a década de 1960, representados por fontes de tensão constante conectadas ao sistema elétrico através de impedâncias constantes. Entretanto, esta representação clássica possui sérias limitações, de forma que, modelagens muito mais sofisticadas, são atualmente utilizadas com frequencia nestes estudos.

A incorporação de reguladores, tal como o de velocidade, também tem um papel bastante importante nestas análises, principalmente em sistemas isolados, os quais durante condições de distúrbio, apresentam-se com grandes excessos de carga ou de geração. Também, a consideração de reguladores, assim como, a de modelos mais completos de máquinas, influenciam de maneira determinante, o amortecimento nos estudos de estabilidade dinâmica, além de que, afetam moderamente o comportamento da esta

bilidade transitória.

Nos últimos anos, uma considerável enfase tem sido dado a melhoria da estabilidade através do emprego de sistemas de excitação mais rápidos, e estes dispositivos também já são classicamente adicionados nos programas de estabilidade.

É importante ressalvar neste ponto, que as estruturas matemáticas empregadas na modelagem de geradores e seus dispositivos auxiliares, são derivadas com base em leis físicas. Estes princípios, porém, não podem ser diretamente utilizados para a modelagem das cargas elétricas, exceto quando as mesmas são consideradas isoladamente, o que seria impossível de realizar para grandes sistemas elétricos. Naturalmente, esta observação não se aplica integralmente para o caso de sistemas industriais, para os quais suas principais cargas, tais como sejam, motores, aquecedores, conversores, etc, podem ser individualmente representadas.

A representação de uma carga P + jQ para um dado barramento, exige modelos que são fortemente dependentes de uma experiência de campo. De fato, um primeiro problema seria o da distribuição desta potencia em componentes distintos, que por sua vez, sejam diferentemente afetados pelas variações de tensão e frequencia durantes o estudo dinâmico. Em segundo lugar, uma vez distribuidas as parcelas de carga, por exemplo, em motores de indução, sincronos e impedancias constantes, vem a questão de qual a melhor representação para cada uma delas.

Finalmente, um ponto de real importância para os estudos aqui discutidos, refere-se ao da necessidade ou não de representações mais detalhadas de componentes em função de suas

localizações e importância, de forma que, os resultados obtidos pelas análises retratem de modo confiável, o comportamento do sistema elétrico. De fato, a distância elétrica de uma parte do sistema até o ponto de ocorrência do distúbio é determinante sobre a escolha da representação daquela parte do sistema.

Este trabalho de pesquisa teve, pois, por objetivo , uma investigação sobre as diversas formas propostas para a representação das cargas elétricas, e posteriormente, a sua incorportação em um programa para computador digital existente. Implantadas as representações por corrente e potência constante, inúmeros estudos comparativos foram realizados entre estas e outras formas de representação de carga já existentes no programa. Assim, nos capítulos II e III, discutem-se os princípios físicos e os aspectos computacionais envolvidos nestes estudos. Nestes mesmos capítulos procede-se, também, a uma comparação entre as modelagens de cargas para um sistema elétrico típico.

Com a incorporação das representações de carga acima discutidas, o programa utilizado, que em sua forma original somente utilizava cargas em forma de impedância constante ou motores dinamicamente representados, passa a aceitar representações mais simples, que em função do tipo e localização do distúrbio, são tão confiáveis quanto as complexas modelagens dinâmicas.

Ainda no campo da representação de cargas, no capítulo IV considera-se aquelas constituidas por grandes instalações conversoras com controle a corrente constante alimentando cargas caracterizadas por uma força contra-eletromotriz constante, como é o caso de industrias que utilizam a eletrólise como processo industrial, indústrias de fabricação de cloro, aluminio etc.

Neste capítulo é desenvolvido uma modelagem dinâmica específica para tais instalações retificadoras, e nos capítulos V e VI são apresentados resultados de simulação do comportamento dinâmico destas cargas utilizando-se o modelo proposto e por impedância, corrente e potência constante, e finalmente uma análise comparativa dos resultados obtidos. O interesse por estas cargas prende-se ao crescente emprego destas unidades em sistemas elétricos de potência e suas características operacionais bastante próprias.

CAPÍTULO II

REPRESENTAÇÃO DE CARGAS ELÉTRICAS PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE

2.1 - Introdução

Historicamente, estabilidade era um problema diretamente ligado aos sistemas com geração remota ou motores síncronos conectados radialmente a grandes redes. Em tais sistemas é conhecido que estabilidade é relativamente insensível à resposta transitória de carga. A característica quase infinita do barramento receptor resulta em uma carga estabilizada que apresenta pouca influência direta sobre as tensões do terminal gerador. Nestes casos, uma representação por impedância constante constitui uma possibilidade tanto para a simulação de potências ativas como reativas, o que, sem dúvida, simplificará em muito as complicações decorrentes das equações que, porventura, venham a traduzir a presença de elementos não lineares.

Como resultado do rápido desenvolvimento dos sistemas interligados e da consequente distribuição das cargas, aquela característica de um centro gerador distante de um único centro de consumo, perdeu sua importância. Também, com o crescimento industrial e a necessidade de se manter determinadas características próprias, inúmeros complexos desta natureza mantém sistemas próprios de geração de portes significativos, o que justifica plenamente, para tais sistemas, estudos de estabilidade. Nestes casos, a proximidade elétrica dos centros de carga e de geração são ainda mais marcantes, exigindo-se, portanto, cuidados

mais especiais durante a simulação.

Dentro destas situações, tem-se que as correntes de cargas serão diretamente influenciadas e, também, exercerão influência sobre o sistema analisado. De acordo com a referência [1], diferenças nos limites de estabilidade da ordem de até 50% foram encontrados, pela representação de cargas através de potência constante ou por corrente constante. Esta mesma referência mostra resultados bastante esclarecedores sobre o comportamento do ângulo δ da máquina e da tensão da barra de transmissão para uma falta de 5 ciclos de duração, em uma linha de 500 KV, afim de ilustrar a estabilidade de um sistema quando se usa diferentes representações de carga. As figuras 2.1a e 2.1b mostram, respectivamente, as variações dos ângulos de potência para um gerador remoto e a tensão em um barramento. Conforme indicado, as cargas foram representadas por:

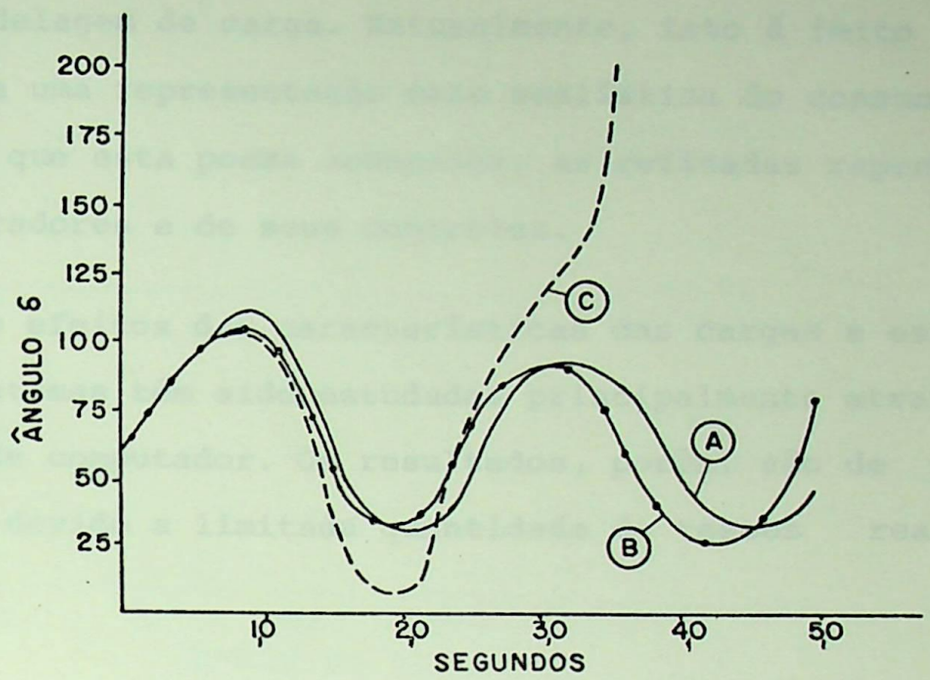
(a) - impedância constante

(b) - corrente constante

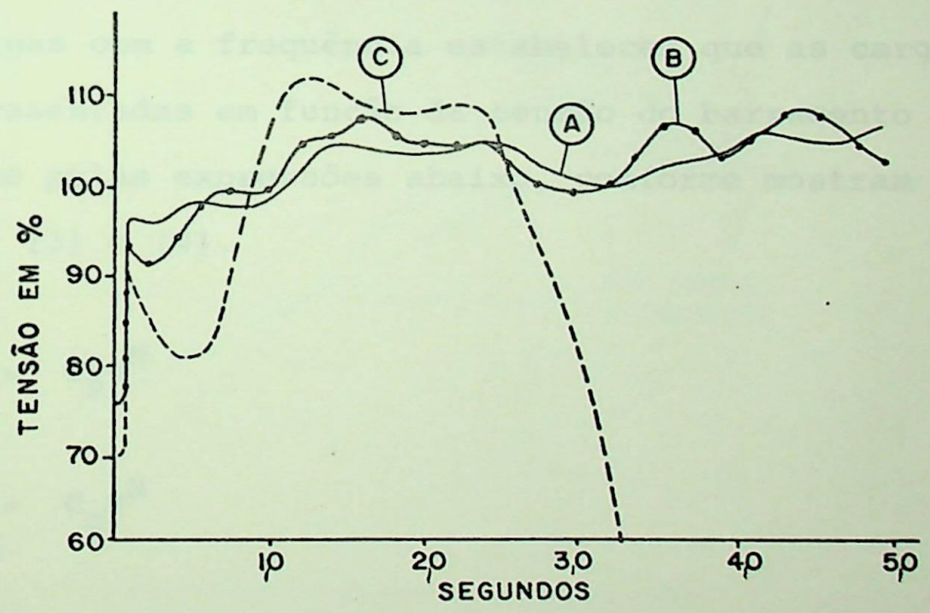
(c) - potência ativa - 50% por corrente constante e
50% por potência constante
- potência reativa - 100% por corrente constante.

De acordo com o indicado nas figuras 2.1a e 2.1b, uma comparação entre os casos b e c mostram que a simples mudança de 50% da potência ativa de potência constante para corrente constante foi o suficiente para levar o sistema à instabilidade.

Dentro deste quadro, embora, no passado, ênfase tenha sido dada às características das unidades geradoras e de suas representações, ficando as cargas consideradas como secundária, recentemente, a situação mudou e muito mais atenção tem sido de



(a)



(b)

Figura 2.1-Efeito de representação de cargas sobre a simulação do comportamento de um sistema elétrico.
(a) ângulo de potência
(b) tensão

dicada à modelagem de carga. Naturalmente, isto é feito para que se tenha uma representação mais realística do consumo, proporcionando que esta possa acompanhar as refinadas representações dos geradores e de seus controles.

Os efeitos das características das cargas a estabilidade dos sistemas têm sido estudadas principalmente através de simulações de computador. Os resultados, porém, são de difícil verificação devido a limitada quantidade de testes realizados no campo.

2.2 - Variação das Cargas com Tensão e Frequência

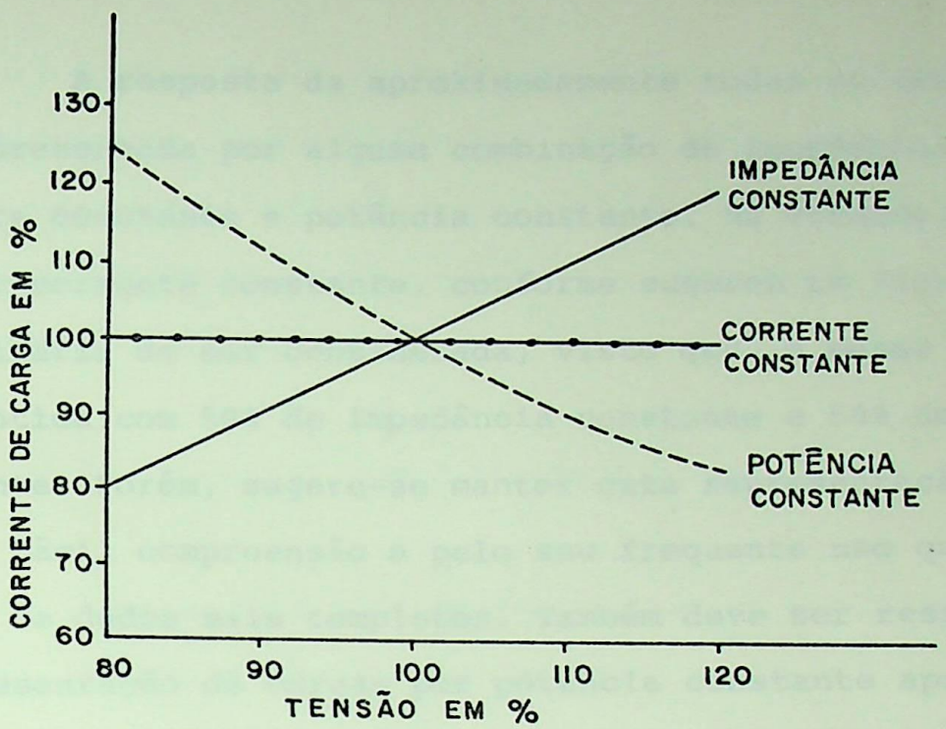
Os tratamentos clássicos que não consideram as variações das cargas com a frequência estabelecem que as cargas podem ser representadas em função da tensão do barramento ao qual estão ligadas pelas expressões abaixo, conforme mostram as referências [2], [3] e [4].

$$P = C_p V^M \qquad (2.1)$$

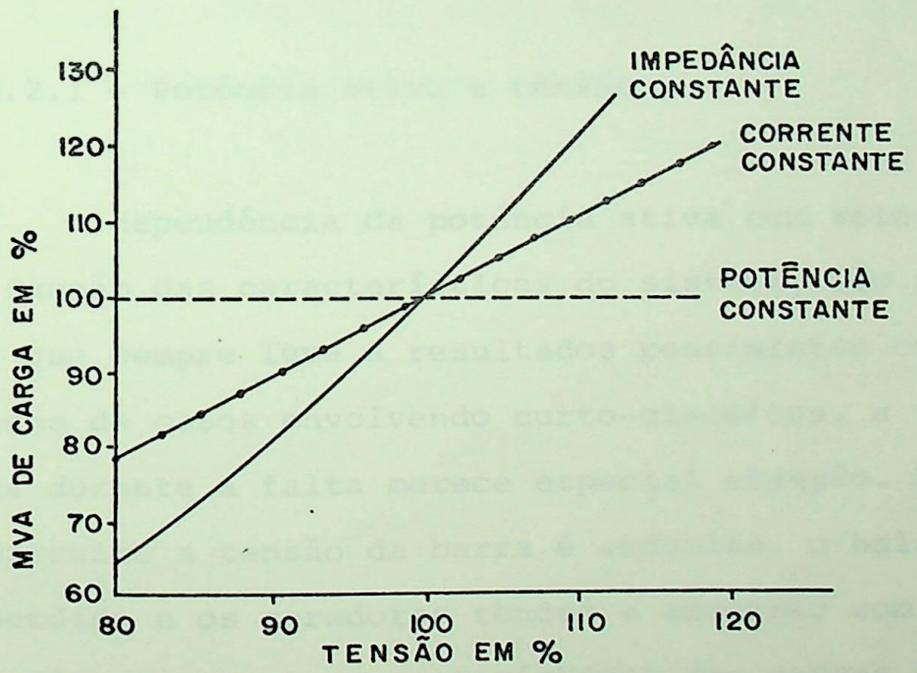
$$Q = C_q V^N \qquad (2.2)$$

Se M = N = 0 tem-se uma representação por potência constante, M = N = 1 a representação é por corrente constante e M = N = 2, a representação é por impedância constante.

As figuras 2.2a e 2.2b mostram as variações das correntes e potências associadas a cada um dos tipos de modelagens empregados, em função da mudança da tensão do barramento ao qual se encontram conectadas.



(a)



(b)

Figura 2.2 - Variações das correntes e potências em função da tensão.

(a) curva de $I = f(V)$

(b) curva de $S = f(V)$

A resposta de aproximadamente todas as cargas, pode ser representada por alguma combinação de impedância constante, corrente constante e potência constante. Na verdade, a modelagem por corrente constante, conforme sugerem as figuras 2.2 não necessitaria de ser considerada, visto que, a mesma é equivalente a obtida com 50% de impedância constante e 50% de potência constante. Porém, sugere-se manter esta representação em face de sua fácil compreensão e pelo seu frequente uso quando da ausência de dados mais completos. Também deve ser ressaltado que a representação de cargas por potência constante apresenta sérios problemas de convergência, dificulta assim uma simulação de representação por corrente constante com a composição acima citada.

2.2.1 - Potência ativa x tensão

A dependência da potência ativa com relação a tensão P(V) é função das características do sistema, não se podendo afirmar que sempre leva a resultados pessimistas ou otimistas. Em estudos de casos envolvendo curto-circuitos, a representação da carga durante a falta merece especial atenção. Durante um curto-circuito a tensão da barra é reduzida, o balanço de potência é perdido e os geradores tendem a acelerar com taxas de aceleração diferentes. As características das cargas podem ter efeitos significantes nas taxas de aceleração e desaceleração de cada gerador individual durante a falta, portanto, na eventual estabilidade do sistema. Os limites de estabilidade frequentemente decrescem quando P(V) muda a representação de carga do tipo impedância constante para o tipo potência constante, especialmente nos casos onde as cargas estão em grandes centros

de cargas distantes da geração. No entanto, os limites de estabilidade tendem a aumentar com a mesma troca de representação de P(V) nos casos onde as cargas estão próximas da geração e no barramento de envio de uma linha. As figuras 2.2a e 2.2b ilustram as situações acima descritas.

2.2.2 - Potência reativa x tensão

A dependência da potência reativa com relação à tensão Q(V), também afeta a estabilidade, mas a análise é relativamente complexa devido aos efeitos na tensão, os quais afetam também a potência ativa. Conforme é citado na referência [3], para se conhecer a função Q = f(V), é extremamente importante o conhecimento do fator de potência da carga da barra testada, como também da compensação capacitiva. Percebe-se facilmente que a estabilidade é melhorada por condensadores síncronos e compensadores estáticos de potência reativa, os quais tendem a estabilizar a tensão.

Uma notável característica de Q(V) é ser provavelmente não linear devido a saturação magnética em transformadores e motores. A saturação magnética depende da relação Volts por Hertz e, portanto, para um tratamento rigoroso, a tensão e a frequência devem ser consideradas juntas.

2.2.3 - Efeitos da frequência

A variação da carga com a frequência é reconhecida como um fator que contribui para o amortecimento do sistema. Uma queda na frequência é seguida por uma queda na potência ativa

de carga, e um aumento da frequência é seguido por um aumento na potência reativa o que ocasiona uma redução de tensão e consequentemente da potência ativa. Portanto, nota-se que o comportamento da potência reativa com relação à variação de frequência é no sentido de melhorar a estabilidade do sistema.

A incorporação dos efeitos da variação da potência de carga com a frequência nos programas de estabilidade não é normalmente feita diretamente na carga de cada barra, mas sim no seu todo. Para tal deduz-se da potência ativa de aceleração uma parcela que depende da frequência. A equação normalmente usada é:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_{acel} = P_{mec} - P_{elet} \qquad (2.3)$$

Chamando-se de D a relação $\Delta P/\Delta f$, para uma variação da frequência de Δf, a carga varia de D x Δf, e portanto, a nova potência de carga será:

$$P_{elet} + D\,\Delta f = P_{elet} + D \frac{d\delta}{dt}$$

E a equação de balanço passará para:

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} - D \frac{d\delta}{dt} = P_{mec} - P_{elet} \qquad (2.4)$$

Utilizando-se a equação (2.4) a potência elétrica não necessita variar com a frequência, pois o efeito da variação da carga com a frequência é incluída indiretamente no coeficiente D, e a potência elétrica não necessita ser modificada a cada instante.

Conforme a referência [5], os valores típicos de D estão compreendidos entre 2 e 3, isto é, havendo 1% de variação de frequência haverá uma variação de 2 a 3% de potência, isto se refere à carga total.

Conforme pode-se concluir com base no descrito acima, a não consideração de variação da carga com a frequência leva a resultados pessimistas, o que significa estar em favor de segurança. Além disto, as oscilações pertinentes a estabilidade transitória se processam de maneira tal que as alterações de frequência são bastante pequenas, resultando que a frequência real pouco oscila em torno da frequência básica.

A tabela 2.1, elaborada com base na referência [3], mostra a variação das potências ativa e reativa com relação a tensão e frequência para algumas cargas. Observando-se esta tabela, nota-se a grande diversificação de características que um dado componente pode apresentar (tal como as lâmpadas fluorescentes)

TABELA 2.1

VARIAÇÃO DE POTÊNCIAS (P e Q) COM TENSÃO E FREQUÊNCIA

COMPONENTES	ΔP%		ΔQ%	
	ΔV = 1%	Δf% = 1%	ΔV% = 1%	Δf% = 1%
Lâmpada incandescente	1,6	0	0	0
Lâmpada fluorescente	1,6 a 2,0	0 a 1	2 a 5	-2,8 a 0
Lâmpada vampor de mercúrio	2,5	-	2,2	-
Condicionadores de ar	0 a 0,5	0,1 a 1,0	1,5 a 3,0	-2,8 a -1,3
Eletrodomésticos c/ motor	0,3	0,1	1,8	-1,6
Televisores	2,0	0	5,2	-4,2
Aquecedores resistivos	2,0	0	0	0
Transformadores de distribuição (perdas)	3,4	0 a 1	11,0	24,0

2.3 - Classificação das Cargas Elétricas

Quanto às suas características, as cargas podem ser divididas em duas grandes categorias: estáticas e dinâmicas (por vezes denominadas girantes). Estes dois tipos são discutidos a seguir.

2.3.1 - Características Estáticas

As características das cargas serão consideradas como estáticas quando elas puderem ser razoavelmente representadas por funções polinominais, ou outras funções algébricas, tal como a exponencial.

As cargas de características estáticas são constituídas, principalmente, de aparelhos de aquecimento e iluminação, as quais possuem um fator de potência constante e próximo da unidade.

Devido à falta de maiores informações, as características estáticas, as quais são baseadas em uma estreita faixa de variação de tensão, são muito frequentemente usadas em estudos envolvendo amplas faixas de variação de tensão.

A faixa de variação da tensão e frequência de interesse depende da natureza do distúrbio. Perdas acidentais de carga frequentemente levam a altas frequências e a altas tensões; perdas de geração resultam em baixas frequências e baixas tensões; um curto-circuito e a sua subsequente eliminação, leva a severas reduções de tensão, seguidas por oscilações na tensão e frequência.

A representação por impedância constante normalmente é satisfatória para as cargas de características estáticas e motores de indução situados em barras desacopladas do ponto onde ocorre a pertubação.

2.3.2 - Características Dinâmicas

As características das cargas são consideradas dinâmicas, quando as respostas aos distúrbios não ocorrem instantaneamente, mas requerem algum tempo. Dependendo da natureza do distúrbio e da proposição do estudo, os tempos de resposta se tornam mais ou menos importantes.

As cargas de características dinâmicas de maior interesse a estabilidade são: os motores, grupos retificadores, etc.

Grandes cargas retificadoras com sofisticados controles eletrônicos de potência tem se tornado comum. Para os estudos de Estabilidade Transitória de sistemas de potência, erros consideráveis podem ocorrer com representações impróprias destas cargas conforme será discutido posteriormente.

A escolha do modelo adequado para representar as cargas constituídas por motores é uma função dos dados disponíveis e da importância do efeito do motor para o estudo. Da literatura [2], [6], existem diversas formas propostas para a representação exata destas cargas. Porém para se utilizar representações dinâmicas exatas, é exigido uma grande quantidade de dados sobre os motores, o que nem sempre se tem disponível. Além disto, o uso destas representações aumenta significativamente

os tempos de processamento e memória de computador, o que onera os estudos. As referências [2] e [3] afirmam que nem sempre uma representação da máquinas mais exata fornece melhores resultados do que representações menos precisas, e certos aumentos de complexidade nos modelos não trazem efeitos significantes nos resultados. Assim modelos mais simplificados, como a proposição de máquinas equivalentes, podem se tornar opções bastantes atrativas para certos estudos.

2.4 - Representações de Cargas por: Impedância Constante, Potência Constante e Corrente Constante

As três formas de representação são discutidas em maiores detalhes a seguir:

2.4.1 - Representação de carga por impedância constante

Sendo P a potência ativa e Q a potência reativa de uma carga conectada a um barramento de tensão V, então:

$$\dot{S} = P + jQ$$

e

$$Z = \frac{V^2}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \tag{2.5}$$

$$\underline{/\dot{Z}} = \phi = \text{arc tg } (\frac{Q}{P}) \tag{2.6}$$

Onde:

Nº EMPENHO 123

V = tensão na carga

P = potência ativa da carga

Q = potência reativa da carga

Z = impedância constante equivalente à carga

Numa representação de carga por impedância constante, assume-se que as potências ativa e reativa são proporcionais ao quadrado da tensão, e que ambas são independentes da frequência.

No caso de um transitório iniciado devido a ocorrência de uma falta na rede de transmissão, tem-se uma potência de carga menor que a esperada durante a falta e, maior que o normal logo após a remoção da falta, devido a desconsideração da variação da potência com a frequência.

Como a impedância permanece constante, uma variação na tensão é acompanhada por uma variação na corrente no mesmo sentido o que atenua as oscilações de tensão, pois, uma redução na tensão leva a uma redução na corrente e consequentemente tem-se uma menor queda de tensão.

2.4.2 - Representação de carga por potência constante

A representação de carga como potência constante é muito severa sob o ponto de vista de estabilidade do sistema, pois ela amplifica as oscilações de tensão: uma queda na tensão causa um aumento na corrente de carga resultando em uma maior queda de tensão. Isto pode levar a concluir que a representação de carga por potência constante é sempre prejudicial à estabilidade. Realmente, se tal representação prejudica ou beneficia os limites de estabilidade, isto depende da localização da carga.

Ocorrendo uma falta em uma linha de interligação de dois sistemas, os geradores do sistema que tem excesso de geração aceleram menos se o consumo local for representado por potência constante do que quando representado por impedância constante, já para o sistema que tem geração inferior à carga, a situação é oposta.

2.4.3 - Representação de Carga por Corrente Constante

A determinação da corrente correspondente a uma carga de potência ativa P e potência reativa Q conectada a um barramento de tensão V, com relação a uma referência é:

$$\dot{S} = P + jQ$$

$$\dot{V} = V_R + jV_M$$

$$\dot{I}^* = I_R + I_M$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{S}}{\dot{V}}$$

onde:

V_R, V_M = componentes real e imaginária da tensão V da barra.

I_R, I_M = componentes real e imaginária da corrente $\dot{I}$

P,Q = parcelas ativa e reativa da carga

$\dot{S} = P+jQ$ = potência aparente da carga

Durante o processamento de um estudo de estabilidade, o valor do ângulo δ da tensão com a referência, conforme mostra a figura 2.3, irá variar a cada solução, mas a defasagem entre a tensão e a corrente injetada (ângulo Θ) permanecerá constante, logo a corrente injetada representativa de uma carga por corrente constante será:

$\dot{I} = I \angle\alpha$ onde:

I = módulo da corrente, que é constante para toda a simulação

α = ângulo de fase da corrente, para cada solução transitória da rede. É obtido pela diferença entre o ângulo δ da tensão (determinado na solução anterior da rede) e o angulo Θ da defasagem inicial entre a tensão e a corrente, que é mantido constante durante todo o processamento.

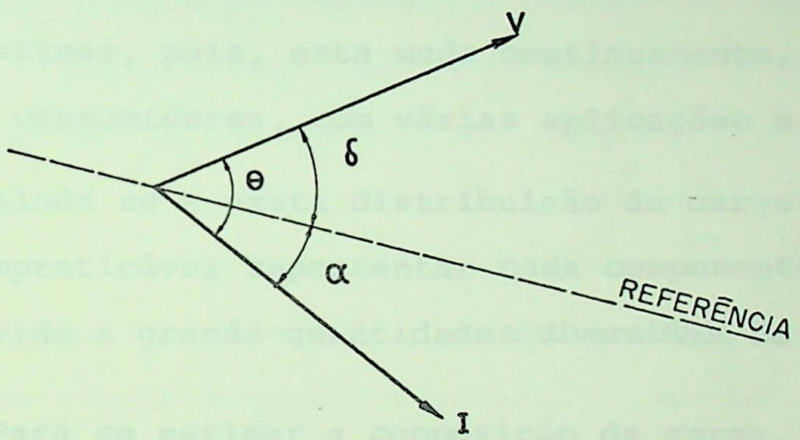


Figura 2.3 - Diagrama Fasorial

A representação de carga por corrente constante é uma situação intermediária entre representação por potência constante e representação por impedância constante.

Pode-se simular uma representação de carga por corrente constante, através da representação de 50% do consumo por potência constante e 50% do consumo por impedância constante, como será mostrado posteriormente.

A carga que compõe um sistema normalmente apresenta parte com características de impedância constante e parte com característica de potência constante, portanto quando se tem

poucas informações sobre a composição da carga pode se tornar conveniente representar toda ela por corrente constante.

Como a corrente se mantém constante, a queda de tensão independe da variação de tensão e assim não se tem redução e nem ampliação das oscilações de tensão.

2.5 - Identificação e Classificação das Cargas

A exata composição de uma carga, é frequentemente difícil de estimar, pois, esta muda continuamente, refletindo os diferentes consumidores, com várias aplicações e dispositivos.

Ainda se a exata distribuição da carga for conhecida, pode ser impraticável representar cada componente de carga individual, devido a grande quantidade e diversidade de elementos.

Para se estimar a composição da carga, dois tipos de dados são requeridos:

- Total de carga instalada
- Fatores de utilização, ou seja, qual a fração do total da carga que está sendo utilizada, em um dado instante de interesse.

O ideal é se conhecer quais são os vários tipos de carga que compõem a carga total, a parcela correspondente a cada tipo e o fator de utilização de cada um. A modelagem de cada elemento que entra na formação da carga total, é feita a partir das características do elemento considerado.

Os diversos tipos de cargas que constituem a tabela 2.1 podem ser classificadas em três grandes grupos:

- Impedância constante
- Motores síncronos
- Motores de indução

No grupo de "Impedância Constante", as cargas de iluminação são as que mais se destacam. Estas se dividem em dois grupos: lâmpadas incandescentes e lâmpadas de descarga em meio gasoso. Para as lâmpadas incandescentes tem-se que a potência reativa é igual a zero, e a potência ativa varia com o quadrado da tensão, quando se despreza o efeito da variação da resistência com a temperatura. Não se desprezando a influência dos efeitos térmicos na resistência das lâmpadas incandescentes, as referências [1] e [5] indicam 1.6 como expoente da tensão. Dependendo do tipo de lâmpadas de descarga em meio gasoso, o fator de potência varia de 0,45 a 0,95. Assim sendo, tanto a potência ativa como a potência reativa variam com o quadrado da tensão.

Para a análise do comportamento dos motores síncronos com relação à variação de tensão, será considerado o circuito equivalente do motor síncrono da figura 2.4,bem como, o diagrama vetorial de tensões. O circuito indicado é simplificado, porém atende aos objetivos físicos da análise que se pretende desenvolver, que é de concluir sobre a relação entre as potências ativa e reativa e a tensão de alimentação da máquina. Esta mesma consideração aplica-se ao tratamento do motor de indução a ser realizado posteriormente.

Da figura 2.4 tem-se:

$$\dot{V} = \dot{E} + jX\dot{I} \qquad (2.7)$$

$$\therefore \quad \dot{I} = \frac{\dot{V} - \dot{E}}{jX}$$

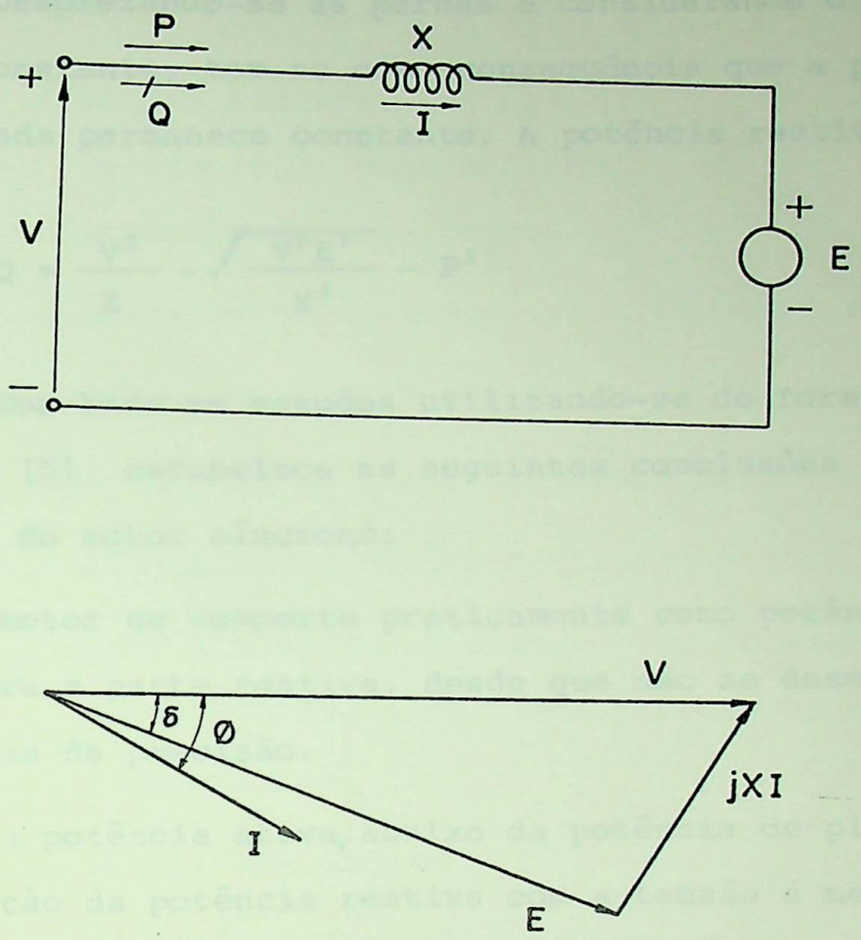


Figura 2.4-Circuito equivalente do motor síncrono e diagrama vetorial de tensões.

Sabendo-se que:

$$\dot{S} = \dot{V}\dot{I}^* = P + jQ \qquad (2.8)$$

tem-se:

$$P = \frac{VE}{X} \operatorname{sen}\delta \qquad (2.9)$$

$$Q = \frac{V^2}{X} - \frac{VE}{X} \cos\delta \qquad (2.10)$$

Desprezando-se as perdas e considerando o conjugado de carga constante, tem-se como consequência que a potência ativa de entrada permanece constante. A potência reativa fica:

$$Q = \frac{V^2}{X} - \sqrt{\frac{V^2E^2}{X^2} - P^2} \qquad (2.11)$$

Com base em estudos utilizando-se do formulário acima, a referência [5], estabelece as seguintes conclusões sobre o comportamento do motor síncrono:

- este motor se comporta praticamente como potência constante para a parte reativa, desde que não se deseje um elevado grau de precisão.
- Para a potência ativa, abaixo da potência de plena carga, a variação da potência reativa com a tensão é menor, tornando-se ainda mais válida a afirmação anterior.

Para analisar o comportamento dos motores de indução com relação a variação de tensão, considerar-se-á o circuito equivalente simplificado de um motor de indução, mostrado na figura 2.5.

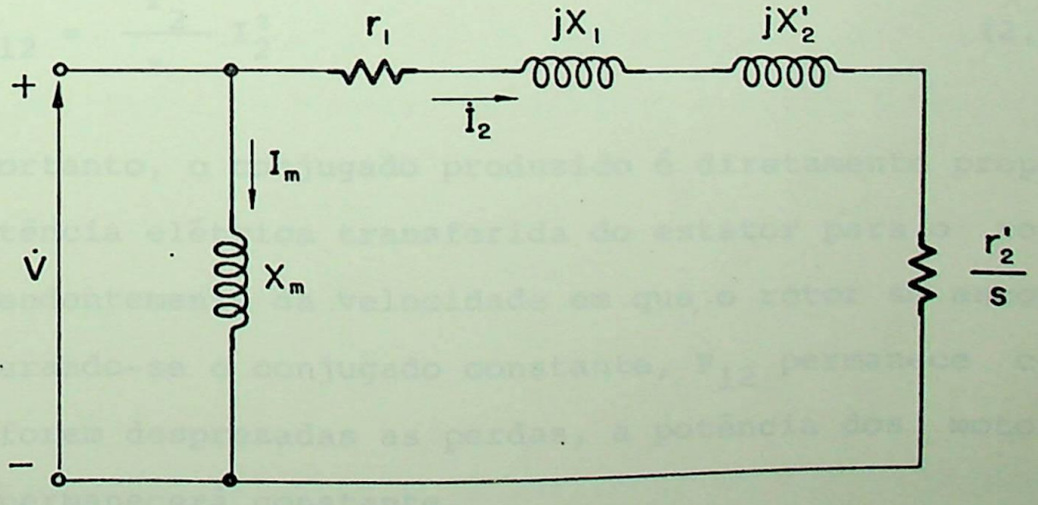


Figura 2.5 - Circuito equivalente simplificado de um motor de indução.

Onde:

V = tensão aplicada

X_m = reatância de magnetização

r_1 = resistência do estator

r'_2 = resistência do rotor refletida para o estator

x_1 = reatância do estator

x'_2 = reatância do rotor refletida para o estator

sendo:

T = conjugado ou torque eletromagnético

P_{12} = potência elétrica transferida do estator para o rotor (Potência de campo girante ou potência eletromagnética)

ω_s = velocidade síncrona

s = deslizamento ou escorregamento

Sabe-se da teoria do motor de indução que:

$$T = \frac{P_{12}}{\omega_s} \qquad (2.12)$$

$$P_{12} = \frac{r'_2}{s} I_2^2 \qquad (2.13)$$

Portanto, o conjugado produzido é diretamente proporcional à potência elétrica transferida do estator para o rotor (P_{12}) independentemente da velocidade em que o rotor se encontra. Considerando-se o conjugado constante, P_{12} permanece constante e se forem desprezadas as perdas, a potência dos motores de indução permanecerá constante.

A potência reativa pode ser dividida em duas parcelas: aquela correspondente à magnetização (em X_m), e aquela

nas reatâncias x_1 e x'_2 , conforme estabelece a expressão (2.14). Supondo que a máquina não esteja em regime de saturação, pode considerar-se a reatância X_m como aproximadamente constante.

$$Q = Q_m + Q_{12} \tag{2.14}$$

Onde:

$$Q_m = X_m (I_m)^2 = \frac{V^2}{X_m} \tag{2.15}$$

$$Q_{12} = (x_1 + x'_2)\ I_2^2 \tag{2.16}$$

Substituindo (2.13) em (2.12) obtém-se:

$$T = \frac{1}{\omega s} \quad \frac{r'_2}{s} \quad I_2^2 \tag{2.17}$$

Da figura (2.5) tira-se que:

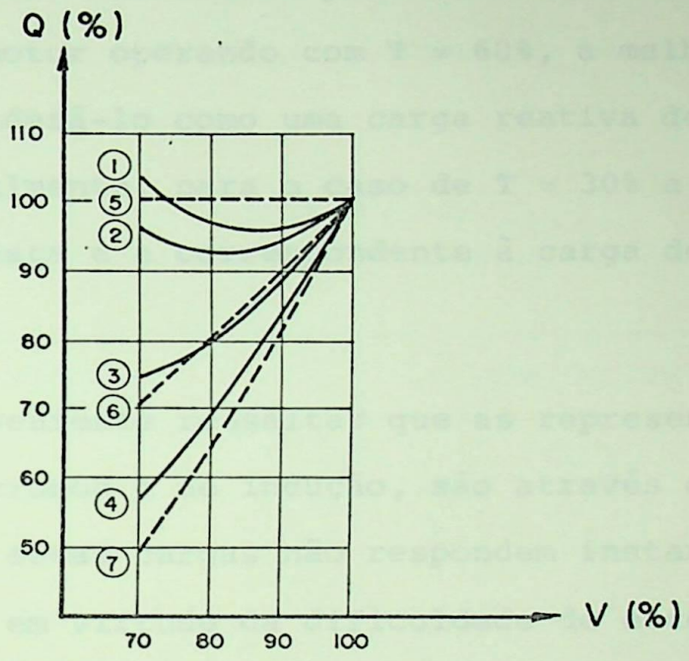
$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{V}}{r_1 + r'_{2/s} + j(x_1 + x'_2)} \tag{2.18}$$

Considerando que o motor esteja operando próximo ao conjugado nominal, a parcela r'_2/s do denominador da equação (2.18) será dominante, e fazendo as devidas substituições, obtem-se:

$$Q = Q_m + Q_2 = \frac{V^2}{X_m} + \frac{T^2 \omega_s^2}{V^2} (x_1 + x'_2) \tag{2.19}$$

Observando a equação (2.19), nota-se que a potência reativa consumida por um motor de indução é função da tensão e do grau de carregamento, dificultando assim, ter-se uma única

curva de Q= f(V). A figura 2.6 apresenta sete curvas de Q = f(V), sendo as quatro primeiras correspondentes aos torques de carga de 100, 90, 60 e 30%, e as três últimas correspondentes a potência constante, corrente constante e impedância constante.



- ① T_{carga} = 100%
- ② T_{carga} = 90%
- ③ T_{carga} = 60%
- ④ T_{carga} = 30%
- ⑤ Correspondente a potência constante
- ⑥ Correspondente a corrente constante
- ⑦ Correspondente a impedância constante

Figura 2.6-Curvas de Q = f(V)

Utilizando-se do equacionamento acima, chegou-se [5] às seguintes conclusões com relação às potências ativas e reati

vas dos motores de indução.

- A potência ativa permanece praticamente constante.
- A curva Q = f(V) é bastante influenciada pelo conjugado de carga. Para um conjugado de carga de 100% ou 90% do nominal, a potência reativa é praticamente constante. Já para o caso do motor operando com T = 60%, a melhor aproximação seria considerá-lo como uma carga reativa de corrente constante. Finalmente, para o caso de T = 30% a curva que melhor se ajusta é a correspondente à carga de impedância constante.

É conveniente ressaltar que as representações exatas dos motores síncronos e de indução, são através de modelagens dinâmicas, pois estas cargas não respondem instantaneamente aos distúrbios. Mas em virtude da dificuldade de obtenção de dados, do maior gasto de tempo de computador quando se utiliza representações mais elaboradas e da redução do efeito do motor, para os estudos quando este se afasta do ponto de falta, sugere-se modelagens simplificadas como: potência constante, corrente constante e impedância constante.

2.6 - Composição da Carga Elétrica

De posse da forma de representação dos diversos tipos de carga, faz-se a seguir estudos para determinar a composição da carga de um barramento.

Conforme citado anteriormente, para se conhecer a composição de uma carga em um dado instante de interesse, é necessário que se conheça os tipos de carga que compõem a carga total, a parcela correspondente a cada tipo e o fator de utiliza

ção de cada um. As tabelas 2.2 a 2.6 e a figura 2.6 foram extraídas da referência [5] e fornecem informações necessárias para se determinar a formação típica da potência total de uma subestação. É conveniente ressaltar que a referência [5] acima citada, que teve sua conclusão em 1974, pode não condizer com a realidade de outras regiões, mesmo da região Sudeste na atual situação.

A tabela 2.2, tipicamente aplicável a região Sudeste do Brasil, fornece a divisão percentual de carga entre os diversos tipos de consumidores.

TABELA 2.2

DIVISÃO DE CARGA ENTRE OS TIPOS DE CONSUMIDORES

TIPO	PORCENTAGEM
Residencial	21%
Industrial	55%
Comercial	13%
Iluminação Pública	3%
Tração	2%
Serviços Públicos	6%

Como visto anteriormente, os diversos tipos de cargas existentes, podem ser classificados em três grandes grupos: cargas de impedância constante, motores síncronos e motores de indução. A tabela 2.3 distribui os tipos de consumidores da tabela 2.2 pelos grupos acima citados. A título de ilustração, os 100% da potência consumida nas indústrias, são divididos em percentagens correspondentes a motores síncronos, motores de indução e impedância constante. O mesmo ocorre para os demais consumidores, como: residenciais, iluminação pública, tração, comércio e serviços públicos.

TABELA 2.3

DIVISÃO DOS TIPOS DE CARGAS ENTRE OS TIPOS DE CONSUMIDORES

TIPO	GRUPO		
	IMPEDÂNCIA CONSTANTE	MOTORES SINCRONOS	MOTORES DE INDUÇÃO
Residencial	95%	-	5%
Industrial	20%	5%	75%
Iluminação Pública	100%	-	-
Tração	100%	-	-
Comercial	90%	-	10%
Serviços Públicos	20%	50%	30%

Reunindo as informações contidas nas tabelas 2.2 e 2.3, chega-se aos valores da tabela 2.4, a qual fornece as porcentagens da carga total por grupo e por tipo de consumidor. Divide-se a potência total da subestação entre os vários tipos de consumidores constituintes, e a percentagem corresponde a cada consumidor nos grupos de carga que o compõe, tem-se os números exemplificados na tabela 2.4.

TABELA 2.4

PERCENTAGENS DA CARGA TOTAL POR GRUPO

E POR TIPO DE CONSUMIDOR

TIPO	GRUPO			
	IMPEDÂNCIA CONSTANTE	MOTORES SÍNCRONOS	MOTORES DE INDUÇÃO	TOTAL TIPO
Residencial	19,95%	-	1,05%	21%
Industrial	11 %	2,75%	41,25%	55%
Iluminação Pública	3 %	-	-	3%
Tração	2 %	-	-	2%
Comercial	11,7%	-	1,3%	13%
Serviços Públicos	1,2%	3,0%	1,8%	6%
TOTAL POR GRUPO	48,85%	5,75%	45,40%	100%

Conforme citado anteriormente, a potência reativa consumida por motores de indução é função do grau de carregamento dos mesmos. Objetivando a distribuição da potência consumida pelos motores de indução nos diversos graus de carregamento, pode utilizar-se do fator de demanda como uma medida de tal grandeza. A tabela 2.5 fornece valores típicos de fatores de demanda, em função do tipo de processo.

TABELA 2.5

FATORES DE DEMANDA DOS MOTORES DE INDUÇÃO PARA TIPOS DE PROCESSOS

TIPO DE PROCESSO	F.D. (%)
Uso Geral	30%
Processo semicontínuo	60%
Processo contínuo	90%

A carga total de motores de indução é dividida em parcelas correspondentes aos vários graus de carregamento dos motores. A tabela 2.6 exemplifica tal divisão.

TABELA 2.6

DIVISÃO DA CARGA TOTAL DE MOTORES DE INDUÇÃO ENTRE OS TIPOS DE PROCESSO

TIPO DE PROCESSO	PORCENTAGEM
Uso Geral	45%
Processo semicontínuo	30%
Processo contínuo	25%
TOTAL	100%

Finalmente, uma vez conhecidas as potências P e Q de um dado barramento, as fórmulas usadas para representar as potências ativa e reativa totais, em função da divisão da carga em motores síncronos, de indução e outras cargas, são:

$$P_T = P_S + P_I + K_1V^2 \qquad (2.20)$$

$$Q_T = Q_S + Q_I + K_2V^2 \qquad (2.21)$$

Onde:

P_S e Q_S - são, respectivamente, as potências ativa e reativa consumidos pelos motores síncronos.

P_I e Q_I - são, respectivamente, as potências ativa e reativa consumidas pelos motores de indução.

K_1V^2 e K_2V^2 - são, respectivamente, as potências ativa e reativa consumidas pelas cargas de impedância constante.

É importante ressaltar que as potências ativas consumidas pelos motores síncronos e de indução podem ser consideradas constantes, e que as potências reativas dos motores de indução são determinados pela equação (2.19), e para os motores síncronos podem ser considerados constantes.

Considerando-se que a potência total e uma substação seja de 100MW à tensão nominal, na base de 100 MVA, do resumo constante na tabela 2.4 tem-se:

$P_S \cong 0,05$

$P_I \cong 0,45$

$K_1 \cong 0,50$

Portanto, da equação (2.20):

$P_T = 0,5 + 0,5V^2$

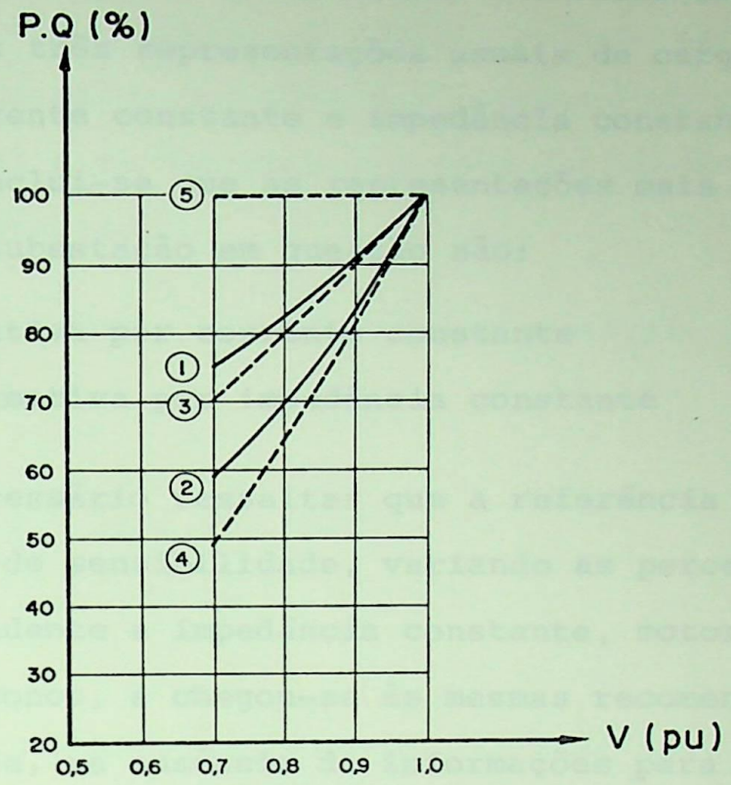
Na referência [5] são feitos cálculos para a potência reativa total da Região Sudeste do Brasil, utilizando-se das fórmulas e tabelas apresentadas, chegando-se aos valores mostrados na tabela 2.7.

TABELA 2.7

VALORES DE POTÊNCIA REATIVA EM FUNÇÃO DA TENSÃO

TENSÃO (P.V.)	POTÊNCIA REATIVA (%)
V = 0,7	Q_T = 58,5%
V = 0,8	Q_T = 69,3%
V = 0,9	Q_T = 83,2%
V = 1,0	Q_T =100,0%

As potências ativa e reativa totais são mostradas em forma de curvas na figura 2.7.



① $P_T = f(V)$

② $Q_T = f(V)$

③ P ou Q por I = constante

④ P ou Q por Z = constante

⑤ P ou Q por potência constante

Figura 2.7 - Curvas de P = f(V) e Q = f(V)

Nestas figuras estão também indicadas as curvas correspondentes às três representações usuais de carga: potência constante, corrente constante e impedância constante. Com base na figura 2.7 conclui-se que as representações mais adequadas para a carga da subestação em questão são:

- Potência ativa por corrente constante
- Potência reativa por impedância constante

É necessário ressaltar que a referência [5] apresenta uma análise de sensibilidade, variando as percentagens de carga correspondente a impedância constante, motores de indução e motores síncronos, e chegou-se às mesmas recomendações acima citadas, ou seja, na ausência de informações para verificar a variação da carga com a tensão, que se represente toda a potência ativa da subestação por corrente constante e toda a potência reativa por impedância constante.

Uma outra observação importante é que, neste estudo, a faixa de variação de tensões é de 70 a 100% do valor nominal. Para variações de tensões abaixo de 70%, os contatores de corrente alternada já terão desarmado os motores e a parcela de carga referente a motores será bastante reduzida, o que justifica o fato de recomendar-se para barramentos onde a tensão possa cair abaixo de 70%, a representação por impedância constante como a mais indicada, para ambas as componentes da potência.

2.7 - Outro Processo para a Distribuição da Carga [6]

Em sistemas ou indústrias em que seja possível determinar-se a relação $\Delta I/\Delta V$, onde ΔI é a diferença percentual na

corrente de carga e ΔV é a diferença percentual final da tensão da barra onde estão ligadas as cargas, pode-se determinar qual a percentagem da carga que deve ser representada por potência constante e qual a percentagem que deve ser representada por impedância constante.

Da referência [1] tem-se que a relação entre carga e tensão é da forma:

$$S_1 = S_o \quad [A + (1 - A)V_r^2] \tag{2.22}$$

onde:

S_1 = potência aparente de carga na tensão V.

S_o = potência de carga na tensão inicial

V_r = relação da tensão para a tensão inicial

A = parte da carga na tensão inicial representada por potência aparente constante.

I_r = relação da corrente de carga para a corrente inicial.

Fazendo:

$$S = \frac{S_1}{S_o} = V_r I_r \text{ por definição}$$

Dividindo (2.22) por S_o e substituindo,

$$V_r I_r = A + (1 - A)\ V_r^2 \tag{2.23}$$

Dividindo (2.23) por V_r e diferenciando:

$$\frac{dI_r}{dV_r} = \frac{-A}{V_r^2} + 1 - A \tag{2.24}$$

Assumindo pequenas variações de tensão em torno do valor nominal, pode-se escrever:

$$\frac{\Delta I_r}{\Delta V_r} = \frac{dI_r}{dV_r} \quad e \quad V_r^2 \cong 1$$

e resolvendo (2.24) tem-se:

$$A = 1/2 \ (1 - \Delta I_r/\Delta V_r) \qquad (2.25)$$

As cargas de impedância constante se caracterizam por terem a relação $\Delta I_r/\Delta V_r = 1$ que substituindo em (2.25) fornece $A = 0$, ou seja toda carga deve ser representada por impedância constante.

As cargas representadas por corrente constante se caracterizam por terem uma relação $\Delta I_r/\Delta V_r = 0$ que substituido em (2.25) fornece $A = 1/2$, resultando uma representação de 50% da carga por impedância constante e 50% por potência constante.

2.8 - Conclusões

Quando da escolha da representação mais adequadas das cargas de um sistema, vários fatores devem ser considerados, entres os quais pode-se citar: quantidade de dados disponíveis sobre as cargas, distância entre a carga e o ponto de falta para se determinar a importância da mesma para o estudo, convergência do fluxo de potência transitório, etc.

Analisando vários resultados obtidos pelas representações de carga por impedância constante, potência constante e

corrente constante, pode-se notar que a representação por impedância constante amortece as oscilações de tensão, o que garante a convergência do fluxo de potência transitória. Já a representação por potência constante é bastante rigorosa, pois, a mesma amplia as oscilações de tensão o que leva o fluxo de potência transitório à não convergência em um grande número de casos [1], [5]. De fato, uma queda de tensão resultará, para esta representação, num aumento da corrente, que por sua vez, causará uma maior queda de tensão, etc. A representação por corrente constante situa-se numa posição intermediária, mesmo a corrente sendo mantida constante poderá provocar a não convergência do fluxo de potência transitório [5]. Nesta mesma referência, são apresentadas conclusões de um estudo, onde os resultados obtidos com modelagem por corrente constante são bastante próximos daqueles obtidos por impedância constante, sendo as oscilações de maior amplitude com a primeira representação.

Em síntese, o capítulo apresentou diversos aspectos associados a modelagem de cargas, análise e recomendações sobre a distribuição de cargas para um barramento típico e finalmente, considerações extraídas da literatura sobre os efeitos das modelagens nos comportamentos $P = f(v)$ e $Q = f(v)$. Nos capítulos seguintes, onde serão implementados as representações, serão verificados os efeitos destas representações de carga sobre o comportamento dinâmico do sistema.

CAPÍTULO III

IMPLEMENTAÇÃO DIGITAL DA MODELAGEM DE CARGAS POR CORRENTE E POTÊNCIA CONSTANTE

3.1 - Introdução

Este capítulo tem por objetivo descrever a estrutura utilizada para a implementação das modelagens de carga por corrente e por potência constante no programa de estabilidade desenvolvido na referência [7]. Neste programa as representações por impedância constante e as por modelos dinâmicos (motores) já se encontravam em funcionamento, de forma que, as alterações a serem realizadas visam ápenas proporcionar novas opções para as representações das cargas nos estudos a serem posteriormente executados. Deve-se, neste ponto, deixar claro que a modelagem designada por dinâmica compreende a representação de motores de indução e síncronos por seus circuitos equivalentes, e dispositivos de regulação do modo mais completo possível. Além da representação elétrica dentro de um alto grau de realismo, considera-se, nestes casos, a inércia mecânica dos motores. Com isto, estas máquinas serão descritas por conjuntos de equação diferenciais que serão resolvidas através dos métodos numéricos já empregados no programa. Inevitavelmente, isto ocasiona altos tempos computacionais conciliados a grandes espaços de memória. A inclusão das modelagens por P e I constantes procurou exatamente conciliar um compromisso entre realismo de representação e redução de tempo e espaço computacionais. Como o procedimento para a implantação será verificado para um programa digital já com pleno uso, o tratamento do capítulo focalizará, sobretudo,

a respeito das modificações e novas subrotinas desenvolvidas.

3.2 - Estrutura Geral para Modelagens das Cargas

Como primeiro procedimento deve-se atentar para a subrotina de leitura e impressão de dados que definirão as modelagens a serem utilizadas. Esta subrotina deverá ser a responsável pela leitura e posterior separação das cargas quanto às modelagens empregadas ao estudo em questão, e, em seguida, providenciar a impressão dos dados já convenientemente divididos segundo os tipos de representação de cargas solicitadas.

Os diagramas de blocos a seguir (figura 3.1) mostra a sequência obedecida para modelagem de cargas desde a leitura dos dados até a transformação da carga na impedância, corrente ou potência calculada de forma a atender a representação considerada. É importante observar aqui que o programa usado também admite cargas motoras representadas dinamicamente, de forma individual ou através de motores equivalentes. Quando estas últimas são consideradas, o primeiro passo consiste em separar da carga total do barramento aquelas representadas por motores. Posteriormente, com a carga restante, procede-se conforme será discutido ao longo do capítulo.

De forma a atender os requisitos que obedecem a estrutura geral da figura 3.1, estas subrotinas serão detalhadamente discutidas nos itens que se seguirão.

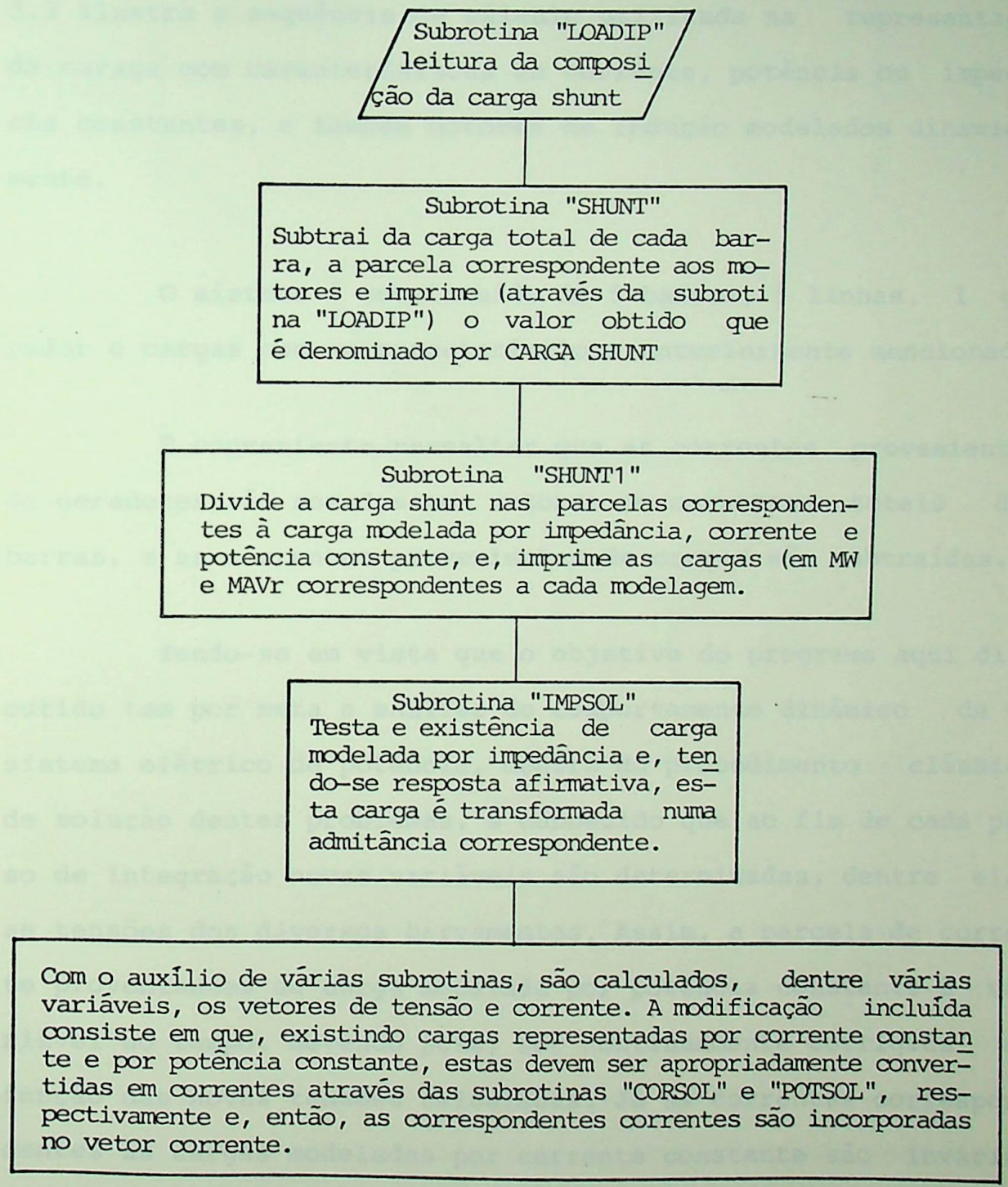


Figura 3.1 - Diagrama de blocos da sequência de modelagem de cargas.

3.3 - Conceituação Física das Implementações de Cargas por Potência e Corrente Constante

De forma a ilustrar fisicamente as transformações propostas, o equacionamento do sistema mostrado nas figuras 3.2 e 3.3 ilustra a sequência de cálculo utilizada na representação de caragas com características de corrente, potência ou impedância constantes, e também motores de indução modelados dinamicamente.

O sistema é constituído de 5 barras, 5 linhas, 1 gerador e cargas com as características anteriormente mencionadas.

É conveniente ressaltar que as correntes provenientes de geradores são somadas aos vetores de correntes totais das barras, e as correntes provenientes de cargas são subtraídas.

Tendo-se em vista que o objetivo do programa aqui discutido tem por meta a análise do comportamento dinâmico de um sistema elétrico de potência, dentro do procedimento clássico de solução destes problemas, é conhecido que ao fim de cada passo de integração novas variáveis são determinadas, dentre elas as tensões dos diversos barramentos. Assim, a parcela de corrente provenientes da carga modelada por potência constante é variável no tempo, devendo pois, ser continuamente corrigida em função das novas tensões calculadas. Já as correntes correspondentes às cargas modeladas por corrente constante são invariáveis no tempo, e iguais aos valores determinados com a finalidade de verificar o balanço de carga, isto é, na condição inicial.

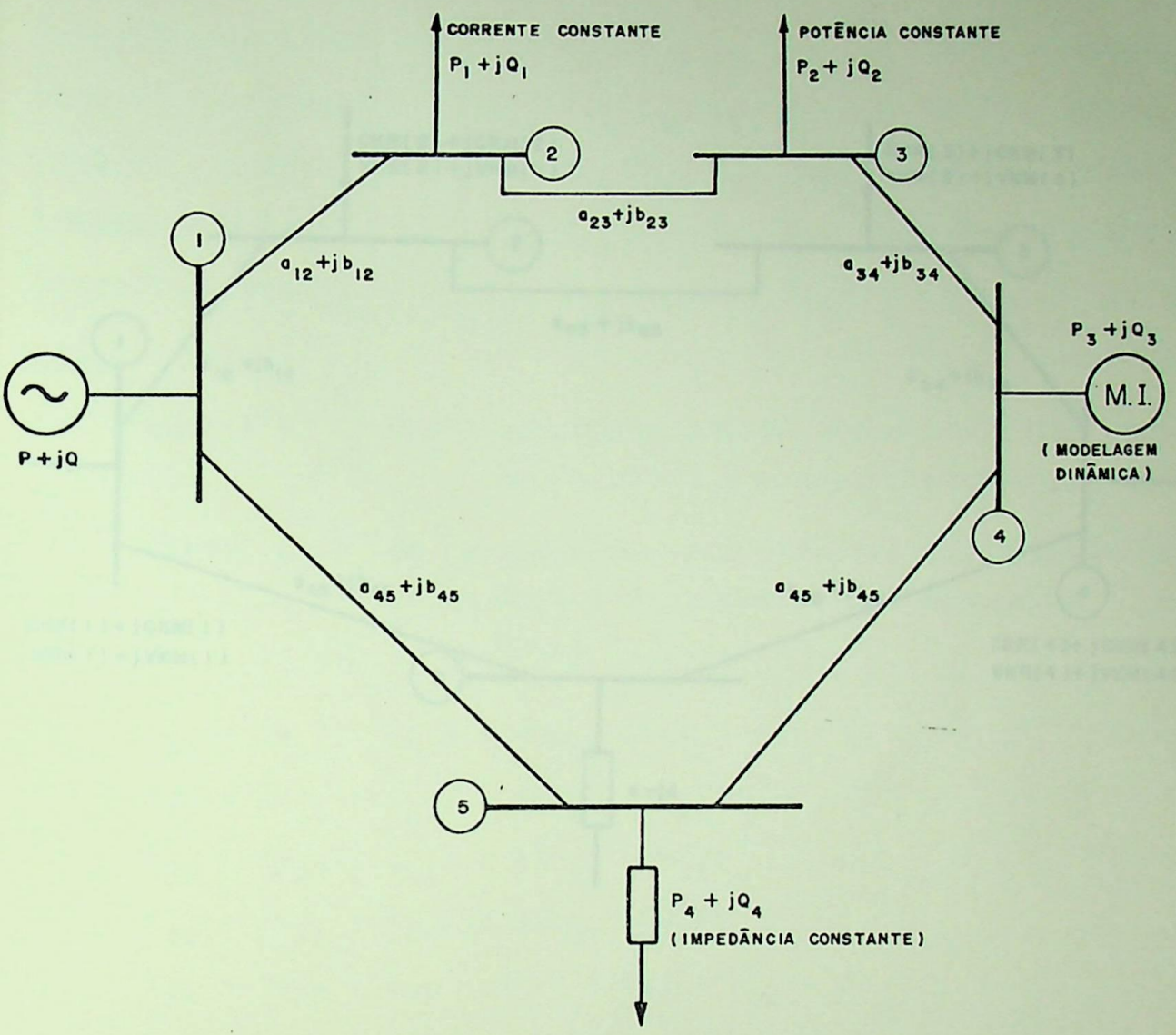


Figura 3.2 - Diagrama Unifilar para ilustração do equacionamento de transformação.

A figura 3.3, substitui as fontes e cargas (quando aplicável) por fontes de corrente. Estas correntes são sempre representadas por um fasor com sua parte real dadas pelo termo CKR(j) e sua parte imaginária por CKM(j). O mesmo se aplica às tensões de barramentos. A carga modelada por impedância constante foi representada pela admitância (c - jd).

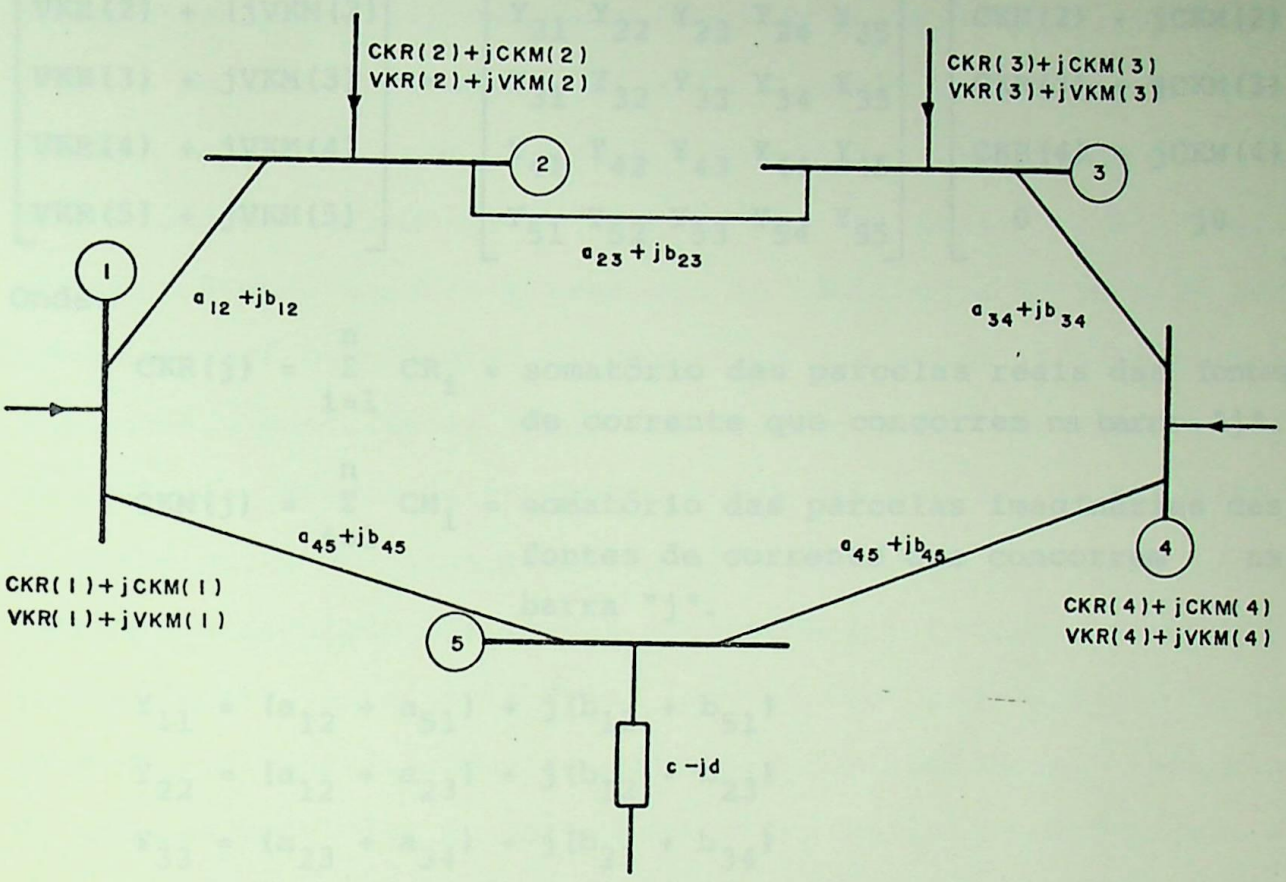


Figura 3.3 - Ilustração do processo de ignição de corrente

Com base no diagrama unifilar da figura 3.2 pode-se obter as relações:

$$[V] = [Y]^{-1} [I] \qquad (3.1)$$

Ou:

$$\begin{bmatrix} VKR(1) + (jVKM(1) \\ VKR(2) + (jVKM(2) \\ VKR(3) + jVKM(3) \\ VKR(4) + jVKM(4) \\ VKR(5) + jVKM(5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} CKR(1) + JCKM(1) \\ CKR(2) + jCKM(2) \\ CKR(3) + jCKM(3) \\ CKR(4) + jCKM(4) \\ 0 \qquad\quad j0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Onde:

$CKR(j) = \sum_{i=1}^{n} CR_i$ = somatório das parcelas reais das fontes de corrente que concorrem na barra "j".

$CKM(j) = \sum_{i=1}^{n} CM_i$ = somatório das parcelas imaginárias das fontes de corrente que concorrem na barra "j".

$$Y_{11} = (a_{12} + a_{51}) + j(b_{12} + b_{51})$$
$$Y_{22} = (a_{12} + a_{23}) + j(b_{12} + b_{23})$$
$$Y_{33} = (a_{23} + a_{34}) + j(b_{23} + b_{34})$$
$$Y_{44} = (a_{34} + a_{45}) + j(b_{34} + b_{45})$$
$$Y_{55} = (a_{45} + a_{51} + c) + j(b_{45} + b_{51} - d)$$
$$Y_{12} = Y_{21} = -(a_{12} + jb_{12})$$
$$Y_{13} = Y_{31} = -(a_{13} + jb_{13})$$
$$Y_{14} = Y_{41} = -(a_{14} + jb_{14})$$
$$Y_{15} = Y_{51} = -(a_{15} + jb_{15})$$
$$Y_{23} = Y_{32} = -(a_{23} + jb_{23})$$
$$Y_{24} = Y_{42} = -(a_{24} + jb_{24})$$
$$Y_{25} = Y_{52} = -(a_{25} + jb_{25})$$
$$Y_{34} = Y_{43} = -(a_{34} + jb_{34})$$
$$Y_{35} = Y_{53} = -(a_{35} + jb_{35})$$
$$Y_{45} = Y_{54} = -(a_{45} + jb_{45})$$

O primeiro membro das equações (3.12) e (3.2) é constituído pelo vetor de tensões das barras, o qual não apresenta nenhuma

característica especial que caracterize a modelagem considerada. Já o segundo membro é formado pelo produto da inversa da matriz de admitâncias do sistema pelo vetor de correntes injetadas nas barras. Na matriz de admitâncias do sistema, incorpora-se as cargas modeladas por impedância constante. Observando-se a composição dos elementos da diagonal da matriz de admitâncias [Y] do sistema, nota-se a presença da admitância da cargas nos elementos correspondentes às barras em que estão ligadas as cargas, onde a condutância apresenta sinal (+) e a susceptância sinal (-). Os vetores de correntes injetadas nas barras não recebe contribução da carga modelada por impedância constante, mas recebe contribuição das cargas modeladas por potência e corrente constantes. A corrente total injetada em cada barra, é um somatório das contribuições de correntes dos geradores, motores de indução modelados dinamicamente e das cargas shunt modeladas por corrente e potência constantes.

3.4 - Subrotinas Modificadas

Nas análises que se seguem, procurar-se-á colocar, inicialmente as modificações que foram necessárias em várias subrotinas que já constituíam o programa principal para estudos de estabilidade transitória. Uma vez compreendidos estes passos, serão comentadas as subrotinas especialmente elaborados no sentido de possibilitar a incorporação, nos estudos, de outras formas de representação de cargas.

3.4.1 - Subrotina "SHUNT"

Função: A subrotina "SHUNT" remove, da carga total, a carga em motores de indução a serem modelados dinamicamente, e o resultado assim obtido forma o que se dominará, daqui por diante, por "carga shunt".

Comentários:

Os vetores PL(n) e QL(n), fornecidos como dados de entrada são constituídos pelas potências ativa e reativa totais de cada barra, e os vetores PLM(M) e QLM(M) pelas potências ativa e reativa de cada motor.

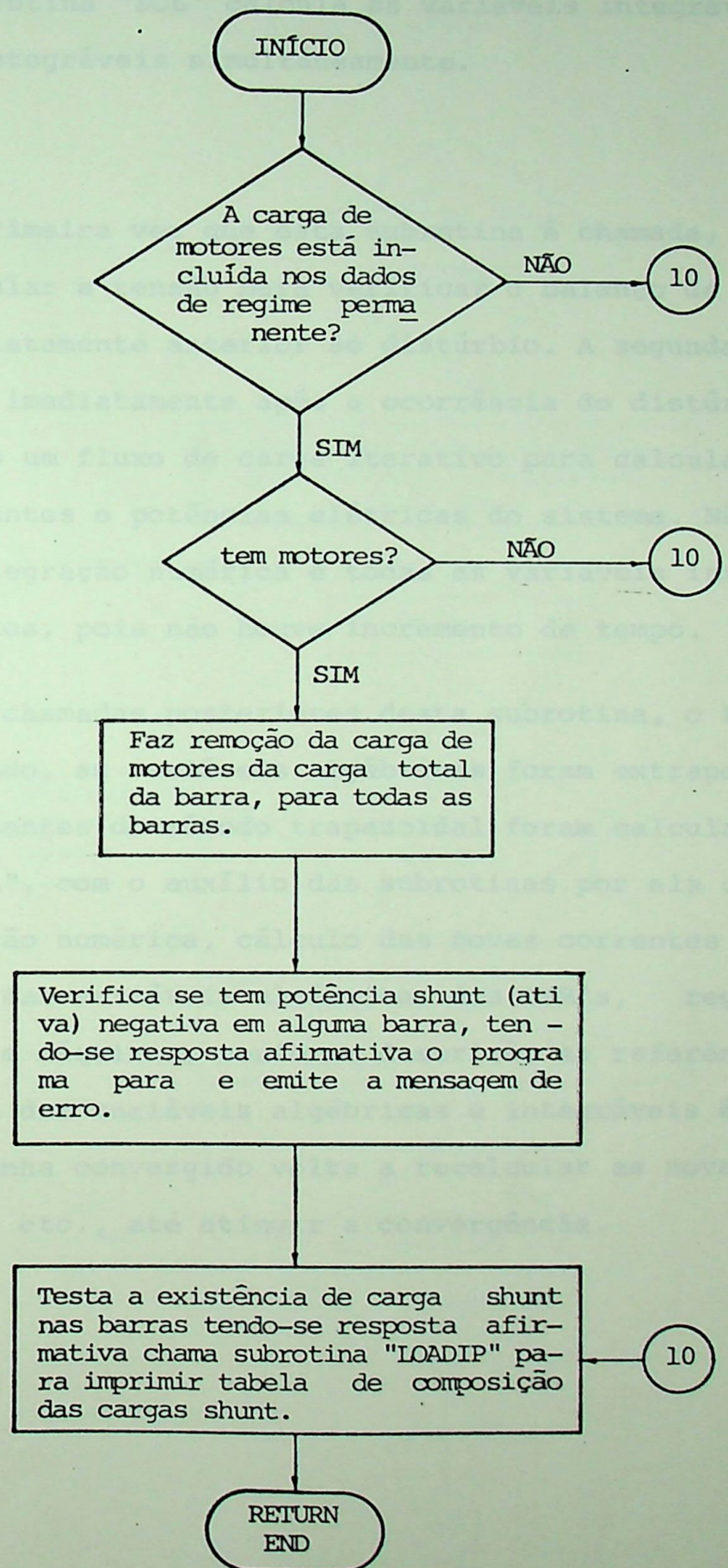
Nesta subrotina verifica-se ainda a existência de potência negativa em alguma barra e, em caso afirmativo, o processamento é interrompido e uma mensagem de erro é emitida.

Códigos Usados:

ILM > Ø - significa que a carga de motores não está incluida nos dados de regime permanente.

IMSW = 1 - significa que os motores estão inicialmente desligados.

Fluxograma Subrotina "SHUNT"



3.4.2 - Subrotina "SOL"

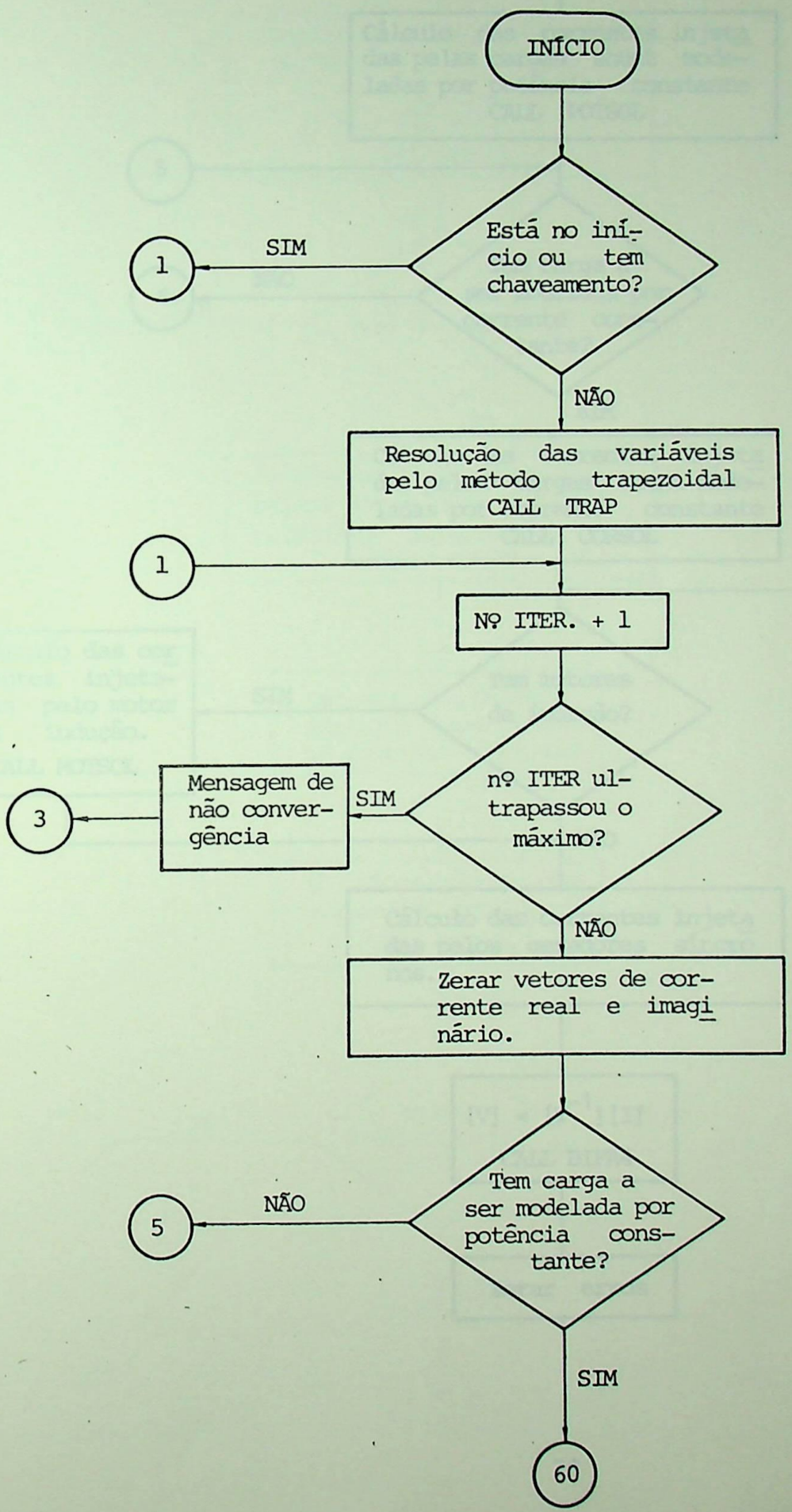
Função: A subrotina "SOL" calcula as variáveis integráveis e não integráveis simultaneamente.

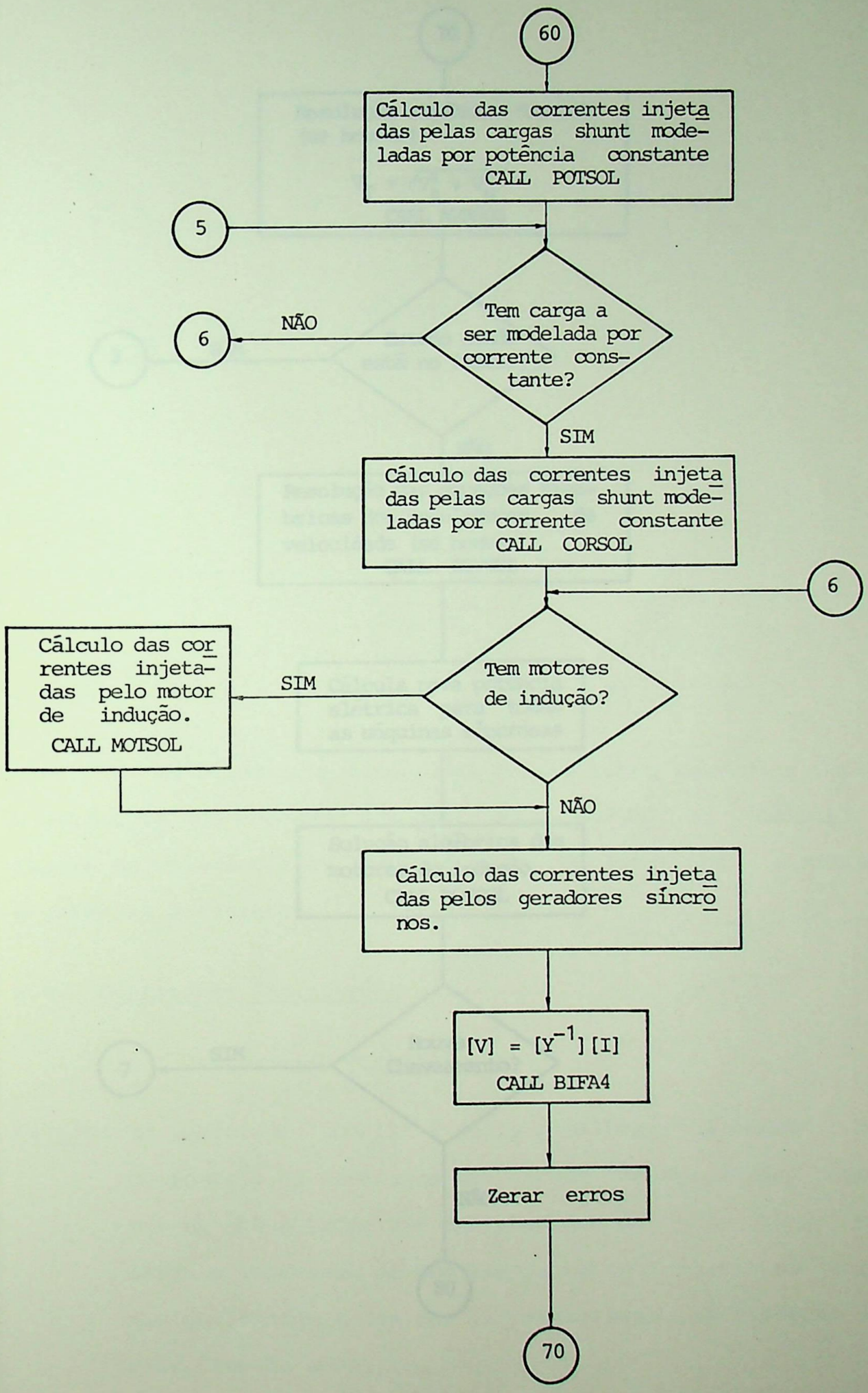
Comentários:

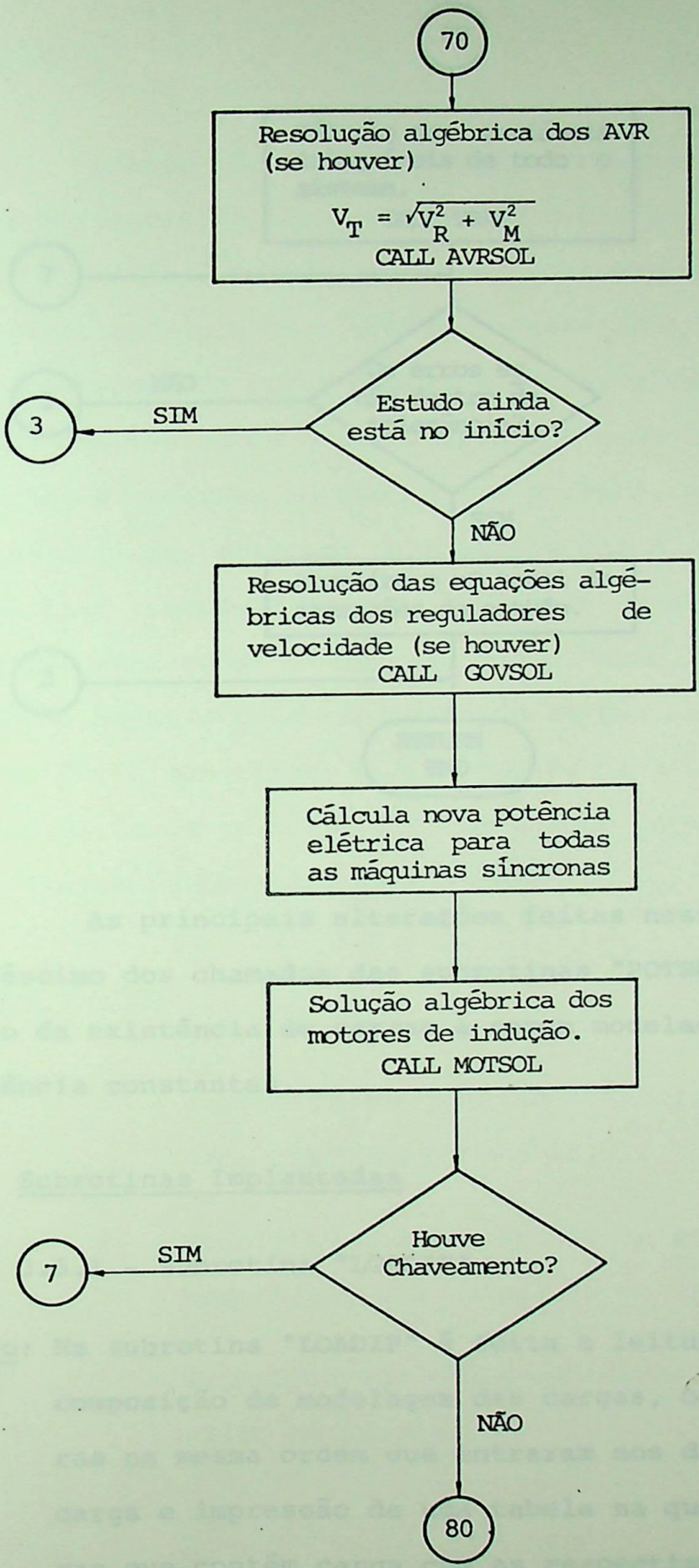
A primeira vez que esta subrotina é chamada, tem como objetivo calcular a tensão para verificar o balanço de carga no instante imediatamente anterior ao distúrbio. A segunda chamada é no instante imediatamente após a ocorrência do distúrbio, quando é resolvido um fluxo de carga iterativo para calcular novas tensões, correntes e potências elétricas do sistema. Não é feita nenhuma integração numérica e todas as variáveis integráveis ficam constantes, pois não houve incremento de tempo.

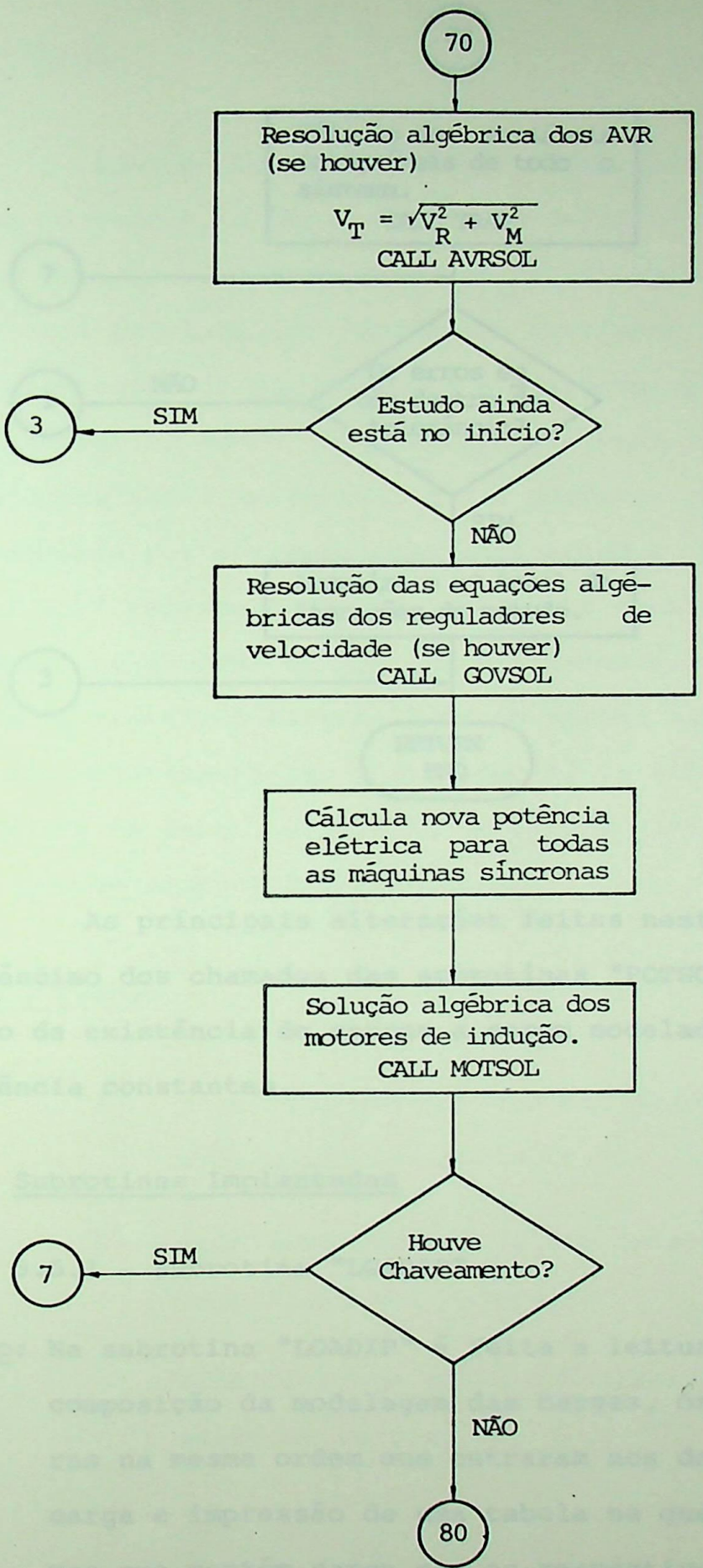
Nas chamadas posteriores desta subrotina, o tempo já foi incrementado, as variáveis algébricas foram extrapoladas e as novas constantes do método trapezoidal foram calculados. A subrotina "SOL", com o auxílio das subrotinas por ela chamadas, faz a integração numérica, cálculo das novas correntes e tensões, cálculo das variáveis algébricas dos AVR's, reguladores de velocidade e máquinas, conforme descrição na referência [2] A convergência das variáveis algébricas e integráveis é testada e, caso não tenha convergido volta a recalcular as novas correntes e tensões, etc., até atingir a convergência.

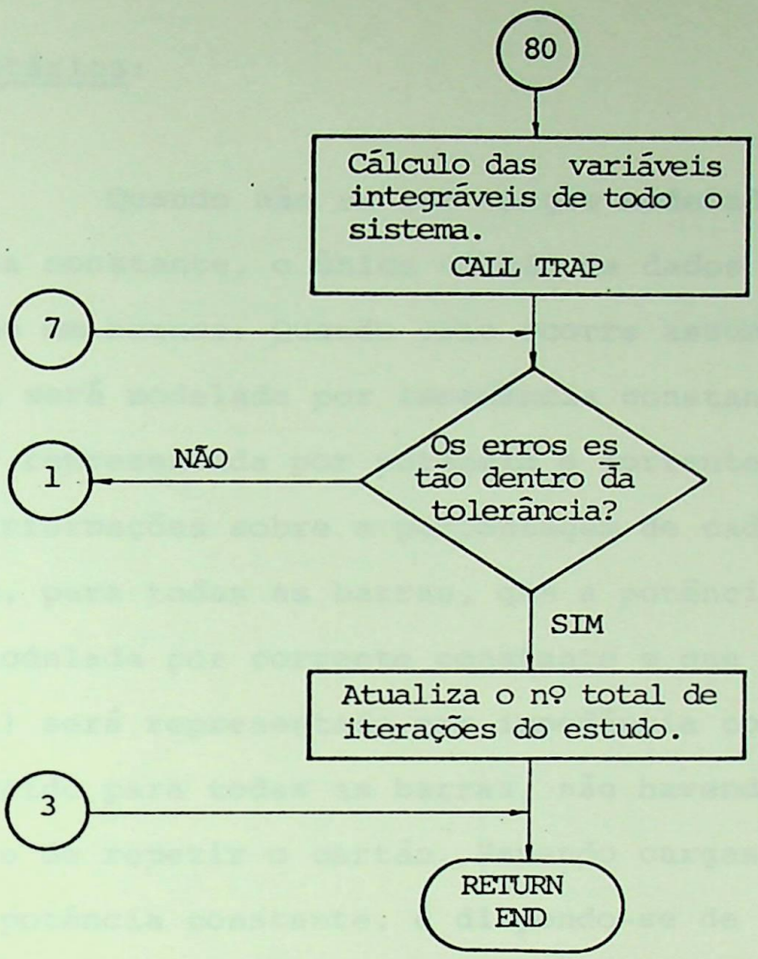
Fluxograma Subrotina "SOL"




60
Cálculo das correntes injetadas pelas cargas shunt modeladas por potência constante
CALL POTSOL
5
Tem carga a ser modelada por corrente constante?
NÃO
6
SIM
Cálculo das correntes injetadas pelas cargas shunt modeladas por corrente constante
CALL CORSOL
6
Tem motores de indução?
SIM
Cálculo das correntes injetadas pelo motor de indução.
CALL MOTSOL
NÃO
Cálculo das correntes injetadas pelos geradores síncronos.
[V] = [Y^-1] [I]
CALL BIFA4
Zerar erros
70


70
Resolução algébrica dos AVR (se houver)
$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_M^2}$
CALL AVRSOL
Estudo ainda está no início?
SIM
3
NÃO
Resolução das equações algébricas dos reguladores de velocidade (se houver)
CALL GOVSOL
Cálcula nova potência elétrica para todas as máquinas síncronas
Solução algébrica dos motores de indução.
CALL MOTSOL
Houve Chaveamento?
SIM
7
NÃO
80


70
Resolução algébrica dos AVR (se houver)
$V_T = \sqrt{V_R^2 + V_M^2}$
CALL AVRSOL
Estudo ainda está no início?
SIM
3
NÃO
Resolução das equações algébricas dos reguladores de velocidade (se houver)
CALL GOVSOL
Cálcula nova potência elétrica para todas as máquinas síncronas
Solução algébrica dos motores de indução.
CALL MOTSOL
Houve Chaveamento?
SIM
7
NÃO
80



As principais alterações feitas nesta subrotina foram o acréscimo dos chamados das subrotinas "POTSOL" e "CORSOL", quando da existência de cargas a serem modeladas por corrente e potência constantes.

3.5 - Subrotinas Implantadas

3.5.1 - Subrotina "LOADIP"

Função: Na subrotina "LOADIP" é feita a leitura dos dados da composição da modelagem das cargas, ordenação das barras na mesma ordem que entraram nos dados do fluxo de carga e impressão de uma tabela na qual consta as barras que contém carga com as respectivas percentagens de cada tipo de modelagem.

Comentários:

Quando não se tem cargas modeladas por corrente e potência constante, o único cartão de dados de cargas lido é um cartão em branco. Quando isto ocorre assume-se que toda a carga shunt será modelada por impedância constante. Se existe carga a ser representada por potência e corrente constante, e não se tem informações sobre a porcentagem de cada tipo, o programa adota, para todas as barras, que a potência ativa (toda) deve ser modelada por corrente constante e que a potência reativa (toda) será representada por impedância constante. Isto será obedecido para todas as barras, não havendo, neste caso, necessidade de repetir o cartão. Havendo cargas modeladas por corrente e potência constante, e dispondo-se de informações sobre a composição da carga, será lido um cartão para cada barra se elas tiverem composições diferentes.

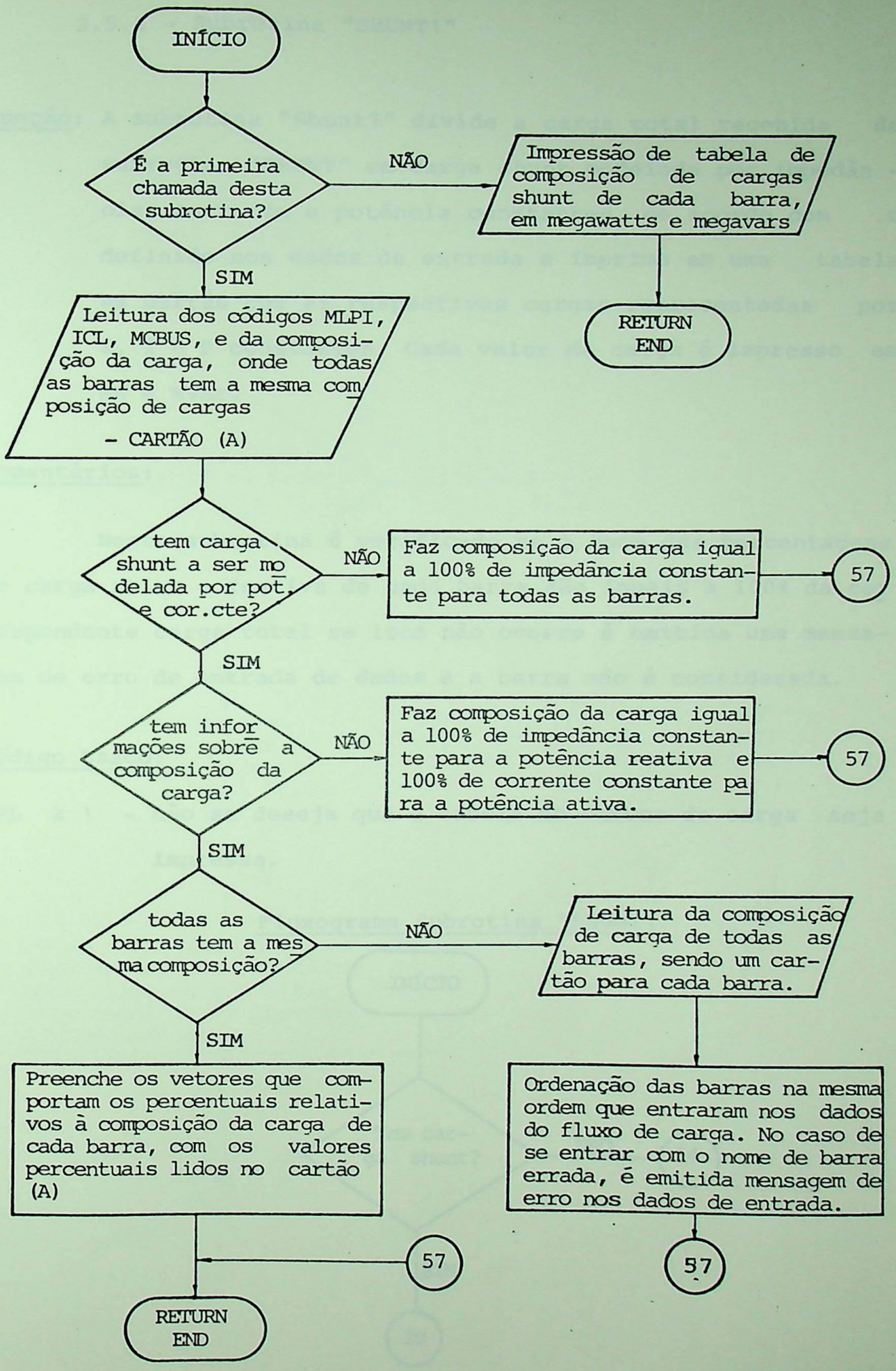
Códigos Usados:

MLPI = Ø - significa que não tem modelagem por corrente e/ou potência constante.

ICL = Ø - significa que não se tem informações sobre a composição das cargas.

MCBUS = 1 - significa que todas as barras têm a mesma composição de cargas.

Fluxograma da Subrotina "LOADIP"



3.5.2 - Subrotina "SHUNT1"

Função: A subrotina "Shunt1" divide a carga total recebida da subrotina "SHUNT" em carga shunt modelada por impedância, corrente e potência constantes, de acordo com o definido nos dados de entrada e imprime em uma tabela as barras com as respectivas cargas representadas por Z, I e P constantes. Cada valor de carga é impresso em MW e MVAr.

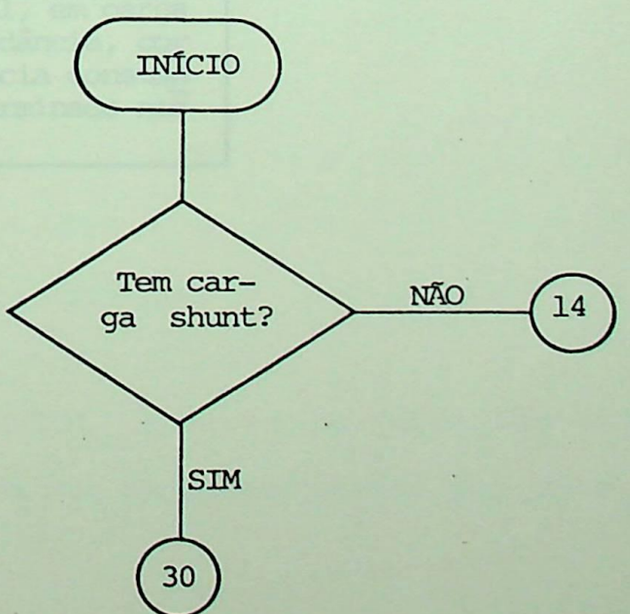
Comentários:

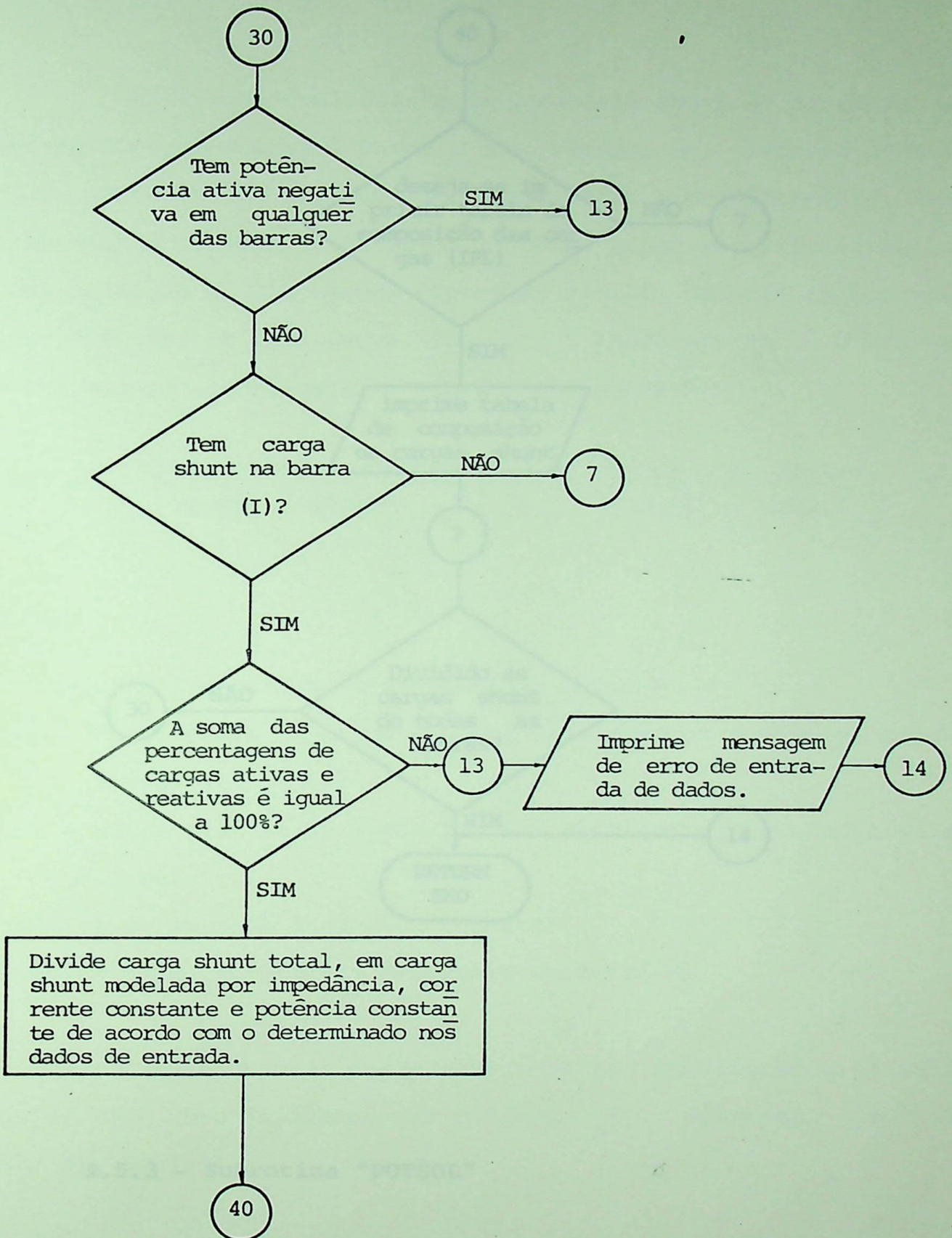
Nesta subrotina é verificado se a soma das percentagens de carga ativa e reativa de cada barra são iguais a 100% da correspondente carga total se isto não ocorre é emitida uma mensagem de erro de entrada de dados e a barra não é considerada.

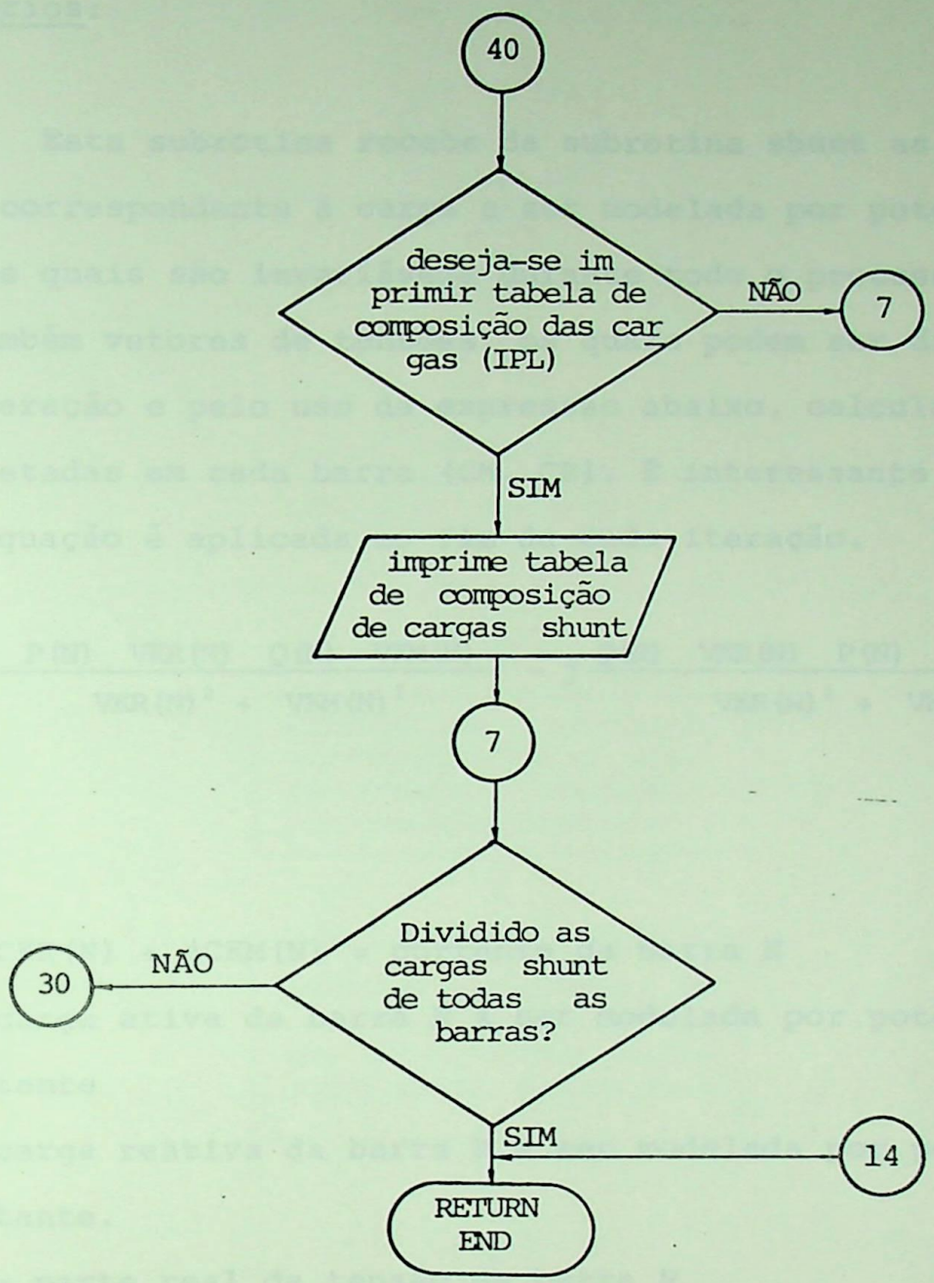
Código Usado:

IPL $\geq$ 1 - não se deseja que a tabela de barras de carga seja impressa.

Fluxograma Subrotina "SHUNT1"




30
Tem potência ativa negativa em qualquer das barras?
SIM
13
NÃO
Tem carga shunt na barra (I)?
NÃO
7
SIM
A soma das percentagens de cargas ativas e reativas é igual a 100%?
NÃO
13
Imprime mensagem de erro de entrada de dados.
14
SIM
Divide carga shunt total, em carga shunt modelada por impedância, corrente constante e potência constante de acordo com o determinado nos dados de entrada.
40



3.5.3 - Subrotina "POTSOL"

Função: A subrotina "POTSOL" calcula as correntes injetadas nas barras pelas cargas shunt modeladas por potência constante.

Comentários:

Esta subrotina recebe da subrotina shunt as parcelas de cargas correspondente à carga a ser modelada por potência constante as quais são invariáveis durante todo o processamento. Recebe também vetores de tensões, os quais podem ser diferentes a cada iteração e pelo uso da expressão abaixo, calcula as correntes injetadas em cada barra (CM, CR). É interessante observar que a equação é aplicada ao fim de cada iteração.

$$I(N) = \frac{P(N)\ VKR(N)\ \ Q(N)\ VKM(N)}{VKR(N)^2 + VKM(N)^2} - j\frac{Q(N)\ VKR(N)\ \ P(N)\ VKM(N)}{VKR(N)^2 + VKM(N)^2} \qquad (3)$$

onde:

I(N) = CKR(N) + jCKM(N) = corrente da barra N

P(N) = carga ativa da barra N a ser modelada por potência constante

Q(N) = carga reativa da barra N a ser modelada por potência constante.

VKR(N) = parte real da tensão da barra N

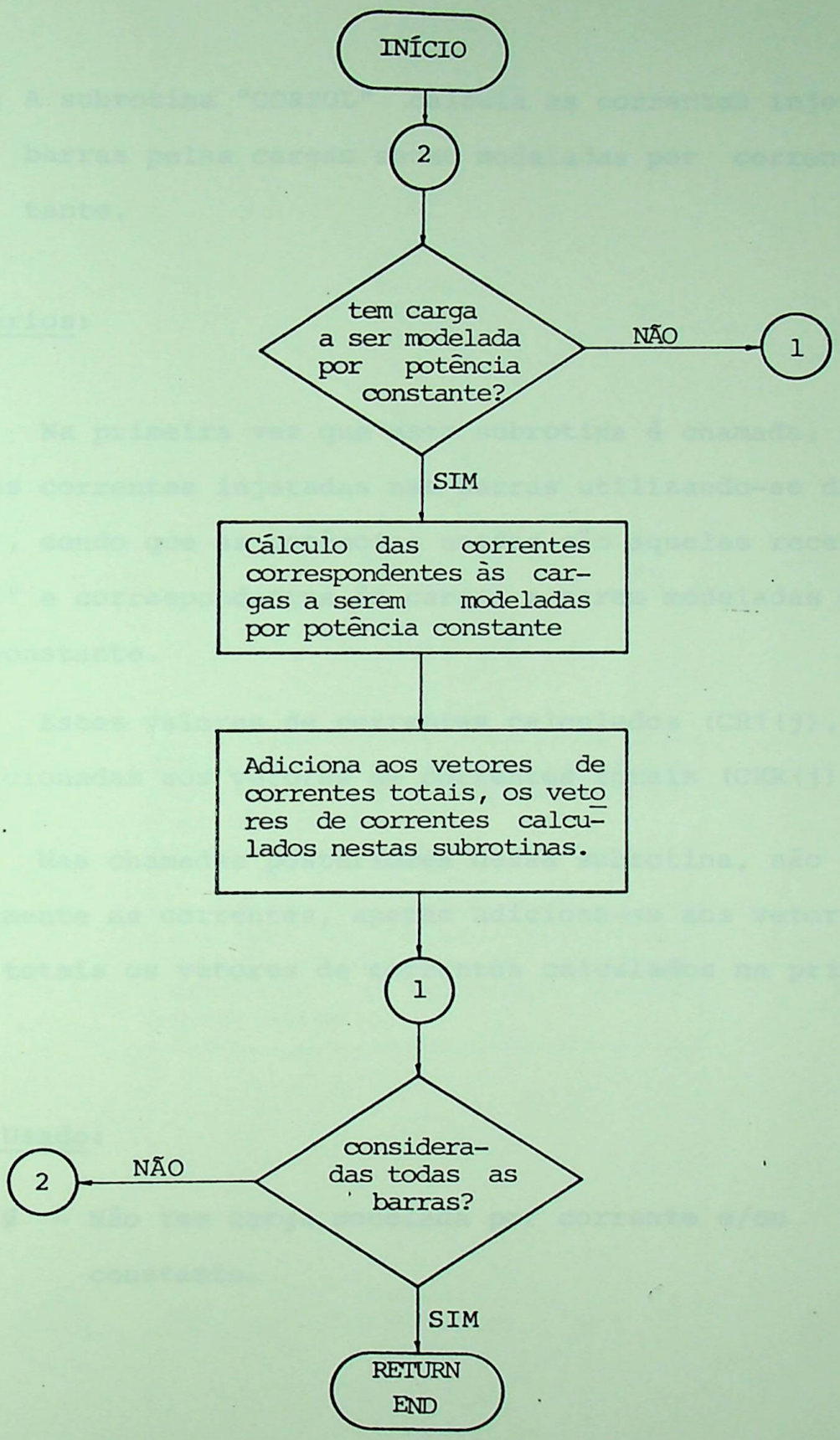
VKM(N) = parte imaginária da tensão da barra N.

A cada chamada desta subrotina são recalculados os valores de CM e CR e injetados nos vetores de correntes totais (CKR(j), CKM(j)).

Código Usado:

MLPI = Ø - não tem carga modelada por corrente e/ou potência constante.

Fluxograma Subrotina "POTSOL"



3.5.4 - Subrotina "CORSOL"

Função: A subrotina "CORSOL" calcula as correntes injetadas nas barras pelas cargas shunt modeladas por corrente constante.

Comentários:

Na primeira vez que esta subrotina é chamada, são calculadas as correntes injetadas nas barras utilizando-se da expressão (3), sendo que as potências usadas são aquelas recebidas da "SHUNT1" e correspondentes às cargas a serem modeladas por corrente constante.

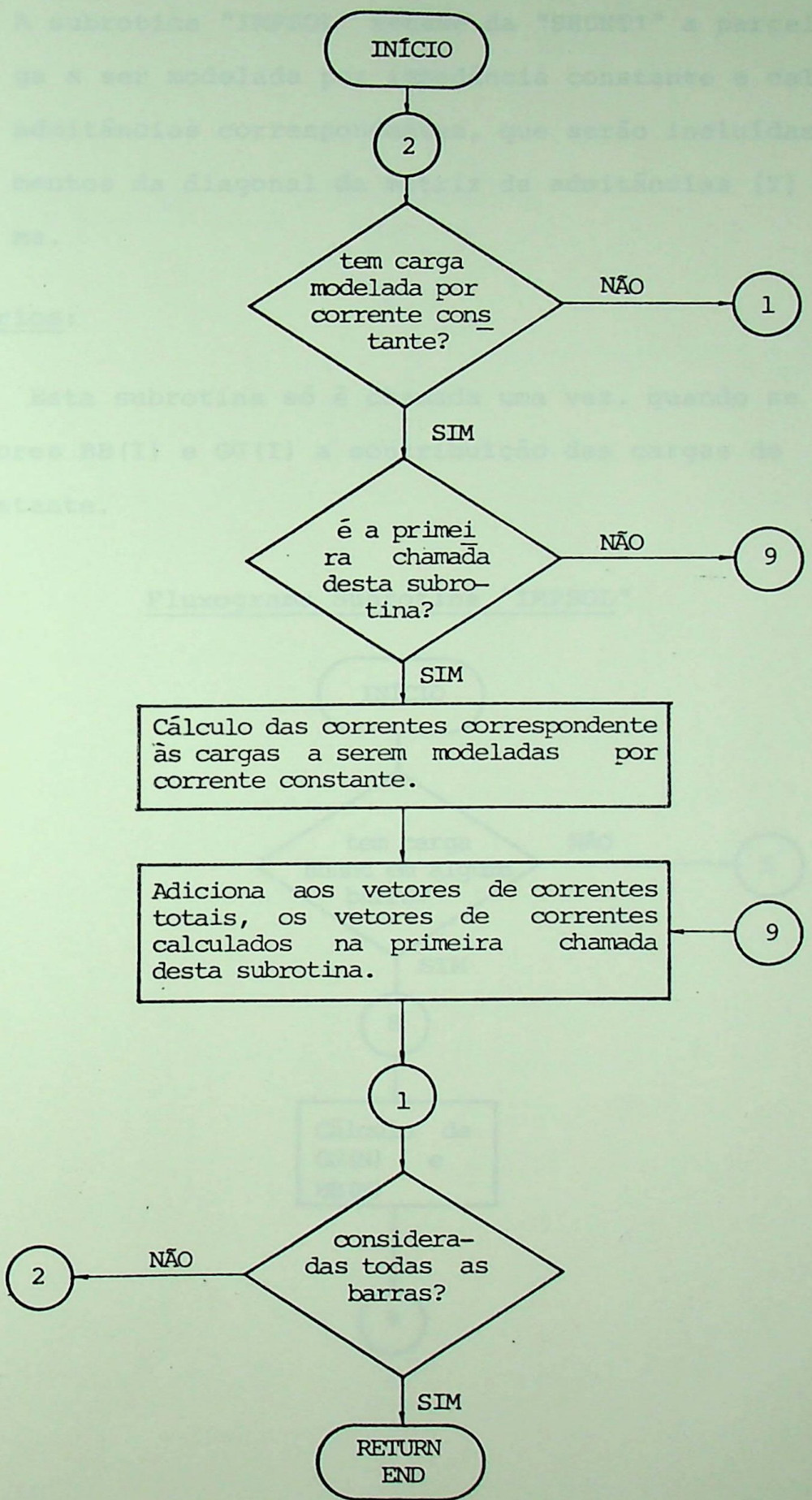
Estes valores de correntes calculados (CR1(j), CM1(j)) são adicionadas aos vetores de correntes totais (CKR(j), CKM(j)).

Nas chamadas posteriores dessa subrotina, não se calcula novamente as correntes, apenas adiciona-se aos vetores de correntes totais os vetores de correntes calculados na primeira chamada.

Código Usado:

MPLI = Ø - Não tem carga modelada por corrente e/ou potência constante.

Fluxograma Subrotina "CORSOL"



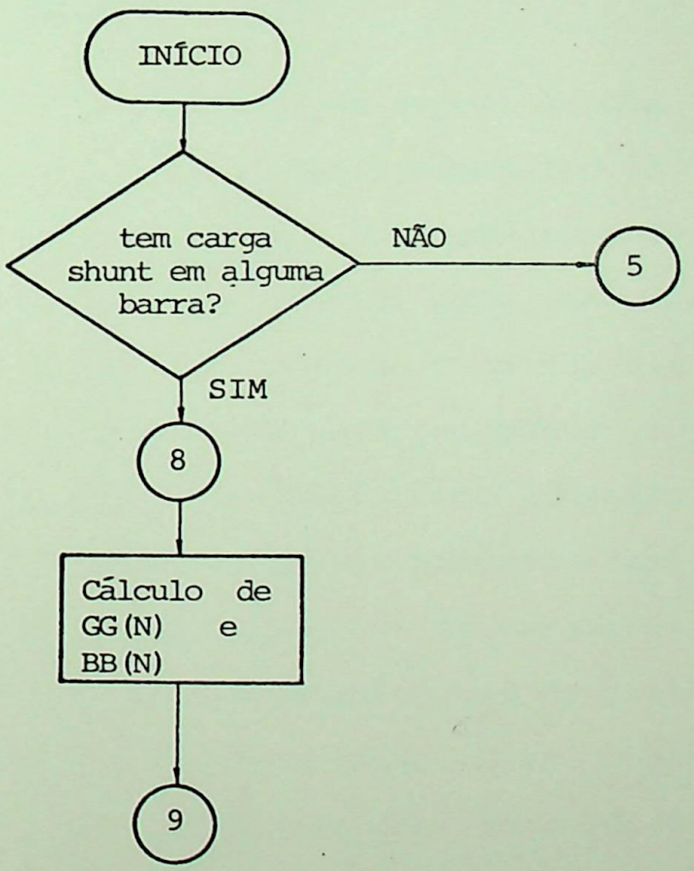
3.5.5 - Subrotina "IMPSOL"

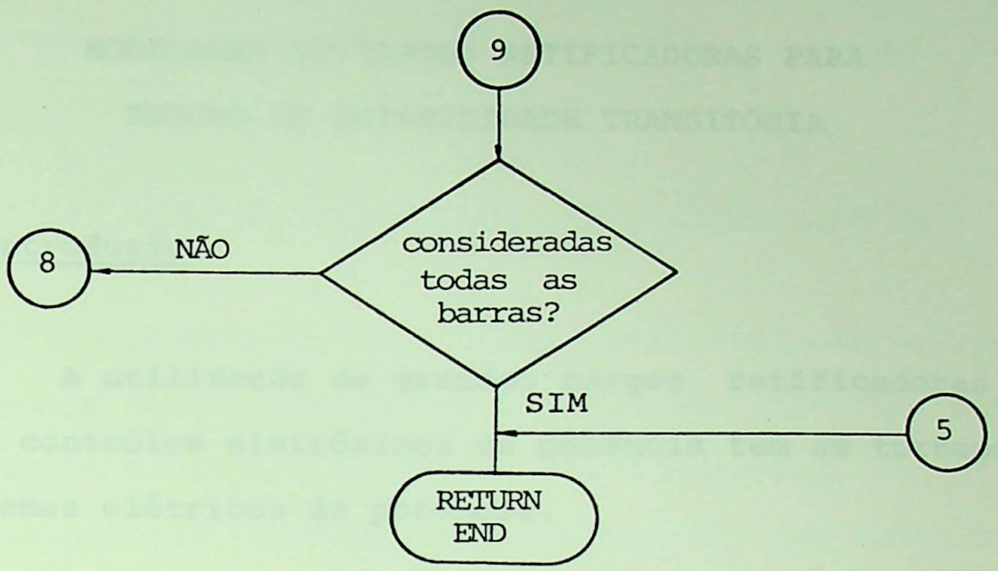
Função: A subrotina "IMPSOL" recebe da "SHUNT1" a parcela de carga a ser modelada por impedância constante e calcula as admitâncias correspondentes, que serão incluídas nos elementos da diagonal da matriz de admitâncias [Y] do sistema.

Comentários:

Esta subrotina só é chamada uma vez, quando se adiciona aos vetores BB(I) e GG(I) a contribuição das cargas de impedância constante.

Fluxograma Subrotina "IMPSOL"




9
consideradas todas as barras?
NÃO
8
SIM
5
RETURN
END

CAPÍTULO IV

MODELAGEM DE CARGAS RETIFICADORAS PARA ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

4.1 - Introdução

A utilização de grandes cargas retificadoras e sofisticados controles eletrônicos de potência tem se tornado comum em sistemas elétricos de potência.

Quando a estabilidade transitória de sistemas de potência está sendo investigada, erros consideráveis podem ocorrer, se representações inadequadas das cargas retificadoras são usadas, conforme demonstra a ref. [6] .

Este capítulo procura pois, desenvolver uma modelagem precisa da carga acima citada, com o propósito de incorporar seu efeito, de um modo mais exato, num programa de estabilidade. O modelo descrito será desenvolvido para uma instalação retificadora constituida por uma carga do tipo f.c.e.m constante. Esta representação é apropriada para processos industriais que utilizam, por exemplo, a eletrólise, como é o caso da fabricação do alumínio, cloro, etc. No modelo procurar-se-á também representar o efeito dinâmico do lado CC da carga retificadora em condições anormais de operação resultantes de grandes distúrbios no sistema elétrico de alimentação. Estas características tornam, portanto o modelo adequado para as condições observadas durante estudos de estabilidade transitória. Em sua essência, o propósito da modelagem é de obter a cada momento, os valores das potências ativa e reativa consumidos pela carga re-

tificadora e, com base nestas avaliar a estabilidade do sistema e prover informações sobre o comportamento da carga durante distúrbios causados por curto-circuitos, saída de linhas, perda de geração, etc.

4.2 - Modelo Simplificado de uma Carga Retificadora

Geralmente grandes cargas retificadoras consistem de um número de pontes ligadas em série e/ou paralela, sendo cada uma defasada em relação a outra, com o propósito de reduzir os níveis harmônicos injetados nos sistema CA. Com estas configurações um grande número de pulsos é conseguido, resultando em uma menor distorção da tensão de alimentação, sem uso de filtros.

Em princípio as cargas retificadoras podem ser modeladas como uma simples ponte equivalente com uma tensão de alimentação senoidal em seus terminais, como é mostrado na figura 4.1.

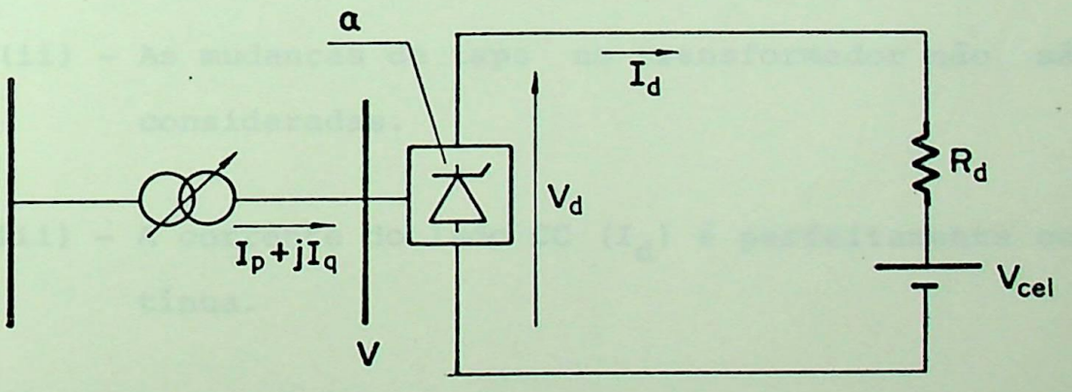


Figura 4.1 - Circuito equivalente da carga retificadora

onde:

V_d - tensão de saída do retificador

I_d - corrente do lado CC

R_d - resistência do lado CC

V_{cel} - f.c.e.m. constante

X - reatância de dispersão do transformador

I_p, I_q - Módulos das componentes ativa e reativa da corrente do lado CA

V - Módulo da tensão eficaz da barra onde está conectado o conversor (fase-fase)

α - ângulo de disparo

As principais suposições feitas no desenvolvimento do modelo simplificado do retificador são:

(i) - A ação do controle no ângulo de disparo é considerada instantânea.

(ii) - As mudanças de taps no transformador não são consideradas.

(iii) - A corrente do lado CC (I_d) é perfeitamente contínua.

(iv) - Perdas no transformador e nos tiristores não são consideradas.

(v) - As tensões CA são admitidas equilibradas e senoidais.

(vi) - Harmônicos do lado CA não são considerados.

(vii) - Os disparos são simétricos.

As equações abaixo são correspondentes ao circuito equivalente da figura 4.1 e à operação com $\mu \leq 60^{o}$. Estas expressões, clássicas na área da conversão estática, podem ser usadas para inter-relacionar as variáveis de entrada e saída de um retificador estático de 6 ou mais pulsos.

$$I_d = I_{s2} \ (\cos\alpha - \cos\delta) \tag{4.1}$$

$$V_d = R_d I_d + V_{cel} \tag{4.2}$$

$$V_d = V_{do} \cos\alpha - R_c I_d \tag{4.3}$$

$$V_d = \frac{V_{do}}{2} \ (\cos\alpha + \cos\delta) \tag{4.4}$$

$$\cos\phi = \frac{\cos\alpha + \cos\delta}{2} \tag{4.5}$$

onde:

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{3}\ Em}{\pi}$$

$$I_{s2} = \frac{\sqrt{3}\ Em}{2\omega L_c}$$

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

R_c - resistência equivalente de comutação

L_c - indutância equivalente de comutação

Em - valor máximo da tensão CA (fase-neutro)

f - frequência do sistema

μ - ângulo de comutação

δ - ângulo de extinção, dado por $(\alpha + \mu)$

ϕ - ângulo de fase entre tensão e corrente CA

A indutância de comutação L_c representa a indutância do sistema AC de alimentação visto dos terminais dos conversores. No entanto ela é constituída basicamente pela reatância de dispersão do transformador ligado à barra do conversor e portanto, a título de simplificação, este valor foi adotado neste trabalho.

4.2.1 - Sistema de Controle

Em condições normais, uma das formas de operação de um retificador é com controle de corrente constante.

O esquema clássico de um regulador para manter a corrente (I_d) constante é ilustrado na figura 4.2, extraído da referência [8].

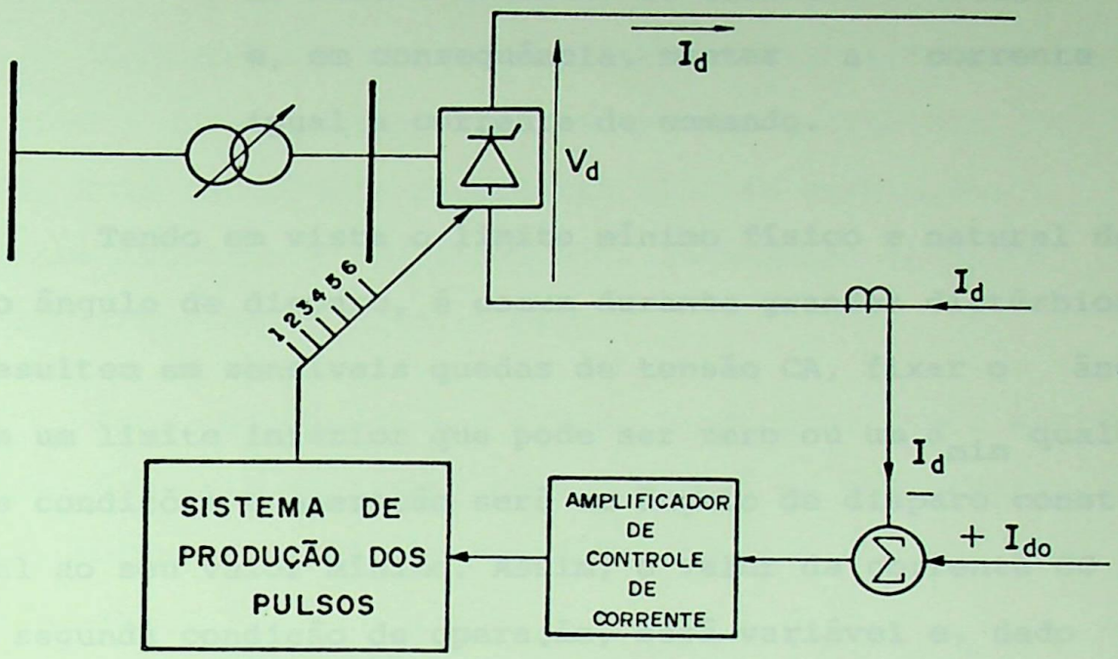


Figura 4.2 - Esquema básico de um sistema de controle para manter I_d constante.

O sistema de controle de corrente constante é formado basicamente pelas seguintes partes:

(i) - Medição da corrente I_d .

(ii) - Comparação de I_d com um valor de referência, o qual é a corrente de comando I_{do}.

(iii) - Amplificação do sinal de erro, o qual será igual a $(I_{do} - I_d)$.

(iv) - Sistema para a produção dos pulsos no qual o ângulo de disparo é automaticamente alterado de modo a aumentar ou diminuir a tendão (V_d) e, em consequência, manter a corrente (I_d) igual a corrente de comando.

Tendo em vista o limite mínimo físico e natural de 0^o para o ângulo de disparo, é comum durante grandes distúrbios , que resultem em sensíveis quedas de tensão CA, fixar o ângulo (α) em um limite inferior que pode ser zero ou um α_{min} qualquer. Nestas condições a operação será um ângulo de disparo constante e igual ao seu valor mínimo. Assim, o valor da corrente CC (I_d), nesta segunda condição de operação, será variável e, dado pela substituição da equação (4.2) na equação (4.3), de onde se obtém:

$$I_d = \frac{V_{do} \cos(\alpha_{min}) - V_{cel}}{R_d + R_c} \qquad (4.6)$$

Dentro do exposto, o modelo simplificado do retificador assume que a corrente do lado CC da ponte pode variar instantaneamente. Porém, para alguns tipos de cargas, principalmente nos casos em que existe uma indutância significante do lado CC, esta suposição não é verdadeira. A referência [6] cita uma grande carga de fundição de alumínio na Nova Zelândia, que se apresenta com uma constante de tempo de 113 ms e também esclarece sobre a importância deste efeito. Assim, uma análise mais realística dos efeitos das cargas retificadoras nos estudos de estabilidade transitória de sistemas deve incorporar estas constantes de tempo nos estudos a serem desenvolvidos.

4.3 - Modelo Completo de uma Carga Retificadora com Controle para I_d Constante

A figura 4.3 ilustra um sistema retificador semelhante ao da figura 4.1, porém adicionando-se uma indutância (L) ao lado CC. Esta indutância representa efeitos combinados de eventuais: indutância de alisamento, indutância de cabos, indutâncias próprias de cargas, etc.

Esta indutância é a grande responsável pelo aparecimento da constante de tempo, cujo efeito é de não admitir repentinas mudanças de alguns elementos do lado CC, tal como seja, da corrente I_d.

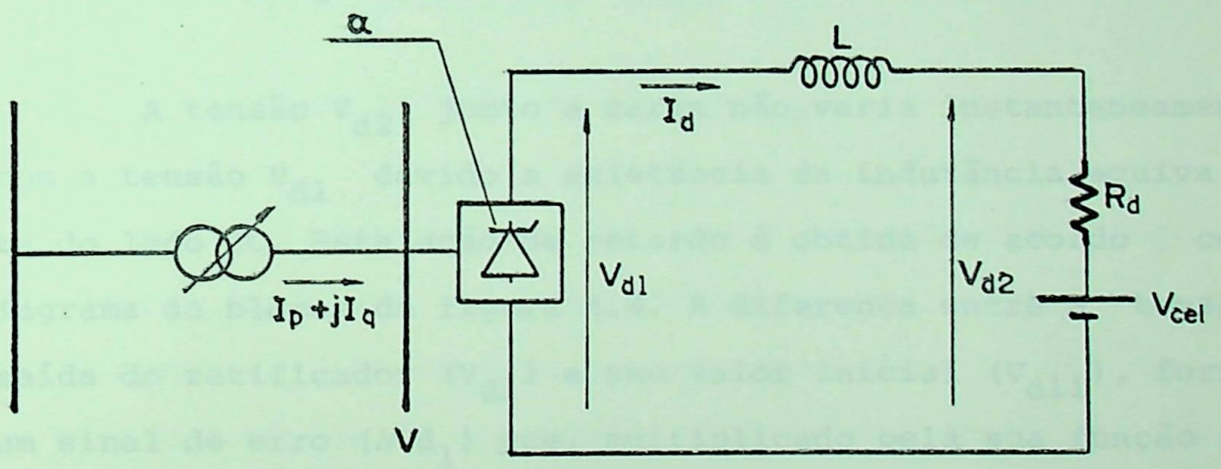


Figura 4.3 - Modelo equivalente da carga retificadora considerando a indutância (L) do lado CC.

Na figura 4.3:

V_{d1} - tensão CC de saída do retificador.

V_{d2} - tensão CC após a indutância L.

L - indutância equivalente do lado CC.

O equacionamento abaixo pode ser facilmente entendido e obtido do circuito equivalente da figura 4.3.

$$I_d = \frac{V_{d2} - V_{cel}}{R_d} \tag{4.7}$$

$$V_{d1} = V_{do} \cos\alpha - R_c I_d \tag{4.8}$$

$$V_{d1} = \frac{V_{do}}{2} (\cos\alpha + \cos\delta) \tag{4.9}$$

A tensão V_{d2}, junto a carga não varia instantaneamente com a tensão V_{d1} devido a existência da indutância equivalente do lado CC. Esta ação de retardo é obtida de acordo com o diagrama de blocos da figura 4.4. A diferença entre a tensão de saída do retificador (V_{d1}) e seu valor inicial (V_{d1i}), fornece um sinal de erro (ΔVd_1) que, multiplicado pela sua função de transferência $\frac{1}{1 + sT_1}$, resulta o sinal ΔV_{d2}, o qual difere da entrada simplesmente por um atraso determinado pela constante de tempo T_1, associada à indutância CC (L). Finalmente, obtido o incremento de tensão, adiciona-se ΔV_{d2} à ΔV_{d2i}, e, tem-se o valor instantâneo da tensão V_{d2}.

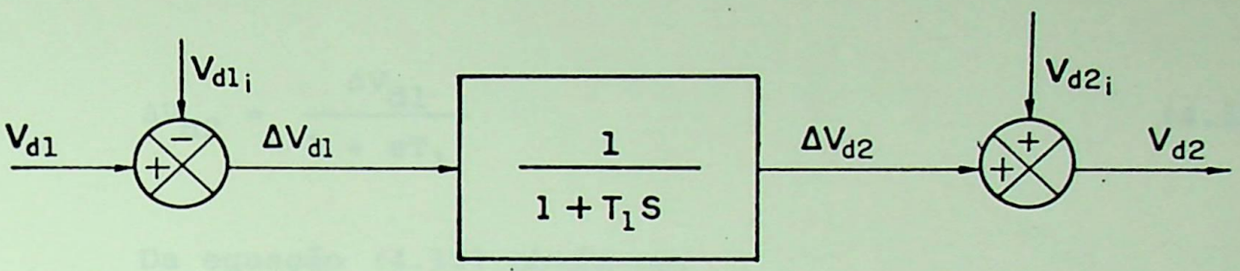


Figura 4.4 - Diagrama de blocos da relação entre as tensões V_{d1} e V_{d2}

Na figura 4.4:

T_1 - constante de tempo introduzido pela indutância.

V_{d1i} - valor inicial da tensão V_{d1}.

V_{d2i} - valor inicial da tensão V_{d2}.

Nota-se claramente que o equacionamento dos diagramas de blocos da figura 4.4 e posteriormente da figura 4.5, resulta em equações diferenciais que são resolvidas utilizando-se o método numérico de Integração Trapezoidal Implícito. Neste método as equações diferenciais são transformadas em equações algébricas, como é mostrado no Apêndice A. Para o caso específico da figura 4.4, o equacionamento é realizado a seguir.

Da figura 4.4 pode-se escrever:

$$\Delta V_{d1} = V_{d1} - V_{d1i} \qquad (4.10)$$

$$\Delta V_{d2} = V_{d2} - V_{d2i} \tag{4.11}$$

$$\Delta V_{d2} = \frac{\Delta V_{d1}}{1 + sT_1} \tag{4.12}$$

Da equação (4.12) obtém-se:

$$\Delta \dot{V}_{d2} = (1 + sT_1) = \Delta V_{d1}$$

$$s\Delta V_{d2} = (\Delta V_{d1} - \Delta V_{d2})/T_1 \tag{4.13}$$

que, no dominio do tempo:

$$\Delta \dot{V}_{d2} = (\Delta V_{d1} - \Delta V_{d2})/T_1 \tag{4.14}$$

Colocando ΔV_{d2} de forma a ser resolvido pelo método Trapezoidal Implícito (equação 3 - Apêndice A), tem-se:

$$\Delta V_{d2}(t+\Delta t) = \Delta V_{d2}(t) + \frac{\Delta t}{2}\left[\frac{d}{dt}(\Delta V_{d2}(t+\Delta t)) + \frac{d}{dt}(\Delta V_{d2}(t))\right] \tag{4.15}$$

Fazendo:

$$\frac{d}{dt}(\Delta V_{d2}(t+\Delta t)) = \frac{d}{dt}(\Delta V_{d2}) \tag{4.16}$$

$$\frac{d}{dt}(\Delta V_{d2}(t)) = \frac{d}{dt}(\Delta V_{d2A}) \tag{4.17}$$

De forma similar para V_{d1} e substituindo em (4.14) e posteriormente em (4.15), obtém-se:

$$\Delta V_{d2} = \Delta V_{d2A} + \frac{h}{2T_1}(\Delta V_{d1} - \Delta V_{d2} + \Delta V_{d1A} - \Delta V_{d2A}) \tag{4.18}$$

Substituindo (4.10) e (4.11) em (4.18) fica:

$$(V_{d2} - V_{d2i}) = (V_{d2A} - V_{d2i}) + \frac{h}{2T_1}[(V_{d1} - V_{d1i}) -$$

$$- (V_{d2} - V_{d2i}) + (V_{d1A} - V_{d1i}) - (V_{d2A} - V_{d2i})]$$

Simplificando torna-se:

$$V_{d2} = V_{d2A} + \frac{h}{2T_1}[V_{d1} - V_{d2} + (V_{d1A} - 2V_{d1i}) - (V_{d2A} - 2Vd_{2i})]$$

Rearranjando fica:

$$V_{d2}(2T_1 + h) = V_{d2A}(2T_1 - h) + h(V_{d1A} - 2V_{d1i}) +$$

$$+ 2hV_{d2i} + hV_{d1} \qquad (4.19)$$

Fazendo:

$$B_1 = \frac{h}{h + 2T_1} \qquad (4.20)$$

$$B_2 = 1 - 2B_1 \qquad (4.21)$$

$$A_1 = B_2 \; V_{d2A} + B_1 \; (V_{d1A} - 2V_{d1i}) + 2B_1 \; V_{d2i} \qquad (4.22)$$

$$V_{d2} = A_1 + B_1 \; V_{d1} \qquad (4.23)$$

onde:

V_{d1A} - valor da tensão de saída do retificador na iteração anterior

V_{d2A} - valor da tensão após a indutância equivalente do lado CC na iteração anterior.

h - passo de integração

As equações de (4.20) a (4.23) são aquelas utilizadas na modelagem digital, isto é, são as expressões implementadas no programa para representar o efeito do atraso em tempo causado pelo lado de CC.

O ângulo de disparo (α) é determinado em função da variação da corrente I_d, como foi observado na figura 4.2 anteriormente apresentada. O diagrama de blocos da figura 4.5 obtido na referência [9], mostra a função de transferência usada para representar o circuito de controle do ângulo de disparo (α).

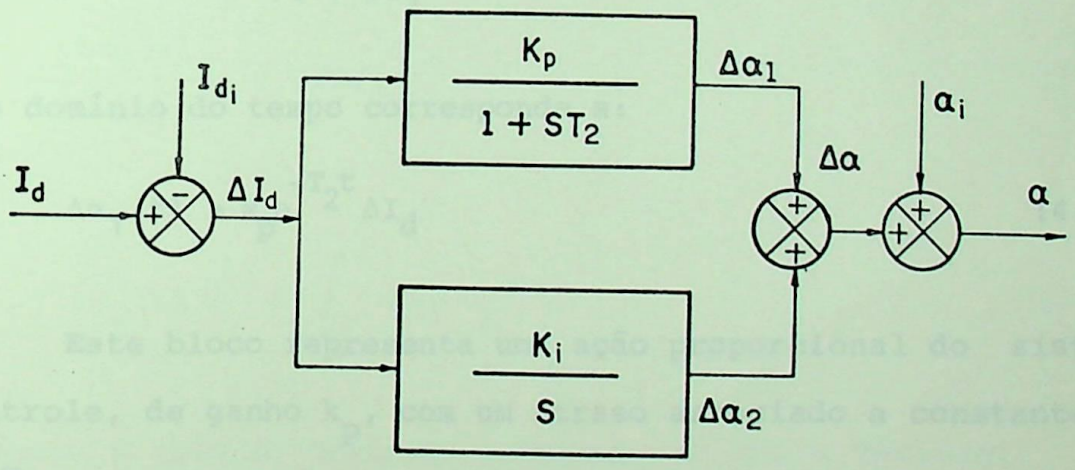


Figura 4.5 - Diagrama de blocos do controle do ângulo de disparo (α).

onde:

K_p - ganho proporcional

K_i - ganho integral

T_2 - constante de tempo do controle do ângulo de disparo (α).

I_{di} - valor inicial da corrente (I_d).

α_i - valor inicial do ângulo de disparo (α).

É de conhecimento geral que a ação do controle no ângulo de disparo não é instantânea, e tal efeito foi considerado na modelagem aqui proposta, como pode ser observado na figura 4.5.

A função de transferência referente ao bloco proporcional é:

$$\Delta\alpha_1(s) = \frac{k_p}{1 + sT_2} \Delta I_d \qquad (4.24)$$

que no domínio do tempo corresponde a:

$$\Delta\alpha_1(t) = k_p e^{-T_2 t} \Delta I_d \qquad (4.25)$$

Este bloco representa uma ação proporcional do sistema de controle, de ganho k_p, com um atraso associado a constante de tempo T_2.

Se o sistema de controle do ângulo de disparo (α) fosse representado apenas pela ação proporcional, um sinal de erro nulo, ou seja, com $I_d = I_{di}$, implicaria num retorno do ângulo de disparo (α) ao valor inicial (α_i). Porém, se a tensão da barra retificadora não retornasse às condições iniciais, este ângulo deveria assumir um novo valor para corrigir a tensão na carga

e consequentemente a corrente. Assim, existiria duas condições contraditórias em que o sistema de controle para corrigir a corrente fazendo $I_d = I_{di}$, necessitaria de um $\alpha \neq \alpha_i$, mas um erro nulo implicaria em $\alpha = \alpha_i$. O que ocorreria na realidade é que o controle não conseguiria retornar a corrente ao seu valor inicial, nem levar o ângulo de disparo ao valor desejado para corrigir a tensão, estabilizando-se numa condição intermediária, com os valores de I_d diferente de I_{di} e α diferente do valor desejado.

Verifica-se assim a necessidade do acréscimo de uma nova função indicada na figura 4.5 e matemáticamente representada a seguir.

$$\Delta\alpha_2(s) = \frac{K_i}{s} \Delta I_d \tag{4.26}$$

Esta função, no domínio do tempo, é dada por:

$$\frac{\Delta\alpha_2(t)}{\Delta t} = K_i \Delta I_d \tag{4.27}$$

$$\Delta\alpha_2(t) = K_i \int_o^t \Delta I_d \, d_t \tag{4.28}$$

representa a ação do controle integral, em que a variação de $\Delta\alpha_2$ muda a uma taxa proporcional ao sinal de erro ΔI_d. Para um sinal de erro nulo, o valor de $\Delta\alpha_2$ permanece fixo.

A ação simultânea destas duas funções de transferências, com ajustes adequados das constantes K_i e I_p segundo o amortecimento desejado, definem a dinâmica do sistema de controle do ângulo de disparo.

Tendo em vista o método de solução já utilizado pelo programa, puramente por uma questão de maior simplificação de implementação digital, optou-se por uma modificação sequencial de cálculos, que em termos básicos, resultou no diagrama de blocos da figura 4.6 em substituição ao da figura 4.5.

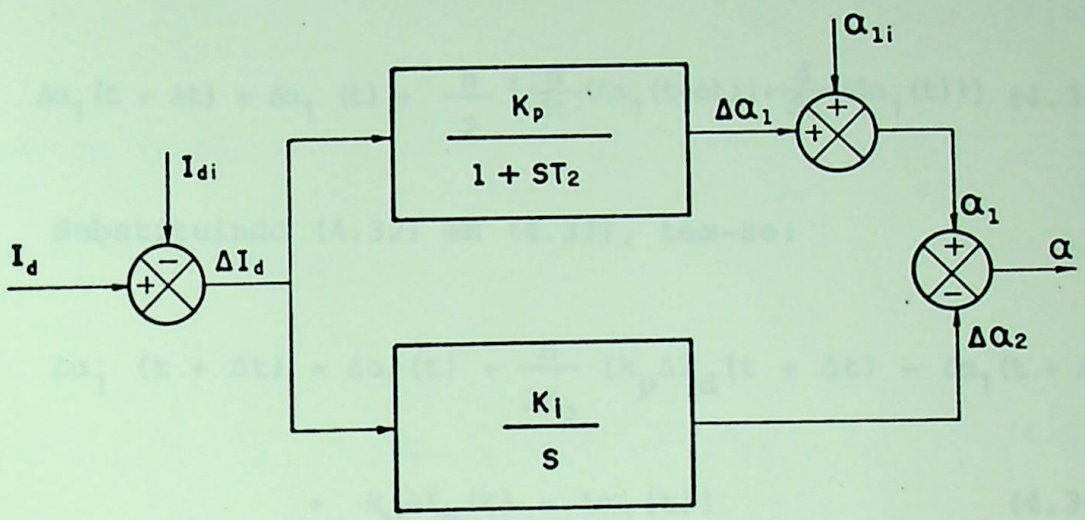


Figura 4.6 - Diagrama de blocos do sistema de controle do ângulo α implementado no programa digital.

O equacionamento de cada bloco é realizado a seguir:

(i) bloco de proporcionalidade

$$\Delta I_d = I_d - I_{di} \tag{4.29}$$

$$\Delta\alpha_1 = \frac{K_p}{1 + sT_2}\,\Delta I_d \tag{4.30}$$

De (4.30):

$$s\Delta\alpha_1 = \frac{k_p\Delta I_d - \Delta\alpha_1}{T_2} \tag{4.31}$$

No domínio do tempo:

$$\frac{d}{dt}(\Delta\alpha_1) = K_p \frac{\Delta I_d - \Delta\alpha_1}{T_2} \tag{4.32}$$

Colocando $\Delta\alpha_1$ de forma a ser resolvido pelo método trapezoidal (equação 3, Apêndice A) tem-se:

$$\Delta\alpha_1(t + \Delta t) = \Delta\alpha_1(t) + \frac{h}{2}\left[\frac{d}{dt}(\Delta\alpha_1(t+\Delta t)) + \frac{d}{dt}(\Delta\alpha_1(t))\right] \tag{4.33}$$

Substituindo (4.32) em (4.33), tem-se:

$$\Delta\alpha_1(t + \Delta t) = \Delta\alpha_1(t) + \frac{h}{2T_2}\left[k_p\Delta I_d(t + \Delta t) - \Delta\alpha_1(t + \Delta t) + k_p\Delta I_d(t) - \Delta\alpha_1(t)\right] \tag{4.34}$$

Indicando as variáveis do instante (t) pelo índice A, tem-se:

$$\Delta\alpha_1 = \Delta\alpha_{1A} + \frac{h}{2T_2}\left[k_p\Delta I_d - \Delta\alpha_1 + K_p\Delta I_{dA}(t) - \Delta\alpha_{1A}(t)\right]$$

$$(\alpha_1 - \alpha_{1i}) = (\alpha_{1A} - \alpha_{1i}) + \frac{h}{2T_2}\left[k_p(I_d - I_{di}) - (\alpha_1 - \alpha_i) + k_p(I_{dA} - I_{di}) - (\alpha_{1A} - \alpha_i)\right]$$

$$\alpha_1 = \alpha_{1A} + \frac{h}{2T_2}\left[k_pI_d - \alpha_1 + k_p(I_{dA} - 2I_{di}) - (\alpha_{1A} - 2\alpha_{1i})\right]$$

$$\alpha_1(2T_2 + h) = \alpha_{1A}(2T_2 - h) + k_ph(I_{dA} - 2I_{di}) + 2h\alpha_{1i} + k_phI_d \tag{4.35}$$

fazendo:

$$B_1 = \frac{h}{h + 2T_2} \tag{4.36}$$

$$B_2 = 1 - 2B_1 \tag{4.37}$$

$$B_3 = k_p B_1 \tag{4.38}$$

e levando em (4.35):

$$\alpha_1 = A_1 + B_3 I_d \tag{4.39}$$

onde

$$A_1 = \alpha_{1A}\, B_2 + B_3 (I_{dA} - 2I_{di}) + 2B_1 \alpha_{1i} \tag{4.40}$$

(ii) Bloco de Integração

$$\Delta I_d = I_d - I_{di} \tag{4.41}$$

$$\Delta\alpha_2 = \frac{k_i}{s}\, \Delta I_d \tag{4.42}$$

De (4.42):

$$s\Delta\alpha_2 = k_i \Delta I_d \tag{4.43}$$

que, no domínio de tempo:

$$\frac{d}{dt}(\Delta\alpha_2) = K_i \Delta I_d \tag{4.44}$$

Colocando-se $\frac{d}{dt}(\Delta\alpha_2)$ de forma a ser resolvido pelo método Trapezoidal, tem-se:

$$\Delta\alpha_2(t + \Delta t) = \Delta\alpha_2(t) + \frac{h}{2}\left[\frac{d}{dt}(\Delta\alpha_2(t+\Delta t)) + \frac{d}{dt}(\Delta\alpha_2(t))\right] \tag{4.45}$$

Levando (4.44) em (4.45):

$$\Delta\alpha_2 (t + \Delta t) = \Delta\alpha_2(t) + \frac{h}{2} [K_i \Delta I(t + \Delta t) + K_i \Delta I(t)]$$

Simplificando:

$$\Delta\alpha_2 = \Delta\alpha_{2A} + \frac{h}{2}[K_i (I_d - Id_i) + K_i (I_{dA} - I_{di})]$$

$$\Delta\alpha_2 = \Delta\alpha_{2A} + \frac{k_i h}{2} (I_{dA} - 2Id_i) + \frac{k_i h}{2} I_d \qquad (4.46)$$

fazendo:

$$B_4 = K_i \frac{h}{2} \qquad (4.47)$$

$$A_2 = \Delta\alpha_{2A} + \frac{k_i h}{2} (I_{dA} - 2I_{di}) \qquad (4.48)$$

tem-se:

$$\Delta\alpha_2 = A_2 + B_4 I_d \qquad (4.49)$$

A união das equações (4.39) e (4.49) fornece o valor do ângulo de disparo:

$$\alpha = \alpha_1 + \Delta\alpha_2 \qquad (4.50)$$

onde:

I_{dA} - valor da corrente do lado CC na iteração anterior

α_{1A} - componente do ângulo de disparo (α) correspondente ao bloco de proporcionalidade na iteração anterior.

$\Delta\alpha_{2A}$ - Componente do ângulo de disparo (α) correspondente ao bloco de integração na iteração anterior.

4.4 - Modos Normais e Anormais de Operação de um Retificador

Dentro do exposto, todo o desenvolvimento feito até agora está baseado na suposição de que o ângulo de comutação não excede 60^{o}. Com a consideração do efeito da constante de tempo resultante da indutância (L) do lado CC, conciliada a operação com altas correntes (I_d) e baixas tensões CA, surge a necessidade de se analisar o funcionamento dos conversores com ângulos de comutação superiores a este valor (60^{o}).

Em seu aspecto mais abrangente, a operação dos conversores pode ser dividida em 4 modos, conforme cita a referência [10].

A identificação de cada modo de operação é feito de acordo com os valores do ângulo de disparo (α) e de uma constante K, definida por:

$$K = \frac{\sqrt{2}\ X_c\ I_d}{V} \qquad (4.51)$$

O fator K, chamado de fator de corrente é obtido através de uma definição matemática e, fornece meios de determinar as condições de operação da ponte em termos da corrente CC e tensão CA, de forma que grandes valores de K indicam correntes CC elevadas e/ou redução da tensão CA.

A seguir procede-se a discussão sobre cada um destes modos de operação.

4.4.1 - Modo A

Características:

(i) $0^{o} \leq \alpha \leq 90^{o}$

(ii) $\mu < 60^{o}$

(iii) $K \leq 2\cos(\alpha)$ (operação como retificador)

$K \leq \cos(60^{o} - \alpha)$

A figura 4.7 indica o circuito de uma ponte conversora operando como retificador.

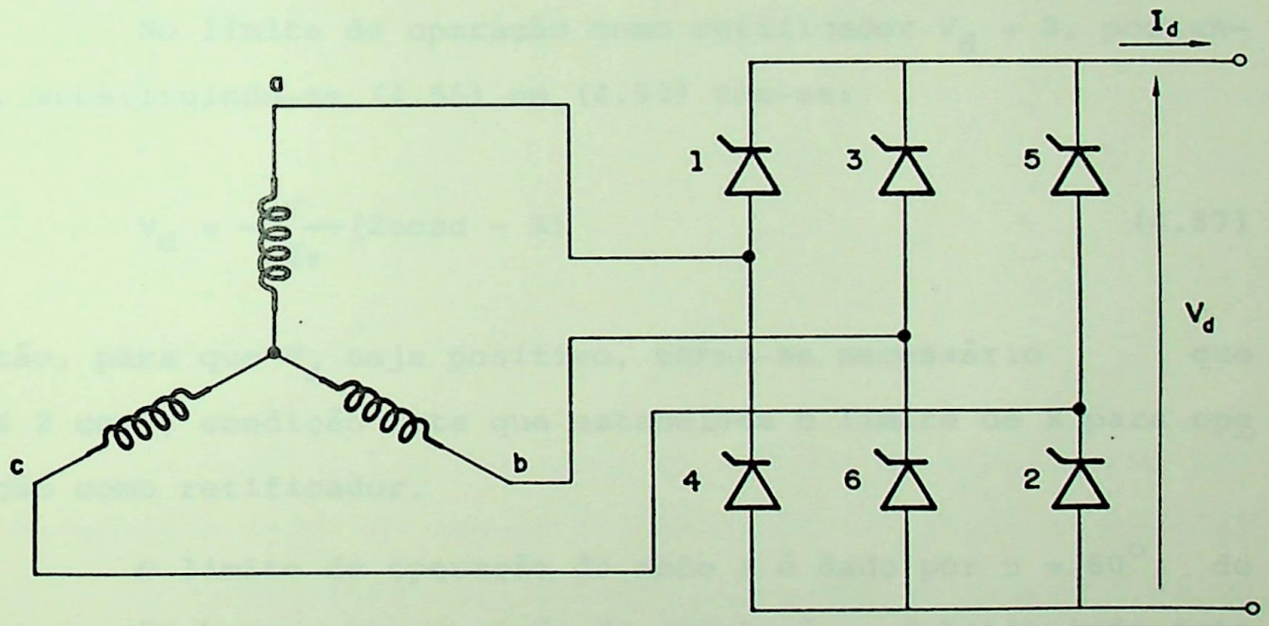


Figura 4.7 - Ponte conversora operando como retificador

Para este modo normal de operação do retificador, seu equacionamento é o mesmo referido anteriormente. Tendo em vista a expressão de I_d, tem-se:

$$I_d = I_{s2}(\cos\alpha - \cos\delta) = \frac{V}{\sqrt{2}Xc}(\cos\alpha - \cos\delta) \qquad (4.52)$$

$$V_d = \frac{V_{do}}{2}(\cos\alpha + \cos\delta) = \frac{3V}{\sqrt{2}\pi}(\cos\alpha + \cos\delta) \qquad (4.53)$$

Substituindo (4.51) em (4.52) tem-se:

$$k = \sqrt{2}Xc\ I_d/V = (\cos\alpha - \cos\delta) = [(\cos\alpha - \cos(\alpha + \mu))] \qquad (4.54)$$

De onde:

$$\cos\delta = \cos\alpha - K \qquad (4.55)$$

$$\delta = \text{arc cos}\ (\cos\alpha - K) \qquad (4.56)$$

No limite de operação como retificador $V_d = 0$, portanto, substituindo-se (4.55) em (4.53) tem-se:

$$V_d = \frac{3V}{\sqrt{2}\pi}(2\cos\alpha - K) \qquad (4.57)$$

então, para que V_d seja positivo, torna-se necessário que $K \leq 2\cos\alpha$, condição esta que estabelece o limite de K para operação como retificador.

O limite de operação do modo A é dado por $\mu = 60^o$, de forma a não haver sobreposição de comutações. Substituindo este valor de μ em (4.54), tem-se $K \leq \cos(60^o - \alpha)$, que é o valor limite de K para este modo.

As curvas da figura 4.8 ilustram as formas de onda das tensões pólo-neutro para a operação dos retificadores no modo A.

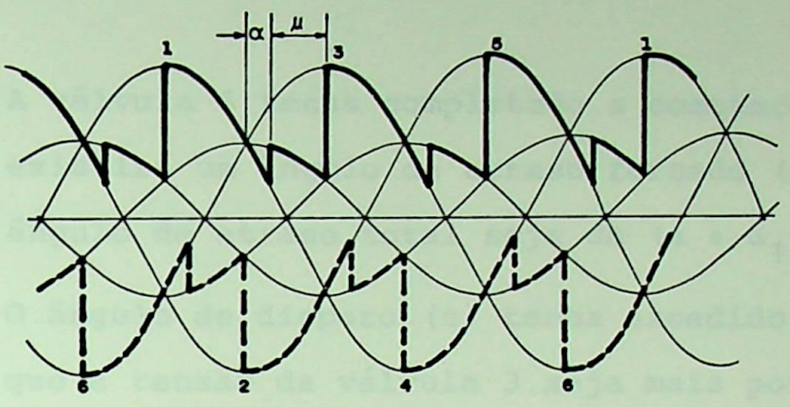


Figura 4.8 - Tensão pólo-neutro para o modo A

4.4.2 - Modo B

Características:

(i) $0^{o} \leq \alpha \leq 30^{o}$

(ii) $\mu = 60^{o}$

(iii) $\cos(60^{o} - \alpha) \leq K \leq 0,866$

Se o fator K ultrapassar os limites de operação do modo A, então o valor do ângulo de comutação (μ) tende a exceder os 60^{o}. Isto significa que, durante uma parte do ciclo, 4 válvulas podem conduzir ao mesmo tempo. Observando-se a figura 4.7 , nota-se que a válvula 1 inicia sua comutação para a válvula 3 antes que a 6 tenha terminado de comutar para a válvula 2, e portanto as válvulas 1, 3, 2 e 6 estarão conduzindo simultaneamente. Mas como as válvulas 2 e 6 estão comutando, a tensão da fase b (válvulas 3 e 6), dada pela média das tensões nas fases b e c (válvulas 2 e 6), é mais negativa que a tensão na fase a

(válvula 1). Portanto a válvula 1 não pode comutar para a válvula 3, a não ser que uma das duas hipóteses abaixo se verifique:

- A válvula 6 tenha completado a comutação. Neste caso existirá um ângulo de atraso forçado (α_1), tal que o ângulo de atraso total seja de $(\alpha + \alpha_1) < 30^o$.
- O ângulo de disparo (α) tenha excedido 30^o, de forma que a tensão da válvula 3 seja mais positiva que a tensão da válvula 1.

Nota-se que no caso da primeira hipótese, quando o ângulo de atraso (α) é menor que 30^o e que, se num determinado instante, o ângulo de comutação (μ) se torna maior que 60^o de um valor X, a válvula que está entrando em operação precisa esperar este valor X até que a válvula anterior saia de operação. No entanto, o atraso desta válvula irá reduzir o ângulo de comutação (μ), como mostra a equação (4.54) para α acrescido de X, reduzindo o ângulo de espera X da válvula seguinte- Assim, depois de algumas comutações, uma condição estável será atingida onde μ se mantém em 60^o e o ângulo de espera resultante (α_1) assume um valor que pode ser calculado como se mostra abaixo.

Da equação (4.54),tem-se:

$$K = \cos(\alpha + \alpha_1) - \cos(\alpha + \alpha_1 + \mu)$$

para $\mu = 60^o$ fica:

$$K = \cos(60^o - \alpha - \alpha_1) \qquad (4.58)$$

Considerando o limite quando $\alpha + \alpha_1 = 30^o$, então:

$K \leq 0{,}866$

Da equação (4.58) tira-se que:

$$\alpha_1 = 60^{\circ} - \alpha - \arccos(K) \qquad (4.59)$$

Da equação (4.57) tem-se:

$$V_d = \frac{3V}{\sqrt{2}\pi}[(2\cos(\alpha + \alpha_1) - K)] = \frac{3V}{\sqrt{2}\pi}[2\cos(60^{\circ} - \arccos(K)) - K] \qquad (4.60)$$

As curvas da figura 4.9 ilustram a operação dos conversores no modo B.

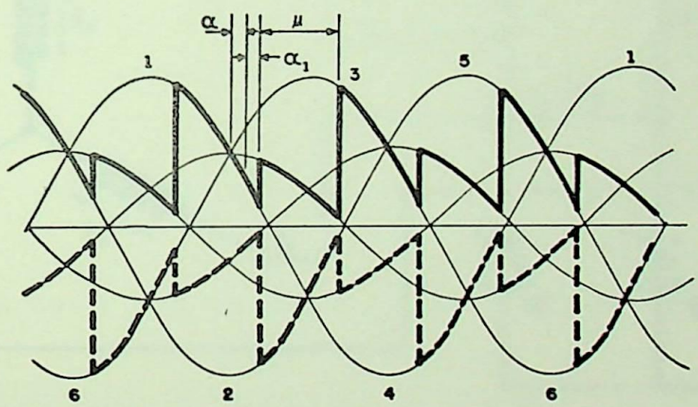


Figura 4.9 - Tensões pólo-neutro para o modo B

4.4.3 - Modo C

Características:

(i) $0^{\circ} \leq \alpha \leq 30^{\circ}$

(ii) $\mu > 60^{\circ}$

(iii) $0{,}866 \leq K \leq 1{,}1547$

Quando o fator K ultrapassa os limites de operação do modo B, o ângulo μ de comutação excederá os 60° e o ângulo de ignição total ($\alpha + \alpha_1$) vai se manter em 30°. Observando-se a figura 4.7, nota-se que a válvula 1 inicia a comutação para a válvula 3 enquanto a válvula 6 ainda está comutando para a válvula 2, e quatro válvulas estarão conduzindo ao mesmo tempo, por um curto intervalo de tempo. Do lado CC existirá um curto-circuito, e a tensão de saída V_d será igual a zero, conforme é ilustrado na figura 4.10.

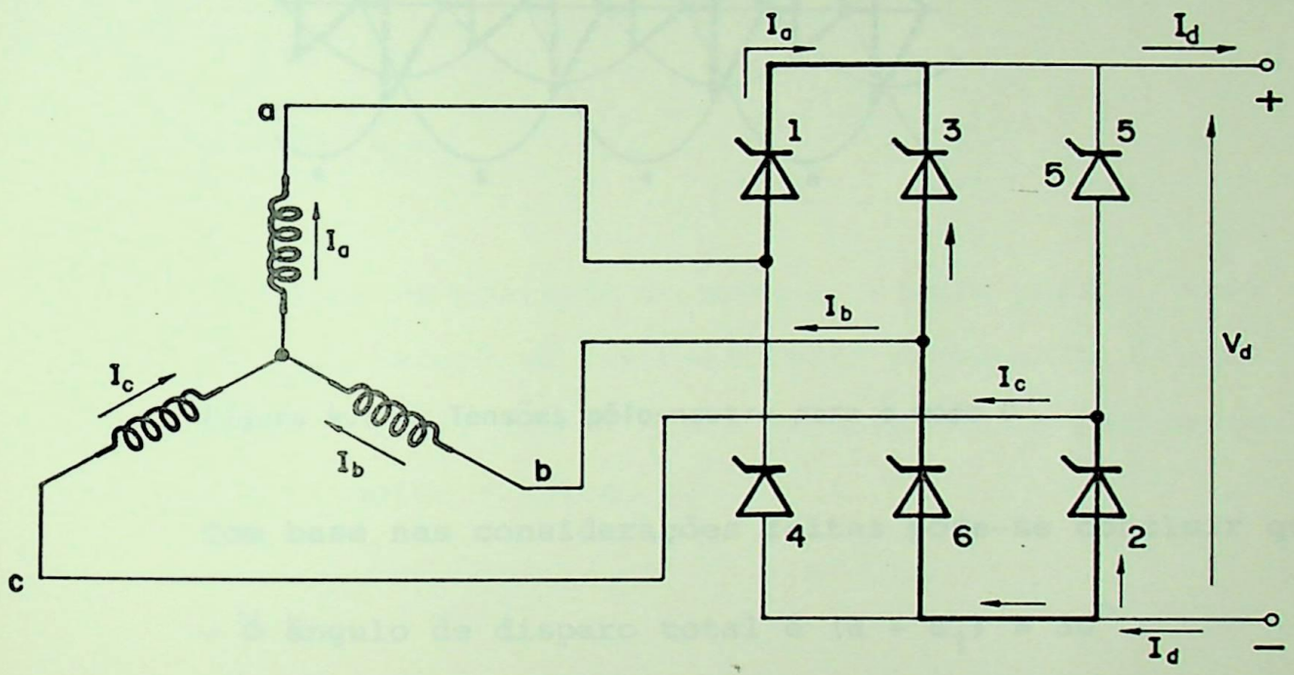


Figura 4.10 - Válvulas 1, 2, 3 e 6 conduzindo simultaneamente.

Do lado CA isto é visto como um curto-circuito trifásico, porém sem características perigosas, uma vez que a corrente em qualquer das válvulas é menor que a corrente CC (I_d) (Figura 4.10) Logo que a comutação da válvula 6 para a válvula 2 tenha sido completada, a condição de curto-circuito desaparece. O efeito do curto-circuito é reduzir a tensão disponível para a comutação, implicando em que, para um mesmo ângulo de disparo (α) tem

se um ângulo de comutação (μ) maior.

As curvas da figura 4.11 ilustram a operação dos retificadores no modo C.

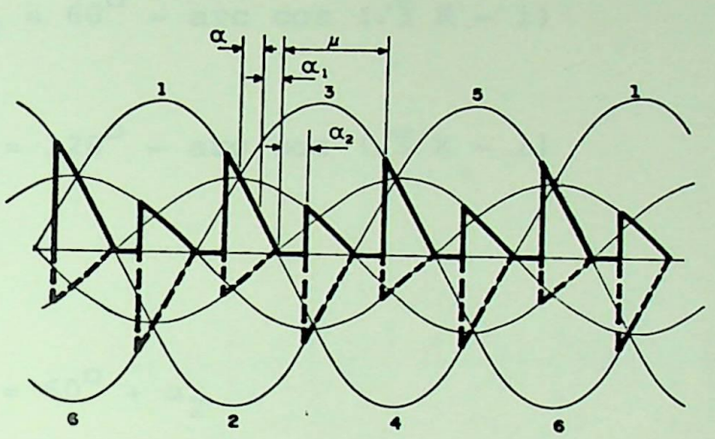


Figura 4.11 - Tensões pólo-neutro para o modo C

Com base nas considerações feitas pode-se concluir que:

- O ângulo de disparo total é $(\alpha + \alpha_1) = 30^{\circ}$.

- O ângulo de curto-circuito é α_2

- O período total de comutação é $\mu = (60^{\circ} + \alpha_2)$.

De acorco com a referência [10] tem-se como resultados finais para I_d e V_d, as seguintes expressões:

$$I_d = \frac{V}{\sqrt{3}\ \sqrt{2}\ X_c} [1 + \cos(60^{\circ} - \alpha_2)] \qquad (4.61)$$

$$V_d = \frac{3V}{\sqrt{2}\pi} (2\sqrt{3} - 3K) \qquad (4.62)$$

Levando-se (4.51) em (4.61) fica:

$$\cos(60^{\circ} - \alpha_2) = \sqrt{3}\,K - 1$$

De onde:

$$\alpha_2 = 60^{\circ} - \arccos(\sqrt{3}\,K - 1) \qquad (4.63)$$

$$\mu = 120^{\circ} - \arccos(\sqrt{3}\,K - 1) \qquad (4.64)$$

pois:

$$\mu = 60^{\circ} + \alpha_2$$

O limite de operação do modo C ocorre para $\alpha_2 = 60^{\circ}$, a partir do qual haverá um curto-circuito permanente. Neste caso, da equação (4.63), tem-se que o curto-circuito permaneceria quando fosse atingido o valor:

$$K = 2/\sqrt{3} = 1.1547$$

4.4.4 - Modo D

Características:

(i) $30^{\circ} \leq \alpha \leq 60^{\circ}$

(ii) $\mu > 60^{\circ}$

(iii) $\cos(60^{\circ} - \alpha) \leq K \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\alpha - 30^{\circ})$

A diferença entre este modo de operação e o modo C está na inexistência do atraso adicional α_1 pois, neste caso, o ângulo de disparo (α) é maior que 30^o.

As curvas da figura 4.12 ilustram a operação dos retificadores no modo D.

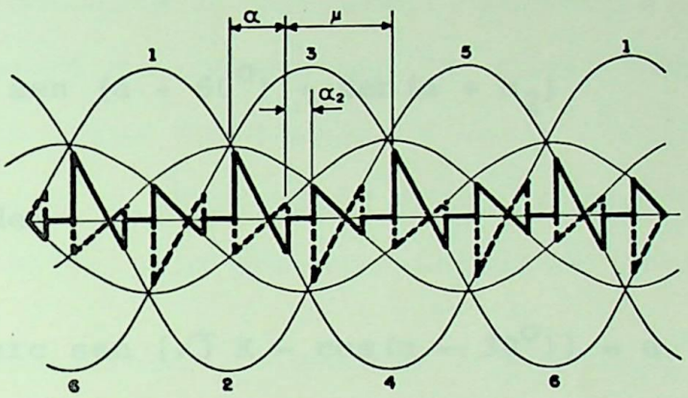


Figura 4.12 - Tensões pólo-neutro para o modo D.

Novamente, pode-se concluir que:

- O ângulo de disparo é α.

- O ângulo de curto-circuito é α_2.

- O ângulo total de comutação é $\mu = 60^o + \alpha_2$.

De acordo com a referência [10], tem-se as seguintes equações para a corrente e tensão do lado CC do retificador ope

rando no modo D:

$$I_d = \frac{V}{\sqrt{3}\ \sqrt{2}\ X_c} [\text{sen}(\alpha + 60^o) + \text{sen}(\alpha + \alpha_2)] \qquad (4.65)$$

$$V_d = \frac{3\sqrt{3}V}{\sqrt{2}\pi} [2 \cos(\alpha - 30^o) - \sqrt{3}\ K] \qquad (4.66)$$

Substituindo (4.51) em (4.65), tem-se:

$$\sqrt{3}\ K = \text{sen}\ (\alpha + 60^o) + \text{sen}(\alpha + \alpha_2)$$

De onde:

$$\alpha_2 = \text{arc sen}\ [\sqrt{3}\ K - \cos(\alpha - 30^o)] - \alpha \qquad (4.67)$$

O limite de operação como retificador é $V_d = 0$, que substituído em (4.66) implica em que:

$$K \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \cos\ (\alpha - 30^o)$$

Pode-se, portanto, em função de K e α, identificar a operação do retificador em qualquer situação, possibilitando determinar facilmente todos os parâmetros de operação do lado CC, ou seja a tensão V_d, a corrente I_d, os ângulos de disparo (α), de comutação (μ), e de extinção (δ).

Resta então relacionar o lado CC com o lado CA, para se conhecer o efeito das cargas conversoras no sistema de alimentação CA.

4.5 - Interação entre os Retificadores e o Sistema CA de Alimentação.

Uma vez conhecida a operação do lado CC e obtidas as equações de suas grandezas mais importantes, deve-se proceder o cálculo das correntes ativa e reativa fornecidas ao retificador. Estas correntes, posteriormente, permitirão tratar o retificador como fontes de corrente e, com isto, determinar as potências ativa e reativa absorvidas do sistema CA. Estas fontes são afetadas pela dinâmica da carga considerada e assim possibilita a inclusão do retificador no programa de estabilidade de acordo com a técnica já empregada pelo programa utilizado neste trabalho.

Fundamentalmente, a questão é ilustrada pelas figuras 4.13(a), 4.13(b) e 4.13(c).

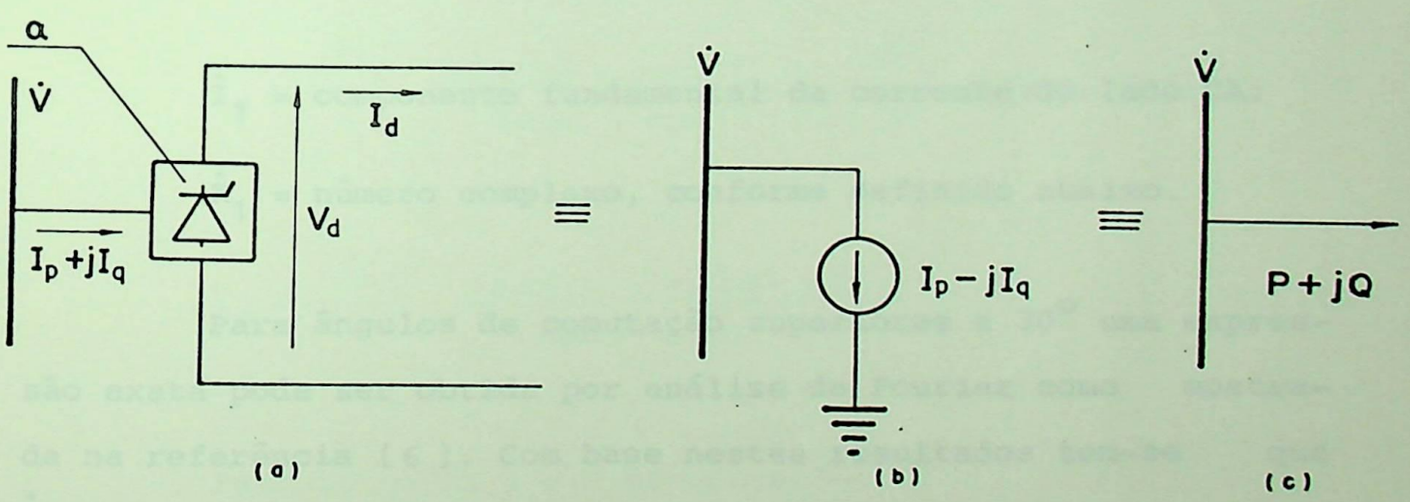


Figura 4.13 (a) - Circuito equivalente da ponte conversora
(b) - Representação por fonte de corrente equivalente
(c) - Representação por uma potência equivalente.

Nas figuras 4.13(a),(b) e (c) são mostrados respectivamente: o circuito equivalente de uma ponte conversora, sua repre

sentação como uma fonte de corrente e como elemento consumidor de potência da denominada barra do retificador.

4.5.1 - Relação entre as Correntes do lado CC e CA

Como citado anteriormente, neste trabalho não foram consideradas as distorções harmônicas, portanto, o texto se refere somente à componente fundamental da corrente do lado CA.

A relação entre o fasor correspondente a componente fundamental da corrente do lado CA em relação a uma referência que é a tensão da barra, e a corrente do lado CC é dada [6] por:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{K}_1 \sqrt{6}\ I_d}{\pi} \qquad (4.68)$$

onde:

$\dot{I}_1$ = componente fundamental da corrente do lado CA.

$\dot{K}_1$ = número complexo, conforme definido abaixo.

Para ângulos de comutação superiores a 30^o uma expressão exata pode ser obtida por análise de Fourier como mostrada na referência [6]. Com base nestes resultados tem-se que $\dot{K}_1$ é dado por:

$$\dot{K}_1 = \frac{(\angle -2\alpha - \angle -2\delta - j2\mu)}{4(\cos\alpha - \cos\delta)} \qquad (4.69)$$

Esta expressão é válida somente para os modos de operação A e B.

Para os modos C e D de operação, uma outra expressão deve ser usada:

$$\dot{K}_1 = \frac{\sqrt{3}(\underline{/-2\alpha'} - \underline{/-2\delta'} - j2\mu)}{4(\cos\alpha' - \cos\delta')} \qquad (4.70)$$

onde:

$$\alpha' = \alpha - 30^{o} \qquad (4.71)$$

$$\delta' = \delta + 30^{o} \qquad (4.72)$$

Com base nas expressões acima, pode-se obter expressões para as componentes ativa e reativa da corrente fundamental para os modos normais de operação (Modos A e B). Os resultados finais são:

$$I_p = \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \frac{[\cos(2\alpha) - \cos(2\delta)]}{4(\cos\alpha - \cos\delta)} = \frac{\sqrt{6}I_d}{2\pi} (\cos\alpha + \cos\delta) \qquad (4.73)$$

$$I_q = \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \frac{[\operatorname{sen}(2\alpha) - \operatorname{sen}(2\delta) + 2\mu]}{4(\cos\alpha - \cos\delta)} \qquad (4.74)$$

Para os modos C e D de operação:

$$I_p = \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \frac{\sqrt{3}[(\cos(2\alpha') - \cos(2\delta')]}{4(\cos\alpha' - \cos\delta')} =$$

$$= \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \sqrt{3} \frac{(\cos\alpha' + \cos\delta')}{2} \qquad (4.75)$$

$$I_q = \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \quad \frac{\sqrt{3}[(\text{sen}(2\alpha') - \text{sen}(2\delta') + 2\mu)]}{4(\cos\alpha' - \cos\delta')} \qquad (4.76)$$

Procurando simplificar as expressões (4.75) e (4.76) tem-se que para o modo C:

$$\alpha_T = \alpha + \alpha_1 = 30^o$$

e que

$$\alpha' = \alpha_T - 30^o$$

ou seja

$$\alpha' = 0^o$$

Substituindo o valor de α' nas equações (4.75) e (4.76) tem-se:

$$I_p = \frac{\sqrt{6}I_d}{2\pi} \quad \sqrt{3}(1 + \cos\delta') \qquad (4.77)$$

$$I_q = \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \quad \frac{\sqrt{3}(2\mu - \text{sen}(2\delta'))}{4(1 - \cos\delta')} \qquad (4.78)$$

Finalmente, uma vez conhecidas as componentes ativa e reativa da corrente, determina-se facilmente as componentes ativa e reativa de potência consumidas da barra do retificador.

$$P = V \; I_p \quad [pu] \qquad (4.79)$$

$$Q = V \; I_q \quad [pu] \qquad (4.80)$$

4.5.2 - Correntes Absorvidas pelos Conversores em Relação à Barra de Referência

Como pode ser observado do equacionamento anterior, a corrente absorvida pelos conversores vista do lado CA, foi determinada em relação à tensão da barra em que estão conectados. Torna-se portanto, necessário referir tal corrente à tensão da barra de referência do sistema, quando esta não coincidir com a barra em que estão ligados estes conversores.

O diagrama fasorial da figura 4.14 ilustra tal situação.

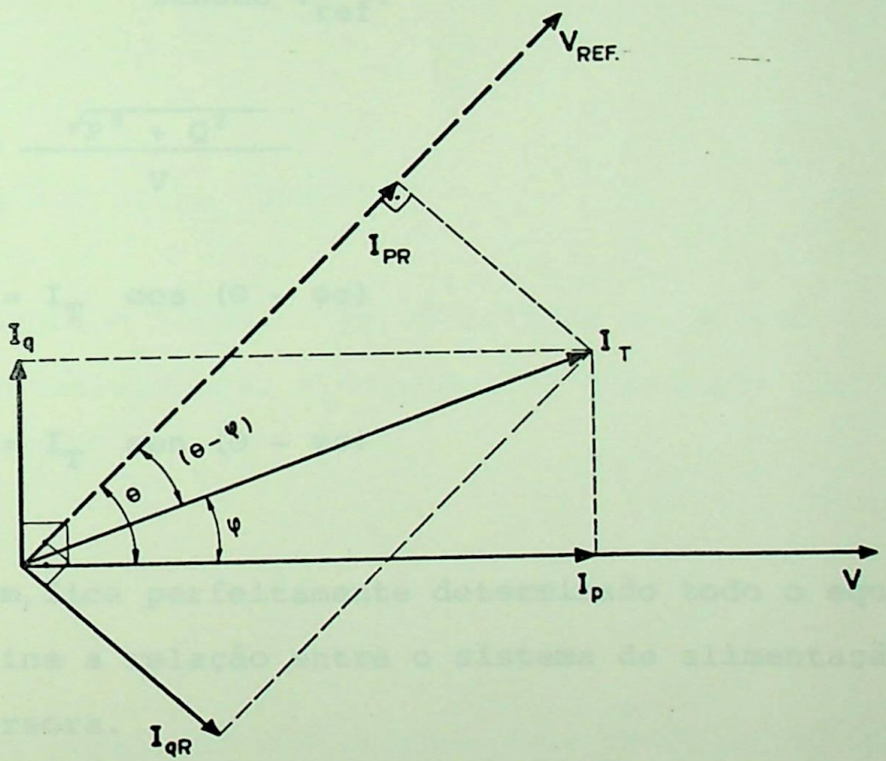


Figura 4.14 - Corrente absorvida pelos conversores em relação à tensão da barra e em relação à tensão de referência do sistema.

onde:

V_{ref} - Módulo da tensão da barra de referência do sistema (fase-fase)

V - Módulo da tensão da barra onde estão conectados os conversores (fase-fase)

I_T - Módulo da corrente absorvida pelos conversores, vista do lado CA.

I_p, I_q - Módulo das componentes ativa e reativa respectivamente da corrente I_T, referidos à tensão V.

I_{pR}, I_{qR} - Módulos das componentes ativa e reativa respectivamente da corrente I_T, referidos à tensão V_{ref}.

$$I_T = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V} \tag{4.81}$$

$$I_{pR} = I_T \cos(\Theta - \psi\sigma) \tag{4.82}$$

$$I_{qR} = I_T \operatorname{sen}(\Theta - \psi\sigma) \tag{4.83}$$

Assim, fica perfeitamente determinado todo o equacionamento que define a relação entre o sistema de alimentação CA e a carga conversora.

4.6 - Implementação Digital da Modelagem Dinâmica de Cargas Retificadoras

Utilizando os conceitos desenvolvidos e a formulação matemática de uma instalação retificadora constituida por uma carga do tipo f.c.e.m constante, procedeu-se a incorporação desta carga, no programa de estabilidade transitória. Dentro da filosofia de modelagem do programa utilizado, a carga deverá ser implementada, de forma que, resulte numa fonte de corrente que é atualizada a cada passo de cálculo.

Com este intuito foram então criadas 8 subrotinas, a saber:

4.6.1 - Subrotina "CONVIP"

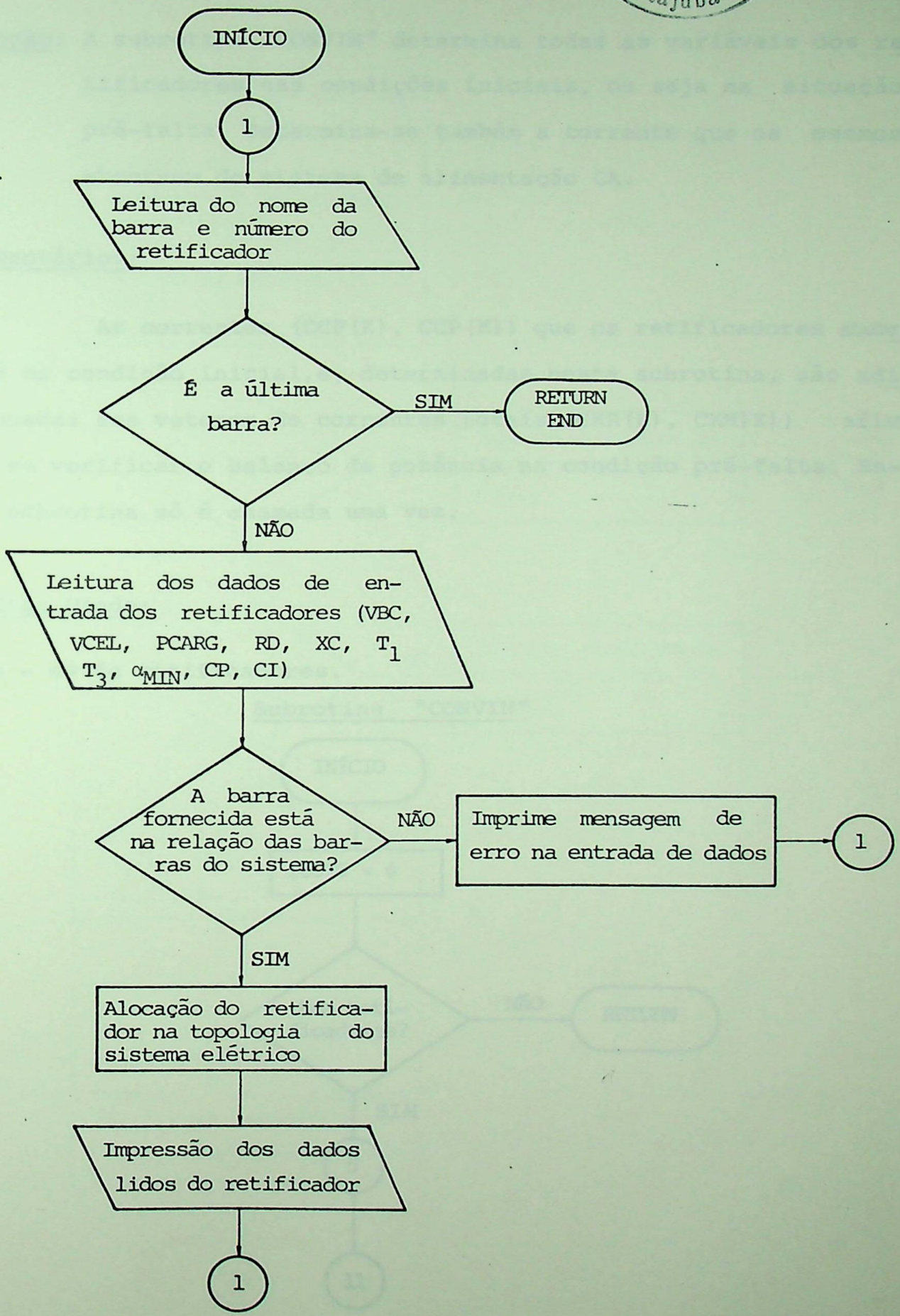
Função: A subrotina "CONVIP" faz a leitura e imprime os dados dos retificadores, e os aloca na topologia do sistema elétrico.

Comentários:

Nesta subrotina são criados dois vetores NCB(NCO), INCOV (NCO) com o objetivo de alocar o retificador no sistema elétrico. O vetor INCOV(NCO) indica em que barra está conectado o retificador considerado, e o vetor NCB(NCO) fornece o número deste retificador quando a barra tem mais de uma unidade conversora.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca MAUÁ
Itajubá

Subrotina "CONVIP"



4.6.2 - Subrotina "CONVIN"

Função: A subrotina "CONVIN" determina todas as variáveis dos retificadores nas condições iniciais, ou seja na situação pré-falta. Determina-se também a corrente que os mesmos absorvem do sistema de alimentação CA.

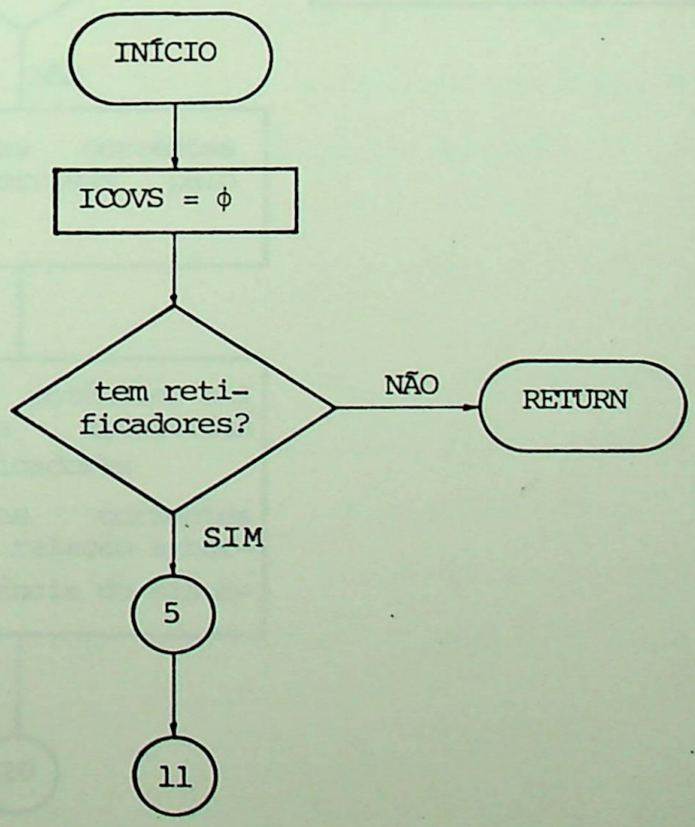
Comentários:

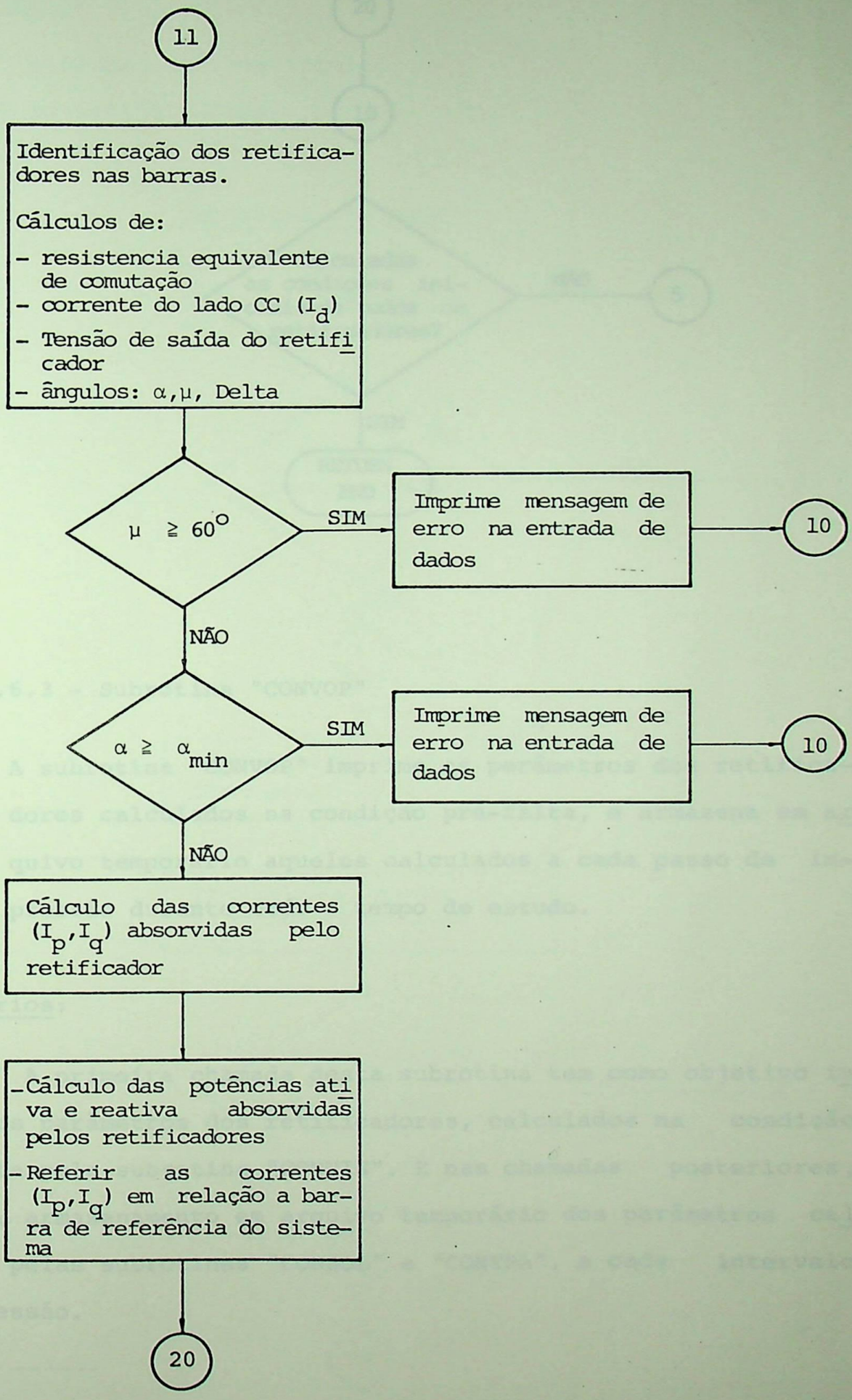
As correntes (CCP(K), CCP(K)) que os retificadores absorvem na condição inicial,e, determinadas nesta subrotina, são adicionadas aos vetores de correntes totais (CKR(K), CKM)K)) afim de se verificar o balanço de potência na condição pré-falta. Esta subrotina só é chamada uma vez.

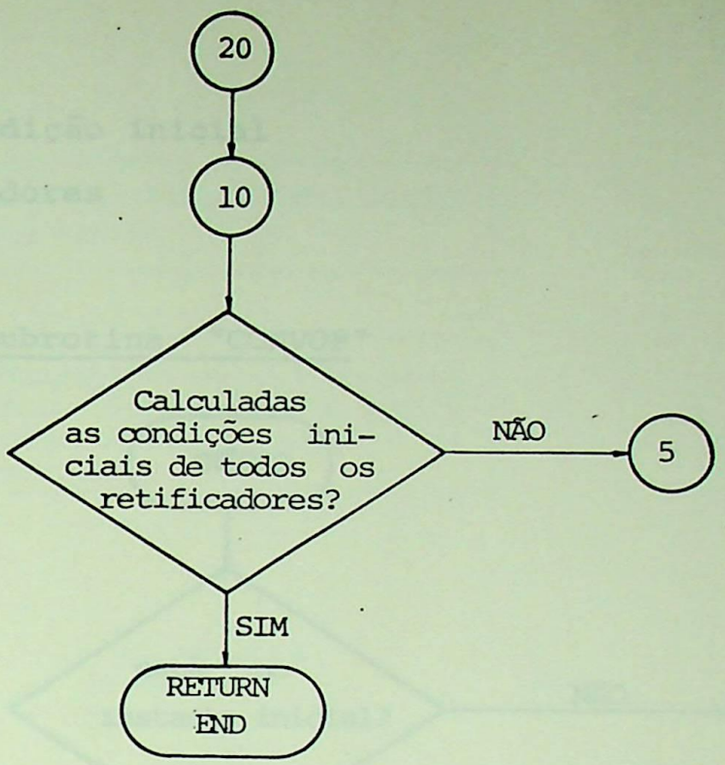
Código Usado:

NCO - nº de retificadores.

Subrotina "CONVIN"




11
Identificação dos retificadores nas barras.
Cálculos de:
- resistencia equivalente de comutação
- corrente do lado CC (I_d)
- Tensão de saída do retificador
- ângulos: α, μ, Delta
μ ≧ 60°
SIM
Imprime mensagem de erro na entrada de dados
10
NÃO
α ≧ α_{min}
SIM
Imprime mensagem de erro na entrada de dados
10
NÃO
Cálculo das correntes (I_p, I_q) absorvidas pelo retificador
- Cálculo das potências ativa e reativa absorvidas pelos retificadores
- Referir as correntes (I_p, I_q) em relação a barra de referência do sistema
20



4.6.3 - Subrotina "CONVOP"

Função: A subrotina "CONVOP" imprime os parâmetros dos retificadores calculados na condição pré-falta, e armazena em arquivo temporario aqueles calculados a cada passo de impressão durante todo o tempo de estudo.

Comentários:

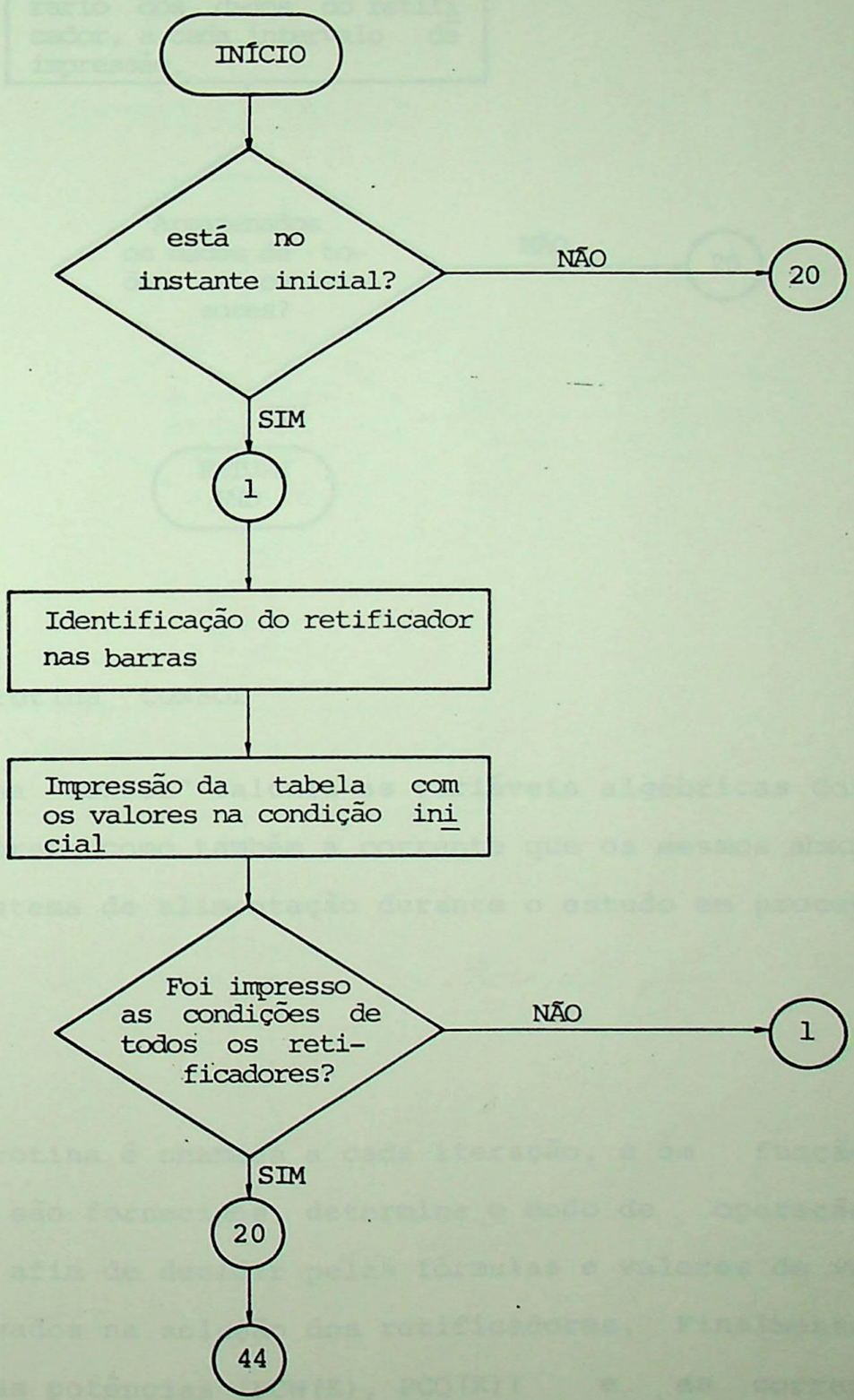
A primeira chamada desta subrotina tem como objetivo imprimir os parâmetros dos retificadores, calculados na condição pré-falta pela subrotina "CONVIN". E nas chamadas posteriores, é feito o armazenamento em arquivo temporário dos parâmetros calculados pelas subrotinas "CONSOL" e "CONTRA", a cada intervalo de impressão.

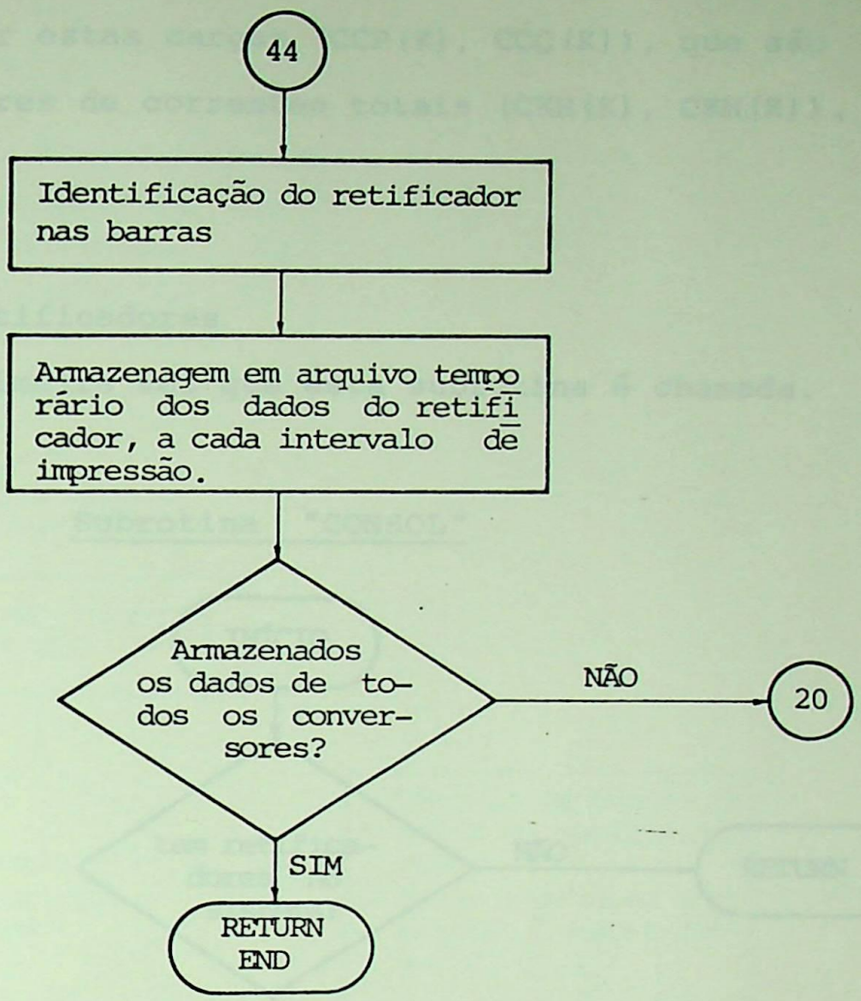
Código Usado:

JJ = 0 está na condição inicial

NCO = nº de retificadores

Subrotina "CONVOP"





4.6.4 - Subrotina "CONSOL"

Função: A subrotina "CONSOL" calcula as variáveis algébricas dos retificadores, como também a corrente que os mesmos absorvem do sistema de alimentação durante o estudo em processo.

Comentários:

Esta subrotina é chamada a cada iteração, e em função dos dados que lhe são fornecidos, determina o modo de operação dos retificadores afim de decidir pelas fórmulas e valores de variáveis a serem usados na solução dos retificadores. Finalmente são determinadas as potências (PCW(K), PCQ(K)) e as corren

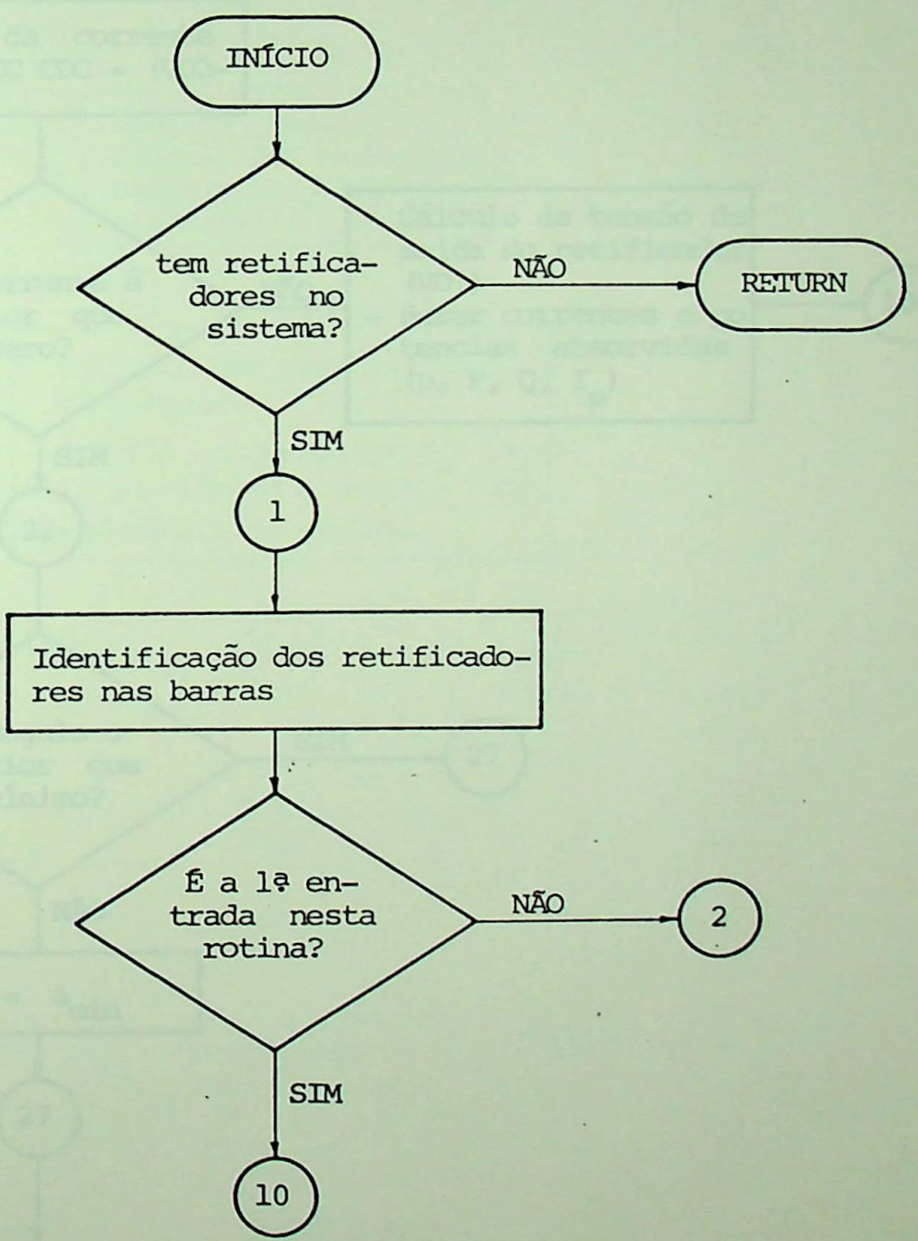
tes absorvidas por estas cargas (CCP(K), CCQ(K)), que são adicionados aos vetores de correntes totais (CKR(K), CKM(K)).

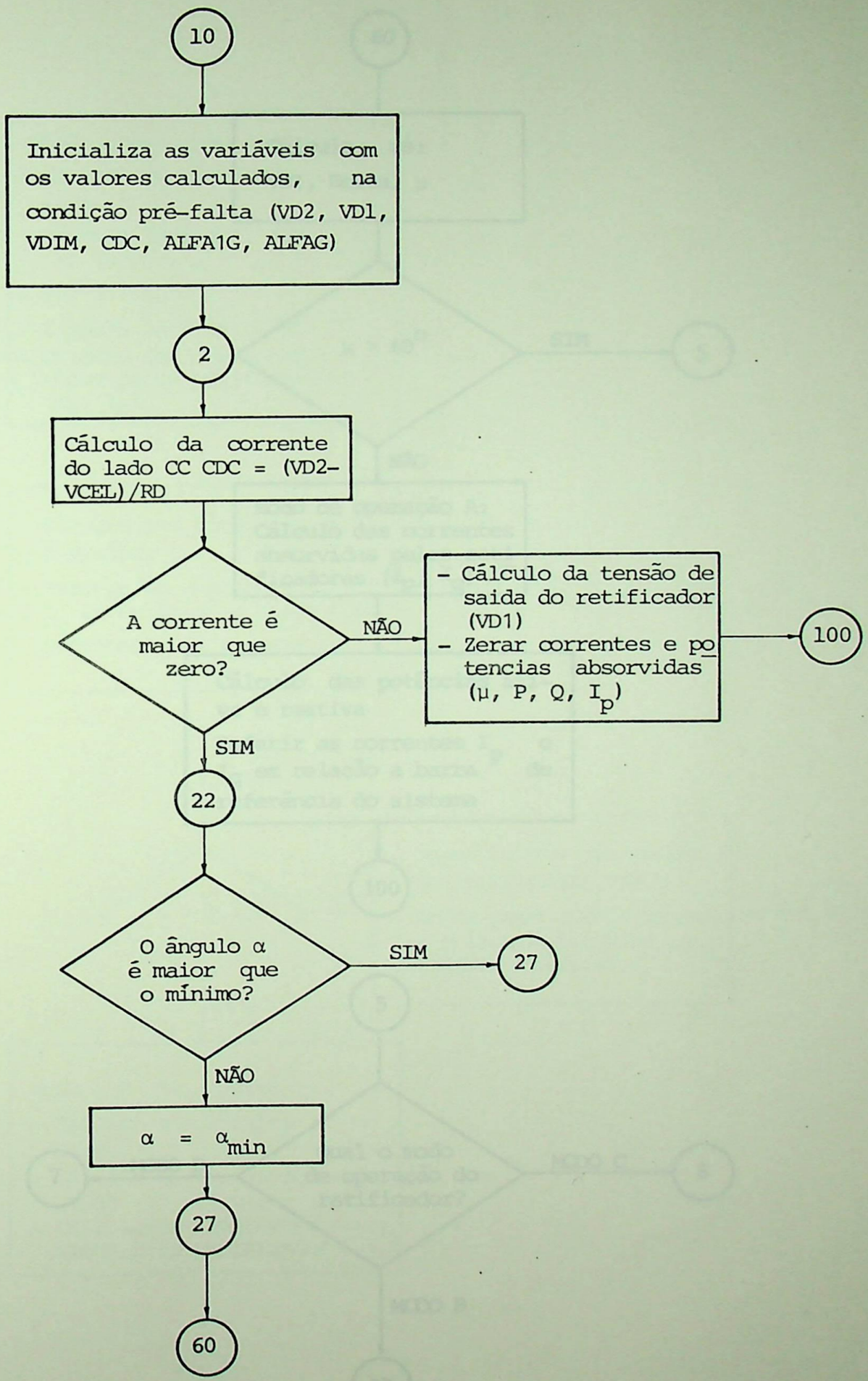
Códigos Usados:

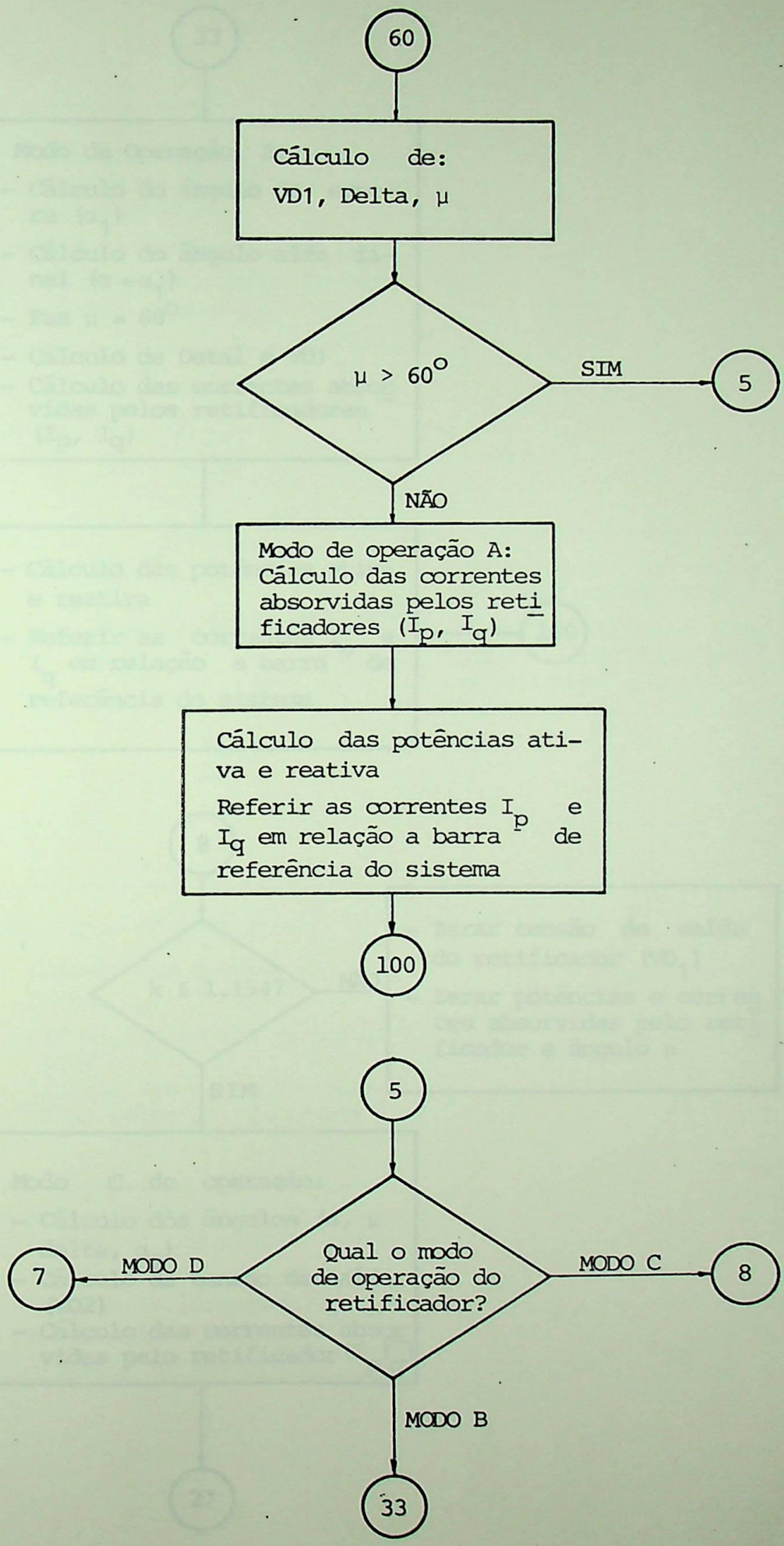
NCO - nº de retificadores

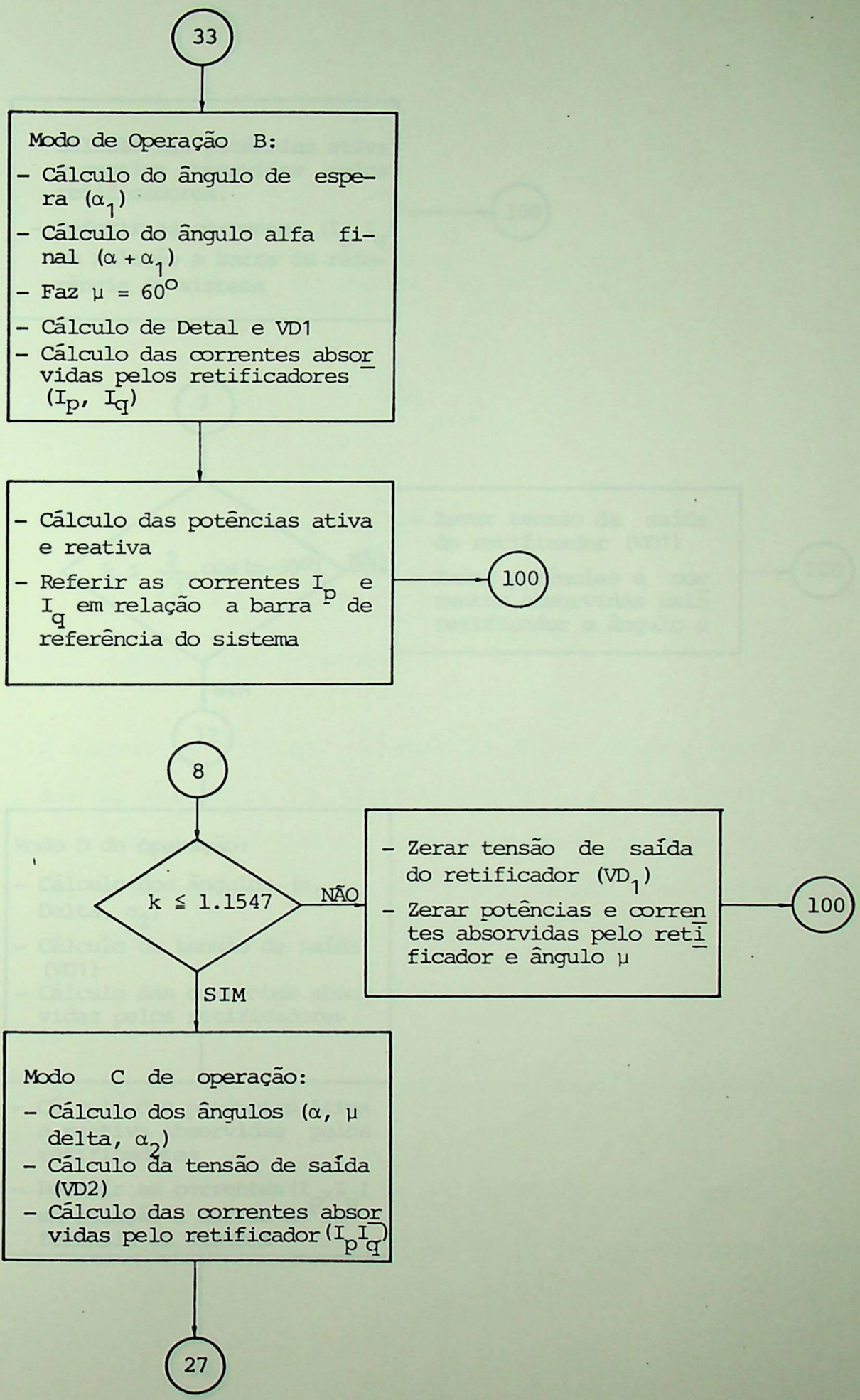
ICOVS = 0 É a primeira vez que esta subrotina é chamada.

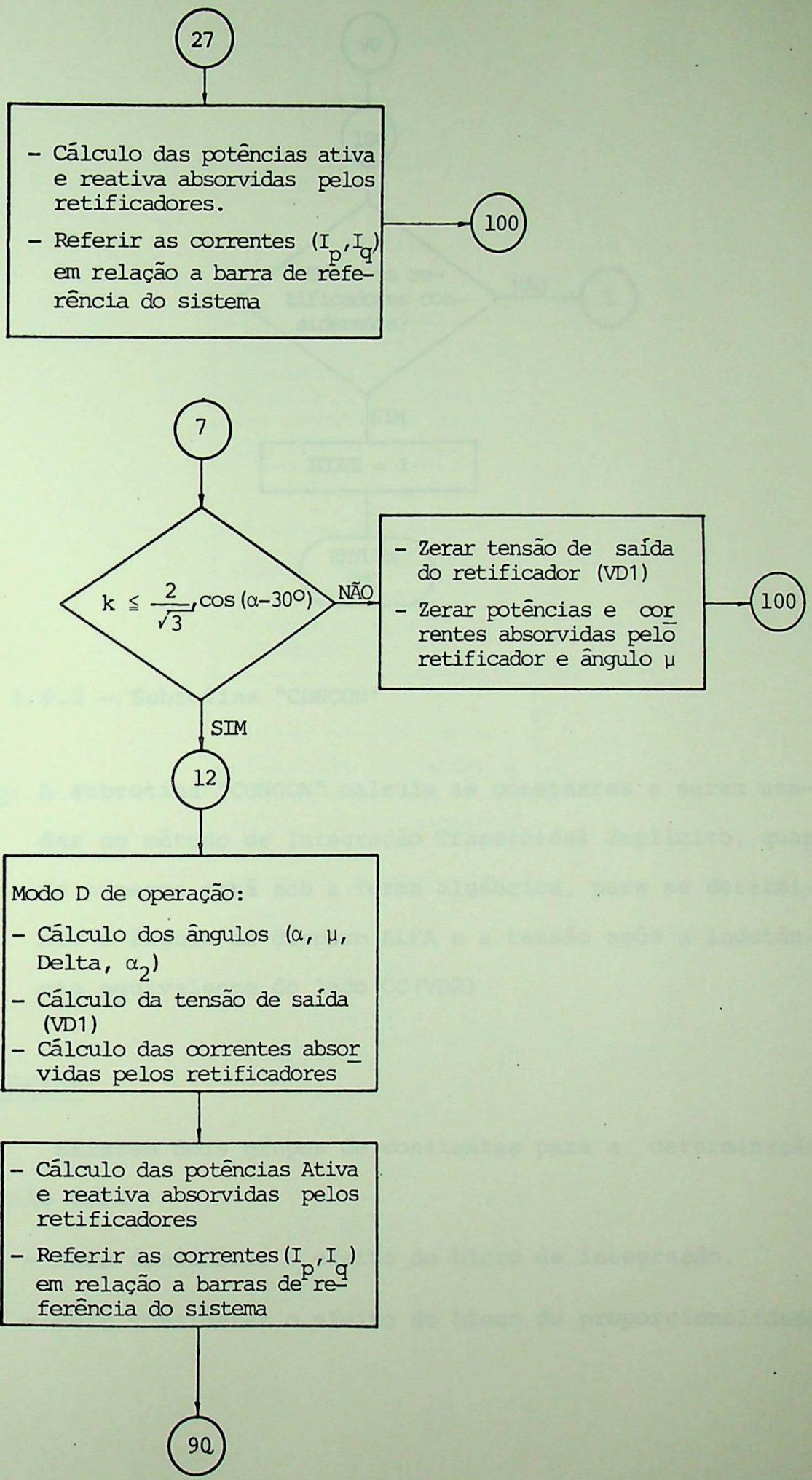
Subrotina "CONSOL"

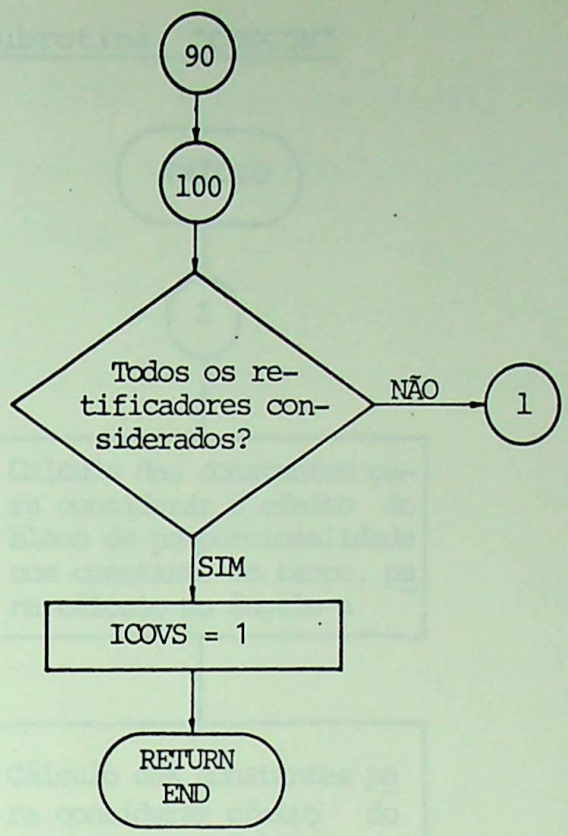



10
Inicializa as variáveis com os valores calculados, na condição pré-falta (VD2, VD1, VDIM, CDC, ALFA1G, ALFAG)
2
Cálculo da corrente do lado CC CDC = (VD2-VCEL)/RD
A corrente é maior que zero?
NÃO
- Cálculo da tensão de saida do retificador (VD1)
- Zerar correntes e potencias absorvidas (μ, P, Q, I_p)
100
SIM
22
O ângulo α é maior que o mínimo?
SIM
27
NÃO
α = α_{min}
27
60


60
Cálculo de:
VD1, Delta, μ
μ > 60°
SIM
5
NÃO
Modo de operação A:
Cálculo das correntes absorvidas pelos retificadores (Ip, Iq)
Cálculo das potências ativa e reativa
Referir as correntes Ip e Iq em relação a barra de referência do sistema
100
5
Qual o modo de operação do retificador?
MODO D
7
MODO C
8
MODO B
33


33
Modo de Operação B:
- Cálculo do ângulo de espera (α_1)
- Cálculo do ângulo alfa final ($\alpha + \alpha_1$)
- Faz $\mu = 60^o$
- Cálculo de Detal e VD1
- Cálculo das correntes absorvidas pelos retificadores (I_p, I_q)
- Cálculo das potências ativa e reativa
- Referir as correntes I_p e I_q em relação a barra de referência do sistema
100
8
k ≦ 1.1547
NÃO
- Zerar tensão de saída do retificador (VD_1)
- Zerar potências e correntes absorvidas pelo retificador e ângulo μ
100
SIM
Modo C de operação:
- Cálculo dos ângulos (α, μ delta, α_2)
- Cálculo da tensão de saída (VD2)
- Cálculo das correntes absorvidas pelo retificador (I_p I_q)
27


27
- Cálculo das potências ativa e reativa absorvidas pelos retificadores.
- Referir as correntes (I_p, I_q) em relação a barra de referência do sistema
100
7
$k \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\alpha - 30^o)$
NÃO
- Zerar tensão de saída do retificador (VD1)
- Zerar potências e correntes absorvidas pelo retificador e ângulo μ
100
SIM
12
Modo D de operação:
- Cálculo dos ângulos (α, μ, Delta, α_2)
- Cálculo da tensão de saída (VD1)
- Cálculo das correntes absorvidas pelos retificadores
- Cálculo das potências Ativa e reativa absorvidas pelos retificadores
- Referir as correntes (I_p, I_q) em relação a barras de referência do sistema
90



4.6.5 - Subrotina "CONCON"

Função: A subrotina "CONCON" calcula as constantes a serem usadas no método de Integração Trapezoidal Implícito, quando o mesmo está sob a forma algébrica, para se determinar o ângulo de disparo ALFA e a tensão após a indutância equivalente do lado CC(VD2)

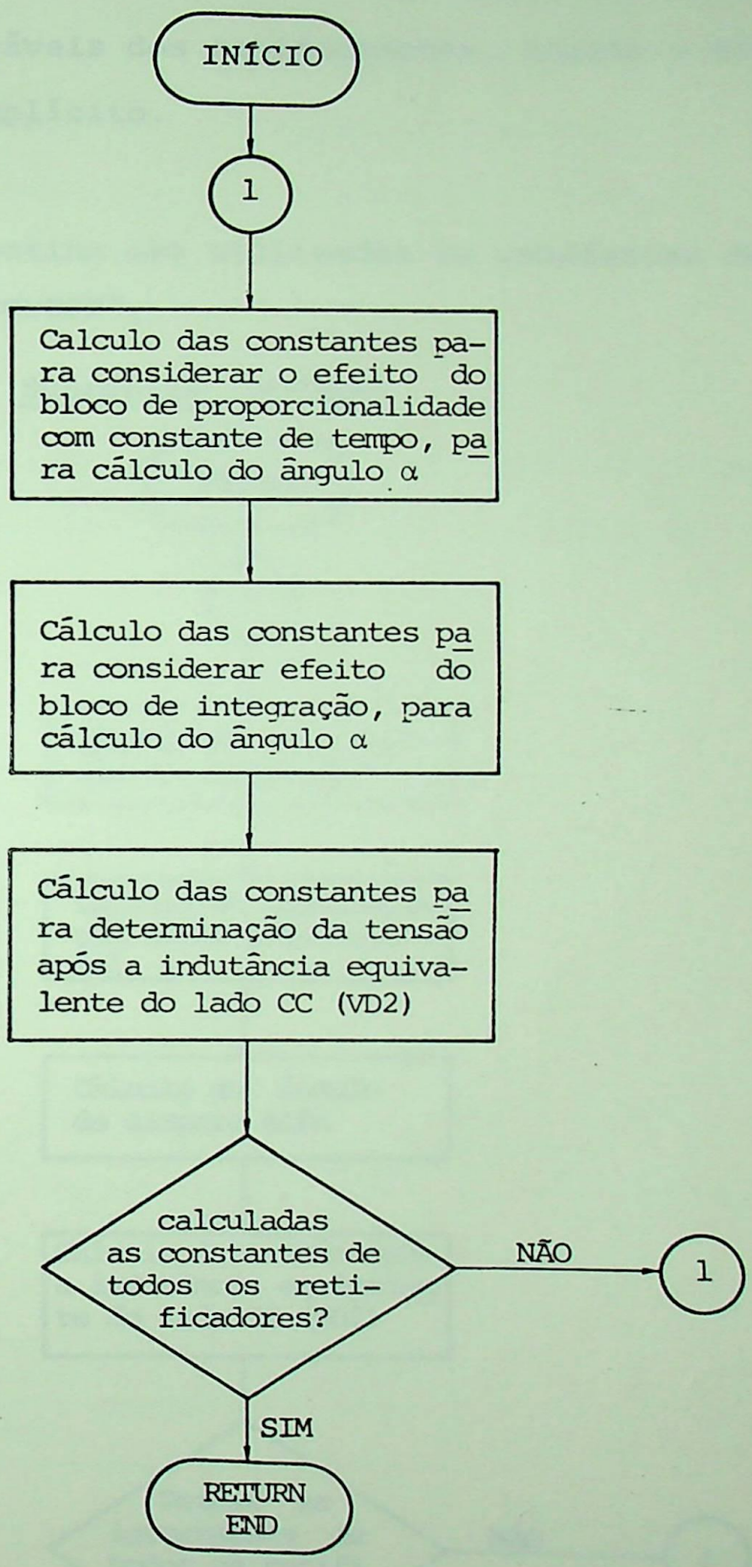
Comentários:

Existem dois grupos de constantes para a determinação do ângulo ALFA

(i) - Para considerar o efeito do bloco de integração.

(ii) - Para considerar o efeito do bloco de proporcionalidade.

Subrotina "CONCON"



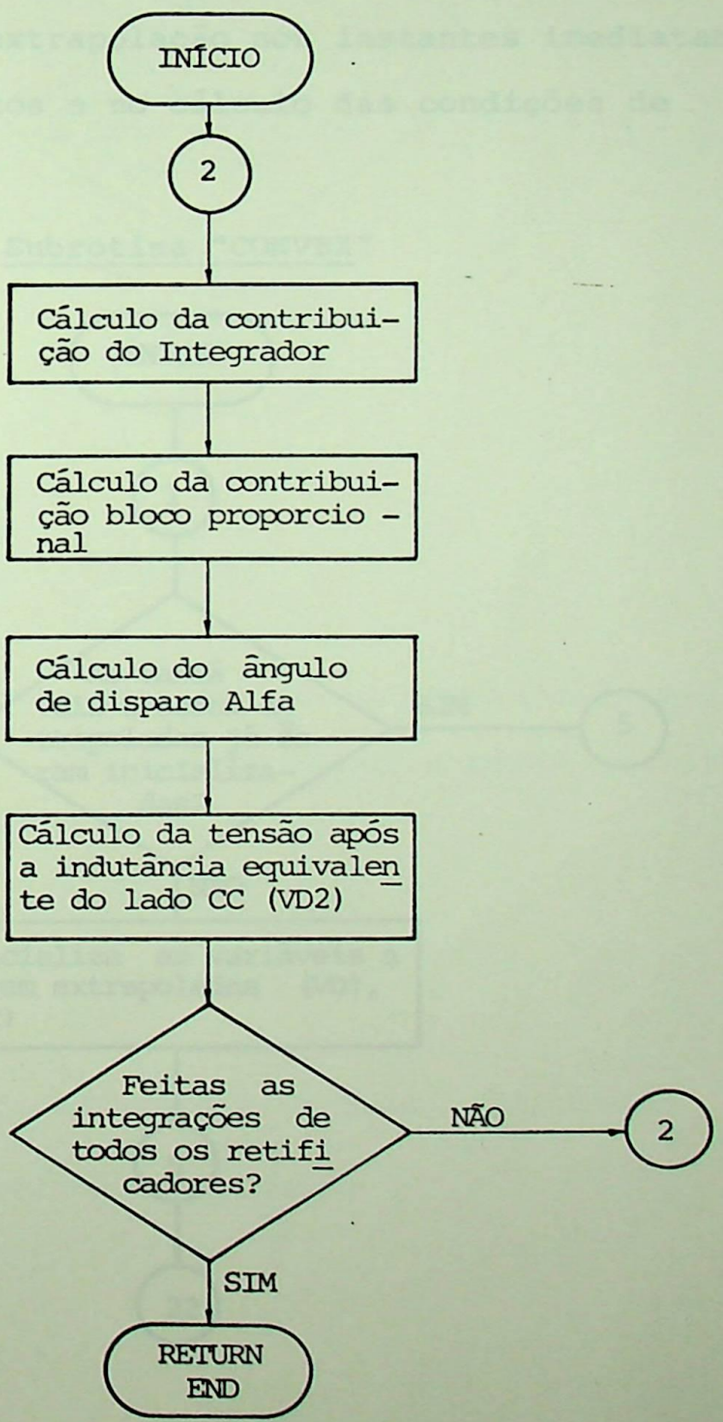
4.6.6 - Subrotina "CONTRA"

Função: A subrotina "CONTRA" executa as integrações das variáveis integráveis dos retificadores, usando o Método Trapezoidal Implícito.

Comentários:

Nesta subrotina são utilizadas as constantes determinadas na subrotina "CONCON".

Subrotina "CONTRA"



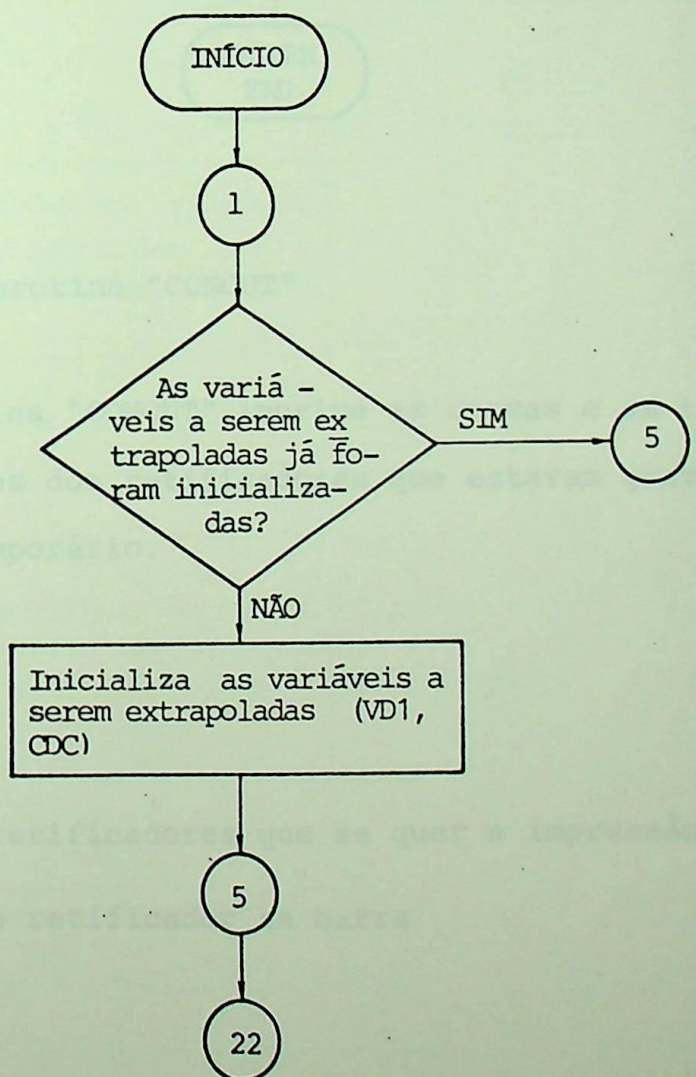
4.6.7 - Subrotina "CONVEX"

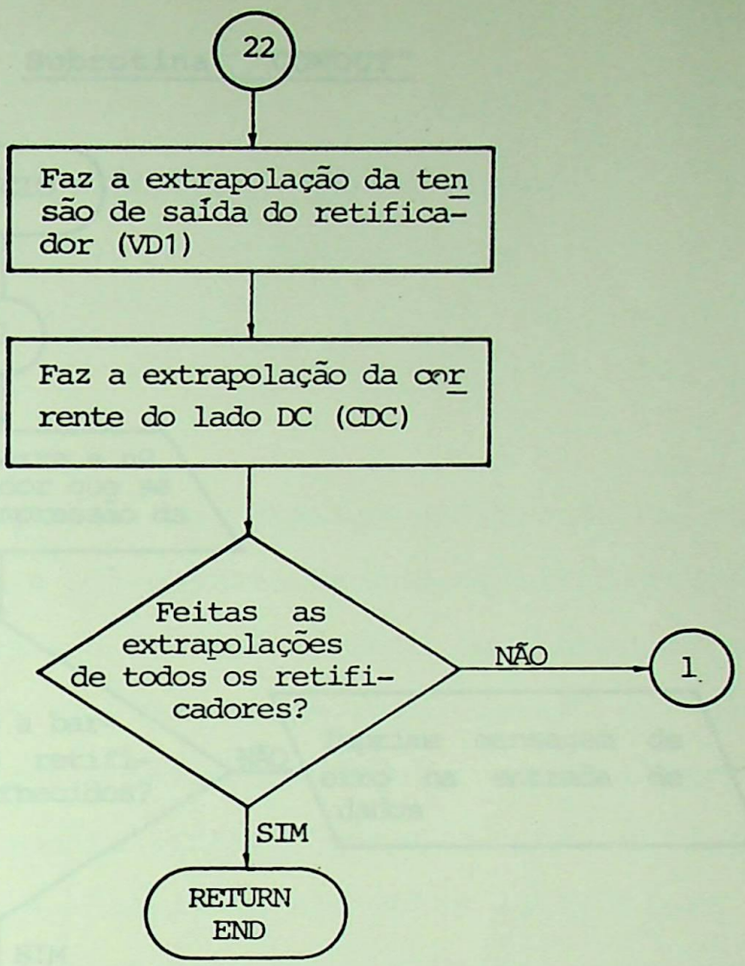
Função: A subrotina "CONVEX" faz a extrapolação das variáveis não-integráveis dos retificadores. Somente as variáveis algébricas associadas às equações diferenciais necessitam ser extrapoladas.

Comentários:

Não se faz extrapolação nos instantes imediatamente anteriores a chaveamentos e no cálculo das condições de regime permanente.

Subrotina "CONVEX"





4.6.8 - Subrotina "CONOUT"

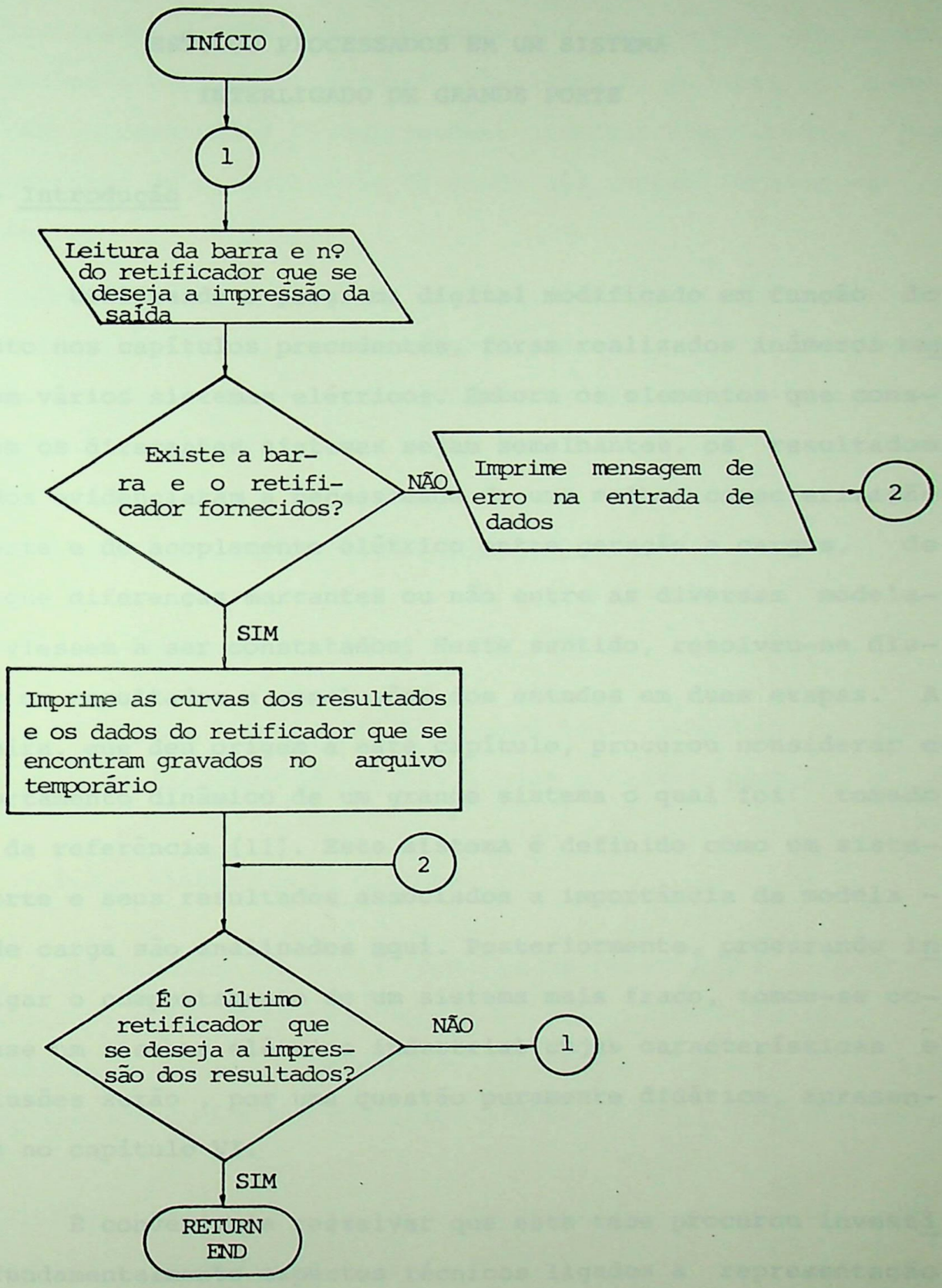
Função: A subrotina "CONOUT" imprime as curvas e as tabelas dos resultados dos retificadores que estavam gravados no arquivo temporário.

Códigos Usados:

NDC - número de retificadores que se quer a impressão

NCONV - número do retificador na barra

Subrotina "CONOUT"



CAPÍTULO V

ESTUDOS PROCESSADOS EM UM SISTEMA INTERLIGADO DE GRANDE PORTE

5.1 - Introdução

Utilizando o programa digital modificado em função do exposto nos capítulos precedentes, foram realizados inúmeros testes em vários sistemas elétricos. Embora os elementos que constituem os diferentes sistemas sejam semelhantes, os resultados obtidos evidenciaram a necessidade de uma melhor caracterização do porte e do acoplamento elétrico entre geração e cargas, de modo que diferenças marcantes ou não entre as diversas modelagens viessem a ser constatados. Neste sentido, resolveu-se discutir os resultados e conclusões dos estudos em duas etapas. A primeira, que deu origem a este capítulo, procurou considerar o comportamento dinâmico de um grande sistema o qual foi tomado como da referência [11]. Este sistema é definido como um sistema forte e seus resultados associados a importância da modelagem de carga são analisados aqui. Posteriormente, procurando investigar o comportamento de um sistema mais fraco, tomou-se como base um sistema elétrico industrial cujas características e conclusões serão , por uma questão puramente didática, apresentados no capítulo VI.

É conveniente ressalvar que esta tese procurou investigar fundamentalmente aspectos técnicos ligados a representação de cargas. Em vista da própria orientação dada anteriormente,ao se considerar os resultados extraídos, optou-se por apresentá-

-los em duas partes distintas, a saber:

- numa primeira, serão abordados os estudos comparativos e relacionados a modelagens de carga por: impedância constante, potência constante, corrente constante e, motores de indução representados dinamicamente. Diversas composições percentuais de distribuição da carga são também levadas em conta.
- numa segunda etapa, serão consideradas aspectos relacionados a importância de representação de cargas retificadoras de grande porte, e, estabelecidas medidas comparativas com outras modelagens.

5.2 - Características do Sistema Simulado

5.2.1 - Diagrama Unifilar

A figura 5.1 ilustra o sistema teste utilizado e, fornece os valores das impedâncias das linhas e transformadores em pu.

5.2.2 - Parâmetros do Sistema

As tabelas 5.1 a 5.3 fornecem os valores dos parâmetros das máquinas síncronas, reguladores de velocidade e tensão. Os reguladores de tensão e velocidade utilizados (Figuras 5.2 e 5.3) correspondem aos modelos propostos pelas referências [16] e [17], respectivamente.

5.2.3 - Resultados do Fluxo de Carga para a Situação Ilustrada no Unifilar.

O resultado do fluxo de carga do sistema, é apresentado na figura 5.4.

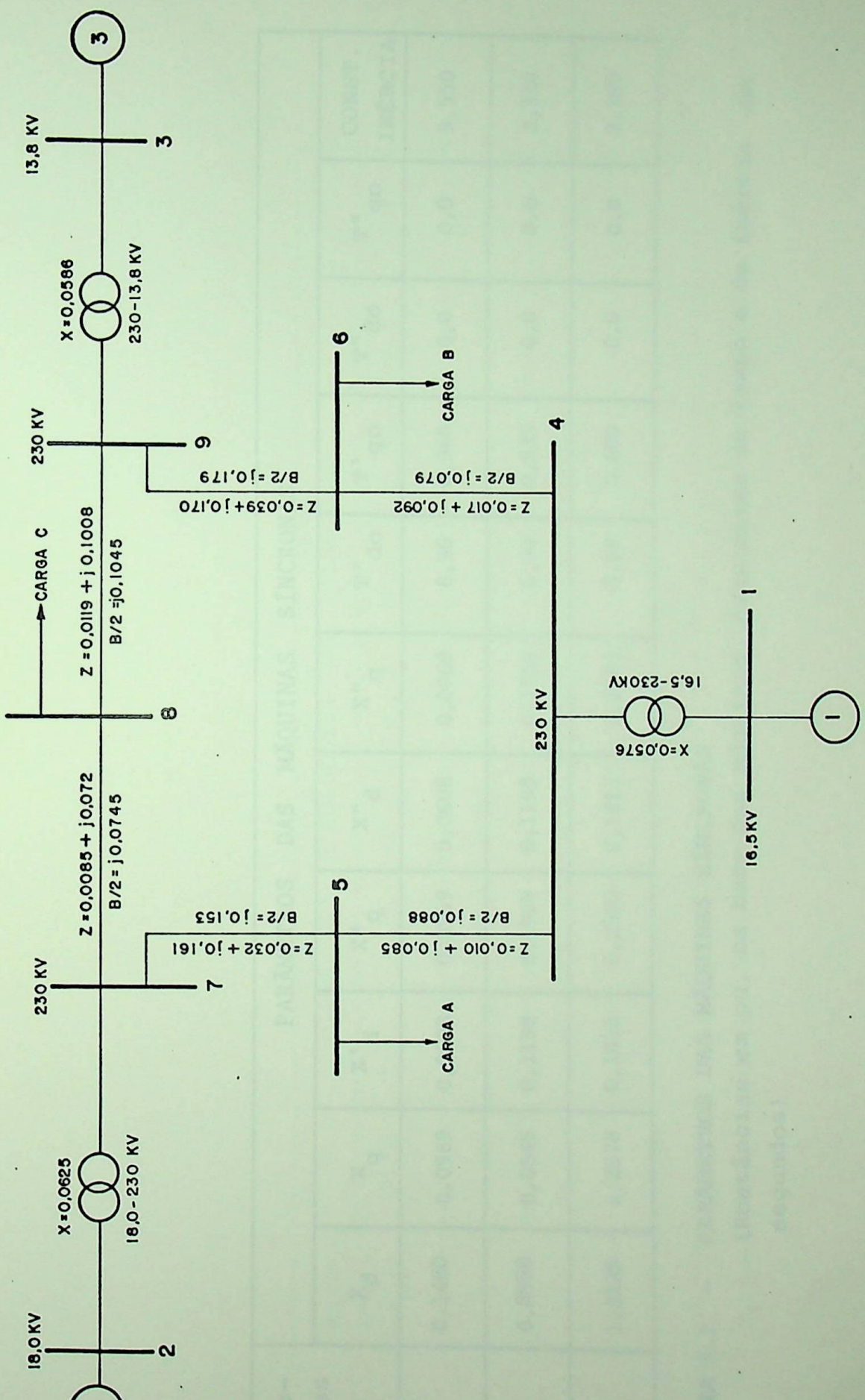


Figura 5.1 - Diagrama Unifilar - Sistema Teste 1

Geradores Nº	PARÂMETROS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS										
	X_d	X_q	X'_d	X'_q	X''_d	X''_q	T'_{do}	T'_{qo}	T''_{do}	T''_{qo}	CONST. INÉRCIA
1	0,1460	0.0969	0,0608	0,0969	0,0608	0,0969	8,96	8,960	0,0	0,0	9,550
2	0,8958	0,8645	0,1198	0,1969	0,1198	0,1969	6,00	0,535	0,0	0,0	3,330
3	1,3125	1.2578	0,1813	0,2500	0,1813	0,2500	5,89	0,600	0,0	0,0	2,350

TABELA 5.1 - PARÂMETROS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS
(Reatâncias em pu, na base das máquinas, constantes de tempo e de inércia em segundos)

Reguladores Nº	DADOS DOS REGULADORES DE VELOCIDADE								
	Ganho (FLY BALL)	T_b (s)	R (pu)	T_1 (s)	T_2 (s)	T_3 (s)	T_4 (s)	T_5 (s)	POT. MÁX. (MW)
1	1,000	0,0	0,060	0,250	0,0	0,100	0,0	0,350	100,0
2	1,000	0,0	0,060	0,250	0,0	0,100	0,0	0,350	100,0
3	1,000	0,0	0,060	0,250	0,0	0,100	0,0	0,350	100,0

TABELA 5.2 - DADOS DOS REGULADORES DE VELOCIDADE DOS GERADORES SÍNCRONOS

Reguladores Nº	DADOS DOS REGULADORES DE TENSÃO												
	K_a (pu)	T_a (s)	K_F (pu)	T_F (s)	K_e (s)	T_e (s)	V_{MAX} (pu)	V_{MIN} (pu)	E_{MAX} (pu)	E_{MIN} (pu)	$S_{E.75MAX}$	S_{EMAX}	D_{MAX} (pu/s)
1	400,0	0,010	1,000	1,000	1,000	0,080	7,300	7,300	3,920	∞	0,500	0,860	∞
2	400,0	0,010	1,000	1,000	1,000	0,080	7,300	7,300	3,920	∞	0,500	0,860	∞
3	400,0	0,010	1,000	1,000	1,000	0,080	7,300	7,300	3,920	∞	0,500	0,860	∞

TABELA 5.3 - DADOS DOS REGULADORES DE TENSÃO DOS GERADORES SÍNCRONOS

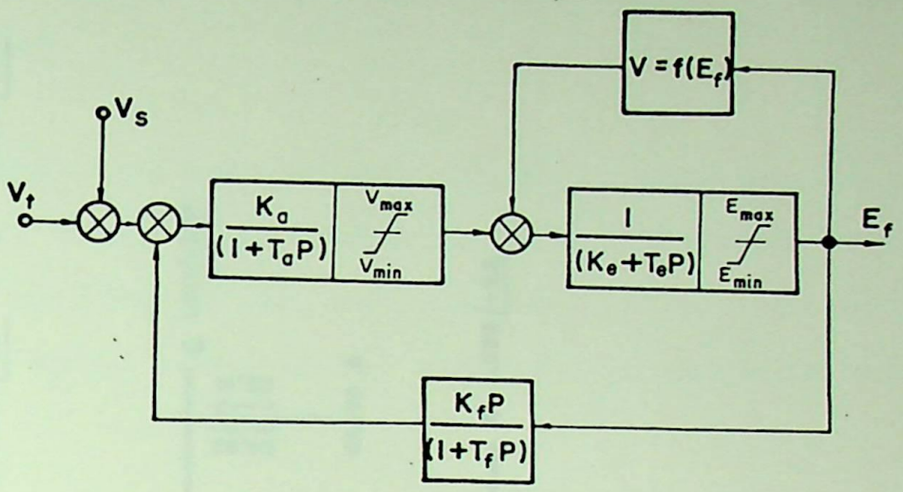


Figura 5.2 - Diagrama de Blocos de Reguladores de Tensão

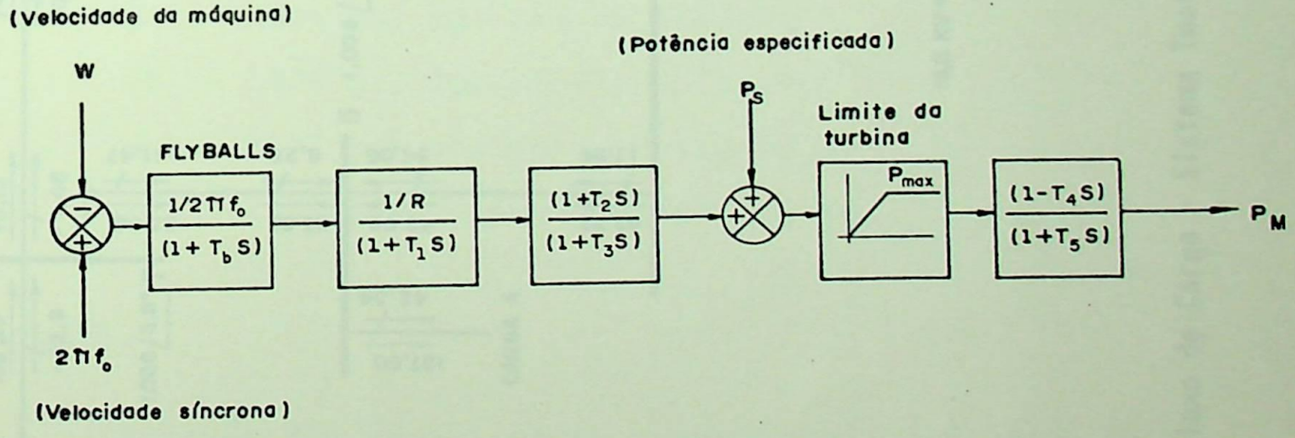


Figura 5.3 - Diagrama de Blocos dos Reguladores de Velocidade

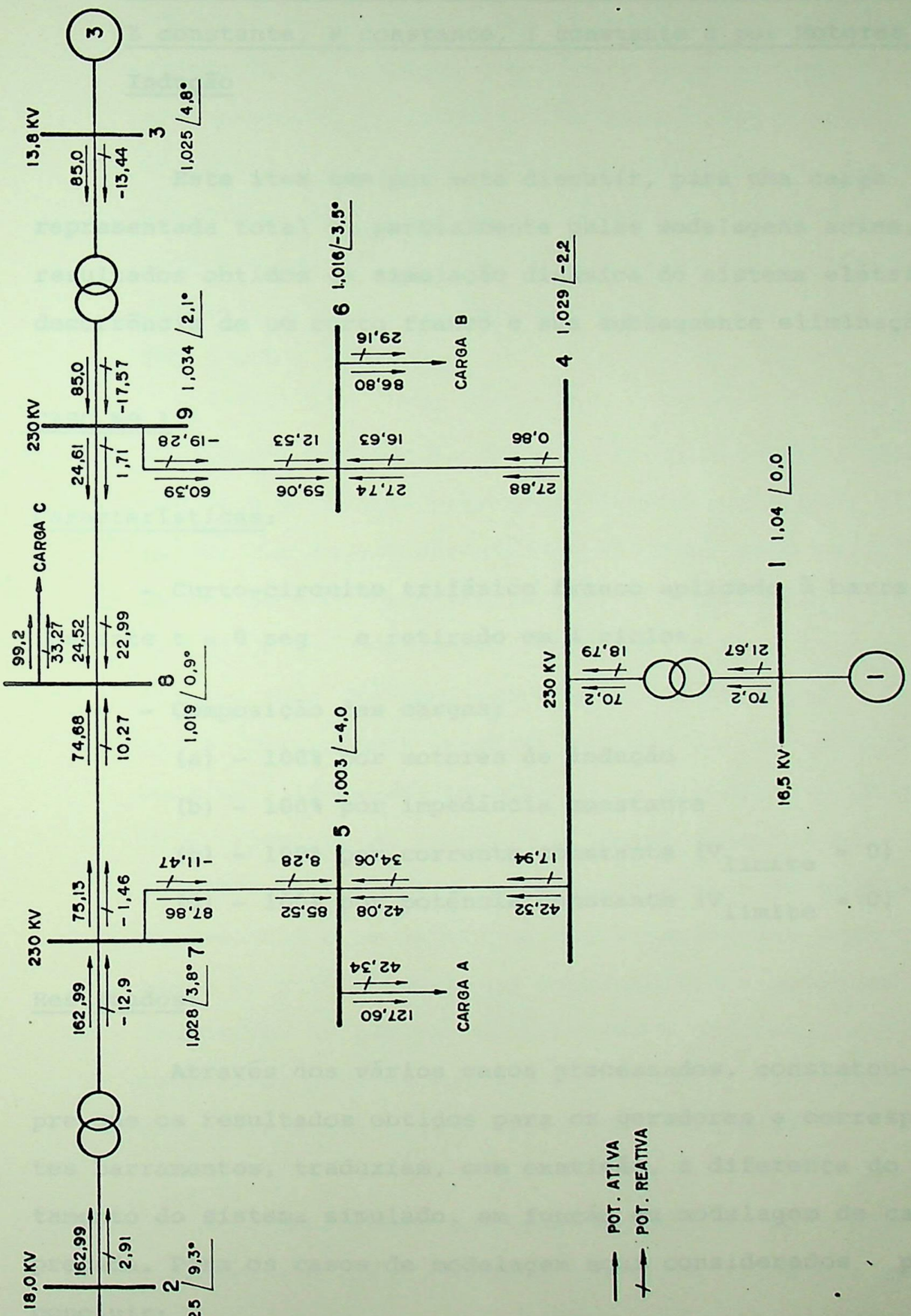


Figura 5.4 - Fluxo de Carga - Sistema Teste 1

5.3 - Estudos Processados para Modelagens de Carga através de Z constante, P constante, I constante e por Motores de Indução

Este item tem por meta discutir, para uma carga P+jQ, representada total ou parcialmente pelas modelagens acima, os resultados obtidos da simulação dinâmica do sistema elétrico, em decorrência de um curto franco e sua subsequente eliminação.

CASO Nº 1

Características:

- Curto-circuito trifásico franco aplicado à barra 7 no instante t = 0 seg e retirado em 4 ciclos.

- Composição das cargas:
  - (a) - 100% por motores de indução
  - (b) - 100% por impedância constante
  - (c) - 100% por corrente constante ($V_{limite} = 0$)
  - (d) - 100% por potência constante ($V_{limite} = 0$)

Resultados:

Através dos vários casos processados, constatou-se sempre que os resultados obtidos para os geradores e correspondentes barramentos, traduziam, com exatidão, a diferença do comportamento do sistema simulado, em função da modelagem de carga empregada. Para os casos de modelagem aqui considerados pode-se concluir:

(i) Motores de indução: sua ação, em consequência do curto, conforme se esperaria, foi de prolongar o período de recuperação do sistema, o que teria ocorrido devido ao próprio processo de reaceleração dos motores. Devido ao grande impacto nestes instantes, as oscilações de ângulo de potência, embora maiores em magnitude, possuem frequências menores que para os outros casos considerados. Na figura 5.5 tem-se os resultados de $\delta = f(t)$ para o gerador 2 até t = 3,0 seg.

(ii) Impedância constante: tendo em vista que esta modelagem tem como principal propriedade aceitar qualquer alteração brusca das características do sistema, seus resultados diferem, de modo marcante, daqueles anteriores, pela maneira rápida com que tensões, correntes, etc, retornam à valores mais próximos aos finais. Constata-se, também, que a consequência imediata disto é que as oscilações, embora mais reduzidas em amplitude, possuem frequências mais elevadas. Na figura 5.5 tem-se evidenciado a diferença entre os resultados para os ângulos da máquina 2 e, na figura 5.6, a diferença entre as tensões para o barramento 8, utilizando-se as representações dinâmica e Z constante. As figuras mostram pouca diferença entre os resultados para os ângulos de potência, enquanto que a diferença entre tensões já é bem acentuada.

(iii) Corrente constante: conforme já abordado no capítulo 2, a literatura clássica sobre o assunto prevê uma aproximação entre os resultados obtidos pela modelagem da carga por corrente ou impedância constante. Isto pode ser obser

vado da figura 5.5, que apresenta os resultados de $\delta = (t)$ para o gerador 2.

(iv) Potência constante: não houve convergência deste caso. Observa-se, porém, que a utilização deste tipo de modelagem de carga, associada aos baixos valores de tensão durante o curto, resultariam em correntes de carga extremamente elevadas durante o distúrbio, o que levou a falha de convergência. Conforme será discutido posteriormente, a utilização de um limite mínimo para a tensão e que resulte em uma alteração do tipo de representação de carga, foi suficiente para que uma solução fosse atingida. Este fato evidencia que a utilização de potência ou mesmo corrente constante, para pequenos níveis de tensão, constituem formas inadequadas de modelagens de cargas.

CASO Nº 2

Características:

- curto circuito trifásico franco aplicado à barra 7 em t = 0 e eliminado em 4 ciclos.

- composição das cargas:
  (a) 100% por corrente constante (V_{limite} = 0,5 pu)
  (b) 100% por potência constante (V_{limite} = 0,5 pu)

Resultados:

O propósito deste caso é o de ilustrar o efeito do limite de tensão na mudança da modelagem e com isto concluir sobre convergência e outros pontos. Foram então processados vários

casos, empregando diferentes níveis para a mudança da modelagem, e, optou-se por uma tensão limite de 0,5 pu apresentação e discussão dos resultados. Naturalmente, isto significa que, para $V \geq 0,5$ pu, uma dada carga seria representada por I ou P constante, e, para $V < 0,5$ pu esta mesma carga seria modelada por Z constante. Além do limite de 0,5 pu, outros valores foram também empregados. Os resultados obtidos, porém, na faixa de $0,5 < V_{limite} < 0,8$ foram bastante semelhantes, e, não serão apresentados aqui. Para o caso considerado, pode-se concluir que:

(i) Corrente constante

Seus resultados são praticamente coincidentes com o caso anterior, e, são apresentados na figura 5.5.

Quanto a grande aproximação entre os resultados obtidos para o ângulo , destaca-se que, para o caso, o nível do distúrbio causado pelo curto-circuito levou as tensões para valores tais que automaticamente, durante a permanência do curto, apenas a modelagem por Z constante foi utilizada. Após a eliminação da falta, a súbita recuperação das tensões para as representações Z, P e I constantes, levou a pontos de operação em que praticamente, estas três modelagens levam a resultados muito próximos. É conveniente ressaltar que estes comentários e conclusões são aplicáveis às modelagens por I e P constantes.

(ii) Potência constante

Como principal característica, para este caso, destaca-se o fato de se obter convergência, que não foi atingida anteriormente. Observou-se ainda, através de testes, que com um limite de tensão igual a zero, a utilização, mesmo que de uma fração mínima da carga, modelada por potência constante, o programa não apresentou convergência.

Quanto aos resultados obtidos, comparando-os com as demais formas de modelagem, pôde-se concluir que os mesmos se assemelharam mais com aqueles associados a corrente ou impedância constante, como ilustrado na figura 5.5.

Através de casos processados verificou-se também a aceleração no processo de convergência a medida que se aumentou o valor limite da tensão.

Além do sistema elétrico considerado, procedeu-se a vários outros testes, de forma a concluir sobre outros casos estudados. Nestes, novamente observou-se que os comentários acima descritos continuaram integralmente válidos.

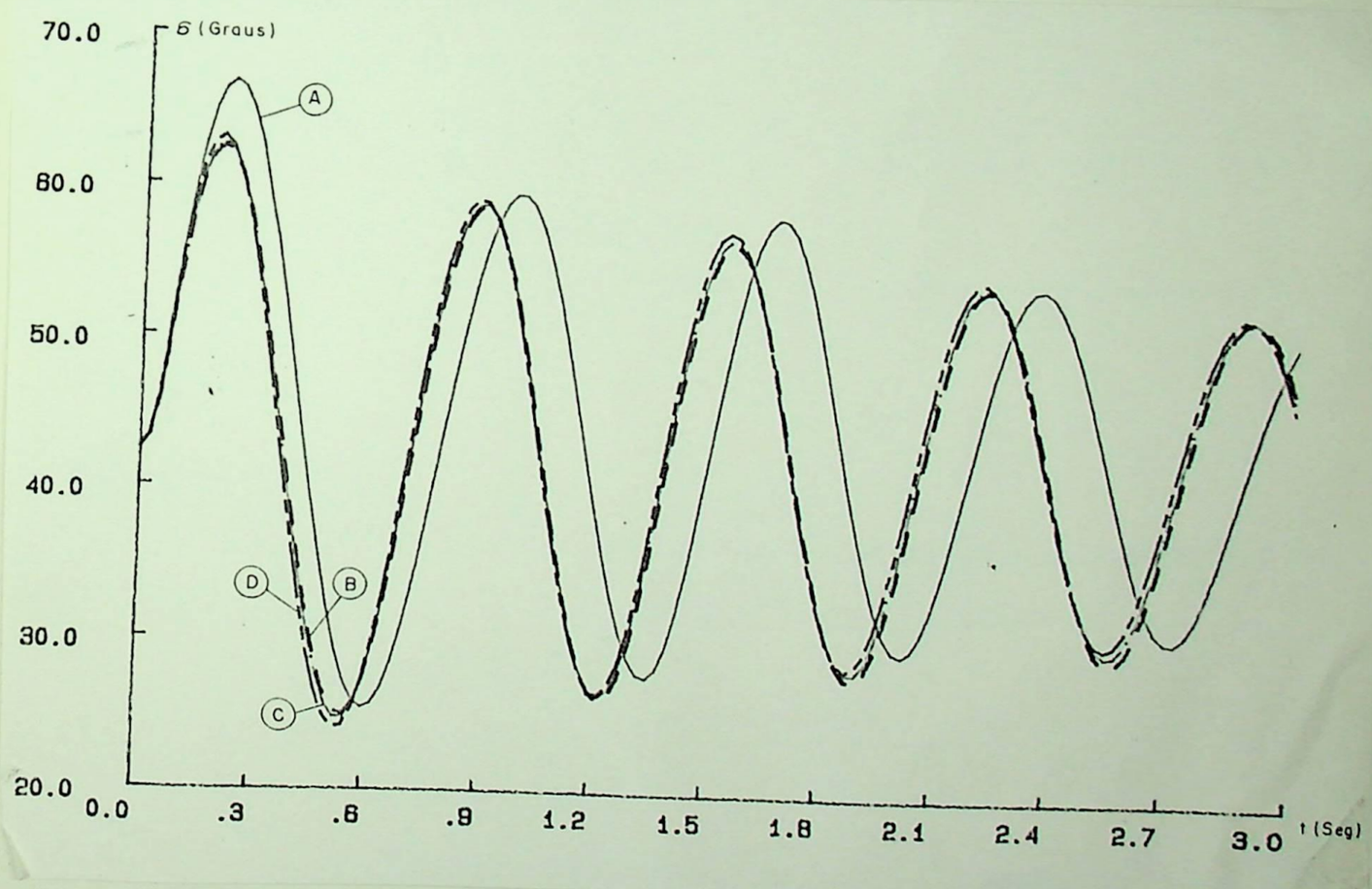


Figura 5.5 - $\delta = f(t)$ para o gerador 2.

A - Dinâmica B - Impedância Constante

C - Corrente Constante D - Potência Constante

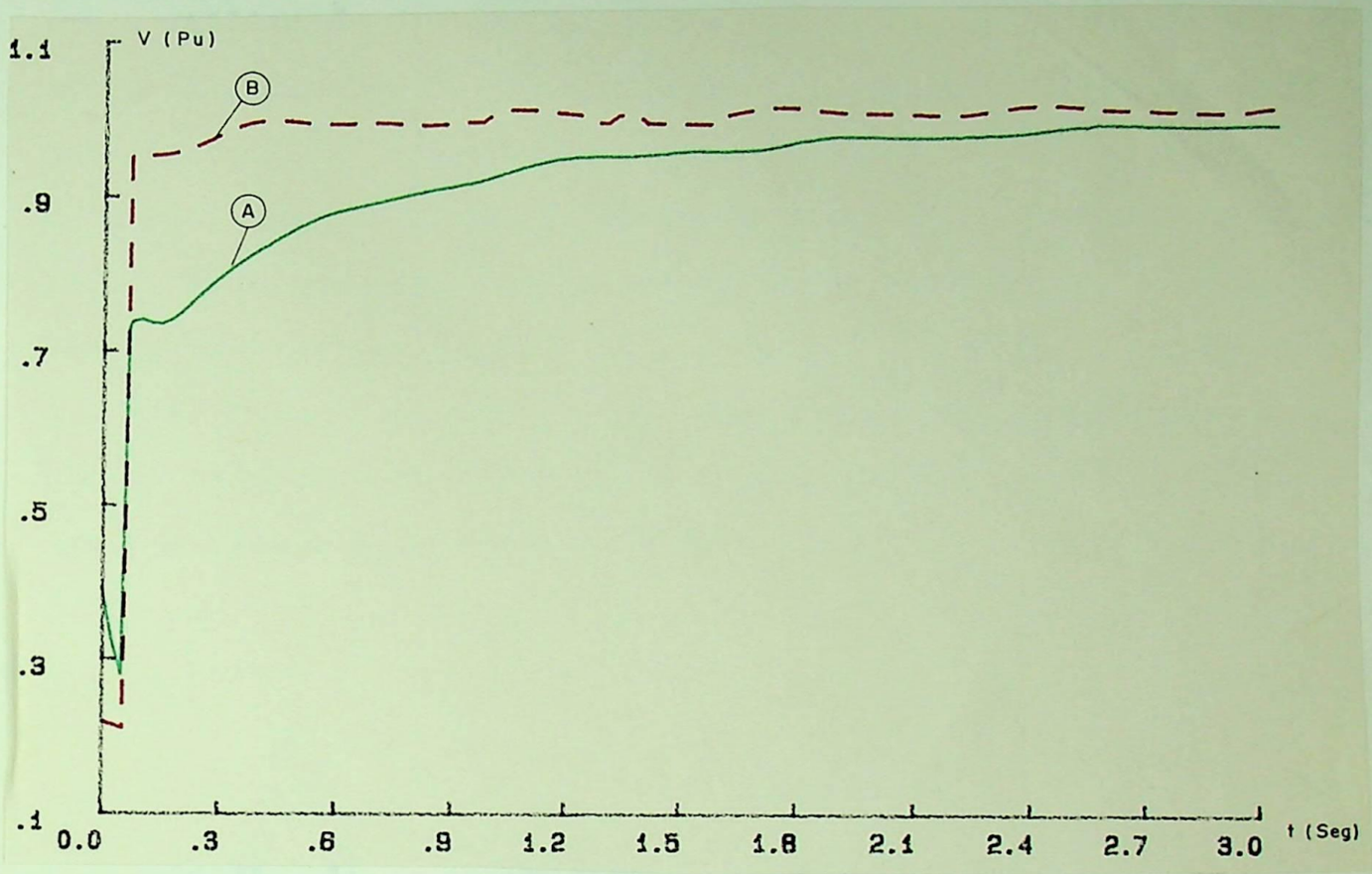


Figura 5.6 - V = f(t) para a barra 8
A - Dinâmica B - Impedância Constante

CASO Nº 3

Características:

- curto circuito através de impedância, aplicado à barra 7, em t = 0 e eliminado em 21 ciclos.
- composição das cargas:
  - (a) 100% por motores de indução
  - (b) 100% por impedância constante
  - (c) 100% por corrente constante (V_{limite} = 0,5 pu)
  - (d) 100% por potência constante (V_{limite} = 0,5 pu)

Resultados:

Novamente foram processados os quatro casos, porém com duas características marcantemente diferentes. A primeira deve-

-se a utilização de uma impedância de falta, cujo efeito é de garantir, durante a permanência desta, que as tensões não sejam reduzidas a níveis tais que alterem as modelagens das cargas para Z constante. A segunda refere-se a maior permanência da falta, de modo que, mais notóriamente possa se observar a proximação ou não dos resultados. Na figura 5.7 tem-se novamente, $\delta = f(t)$ para o gerador 2, onde percebe-se maior divergência entre os resultados obtidos para as quatro modelagens investigadas. Na figura 5.8 tem-se as tensões $V = f(t)$ para a barra 8.

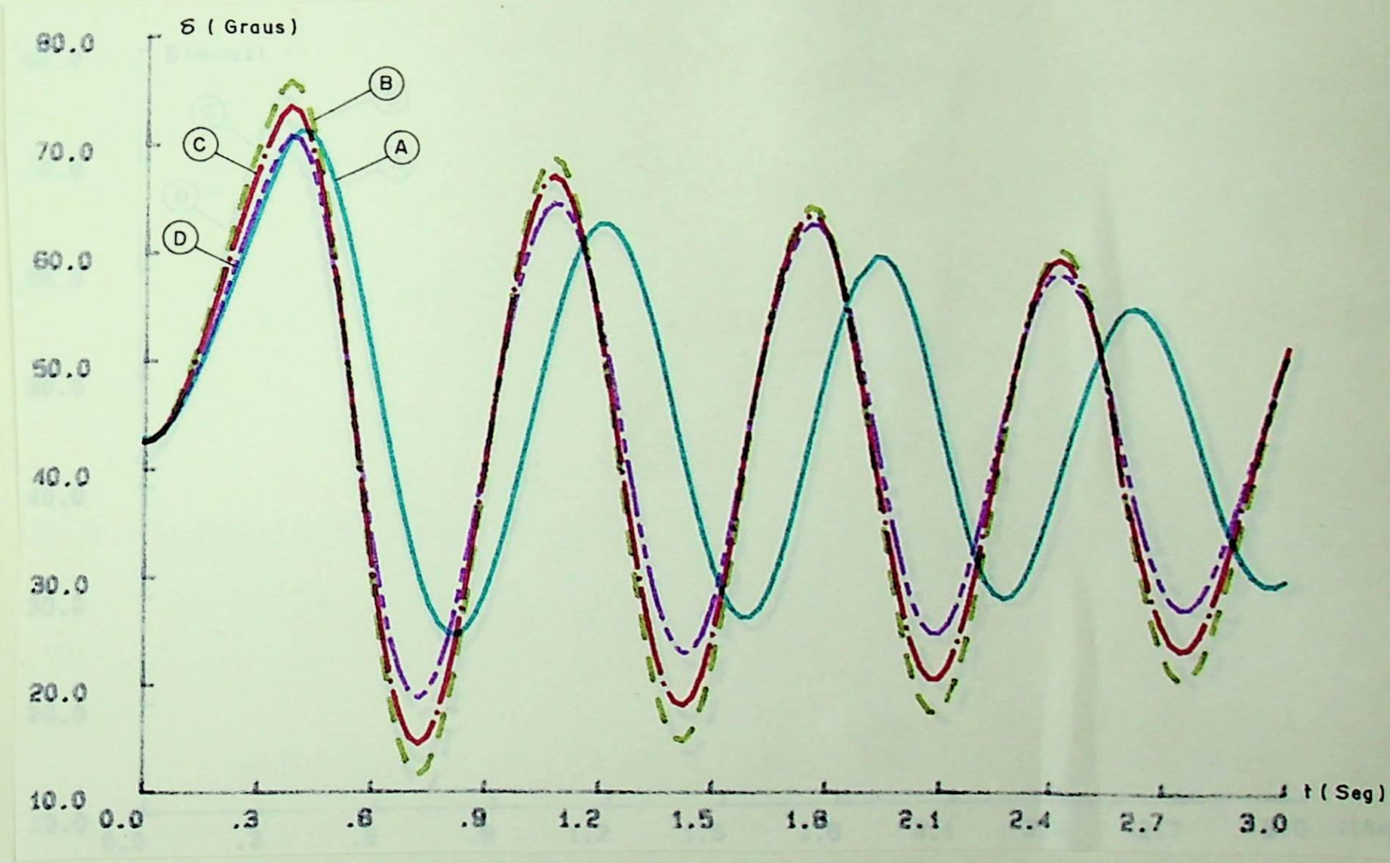


Figura 5.7 - $\delta = f(t)$ para o gerador 2.

A - Dinâmica
B - Impedância Constante
C - Corrente Constante
D - Potência Constante

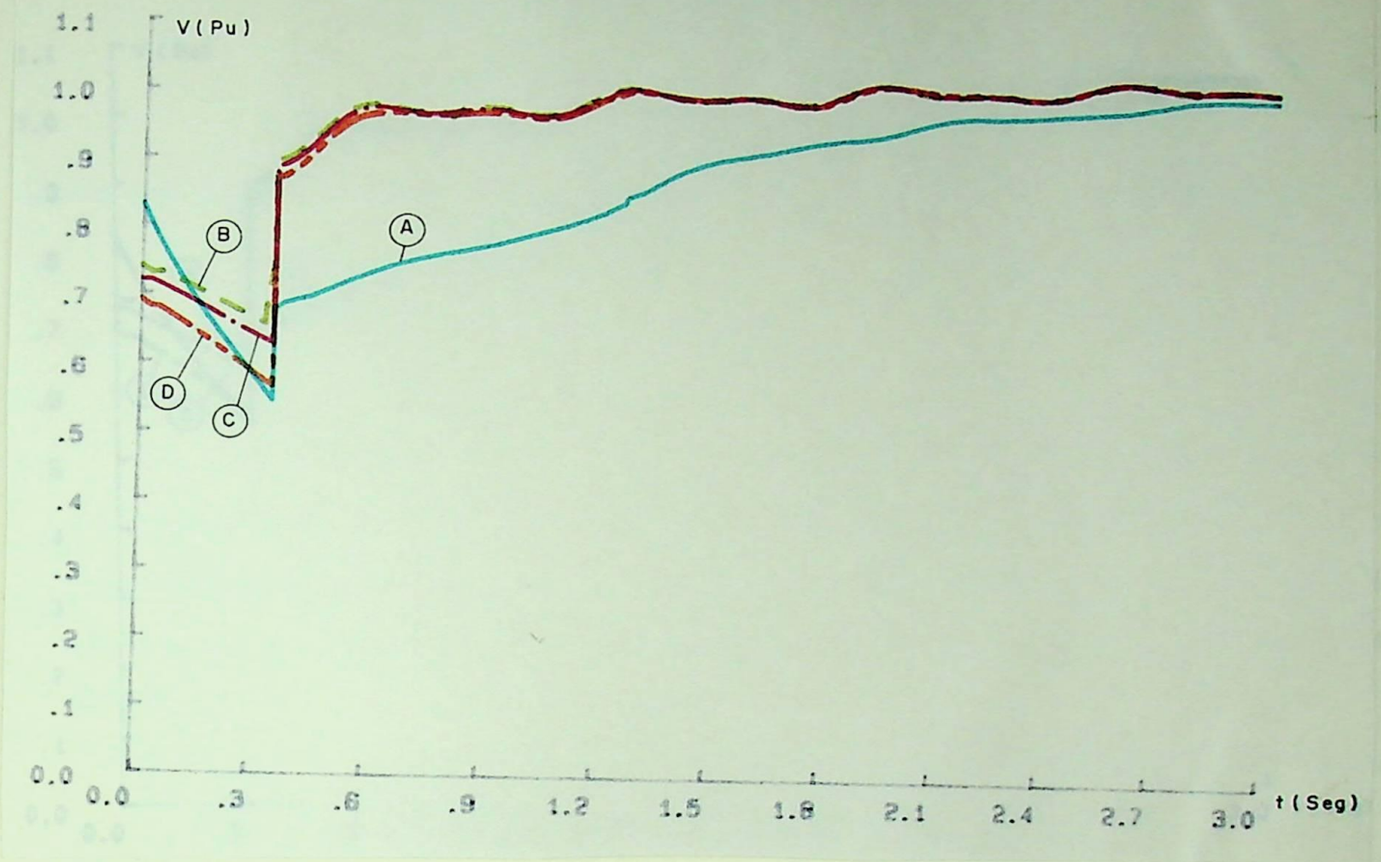


Figura 5.8 - V = f(t) para a barra 8.

A - Dinâmica B - Impedância Constante

C - Corrente Constante D - Potência Constante

5.4 - Estudos Processados Utilizando Modelagem Dinâmica de Conversores e outras Representações

Objetivando comprovar a validade e a importância da consideração específica de grandes cargas conversoras, utilizou-se de um sistema elétrico conforme dado pelo diagrama unifilar da figura 5.9. Neste sistema a carga de 84,08 MW + j 34,07 MAVr da barra 10, foi admitida como sendo constituida puramente por uma instalação retificadora. Tal instalação apresenta as características fornecidas a seguir.

5.4.1 - Diagrama Unifilar

A figura 5.9 ilustra o sistema teste utilizado e, fornece os valores das impedâncias das linhas e transformadores em pu.

5.4.2 - Parâmetros do Sistema

As tabelas 5.1 a 5.3 fornecem os valores dos parâmetros das máquinas síncronas, reguladores de velocidade e tensão. Os reguladores de tensão e velocidade utilizados (Figuras 5.2 e 5.3) correspondem aos modelos propostos pelas referências [16] e [17], respectivamente.

5.4.3 - Resultados do Fluxo de Carga para a Situação Ilustrada no Unifilar

O resultado do fluxo de carga do sistema, é apresentado na figura 5.10.

Naturalmente, para atender a estes requisitos, o conversor deve estar operando dentro de certas condições. Para que estas condições sejam conhecidas deve-se procurar um estudo operacional do retificador em regime permanente, o que é realizado pelo programa, e que levou aos resultados apresentados nas tabelas 5.4, e 5.5.

TENS. (VD) kV	COR. (ID) kA	ÂNGULO ALFA (GR)	ÂNGULO MI (GR)
2.943	28.571	17.966	7.643

Tabela 5.4

TENSÃO DA BARRA P.U.	ÂNGULO	COR. (ABSOR) P.U.	POT. (ATIV) P.U.	POT (REAT) P.U.
0.979	-4.722	0.925	0.841	0.340

Tabela 5.5

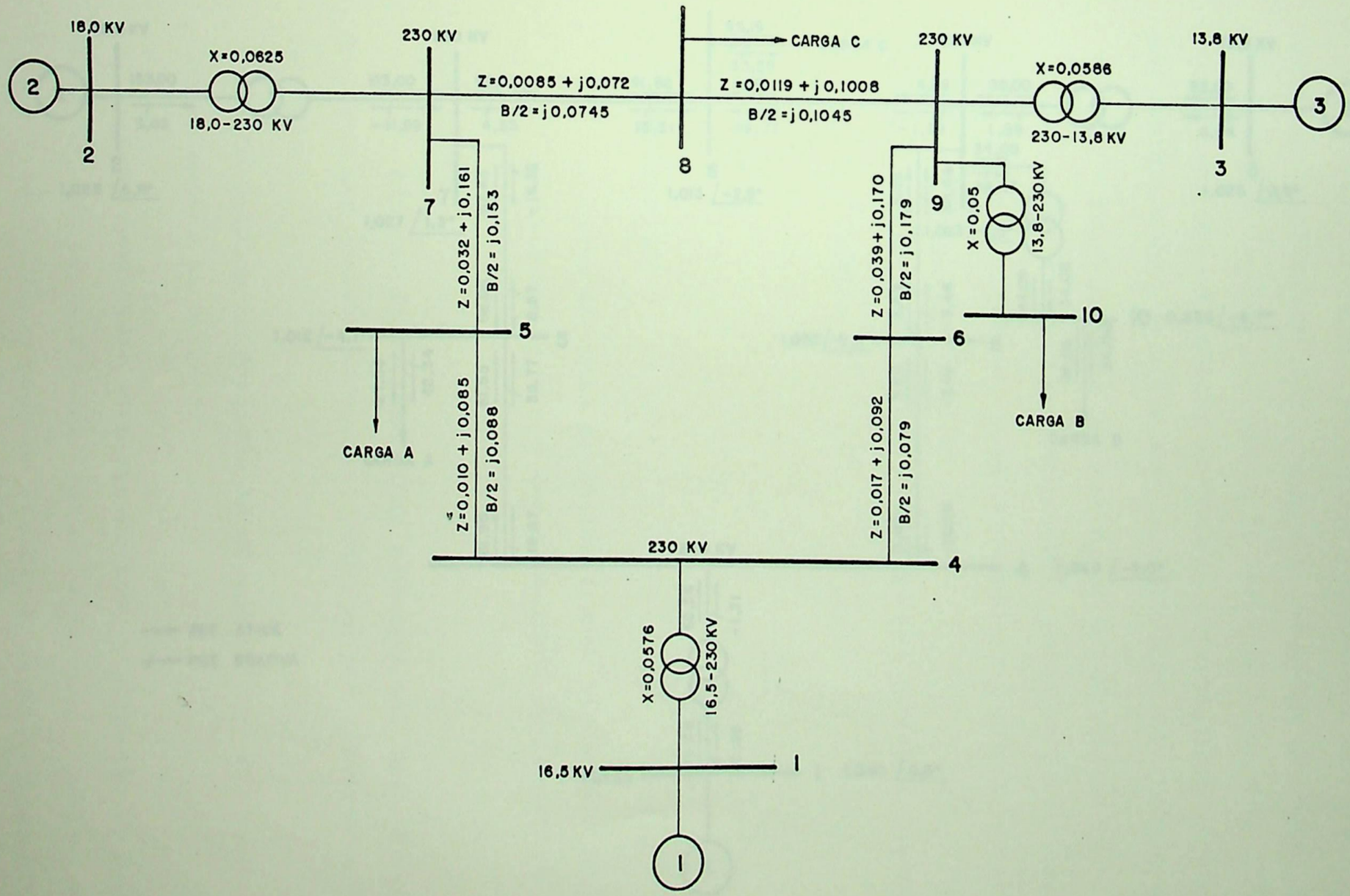


Figura 5.9 - Diagrama Unifilar - Sistema Teste 2

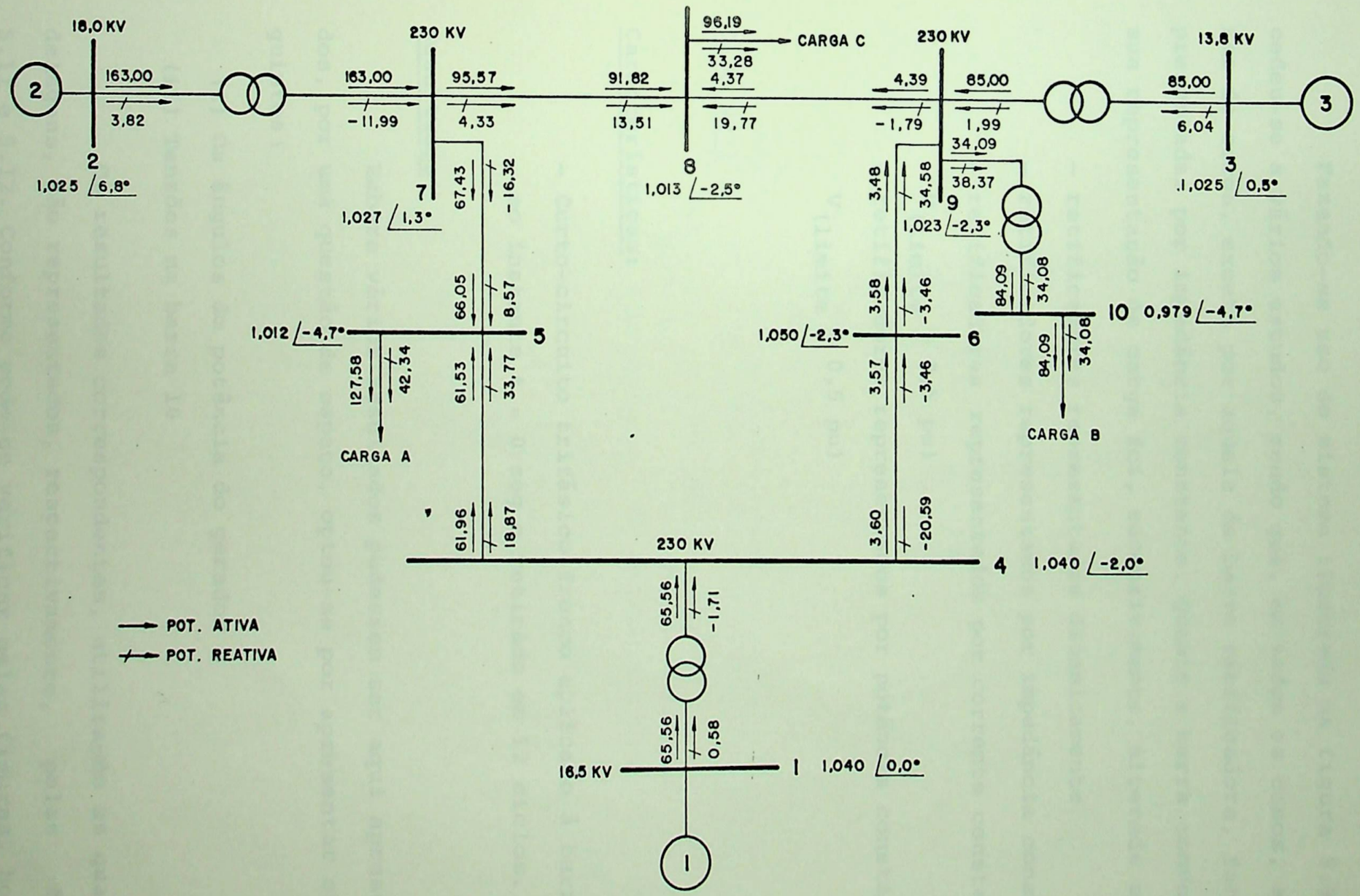


Figura 5.10 - Fluxo de carga - Sistema teste 2

Fazendo-se uso do sistema ilustrado na figura 5.9 procedeu-se a vários estudos, sendo que, em todos os casos, as barras de carga, exceto por aquela da barra retificadora, foram representadas por impedância constante. Quanto a barra conversora, sua representação de carga foi, sucessivamente, alterada para:

- retificadores representados dinamicamente
- retificadores representados por impedância constante
- retificadores representados por corrente constante $V_{(limite} = 0,5$ pu)
- retificadores representados por potência constante $V_{(limite} = 0,5$ pu)

CASO Nº 1

Características:

- Curto-circuito trifásico franco aplicado à barra 7 no instante t = 0 seg e retirado em 12 ciclos.

Resultados:

Embora vários resultados pudessem ser aqui apresentados, por uma questão de espaço, optou-se por apresentar os seguintes:

(i) Os ângulos de potência do gerador 3

(ii) Tensões na barra 10

Os resultados correspondentes, utilizando as quatro modelagens, são representados, respectivamente, pelas figuras 5.11 e 5.12. Conforme pode-se verificar pelas figuras, houve relativamente pouca influência do tipo de modelagem, nos resultados obtidos.

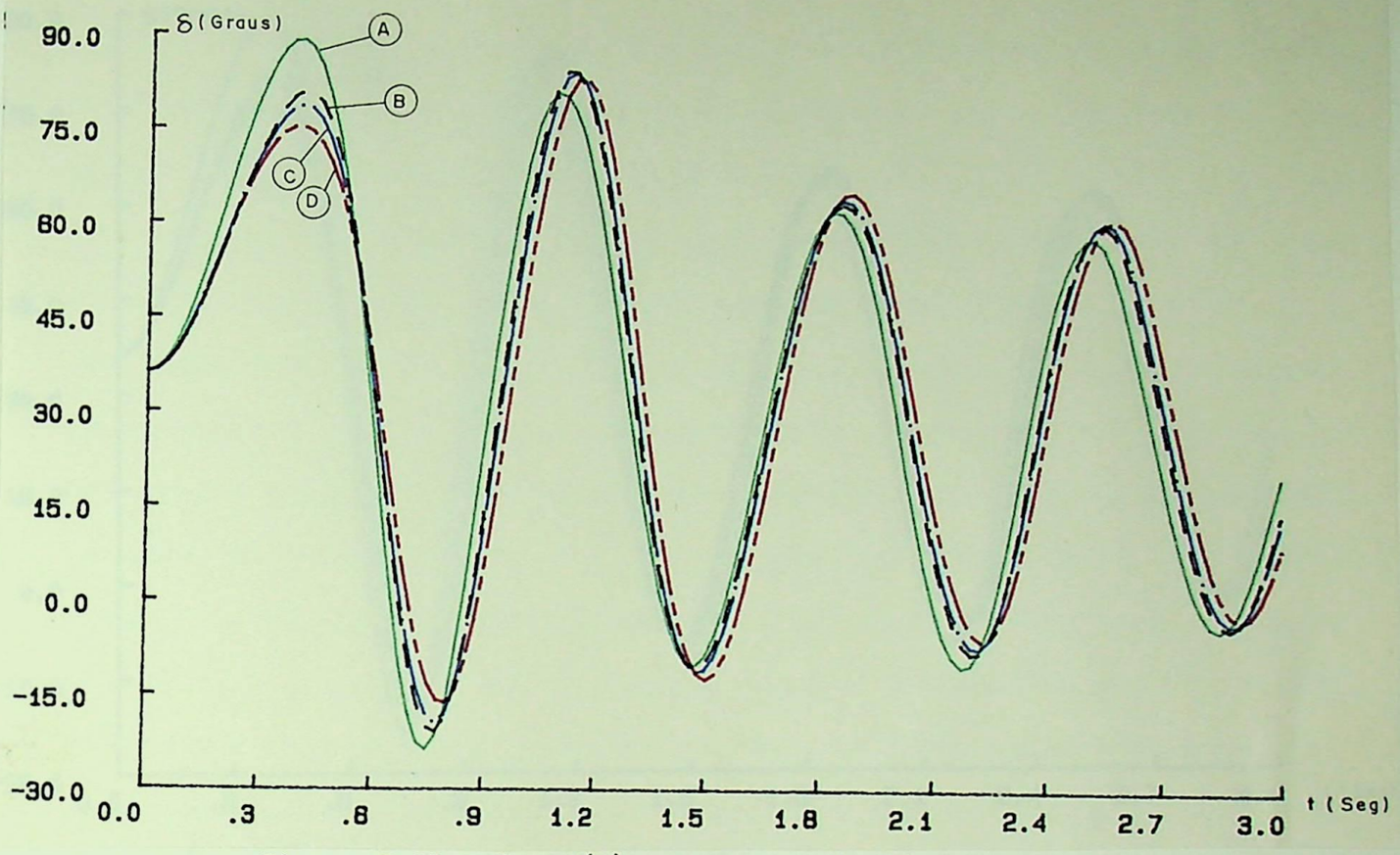


Figura 5.11 - $\delta = f(t)$ para o gerador 3.
A - Dinâmica B - Impedância Constante
C - Corrente Constante D - Potência Constante

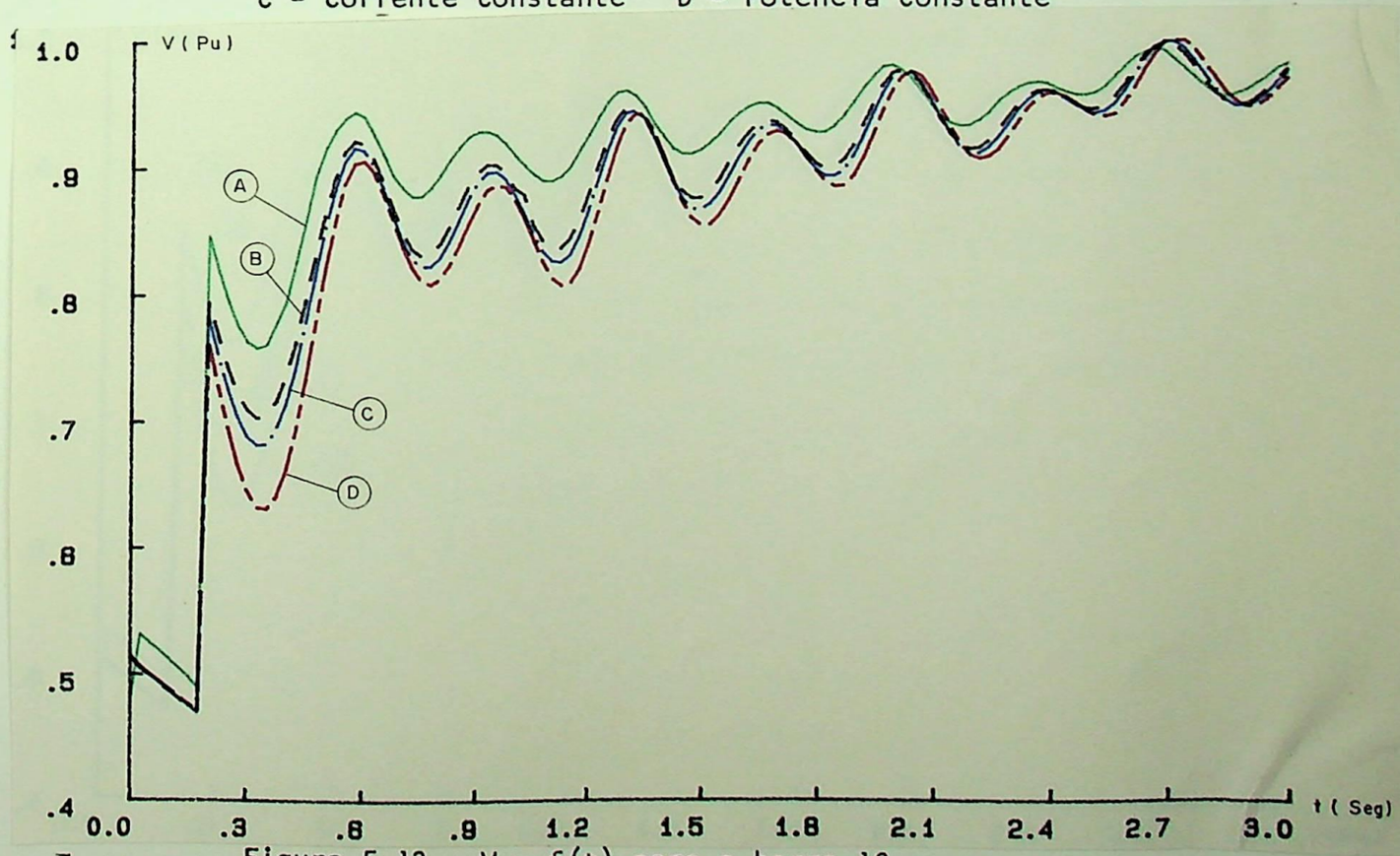


Figura 5.12 - $V = f(t)$ para a barra 10
A - Dinâmica B - Impedância Constante
C - Corrente Constante D - Potência Constante

De fato, no início do processo percebe-se uma divergência dos valores atingidos para os primeiros picos do ângulo δ, sendo registrados, respectivamente, 90^{o}, 80^{o}, 78^{o} e 75^{o} para as representações: dinâmica, Z, I e P constantes. Após este primeiro pico os resultados se aproximaram bastante. A razão disto é que após ter ocorrido a recuperação das tensões as modelagens se aproximam muito. Esta conclusão tem, na verdade, se tornado uma regra para todos os casos processados, ou seja, tão logo as tensões se aproximam de $V \geq 0,9$ pu que, as modelagens conduzem a resultados muito semelhantes. De qualquer forma verificou-se claramente a relevância do método para a avaliação dos primeiros picos. A razão das oscilações de $\delta = f(t)$ serem maiores para a modelagem dinâmica, está associada a existência da f.c.e.m constante. Se a tensão da barra da carga retificadora descresce a valores inferiores à f.c.e.m, toda a carga desta barra é eliminada. Para as demais modelagens, sabe-se que a carga da barra é função da tensão nesta barra, onde para modelagens por Z constante a carga varia com o quadrado da tensão, por I constante varia proporcionalmente às variações de tensão e por P constante a carga é invariável com a tensão. Assim, enquanto que no primeiro caso toda a carga é desconectada da barra, as outras três modelagens ainda garantem um consumo de potência, embora que com valor reduzido.

CASO Nº 2

Características:

Curto-circuito através de impedância, aplicado à barra 7, no instante t = 0 seg e eliminado em 24 ciclos.

Resultados:

O caso aqui considerado destaca-se do anterior pela maior duração do distúrbio e pelos níveis de redução registrados pelas tensões que não atingem, em nenhuma circunstância, valores inferiores a 0,5 pu. Com isto, garante-se que durante a permanência do distúrbio, as modelagens são mantidas de forma inalterada. Os ângulos δ para o gerador 3 e as tensões para a barra 10 são dados, para as quatro formas de modelagem, pelas figuras 5.13 e 5.14. O que se pode observar é uma maior divergência para os valores iniciais de δ e V, como era de se esperar. As razões destas diferenças foram exploradas anteriormente.

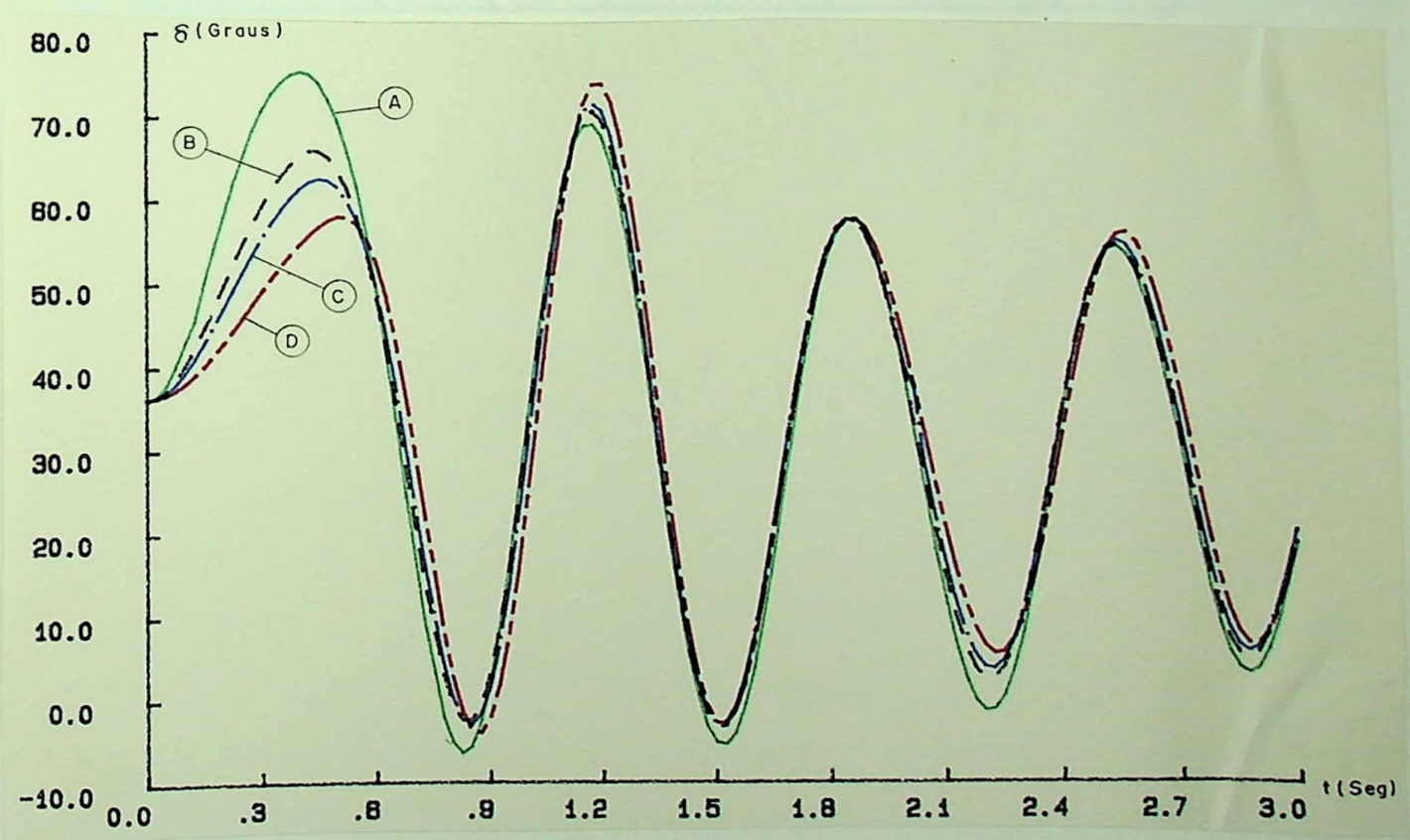


Figura 5.13 - $\delta = f(t)$ para o gerador 3.

A - Dinâmica B - Impedância Constante

C - Corrente Constante D - Potência Constante

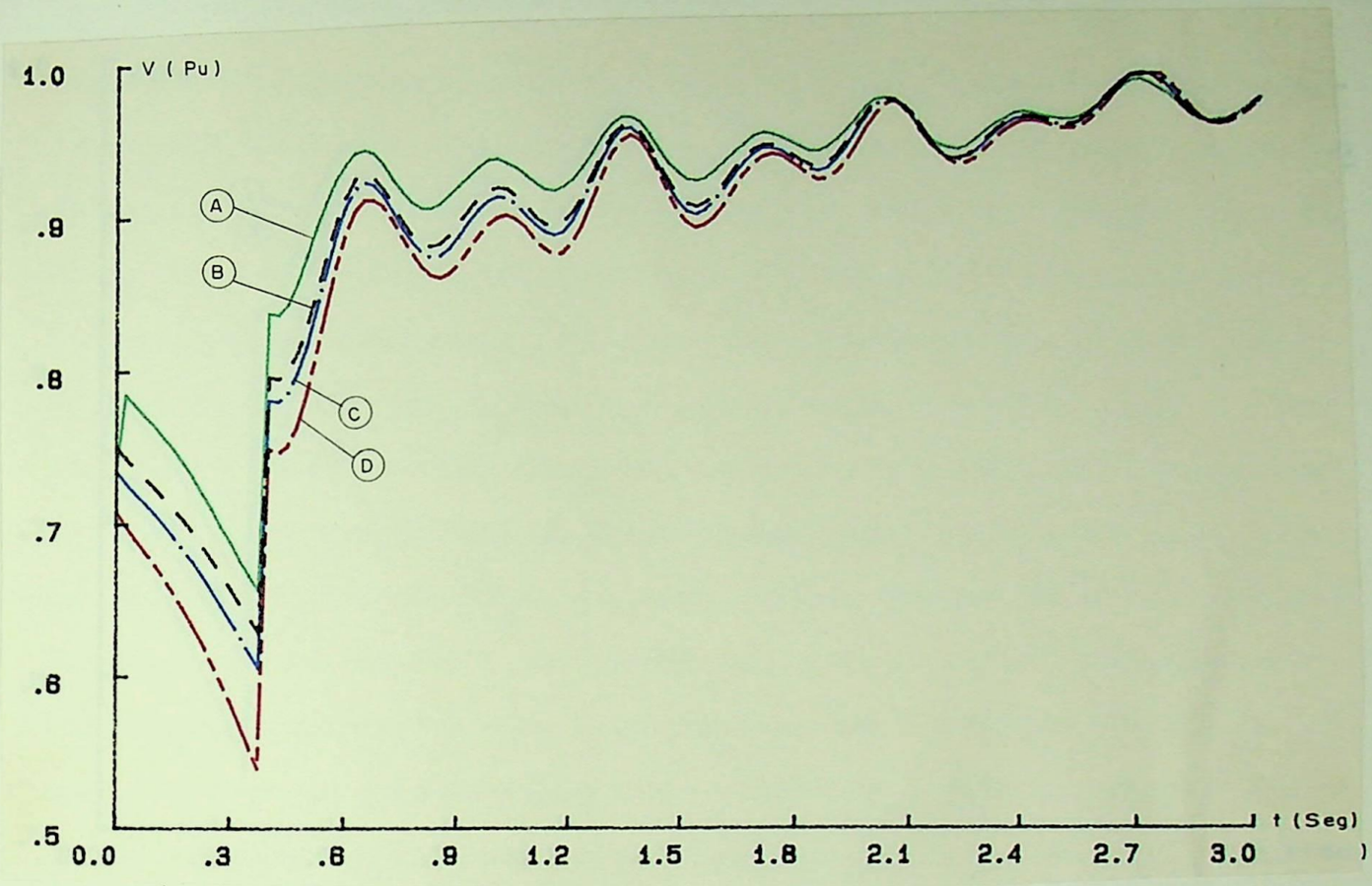


Figura 5.14 - V = f(t) para a barra 10.
A - Dinâmica B - Impedância Constante
C - Corrente Constante D - Potência Constante

5.5 - Conclusões:

Quanto a primeira parte dos resultados, isto é, a comparação entre as modelagens por: motores de indução (dinâmicamente representados), impedância constante, potência constante e corrente constante, verificou-se sérios problemas de convergência para as modelagens por potência e corrente constantes quando da ocorrência de grandes quedas de tensão. A proposição de uma tensão limite abaixo da qual se modifica estas formas de modelagem para impedância constante mostrou-se efetiva e os vários casos estudados convergiram satisfatoriamente. Relativamente aos ângulos de potência, e outras variáveis, não se constatou diferenças muito acentuadas entre os resultados. Embora isto tenha ocorrido para estas variáveis para o sistema sob estudo, não se pode afirmar genéricamente que as modelagens não

afetam significativamente os resultados. De fato, casos processados para outras configurações, como é o caso daquele a ser considerado no capítulo 6 evidenciaram que uma regra geral dificilmente se poderia estabelecer a priori. É importante ainda ressalvar que os casos aqui discutidos, embora tenham considerado a presença de reguladores de velocidade e tensão, não incluiram a ação amortecedora nos geradores. A inclusão deste efeito, conforme computacionalmente comprovado, veio a reduzir ainda mais a diferença entre os resultados. Quanto as potências reativas, tensões de barra e frequência de oscilação, pode-se concluir sobre significantes dependências da modelagem da carga e dos resultados atingidos. O fato é marcante,principalmente quando da comparação das modelagens por motores e as outras, quando se percebe taxas de crescimento e comportamento dinâmico completamente distintos. Entre as representações por Z constante, I constante, P constante tem-se a considerar fundamentalmente oscilações mais rápidas para as duas últimas. Também, a alteração de P e I constante para I constante, resultou em que a medida que se eleva V_{limite} em três modelagens ficam bastante próximas.

Com relação a modelagem dinâmica do sistema conversor e sua comparação com os outros tipos, pode-se, para o caso aqui considerado, perceber uma divergência bastante pequena entre os resultados. Isto foi ocasionado pelo grande porte do sistema e também em face ao acoplamento entre geradores e carga. Também, percebeu-se que no início do distúrbio, e, principalmente durante a permanência da falta e nos instantes subsequentes a sua diminuição, as modelagens influem consideravelmente sobre os resultados atingidos. Posteriormente a estes momentos a aproximação entre as respostas obtidas foi bastante grande.

Objetivando concluir sobre o comportamento de outros sistemas, com características próprias diferentes dos utiliza - dos neste capítulo, procedeu-se em seguida a testar com arran - jos industriais típicos. Devido as particularidades destes , optou-se por apresentar os correspondentes resultados num capí- tulo a parte, como será discutido no capítulo 6 a seguir.

CAPÍTULO VI

ESTUDOS PROCESSADOS EM UM SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL

6.1 - Introdução

Conforme destacado no capítulo precedente, procurou-se, neste trabalho, concluir sobre o desempenho dinâmico de um sistema elétrico com suas cargas modeladas por motores de indução, impedância constante, corrente constante e potência constante. Além deste aspecto, considerou-se também a importância da representação da carga retificadora e da dependência com o sistema em estudo. Assim, neste capítulo considera-se um sistema elétrico para o qual estipulou-se uma certa concentração de cargas conversoras em uma de suas barras. Foram então processados vários estudos empregando-se, para a parte da carga associada a conversores, as modelagens: dinâmica, impedância constante, corrente constante e potência constante. Procedendo deste modo foi então possível estabelecer termos comparativos entre os resultados atingidos, os quais, segundo será verificado oportunamente, identificam diferenças substanciais, de acordo com o modelo empregado. Destaca-se ainda que várias outras variáveis podem vir a interferir nos resultados obtidos. Dentre elas destaca-se sobremaneira o efeito do amortecimento, que a medida que aumenta em valor, aproxima mais os resultados obtidos, qualquer que seja a representação de cargas empregada. Em vista disto, por uma questão didática e da ênfase aos objetivos propostos por este trabalho, optou-se por um fator de amortecimento nulo para os estudos aqui discutidos. De fato, este

mesmo procedimento foi também empregado para as análises feitas no Capítulo V.

Além do aspecto relacionado a modelagem da instalação conversora, o caso aqui discutido serve também como base para a análise comparativa entre modelagens de carga por Z, P e I constantes e por motores de indução.

6.2 - Características do Sistema Simulado

6.2.1 - Diagrama Unifilar

A figura 6.1 ilustra o sistema teste utilizado, e, fornece os valores das impedâncias das linhas e transformadores em pu.

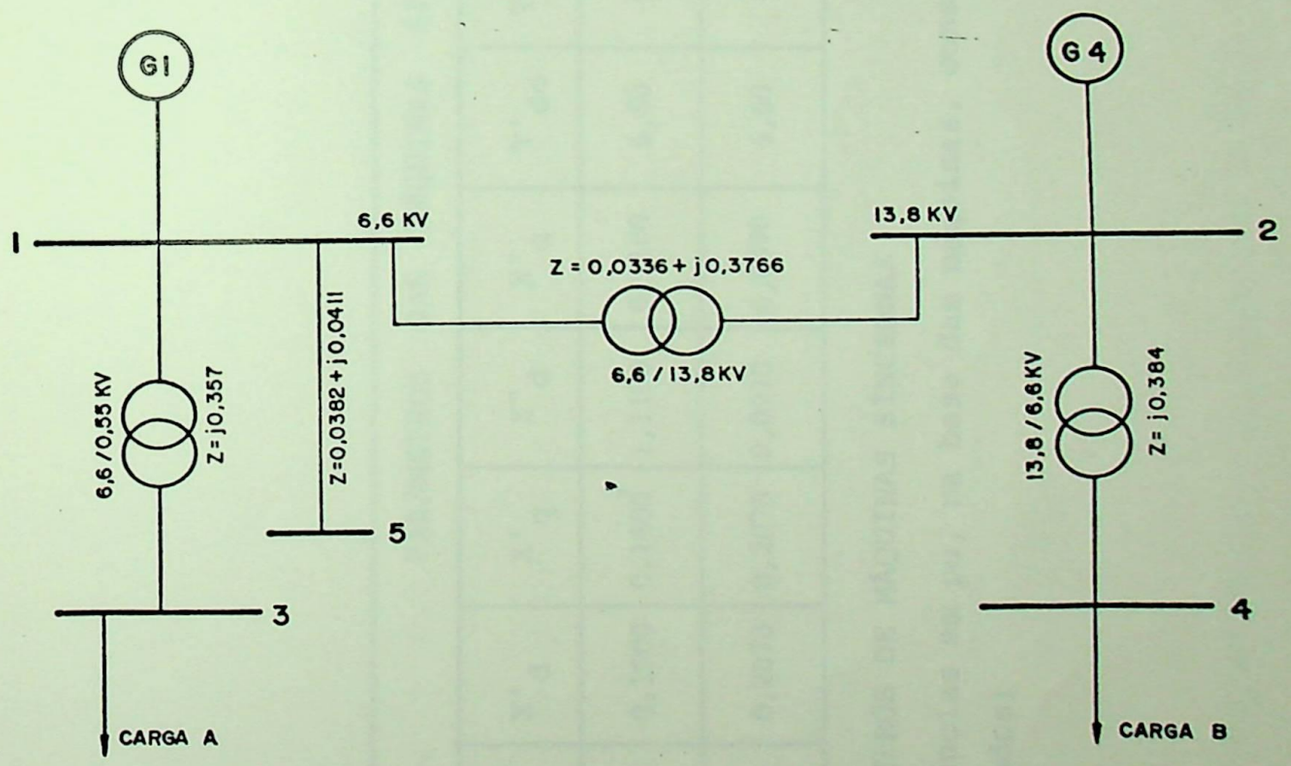


Figura 6.1 - Diagrama Unifilar - Sistema teste 3

6.2.2 - Parâmetros do Sistema

As tabelas 6.1 e 6.2 fornecem os valores dos parâmetros das máquinas síncronas e reguladores de tensão. O regulador de tensão utilizado (figura 6.2) corresponde a um dos modelos propostos pelo IEEE [16].

Gera-dores Nº	PARÂMETROS DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS											
	X_d	X_q	X'_d	X'_q	X''_d	X''_q	T'_{do}	T'_{qo}	T''_{do}	T''_{qo}	CONST. INÉRCIA	FATOR SATURAÇÃO
1	1,4500	1,4500	0,1900	0,1900	1,1100	0,1100	6,60	0,0	0,0350	0,0350	5,680	1,200
2	1,5820	1,5820	0,2070	0,2070	0,0970	0,0970	6,60	0,0	0,0680	0,0680	0,950	1,200

TABELA 6.1 - PARÂMETROS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

(Reatâncias em pu, na base das máquinas, constantes de tempo e de inércia em segundos)

Reguladores Nº	DADOS DOS REGULADORES DE TENSÃO								
	$K_{a(pu)}$	$T_{a(s)}$	$K_{F(pu)}$	$T_{F(s)}$	$E_{MAX(pu)}$	$E_{MIN(pu)}$	$D_{MAX(PU/s)}$	K_e	$T_{e(s)}$
1	0,05	20,0	0,0	0,0	3,120	∞	∞	1,00	2,019
2	0,05	20,0	0,0	0,0	3,120	∞	∞	1,00	2,019

TABELA 6.2 - DADOS DOS REGULADORES DE TENSÃO DOS GERADORES SÍNCRONOS

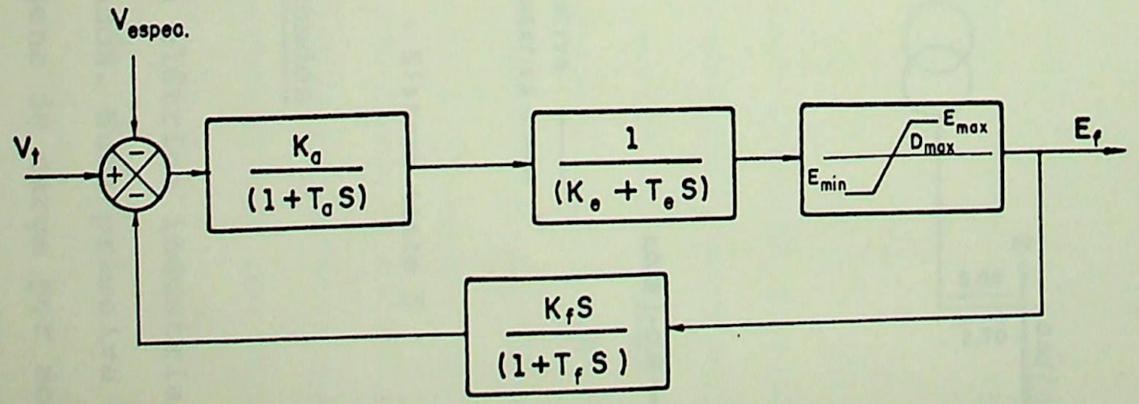


Figura 6.2 - Diagrama de Blocos dos Reguladores de Tensão.

6.2.3 - Resultados do Fluxo de Carga para a Situação Ilustrada no Unifilar

O resultado do fluxo de carga do sistema, é apresentado na figura 6.3

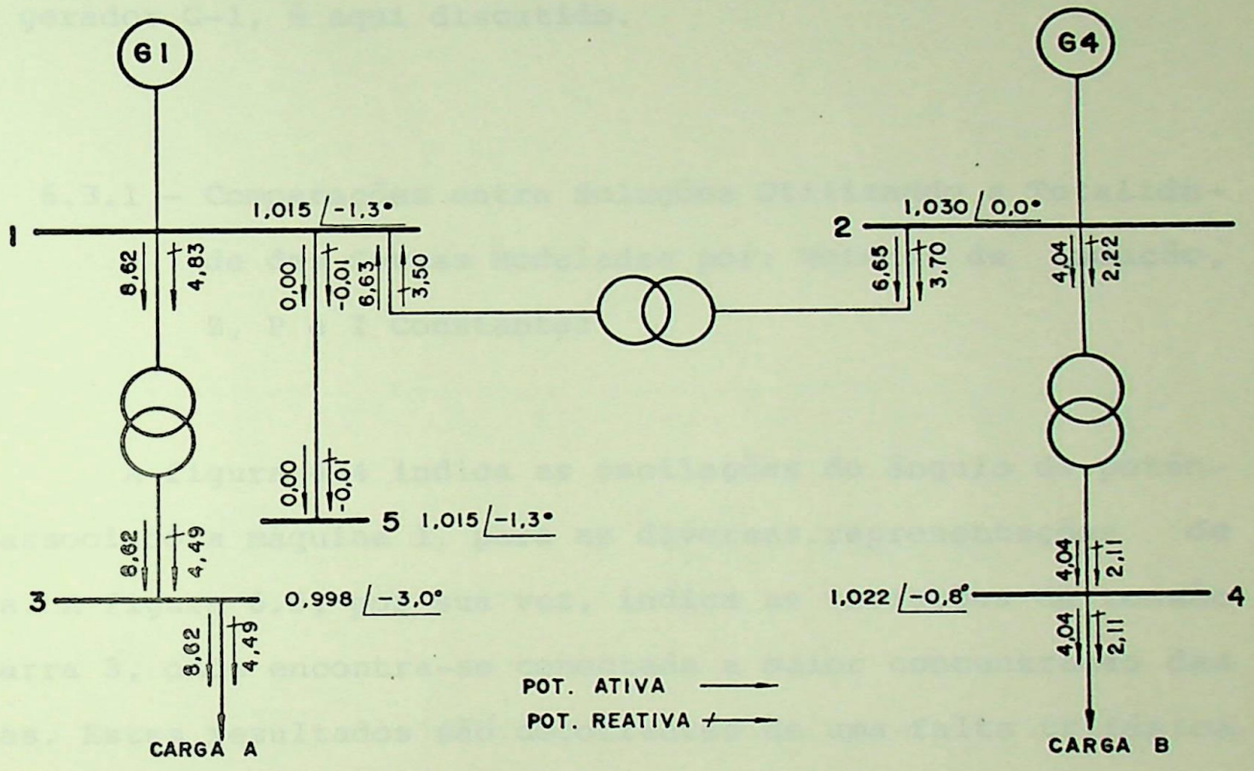


Figura 6.3 - Fluxo de Carga - Sistema teste 3

6.3 - Resultados dos Casos Processados

Utilizando-se do sistema elétrico industrial anterior considerou-se duas etapas de estudos. Numa primeira etapa, com o objetivo de comparar as modelagens de carga por motores de indução e outras formas (Z, P e I constantes), admitiu-se que para as duas barras de carga o total destas cargas fosse representada por motores, Z, P ou I constantes. Assim pode-se novamente analisar as divergências ou concordâncias entre os resultados obtidos. Numa segunda etapa dos estudos considerou-se que, para a barra 3, 66% da carga fôsse constituida por retificado-

res com controle automático de corrente constante. Neste mesmo caso, tanto os 34% restante da carga da barra 3, como, os 100% da carga da barra 4 foram tomadas como impedância constante. Assim procedendo obteve-se vários resultados das quais um resumo, principalmente concentrando as apresentações dos resultados para o gerador G-1, é aqui discutido.

6.3.1 - Comparações entre Soluções Utilizando a Totalidade das Cargas Modeladas por: Motores de Indução, Z, P e I Constantes

A figura 6.4 indica as oscilações do ângulo de potência associado a máquina 1, para as diversas representações de carga. A figura 6.5, por sua vez, indica as variações da tensão da barra 3, onde encontra-se conectada a maior concentração das cargas. Estes resultados são decorrentes de uma falta trifásica, franca, aplicada à barra 5 em t = 0, e eliminada em 6 ciclos. Embora, com divergência entre os resultados, as modelagens de carga por impedância, corrente e potência constantes tenham levado a uma resposta estável, a representação por motores de indução levou a uma instabilidade. Esta instabilidade teria sido ocasionada pelos altos níveis de reativos exigidos pelos motores e as consequentes reduções das tensões dos barramentos. Este caso, talvez um outro extremo do correspondente apresentado no Capítulo V pode ser usado para ilustrar a necessidade da consideração específica de cada sistema.

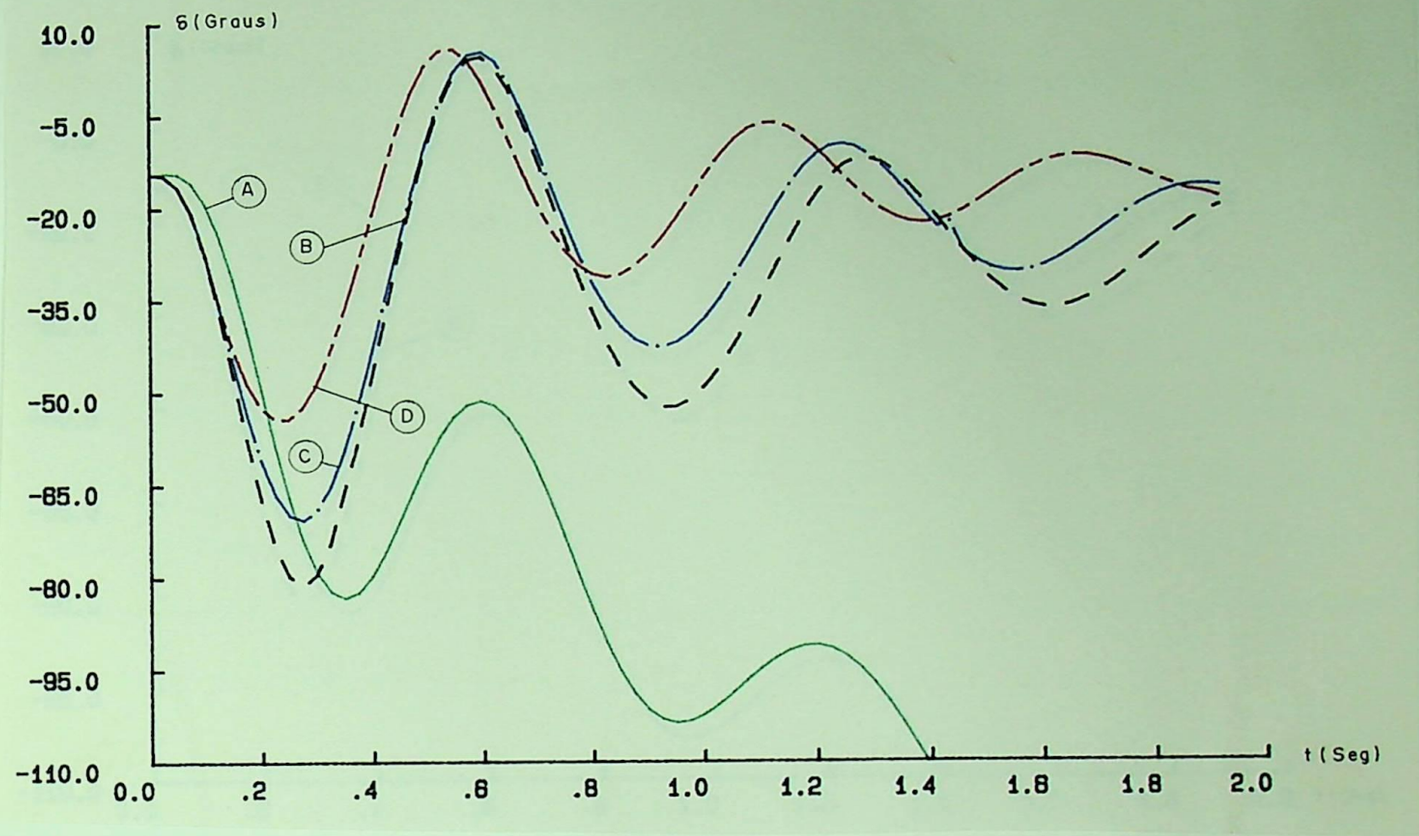


Figura 6.4 - $\delta = f(t)$ para o gerador 1
A - Dinâmica B - Impedância Constante
C - Corrente Constante D - Potência Constante

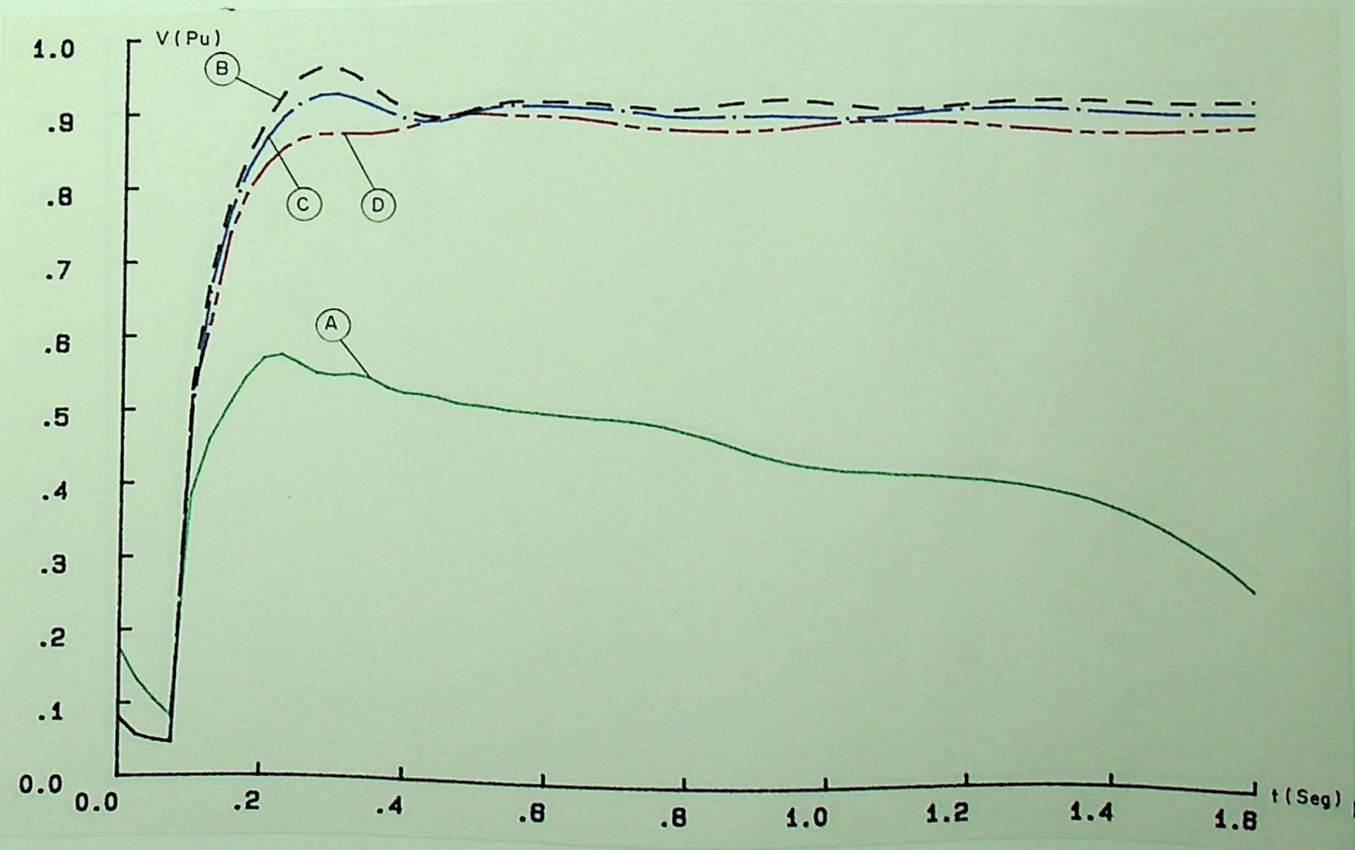


Figura 6.5 - $V = f(t)$ para a barra 3.
A - Dinâmica B - Impedância Constante
C - Corrente Constante D - Potência Constante

O mesmo caso foi posteriormente re-estudado admitindo-se uma falta na mesma barra, porém, com duração de 12 ciclos e através de uma impedância que garantiu que as tensões de barra não fossem inferiores a 0,5 pu. Os resultados para $\delta = f(t)$ - G1 e V = f(t) - barra 3, são dados pelas figuras 6.6 e 6.7. Destas verificou-se divergências substanciais entre as diversas modelagens, todavia todos os casos levaram a uma solução final estável. Ainda, das figuras conclui-se sobre uma maior aproximação dos resultados da potência constante com a modelagem dinâmica por motores de indução.

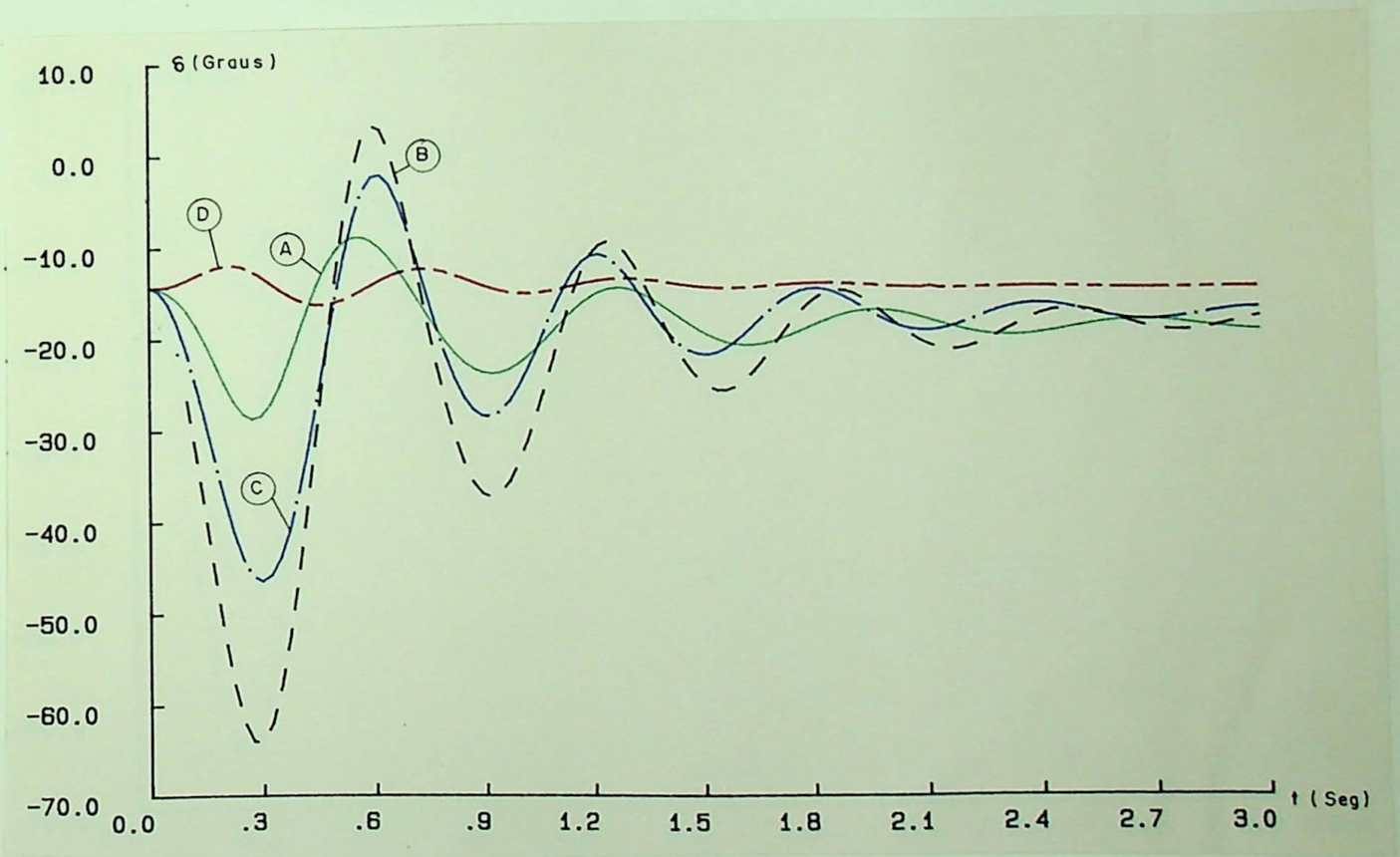


Figura 6.6 - $\delta = f(t)$ para o gerador 1

A - Dinâmica B - Impedância Constante
C - Corrente Constante D - Potência Constante

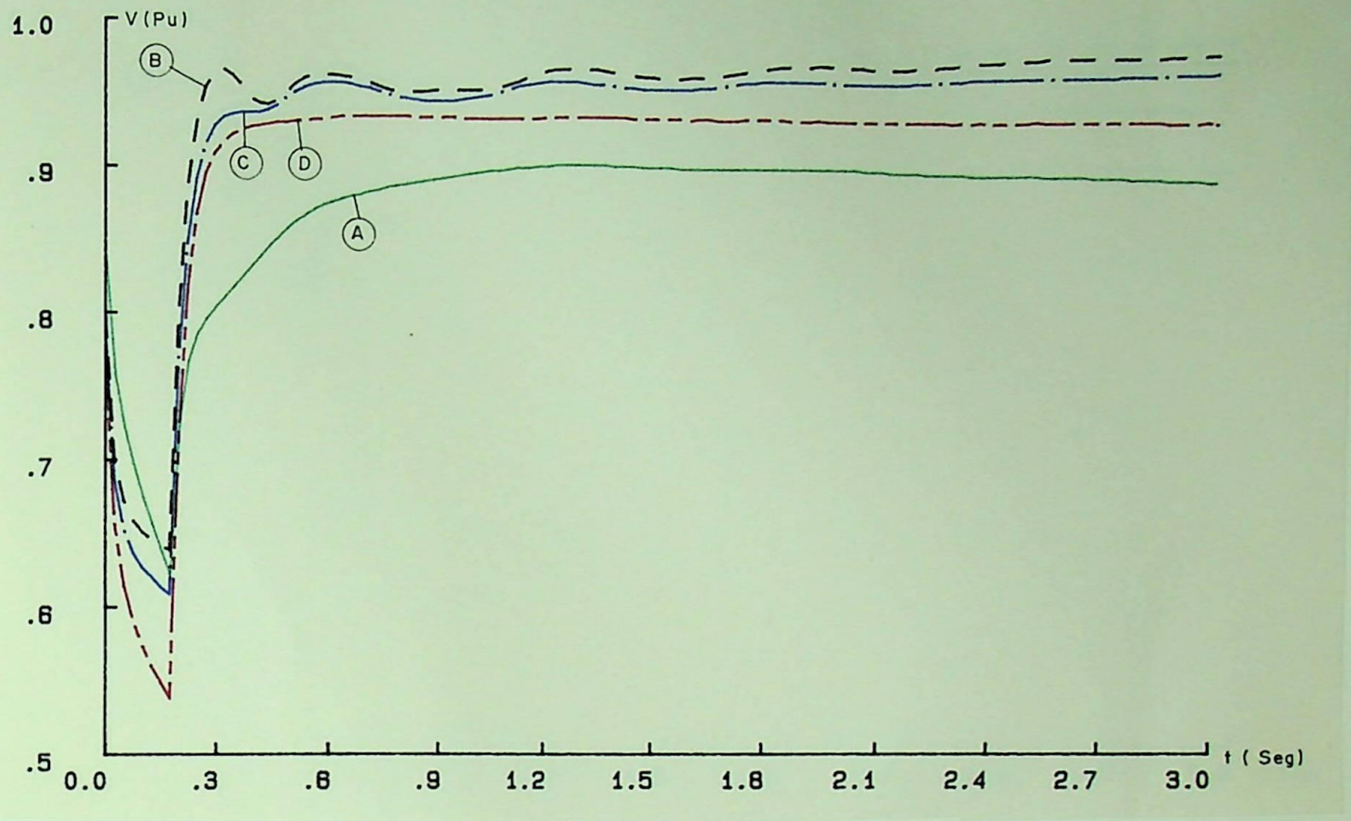


Figura 6.7 - V = f(t) para a barra 3

A - Dinâmica B - Impedância Constante

C - Corrente Constante D - Potência Constante

6.3.2 - Comparações entre Soluções Utilizando-se o Retificador Modelado: dinamicamente, Z, P e I Constantes

Conforme já referido, com o objetivo de investigar as diferenças de resultados com as modelagens da carga retificadora, considerou-se 66% da carga total da barra 3 como constituida por retificadores sendo que as demais, para todos os casos, foram admitidas como modeladas por Z constante. Deve-se ressaltar que as cargas das barras 3 e 4 foram alteradas, e o fluxo de carga para esta nova situação é apresentado na figura 6.8. Assim procedendo chegou-se aos resultados ilustrados na figura 6.9, mostrando as variações de δ da máquina 1. Estes resultados correspondem a um curto franco de duração 6 ciclos aplicado a barra 5. Novamente, os resultados ilustram maiores oscilações para a modelagem dinâmica, enquanto que as respostas para as representações por Z, P e I constantes são bastante aproximadas.

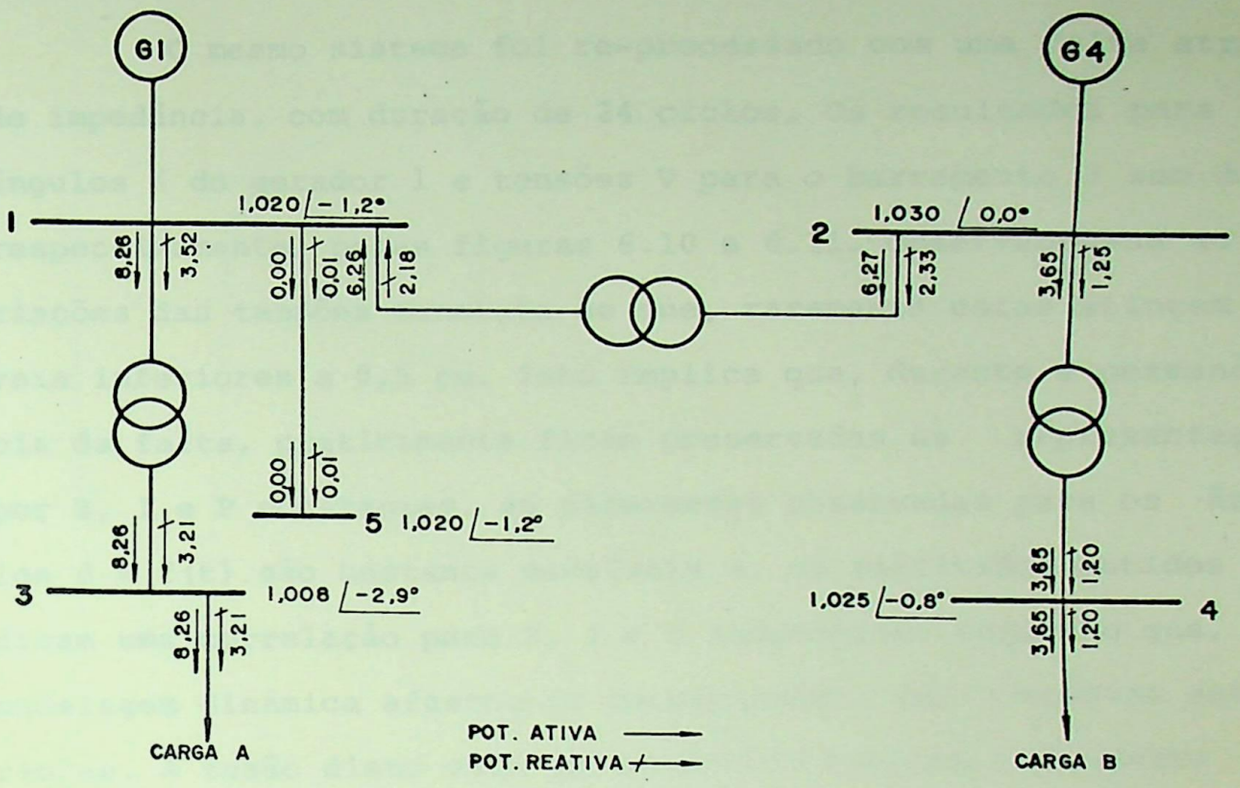


Figura 6.8 - Fluxo de Carga - Sistema teste 3

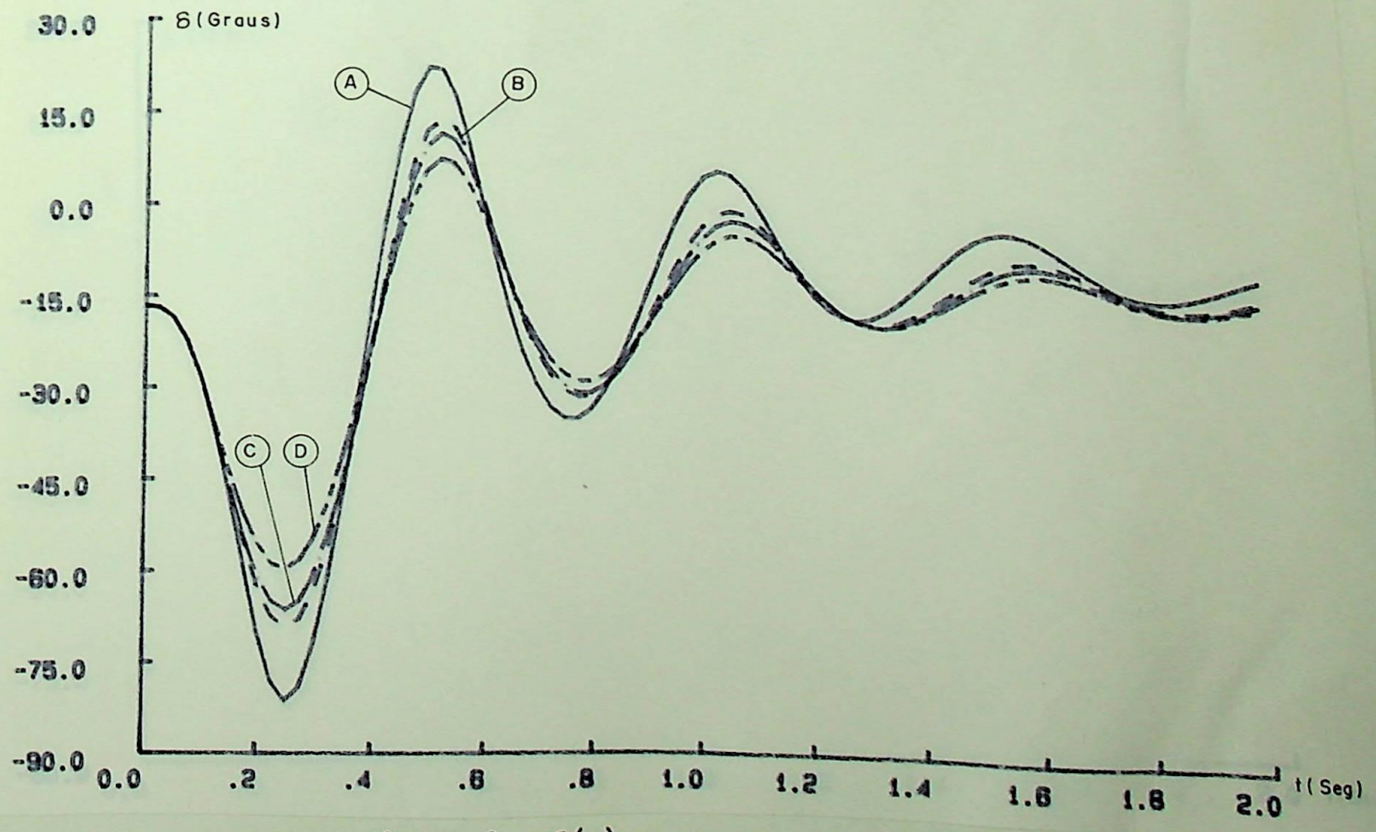


Figura 6.9 - $\delta = f(t)$ para o gerador 1

A - Dinâmica B - Impedância Constante

C - Corrente Constante D - Potência Constante

O mesmo sistema foi re-processado com uma falta através de impedância, com duração de 24 ciclos. Os resultados para os ângulos δ do gerador 1 e tensões V para o barramento 3 são dados respectivamente, pelas figuras 6.10 e 6.11. Observando-se as variações das tensões constata-se que, raramente estas atingem níveis inferiores a 0,5 pu. Isto implica que, durante a permanência da falta, praticamente ficam preservadas as representações por Z, I e P constantes. As diferenças observadas para os ângulos $\delta = f(t)$ são bastante sensíveis e, os resultados obtidos indicam uma correlação para Z, I e P constantes, enquanto que, a modelagem dinâmica afastou-se marcantemente das respostas anteriores. A razão disto está em sucessivos disparos e bloqueios das pontes retificadoras devido ao sistema operacional implantado.

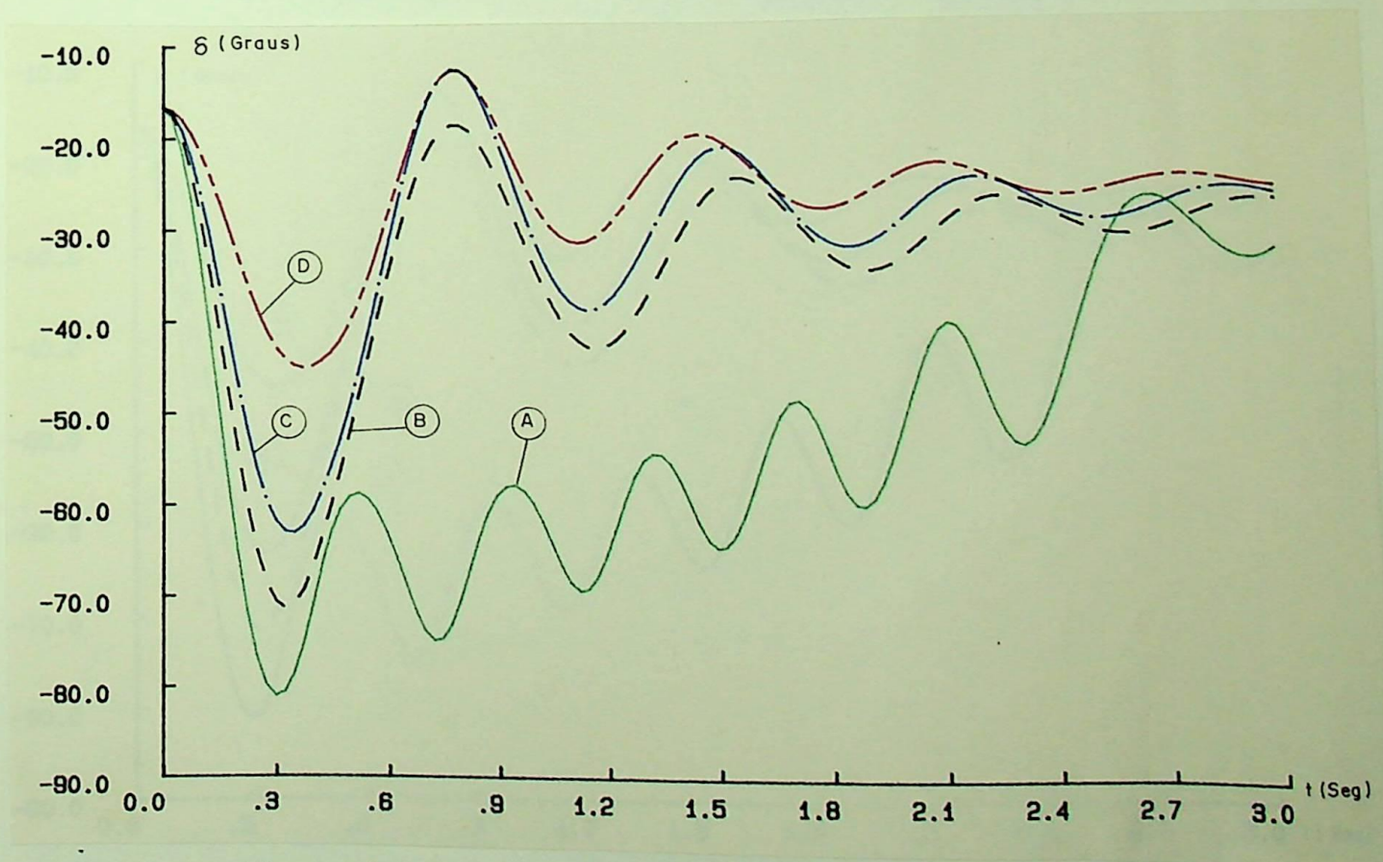


Figura 6.10 - $\delta = f(t)$ para o gerador 1

A - Dinâmica
B - Impedância Constante
C - Corrente Constante
D - Potência Constante

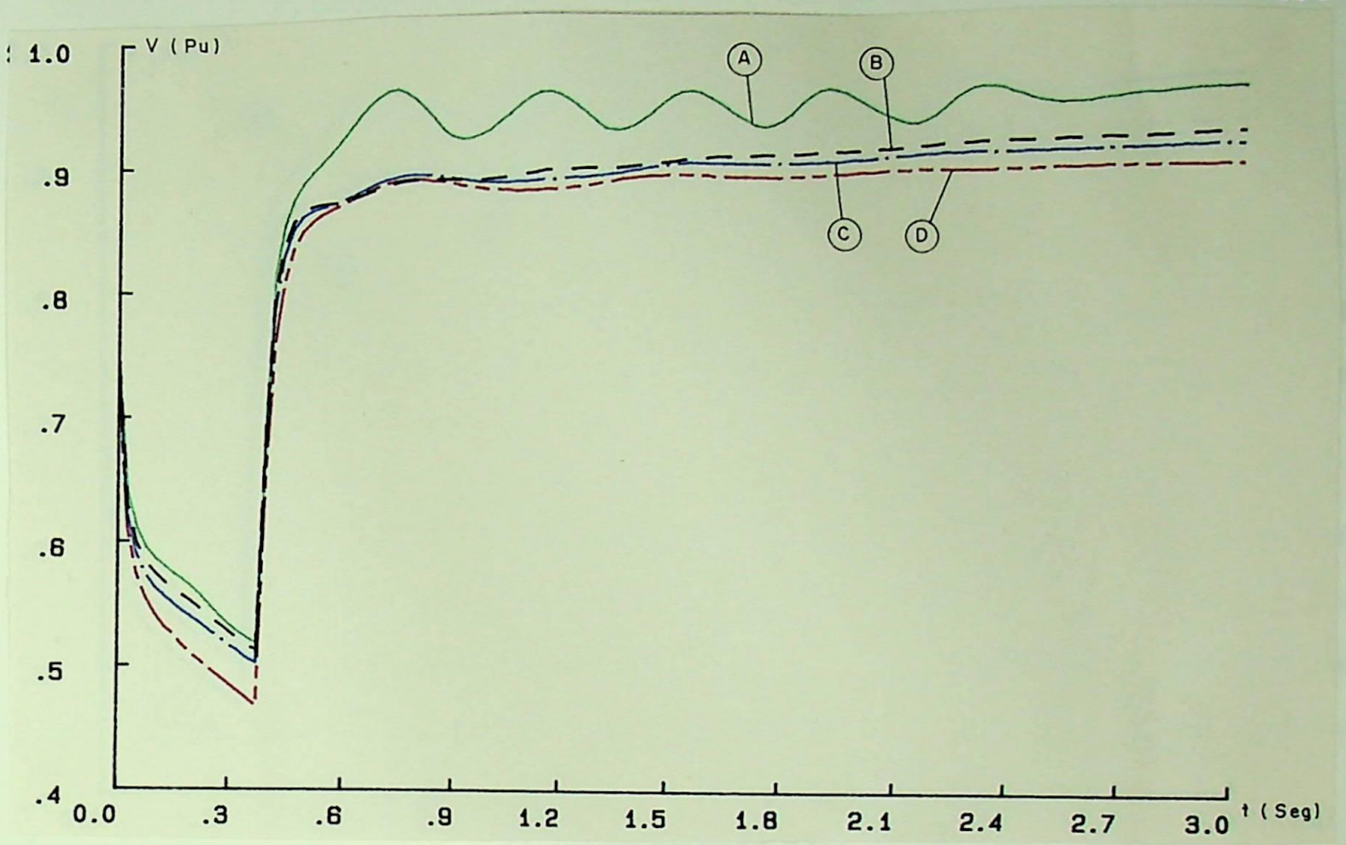


Figura 6.11 - V = f(t) para a barra 3
A - Dinâmica B - Impedância Constante
C - Corrente Constante D - Potência Constante

6.4 - Conclusões

Os estudos processados para um sistema elétrico substancialmente diferente, como o aqui apresentado, evidenciou diferenças maiores entre as respostas dinâmicas, e outras modelagem da carga. Um dos resultados mais significativos foi aquele ilustrado pelas figuras 6.4 e 6.5, onde, a utilização dos 100% das cargas em forma de motores de indução levou a uma instabilidade, que não foi constatada quando do uso de P, I ou Z constantes. Sem dúvida, a utilização dos motores e seus correspondentes efeitos de partida, subsequentes a uma ação de distúrbio, criam uma inércia elétrica que se manifesta em taxas menores de recuperação das tensões. Este fato, como verificado para o sistema testado, se faz mais notório quando da análise de sistemas elétricos com estruturas menos robustas. Este é o caso da maioria dos sistemas

industriais, quando inclusive, a modelagem de uma parte significativa da carga, deve ser feita por motores de indução. A utilização da modelagem mais simples e rápida, por potência constante, indicou apenas uma tendência de aproximação de resultados com a representação por motores, como ilustra, por exemplo, a figura 6.6.

Com relação a modelagem dinâmica para os conversores resultados semelhantes aos acima foram obtidos. Isto ilustra que para o sistema apresentado, diferenças perceptíveis ocorreram em função das modelagens empregadas para a instalação conversora.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES GERAIS

Várias, daquelas que se poderia designar por conclusões específicas de cada capítulo, já foram exploradas ao longo do texto. Desta forma, este capítulo tem por meta discutir alguns resultados mais significativos e ressaltar aspectos considerados mais genéricos sobre o trabalho desenvolvido.

No capítulo II apresentou-se o resumo de um extensivo levantamento bibliográfico sobre aquilo que se poderia conotar de estado da arte, isto é, sobre o atual estágio de desenvolvimento da ciência da modelagem de cargas para estudos de estabilidade transitória. Deste trabalho verificou-se a existências de diversas formas simplificadas de representações, cada uma com suas particularidades e com identificação maior para aplicações específicas. Este é, por exemplo, o caso do uso da modelagem de motores de indução por potência constante, embora que outras variáveis devam ser também consideradas. Estas e outras formas de representação, foram então implementadas digitalmente e a questão foi abordada no capítulo III. As conclusões extraídas de vários casos estudados, cada um com arranjo físico próprio, evidenciaram que nem sempre estas substituições atingem o grau de precisão almejado. De fato, citando por exemplo o caso de um motor de indução, esta carga além das características elétricas próprias de sua operação, também apresenta uma inércia mecânica. Isto retarda, tanto elétrica como mecânicamente, qualquer tentativa que o motor venha a manifestar no sentido de acompanhar imposições criadas pelos distúrbios elétri

cos. Nestes casos, qualquer modelagem que não leve em conta tais características resultaria que a carga se ajustaria muito rapidamente às condições estabelecidas pelo distúrbio. Este é o caso, por exemplo, que aconteceria quando da ocorrência de um curto circuito, quando numa barra mais distante daquele ponto em falta, os motores tendem a sustentar muito mais a tensão, e,com isto, afetar significantemente a dinâmica de todo o sistema. Esta mesma afirmativa e os resultados obtidos evidenciam a necessidade de se considerar um outro fato: o acoplamento elétrico entre o local de ocorrência do distúrbio e o de localização destas cargas. Realmente, os resultados obtidos mostraram nítida - mente que quanto mais afastadas se encontram as cargas dinâmi - cas do ponto de defeito, tanto menos importante se torna a exatidão de sua representação.

Também, os problemas oriundos de não-convergência de soluções ilustrou, como já é prática comum, a necessidade de estabelecer limites mínimos de tensão a baixa dos quais tanto as modelagens por potência e/ou corrente constante são automaticamente alteradas para impedância constante. Um nível mínimo de V = 0,5 pu mostrou, para todos os casos testados, que uma solução final foi atingida. Este valor é, de fato, uma das práticas consagradas na literatura especializada. Em consequência disto tem-se que, exatamente quando a representação das cargas por Z, P ou I constantes não se distaciam, as representações convergem para uma única forma comum de modelagem.

As verificações da necessidade ou não da representa - ção apropriada das denominadas cargas retificadoras, atualmente tão comuns em grandes processos industriais, foi objeto de análise nos capítulos 5 e 6. Conforme apresentado ao longo do

texto, deve-se considerar que são vários os tipos das cargas alimentadas por tais instalações conversoras, porém, as aqui modeladas foram do tipo f.c.e.m constante. Para estes casos, novamente concluiu-se que o detalhamento da modelagem destes consumidores de sistemas elétricos apresenta importância relativa. Estudos processados em grandes sistemas integrados evidenciaram que o grau de sofisticação da modelagem da carga não deve constituir um problema de grande relevância. De fato, os resultados obtidos para tais sistemas mostram grande aproximação de resultados extraídos com estas modelagens complexas ou aquelas de natureza mais simples, como é o caso da impedância constante. Para um sistema de menor porte, como apresentado no capítulo 6, utilizado para destacar as modelagens por Z, I ou P constante , já se pode verificar uma manifestação mais intensa no comportamento dinâmico do sistema. Como uma contribuição deste tratamento, destaca-se ainda que foi feito um extensivo tratamento da operação de uma instalação retificadora quando do funcionamento dentro do que se chama condições anormais de operação. Neste sentido, considerou-se os aspectos físicos e de tratamento matemático associados a operação com baixas tensões de alimentação, altas correntes CC, etc, quando então os ângulos de comutação são superiores a 60^{o}. Naturalmente situações semelhantes a estas são de ocorrência provável quando da existência de distúrbios no sistema elétrico.

BIBLIOGRAFIA

[1] KENT, M.H., SCHMUS W.R., McCRACKIN F.A. e WHEETER L.M. - "Dynamic Modeling of Loads in Stability Studies" - IEEE, Trans. Vol. pas - 88, 1969, pp. 756-763.

[2] ARNOLD, C.P. "Solutions of the Multi-Machine Power System Stability Problem" - Ph.D. Thesis, UMIST, 1976.

[3] CONCORDIA C. e IHARA S. "Load Representation in Power System Stability Studies" - IEEE, Trans., Vol. pas.101 1982, pp. 969-977.

[4] MATHUR, B.K. "The Modeling of Load Characteristics Representation in System Studies", IEEE Trans., Vol. IA-20, nº 1, 1984.

[5] ARAUJO, A.R. "Modelos Representativos das Cargas em Estudos de Estabilidade" - L.D. Tese, Itajubá, 1974.

[6] ARNOLD, C.P., TURNER, K.S., ARRILAGA, J. Modelling rectifier loads for a multi-machine Transient Stability Programme". IEEE Trans - on Power Appar Syst, New York, 99(1): 78:85, Jan/Feb, 1980.

[7] SHIN, C.G. "Simulação Digital para Estudos de Estabilidade Transitória e Rejeição de Carga em Sistemas Elétricos de Potência" M.Sc. Tese - Itajubá, 1981.

[8] OLIVEIRA, J.C. & COGO, J.R. "Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Contínua. Itajubá", Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1981, 331p.

[9] CASTRILLON, J.L. "Modelagens de Ligações em Corrente Contínua". MSc. Tese. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1982. 204 p.

[10] GIESNER, D.B., ARRILAGA, J., "Operating Modes of the 3 Phase Bridge Convertor. Int. J. Elect. Engng Educ. 8:373-88, 1970.

[11] ANDERSON, P.M. e FOUAD, A.A., "Power System Control and Stability, Yowa, USA, Science Press, 1977.

[12] BERG, G.J. "Power System Load Representation" - Proc. IEE, Vol. 120, 1973, pp.344-348.

[13] DOMMEL, H.W., SATO, N. "Fast Transient Stability Solutions". IEEE Trans on Power Appar Syst, New York, 91(8): 1643-50, Aug. 1972.

[14] KIMBARK, E.W. "Direct Current Transmission". New York , John Wiley, 1971. 508 p.

[15] OGATA, K., "Engenharia de Controle Moderno", Ed. Pretince/Hall do Brasil Ltda, Rio de Janeiro, 1982.

[16] IEEE COMMITTEE REPORT:"Computer Representation of Excitation Systems" IEEE Trans. Vol PAS-87, No. 6, 1968, pp. 1460-1464.

[17] RAMEY, D.G. and SKOGLUND, J.W.:"Detoiled Hydrogovernor Representation for Systems Stability Studies: IEEE Trans. Vol. PAS-89, No. 1, 1970, pp. 106-111.

APÊNDICE A

Um sistema de equações $[y(t)]$ pode ser colocado, para a resolução passo-a-passo, na forma:

$$[y(t+\Delta t)] = [y(t)] + \int_{t}^{t+\Delta t} \frac{d}{dt}(y(\tau)\,d\tau \qquad (1)$$

A solução do termo integral é feita pelo método trapezoidal, o qual é representado graficamente na figura A.1.

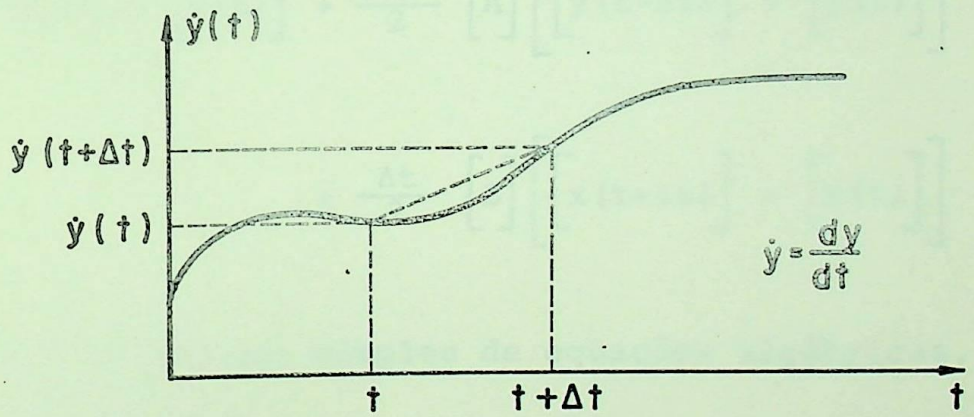


Figura A.1 - Representação Gráfica do Método Trapezoidal

A partir da figura pode-se escrever:

$$\int_{t}^{t+\Delta t} \frac{d}{d\tau}(y(\tau))\,d\tau = \frac{\Delta t}{2}\left[\left[\frac{d}{dt}(y(t+\Delta t))\right] + \left[\frac{d}{dt}(y(t))\right]\right] \qquad (2)$$

que levando em (1):

$$\left[y(t+\Delta t)\right] = \left[y(t)\right] + \frac{\Delta t}{2}\left[\left[\frac{d}{dt}(y(t+\Delta t))\right] + \left[\frac{d}{dt}(y(t))\right]\right] \qquad (3)$$

De (3), constata-se a necessidade do conhecimento das derivadas da função y(t) nos instantes t e t+Δt. Com este intui

to, considere-se a forma linear de representação das equações diferenciais conforme a seguir:

$$\left[\dot{y}\right] = \left[A\right]\left[y\right] + \left[B\right]\left[x\right] \qquad (4)$$

A maioria das equações diferenciais são lineares, embora a inclusão de não linearidades não apresente grandes problemas, como mostra a referência[9].

Substituindo-se a equação (4) em (3), tem-se:

$$\left[y(t+\Delta t)\right] = \left[y(t)\right] + \frac{\Delta t}{2}\left[A\right]\left[\left[y(t+\Delta t)\right] + \left[y(t)\right]\right] + \frac{\Delta t}{2}\left[B\right]\left[\left[x(t+\Delta t)\right] + \left[x(t)\right]\right] \qquad (5)$$

que constitui um sistema simples de equações algébricas, que sendo rearranjado leva a:

$$\left[\left[U\right] - \frac{\Delta t}{2}\left[A\right]\right]\left[y(t+\Delta t)\right] - \frac{\Delta t}{2}\left[B\right]\left[x(t\Delta t)\right] = \left[C(t)\right] \qquad (6)$$

onde o vetor $\left|C(t)\right|$, que é conhecido do passo anterior é dado por:

$$\left[C(t)\right] = \frac{\Delta t}{2}\left[B\right]\left[x(t)\right] + \left[\left[U\right] + \frac{\Delta t}{2}\left[A\right]\right]\left[y(t)\right] \qquad (7)$$

onde $\left[U\right]$ representa a matriz identidade.

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

DAT 12/04/1985
HR.
FL. @PG
LIV.
NC§ Soares

INVENTÁRIO
BIM - EFEI

DATA	Rubrica

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA ÚLTIMA DATA CARIMBADA.

12/03/02		

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200939
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA