

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS DE CARGAS ESPECIAIS EM  
PROGRAMAS DE FLUXO DE POTÊNCIA

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA

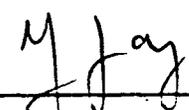
LUIZ CARLOS DE FREITAS

FLORIANÓPOLIS, JUNHO 1985

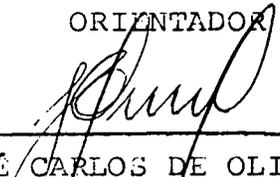
IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS DE CARGAS ESPECIAIS EM PROGRAMAS DE  
FLUXO DE POTÊNCIA

LUIZ CARLOS DE FREITAS

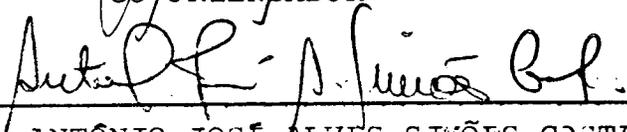
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE  
EM ENGENHARIA, ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA, E APROVADA EM  
SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. LUIZ GONZAGA DE SOUZA FONSECA, D.Sc.

ORIENTADOR

  
\_\_\_\_\_  
Prof. JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA, Ph.D.

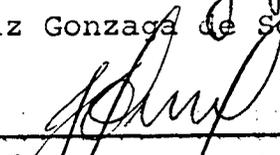
CO-ORIENTADOR

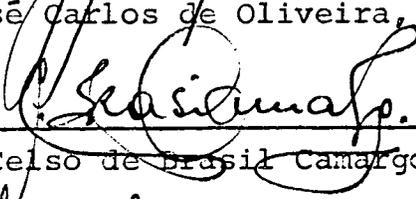
  
\_\_\_\_\_  
Prof. ANTÔNIO JOSÉ ALVES SIMÕES COSTA, Ph.D.

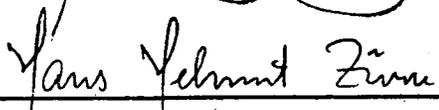
COORDENADOR DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA

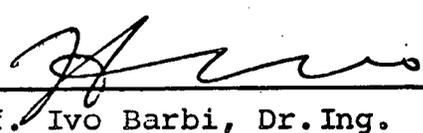
BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. José Carlos de Oliveira, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. C. Celso de Brasil Camargo, M.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Hans Helmut Zörn, Ph.D.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Ivo Barbi, Dr. Ing.

À minha noiva Americilda

Aos meus filhos Luiz Carlos e  
Carolina

Aos meus pais Geraldo e Maria

Rosa

## A G R A D E C I M E N T O S

Ao professor Luiz Gonzaga de Souza pelo incentivo constante, pela orientação e pelo apoio prestado para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor José Carlos de Oliveira pelo apoio, amizade e sua valiosa co-orientação que contribuiu no enriquecimento deste trabalho.

Aos professores e colegas do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, em especial ao José Maria Filho, que contribuíram, cada um a seu modo, para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina pelo crédito de confiança e apoio técnico prestado ao longo do curso oferecido.

À minha noiva Americilda pelo apoio e incentivo.

## R E S U M O

O objetivo deste trabalho é de desenvolver a modelagem de cargas elétricas especiais adequando-as à implementação em programas de fluxo de potência.

Inicialmente apresenta-se os fundamentos operacionais de um Elo de Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Contínua, assim como, de sua técnica de controle. Com isto obtém-se as potências ativas e reativas associadas às estações retificadoras e inversoras, as quais são diretamente empregadas no programa de fluxo de potência. Elos operando como simples interligações e como "tie-lines" são considerados.

Procurando contribuir no campo de cargas industriais, são então consideradas as situações típicas de instalações retificadoras e de motores de indução. Utilizando-se do mesmo procedimento anterior, são analisados seus aspectos fundamentais que levam a um equacionamento que retrate a operação destas e, finalmente são apresentados critérios de implementação digital.

Uma vez obtidos os modelos individuais, procede-se então, a integração destes num programa de fluxo de potência existente. A solução empregada consiste num processo iterativo entre as soluções CA/cargas especiais.

Na parte final do trabalho apresenta-se os resultados para dois sistemas elétricos típicos, um com características de um sistema interligado, e outro, caracterizando um sistema industrial.

## A B S T R A C T

The main purpose of this work is to develop models for special loads and to include them into a digital load flow program.

First of all it is shown the basic operation and equations of the DC Transmission System and its control. With this, the active and reactive power at rectifier and inverter stations are derived. The HVDC scheme working as a tie-line is also taken into account.

On the industrial side, there are two types of loads which are often found and should be specially taken into consideration, they are: induction motors and rectifier installations. Using the same previous approach their basic operation and equations are discussed and the individual digital simulations and results are given.

Once the models have been established they are finally included into an existing load flow program. The overall solution is then obtained by using an iterative AC/special load method.

The results given in the final part of this work are concerned with electrical systems; one being typically industrial and the other a power supply scheme.

## S U M Á R I O

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO .....	01
CAPÍTULO II - MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO OPERACIONAL DE UM ELO DE CORRENTE CONTÍNUA PARA ESTUDOS DE FLU XO DE CARGA	
2.1 - Introdução .....	06
2.2 - Características do Sistema C.A - C.C .....	07
2.3 - Análise da ponte converosra não considerando o ângu lo de comutação .....	11
2.4 - Análise da ponte conversora com ângulo de comutação menor que $60^{\circ}$ .....	15
2.5 - Fenômeno da falha de comutação no inversor .....	27
2.6 - Arranjos das estações conversoras e suas influências nas equações e modelagem do Elo de Transmissão em Corrente Contínua .....	29
2.7 - Filosofia de controle de operação de um Elo de Trans missão em Corrente Contínua .....	31
2.8 - Cálculo das potências ativas e reativas nas barras primárias dos transformadores que alimentam os con versores .....	35
2.9 - Implementação digital .....	39
2.10- Resultados .....	53
2.11- Conclusões .....	59

CAPÍTULO III - MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO OPERACIONAL DE  
INSTALAÇÕES RETIFICADORAS PARA ESTUDOS DE  
FLUXO DE CARGA

3.1 - Introdução .....	60
3.2 - Modelo de uma carga retificadora com f.c.e.m. constante .....	61
3.3 - Modos normais e anormais de operação de um retificador .....	64
3.4 - Interação entre os retificadores e o sistema c.a de alimentação .....	75
3.5 - Implementação digital .....	79
3.6 - Resultados .....	87
3.7 - Conclusões .....	89

CAPÍTULO IV - MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO OPERACIONAL DE MO-  
TORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS PARA ESTUDOS DE  
FLUXO DE CARGA

4.1 - Introdução .....	90
4.2 - Considerações para a escolha da modelagem adequada do motor de indução .....	91
4.3 - Motor equivalente .....	99
4.4 - Determinação das características de operação de um motor de indução .....	100
4.5 - Implementação digital .....	107
4.6 - Resultados .....	111
4.7 - Conclusões .....	114

CAPÍTULO V - INCORPORAÇÃO DOS MODELOS DAS CARGAS ESPECIAIS  
AO ESTUDO DE FLUXO DE CARGA

5.1 - Introdução .....	115
5.2 - O programa do fluxo de carga na sua estrutura original .....	115
5.3 - Configurações do sistema de potência previstas pelo programa .....	118
5.4 - Implementação digital .....	121
5.5 - Resultados .....	128
5.6 - Conclusões .....	159
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES .....	160
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	163

## CAPÍTULO I

### INTRODUÇÃO

Antes de iniciar as discussões de carácter específico de cada unidade neste trabalho, é conveniente ressaltar as razões básicas que nortearam a idéia desta linha de desenvolvimento. Conforme destacado pelo próprio título da dissertação, as análises envolvem estudos de operação de sistemas elétricos em regime permanente, inter-relacionando as tradicionais técnicas de solução de fluxo de carga com a operação de cargas fornecidas e tratadas não apenas como um consumo  $P + jQ$  constante, mas sim, com preocupações relativas a sua natureza e às características operacionais, como está destacado posteriormente.

De fato, ao se estudar o sistema com tais objetivos, consegue-se que sejam obtidas não apenas as clássicas respostas fornecidas pelos estudos de fluxo de carga, quais sejam: tensões, ângulos das tensões, potências geradas, fluxos de potências nas linhas, etc, mas também, informações detalhadas sobre o funcionamento das cargas específicas, como por exemplo, seria a determinação das potências ativa e reativa reais consumidas por um motor de indução, o seu escorregamento, torque, perdas, etc. Informações como estas, não apenas interessariam à própria operação destas cargas mas também complementariam os dados, por vezes necessárias, para subsequentes estudos. Dentre estudos que necessitam tais informações complementares, destacam-se, por exemplo, os de estabilidade de um sistema elétrico. Para tais casos, o fornecimento das denominadas condições iniciais do sistema elétrico sob análise constitui um dos procedimentos mais importantes. Assim, utilizando novamente o exemplo de uma carga constituída por um grande motor de indução, hoje tão frequen

temente empregados industrialmente, se o fluxo de carga foi pro- cessado com a consideração de um  $P$  conforme definido pelo consu- mo e, o valor da potência reativa foi simplesmente estimado com base num fator de potência típico, então, pode-se posteriormen- te encontrar sérios problemas de balanço de potência quando es- te motor fôr representado num programa de estabilidade. A razão disto está no fato que, se o citado programa representa tais má- quinas através de modelos dinâmicos, isto é, emprega seu cir- cuito equivalente mais completo e ainda considera a dinâmica me- cânica, pode ocorrer, logo no instante inicial, um desbalanço entre os reativos anteriormente estimados e os calculados com base no circuito equivalente. É natural que problemas desta na- tureza sejam mais específicos para os estudos de sistemas indus- triais, porém, a filosofia da explicação é que deve prevalecer, e, indiscutivelmente situações semelhantes ocorrerão mesmo com problemas específicos de sistemas elétricos de concessionárias. Este é o caso quando um sistema de transmissão em corrente con- tinua se faz presente no sistema elétrico. Para este caso, tra- tam-se as denominadas estações retificadoras e inversoras como pontos de consumo ou fornecimento de energia ativa e reativa, e o conhecimento prévio dos valores corretos de  $P$  e  $Q$  implica nu- ma análise semelhante a anterior.

Destas discussões resultou então a origem deste traba- lho, cujas metas fundamentais podem ser resumidas no conhecimen- to mais detalhado da operação de cargas elétricas que se apre- sentam com o que se convencionou aqui denominar, característi- cas dinâmicas. Sob tal terminologia subentendem-se aquelas car- gas cujo funcionamento depende e varia significativamente com alguns parâmetros, por exemplo, a tensão de alimentação. Ao admitir-se uma tensão

$V = 1$  pu para todas estas cargas e calcular os correspondentes valores de  $P$  e  $Q$ , é evidente que um estudo de fluxo de carga poderia então ser processado. Porém, ao final deste estudo chegar-se-ia a diferentes tensões que aquelas (1 pu) inicialmente assumidas, e então pergunta-se: para estes novos valores de tensões as potências permaneceriam as mesmas?. Naturalmente a resposta seria negativa e, para que um ponto final de equilíbrio fosse atingido, além das iterações normais já empregadas nos estudos de fluxo de carga, haveria também a necessidade de um segundo processo de iteração para que as cargas fossem constantemente reavaliadas e novos fluxos de carga realizados. Assim, um processo cíclico deveria ser implantado até que entre duas iterações sucessivas não houvesse diferenças substanciais entre os valores de tensões de barramentos ou das potências  $P$  e  $Q$  calculadas para as citadas cargas dinâmicas. Somente ao fim deste estudo se conheceria então o verdadeiro resultado de fluxo de carga e as informações detalhadas e específicas de cada uma das cargas.

Quanto às cargas aqui utilizadas, são elas:

- (i) - Elos de transmissão em corrente contínua
- (ii) - Cargas retificadoras industriais
- (iii) - Motores de indução

A primeira das cargas acima citadas é analisada ao longo do capítulo II, quando então se descreve resumidamente a teoria básica da conversão culminando-se com uma breve explanação sobre a filosofia de controle de um ETCC (elo de transmissão em corrente contínua). Utilizando esta modelagem, descreve-se o algoritmo computacional utilizado na simulação e discutem-se resultados isolados para tais cargas.

Em vista da crescente utilização de grandes blocos de unidades retificadoras a nível industrial, como é o caso, por exemplo, do sistema elétrico de Alunorte para a CHESF/ELETRONORTE, quando 750 MW são constituídos de unidades retificadoras empregadas para a produção do alumínio, optou-se por considerá-las no capítulo III. Na verdade, estas constituem-se em uma extensão natural daquelas consideradas anteriormente, porém com adaptações específicas quanto aos modos de operação. Utilizando-se da mesma estrutura do capítulo precedente apresenta-se o algoritmo para a modelagem digital e discutem-se resultados isolados para as cargas retificadoras.

Os motores de indução são, pela sua freqüente e dominante utilização na grande maioria dos sistemas elétricos, as cargas que mais interessam quanto a simulação e determinação de parâmetros e características. Estas cargas são consideradas no capítulo IV, onde justifica-se o modelo empregado e são desenvolvidas as expressões básicas para a análise. Novamente, o algoritmo computacional e resultados ilustrativos são apresentados para um motor isolado.

O inter-relacionamento entre as cargas citadas e o sistema de corrente alternada propriamente dito é feito no capítulo V, quando então as diversas sub-rotinas elaboradas nos capítulos precedentes são incorporadas num programa de fluxo de carga existente. Neste capítulo considera-se também, a ocorrência de uma interligação por um ETCC quando este opera como elo de interligação. De fato, quando desta situação, tem-se que, na verdade, o sistema elétrico divide-se em duas áreas distintas, e uma solução combinada de dois sistemas isolados sob o ponto de vista de sincronismo, porém interligados energeticamente pelo ETCC, dever ser adotada. Neste particular, trata-se de outra

contribuição deste trabalho, pois o programa de fluxo de carga em sua forma original não considerava tal hipótese. Ainda no capítulo V apresentam-se os resultados finais e combinados de todo o trabalho, quando então são estabelecidos termos comparativos entre as metodologias aqui discutidas e aquelas que seriam convencionalmente adotadas por um fluxo de carga tradicional.

## CAPÍTULO II

### MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO OPERACIONAL DE UM ELO DE CORRENTE CONTÍNUA PARA ESTUDOS DE FLUXO DE CARGA

#### 2.1 - Introdução

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

Dentro dos padrões apresentados na literatura, as equações e análises estão normalmente associadas a pontes conversoras de 6 pulsos. Sabe-se, porém, que não é esta a realidade das estações conversoras que compõem o elo CC, pois o usual é encontrar-se os denominados sistemas bipolares onde cada polo é composto de um ou mais grupos de pontes de 12 (doze) pulsos. Neste sentido, embora o tratamento matemático seja sempre realizado para pontes de 6 (seis) pulsos, os resultados obtidos são facilmente estendidos para ETCC(s) formados por quaisquer números de pontes.

Uma vez obtida a modelagem dos conversores procede-se à análise operacional do sistema utilizando-se controle de corrente e potência constante. Assim, os subsídios necessários à formulação digital são conhecidos e implementados no sentido de se obter as características operacionais do elo, das quais destacam-se: Ângulo de ignição ( $\alpha$ ) do retificador, poten-

cias ativa e reativa fornecidas pelo barramento C.A que alimentam os conversores, etc. Estes resultados não s3o permitem avaliar a opera33o do elo, como tamb3m fornecem dados necess3rios 3 incorporaa3o do ETCC no sistema CA de modo que conjuntos de fluxo de carga ou outros possam ser processados.

## 2.2 - Caracter3sticas do sistema CA - CC

O circuito simplificado de um sistema de transmiss3o em corrente cont3nua e dos sistemas CA adjacentes s3o mostrados na Figura 2.1.

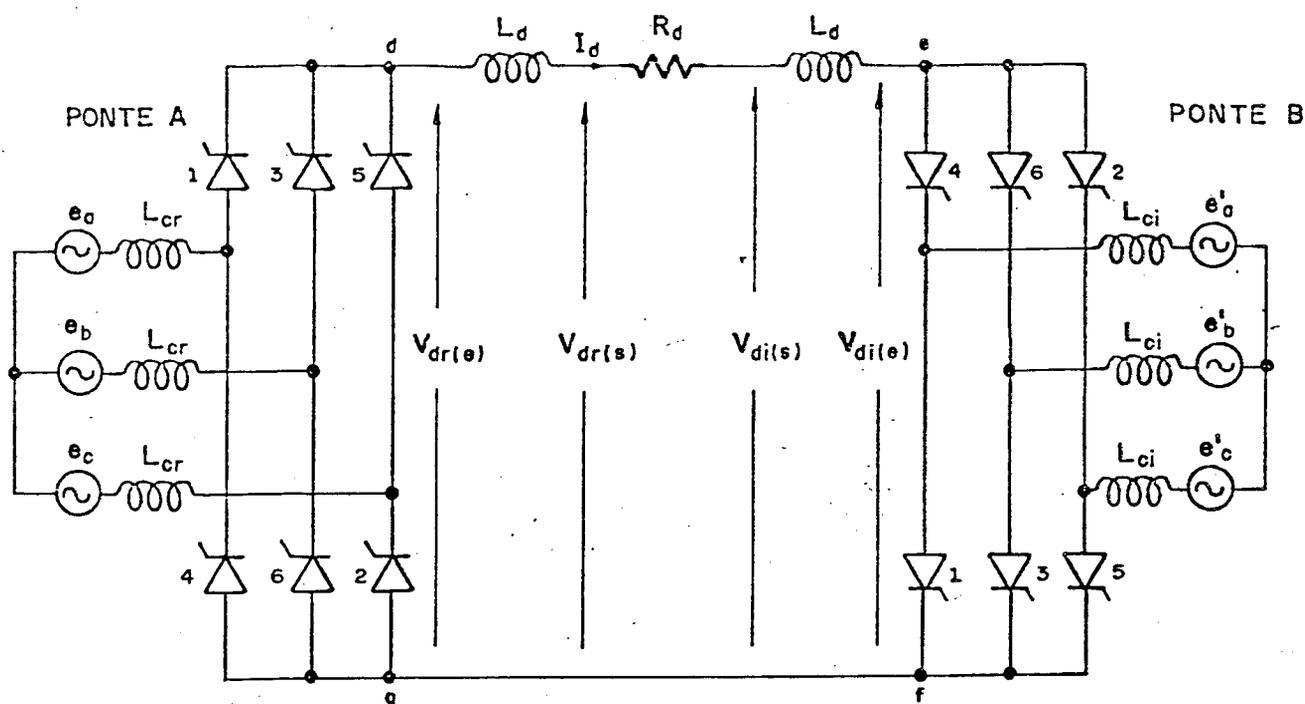


Figura 2.1 - Circuito simplificado de um sistema de transmiss3o cc

onde:

$L_{cr}$  = indut3ncia de comuta33o do retificador

$L_{ci}$  = indut3ncia de comuta33o do inversor

$L_d$  = reator de alisamento

$V_{dr}$  = valor médio da tensão CC do retificador na saída do reator de alisamento

$V_{di}$  = valor médio da tensão CC do inversor na saída do reator de alisamento

$I_d$  = corrente contínua

$e_a, e_b, e_c$  = tensões trifásicas do sistema CA adjacente ao retificador

$e'_a, e'_b, e'_c$  = tensões trifásicas do sistema CA adjacente ao inversor

O Circuito CC, em sua estrutura básica, é estabelecido pelas pontes conversoras A e B, de 6 pulsos, e linha CC. As pontes A e B são idênticas, apresentando um sentido único para a corrente  $I_d$ , de d para e e de f para g.

As pontes conversoras podem ser ligadas em série, formando pontes de 12 pulsos (Figura 2.2), ou em paralelo. Este último caso é largamente empregado em aplicações industriais.

Se o sistema de transmissão for ainda constituído de duas linhas, um terminal positivo e outro negativo, com o ponto central aterrado, ele é dito bipolar (Figura 2.3).

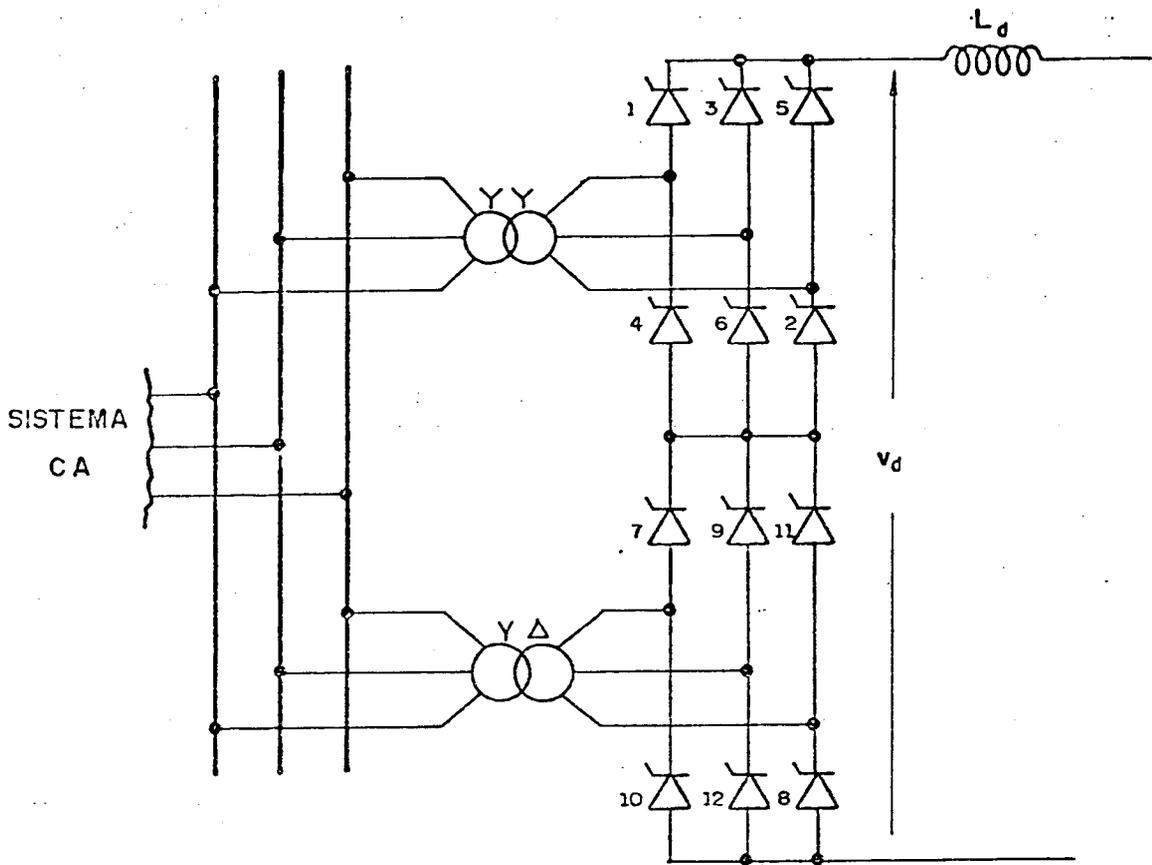


Figura 2.2 - Ponte conversora de 12 pulsos

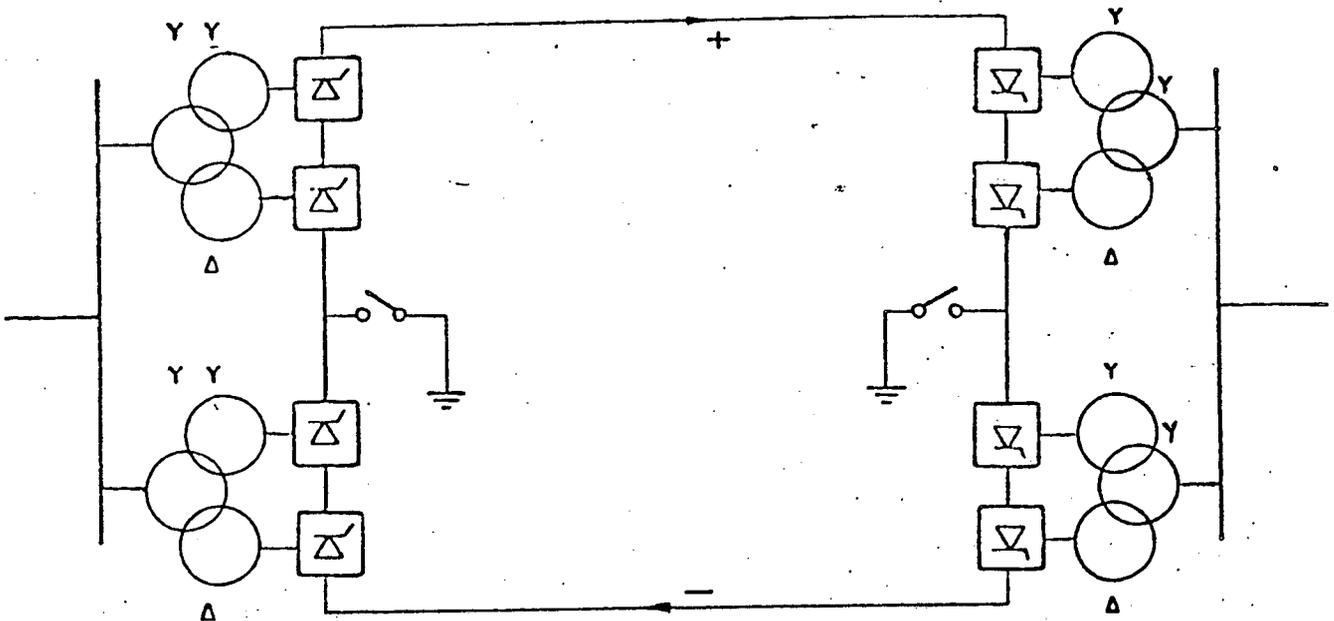


Figura 2.3 - Sistema Bipolar

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

- i) A alimentação CA dos conversores é feita através de f.e.m.'s senoidais e balanceadas;
- ii) As válvulas formando os conversores apresentam resistência nula no sentido de condução e infinita no caso oposto;
- iii) Os reatores  $L_d$ 's, instalados no lado CC, fazem com que a corrente CC seja perfeitamente contínua;
- iv) A ignição das válvulas ocorre em intervalos iguais a  $1/6$  de ciclo (ponte de 6 pulsos);
- v) A impedância que representa o sistema CA visto dos terminais dos conversores é considerada apenas como uma indutância  $L_c$ , e é, neste trabalho, admitida igual a indutância de dispersão dos transformadores que alimentam os conversores.

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

A resistência do sistema CA é desprezada no cálculo da impedância de comutação, devido ao seu efeito mínimo no comportamento dos conversores.

A indutância de comutação poderia incluir as demais indutâncias do sistema CA, mas ela é basicamente a dos transformadores das conversoras e, por simplicidade, foi esta a representação utilizada no programa desenvolvido.

### 2.3 - Análise da ponte conversora não considerando o ângulo de comutação ( $\mu$ )

As vantagens apresentadas pelas pontes trifásicas, tais como maiores valores de tensão e potência CC e não existência de componente contínua no secundário do transformador conectado ao conversor, que poderia saturá-lo [1], fazem com que sejam as únicas usadas para a transmissão em corrente contínua em alta tensão. Assim, toda a análise será feita unicamente para tais pontes.

Considere que os pulsos mostrados na Figura 2.4 sejam aplicados à porta ou gatilho das válvulas da ponte conversora A da figura 2.1. Nestas condições, a forma de onda da tensão na saída da ponte conversora ( $V_d$ ) é mostrada na Figura 2,5(a), para a sequência de pulsos da Figura 2.5(b).

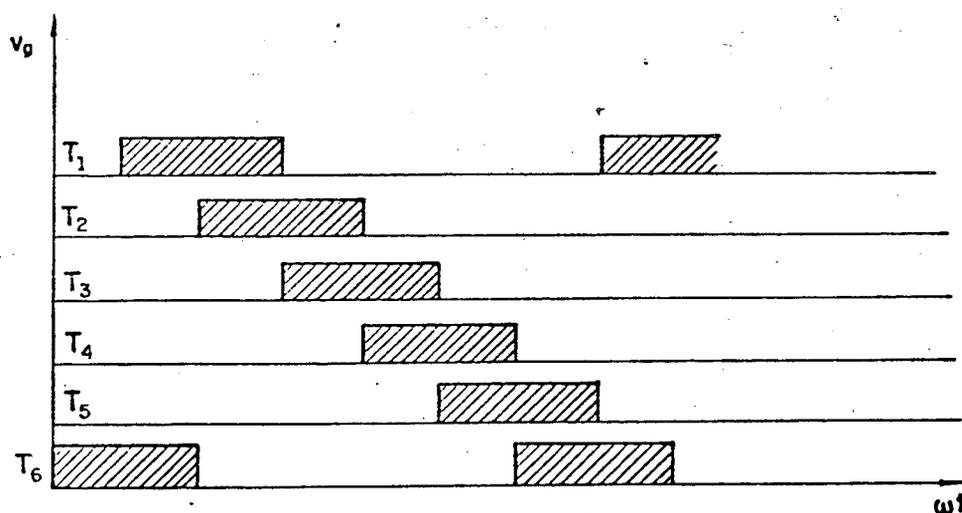


Figura 2.4 - Lógica de disparo (Sistema de pulsos)

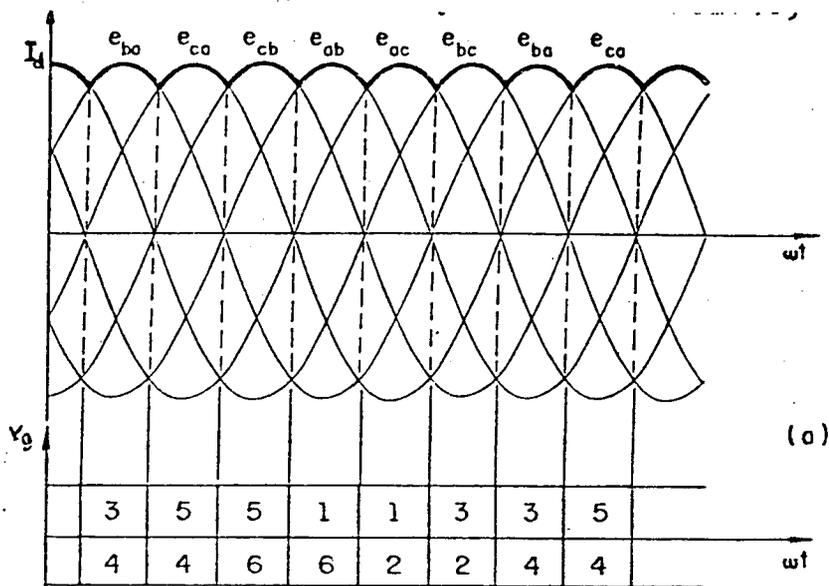


Figura 2.5 - (a) Tensão póló-póló  $v_d$

(b) Sequência dos pulsos de disparo

Pode-se verificar que a forma de onda da tensão  $v_d$ , tensão póló-póló, obtida pela diferença entre a tensão do terminal positivo da linha CC e a do terminal negativo, não é perfeitamente contínua.

A existência de um sistema de controle permite que os inícios dos pulsos aplicados aos tiristores sejam igualmente atrasados, prolongando o instante de comutação de uma válvula para outra. A Figura 2.6 mostra este ângulo de atraso ou ignição ( $\alpha$ ), que é medido em relação ao ângulo de comutação natural.

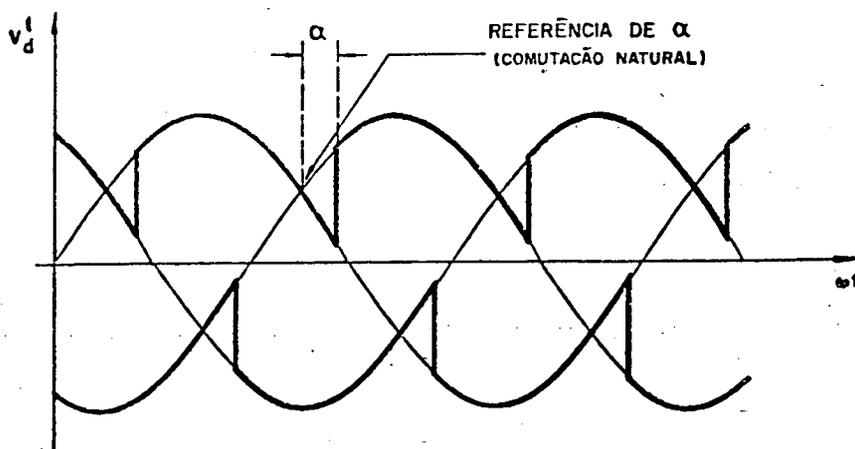


Figura 2.6 - Tensões póló-neutro, com ângulo de ignição ( $\alpha$ ) diferente de zero.

O valor médio da tensão  $V_d$ , representado por  $V_d$ , é dado pela expressão 2.1[2].

$$V_d = V_{do} \cos \alpha \quad (2.1)$$

$$\text{onde } V_{do} = 3\sqrt{3} \frac{E_m}{\pi} \quad (2.2)$$

$E_m$  = tensão máxima fase-neutro

Desta forma, o efeito do ângulo de atraso ( $\alpha$ ) é o de reduzir a tensão média  $V_d$ , variando de  $V_{do}$  ( $\alpha = 0^\circ$ ) até  $-V_{do}$  ( $\alpha = 180^\circ$ ).

Se for suposto que a ponte conversora A da Figura 2.1 seja retificadora, e a ponte B a inversora, tem-se que:

- a ponte A recebe pulsos de ignição com  $\alpha$  entre  $0$  e  $90^\circ$ , fazendo com que, em condições normais, a tensão média do retificador ( $V_{dr}$ ) seja positiva (curvas de (a) até (d), Figura 2.7).
- a ponte B recebe pulsos com  $\alpha$  entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ , fazendo com que, em condições normais, a tensão média no inversor ( $V_{di}$ ) seja negativa (curvas de (d) e (g), Figura 2.7).

Como o sentido da corrente  $I_d$  é único, esta só poderá existir se a tensão média  $V_d$  do retificador ( $V_{dr}$ ) for superior a do inversor ( $V_{di}$ ).

As correntes CA são constituídas por blocos de correntes, como é mostrado na Figura 2.8.

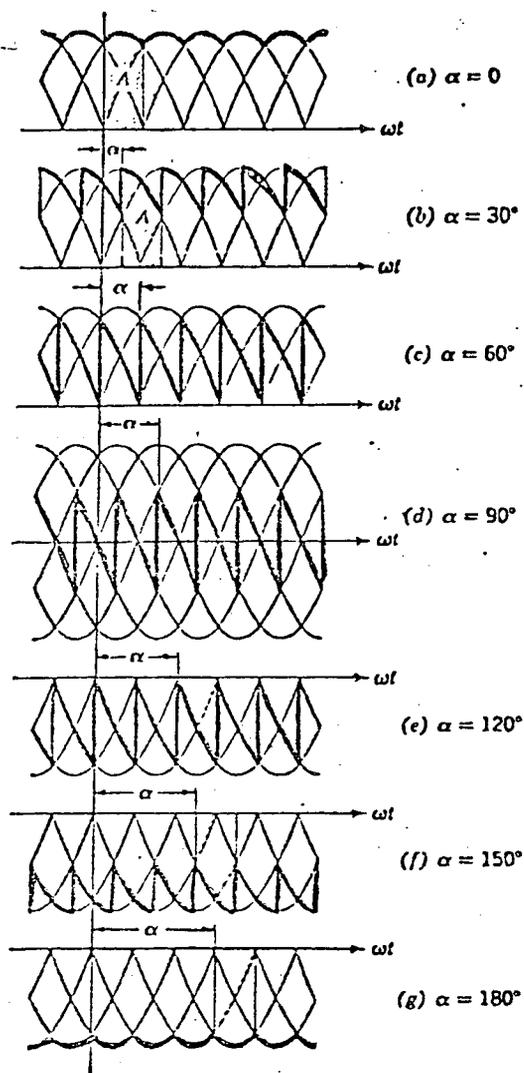


Figura 2.7 - Tensão  $v_d$  para diferentes  $\alpha$

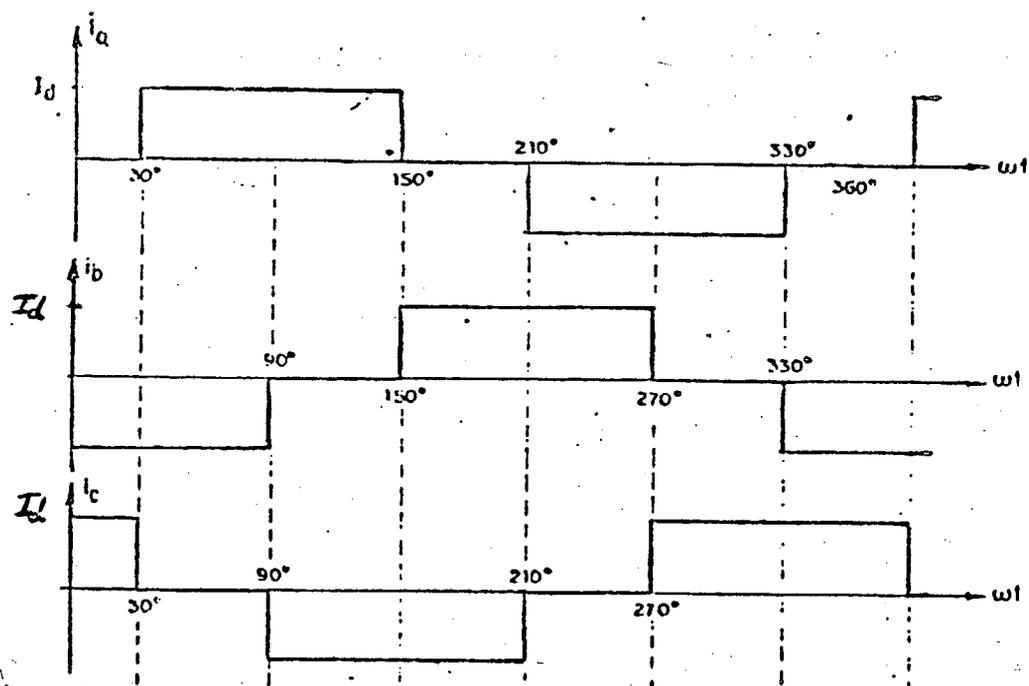


Figura 2.8 - Correntes secundárias, de linha, de alimentação dos conversores ( $\mu = 0^\circ$ ).

Se o ângulo de ignição ( $\alpha$ ) é zero, os blocos retangulares de corrente estão centralizados com respeito ao valor de pico das correspondentes tensões, e a componente fundamental da corrente está em fase com a tensão. Quando o ângulo  $\alpha$  é diferente de zero, os blocos de corrente e os respectivos valores da componente fundamental também se deslocam de  $\alpha$ , como o demonstrado a seguir.

Equacionando e resolvendo a série de Fourier para a forma de onda da corrente de linha dada pela Fig. 2.8, obtém-se a seguinte relação para a sua componente fundamental [2]:

$$I = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (2.3)$$

Utilizando-se as expressões 2.2 e 2.3 e considerando que a potência C.A. trifásica fornecida a um retificador ou recebida de um inversor, desprezando-se as perdas, é igual à potência C.C, obtém-se:

$$\cos\vartheta = \cos\alpha \quad (2.4)$$

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

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

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

Devido às indutâncias de comutação inerentes aos sis

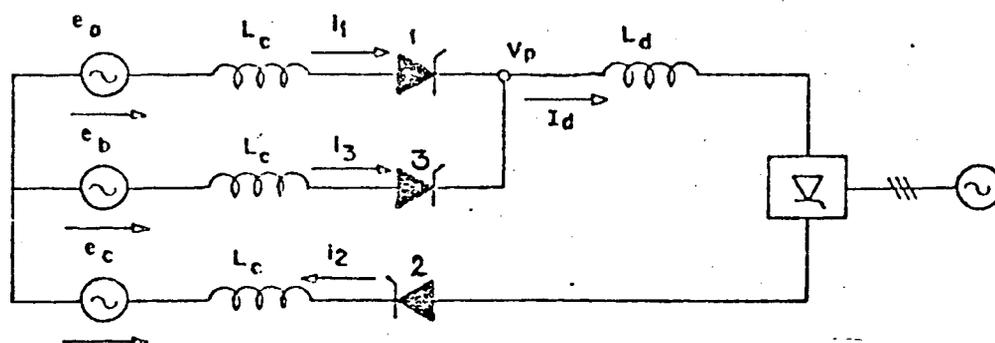
temas de corrente alternada conectados aos conversores, as correntes nas pontes não se transferem de um tiristor ao outro instantaneamente, processando-se dentro de um tempo finito, denominado "tempo de comutação", ou por vezes definido em termos de um "ângulo de comutação" ( $\mu$ ).

Em situações normais,  $\mu$  situa-se entre  $15^\circ$  e  $25^\circ$  mas, em condições de distúrbio, o valor deste ângulo pode ultrapassar  $60^\circ$ , fazendo com que possam existir intervalos em que mais de 3 válvulas estejam conduzindo simultaneamente.

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

#### 2.4.1 - Análise da ponte conversora operando como retificador considerando $\mu < 60^\circ$

Durante a comutação do tiristor 1 para o tiristor 3 (Figura 2.1), por exemplo, o circuito equivalente para uma das pontes é mostrado na Figura 2.9.



2.9 - Circuito da ponte conversora durante a comutação da válvula 1 para 3

Durante a comutação:

$$e_b - e_a = L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt} \quad (2.5)$$

mas,

$$e_b - e_a = \sqrt{3} E_m \sin \omega t \quad (2.6)$$

e

$$i_1 = I_d - i_3 \quad (2.7)$$

de onde se obtêm:

$$\frac{di_1}{dt} = - \frac{di_3}{dt} \quad (2.8)$$

Levando (2.6) e (2.8) em (2.5), tem-se:

$$\sqrt{3} E_m \sin \omega t = 2L_c \frac{di_3}{dt}, \text{ que resolvida em termos de } i_3:$$

$$i_3 = \int (\sqrt{3} E_m / 2L_c) \sin \omega t dt =$$

$$i_3 = -(\sqrt{3} E_m / 2\omega L_c) \cos \omega t + c_1 \quad (2.9)$$

Das condições iniciais,

$$i_3 = 0 \text{ para } \omega t = \alpha$$

que substituído em (2.9):

$$0 = -(\sqrt{3} E_m / 2\omega L_c) \cos \alpha + c_1$$

$$c_1 = (\sqrt{3} / 2\omega L_c) \cos \alpha$$

Então,

$$i_3 = I_{s2} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (2.10)$$

onde:

$$I_{s2} = \sqrt{3} E_m / 2\omega L_c$$

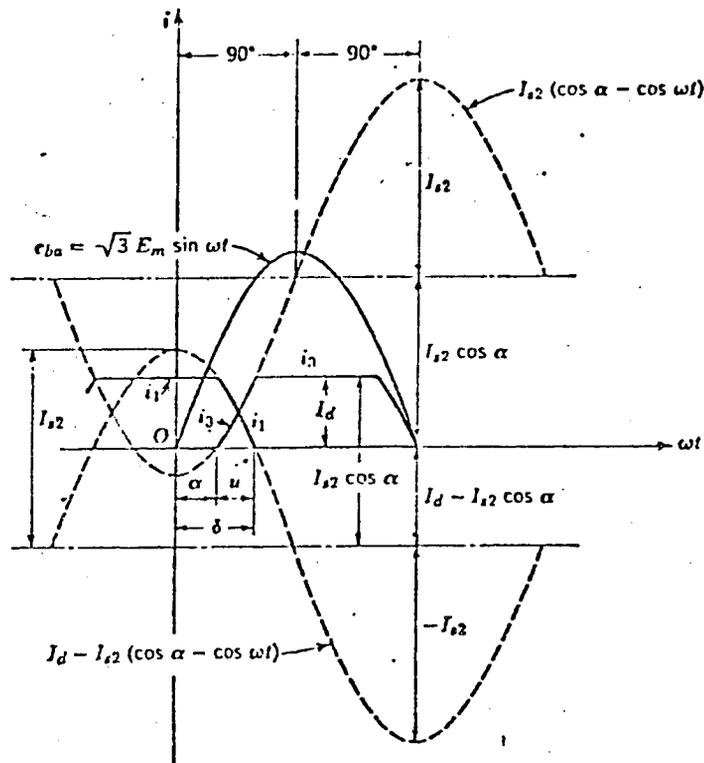


Figura 2.10 - Correntes de comutação de válvula 1 para a válvula 3

Observando-se a Figura 2.10, que mostra a forma de onda da corrente, tem-se que:

no início da comutação ( $\omega t = \alpha$ )

$$i_1 = I_d, \quad i_3 = 0$$

no final da comutação ( $\omega t = \delta$ )

$$i_1 = 0, \quad i_3 = I_d$$

onde:

$i_1$  = valor instantâneo da corrente na fase a

$i_3$  = valor instantâneo da corrente na fase b

$\delta = \alpha + \mu$  = ângulo de extinção

$\mu$  = ângulo de comutação

que substituído em (2.10):

$$I_d = I_{s2} (\cos \alpha - \cos \delta) \quad (2.11)$$

A tensão  $v_p$ , que corresponde a uma tensão polo-neutro durante a comutação (Figura 2.9), será:

$$v_p = e_a - L_c \frac{di_1}{dt} \quad (2.12)$$

ou

$$v_p = e_b - L_c \frac{di_3}{dt}$$

Somando membro a membro, e considerando a equação (2.8), tem-se:

$$2v_p = e_a + e_b$$

$$v_p = \frac{e_a + e_b}{2} \quad (2.13)$$

Assim, na figura 2.11 são mostradas as tensões pólo neutro que produzem a tensão  $V_d$  durante a comutação e, na Figura 2.12, a tensão pólo-pólo  $V_d$ .

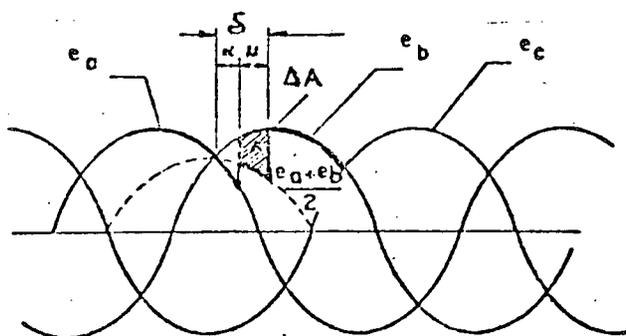


Figura 2.11 - Tensões pólo-neutro durante a comutação da válvula 1 para a válvula 3

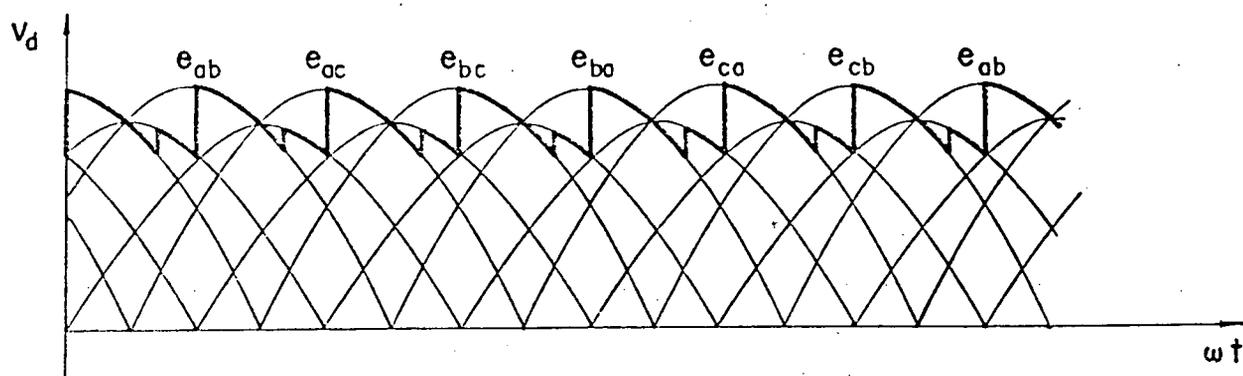


Figura 2.12 - Tensão pólo-pólo  $V_d$

Devido ao efeito das indutâncias, as formas de onda das correntes nas fases não são mais formadas pelos blocos retangulares da Figura 2.8, mas são alteradas com a consideração da indutância de comutação, como mostra a Figura 2.13.

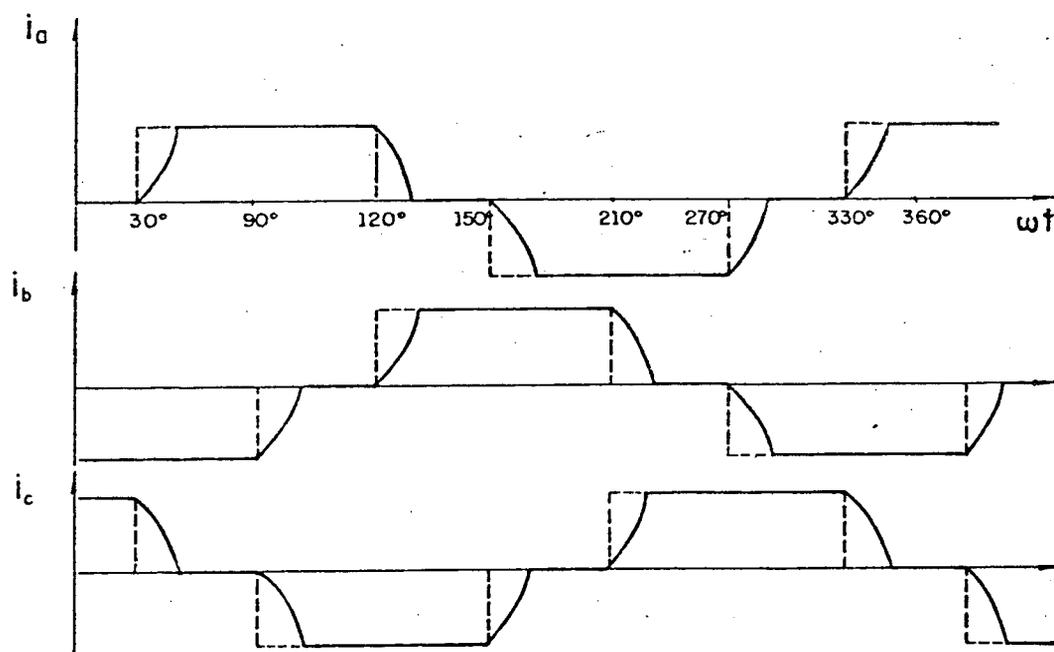


Figura 2.13 - Correntes secundárias, de linha, de alimentação dos conversores ( $\mu > 0^\circ$ )

Note-se, através da Figura 2.11, que, devido à perda de área introduzida pela comutação, há um decréscimo no va-

lor médio  $V_d$ . Esta área  $\Delta A$ , perdida em cada intervalo  $\pi/3$ , é da da por:

$$\Delta A = \int_{\alpha}^{\delta} \left( e_b - \frac{e_a + e_b}{2} \right) dt = \frac{\sqrt{3}}{2} \int_{\alpha}^{\delta} E_m \sin \omega t dt$$

$$\Delta A = \sqrt{3}/2 E_m (\cos \alpha - \cos \delta) \quad (2.14)$$

A correspondente queda de tensão média ( $V_d$ ) é:

$$\Delta V_d = (3/\pi) \Delta A$$

$$\Delta V_d = (3\sqrt{3}/2\pi) E_m (\cos \alpha - \cos \delta) \quad (2.15)$$

$$\Delta V_d = \frac{V_{do}}{2} (\cos \alpha - \cos \delta) \quad (2.16)$$

onde  $V_{do}$  é definido em (2.2).

Subtraindo (2.16) de (2.1):

$$V_d = V_{do} \cos \alpha - \Delta V_d$$

$$V_d = \frac{V_{do}}{2} (\cos \alpha + \cos \delta) \quad (2.17)$$

ou de outra forma, da equação 2.11:

$$(\cos \alpha - \cos \delta) = \frac{2\omega L_c I_d}{\sqrt{3} E_m}$$

Levando em (2.16):

$$\Delta V_d = \frac{V_{do}}{2} \frac{2\omega L_c I_d}{\sqrt{3} E_m} \quad (2.18)$$

Substituindo o valor de  $V_{do}$  em (2.18) e simplifican

do:

$$\Delta V_d = \frac{3\omega L_c}{\pi} I_d$$

$$\Delta V_d = \frac{3X_c}{\pi} I_d \quad (2.19)$$

Definindo:

$$R_c = \frac{3X_c}{\pi} \quad (2.20)$$

$$\Delta V_d = R_c I_d$$

que subtraído de (2.1):

$$V_d = V_{do} \cos \alpha - R_c I_d \quad (2.21)$$

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

Assim, a equação (2.21) sugere um circuito equivalente para a ponte conversora operando com retificador, que é mostrado na Figura 2.14.

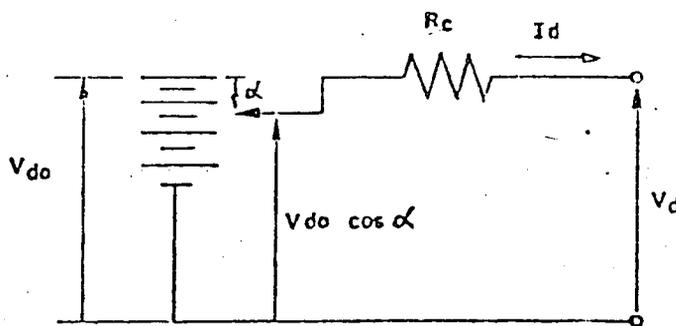


Figura 2.14 - Circuito equivalente para o retificador

A expressão (2.3) relaciona a componente fundamental da corrente CA de linha quando se idealiza a comutação. Se este efeito (comutação) é considerado, a presença do ângulo de comutação ( $\mu$ ) afeta a tensão C.C e a forma de onda da corrente C.A de linha, o que tende a afetar a relação dada pela expressão (2.3). Todavia, cálculos efetuados através de tratamento matemático

co exato, mostram que para  $\mu < 30^\circ$  os erros cometidos, em se continuar empregando a expressão 2.3, seriam da ordem de 1,1%, e da ordem de 4,3% para  $30 < \mu < 60^\circ$ . Assim, a utilização da expressão 2.3 pode ser mantida sem sacrifício significativo de precisão [2]:

Desta forma, tomando-se o mesmo procedimento adotado para obtenção da expressão 2.4, exceto que a expressão 2.2 é substituída pela expressão 2.17, obtém-se:

$$\cos \theta_r = \frac{1}{2} (\cos \alpha + \cos \delta) \quad (2.22)$$

Um tratamento exato por expansão em série de Fourier para a equação de forma de onda da corrente C.A de linha, leva a [2]:

$$\operatorname{tg} \theta_r = \frac{2\mu_r - \operatorname{sen} 2\alpha - \operatorname{sen} 2\delta}{\cos 2\alpha - \cos 2\delta} \quad (2.23)$$

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

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

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

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

A figura 2.15 ilustra estes ângulos, para retifica-

dor e inversor, quando da comutação da válvula 1 para a válvula 3.

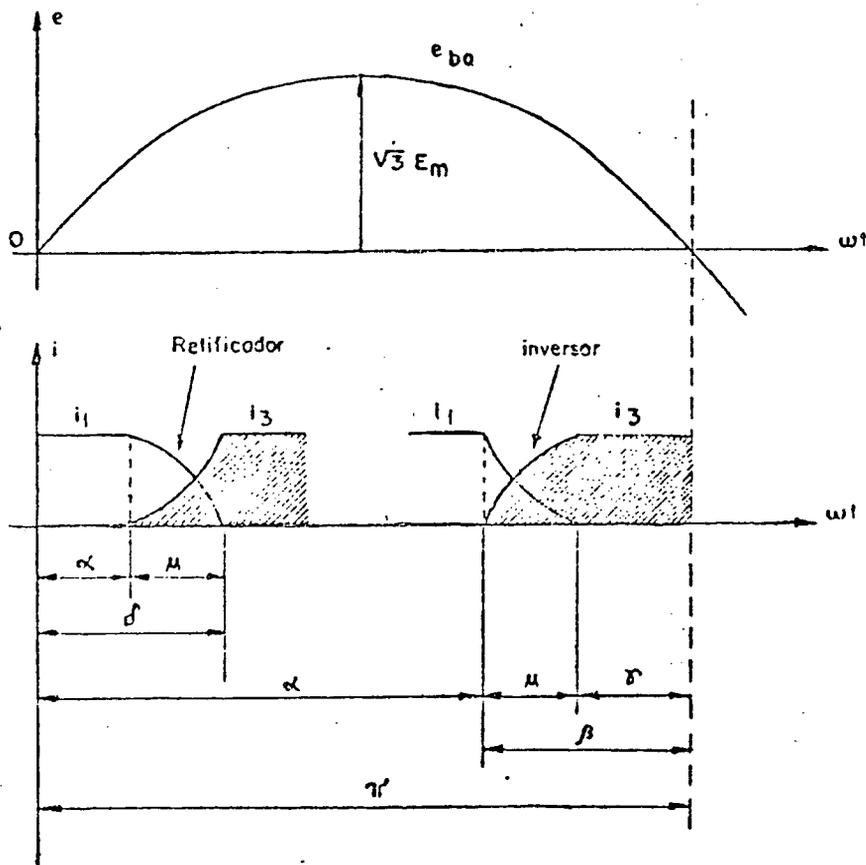


Figura 2.15 - Convenção dos ângulos do retificador e do inversor (comutação da válvula 1 para válvula 3).

Assim, tem-se:

$$\cos \alpha = -\cos \beta$$

$$\cos \gamma = -\cos \delta \quad (2.24)$$

Reescrevendo-se as equações (2.11), (2.17) e (2.21)

para o inversor:

$$I_d = (\sqrt{3} E_m / 2\omega L_c) (\cos \gamma - \cos \beta) \quad (2.25)$$

$$V_d = (-V_{do} / 2) (\cos \gamma + \cos \beta) \quad (2.26)$$

$$V_d = -V_{do} \cos \beta - R_c I_d \quad (2.27)$$

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

$$V_d = (V_{do}/2) (\cos\gamma + \cos\beta) \quad (2.28)$$

$$V_d = V_{do} \cos\beta + R_c I_d \quad (2.29)$$

Pode-se obter, explicitando  $\cos\beta$  na equação (2.28) e levando em (2.29):

$$V_d = V_{do} \cos\gamma - R_c I_d \quad (2.30)$$

Um circuito equivalente para o inversor é apresentado na Figura 2.16, e o circuito equivalente total para o sistema de transmissão CC é representado na Figura 2.17. É conveniente ressaltar que todo o equacionamento prévio refere-se à operação dos conversores sob regime permanente. Assim sendo, o circuito equivalente da figura 2.17 refere-se a esta condição de funcionamento.

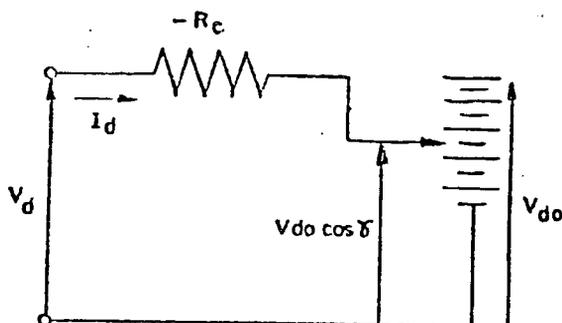


Figura 2.16 - Circuito equivalente para o inversor

A partir das mesmas afirmações feitas para obtenção da expressão 2.22, pode-se obter, de forma similar, a seguinte expressão para o inversor:

$$\cos \phi_i = \frac{1}{2} (\cos \gamma + \cos \beta) \quad (2.31)$$

Ainda de forma similar ao exposto para o retificador, adotando-se o tratamento exato, chega-se a:

$$\cos \phi_i = \frac{2\mu_i + \sin 2\gamma - \sin 2\beta}{\cos 2\gamma - \cos 2\beta} \quad (2.32)$$

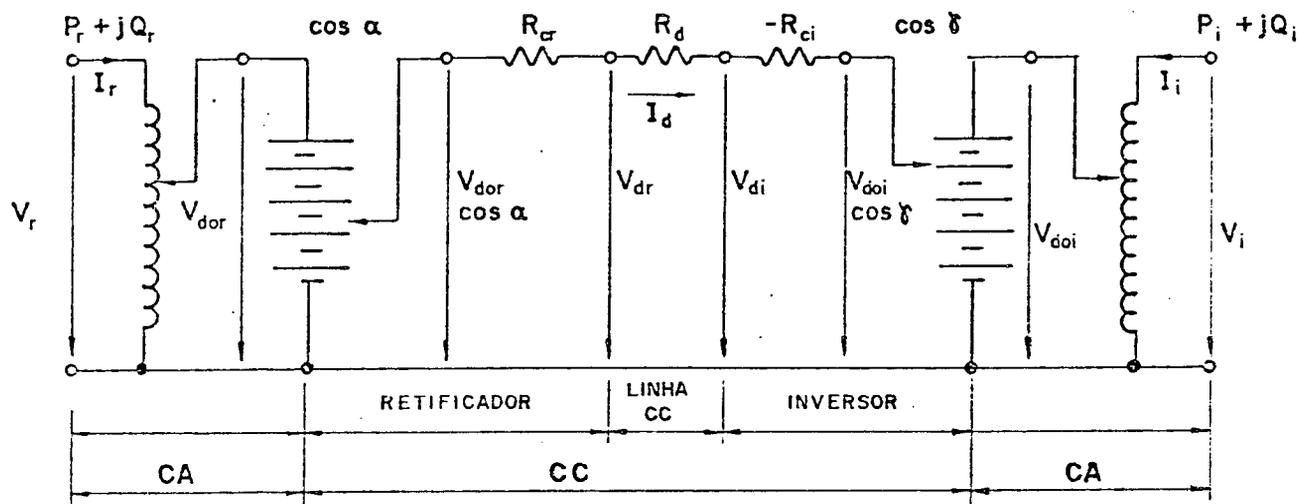


Figura 2.17 - Circuito equivalente para o sistema de transmissão cc

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

A potência CC é sempre transmitida de retificador para inversor, podendo se efetuar em qualquer dos dois sentidos, através da alteração do ângulo de ignição das pontes, transformando a ponte retificadora em inversora e vice-versa. No en-

tanto, mesmo que o sentido da potência se inverta, invertendo-se as tensões contínuas, o sentido da corrente C.C sempre se mantém o mesmo.

## 2.5 - Fenômeno da falha de comutação no inversor

Devido aos problemas que este fenômeno ocasiona na operação de um elo de corrente contínua, impondo limitações para o ângulo de ignição do inversor, uma rápida análise do efeito conhecido por falha de comutação torna-se necessária para o entendimento da operação da ponte inversora.

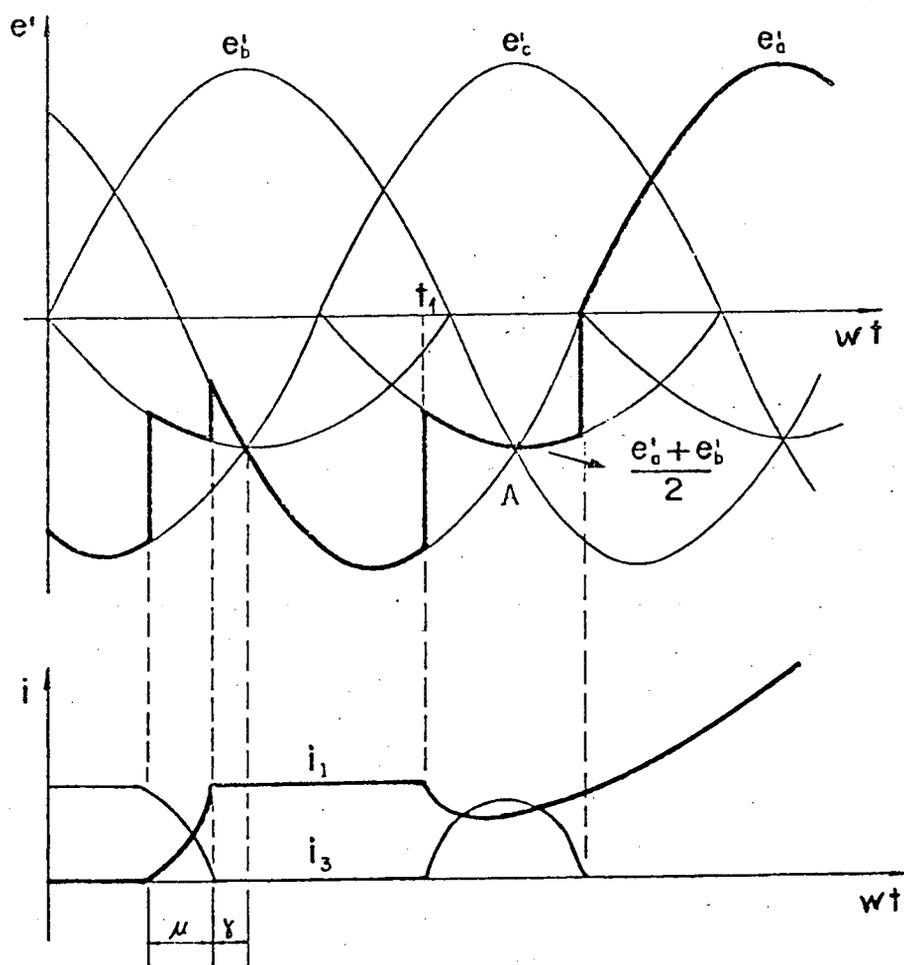


Figura 2.18 - Falha de comutação quando da comutação da válvula 1 para a válvula 3

Seja um inversor em operação e que, num dado momento, o tiristor  $T_1$  esteja conduzindo (Figura 2.1). No instante  $t_1$  (Figura 2.18), dispara-se  $T_3$ , que tem condição de conduzir, pois a sua tensão de anodo obedece a relação  $(e'_b - e'_a) > 0$ . Uma vez iniciada a comutação, ao atingir o ponto A,  $T_1$ , não se encontrando totalmente bloqueado, fará com que  $T_3$  seja inversamente polarizado  $(e'_b - e'_a) < 0$ . Nestas condições  $T_1$  retoma a corrente de carga, levando o conversor a operar como retificador e ocasionando elevada sobrecorrente no circuito.

Este fenômeno é denominado "Falha de Comutação", e só ocorre no inversor, pelo fato que estes operam com ângulos de ignição próximos de  $180^\circ$ .

Este fato resulta que, embora o ângulo máximo teórico de disparo dos tiristores, para funcionamento como inversor, seja  $180^\circ$ , por questões operacionais, ele é limitado a um valor inferior.

Matematicamente, para que não ocorra falha de comutação no inversor, tem-se que a relação a seguir deve ser obedecida:

$$(\alpha + \mu + \theta_0) < 180^\circ \quad (2.33)$$

onde  $\theta_0$  representa a margem necessária para o bloqueio completo do tiristor saindo de operação.

Da equação (2.33), tem-se:

$$(\alpha + \mu) < (180^\circ - \theta_0)$$

$$\cos(\alpha + \mu) > \cos(180^\circ - \theta_0)$$

$$\cos\delta > \cos(180^\circ - \theta_0)$$

Subtraindo  $\cos\alpha$  dos dois lados da desigualdade e multiplicando por  $(-1)$ , tem-se:

$$(\cos\alpha - \cos\delta) < \cos\alpha - \cos(180^\circ - \theta_0) \quad (2.34)$$

mas, da equação (2.11):

$$(\cos\alpha - \cos\delta) = (2X_c I_d / \sqrt{3}) E_m \quad (2.35)$$

Levando (2.35) em (2.34):

$$(2X_c I_d / \sqrt{3}) E_m < [\cos\alpha - \cos(180^\circ - \theta_0)] \quad (2.36)$$

A preservação da desigualdade (2.36) estabelece a condição de funcionamento normal do inversor. Como a reatância  $X_c$  é constante, falhas de comutação podem ocorrer se:

- i) o ângulo  $\alpha$  assumir valores elevados;
- ii) a corrente CC,  $I_d$ , atingir valores elevados;
- iii) a tensão da barra CA onde está conectado o inversor ( $E_m$ ) sofrer reduções demasiadas;

Assim, uma maior solicitação de corrente e/ou uma maior redução da tensão de alimentação irão provocar falhas de comutação, se não houver uma atuação do sistema de controle no sentido de diminuir o ângulo  $\alpha$  do inversor (aumentar  $\beta$ ).

## 2.6 - Arranjos das estações conversoras e suas influências nas equações e modelagem do ETCC

As correntes e tensões elevadas requeridas na transmissão de potência a grandes distâncias e as limitações construtivas das válvulas, impõem a utilização de arranjos, como aquele da figura 1, de forma a obter as tensões e/ou capacidade de condução de corrente desejados.

Para melhorar a capacidade de condução de corrente têm-se as seguintes possibilidades:

- a). Tiristores em paralelo compondo cada válvula da ponte;
- b). Pontes em paralelo;
- c). Combinações das soluções a e b

Para aumentar a tensão de operação, tem-se as seguintes possibilidades:

- a). Tiristores em série em cada válvula da ponte
- b). Pontes em série
- c). Combinação das soluções a e b.

As expressões anteriores foram obtidas a partir de uma única ponte de 6 (seis) pulsos. Para um ETCC com " $N_s$ " pontes por polo e " $P$ " polos, as expressões desenvolvidas, admitindo-se simetria operacional, levam a:

$$V_{drt} = N_s (V_{d0r} \cos\alpha - R_{cr} I_d) \quad (2.37)$$

$$V_{dit} = N_s (V_{d0i} \cos\gamma - R_{ci} I_d) \quad (2.38)$$

$$V_{drt} = V_{dit} + R_L I_d \quad (2.39)$$

$$V_{drt} = \frac{V_{d0r} \cdot N_s}{2} (\cos\alpha + \cos\delta) \quad (2.40)$$

$$V_{dit} = \frac{V_{d0i} \cdot N_s}{2} (\cos\alpha + \cos\delta) \quad (2.41)$$

onde

$V_{drt}$  = tensão C.C polo-terra, na saída da estação retificadora

$V_{dit}$  = tensão C.C polo-terra, na saída da estação inversora

$R_L$  = resistência elétrica de um polo

A razão da introdução das constantes multiplicativas está no fato que, visto pelo lado C.C, todas as pontes estão em série, portanto as tensões e resistências individuais de

verão ser multiplicadas pelo número total de pontes de 6 (seis) pulsos.

## 2.7 - Filosofia de controle de operação de um ETCC

O sistema C.C pode operar dentro de duas filosofias de controle, que são:

- a) Transmitir potencia constante
- b) Transmitir corrente constante

Uma condição comum de operação de um ETCC é transmitir um valor de potência ( $P_d$ ) fixado pelo centro do despacho de carga. Entretanto, mesmo para este caso, a obtenção de  $P_d$  se faz através do controle direto da corrente de referência ( $I_{do}$ ). Para tanto utiliza-se do controle do ângulo de ignição ( $\alpha$ ) e do controle dos taps dos transformadores dos conversores, no sentido de se obter uma característica  $V_d \times I_d = P_d$  constante. Este trabalho não se propõe discutir particularidades do controle e sim a partir de uma dada potência que se deseja transmitir, num dado instante de operação, determinar todos os parâmetros operacionais do ETCC. Dessa forma, para se obter uma formulação matemática adequada à realidade de operação do ETCC, é necessário que se façam algumas considerações de ordem prática:

- a. O ângulo de extinção  $\gamma$ , conforme visto em parágrafos anteriores, não deve atingir valores transitórios inferiores a  $89^\circ$  no sentido de se evitar falhas de comutação. Usualmente, tal como utilizado neste trabalho, que trata o ETCC em regime permanente, o ângulo  $\gamma$  é mantido constante na faixa de  $169^\circ$  a  $189^\circ$ .

- b. O ângulo de ignição  $\alpha$  deve ser mantido entre  $10^\circ$  e  $17^\circ$  no sentido de se ter boa flexibilidade de operação bem como reduzidas as perdas, o consumo de reativos, aliviar a operação das válvulas e ainda proporcionar recursos para atender variações extremas de  $\alpha$  sob condições transitórias.
- c. Para se evitar os casos em que se torne necessária a violação dos limites de  $\alpha$  determinados no item b, entra em ação a variação dos taps dos transformadores dos conversores, sempre procurando manter constante a potência a ser transmitida ( $P_d$ ) e minimizar o consumo de reativos.

A partir do exposto, considerando a tensão CC na saída do retificador, com base na figura 2.17, obtém-se as seguintes expressões  $V_d$ :

$$V_d = V_{dor} \cos \alpha - R_{cr} I_d \quad (2.42)$$

$$V_d = V_{doi} \cos \gamma - (R_{ci} - R_d) I_d \quad (2.43)$$

A potência especificada  $P_d$  a ser transmitida pelo ETCC fornece a seguinte relação:

$$I_d = \frac{P_d}{V_d} \quad (2.44)$$

Substituindo (2.44) em (2.43), obtém-se a seguinte expressão para  $V_d$ :

$$V_d^2 - V_d \cdot V_{di} \cdot \cos \gamma + (R_{ci} - R_d) P_d = 0 \quad (2.45)$$

O valor positivo de  $V_d$  obtido a partir da solução da equação (2.45) será a tensão  $V_d$  de operação do ETCC para uma posição determinada do tap do transformador do inversor. Como se

ponde observar pela expressão (2.45), a tensão  $V_d$ , ~~para uma dada~~ da potência  $P_d$ , varia com o tap do transformador do inversor, assim se pode concluir que o controle da tensão  $V_d$  do ETCC, operando em regime permanente, pertence ao inversor.

A partir da expressão de  $V_d$  (2.45) e das demais expressões desenvolvidas nos parágrafos precedentes, pode-se obter o ponto de operação do ETCC. Considerando que o ângulo de extinção  $\gamma$  é mantido constante, e que, o ângulo de ignição  $\alpha$  e os taps dos transformadores dos conversores possam sofrer variações, pode-se, então, procurar um ponto ótimo de operação onde se tenha o menor consumo de reativos possível bem como uma corrente  $I_d$  tal que resulte numa menor perda na transmissão da potência  $P_d$  especificada.

Desta forma, com base no exposto, podem-se estabelecer os seguintes casos de operação do ETCC transmitindo  $P_d$  constante:

- a. Operação com taps dos transformadores dos conversores fixos, apenas  $\alpha$  podendo sofrer variações dentro de sua faixa de operação.
- b. Operação com transformadores de taps variáveis alimentando os conversores e  $\alpha$  variável dentro de sua faixa normal.

As figuras 2.19 e 2.20, a seguir, ilustram os dois casos descritos, para uma dada potência  $P_d$ :

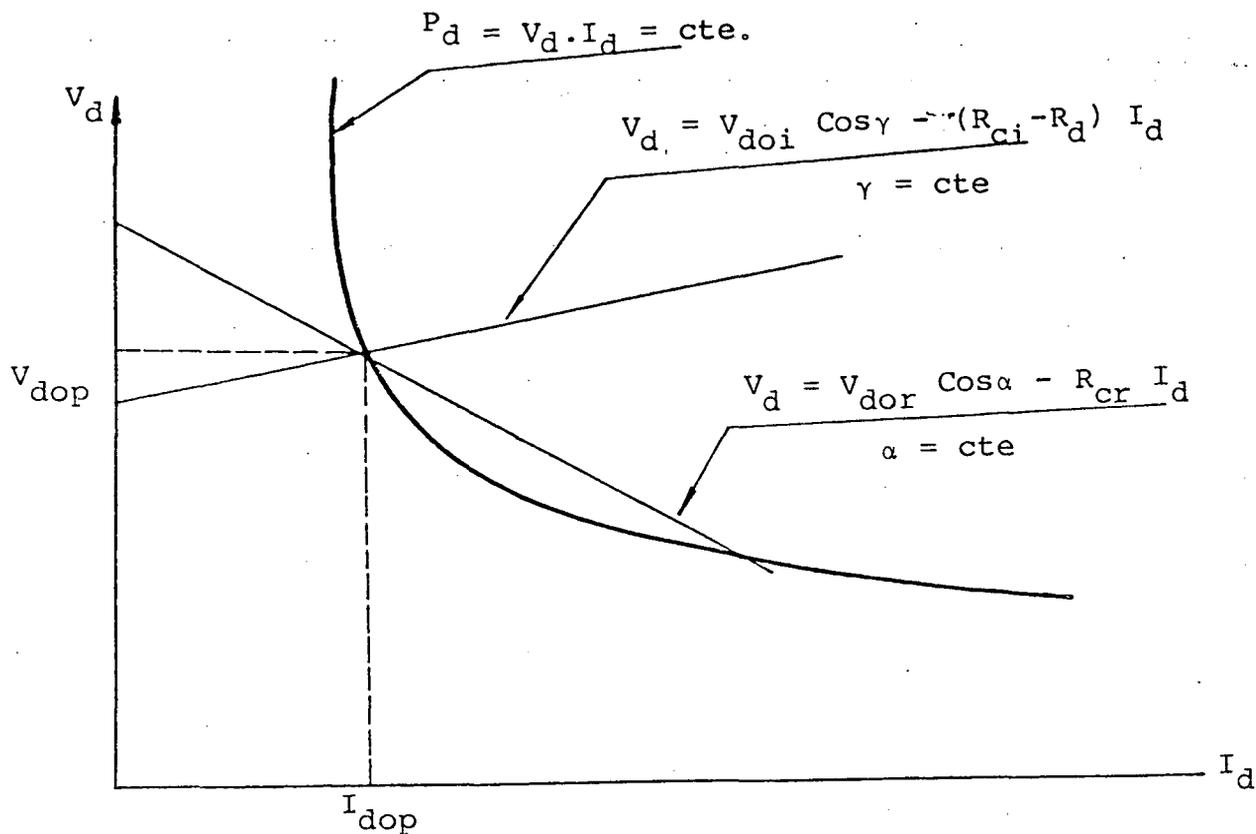


Figura 2.19 - ETCC transmitindo  $P_d$  constante com taps fixos dos transformadores dos conversores

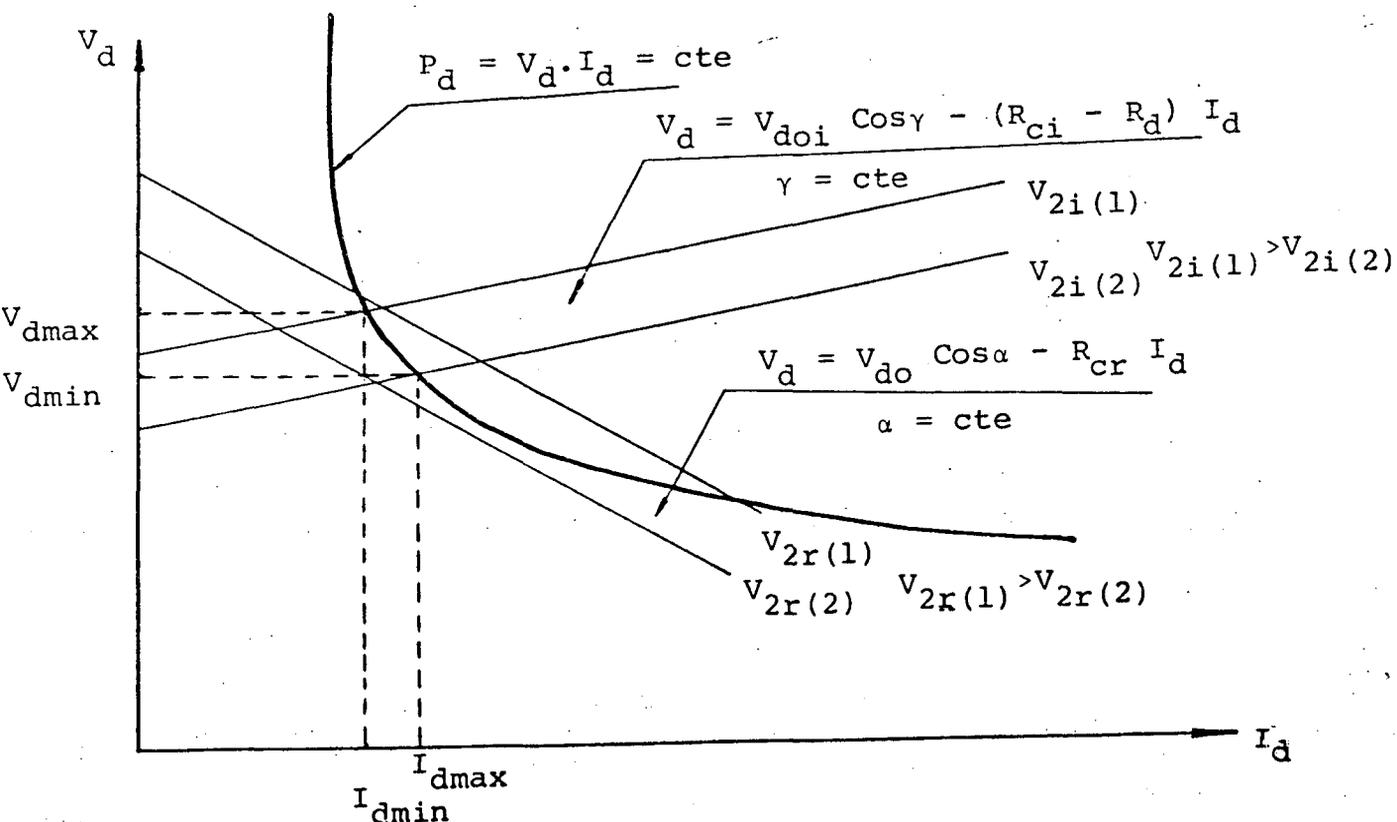


Figura 2.20 - ETCC transmitindo  $P_d$  constante com taps variáveis dos transformadores dos conversores, sendo  $V_{2r}$ ,  $V_{2i}$  as tensões C.A secundárias.

Pode-se observar pelas Figuras 2.19 e 2.20, que o ponto de operação do ETCC em regime permanente, obedecerá a característica  $V_d \times I_d = P_d = \text{constante desejada}$ .

## 2.8 - Cálculo das Potências Ativas e Reativas nas barras primárias dos transformadores que alimentam os conversores

No item anterior foram discutidas as adaptações necessárias às expressões, de forma a acomodá-las para uma estação conversora completa. Constatou-se então que qualquer das expressões deduzidas pode, com grande facilidade, condicionar-se a uma única ponte de 6 pulsos, um conjunto de 12 pulsos, a uma estação polo-terra ou mesmo a uma estação completa.

Admitindo-se que para uma mesma estação conversora todas as pontes e transformadores de alimentação sejam semelhantes, então o cálculo das potências ativa e reativa total pode ser feito por ponte. O resultado final será então multiplicado pelo número de pontes e polos.

O circuito equivalente para uma única ponte é dado pela Figura 2.21.

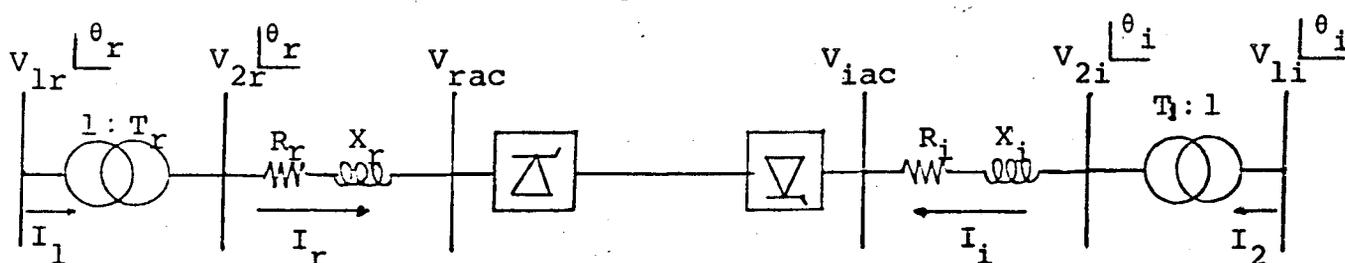


Figura 21 - Diagrama unifilar geral para um sistema AC-DC com uma ponte de 6 pulsos

Com base na figura 2.21 e nos parágrafos precedentes, podem ser desenvolvidas as expressões a seguir:

Para o retificador:

$$\frac{\dot{V}_{2r}}{\sqrt{3}} = (R_r + jX_r) \dot{I}_r + \frac{P_r + jQ_r}{3 \cdot \dot{I}_r^*} \quad (2.46)$$

sendo:

$$I_r = \frac{I_d \cdot \sqrt{6}}{\eta}$$

para o inversor:

$$\frac{\dot{V}_{2i}}{\sqrt{3}} = (R_i + jX_i) \dot{I}_i + \frac{P_i + jQ_i}{3 \cdot \dot{I}_i^*} \quad (2.47)$$

sendo:

$$I_i = \frac{I_d \cdot \sqrt{6}}{\eta}$$

A partir destas expressões obtem-se:

$$R_e(\dot{I}_r) = \frac{\sqrt{3}}{V_{2r}} \left[ \frac{P_r \cos\theta_r + Q_r \operatorname{sen}\theta_r}{3} + I_r^2 (R_r \cos\theta_r + X_r \operatorname{sen}\theta_r) \right] \quad (2.48)$$

$$R_e(\dot{I}_i) = \frac{\sqrt{3}}{V_{2i}} \left[ \frac{P_i \cos\theta_i + Q_i \operatorname{sen}\theta_i}{3} + I_i^2 (R_i \cos\theta_i + X_i \operatorname{sen}\theta_i) \right] \quad (2.49)$$

$$I_m(\dot{I}_r) = \frac{\sqrt{3}}{V_{2r} \cos\theta_r} \left[ R_e(\dot{I}_r) \operatorname{sen}\theta_r \cdot \frac{V_{2r}}{\sqrt{3}} - I_r^2 X_r - \frac{Q_r}{3} \right] \quad (2.49)$$

$$I_m(\dot{I}_i) = \frac{\sqrt{3}}{V_{2i} \cos\theta_i} \left[ R_e(\dot{I}_i) \operatorname{sen}\theta_i \cdot \frac{V_{2i}}{\sqrt{3}} - I_i^2 X_i - \frac{Q_i}{3} \right] \quad (2.51)$$

Assim:

$$R_e(\dot{I}_1) = T_r \cdot R_e(\dot{I}_r) \quad (2.52)$$

$$R_e(\dot{I}_2) = T_i \cdot R_e(\dot{I}_i); \text{ onde:} \quad (2.53)$$

$T_r, T_i$  - Relação de transformação dos transformadores dos conversores.

$$I_m(\dot{I}_1) = T_r \cdot I_m(\dot{I}_r) \quad (2.54)$$

$$I_m(\dot{I}_2) = T_i \cdot I_m(\dot{I}_i) \quad (2.55)$$

Tendo-se em vista que  $P + jQ = \dot{V} \cdot \dot{I}^*$ , então, na barra primária do transformador do retificador, têm-se as seguintes expressões para as potências trifásicas:

$$P_{1r} = 3 \frac{V_{1r}}{\sqrt{3}} \left[ R_e(\dot{I}_1) \cos\theta_r + \frac{V_{1r}}{\sqrt{3}} I_m(\dot{I}_1) \operatorname{sen}\theta_r \right] \quad (2.56)$$

$$Q_{1r} = 3 \frac{V_{1r}}{\sqrt{3}} \left[ R_e(\dot{I}_1) \operatorname{sen}\theta_r - \frac{V_{1r}}{\sqrt{3}} I_m(\dot{I}_1) \cos\theta_r \right] \quad (2.57)$$

De forma similar, na barra primária do transformador do inversor, tem-se:

$$P_{1i} = 3 \frac{V_{1i}}{\sqrt{3}} \left[ R_e(\dot{I}_2) \cos\theta_i + \frac{V_{1i}}{\sqrt{3}} \cdot I_m(\dot{I}_2) \operatorname{sen}\theta_i \right] \quad (2.58)$$

$$Q_{1i} = 3 \frac{V_{1i}}{\sqrt{3}} \left[ R_e(\dot{I}_2) \operatorname{sen}\theta_i - \frac{V_{1i}}{\sqrt{3}} I_m(\dot{I}_2) \cos\theta_i \right] \quad (2.59)$$

As potências totais nas barras primárias dos transformadores dos conversores serão dadas por:

$$P_{1rt} = N_s \cdot P \cdot P_{1r} \quad (2.60)$$

$$Q_{1rt} = N_s \cdot P \cdot Q_{1r} \quad (2.61)$$

$$P_{1it} = N_s \cdot P \cdot P_{1i} \quad (2.62)$$

$$Q_{1it} = N_s \cdot P \cdot Q_{1i} \quad (2.63)$$

A partir dos desenvolvimentos anteriores, um sistema elétrico completo, como aquele da figura 2.22, associado a um ETCC pode ser tratado como um circuito análogo ao dado pela figura 2.23, onde se verifica a substituição das estações retificadora e inversora por duas injeções de potência ( $P$ ,  $Q$ ) sendo estes valores dependentes de  $V_r$  e  $V_i$ .

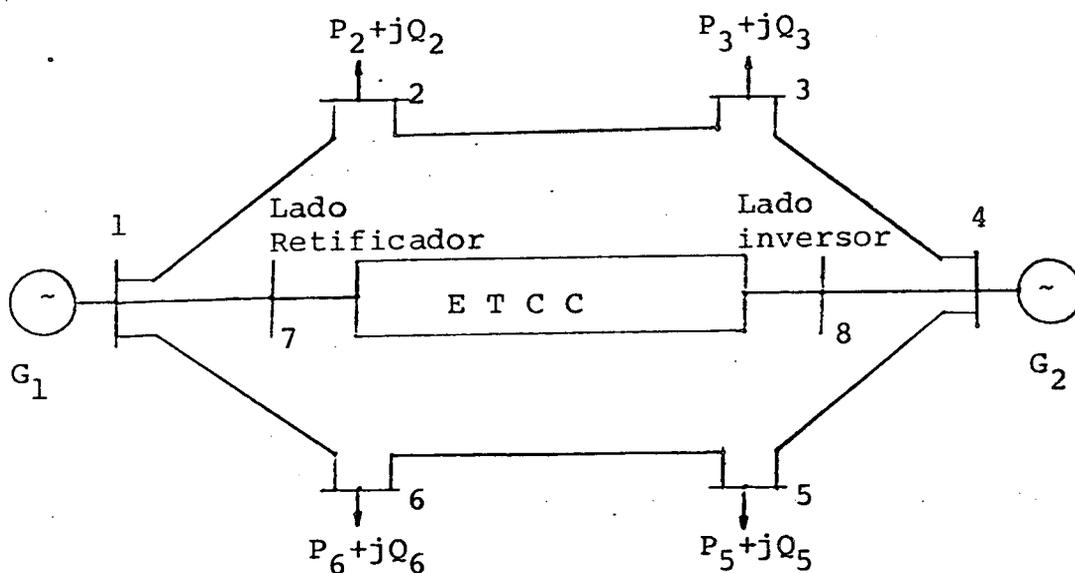


Figura 2.22 - Diagrama unifilar de um sistema C.A-CC

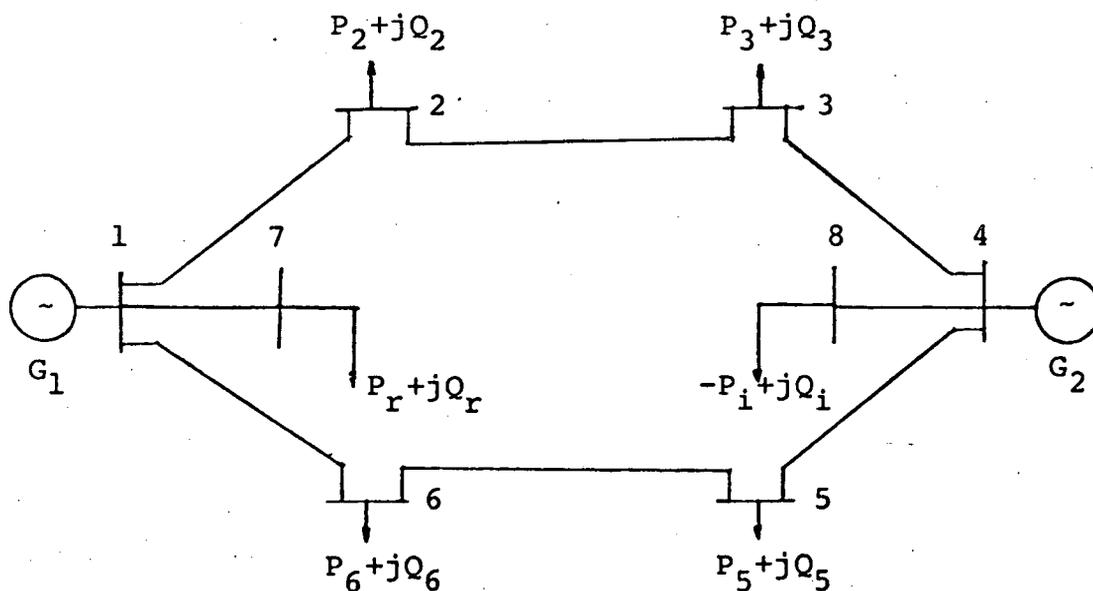


Figura 2.23 - Diagrama unifilar equivalente do sistema CA-CC da figura 2.22.

Neste ponto, todos os subsídios, necessários à implementação digital que determine os parâmetros, do ETCC, são conhecidos e pode-se, então, passar a formulação do programa digital, utilizado neste capítulo, já na forma adequada para utilização acoplada aos programas de fluxo de carga.

## 2.9 - Algoritmo para implementação digital

Para analisar e procurar um ponto de operação do ETCC que atenda as equações e objetivos propostos nos itens precedentes, descreve-se a seguir o algoritmo elaborado para uso em computadores digitais.

A filosofia básica do método consiste em procurar transmitir uma potencia constante ( $P_d = V_d \cdot I_d$ ) com a maior tensão  $V_d$  possível, sem entretanto violar os limites de tensão e corrente, e ainda, procurar operar com o menor consumo de reativos.

Referindo-se a Figura 2.21, são necessárias as seguintes informações para que o programa digital calcule os parâmetros do ETCC para os objetivos definidos:

- a- Tensão e ângulo na barra primária dos transformadores do retificador e do inversor  $V_{lr}$  e  $\theta_r$ ,  $V_{li}$  e  $\theta_i$
- b- Relação de transformação nominal dos transformadores dos conversores -  $T_r$ ,  $T_i$
- c- Resistências e reatâncias dos transformadores dos conversores  $R_r$ ,  $X_r$ ,  $R_i$ ,  $X_i$
- d- Ângulo de extinção Gama ( $\gamma$ )

- e- Resistência de linha do ETCC- $R_d$
- f- Limites da tensão de operação  $V_d$
- g- Limites de corrente de operação  $I_d$
- h- Limites de operação do ângulo de ignição ( $\alpha$ )

A partir destas informações, pode-se, então, desenvolver o programa digital segundo o algoritmo a seguir:

- a- Faz-se a leitura dos dados de entrada e calcula-se a tensão de operação  $V_d$  e ângulo de ignição  $\alpha$  a partir das expressões (2.45) e (2.42) para condição nominal dos taps dos transformadores dos conversores,
- b- Verifica-se a violação ou não dos limites operacionais do ETCC (tensão  $V_d$  e corrente  $I_d$ ).
- c- Se os limites forem obedecidos, ajustam-se os taps dos transformadores, buscando a otimização da operação do ETCC.
- d- Se os limites forem violados, ajustam-se os taps dos transformadores dos conversores buscando alcançar as faixas recomendadas e otimizar a operação.
- e- Uma vez obtida a solução, emite-se um relatório de saída e o processamento é interrompido.
- f- Se a solução não existir, emite-se uma mensagem de erro e o processamento é interrompido.

Para o algoritmo acima é apresentado, a seguir, o fluxograma que deu origem ao programa digital que analisa o fluxo de potência no ETCC e nos seus barramentos CA alimentadores. Neste fluxograma foi adotada a seguinte simbologia:

$V_r$  = Tensão de Operação do retificador (Ponto "A" da Figura 14)

$a = V_{doi} \cos \gamma = 1,35 \cdot V_{2i} \cdot \cos \gamma$

$b = (R_i - \frac{3}{\pi} X_i) = R_i - 0,954 \cdot X_i$

$c = \frac{\pi}{3} \cdot X_r \cdot I_d = 0,954 \cdot X_r \cdot I_d$

$d = 1,35 V_{2r}$

$X_i$  = Reatância do transformador do inversor

$X_r$  = Reatância do transformador do retificador

$V_{2i}$  = Tensão no secundário do transformador do inversor

$V_{2r}$  = Tensão no secundário do transformador do retificador

$V_{2ro}$  = Tensão no secundário do transformador do retificador para o TAP nominal

$V_{2io}$  = Tensão no secundário do transformador do inversor para o TAP nominal

$P$  = Potencia que se deseja transmitir

$V_m$  = Limite superior da tensão de operação do ETCC

$V_n$  = Limite inferior da tensão de operação do ETCC

$I_d$  = Corrente conduzida pelo ETCC

$I_m$  = Limite superior da corrente de operação do ETCC

$\alpha_m$  = Limite superior da faixa de operação do angulo  $\alpha$

$\alpha_{oi}$  = Limite inferior da faixa de operação do angulo  $\alpha$

$T_r$  = Passo para a variação do tap do transformador do retificador

$T_i$  = Passo para variação do tap do transformador do inversor

Mensagem nº 1 - "Impossível transmitir a potência desejada sem violar o limite superior da faixa de operação do ângulo  $\alpha$ ".

Mensagem nº 2 - "Impossível transmitir a potência desejada sem violar o limite superior da tensão do elo".

$I_n$  = Limite inferior da corrente de operação do ETCC

$V_{2im}$  = Tap superior para  $V_{2i}$

$V_{2in}$  = Tap inferior para  $V_{2i}$

$V_{2rm}$  = Tap superior para  $V_{2r}$

$V_{2rn}$  = Tap inferior para  $V_{2r}$

$\alpha$  = ângulo de ignição do retificador

$s$  = Passo para variação do ângulo  $\alpha$

$\gamma$  = ângulo de extinção do inversor

Mensagem nº 3 = "Para transmitir a potência desejada é necessário violar o limite inferior da faixa de variação de  $\alpha$ ".

Mensagem nº 4 = "Elo transmitirá a potência desejada com  $\alpha$  dentro da faixa, um passo abaixo do  $\alpha_o$  ótimo".

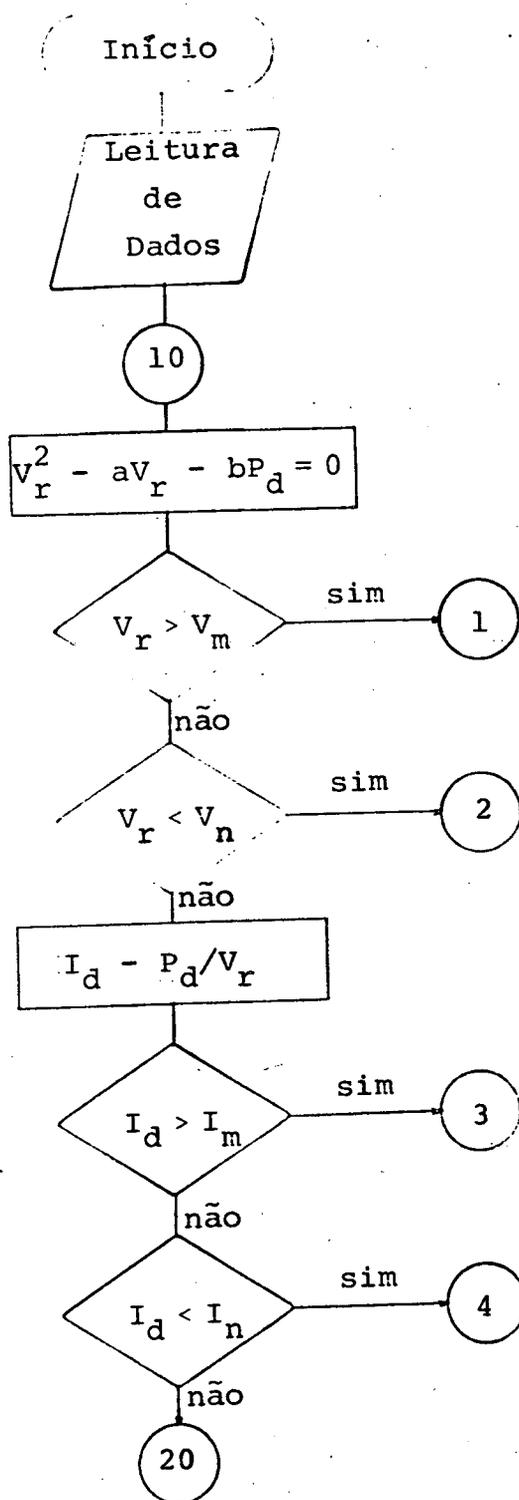
Mensagem nº 5 = "Elo transmitirá a potência desejada com dentro da faixa, acima do valor de  $\alpha_o$  ótimo".

Mensagem nº 6 = "Impossível transmitir a potência desejada sem violar o limite inferior da tensão de operação do elo".

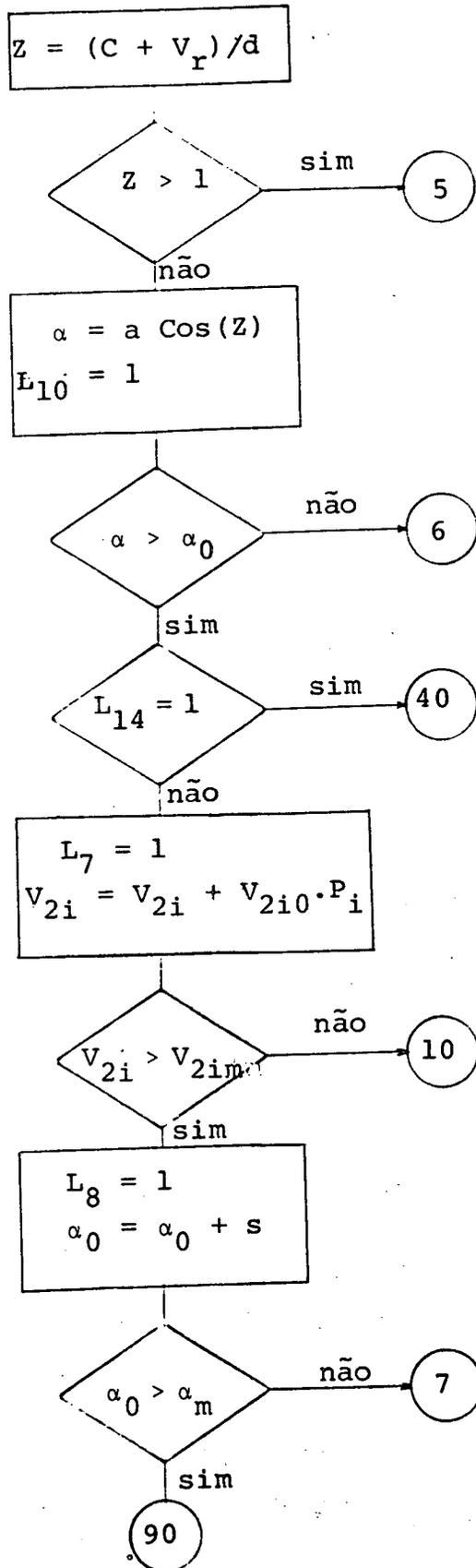
Mensagem nº 7 = "Impossível transmitir a potência desejada sem violar o limite superior de corrente do elo".

Mensagem nº 8 = "Impossível transmitir a potência desejada sem violar o limite inferior de corrente do elo".

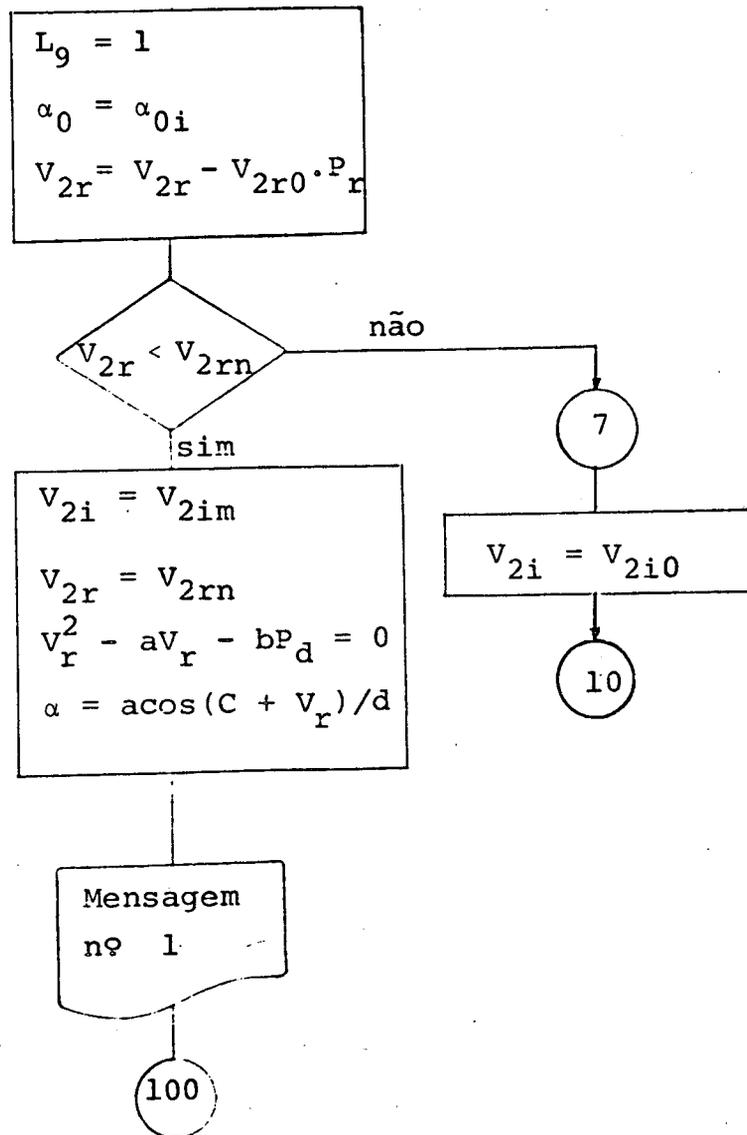
Mensagem nº 9 = "Não há  $\alpha$  capaz de manter a operação do elo para a potência desejada".

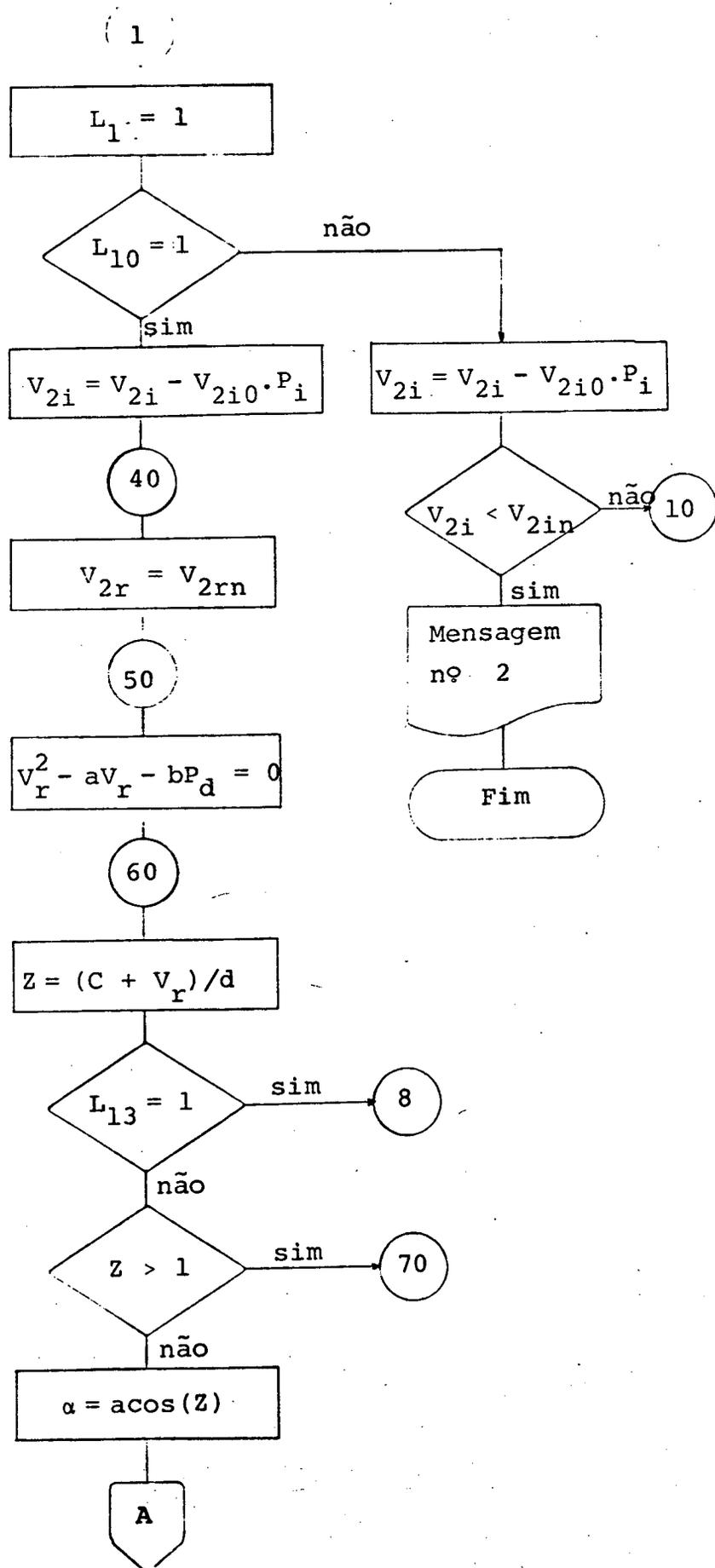


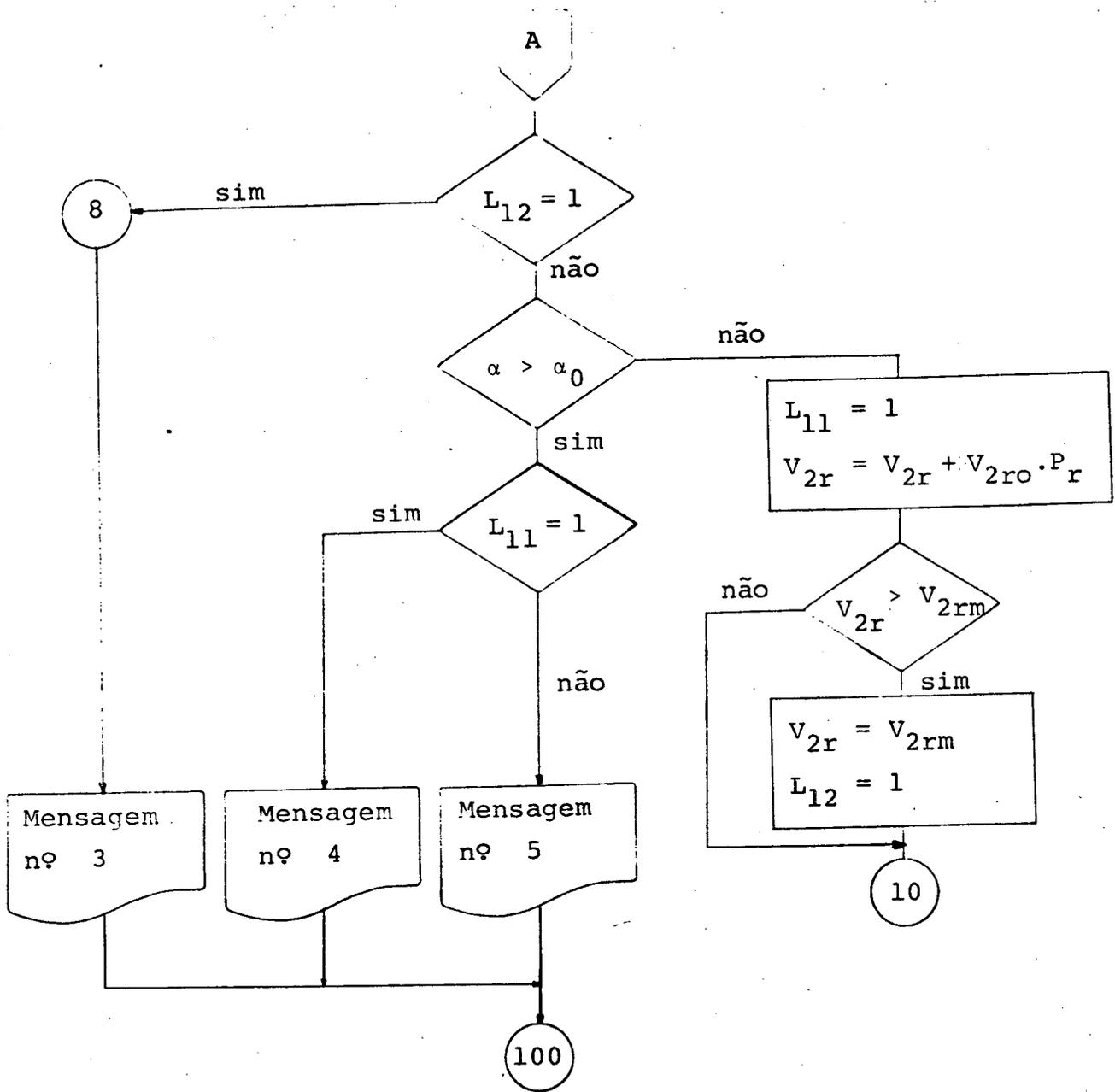
20

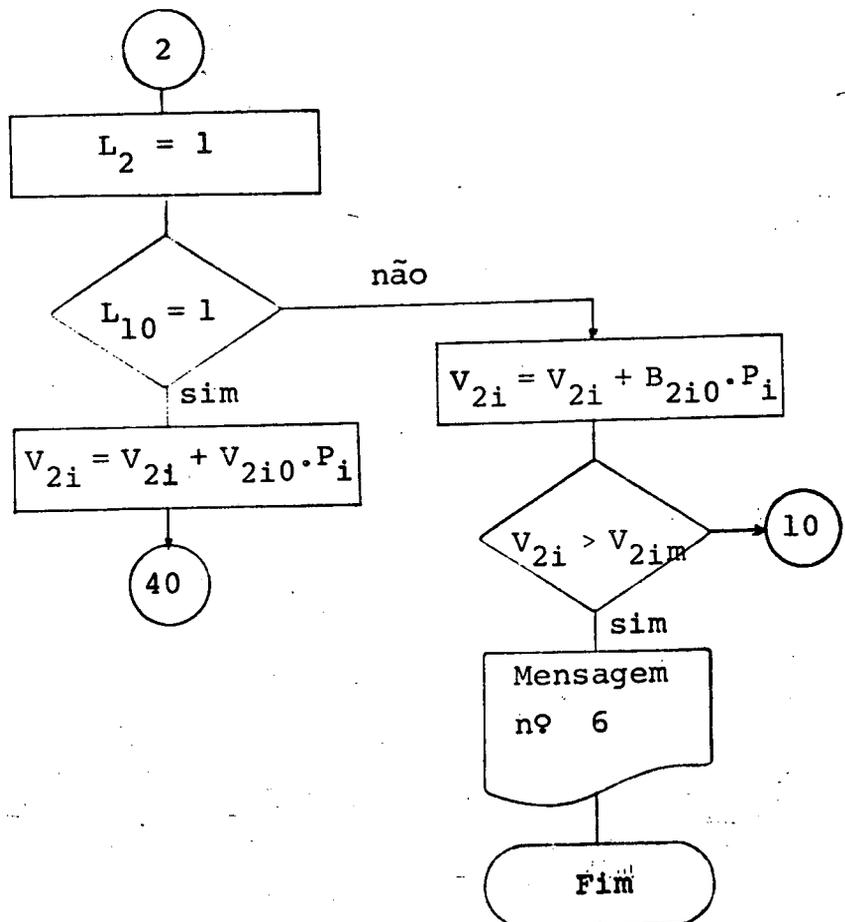
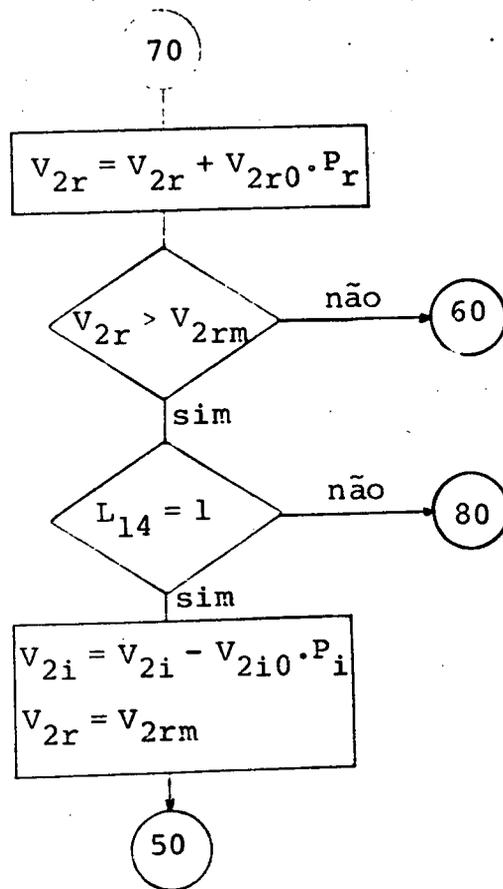


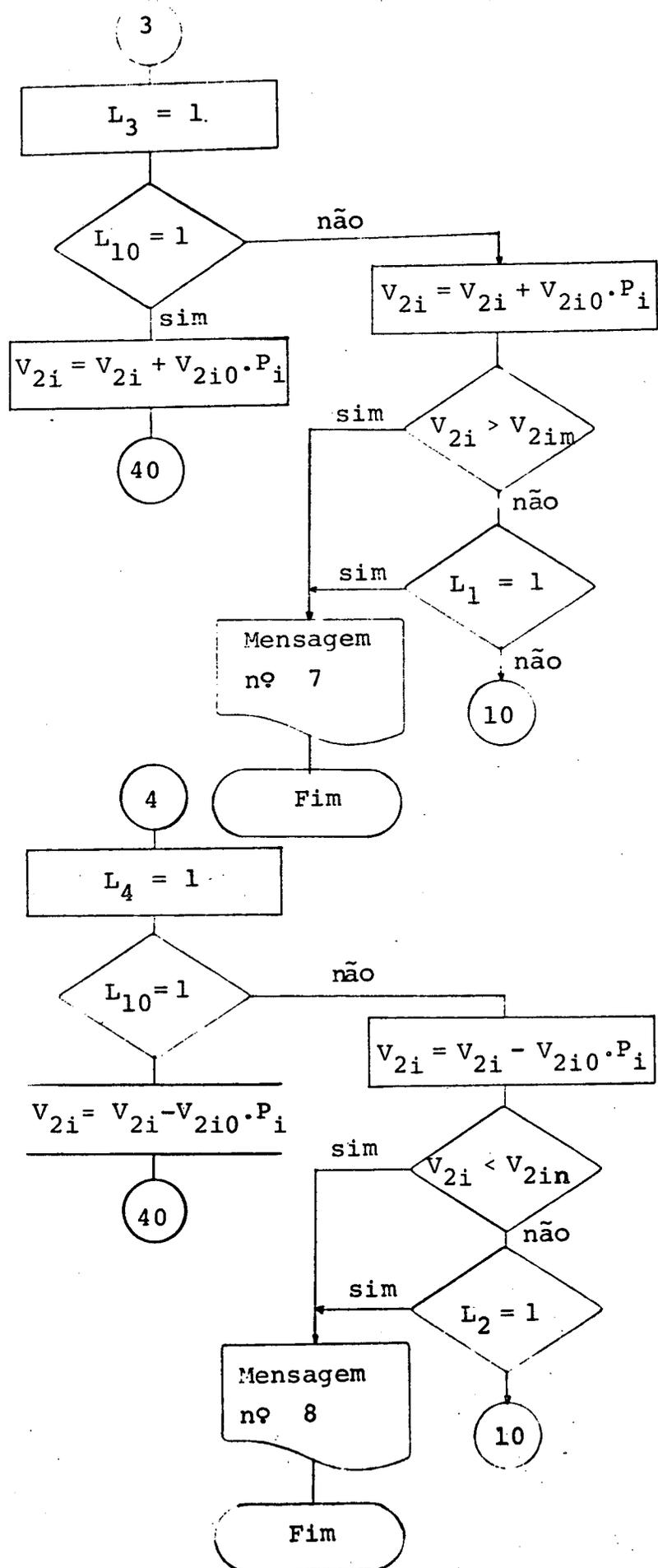
90

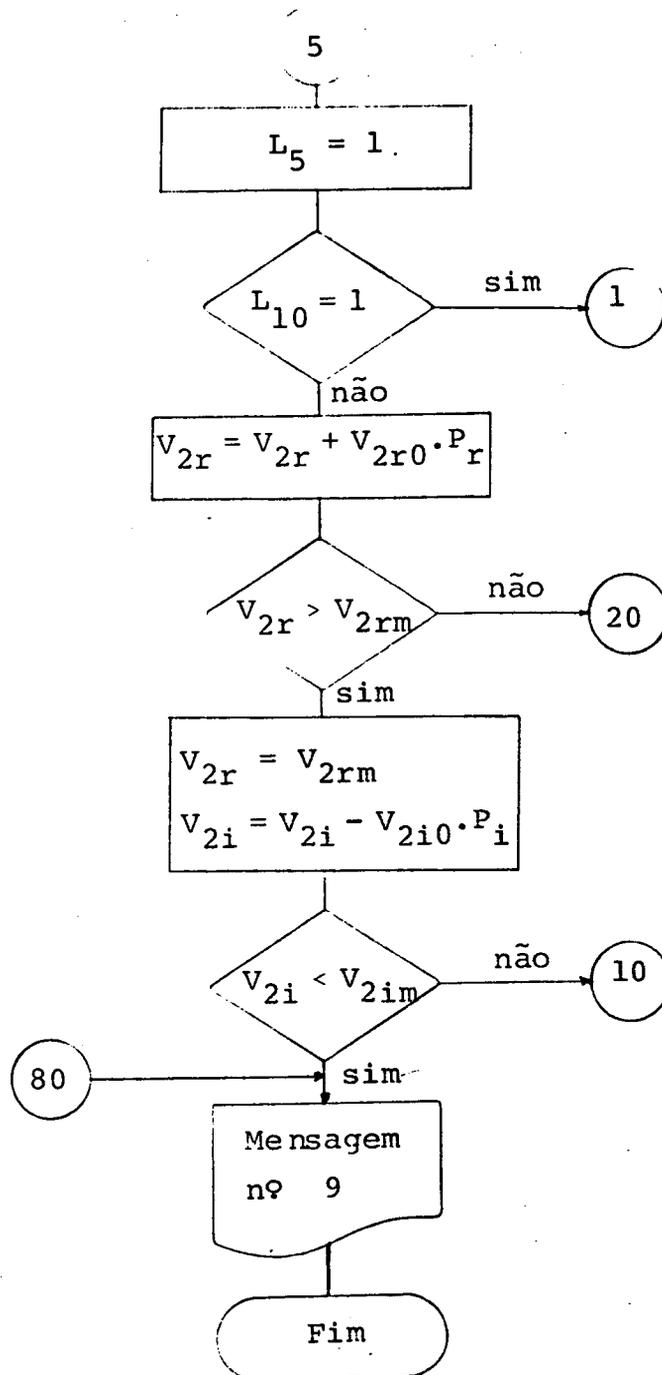


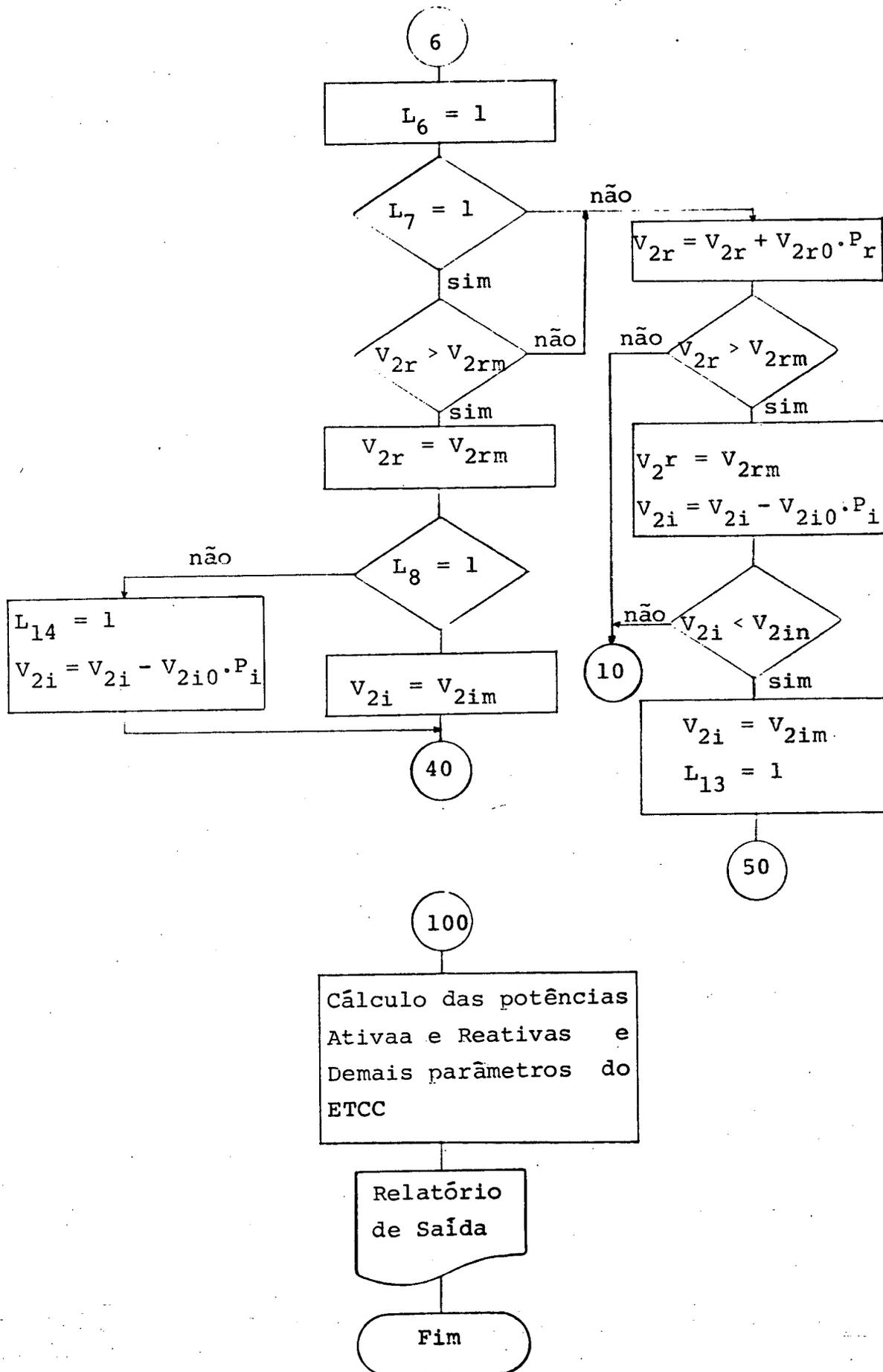












## 2.10 - Resultados

Para ilustrar e comprovar o trabalho desenvolvido nos paragrafos precedentes, utilizando-se o modelo dado pela figura 2.21, calcularam-se os parâmetros de um ETCC transmitindo uma potência  $P$  igual a 1000 MW sob as quatro condições de operação descritas a seguir:

- (i) - Taps variáveis para os transformadores dos conversores
- (ii) - Tap fixo para o transformador do retificador e tap variável para o transformador do inversor
- (iii) - Tap fixo para o transformador do inversor e tap variável do transformador do retificador.
- (iv) - Taps fixos para os transformadores dos conversores.

Para cada um dos casos descritos foram emitidas tabelas dos dados e dos parâmetros calculados do ETCC. As tabelas 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4 representam cada caso respectivamente.

Com base nas referidas tabelas, podem-se fazer os seguintes comentários com respeito ao consumo de reativos e perdas ativas do ETCC:

No primeiro caso, pode-se observar que o ângulo de ignição ( $\alpha$ ) está otimizado, isto é, o ETCC opera com  $\alpha$  próximo ao ângulo de ignição mínimo desejado, desta maneira limitando o consumo de reativos sem comprometer a operação do ETCC pois este ângulo ainda é superior ao ângulo ( $\alpha$ ) mínimo de regime transitório. Da mesma forma, a tensão de operação ( $V_r$ ) nos terminais

do retificador foi elevada ao máximo permitido, reduzindo conseqüentemente as perdas ativas no ETCC.

No segundo caso, pode-se obter, a partir da variação do tap do transformador do inversor, a máxima tensão de operação  $V_r$  dos terminais do retificador, reduzindo, conseqüentemente, as perdas ativas do ETCC. Isto confirma a declaração, feita anteriormente, de que o ângulo de operação é controlado pelo inversor. Quanto ao ângulo de ignição ( $\alpha$ ), não pôde ser otimizado pois o tap do transformador do retificador, foi mantido fixo. No entanto, pode-se, ainda neste caso, observar que o angulo de ignição ( $\alpha$ ) também melhora um pouco quando se otimiza a tensão  $V_r$ , porém sua variação é mais sensível à variação do tap do transformador do retificador.

No terceiro caso, a tensão  $V_r$ , que é definida pelo inversor, não pode ser otimizada devido ao tap fixo do transformador do inversor. Quanto ao ângulo de ignição ( $\alpha$ ), este foi otimizado através da variação do tap do transformador do retificador. Observa-se que no terceiro caso o consumo de reativos foi menor que aquele do segundo caso, o que confirma a sensibilidade de  $\alpha$  para a variação da tensão CA do retificador.

Finalmente, no quarto caso, o que se tem é apenas um ponto de operação para  $V_r$  e  $\alpha$ , sendo impossível otimizar qualquer um destes parâmetros. Neste caso, o consumo de reativos e as perdas do ETCC são definidos pelos parâmetros fornecidos e serão tanto maiores quanto maior a potência que se deseja transmitir.

```

+-----+
I ELO OPERANCC SOB ANGULO DE EXTINGAC E POTENCIA CONSTANTE I
+-----+
I ANGULO DE IGNICAO MINIMO = 10.00 GRAUS I
I ANGULO DE IGNICAO MAXIMO = 17.00 GRAUS I
I ANGULO DE EXTINGAC GAMA = 15.00 GRAUS I
I POTENCIA TRANSMITIDA = 1000.00 MWATTS I
I POTENCIA BASE DC SISTEMA = 100.00 MVA I
I
+-----+
I TENSOES BASE EM KV I
I
I NC RETIFICADOR = 445.00 NC INVERSOR = 445.00 I
+-----+
I TENSOES PRIMARIAS EM PU I
I
I NO RETIFICADOR = 1.0000 NC INVERSOR = 1.0000 I
+-----+
I RELACCES DE TRANSFORMACAO NOMINAIS I
I
I NC RETIFICADOR = 1.00 NC INVERSOR = 1.00 I
+-----+
I RESISTENCIAS DOS TRANSFORMADORES VISTAS DO SECUNDARIO (EM OHMS) I
I
I NO RETIFICADOR = 0.0 NC INVERSOR = 0.0 I
+-----+
I REATANCIAS DOS TRANSFORMADORES VISTAS DO SECUNDARIO (EM OHMS) I
I
I NC RETIFICADOR = 9.52 NC INVERSOR = 9.52 I
+-----+
I RESISTENCIA DA LINHA CC EM OHMS = 10.00 I
I
I LIMITES SUPERIORES DOS TAPS DOS TRANSFORMADORES DOS CONVERSORES I
I
I NC RETIFICADOR = 1.20* NOMINAL NC INVERSOR = 1.20* NOMINAL I
I
I LIMITES INFERIORES DOS TAPS DOS TRANSFORMADORES DOS CONVERSORES I
I
I NO RETIFICADOR = 0.80* NOMINAL NC INVERSOR = 0.80* NOMINAL I
+-----+

```

## (a) Dados

```

+-----+
I POTENCIAS EM PU I ANGULO I RELACAO DE I ANGULO I TENSAO DC I CORRENTE I FATOR DE I I
I BARRA PRIMARIA I COMUTACAO I TRANSFORMACAO I ALFA I (KV) I NO ELO I POTENCIA I I
+-----+
I ATIVA I REATIVA I RET I INV I RET I INV I GRAUS I RET I INV I (KA) I RET I INV I I
+-----+
I RET I INV I RET I INV I I I I I I I I I I I I I I
+-----+
I 110.000 I 9.712 I 3.492 I 4.038 I 11.041 I 9.031 I 1.022 I 1.012 I 110.22 I 1583.80 I 1571.82 I 1.698 I 0.96 I 0.94 I
+-----+

```

## (b) Resultados

Tabela 2.1

```

=====
I  ELC CREFANCC SCE ANGULO DE EXTINCAO E POTENCIA CONSTANTE  I
=====
I  ANGULO DE IGNICAO MINIMO = 10.00 GRAUS  I
I  ANGULO DE IGNICAO MAXIMO = 17.00 GRAUS  I
I  ANGULO DE EXTINCAO GAMA = 15.00 GRAUS  I
I  POTENCIA TRANSMITIDA = 1000.00 MWATTS  I
I  POTENCIA BASE CC SISTEMA = 100.00 MVA  I
I  I
=====
I  TENSORES BASE EM KV  I
I  I
I  NO RETIFICADOR = 445.00  NO INVERSOR = 445.00  I
=====
I  TENSORES PRIMARIAS EM PU  I
I  I
I  NO RETIFICADOR = 1.0000  NO INVERSOR = 1.0000  I
=====
I  RELACOES DE TRANSFORMACAO NOMINAIS  I
I  I
I  NO RETIFICADOR = 1.00  NO INVERSOR = 1.00  I
=====
I  RESISTENCIAS DOS TRANSFORMADORES VISTAS DO SECUNDARIO (EM OHMS)  I
I  I
I  NO RETIFICADOR = 0.0  NO INVERSOR = 0.0  I
=====
I  REATANCIAS DOS TRANSFORMADORES VISTAS DO SECUNDARIO (EM OHMS)  I
I  I
I  NO RETIFICADOR = 9.52  NO INVERSOR = 9.52  I
=====
I  RESISTENCIA DA LINHA CC EM OHMS = 10.00  I
I  I
I  LIMITES SUPERIORES DOS TAPS DOS TRANSFORMADORES DOS CONVERSORES  I
I  I
I  NO RETIFICADOR = 1.00* NOMINAL  NO INVERSOR = 1.20* NOMINAL  I
I  I
I  LIMITES INFERIORES DOS TAPS DOS TRANSFORMADORES DOS CONVERSORES  I
I  I
I  NO RETIFICADOR = 1.00* NOMINAL  NO INVERSOR = 0.80* NOMINAL  I
=====

```

## (a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU  I  ANGULO  I  RELACAO DE  I  ANGULO  I  TENSAO DC  I  CORRENTE  I  FATOR DE  I
I  BARRA PRIMARIA  I  CONJUGACAO  I  TRANSFORMACAO  I  ALFA  I  (KV)  I  NO ELO  I  POTENCIA  I
I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I
I  ATIVA  I  REATIVA  I  RET  I  INV  I  RET  I  INV  I  GRAUS  I  RET  I  INV  I  (KA)  I  RET  I  INV  I
I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I
I  RET  I  INV  I  RET  I  INV  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I
I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I
I  110.000  I  9.698  I  3.556  I  4.055  I  11.411  9.271  1.000  0.985  10.19  1575.49  1553.12  1.738  1 0.96  1 0.94  I
I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I  I
=====

```

## (b) Resultados

Tabela 2.2

```

=====
I ELO OPERANCC SCB ANGULO DE EXTINCAO E POTENCIA CONSTANTE I
I=====
I ANGULO DE IGNICAO MINIMO = 10.00 GRAUS I
I ANGULO DE IGNICAO MAXIMO = 17.00 GRAUS I
I ANGULO DE EXTINCAO GAMA = 15.00 GRAUS I
I POTENCIA TRANSMITIDA = 1000.00 MWATTS I
I POTENCIA BASE DO SISTEMA = 100.00 MVA I
I=====
I TENSORES BASE EM KV I
I I
I NO RETIFICADOR = 445.00 NC INVERSOR = 445.00 I
I=====
I TENSORES PRIMARIAS EM PU I
I I
I NO RETIFICADOR = 1.0000 NC INVERSOR = 1.0000 I
I=====
I RELACOES DE TRANSFORMACAO NOMINAIS I
I I
I NC RETIFICADOR = 1.00 NC INVERSOR = 1.00 I
I=====
I RESISTENCIAS DOS TRANSFORMADORES VISTAS DO SECUNDARIO (EM OHMS) I
I I
I NO RETIFICADOR = 0.0 NC INVERSOR = 0.0 I
I=====
I REATANCIAS DOS TRANSFORMADORES VISTAS DO SECUNDARIO (EM OHMS) I
I I
I NC RETIFICADOR = 9.52 NC INVERSOR = 9.52 I
I=====
I RESISTENCIA DA LINHA CC EM OHMS = 10.00 I
I I
I LIMITES SUPERIORES DOS TAPS DOS TRANSFORMADORES DOS CONVERSORES I
I I
I NO RETIFICADOR = 1.20* NOMINAL NC INVERSOR= 1.00* NOMINAL I
I I
I LIMITES INFERIORES DOS TAPS DOS TRANSFORMADORES DOS CONVERSORES I
I I
I NO RETIFICADOR = 0.80* NOMINAL NC INVERSOR= 1.00* NOMINAL I
I=====

```

## (a) Dados

```

=====
I POTENCIAS EM PU I ANGULO I RELACAO DE I ANGULO I TENSAO DC I CORRENTE I FATOR DE I I
I BARRA PRIMARIA I COMPUTACAO I TRANSFORMACAO I ALFA I (KV) I NO ELO I POTENCIA I I
I=====
I ATIVA I REATIVA I RET I INV I RET I INV I GRAUS I RET I INV I (KA) I RET I INV I I
I=====
I RET I INV I RET I INV I I I I I I I I I I I I I I I I I
I=====
110.000 I 9.705 I 3.506 I 4.067 I 11.321 I 9.211 I 1.010 I 1.000 I 10.04 I 1581.861 I 504.071 I 1.719 I 0.96 I 0.94 I I
I=====

```

## (b) Resultados

Tabela 2.3



## 2.11 - Conclusões

Este capítulo teve por meta a apresentação e discussão das equações clássicas de regime permanente que definem a operação de um sistema em corrente contínua. Além dos aspectos clássicos abordados, a inclusão do tratamento de uma análise gráfica da potência transmitida e seu vínculo com os parâmetros operacionais e características, permitiu uma visualização física dos objetivos a serem perseguidos pelo algoritmo computacional estabelecido.

Quanto a eficiência e validade do programa desenvolvido para o estudo individual de um elo de transmissão em corrente contínua, os testes relatados no item anterior são suficientes para ilustrar os efeitos dos parâmetros do ETCC sobre a sua operação. Destaca-se, sobretudo, a flexibilidade do programa no que se refere a permanente procura por pontos de operação que atendem os requisitos de transmissão de potência com um menor consumo de reativos.

Destaca-se, finalmente, que o tratamento aqui desenvolvido representa, com realismo, a operação de um ETCC. Com base nisto, pode-se afirmar que a modelagem do sistema conversor, seja para o lado do retificador do inversor, para estudo de fluxo de potência, é suficientemente abrangente e completa.

## CAPÍTULO III

## MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO OPERACIONAL DE INSTALAÇÕES RETIFICADORAS PARA ESTUDO DE FLUXO DE CARGA

3.1. Introdução

A utilização de grandes estações retificadoras com sofisticados controles eletrônicos de potência associados, tem se tornado comum em sistemas elétricos de potência.

O estudo de fluxo de carga, com a representação destas cargas por uma modelagem  $P + jQ$  constante, fornecerá valores de tensão incompatíveis para as potências ativa e reativa exatas na barra do retificador. Isto é devido ao inter-relacionamento operacional do controle, da alimentação e da operação desta unidade. Assim, o propósito deste capítulo é modelar o sistema de corrente contínua acoplado ao sistema de corrente alternada de forma a que se obtenham as potências ativas e reativa exatas que representem o efeito da carga na barra C.A.

Como resultado adicional de um tratamento mais elaborado do retificador, serão obtidas informações sobre a operação do retificador, como por exemplo, o valor do ângulo de ignição ( $\alpha$ ). Com isto, procede-se a procura de pontos ótimos de operação sob o ponto de vista de consumo de reativos, fornecem-se elementos para análise harmônica, etc.

O modelo será desenvolvido para uma estação retificada constituída 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 considerar os casos de condições anormais de operação, que poderá ser utilizado na análise de contingências por estudo de fluxo de carga. Assim, as características apresentadas a seguir representam o modelo adequado para o estudo de fluxo de carga com parcelas significativas desse tipo de carga incorporadas ao sistema.

### 3.2. Modelo de uma Carga Retificadora com f.c.e.m. constante

Geralmente grandes cargas retificadoras consistem de um número de pontes ligadas em série e/ou paralelo, 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 3.1.

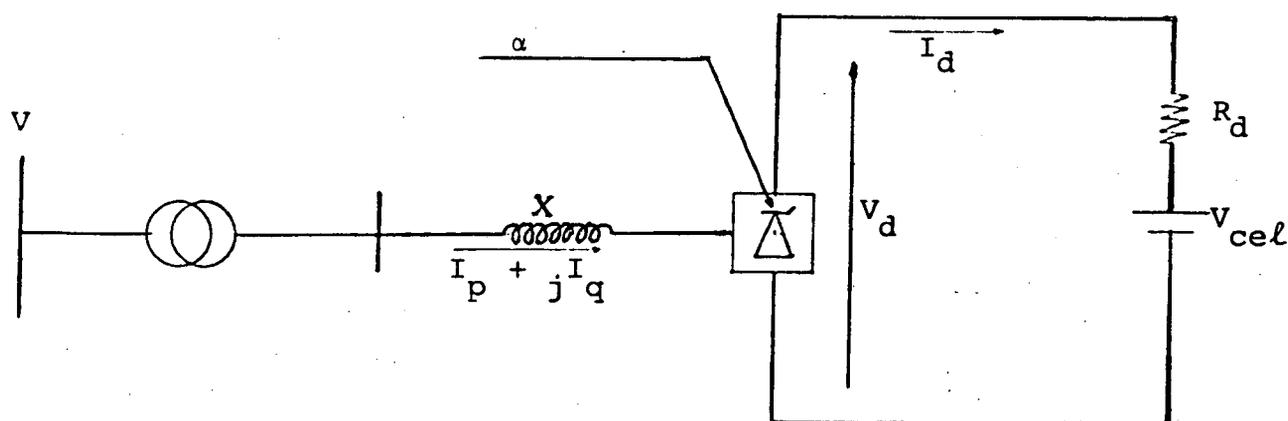


Fig. 3.1. Circuito equivalente da carga retificadora

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)
$\alpha$	- ângulo de disparo

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

- (a) - A corrente do lado CC ( $I_d$ ) é perfeitamente contínua
- (b) - As tensões CA são admitidas equilibradas e senoidais
- (c) - Harmônicos do lado CA não são considerados
- (d) - Os disparos são simétricos

As equações a seguir correspondem ao circuito equivalente da figura 3.1. e à operação com  $\mu \leq 60^\circ$ . Estas expressões, clássicas na área da conversão estática [2], podem ser usadas para inter-relacionar as variáveis de entrada e saída de

um retificador estático de 6 ou mais pulsos.

$$I_d = I_{s2} (\cos\alpha - \cos\delta) \quad (3.1)$$

$$V_d = R_d I_d + V_{cel} \quad (3.2)$$

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

$$V_d = \frac{V_{do}}{2} (\cos\alpha + \cos\delta) \quad (3.4)$$

$$\cos\phi = \frac{\cos\alpha + \cos\delta}{2} \quad (3.5)$$

onde:

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

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

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

$R_c$  - resistência equivalente de comutação

$L_c$  - indutância equivalente de comutação

$E_m$  - valor máximo da tensão CA (fase-neutro)

$f$  - frequência do sistema

$\mu$  - ângulo de comutação

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

$\phi$  - ângulo de fase entre tensão e corrente CA

A indutância de comutação  $L_c$  representa a indutância do sistema de corrente alternada 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.

Antes de considerar os modos anormais de operação é conveniente ressaltar que o assunto somente é focalizado neste instante devido a natureza dos sistemas industriais. De fato estes possuem, em muitos casos, níveis de curto-circuito bastante inferiores aos valores típicos de grandes sistemas, e, em decorrência, as altas indutâncias presentes podem ser responsáveis pelos efeitos abordados a seguir.

### 3.3. 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  $60^\circ$ . Com a consideração da operação com altas correntes ( $I_d$ ) e baixas tensões de corrente alternada, surge a necessidade de se analisar o funcionamento dos conversores com ângulos de comutação superiores a este valor ( $60^\circ$ ).

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

A identificação de cada modo de operação é feita de a-

cordo com os valores do ângulo de disparo ( $\alpha$ ) e de uma constante  $K$ , definida por:

$$K = \frac{\sqrt{2} x_c I_d}{V} \quad (3.6)$$

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; desta forma 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.

### 3.3.1. Modo A

Características:

- (i)  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$
- (ii)  $\mu < 60^\circ$
- (iii)  $K < 2 \cos(\alpha)$  (operação como retificador)  
 $K < \cos(60^\circ - \alpha)$

A figura 3.2 indica o circuito de uma ponte conversora operando como retificador.

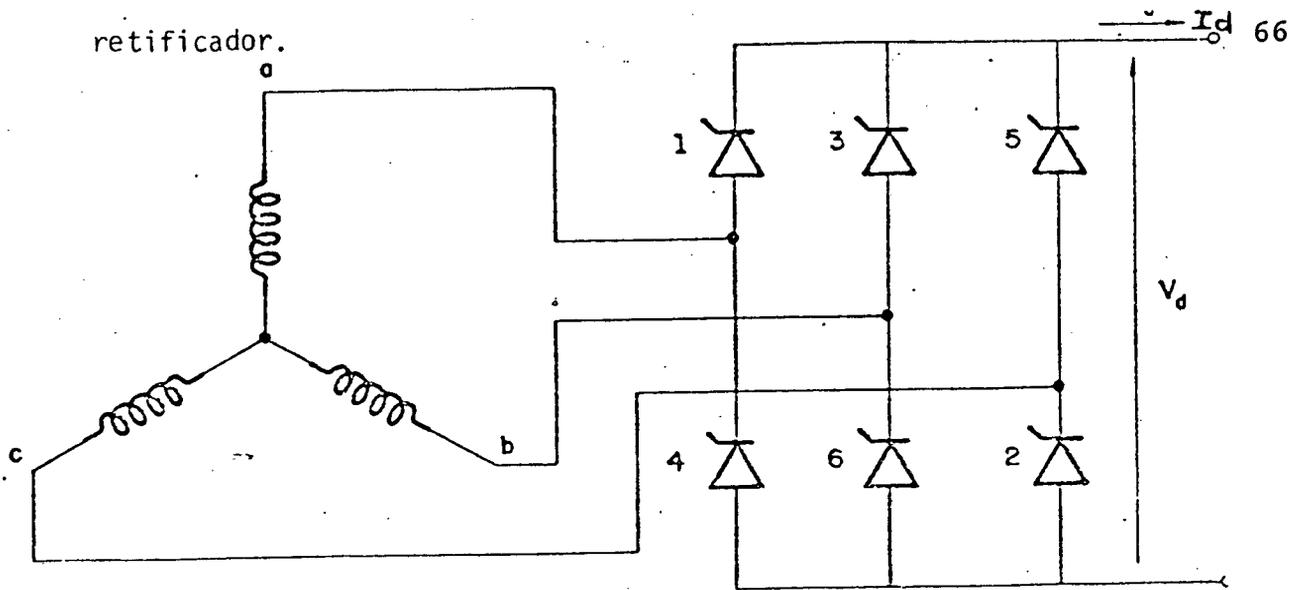


Figura 3.2 - Ponte conversora operando como retificador

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:

$$I_d = I_{s2} (\cos \alpha - \cos \delta) = \frac{V}{\sqrt{2} X_c} (\cos \alpha - \cos \delta) \quad (3.7)$$

$$V_d = \frac{V_{do}}{2} (\cos \alpha + \cos \delta) = \frac{3V}{\sqrt{2} \pi} (\cos \alpha + \cos \delta) \quad (3.8)$$

Substituindo (3.6) em (3.7) tem-se:

$$K = \sqrt{2} X_c I_d / V = (\cos \alpha - \cos \delta) = [(\cos \alpha - \cos (\alpha + \mu))] \quad (3.9)$$

De onde:

$$\cos \delta = \cos \alpha - K \quad (3.10)$$

$$\delta = \arccos (\cos \alpha - K) \quad (3.11)$$

No limite de operação como retificador,  $V_d = 0$

Substituindo-se (3.10) em (3.8) tem-se:

$$V_d = \frac{3V}{\sqrt{2}\pi} (2\cos\alpha - K) \quad (3.12)$$

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  $\mu = 60^\circ$ , de forma a não haver sobreposição de comutações. Substituindo este valor de  $\mu$  em (3.9), tem-se  $K < \cos(60^\circ - \alpha)$ , que é o valor limite de  $K$  para este modo.

As curvas da figura 3.3 ilustram as formas de onda das tensões póló-neutro para a operação dos retificadores no modo A.

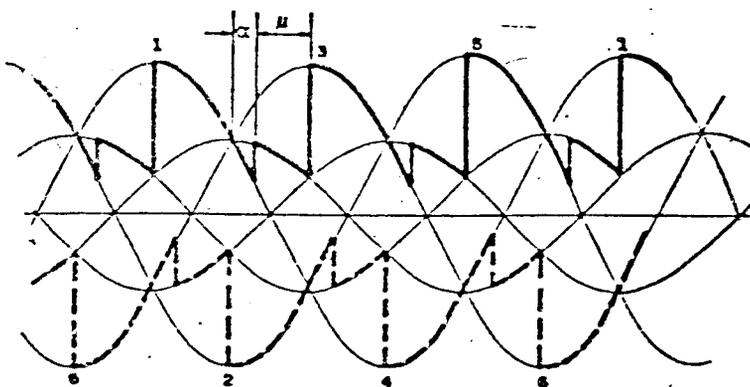


Figura 3.3. - Tensão póló-neutro para o modo A

### 3.3.2. - Modo B

Características:

(1)  $0^\circ < \alpha < 30^\circ$

- (ii)  $\mu = 60^\circ$   
 (iii)  $\cos(60^\circ - \alpha) < K < 0,866$

Se o fator K ultrapassar os limites de operação do modo A, então o valor do ângulo de comutação ( $\mu$ ) tende a exceder os  $60^\circ$ . Isto significa que, durante uma parte do ciclo, 4 válvulas podem conduzir ao mesmo tempo. Observando-se a figura 3.2, 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 ( $\alpha_1$ ), tal que o ângulo de atraso total seja de  $(\alpha + \alpha_1) = 30^\circ$ .
- O ângulo de disparo ( $\alpha$ ) tenha excedido  $30^\circ$ , 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 ( $\alpha$ ) é menor que  $30^\circ$  e que, se num determinado instante, o ângulo de comutação ( $\mu$ ) se torna maior que  $60^\circ$  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 ( $\mu$ ), como mostra a equação (3.9) para  $\alpha$  acrescido de X,

reduzindo o ângulo de espera X da válvula seguinte. Assim, depois de algumas comutações, uma condição estável será atingida em que  $\mu$  se mantém em  $60^\circ$ , e o ângulo de espera resultante ( $\alpha_1$ ) assume um valor que pode ser calculado como se mostra abaixo.

Da equação (3.9), tem-se:

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

para  $\mu = 60^\circ$  fica:

$$K = \cos (60^\circ - \alpha - \alpha_1) \quad (3.13)$$

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

$$K < 0,866$$

Da equação (3.13) tira-se que:

$$\alpha_1 = 60^\circ - \alpha - \arccos (K) \quad (3.14)$$

Da equação (3.12) tem-se:

$$V_d = \frac{3V}{\sqrt{2} \pi} (2 \cos (\alpha + \alpha_1) - K) = \frac{3V}{\sqrt{2} \pi} [2 \cos (60^\circ - \arccos (K)) - K] \quad (2.15)$$

As curvas da figura 3.4 ilustram a operação dos conversores no modo B.

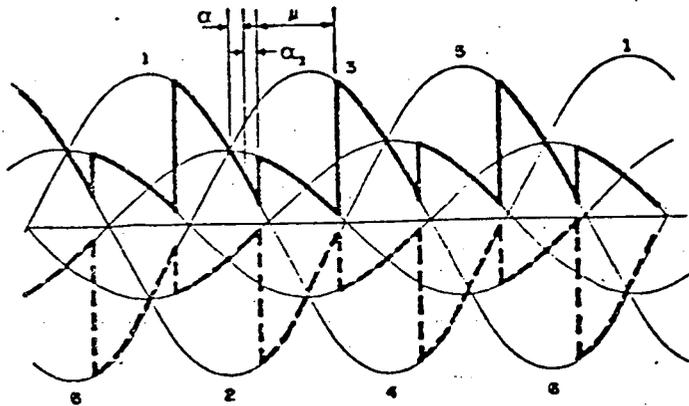


Figura 3.4 - Tensões pólo-neutro para o modo B

### 3.3.3 - Modo C

Características:

- (i)  $0^\circ < \alpha < 30^\circ$
- (ii)  $\mu > 60^\circ$
- (iii)  $0,866 < K < 1,1547$

Quando o fator  $K$  ultrapassa os limites de operação do modo B, o ângulo de comutação excederá os  $60^\circ$  e o ângulo de ignição total ( $\alpha + \alpha_1$ ) vai se manter em  $30^\circ$ . Observando-se a figura 3.2, 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 3.5.

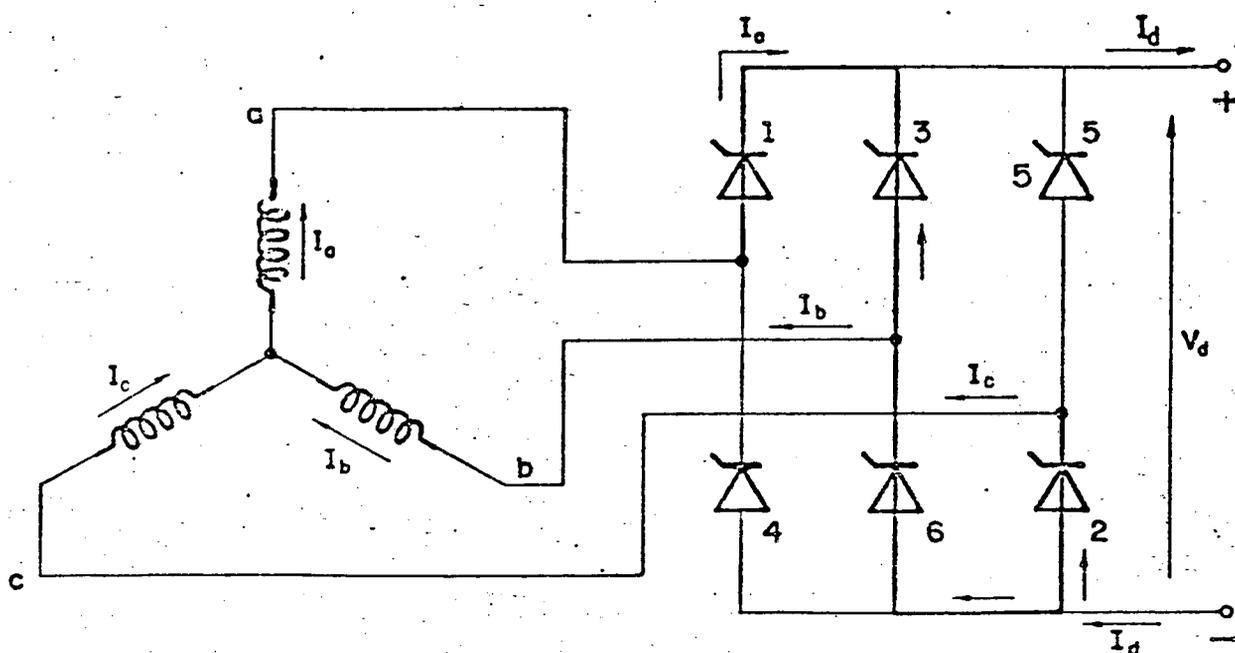


Figura 3.5 - Válvulas 1,2,3 e 6 conduzindo simultaneamente.

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 3.5). 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 ( $\alpha$ ) tem-se um ângulo de comutação ( $\mu$ ) maior.

As curvas da figura 3.6 ilustram a operação dos retificadores no modo C.

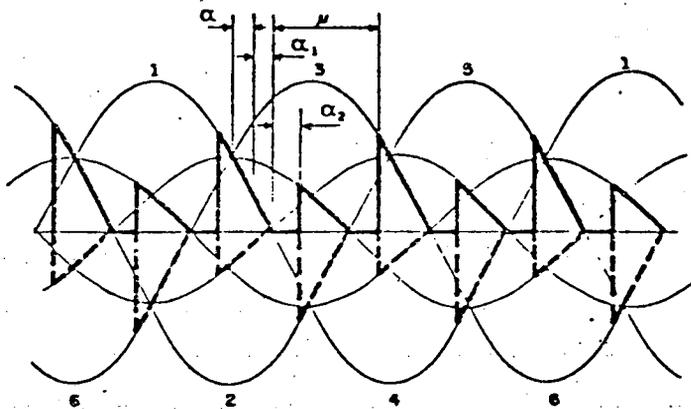


Figura 3.6 - Tensões p̄lo-neutro para o modo C

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  $\alpha_2$
- o período total de comutação é  $\mu = (60^\circ + \alpha_2)$

De acordo com a referência [4] tem-se como resultados finais para  $I_d$  e  $V_d$ , as seguintes expressões:

$$I_d = \frac{V}{\sqrt{3} \sqrt{2} X_c} [1 + \cos (60^\circ - \alpha_2)] \quad (3.16)$$

$$V_d = \frac{3V}{\sqrt{2} \pi} (2 \sqrt{3} - 3K) = V_{d0} [3 - 3/2K] \quad (3.17)$$

Levando-se (3.6) em (3.16) fica:

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

De onde:

$$\alpha_2 = 60^\circ - \arccos(\sqrt{3}k - 1) \quad (3.18)$$

$$\mu = 120^\circ - \arccos(\sqrt{3}k - 1) \quad (3.19)$$

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 (3.18), tem-se que o curto-circuito permaneceria quando fosse atingido o valor:

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

#### 3.3.4. Modo D

Características:

- (i)  $30^\circ < \alpha < 60^\circ$
- (ii)  $\mu > 60^\circ$
- (iii)  $\cos(60^\circ - \alpha) < K < \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\alpha - 30^\circ)$

A diferença entre este modo de operação e o modo C está na inexistência do atraso adicional  $\alpha_1$  pois, neste caso, o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) é maior que  $30^\circ$ .

As curvas da figura 3.7 ilustram a operação dos retificadores no modo D.

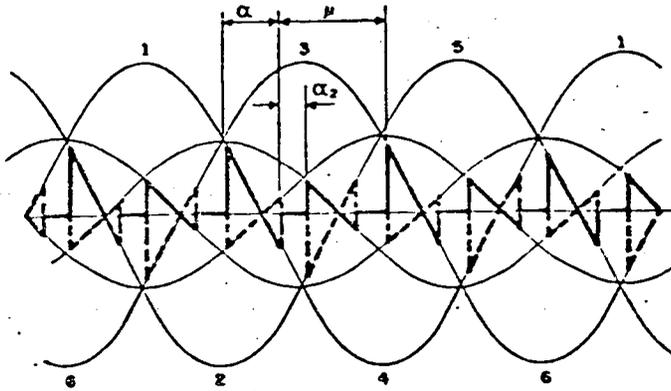


Figura 3.7 - Tensões pólo-neutro para o modo D.

Novamente, pode-se concluir que:

- o ângulo de disparo é  $\alpha$
- o ângulo de curto-circuito é  $\alpha_2$ .
- o ângulo total de comutação é  $\mu = 60^\circ + \alpha_2$

De acordo com a referência [4], tem-se as seguintes equações para a corrente e tensão do lado CC do retificador operando no modo D:

$$I_d = \frac{V}{\sqrt{3} \sqrt{2} X_c} [\text{sen}(\alpha + 60^\circ) + \text{sen}(\alpha + \alpha_2)] \quad (3.20)$$

$$V_d = \frac{3 \sqrt{3} V}{\sqrt{2} \pi} [2 \cos(\alpha - 30^\circ) - \sqrt{3} k] \quad (3.21)$$

Substituindo (3.6) em (3.20), tem-se:

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

De onde:

$$\alpha_2 = \text{arc sen } [\sqrt{3} K - \cos (\alpha - 30^\circ)] - \alpha \quad (3.22)$$

O limite de operação como retificador é  $V_d = 0$ , que substituindo em (3.21) implica em que:

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

Pode-se portanto, em função de  $K$  e  $\alpha$ , identificar a operação do retificador em qualquer situação, possibilitando de terminar facilmente todos os parâmetros de operação do lado CC, ou seja a tensão  $V_d$ , a corrente  $I_d$ , os ângulos de disparo ( $\alpha$ ), de comutação ( $\mu$ ), e de extinção ( $\delta$ ).

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

### 3.4. 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.

Com estas correntes, determinam-se as potências ativa e reativa absorvidas do sistema CA.

Fundamentalmente, a questão é ilustrada pelas figuras 3.8(a) e 3.8.(b).

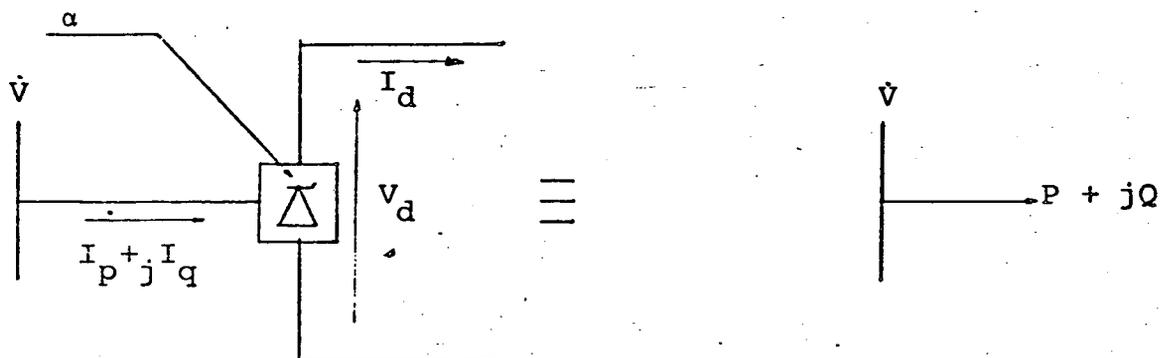


Figura 3.8. (a) Circuito equivalente da ponte conver-  
sora

(b) Representação por uma potência equi-  
valente

Nas figuras 3.8(a) e (b) são mostrados respectivamente: o circuito equivalente de uma ponte conversora e o retificador como elemento consumidor de potência.

#### 3.4.1. Relação entre as Correntes do lado CC e CA

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

A expressão que fornece 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 [5].

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{K}_1 \sqrt{6} I_d}{1} \quad (3.23)$$

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  $30^\circ$  uma expressão exata pode ser obtida por análise de Fourier como mostrada na referência [5]. Com base nestes resultados tem-se que  $\dot{K}_1$  é dado por:

$$\dot{K}_1 = \frac{(\angle -2\alpha - \angle -2\delta - j2\mu)}{4(\cos\alpha - \cos\delta)} \quad (3.24)$$

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:

$$\dot{K}_1 = \frac{\sqrt{3} \angle -2\alpha' - \angle -2\delta' - j2\mu}{4(\cos\alpha' - \cos\delta')} \quad (3.25)$$

onde:

$$\alpha' = \alpha - 30^\circ \quad (3.26)$$

$$\delta' = \delta + 30^\circ \quad (3.27)$$

Com base nas expressões acima, pode-se obter expressões para as componentes ativa e reativa da corrente fundamen-

tal para os modos normais de operação (Modos A e B). Os resultados finais são:

$$I_p = \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \frac{\cos(2\alpha) - \cos(2\delta)}{4(\cos\alpha - \cos\delta)} = \frac{\sqrt{6}I_d}{2\pi} (\cos\alpha + \cos\delta) \quad (3.28)$$

$$I_q = \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \frac{\sin(2\alpha) - \sin(2\delta) + 2\mu}{4(\cos\alpha - \cos\delta)} \quad (3.29)$$

Para os modos C e D de operação:

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

$$= \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \sqrt{3} \frac{(\cos\alpha' + \cos\delta')}{2} \quad (3.30)$$

$$I_q = \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \frac{\sqrt{3}(\sin(2\alpha') - \sin(2\delta') + 2\mu)}{4(\cos\alpha' - \cos\delta')} \quad (3.31)$$

Procurando simplificar as expressões (3.30) e (3.31) tem-se que para o modo C:

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

e que

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

ou seja

$$\alpha' = 0^\circ$$

Substituindo o valor de  $\alpha'$  nas equações (3.30) e (3.31) tem-se:

$$I_p = \frac{\sqrt{6}I_d}{2\pi} \sqrt{3}(1 + \cos\delta') \quad (3.32)$$

$$I_q = \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \frac{\sqrt{3}(2\mu - \sin(2\delta'))}{4(1 - \cos\delta')} \quad (3.33)$$

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

$$P = V I_p \text{ pu} \quad (3.34)$$

$$Q = V I_q \text{ pu} \quad (3.35)$$

Uma vez obtidas P e Q pelas expressões (3.34) e (3.35), procede-se como no capítulo II para se obter as potências ativa e reativa na barra primária do conversor, que comporão a carga daquela barra no estudo do fluxo de carga do sistema C.A. ao qual está acoplada a carga C.C.

### 3.5. Implementação Digital

Para executar e implementar um programa digital que determine os parâmetros do sistema retificador desenvolvido nes

te capítulo, é necessário que se tenham as seguintes informações iniciais:

- a- Tensão e ângulo de barra primária do transformador do con-  
versor -  $V_1$  ,  $\theta_1$
- b- A relação de transformação nominal do transformador - T
- c- A resistência da linha CC que alimenta a carga
- d- A tensão representativa da carga (E)
- e- A corrente  $I_d$  com que se deseja alimentar a carga.

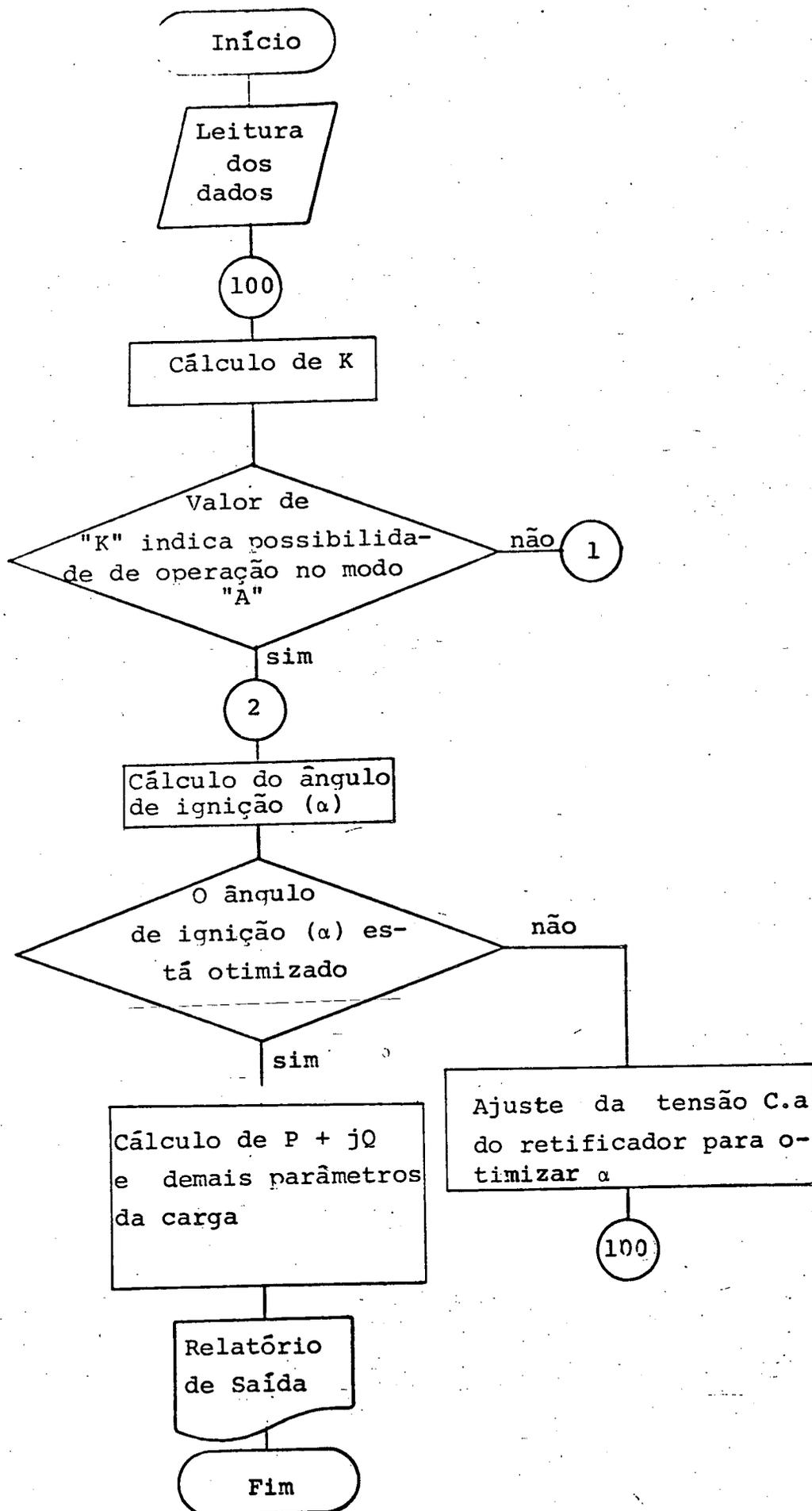
A partir do exposto e dos modelos desenvolvidos nos itens precedentes, foi elaborado um algoritmo, conforme descrito a seguir, onde a carga C.C é considerada como uma f.c.e.m. constante e a estação retificadora fornece uma corrente C.C ( $I_d$ ) constante. O algoritmo consiste em:

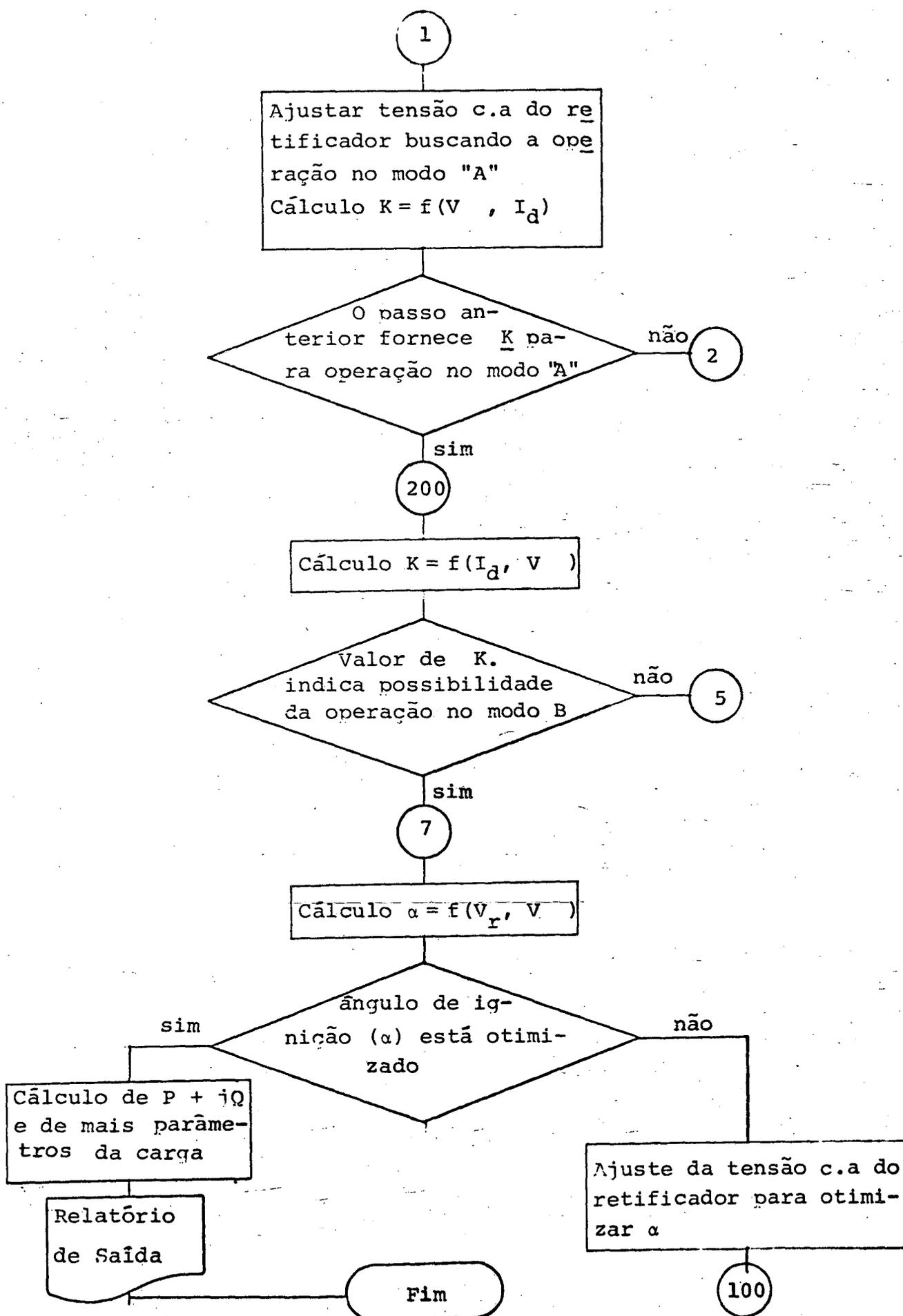
- a- Efetuar a leitura dos dados da entrada, conforme descrito anteriormente.
- b- Verificar os limites de K para determinar o modo de operação em que se encontra o sistema C.C. Se já estiver no modo A, apenas ajustar o tap do transformador e o ângulo de ignição  $\alpha$  no sentido de otimizar a operação, isto é, reduzir o consumo de reativos e em seguida emitir listagem de saída, terminando o processamento.
- c- Caso no item(b) verificar-se que o sistema C.C. está operando num modo de operação diferente do modo A, ajustar o tap do transformador e o ângulo de ignição  $\alpha$  procurando adaptar o sistema ao item(b), isto é, fazê-lo operar no modo A como menor consumo de reativos.
- d- Caso não se consiga o ajuste acima, verificar a possibilidade de operar no modo B; uma vez não sendo a-

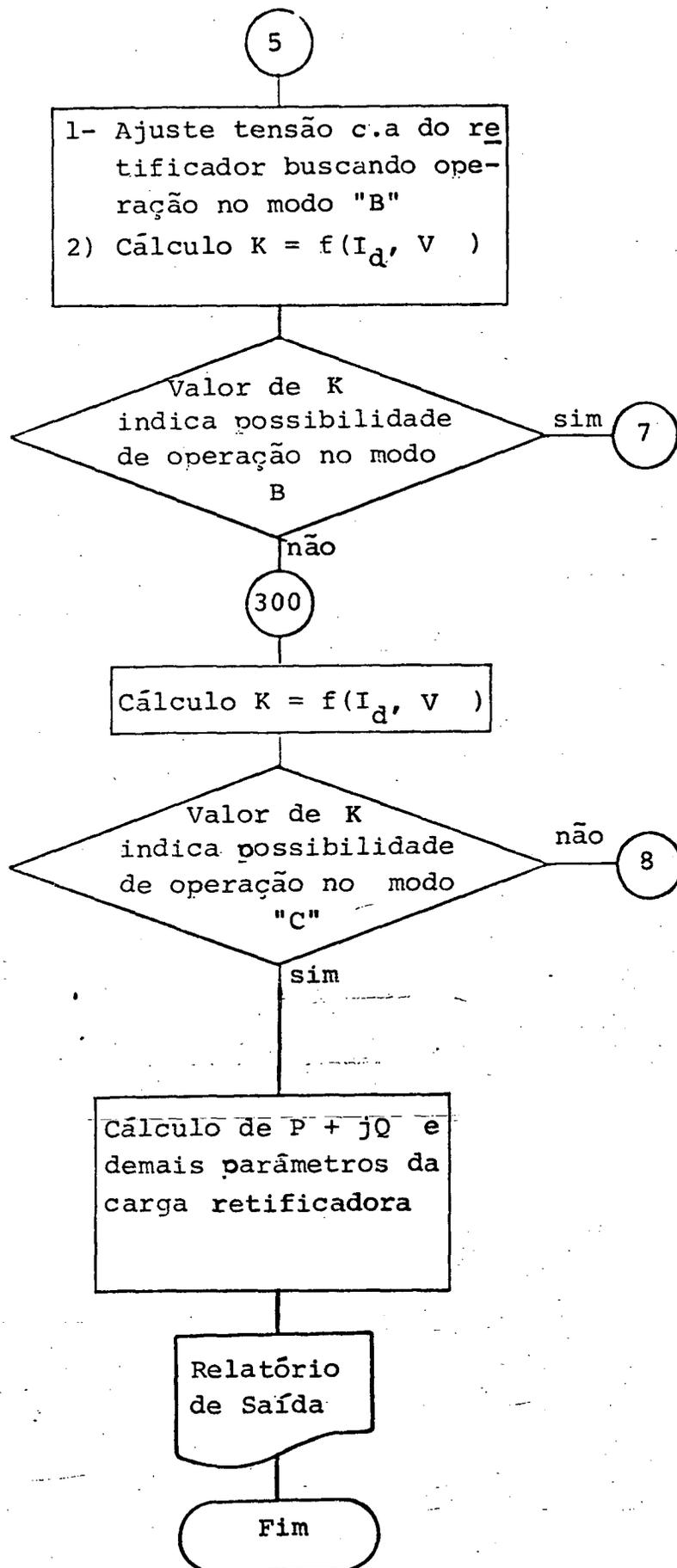
tendido, tentar a operação no modo C, e eventualmente no modo D de operação.

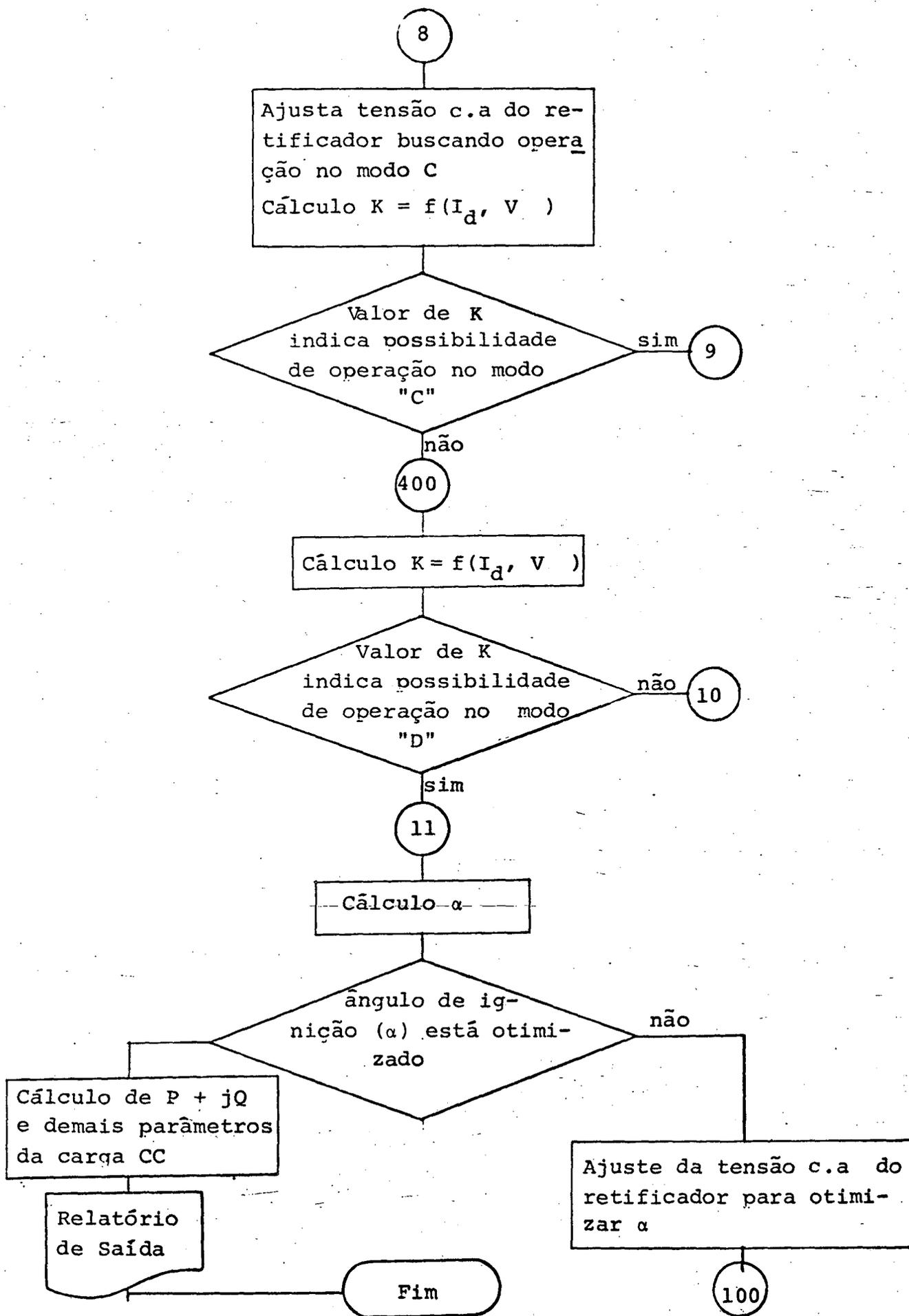
Em qualquer dos casos atendidos, emitir relatório de saída e interromper o processamento. Da mesma forma, se não for possível operar em nenhum modo de operação, emitir mensagem correspondente e encerrar o processamento.

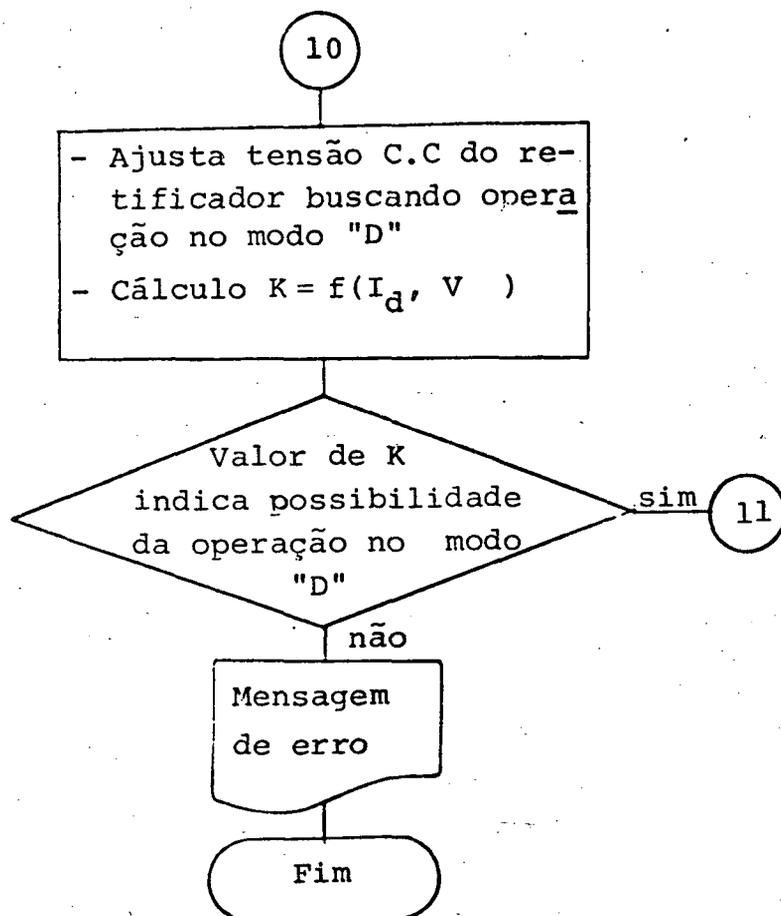
Para o algoritmo acima descrito, foi elaborado um programa digital segundo o fluxograma a seguir:











### 3.6 - Resultados

Procedendo-se de forma similar ao capítulo II, utilizando-se o modelo da figura 3.1, calcularam-se os parâmetros de uma estação retificadora transmitindo uma corrente constante a alimentando uma carga representada por uma f.c.e.m constante, sob as duas condições de operação descritas a seguir:

- (i) - Tap variável do transformador do conversor
- (ii) - Tap fixo para o transformador do conversor.

Em ambos os casos, sendo mantida a corrente de operação ( $I_d$ ) constante e a carga como uma f.c.e.m constante, a tensão de operação ( $V_d$ ) do conversor será a mesma, independente do ajuste de tap do transformador do conversor; observar que no primeiro caso, mediante ajustes adequados no tap do transformador, é possível obter um ângulo da ignição ( $\alpha$ ) tão pequeno quanto possível, dentro do modo de operação mais favorável, reduzindo, desta forma, o consumo de reativos do sistema conversor.

No segundo caso, haverá apenas um ponto de operação para a tensão ( $V_d$ ) e para o ângulo de ignição ( $\alpha$ ), e o seu consequente modo de operação.

As tabelas 3.1 e 3.2, a seguir, mostram os dados da carga retificadora seguidos dos parâmetros calculados para ambos os casos.

```

=====
I SISTEMA DC CCM CORRENTE CONSTANTE
I BARRA NO. 21
=====
I TENSÃO NA BARRA EM KV = 3.60
I TENSÃO NA BARRA EM PU = 1.00
I CORRENTE DESEJADA (KA) = 28.57
I FATOR DE CORRENTE MÁXIMA = 1.03
I FATOR DE CORRENTE MÍNIMA = 0.97
I ÂNGULO DE IGNICAO MÍNIMO = 5.00 GRAUS
I POTENCIA BASE DO SISTEMA = 100.0000 MVA
I TENSÃO BASE EM KV = 3.6000
I TENSÃO PRIMÁRIA EM PU = 1.0000
I FATOR DE TENSÃO MÁXIMA = 1.2000
I FATOR DE TENSÃO MÍNIMA = 0.8000
I RELACAO DE TRANSFORMACAO = 1.0000
I TENSÃO DA BATERIA = 2.8000
I RESISTENCIA DA LINHA = 0.0
I RESISTENCIA DA CARGA = 0.0100
I RESISTENCIA DO TRAFIC (CHMS) = 0.0
I REATANCIA DO TRAFIC (CHMS) = 0.0280
=====

```

## (a) Dados

```

=====
I POTENCIAS NA I ANGLULO I POSICAO I ANGLULO I TENSÃO I CORRENTE I FATOR
I BARRA PRIMARIA I COMUTACAO I DO TAP I ALFA I DC I DC I DE
I EM PU I (GRAUS) I TRAFIC I (GRAUS) I (KV) I (KA) I POTENCIA
I ATIVA I REATIVA I I I I I I
I 0.908 I 0.714 I 48.578 I 0.801 I 5.144 I 3.091 I 28.341 I 0.794
=====

```

## (b) Resultados

Tabela 3.1

```

=====
I SISTEMA DC CCM CORRENTE CONSTANTE
I BARRA NO. 31
=====
I TENSÃO NA BARRA EM KV = 3.60
I TENSÃO NA BARRA EM PU = 1.00
I CORRENTE DESEJADA (KA) = 28.57
I FATOR DE CORRENTE MÁXIMA = 1.03
I FATOR DE CORRENTE MÍNIMA = 0.97
I ÂNGULO DE IGNICAO MÍNIMO = 5.00 GRAUS
I POTENCIA BASE DO SISTEMA = 100.0000 MVA
I TENSÃO BASE EM KV = 3.6000
I TENSÃO PRIMÁRIA EM PU = 1.0000
I FATOR DE TENSÃO MÁXIMA = 1.2000
I FATOR DE TENSÃO MÍNIMA = 1.0000
I RELACAO DE TRANSFORMACAO = 1.0000
I TENSÃO DA BATERIA = 2.8000
I RESISTENCIA DA LINHA = 0.0
I RESISTENCIA DA CARGA = 0.0100
I RESISTENCIA DO TRAFIC (CHMS) = 0.0
I REATANCIA DO TRAFIC (CHMS) = 0.0280
=====

```

## (a) Dados

```

=====
I POTENCIAS NA I ANGLULO I POSICAO I ANGLULO I TENSÃO I CORRENTE I FATOR
I BARRA PRIMARIA I COMUTACAO I DO TAP I ALFA I DC I DC I DE
I EM PU I (GRAUS) I TRAFIC I (GRAUS) I (KV) I (KA) I POTENCIA
I ATIVA I REATIVA I I I I I I
I 0.911 I 1.124 I 24.708 I 1.000 I 37.021 I 3.091 I 29.427 I 0.636
=====

```

## (b) Resultados

Tabela 3.2

### 3.7 - Conclusões

A implementação de grandes blocos de cargas retificadoras para estudos de fluxo de potência foi o objetivo deste capítulo. Dentro dos levantamentos bibliográficos realizados ao longo deste trabalho, não se pôde verificar a existência deste tipo de estudo até a presente data.

No capítulo foi tratada a simulação de instalações eletroquímicas típicas em que a carga alimentada pelos retificadores pode ser associada a uma f.cem constante. Sem dúvida, esta é uma limitação da modelagem aqui utilizada, visto que, para outros casos, o comportamento da carga pode obedecer uma outra forma operacional. É este, por exemplo, o caso de retificadores acionando laminadores, etc. Este ponto pode constituir objeto de futuros estudos.

Com relação ao tratamento analítico, foram considerados diversos modos de operação, o que, acredita-se ser também um dos pontos de maior contribuição do capítulo. Verificou-se que, dentro de certas condições de operação do sistema de retificação, o emprego das expressões clássicas podem conduzir a erros significativos nas respostas finais que seriam as potências ativa e reativa.

Finalmente, a implementação digital comprovou ser efetiva e adequada, o que pode ser constatado pelos resultados obtidos.

## CAPÍTULO IV

MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO OPERACIONAL DE MOTORES  
DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS PARA ESTUDOS DE FLUXO DE  
CARGA4.1. Introdução

Os grandes sistemas industriais são, normalmente, possuidores de sistemas de geração própria. Todavia, esta geração visa atender apenas uma pequena proporção da carga total instalada, servindo para manter em operação as cargas prioritárias quando da ocorrência de interrupção de alimentação por parte da concessionária.

Visto assim, após a interrupção, o sistema industrial torna-se um pequeno sistema de potência isolado onde uma grande parcela de carga existente, em operação, é composta por motores de indução. No instante da interrupção tornam-se necessários desligamentos forçados de cargas não prioritárias, de forma a aliviar o sistema de geração própria, e evitar que em nenhum momento cesse o suprimento de energia a determinados setores em que se encontram ligadas as cargas especiais (prioritárias). Para que isto seja possível, é necessário que se façam estudos de estabilidade transitória para obter dados e informações que permitam fazer uma boa coordenação de proteção, que atuará aliviando o sistema quando sob aquela contingência (desligamento da rede da concessionária).

Desta forma, como para estes estudos uma grande parcela das cargas industriais é composta por motores de indução,

para se obter resultados que representam a realidade do comportamento do sistema é necessário representar o comportamento real dos motores de indução.

Os dados iniciais, necessários para estes estudos dinâmicos, são obtidos através do estudo de fluxo de carga e estabelecerão o estado inicial do sistema por ocasião da referida contingência. As potências ativa e reativa utilizadas pelo programa de fluxo de carga deverão ser aquelas obtidas a partir do modelo do motor de indução, utilizado no programa de estabilidade transitória, em regime permanente.

Neste ponto destaca-se um problema, comumente encontrado de previsão de reativos associados à operação dos motores. De fato, a simples adoção de um valor  $P + jQ$  à uma barra PQ e a posterior adoção desta potência a um motor de indução equivalente, pode levar a grandes incompatibilidades entre o reativo fornecido e aquele calculado com base nos parâmetros fornecidos para o circuito equivalente do motor. Desta forma, se antecipadamente se puder conhecer potência reativa exigida, então os denominados erros de balanço de potências seriam evitados quando do fornecimento dos dados correspondentes às condições iniciais do sistema sob estudo. É, pois, propósito deste capítulo, desenvolver uma metodologia que será incorporada a um programa de fluxo de carga e que permitirá conhecer, para motores de indução trifásicos, maiores informações sobre seu estado de operação inicial.

#### 4.2. Considerações para escolha da modelagem adequada do motor de indução

São dois os tipos de modelagem conhecidos para o mo-

tor de indução:

(i) - Modelagem por gaiola dupla - Utilizado no estudo do motor, durante sua partida e, apresenta resultados da curva Torque (T) versus deslização (s) bem próximos daqueles obtidos na prática. Devido à natureza deste trabalho, que aborda estudos de regime permanente, este modelo é dispensável [ 9 ] .

(ii) - Modelagem por gaiola simples - O motor de indução trifásico sendo tratado como operando em regime permanente , terá um modelo mais apropriado se a representação por gaiola simples fôr empregada.

Para a determinação do modelo do motor de indução por Gaiola Simples, são feitas as seguintes considerações:

- a - Os enrolamentos estatóricos são idênticos entre si;
- b - Os enrolamentos rotóricos são idênticos entre si;
- c - Os ângulos elétricos entre os enrolamentos, tanto no estator como no rotor, são iguais;
- d - O entreferro é constante;
- e - O circuito magnético é linear;
- f - A distribuição do fluxo magnético no entre ferro é radial e senoidal.

Face a estas considerações e utilizando as transformações  $\alpha\beta$ , de Park e em componentes simétricos instantâneos pode-se obter o modelo monofásico do motor de indução, denominado

"Modelo do motor de indução por Gaiola Simples".

Através da transformada de Park generalizada, obtém-se o modelo para máquina simétrica dado pela seguinte expressão [6]:

$$\begin{bmatrix} v_s^d \\ v_s^q \\ v_r^d \\ v_r^q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -L_s \Psi' & pM_{sr} & -M_{sr} \Psi' \\ L_s \Psi' & R_s + pL_s & M_{sr} \Psi' & pM_{sr} \\ pM_{sr} & -nM_{sr}(\Psi' - \theta') & R_r + pL_r & -nL_r(\Psi' - \theta') \\ nM_{sr}(\Psi' - \theta') & pM_{sr} & nL_r(\Psi' - \theta') & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^d \\ i_s^q \\ i_r^d \\ i_r^q \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Onde:

$v_s^d, v_s^q$  - tensões de eixo direto e em quadratura do estator (valor instantâneo)

$v_r^d, v_r^q$  - tensões de eixo direto e em quadratura do rotor (valor instantâneo)

$R_s$  - Resistência do estator

$L_s$  - Indutância cíclica do estator

$R_r$  - Resistência do rotor

$L_r$  - Indutância cíclica do rotor

$n$  - Número de pares de polos

$\Psi'$  - Velocidade dos eixos de referência

$\theta'$  - Velocidade do rotor

$p$  - Símbolo da derivada  $\left(\frac{d}{dt}\right)$

$M_{sr}$  - Indutância mútua cíclica estator-rotor

$i_s^d, i_s^q$  - Correntes do estator no eixo direto e de quadratura  
(valor instantâneo)

$i_r^d, i_r^q$  - Correntes do rotor no eixo direto e de quadratura  
(valor instantâneo)

Com o objetivo de se obter um modelo físico do motor de indução, que será traduzido em forma de um circuito equivalente a ser utilizado para desenvolver as principais equações que traduzem a operação do motor, procede-se, a seguir, a uma mudança do sistema de referência. Para tanto, emprega-se a transformação das equações (4.1) - (na referência dq0) - para um sistema em componentes simétricas no domínio do tempo. Utilizando-se (4.1), considerando a referência no estator onde  $\psi' = 0$ , chega-se a:

$$\begin{bmatrix} v_s^+ \\ v_s^- \\ v_r^+ \\ v_r^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pM_{sr} & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pM_{sr} \\ M_{sr}(p-jn\dot{\theta}) & 0 & R_r + L_r(p-jn\dot{\theta}) & 0 \\ 0 & M_{sr}(p+jn\dot{\theta}) & 0 & R_r + L_r(p-jn\dot{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^+ \\ i_s^- \\ i_r^+ \\ i_r^- \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Onde:

$v_s^+, v_s^-$  - Componentes de seqüência positiva e negativa da tensão instantânea do estator.

$v_r^+, v_r^-$  - Componentes de seqüência positiva e negativa da ten-

são instantânea do rotor

$i_s^+, i_s^-$  - Componentes de seqüência positiva e negativa da corrente instantânea do estator.

$i_r^+, i_r^-$  - Componentes de seqüência positiva e negativa da corrente instantânea do rotor.

Em vista dos objetivos do trabalho aqui proposto, que corresponde à análise operacional do motor em regime permanente, é conveniente transformar (4.2) para o domínio da freqüência. Neste caso, basta substituir as grandezas abaixo pelas correspondentes no domínio da freqüência.

(i) - O operador  $p = \frac{d}{dt}$  é substituído por  $j\omega$ .

(ii) - Os valores instantâneos das tensões e correntes do estator e rotor são substituídos por seus valores eficazes, isto é:

$$v_s^+ \rightarrow V_s^+, \quad v_s^- \rightarrow V_s^-,$$

$$i_s^+ \rightarrow I_s^+, \quad i_s^- \rightarrow I_s^-,$$

$$v_r^+ \rightarrow V_r^+, \quad v_r^- \rightarrow V_r^-,$$

$$i_r^+ \rightarrow I_r^+, \quad i_r^- \rightarrow I_r^-.$$

(iii) - A velocidade do rotor ( $n\dot{\theta}$ ) assume um valor constante representado por  $\omega_m$ .

Como no motor de indução trifásico, objeto deste estudo, os enrolamentos do rotor são Curto Circuitos, então pode-

se dizer que:

$$V_r^+ = 0, \quad V_r^- = 0$$

Assim, o sistema de equações 4.2 toma a seguinte forma:

$$V_s^+ = (R_s + j\omega L_s) I_s^+ + j\omega M_{sr} I_r^+$$

$$0 = M_{sr}(j\omega - j\omega_n) I_s^+ + R_r + L_r(j\omega - j\omega_n) I_r^+$$

(4.3)

$$V_s^- = (R_s + j\omega L_s) I_s^- + j\omega M_{sr} I_s^-$$

$$0 = M_{sr}(j\omega + j\omega_n) I_s^- + R_r + L_r(j\omega + j\omega_n) I_r^-$$

Introduzindo-se o conceito do escorregamento ( $s$ ) e lembrando que  $\omega$  é a velocidade angular do campo girante, pode-se escrever:

$$\omega - \omega_m = s \omega$$

$$\omega + \omega_m = (2-s) \omega$$

Utilizando o símbolo  $\omega_s$  para expressar a velocidade síncrona do campo girante, tem-se finalmente que:

$$V_s^+ = (R_s + j\omega_s L_s) I_s^+ + j\omega_s M_{sr} I_r^+$$

$$0 = js\omega_s M_{sr} I_s^+ + (R_r + js\omega_s L_r) I_r^+$$

(4.4)

$$V_s^- = (R_s + j\omega_s L_s) I_s^- + j\omega_s M_{sr} I_r^+$$

$$0 = j(2-s)\omega_s M_{sr} I_s^- + (R_r + j(2-s)\omega_s L_s) I_r^-$$

Este sistema de equações está representado pelo cir-

cuito da figura 4.1, abaixo:

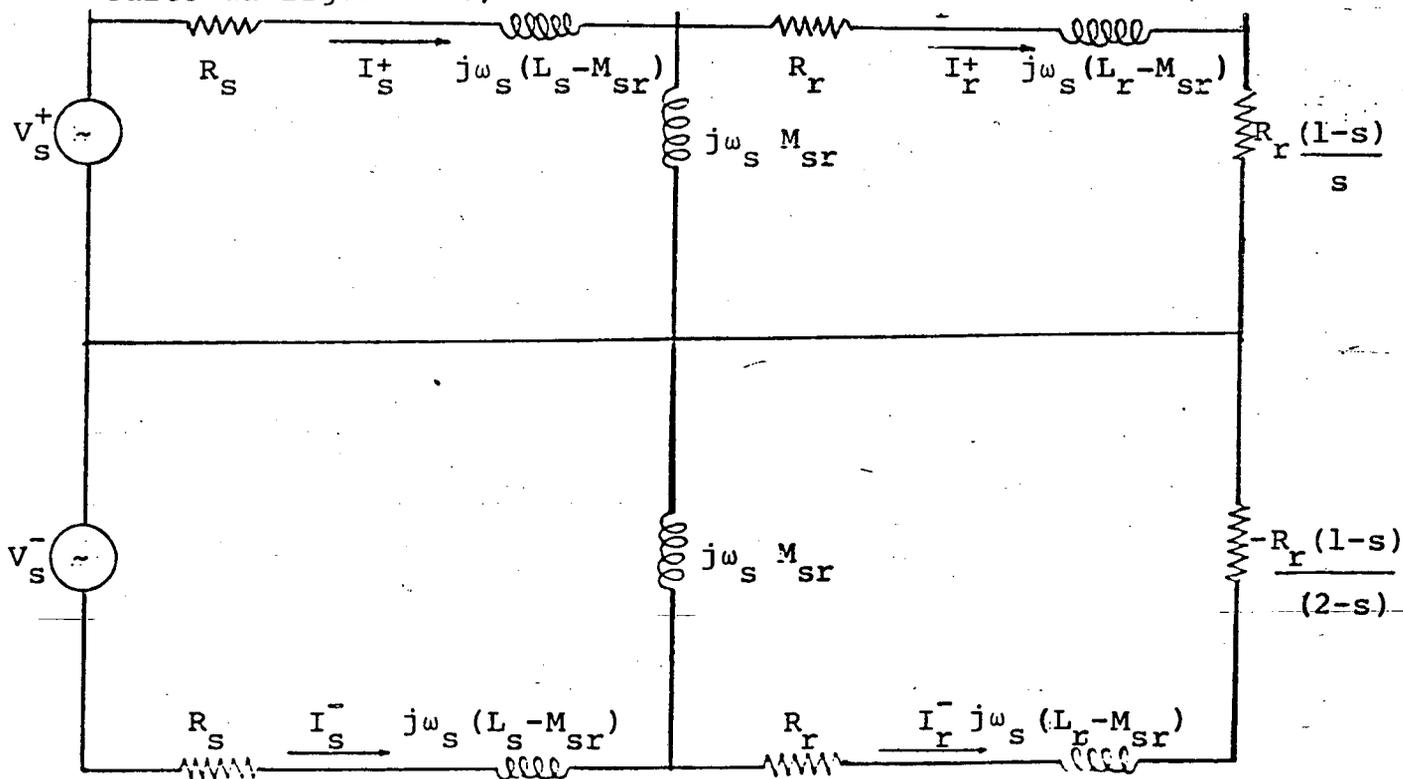


Figura 4.1 - Modelo de gaiola simples para o motor de indução trifásico, para alimentação desequilibrada.

Se as tensões que alimentam o motor de indução forem equilibradas então  $V_s^- = 0$ ,  $I_s^- = 0$ ,  $I_r^- = 0$ ; e o sistema da equação 4.4., torna-se:

$$V_s^+ = (R_s + j\omega_s L_s) I_s^+ + j\omega_s M_{sr} I_r^+ \quad (4.5)$$

$$0 = j\omega_s M_{sr} I_s^+ + \left(\frac{R_r}{s} + j\omega_s L_r\right) I_r^+$$

O sistema da equação 4.5., leva ao circuito equivalente do motor de indução, chamado "Modelo do motor de indução por Gaiola Simples", conforme ilustra a figura 4.2:

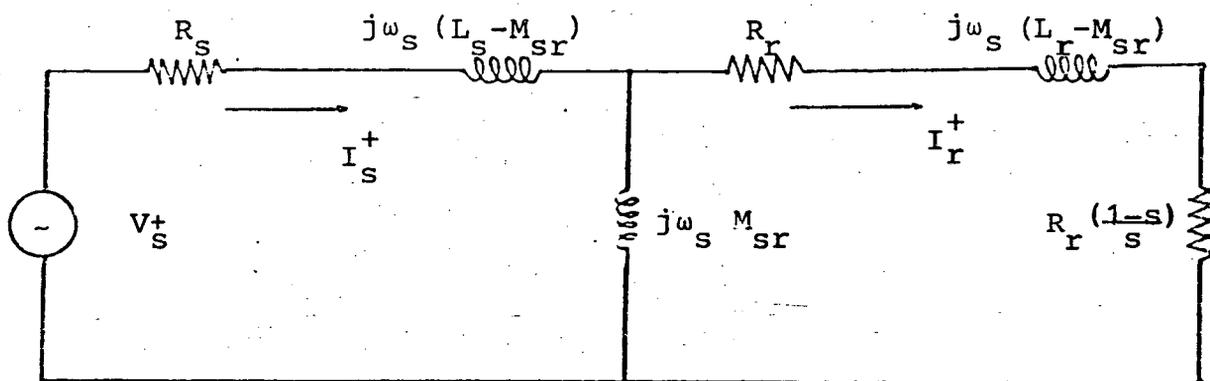


Figura 4.2 - Modelo equivalente ao da figura 4.1 para alimentação equilibrada.

Para incorporar as perdas no ferro do circuito magnético, basta introduzir no circuito da figura 4.2, uma resistência  $R_m$  comumente inserida em paralelo com  $X_m$ , e o circuito fi-

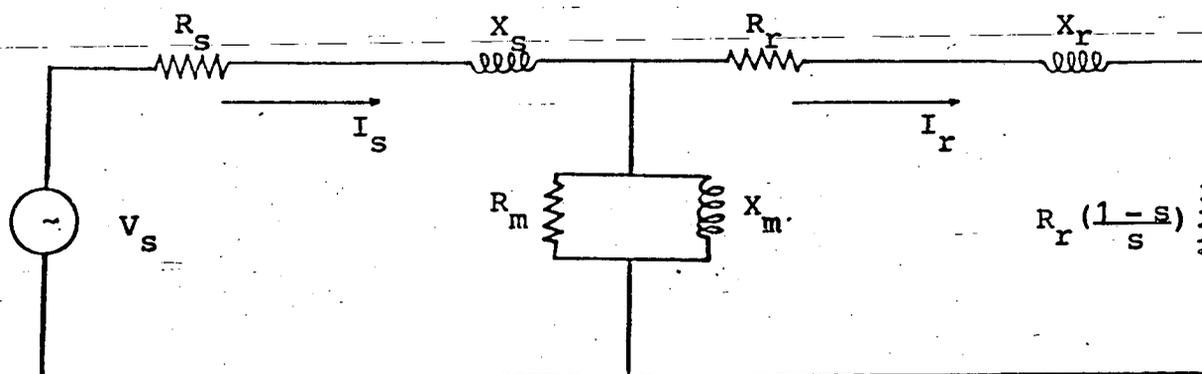


Figura 4.3 - Modelo equivalente ao da figura 4.2 quando se inclui as perdas no ferro.

onde:

$$V_s = V_s^+ , \quad I_s = I_s^+ , \quad I_r = I_r^+$$

$$X_s = j\omega_s (L_s - M_{sr}) , \quad X_m = j\omega_s M_{sr}$$

$$X_r = j\omega_s (L_r - M_{sr})$$

#### 4.3. Motor Equivalente

O modelo obtido a partir dos estudos desenvolvidos nos itens precedentes, é aplicável a um único motor de indução ligado a um determinado barramento C.A. Entretanto, comumente encontra-se um grande número de motores operando em paralelo. Se o objetivo principal é obter as potências ativa e reativa solicitadas pelo conjunto de motores e não grandezas operacionais de cada motor individualmente, então uma boa técnica é modelar esta carga por um único motor. Isto reduzirá significativamente o grau de dificuldade na manipulação de dados, bem como facilitará a execução do programa que calcula estas potências. Em vista disto e das representações empregadas em outros estudos, foi utilizado neste trabalho o modelo equivalente que representa simultaneamente vários motores ligados a um mesmo barramento.

O método empregado, a seguir, para obtenção dos parâmetros do motor equivalente, é aproximado mas garante bons resultados para o estudo proposto, segundo relatado em [7].

Para o objetivo deste estudo necessita-se apenas dos parâmetros elétricos do motor de indução equivalente, normalizados à própria base do motor equivalente, e estes são obtidos calculando-se os parâmetros equivalentes através da combinação paralela dos elementos, como segue:

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \sum_{i=1}^{i=n} [(S_i / Z_i \cdot S_{eq})], \text{ onde} \quad (4.6)$$

$S_i$  = Potência individual de cada motor

$S_{eq}$  = Potência do motor equivalente

$Z_{eq}$  = Impedância do motor equivalente

$Z_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) = Impedância individual de cada motor

#### 4.4. Determinação das características de operação de um motor de indução

A partir do circuito equivalente (modelo por gaiola simples do motor de indução) obtido no item 4.2, que representa também, o modelo para um grupo de motores convertidos a um motor equivalente como demonstrado, no item 4.3, pode-se então calcular o escorregamento do motor para uma dada condição de operação, desde que se conheça a equação do torque da carga aplicada ao eixo do motor. Uma vez obtido o escorregamento  $s$ , então com base no circuito equivalente pode-se calcular as potências ativa e reativa, o rendimento, correntes do estator e do rotor, perdas, etc, como segue:

##### 4.4.1. Equação Geral do Torque de Carga

Em seu aspecto mais abrangente, o torque mecânico acionado pelo motor pode ser descrito por uma expressão polinomial do seguinte tipo:

$$T_c = A_0 + A_1 \omega_m + A_2 \omega_m^2 \quad (4.7)$$

Sabe-se que:

$$\omega_m = (1 - s) \omega_s$$

Então:

$$T_c = (A_0 + A_1 \omega_s + A_2 \omega_s^2) + (-A_1 \omega_s - 2A_2 \omega_s^2)s + A_2 \omega_s^2 s^2 \quad (4.8)$$

onde:

$A_0$  = Coeficiente de torque constante

$A_1$  = Coeficiente de torque linear

$A_2$  = Coeficiente de torque quadrático

#### 4.4.2. Equação do Torque Elétrico

A potência elétrica convertida em potência mecânica por motor de indução trifásico, com base no circuito da figura 4.3, é dada por:

$$P_e = 3 \frac{R_r (1 - s)}{s} I_r^2 \quad (4.9)$$

A potência líquida entregue ao eixo do motor será dada por:

$$P_{el} = P_e - P_{av} \quad (4.10)$$

onde:

$P_{el}$  = Potência líquida no eixo do motor

$P_{av}$  = Perdas por atrito e ventilação

O torque desenvolvido pelo eixo do motor é dado por:

$$T = \frac{P_{el}}{\omega_m} \quad (4.11)$$

substituindo 4.8 e 4.10 em 4.11, obtem-se:

$$T = 3 \frac{R_r I_r^2}{s \omega_s} - \frac{P_{av}}{\omega_s (1-s)} \quad (4.12)$$

O ponto de operação de um motor de indução em regime permanente, será aquele em que o torque elétrico líquido entregue ao eixo do motor for igual ao torque solicitado pela carga mecânica acoplada ao seu eixo.

Desta forma, utilizando-se as expressões 4.8 e 4.12, obtem-se a seguinte expressão polinomial para o escorregamento (s):

$$f(s) = 0 = K_1 s^5 + K_2 s^4 + K_3 s^3 + K_4 s^2 + K_5 s + K_6 \quad (4.13)$$

onde:

$$\begin{aligned}
K_1 = A_2 \omega_s^2 & \left[ \frac{(R_s^2 R_m X_m^2 + R_s X_m^2 R_m^2 + X_s^2 R_m X_m^2)}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + X_m R_m)^2} \right]^2 + \\
& + A_2 \omega_s^2 X_r^2 \left[ \frac{R_s^2 R_m^2 X_m^2 + X_s^2 X_m R_m^2 + R_s X_m^2 X_s R_m + X_s X_m^2 R_m^2 R_s X_s X_m R_m}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + X_m R_m)^2} \right]^2
\end{aligned} \tag{4.14}$$

$$K_2 = \frac{K_1}{A_2 \omega_s^2} (-A_1 \omega_s - 2A_2 \omega_s^2) +$$

$$+ \frac{(2R_r R_s X_m R_m^2 X_s + 2R_s^2 X_m^2 R_r R_m + 2R_r R_s X_m^2 R_m^2)}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + R_m X_m)^2}$$

$$- K_1 = A_2 \omega_s^2 \left[ \frac{(2R_r R_s^2 X_m X_s R_m + 2R_r X_m^2 X_s^2 R_m)}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + R_m X_m)^2} \right] \tag{4.15}$$

$$K_3 = (-A_1 \omega_s - 2A_2 \omega_s^2) \left[ \frac{K_1}{A_2 \omega_s^4} (A_1 \omega_s + 2A_2 \omega_s^2) + \frac{K_2}{A_2 \omega_s^2} \right]$$

$$+ (A_2 \omega_s^2) \left[ \frac{2R_r R_s X_m^2 R_m^2 + 2R_s^2 X_s^2 R_r R_m + 2R_r X_s^2 S_m^2 R_m}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + R_m X_m)^2} - R_r^2 \right] +$$

$$\frac{K_1}{A_2 \omega_s^2} (A_0 + A_1 \omega_s + A_2 \omega_s^2) \tag{4.16}$$

$$\begin{aligned}
K_4 = & (A_0 + A_1 \omega_s + A_2 \omega_s^2) \left[ \frac{K_1}{A_2^2 \omega_s^4} (A_1 \omega_s + 2A_2 \omega_s^2) + \frac{K_2}{A_2 \omega_s^2} \right] \\
& + (A_1 \omega_s - 2A_2 \omega_s^2) \left[ \frac{2R_r R_s X_m^2 R_m^2 + 2R_s^2 X_m^2 R_r R_m + 2R_r X_s^2 X_m^2 R_m}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + R_m X_m)^2} - R_r^2 \right] \\
& + A_2 \omega_s^2 R_r^2 + \frac{3 \cdot R_r (V_t \cdot X_m \cdot R_m)^2}{\omega_s \left[ (R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + R_m X_m)^2 \right]} - \frac{P_{AV} \cdot K_1}{A_2 \omega_s^2}
\end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\begin{aligned}
K_5 = & (A_0 + A_1 \omega_s + A_2 \omega_s^2) \left[ \frac{2R_r R_s X_m^2 R_m^2 + 2R_s^2 X_m^2 R_r R_m + 2R_r X_s^2 X_m^2 R_m}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + X_m R_s + R_m X_m)^2} - R_r^2 \right] \\
& + (-A_1 \omega_s - 2A_2 \omega_s^2) R_r^2 - \frac{3 \cdot R_r (V_t \cdot X_m \cdot R_m)^2}{\left[ (R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + X_m R_s + R_m X_m)^2 \right] \omega_s} \\
& + P_{AV} \left[ \frac{2R_r R_s X_m^2 R_m^2 + 2R_s^2 X_m^2 R_r R_m + 2R_r X_s^2 X_m^2 R_m}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + R_m X_m)^2} \right]
\end{aligned} \tag{4.18}$$

$$K_6 = (A_0 + A_1 \omega_s + A_2 \omega_s^2) R_r^2 + P_{AV} R_r^2 \tag{4.19}$$

Conhecidos os coeficientes da  $f(s) = 0$ , obtêm-se as raízes da equação (4.13) ou do polinômio de  $s$ . O valor do escorregamento( $s$ ) de operação, se houver, será aquele da raiz de  $f(s) = 0$  cujo valor seja real e menor que o escorregamento para

o ponto de torque máximo, desenvolvido pelo motor. Este será, de acordo com [8], dado por:

$$S_{Tm\acute{a}x} = \frac{R_r}{a^2 + b^2} \quad (4.20)$$

onde:

$$a = \frac{R_s R_m^2 X_m + R_s^2 X_m^2 R_m + R_s X_m^2 R_m^2}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + R_m X_m)^2} \quad (4.21)$$

$$b = X_r + \frac{R_s^2 R_m^2 X_m - R_s X_s X_m^2 R_m + X_s^2 X_m R_m^2 + R_s X_m^2 X_s R_m + X_s X_m^2 R_m^2}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + R_m X_m)^2} \quad (4.22)$$

A partir de  $s$  assim obtido e ainda com base no circuito da fig. 4.3, pode-se calcular a potência  $P + jQ$  solicitada pelo motor, rendimento, correntes e demais parâmetros operacionais do motor, como segue:

$$P = 3 \cdot V_s^2 \cdot c_2 \cdot a_2 \quad (4.23)$$

$$Q = 3 \cdot V_s^2 \cdot c_2 \cdot b_2 \quad (4.24)$$

$$|I_2| = \frac{V_s \cdot R_m X_m}{a_1 \cdot b_1} \quad (4.25)$$

$$|I_1| = \frac{V_s \cdot C_1}{a_2 \cdot b_2} \quad (4.26)$$

$$\eta(\%) = 1 - \frac{R_s I_s^2 + R_r' I_r^2 + P_{AV}}{P/3} \quad (4.27)$$

onde:

$$a_1 = \sqrt{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + R_m X_m)^2} \quad (4.28)$$

$$R_1' = \frac{R_r'}{s}$$

$$a_2 = R_s C_1 + (-X_m R_m X_r)(R_r R_m - X_r X_m) + X_m R_m R_r' (X_r R_m + R_r' X_m + X_m R_m) \quad (4.29)$$

$$b_2 = X_s C_1 + X_r R_m R_r' (R_r R_m - X_r X_m) + X_m R_m X_r (X_r R_m + R_r' X_m + X_m R_m) \quad (4.30)$$

$$c_1 = (R_r' R_m - X_r X_m)^2 + (X_r R_m + R_r' X_m + X_m R_m)^2 \quad (4.31)$$

$$c_2 = \frac{c_1}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2}} \quad (4.32)$$

$$b_1 = \sqrt{R_r' + \frac{R_s R_m^2 X_m + R_s^2 X_m^2 R_m + R_s X_m^2 R_m}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + R_m X_m)^2} + \dots \dots \dots X_r + \frac{R_s^2 R_m^2 X_m - R_s X_s X_m^2 R_m + X_s^2 X_m R_m^2 + R_s X_m^2 X_s R_m + X_s X_m^2 R_m^2}{(R_m R_s - X_m X_s)^2 + (X_s R_m + R_s X_m + R_m X_m)^2}} \quad (4.33)$$

A seguir são discutidas as bases de um algoritmo desenvolvido para a simulação digital da operação do motor de indução.

#### 4.5 - Implementação Digital

Da mesma forma que nos capítulos 2 e 3, procedimentos foram efetuados para executar e implementar o programa digital que determine os parâmetros do motor de indução (equivalente ou não) cujo modelo matemático foi desenvolvido nos itens precedentes. Para o método são necessárias as seguintes informações iniciais:

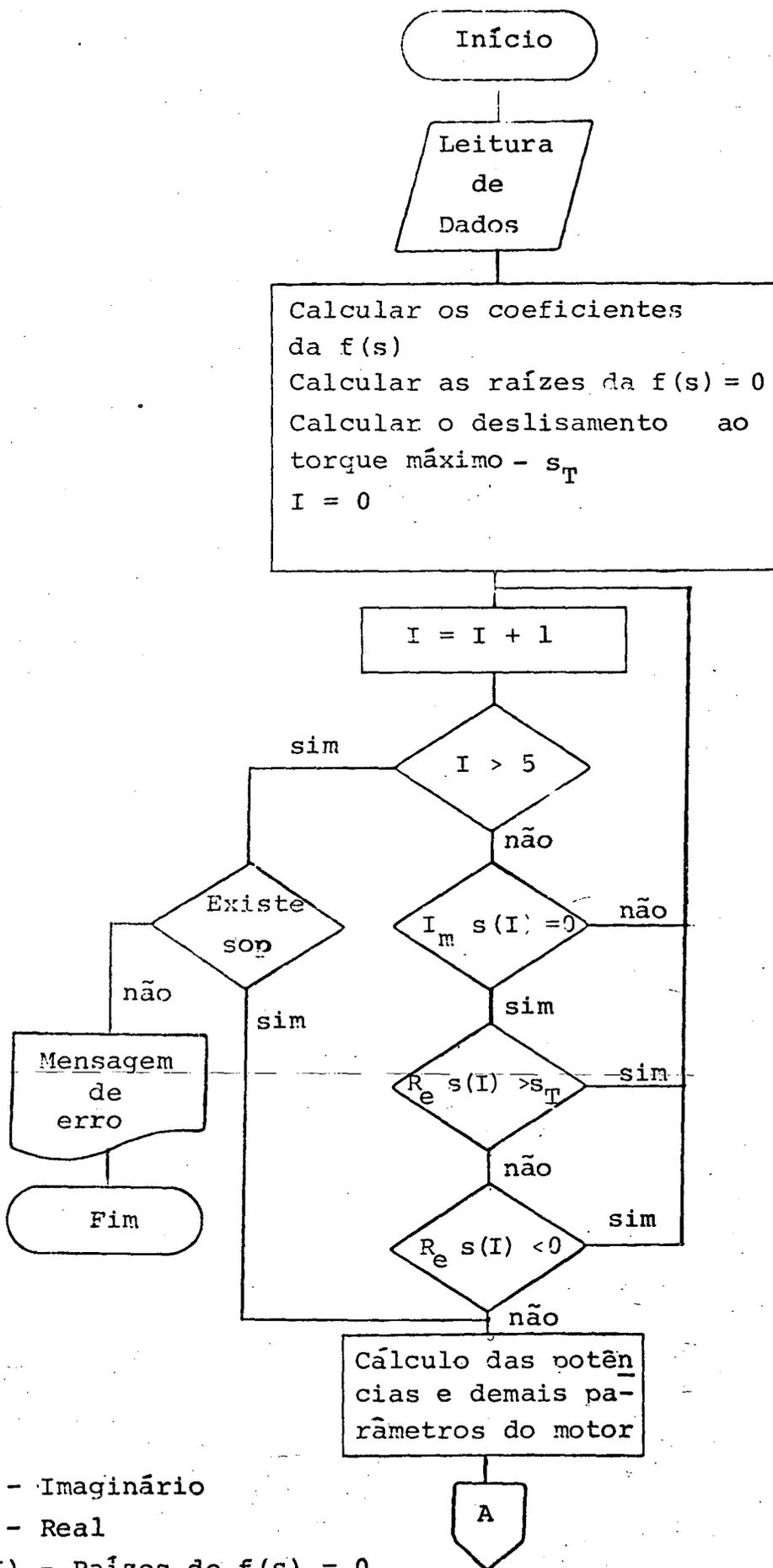
- a - Coeficientes  $A_0, A_1, A_2$  da equação 4.7
- b - Velocidade angular síncrona ( $\omega_s$ )
- c - Perdas por atrito e ventilação ( $P_{av}$ )
- d - Resistências do estator e rotor -  $R_s, R_r$
- e - Reatância do estator e do rotor  $X_s, X_r$
- f - Reatância de magnetização -  $X_m$
- g - Resistência de magnetização -  $R_m$
- h - Tensão Alternada e ângulo de alimentação do motor  $V_s$

A partir do exposto e do modelo desenvolvido nos itens precedentes, foi desenvolvido o seguinte algoritmo:

- a - Efetuar a leitura dos dados de entrada
- b - Determinar os coeficientes da equação (4.13) a partir das expressões de (4.14) a (4.19)

- c - Resolver a equação (4.13) obtendo os valores de  $\underline{s}$  e em seguida determinar o valor de  $s$  da operação.
- d - Calcular as potências, ativa e reativa (P,Q)
- e - Emitir relatório de saída e terminar o processamento

Para o algoritmo descrito, foi desenvolvido um programa digital segundo o fluxograma a seguir:



$I_m$  - Imaginário

$R_e$  - Real

$s(I)$  - Raízes de  $f(s) = 0$

sop - deslissamento de operação (s)



#### 4.6 - Resultados

Seguindo a mesma filosofia adotada nos capítulos 2 e 3, utilizando-se o modelo do motor de indução dado pela figura 4.3, calculam-se as grandezas de operação de 4 motores de indução com características de torque de carga distintas, cujos dados e resultados são fornecidos pelas tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. a seguir.

Dada as características absolutas dos resultados obtidos, torna-se, nesta fase, praticamente impossível discutir de talhes sobre as informações calculadas. Todavia, as tabelas evidenciam que, para a condição de torque de operação especificado, os motores passam a ser conhecidos através de suas principais grandezas, tais como, potências ativa e reativa, correntes, rendimento, etc. Destas, as que interessam aos estudos de fluxo de carga são as potências  $P$  e  $Q$ .

Ressalta-se, finalmente, que os cálculos foram efetuados a partir de uma tensão de alimentação  $V = 1.0$  pu. Posteriormente, quando estas cargas forem incorporadas a um programa de fluxo de carga, o processo exigirá estudos semelhantes com outros níveis de tensão.

```

=====
I  MDELAGEM MOTOR DE INCUCAO - CAICLA SIMPLES... BARRA N. 3
I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA
I
I  TC = 38596.8 + 0.0* WR + 0.0 WR**2
I
=====
I  TENSAC NA BARRA DC MOTOR EM VOLTS = 4160.000
I
I  TENSAC NA BARRA DC MOTOR EM PU = 1.000
I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0542
I
I  RESISTENCIA DC ENFLAMENTO DO ROTOR EM CHMS = 0.0421
I
I  REATANCIA DO ENRCLAMENTO DO ESTATOR EM CHMS = 0.0932
I
I  REATANCIA DO ENRCLAMENTO DO ROTOR EM CHMS = 0.0962
I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 4.5946
I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM CHMS = INFINITA
I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS= 0.0
I
=====

```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU | CORRENTES AMPERES | ESCORREGAMENTO | PERDAS EM KWATTS | TORQUE | FATOR | RENDI | ROTACAO |
I  ATIVA | REATIVA | ESTATOR | ROTOR | MAXIMO | OPERA. | ESTATOR | ROTOR | N X M | POTENCIAL | MENTO | RPM |
I  0.03731 0.0376 | 734.5761 521.590 | 10.2155 | 10.0054 | 87.6821 34.3201 | 38596.810 | 7038681 | 0.96731 | 891.55591
I
=====

```

(b) Resultados

Tabela 4.1

```

=====
I  MDELAGEM MOTOR DE INCUCAO - CAICLA SIMPLES... BARRA N. 10
I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA
I
I  TC = 24489.0 + 0.0* WR + 0.0 WR**2
I
=====
I  TENSAC NA BARRA DC MOTOR EM VOLTS = 4160.000
I
I  TENSAC NA BARRA DC MOTOR EM PU = 1.000
I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM CHMS = 0.0515
I
I  RESISTENCIA DC ENFLAMENTO DO ROTOR EM CHMS = 0.0421
I
I  REATANCIA DO ENRCLAMENTO DO ESTATOR EM CHMS = 0.0932
I
I  REATANCIA DO ENRCLAMENTO DO ROTOR EM CHMS = 0.0962
I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM CHMS = 4.5946
I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM CHMS = INFINITA
I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS= 0.0
I
=====

```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU | CORRENTES AMPERES | ESCORREGAMENTO | PERDAS EM KWATTS | TORQUE | FATOR | RENDI | ROTACAO |
I  ATIVA | REATIVA | ESTATOR | ROTOR | MAXIMO | OPERA. | ESTATOR | ROTOR | N X M | POTENCIAL | MENTO | RPM |
I  0.02371 0.0370 | 605.6511 329.227 | 10.2163 | 10.0055 | 57.4131 13.0741 | 24489.010 | 5385241 | 0.97001 | 894.71511
I
=====

```

(b) Resultados

Tabela 4.2

```

=====
I  MDELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 14
I
I  EQUACAC DE TORQUE DE CARGA
I
I  TC = 46881.7 + 0.0* WR + 0.0 WR**2
I
=====
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 4160.000
I
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM PU = 1.000
I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0515
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0421
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM CHMS = 0.0932
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0962
I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 4.5946
I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM CHMS = INFINITA
I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0
I
=====

```

## (a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU I CORRENTES AMPERES I ESCORREGAMENTO I PERDAS EM KWATTS I TORQUE I FATOR I RENDI I ROTACAO
I  ATIVA I REATIVA I ESTATOR I ROTOR I MAXIMO I OPERA. I ESTATOR I ROTOR I N X M I POTENCIA I MENTO I RPM
I  0.04521 0.0382 I 21.6721 634.982 I 0.216310.0115 I 104.2901 50.6671 46881.710.7639521 0.96571 889.6860
I
=====

```

## (b) Resultados

Tabela 4.3

```

=====
I  MDELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 15
I
I  EQUACAC DE TORQUE DE CARGA
I
I  TC = 99608.5 + 0.0* WR + 0.0 WR**2
I
=====
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 13800.000
I
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM PU = 1.000
I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1034
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM CHMS = 0.0785
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM CHMS = 0.3098
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.2358
I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 9.2963
I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM CHMS = INFINITA
I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0
I
=====

```

## (a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU I CORRENTES AMPERES I ESCORREGAMENTO I PERDAS EM KWATTS I TORQUE I FATOR I RENDI I ROTACAO
I  ATIVA I REATIVA I ESTATOR I ROTOR I MAXIMO I OPERA. I ESTATOR I ROTOR I N X M I POTENCIA I MENTO I RPM
I  0.09261 0.1589 I 524.9261 408.128 I 0.143910.0042 I 265.4501 39.2171 99608.510.4367241 0.96841 896.2878
I
=====

```

## (b) Resultados

Tabela 4.4

#### 4.7 - Conclusões

Dentro da mesma linha estabelecida nos demais capítulos, os motores de indução foram analisados inicialmente sob o ponto de vista de modelagem analítica. Partindo-se de um sistema genérico de equações foram feitas considerações que culminaram no circuito equivalente de um motor de indução trifásico, que foi utilizado na simulação desenvolvida no trabalho. Este motor, acredita-se ser suficiente para representar a maioria dos casos industriais. Entretanto, o desenvolvimento de outros modelos poderá constituir temas para futuros estudos.

Com relação as contribuições do capítulo, destaca-se o desenvolvimento de um método que permite, com precisão, avaliar os valores de potência ativa e reativa consumidas por um motor e o seu inter-relacionamento com a carga acionada. Os resultados obtidos pelo programa digital elaborado, comprovam a significância destas considerações, principalmente sob o ponto de vista de reativos. De fato, a simples consideração de um consumo de reativos com base em um fator de potência típico, pode, indiscutivelmente levar a valores incompatíveis com a realidade da operação do motor de indução para uma dada condição de carga. Além disso programa permite a determinação de várias características de operação dos motores utilizados.

## CAPÍTULO V

INCORPORAÇÃO DOS MODELOS DAS CARGAS ESPECIAIS  
AO ESTUDO DE FLUXO DE CARGA5.1. Introdução

Nos capítulos anteriores foram desenvolvidos os modelos do elo de transmissão em corrente contínua (ETCC), da carga DC (f.c.e.m. constante) alimentada por uma ponte retificadora, e do motor de indução trifásico com rotor em gaiola. Para cada modelo foi desenvolvido um programa digital que calcula todos os seus parâmetros, dentre os quais potências ativa e reativa.

O propósito deste capítulo é incorporar simultaneamente todos estes programas a um programa de fluxo de carga, de forma que o resultado deste traduza a realidade operacional destas cargas, quando consideradas significativas.

5.2. O programa de fluxo de carga em sua estrutura original

Os modelos de carga anteriormente discutidos foram implementados resultando em programas digitais específicos cujos resultados foram comprovados através de testes já apresentados. Para que estes programas possam ser utilizados de forma efetiva, é necessário incorporá-los a um programa de fluxo de carga. Foi então empregado um programa bastante versátil e confiável, atualmente utilizado pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia. Este programa, em sua forma original utiliza, como qualquer outro, cargas modeladas por

$P + jQ$  constante. O programa empregado executa fluxo de potência e estudos de contingências para sistemas de potência de corrente alternada. Ele é capaz de executar os seguintes controles:

- a) Controle de "tap"
- b) Controle de potências reativas em barras P.V.
- c) Controle de tensão em barras P.Q.

Em estudos de contingência o programa é capaz de realizar:

- a) Cálculo automático de contingência em todos os ramos c.a.
- b) Cálculo específico de contingência em ramo previamente determinado.
- c) Saída total e parcial de geradores
- d) Controle automático de tensão
- e) Redistribuição de potência reativa de acordo com as características do governador da turbina.

O programa é escrito em Fortran IV, utilizando o método de Newton Raphson, e foi implementado num sistema IBM-4341.

O programa é dimensionado para:

- a) 60 barras
- b) 100 ramos
- c) 20 transformadores controláveis
- d) 05 sistemas
- e) 10 interligações
- f) 20 geradores
- g) 20 barras com limites de reativos
- h) 20 barras com limites de tensão
- i) 02 transformadores defasadores

Dentro do assunto proposto, um dos principais obje-

tivos é o de se substituir tais campos por modelos apropriados que se fizerem necessários. Assim a técnica consiste em:

- (i) Adotando-se como condição inicial todas as tensões iguais a 1,0 pu e ângulos iguais a  $0^\circ$ , calculam-se, para cada carga especial (retificador, ETCC, motor de indução) as correspondentes potências ativa e reativa.
- (ii) Uma vez conhecidas todas as potências de carga, procede-se à solução convencional, que culmina com valores finais das tensões de barra, dentre elas, as das barras onde se situam as cargas especiais. Naturalmente estas novas tensões implicam em novos pontos de operação e, consecutivamente novos valores de  $P + jQ$  são determinados; com isto procede-se, novamente, à solução convencional até que para duas interações subsequentes haja convergência de potências.

Esta estrutura indica, pois, que o uso do programa original é feito de modo direto, sem necessidade de modificar sua lógica, mas apenas utilizá-lo adequadamente.

~~O problema da incorporação das cargas especiais torna-se um pouco mais difícil quando do tratamento de um ETCC que venha a configurar-se como elo de interligação. Neste caso, as estações retificadora e inversora resultam em que os correspondentes sistemas C.A. sejam tratados separadamente. Conforme estabelece a filosofia já discutida; a solução, para este caso, consiste no processamento de dois fluxos de carga que são a cada iteração, inter-relacionados pelo ETCC. A lógica para tal será descrita posteriormente.~~

Finalizando, pode-se concluir que a incorporação das cargas especiais não modifica o programa original, mas apenas, o complementa em forma de uma avaliação e modificação dos valores de  $P + jQ$  associado às citadas cargas.

### 5.3. Configurações do sistema de potência previstas pelo programa

O programa desenvolvido aceita duas configurações básicas:

- a) uma única área elétrica, podendo nesta existir: cargas retificadoras, motores de indução e sistema de CC desde que não atuem como elo de interligação. Esta configuração está ilustrada pela fig. 5.1 abaixo.

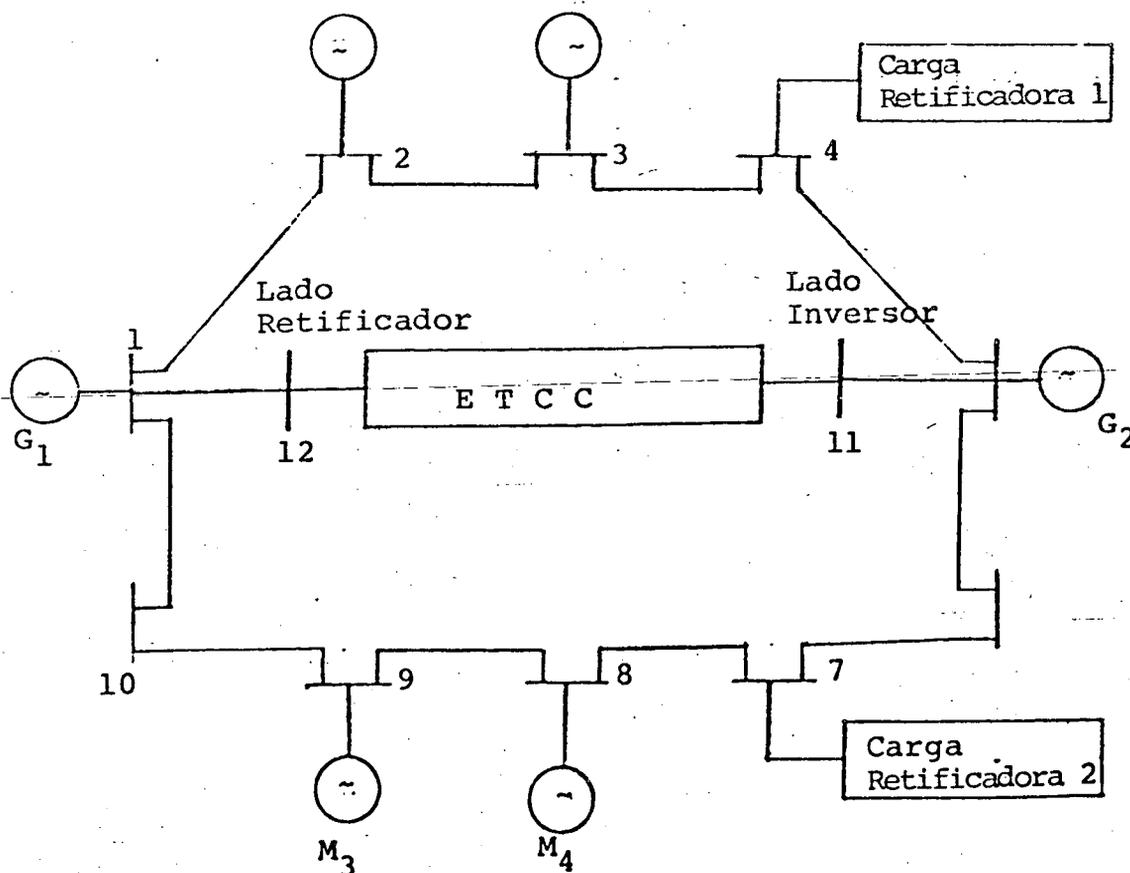


Figura 5.1 - Sistema AC/DC incluindo todas as cargas especiais tratadas neste trabalho.

Em termos de fluxo de carga, o sistema da fig. 5.1 será visto como ilustrado abaixo na fig. 5.2.

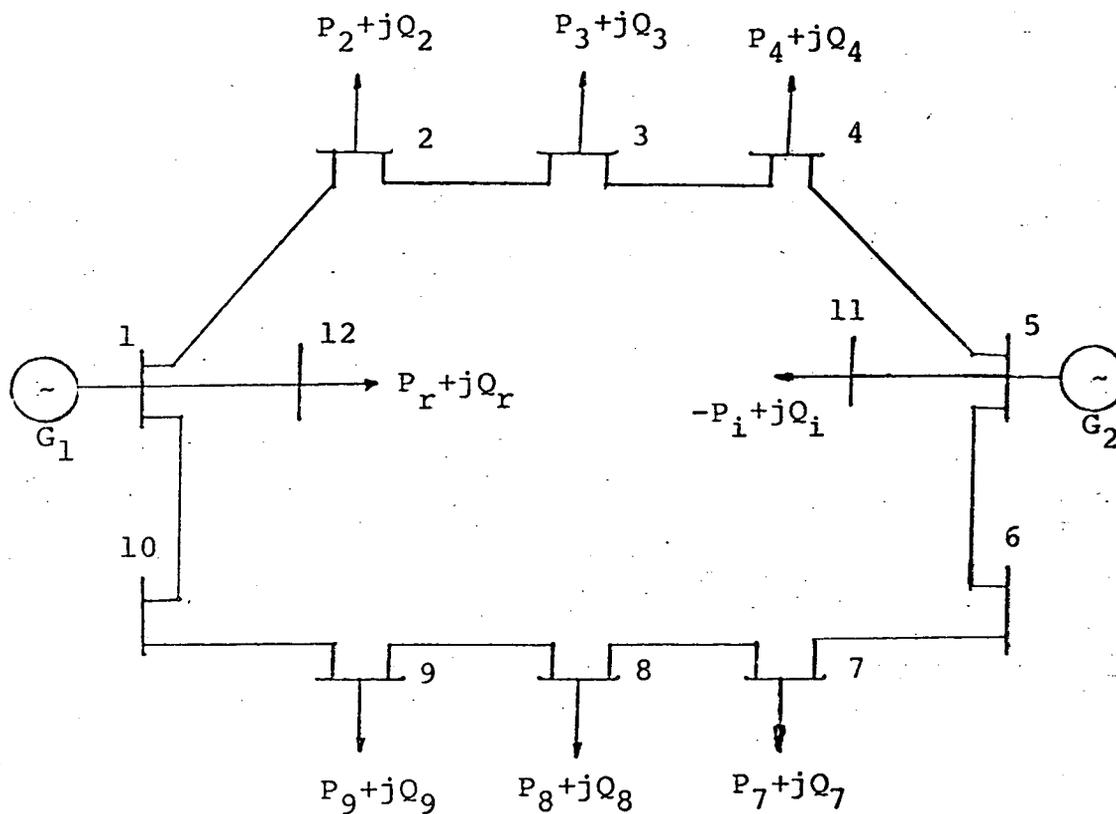


Figura 5.2 - Sistema AC/DC da figura 5.1, preparado para estudo do fluxo de carga.

- b) Duas áreas elétricas interligadas por um sistema de corrente contínua, podendo cada area, possuir cargas semelhantes ao item (a)

Esta configuração está ilustrada pela fig. 5.3 abaixo.

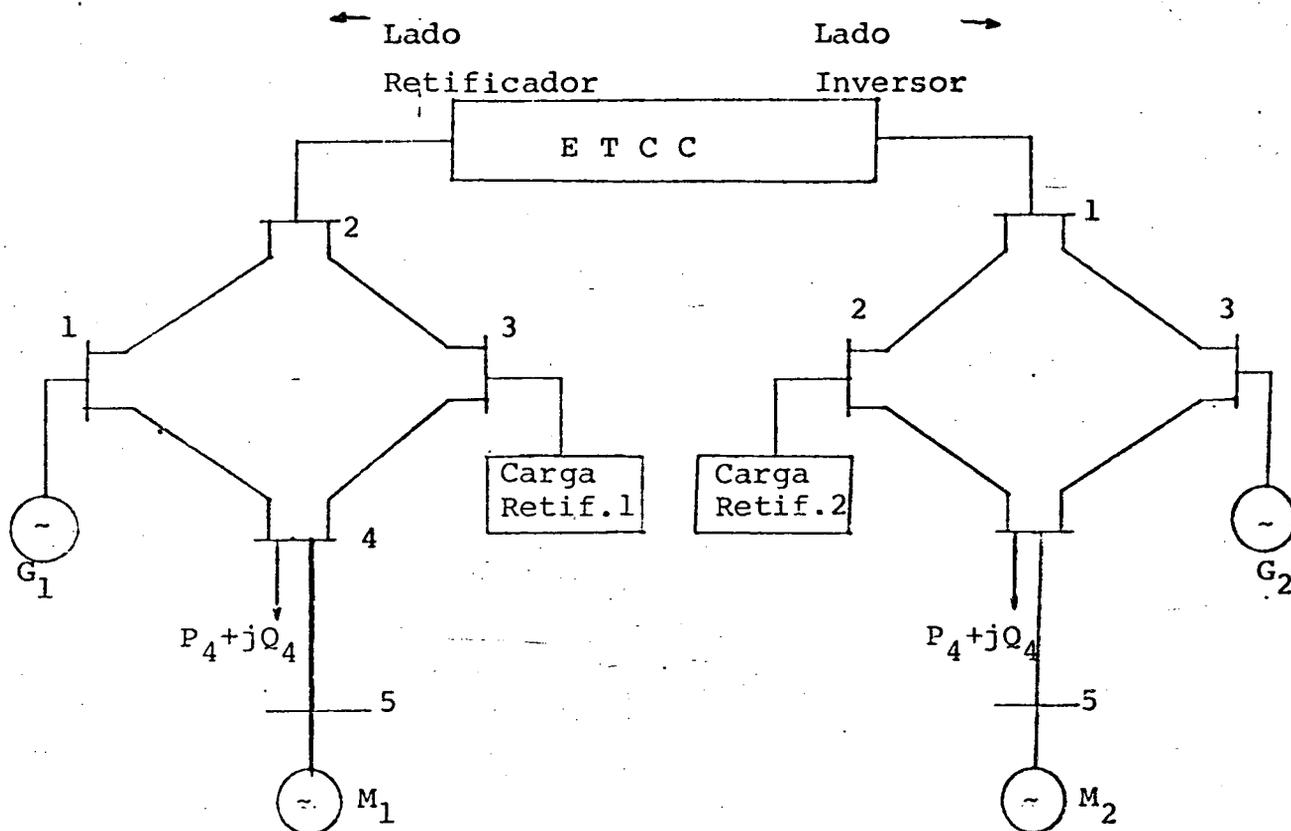


Figura 5.3 - Sistema AC/DC como o ETCC operando como elo de interligação.

Em termos de fluxo de carga, a configuração da fig.5.3 será visto como ilustrado pela fig. 5.4 abaixo.

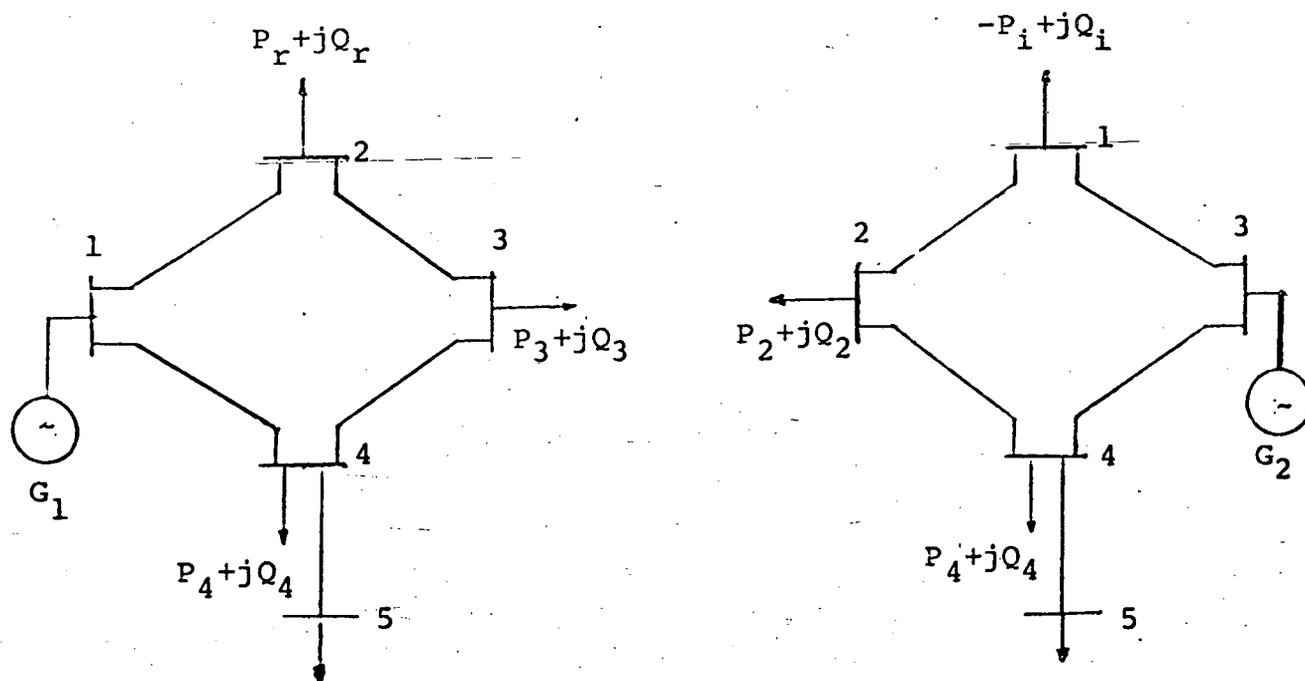


Figura 5.4 - Sistema AC/DC da figura 5.3, preparado para estudo de fluxo de carga.

#### 5.4. Implementação Digital

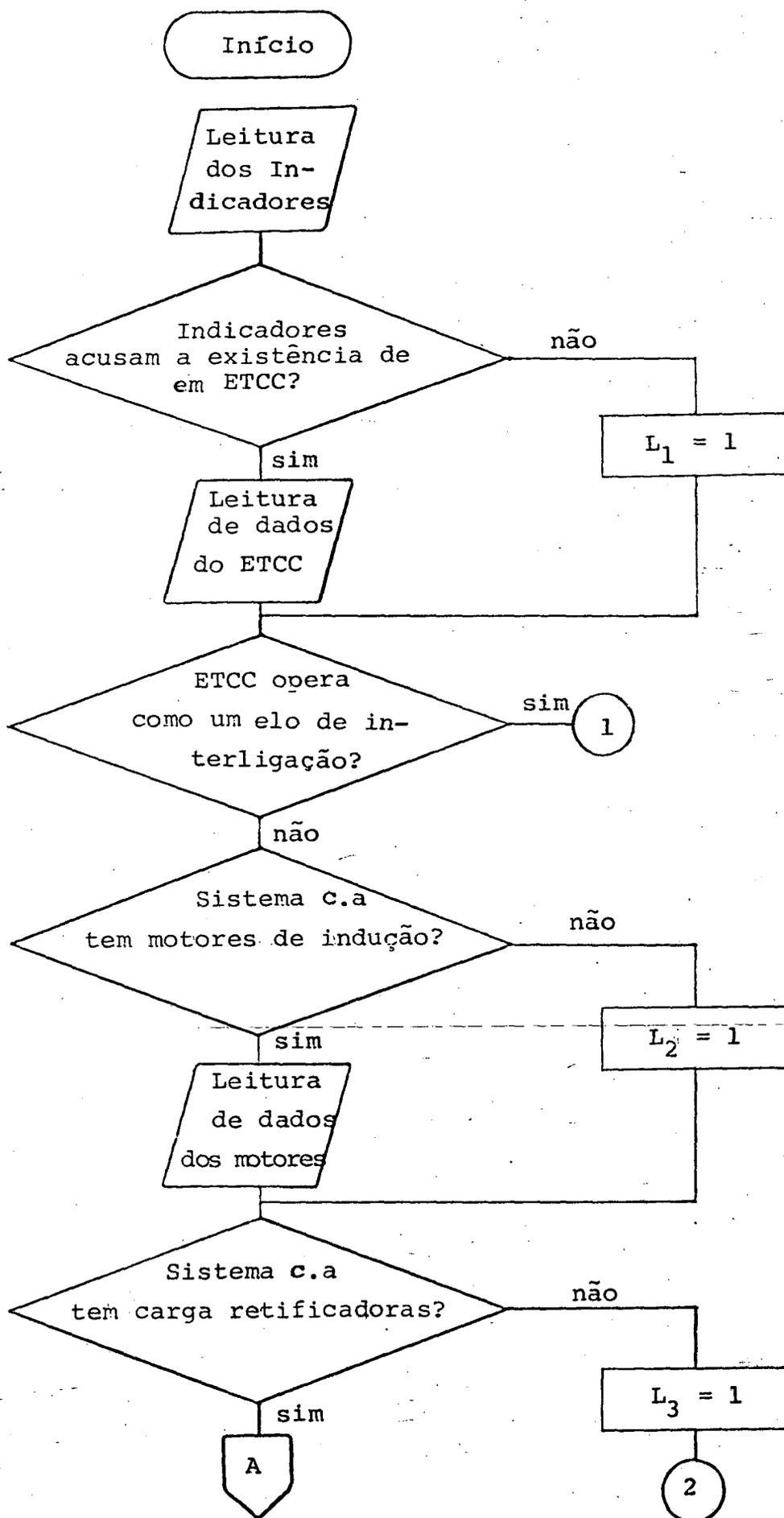
A partir do exposto e dos métodos desenvolvidos nos capítulos precedentes, foi elaborado um algoritmo para implementação digital, utilizando um programa de fluxo de carga já existente, conforme descrito a seguir:

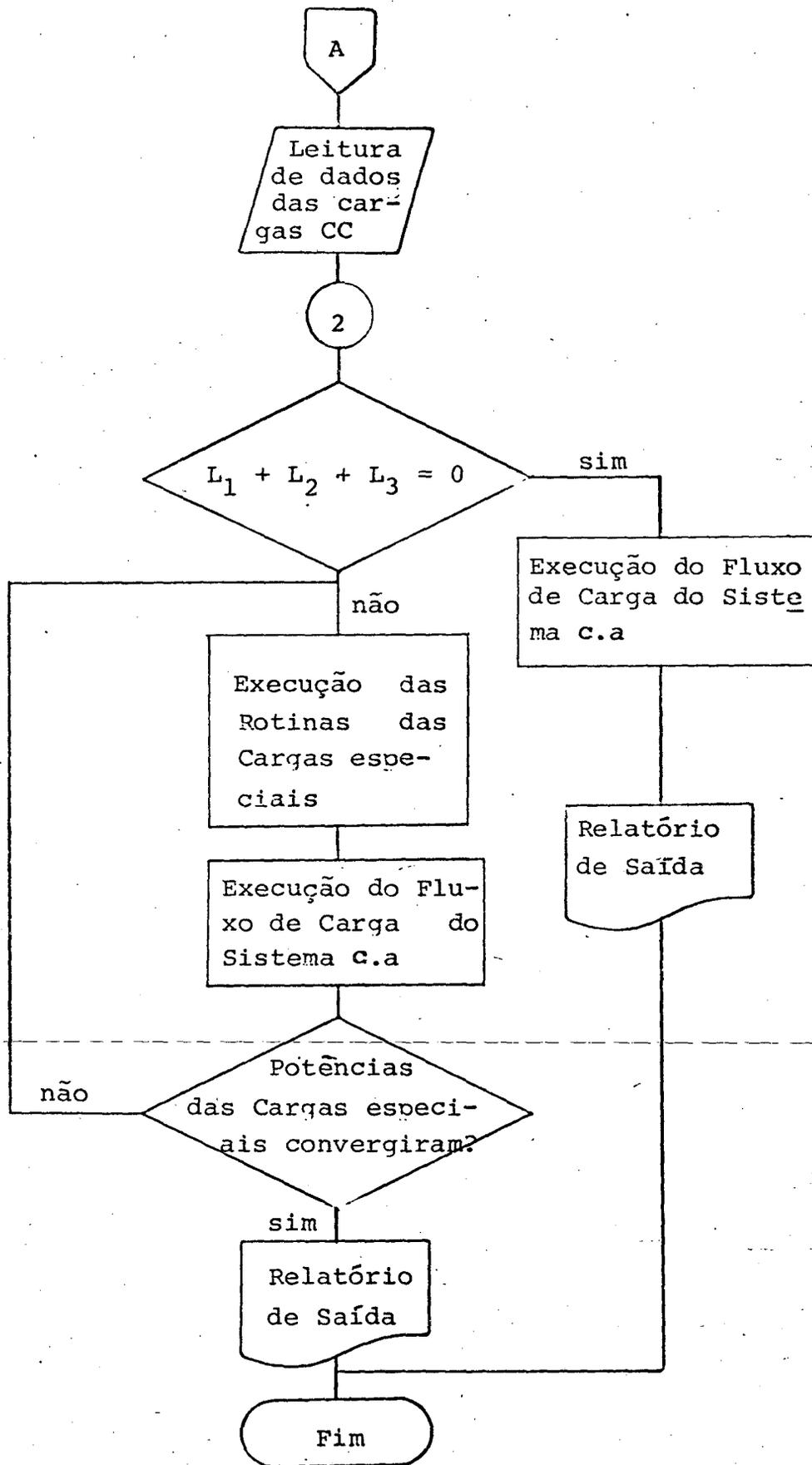
- a) Inicialmente é feita a leitura dos campos que informam se nos sistemas de potência está presente algum tipo de carga especial e ainda se existe um ETCC e se é ou não um elo de interligação.
- b) Se no item (a) a informação é de que não há nenhuma carga especial presente, então passa-se à leitura dos dados do sistema CA e o processamento do fluxo de carga, terminando, em seguida, o estudo.
- c) Se o item (a) informa a existência de cargas especiais, então poderão ser adotados os seguintes procedimentos:
  - 1º) Havendo sistema C.C e que este não seja um elo de interligação, então calcula-se a operação do ETCC para tensões C.A do retificador e inversor inicialmente, iguais a 1.0 pu e seus respectivos ângulos iguais a  $0^\circ$ . Havendo simultaneamente motores de indução e/ou cargas retificadoras, procede-se os cálculos das características operacionais destas cargas para tensões C.A de alimentação das mesmas, inicialmente estimadas em 1.0 pu. Em seguida procede-se a leitura dos dados de entrada do sistema C.A para o cálculo do fluxo de carga que utilizará, também, as potências

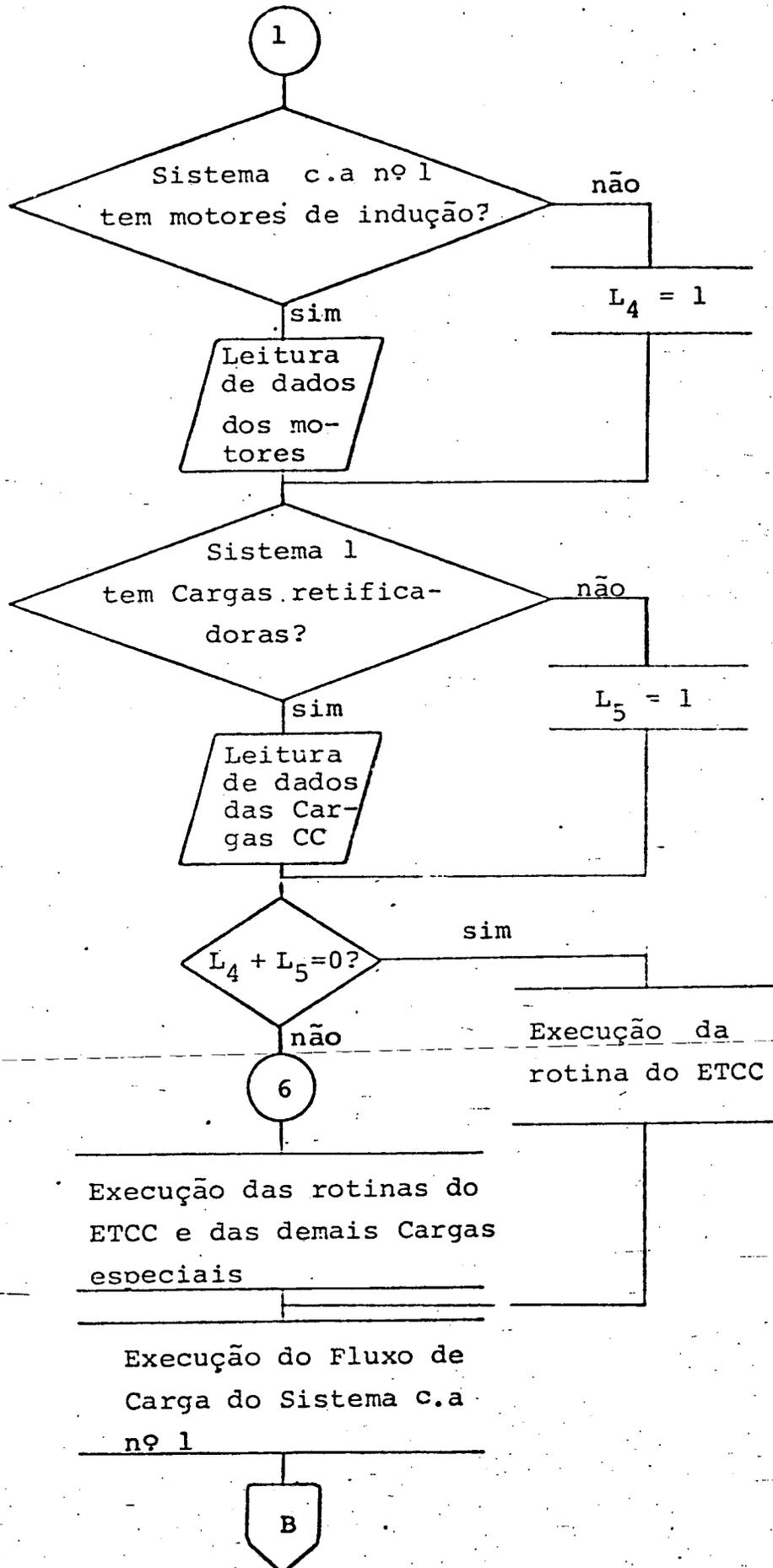
( $P + jQ$ ) calculadas para as cargas citadas. Estas serão incluídas no vetor de potência lido para o sistema C.A, atualizando-o. Executa-se, então, a rotina de cálculo de fluxo de carga, cujo resultado obtido atualizará as tensões C.A e respectivos ângulos das barras que alimentam as cargas especiais. Este procedimento deve ser, então, repetido, com base nas novas tensões e potências das cargas especiais, calculadas, até que o processo convirja.

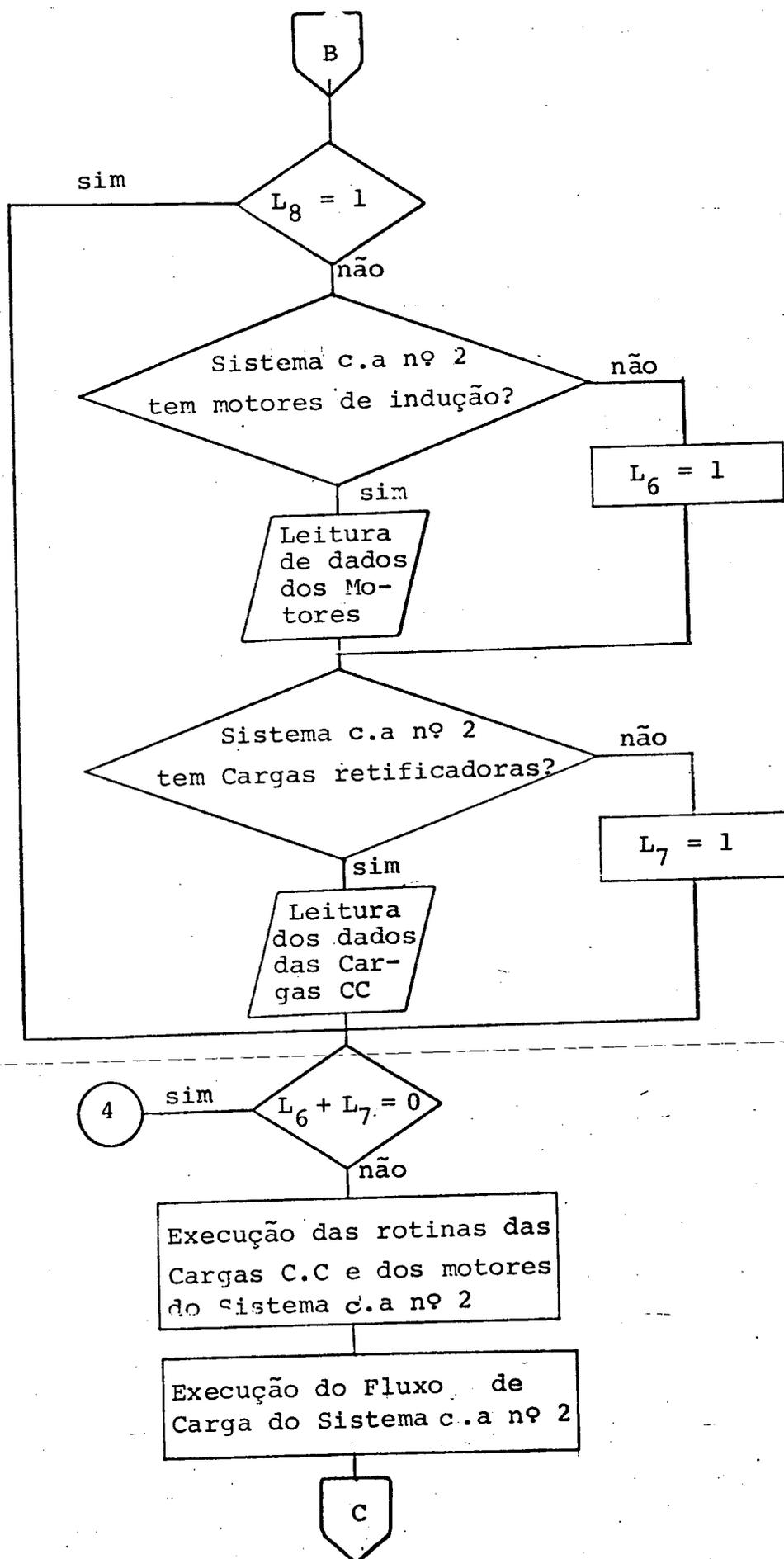
- 2º) Havendo um sistema C.C que atue como um elo de interligação, procede-se isoladamente para o lado do retificador e do inversor, a mesma metodologia adotada no item anterior.

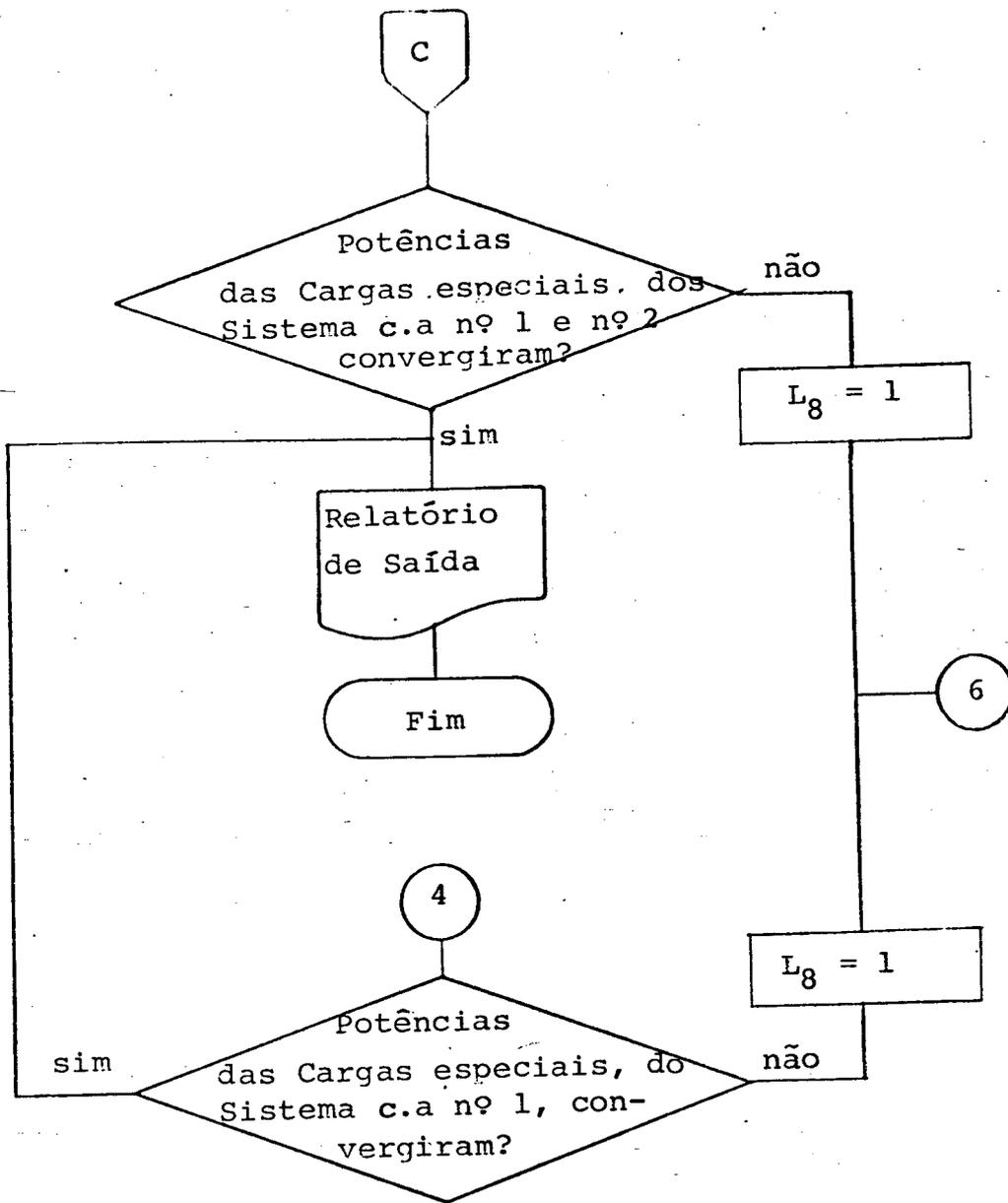
Para o algoritmo descrito, foi desenvolvido um programa digital segundo o fluxograma a seguir:











## 5.5 - Resultados

As análises desenvolvidas nos capítulos precedentes forneceram os subsídios necessários ao desenvolvimento do programa digital que foi elaborado segundo o algoritmo apresentado no parágrafo 5.4. Neste item são discutidos alguns dos vários casos processados com o propósito de verificar a aplicação do estudo realizado e o grau de importância dos resultados quando comparado aos obtidos pelo método clássico.

Dado ao volume do material necessário para relatar as variações dos parâmetros das cargas especiais previstas, nas discussões procedentes será abordado apenas um resumo que ilustra de forma sucinta, porém geral, o mérito do trabalho desenvolvido. Foram relacionados três casos base, utilizando dois sistemas elétricos c.a. aos quais foram incorporadas as cargas especiais, objeto de análise neste projeto.

Num primeiro sistema representa-se um caso típico de um sistema interligado ao qual se incorpora um ETCC. Este caso foi desmembrado em dois estudos: num primeiro emprega-se o ETCC meramente como mais um elemento de conexão e num segundo, o ETCC atua como um elo de interligação.

No segundo sistema procura-se obter situações tipicamente industriais quando a incorporação de cargas c.c e motores de indução constituem práticas usuais. Estes casos são detalhados à seguir:

### 5.5.1 - Sistema c.a. contendo um ETCC

O sistema simulado é ilustrado pela figura 5.5. : Os dados do sistema c.a. estão relacionados nas tabelas 5.1 e 5.2 e os dados do ETCC são fornecidos pela tabela 5.3.

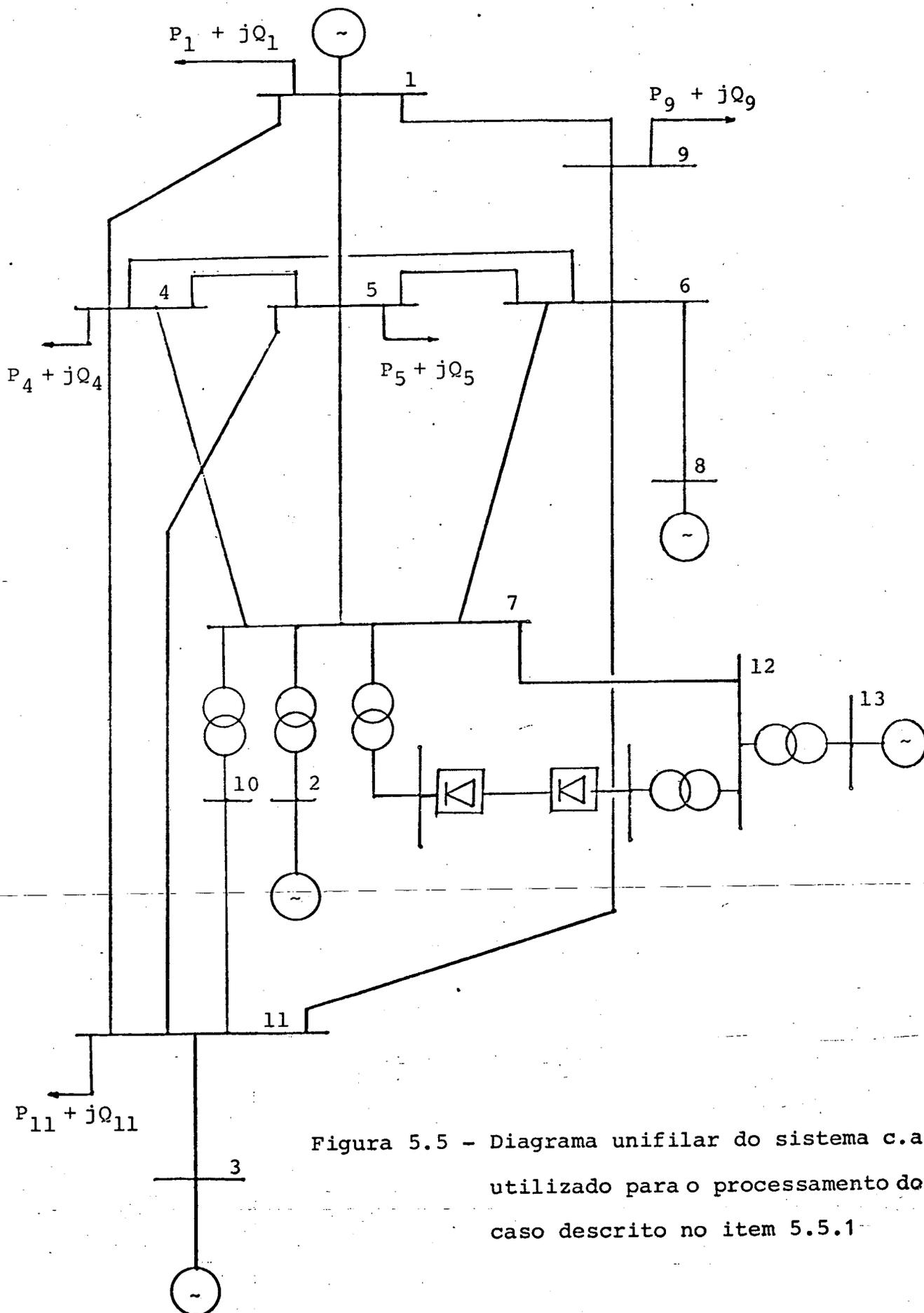


Figura 5.5 - Diagrama unifilar do sistema c.a. utilizado para o processamento do caso descrito no item 5.5.1

PARAMETROS DAS LINHAS DO SISTEMA CA (em p.u)				
DA BARRA	PARA A BARRA	R	X	X <sub>c</sub>
BARRA 1	BARRA 4	0.02530	0.05840	0.12500
BARRA 1	BARRA 5	0.0017	0.01720	0.10600
BARRA 1	BARRA 9	0.00230	0.01280	0.05000
BARRA 2	BARRA 7	0.0	0.00710	0.0
BARRA 3	BARRA 11	0.0074	0.04440	0.98000
BARRA 4	BARRA 5	0.00310	0.06680	0.13500
BARRA 4	BARRA 6	0.00150	0.02200	0.05800
BARRA 4	BARRA 7	0.00120	0.01730	0.44420
BARRA 4	BARRA 11	0.00150	0.05670	0.14000
BARRA 5	BARRA 6	0.00090	0.01510	0.45000
BARRA 5	BARRA 7	0.00080	0.01290	0.38340
BARRA 5	BARRA 11	0.00020	0.35050	0.68000
BARRA 6	BARRA 7	0.00190	0.02620	0.62060
BARRA 6	BARRA 8	0.00200	0.00500	0.25000
BARRA 6	BARRA 9	0.00110	0.00630	0.03600
BARRA 6	BARRA 11	0.00030	0.06520	0.02420
BARRA 7	BARRA 10	0.0	0.00460	0.0
BARRA 10	BARRA 11	0.00080	1.01280	1.06200
BARRA 12	BARRA 13	0.0	0.00140	0.0
BARRA 7	BARRA 12	0.00040	0.00200	0.15000

Tabela 5.1

POTÊNCIAS ATIVAS EM MW E REATIVAS EM MVARs				
RELAÇÃO DE BARRAS	GERADAS		CONSUMIDAS	
	ATIVA	REATIVA	ATIVA	REATIVA
BARRA 1	300	-	600	-
BARRA 2	800	-	-	-
BARRA 3	250	-	-	-
BARRA 4	-	-	700	-
BARRA 5	-	-	300	-
BARRA 6	-	-	-	-
BARRA 7	BARRA DO	INVERSOR	-	-
BARRA 8	450	-	-	-
BARRA 9	-	-	1600	-
BARRA 10	-	-	-	-
BARRA 11	-	-	472	-
BARRA 12	BARRA DO	RETIFICADOR		
BARRA 13	BARRA DE	FOLGA		

Tabela 5.2

```

=====
I ELO OPERANDO SOB ANGULO DE EXTINGAC E POTENCIA CCNSTANTE I
=====
I ANGULO DE IGNICAO MINIMO = 5.00 GRAUS I
I ANGULO DE IGNICAO MAXIMO = 90.00 GRAUS I
I ANGULO DE EXTINGACAO GAMA = 15.00 GRAUS I
I POTENCIA TRANSMITIDA = 1000.00 MWATTS I
I POTENCIA BASE DO SISTEMA = 100.00 MVA I
I
=====
I TENSOES EASE EM KV I
I
I NC RETIFICADOR = 540.00 NC INVERSOR = 540.00 I
=====
I TENSOES PRIMARIAS EM PU I
I
I NO RETIFICADOR = 0.5915 NO INVERSOR = 0.9818 I
=====
I RELACCES DE TRANSFORMACAO NOMINAIS I
I
I NC RETIFICADOR = 1.00 NC INVERSOR = 1.00 I
=====
I RESISTENCIAS DOS TRANSFORMADORES VISTAS DO SECUNDARIO (EM OHMS) I
I
I NO RETIFICADOR = 0.0 NO INVERSOR = 0.0 I
=====
I REATANCIAS DOS TRANSFORMADORES VISTAS DO SECUNDARIO (EM OHMS) I
I
I NC RETIFICADOR = 9.52 NO INVERSOR = 9.52 I
=====
I RESISTENCIA DA LINHA CC EM OHMS = 10.00 I
I
I LIMITES SUPERIORES DOS TAPS DOS TRANSFORMADORES COS CONVERSORES I
I
I NC RETIFICADOR = 1.20* NOMINAL NC INVERSOR= 1.20* NOMINAL I
I
I LIMITES INFERIORES DOS TAPS DOS TRANSFORMADORES COS CONVERSORES I
I
I NO RETIFICADOR = 0.80* NOMINAL NO INVERSOR= 0.80* NOMINAL I
=====

```

Tabela 5.3

Utilizando tal sistema com a carga citada, procurou-se estudar seu fluxo de carga para uma condição de operação em que o ETCC opera transmitindo 100 MW (tabela 5.3) medidos no retificador. Para a apresentação dos resultados optou-se por considerar a situação em que se tem os conversores ligados a transformadores de taps variáveis. A tabela 5.4. e 5.5. fornecem os resultados finais obtidos, para o ETCC e o fluxo c.a respectivamente, os quais foram atingidos após duas iterações do fluxo c.a - c.c.

POTENCIAS EM PU		ANGULO		RELACAO DE		ANGULO		TENSAO DC		CORRENTE		FATOR DE	
BARRA PRIMARIA		COMUTACAO		TRANSFORMACAO		ALFA		(KV)		NO ELO		POTENCIA	
ATIVA	REATIVA	RET	INV	RET	INV	GRAUS	RET	INV	(KA)	RET	INV	RET	INV
110.000	9.717	3.004	4.013	13.971	8.891	0.848	0.858	5.30	1594.94	1573.13	1.681	0.97	0.94

Tabela 5.4

SOLUCAO DO FLUXO DE CARGA

\*\*\* SISTEMA TESTE PARA ETCC CONECTADO OPERACAO NORMAL \*\*\*

TENSOES E POTENCIAS DE BARRAS

NOME	TIPC	TENSAC		GEPACAO		CARGA		REATIVA	SFUNT
		MAGNITUDE (P.U.)	ANGULC (GRAUS)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)		
BARRA13	REF.	1.0000	0.0	2069.3	638.5	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA9	PC	0.9511	-20.26	0.0	0.0	1600.0	0.0	0.0	0.0
BARRA8	PV	1.0100	-13.72	450.0	455.4	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA7	PQ	0.9817	-2.87	0.0	0.0	-971.7	401.3	0.0	0.0
BARRA6	PQ	0.9780	-14.49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA5	PQ	0.9757	-11.01	0.0	0.0	300.0	0.0	0.0	0.0
BARRA4	PQ	0.9659	-13.46	0.0	0.0	700.0	0.0	0.0	0.0
BARRA3	PV	1.0000	-2.78	250.0	-240.5	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA2	PV	1.0000	0.45	800.0	280.4	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA12	PQ	0.9515	-1.67	0.0	0.0	1000.0	300.4	0.0	0.0
BARRA11	PQ	0.9349	-16.46	0.0	0.0	472.0	0.0	0.0	0.0
BARRA10	PQ	0.9838	-2.53	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA1	PQ	0.9438	-19.33	300.0	0.0	600.0	0.0	0.0	0.0
				3669.3	1133.8	3700.3	701.7	0.0	0.0

\*\*\* SISTEMA TESTE PARA ETCC CONECTADO OPERACAO NORMAL \*\*\*

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

EMISSORA	RECEPTORA	N. LINHA	POTENCIA ENVIADA	PCTE.	RECEBIDA	PERDAS NAS LINHAS
			ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
BARRA6	BARRA9	10	1526.4	224.7	1499.0	71.2
BARRA8	BARRA6	10	450.0	455.4	441.7	459.4
BARRA7	BARRA6	10	740.6	5.5	729.7	-84.4
BARRA7	BARRA5	10	1055.4	36.6	1046.1	-76.1
BARRA5	BARRA6	10	381.3	-47.2	379.9	-27.4
BARRA7	BARRA4	10	1015.8	91.4	1002.8	-54.0
BARRA4	BARRA6	10	72.7	-60.0	72.5	-56.5
BARRA5	BARRA4	10	60.9	6.4	60.8	16.4
BARRA2	BARRA7	10	800.0	280.4	800.0	229.3
BARRA13	BARRA12	10	2069.3	638.5	2069.3	572.9
BARRA12	BARRA7	10	1069.3	272.5	1064.2	262.2
BARRA6	BARRA11	10	97.5	66.5	97.5	59.1
BARRA5	BARRA11	10	33.7	-18.8	33.7	38.4
BARRA4	BARRA11	10	140.2	48.7	139.8	47.6
BARRA3	BARRA11	10	249.5	-240.5	176.6	-192.7
BARRA7	BARRA10	10	24.3	-43.2	24.3	-43.3
BARRA10	BARRA11	10	24.3	-43.3	24.3	47.6
BARRA1	BARRA9	10	101.4	-73.5	101.0	-71.2
BARRA5	BARRA1	10	270.1	-16.5	256.9	-44.1
BARRA4	BARRA1	10	150.7	-26.3	144.5	-29.4

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA MW	REATIVA MVAR
SERIE	169.04	966.61
SHUNT		-534.47
TOTAL	169.04	432.14

Tabela 5.5

### 5.5.2 - Dois Sistemas c.a. interligados através de um ETCC

O sistema simulado é dado pela figura 5.6. Conforme se observa, este sistema é semelhante ao do item 1, exceto pela inexistência das linhas entre as barras 7 e 12, que dá origem a duas áreas c.a. interligadas por um ETCC. Desta forma as tabelas 5.1 e 5.6 fornecem os dados das duas áreas c.a. (basta desconsiderar as referidas linhas), e as potências nas barras. O ETCC tem as mesmas características apresentadas pela tabela 5.3, sendo que, neste caso, opera como elo de interligação.

Para esta configuração, embora tenham sido feitos estudos para várias condições de operação do ETCC, por uma questão de volume de apresentação, optou-se por relatar apenas o estudo mais completo que corresponde aquele em que os conversores estão ligados a transformadores com taps variáveis (tabela 5.3). Os resultados são mostrados nas tabelas 5.7, 5.8 e 5.9, obtidos após 2 iterações do fluxo c.a. - c.c., representando respectivamente os resultados do ETCC e dos fluxos de carga dos sistemas c.a. do lado do retificador e do lado do inversor.

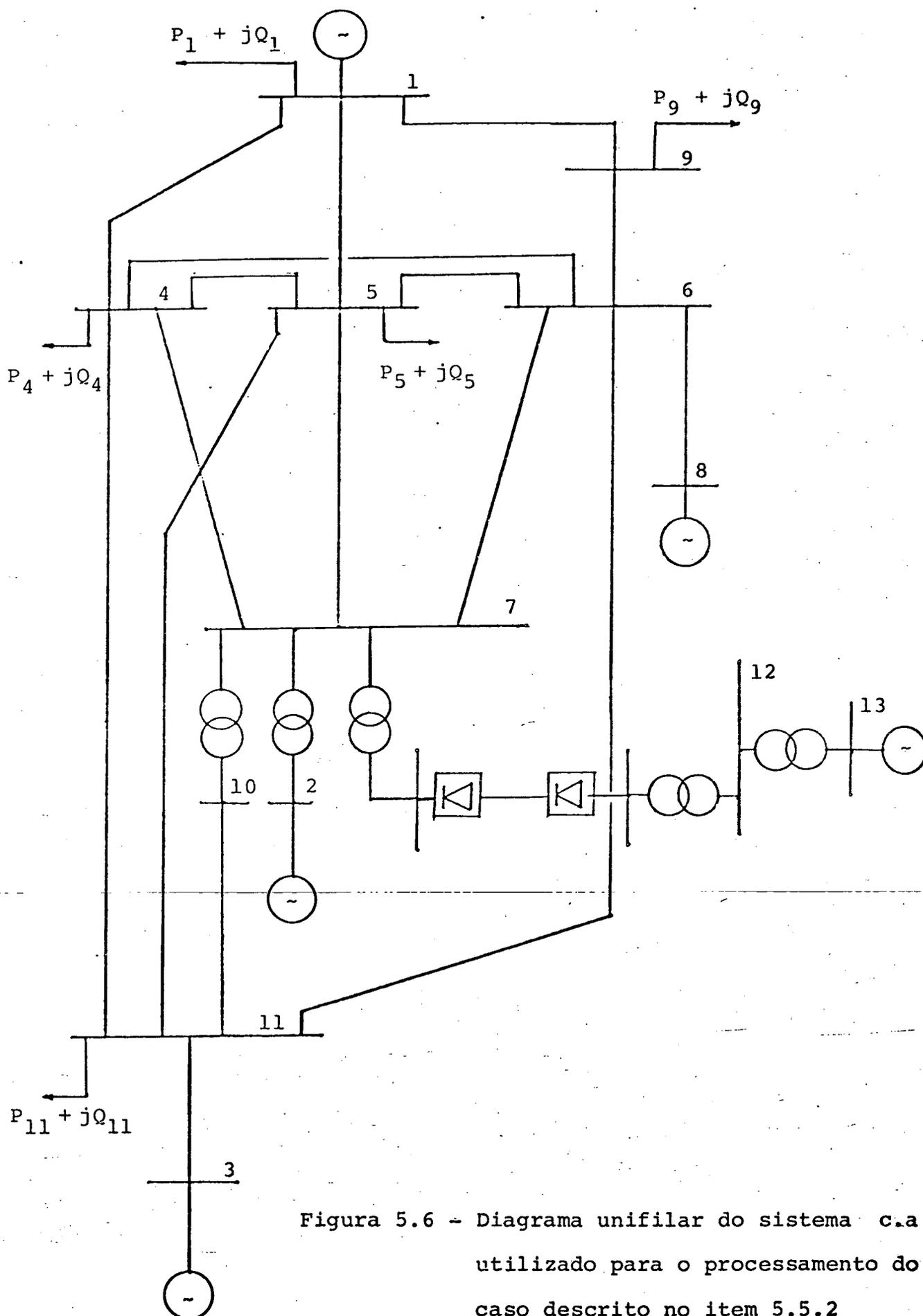


Figura 5.6 - Diagrama unifilar do sistema c.a. utilizado para o processamento do caso descrito no item 5.5.2

POTÊNCIAS ATIVAS EM MW E REATIVA EM MVARs				
RELAÇÃO DE BARRAS	GERADAS		CONSUMIDAS	
	ATIVA	REATIVA	ATIVA	REATIVA
BARRA 1	500	-	300	-
BARRA 2	900	-	-	-
BARRA 3	BARRA DE FOLGA DO SISTEMA		CA DO LADO	DO INVERSOR
BARRA 4	-	-	500	-
BARRA 5	-	-	300	-
BARRA 6	-	-	-	-
BARRA 7	BARRA DO INVERSOR		-	-
BARRA 8	250	-	-	-
BARRA 9	-	-	1200	-
BARRA 10	-	-	-	-
BARRA 11	-	-	472	-
BARRA 12	BARRA DO RETIFICADOR			
BARRA 13	BARRA DE FOLGA DO SISTEMA		CA DO LADO DO	RETIFICADOR

Tabela 5.6

POTENCIAS EM PU		ANGULO	RELACAO DE TRANSFORMACAO		TENSAO DC	CORRENTE	FATOR DE	
BARRA PRIMARIA		CCMLTACAO	ALFA		(KV)	NO ELG	PGTENCIA	
ATIVA	REATIVA	REF	INV	RET	INV	GRAUS	RET	INV
RET	INV	RET	INV	RET	INV	RET	INV	RET
10.000	9.719	3.454	4.007	10.841	8.851	0.8571	0.8611	10.21
						1596.52	1579.70	1.676
								10.56
								0.94

Tabela 5.7

SOLUCAO DO FLUXO DE CARGA

\*\*\* SISTEMA CA DO LADO DC RETIFICADOR (ETCC TIE- LINE) \*\*\*

TENSORES E POTENCIAS DE BARRAS

NCME	TIPO	TENSAC	ANGULO	GERACAO		CARGA		REATIVA
		MAGNITUDE	(GRAUS)	ATIVA	REATIVA	ATIVA	REATIVA	SHUNT
		(P.U.)		(MW)	(MVAR)	(MW)	(MVAR)	(MVAR)
BARRA13	REF.	1.0000	0.0	1000.0	359.9	0.0	0.0	0.0
BARRA12	PC	0.9551	-0.81	0.0	0.0	1000.0	345.4	0.0

1000.0      359.9      1000.0      345.4      0.0

\*\*\* SISTEMA CA DO LADO DC RETIFICADOR (ETCC TIE- LINE) \*\*\*

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA	BARRA	N.	POTENCIA EMITIDA	POTE. RECEBIDA	PERDAS NAS LINHAS
EMISSORA	RECEPTORA		ATIVA	REATIVA	ATIVA
			(MW)	(MVAR)	(MW)
BARRA13	BARRA12	0	1000.0	359.9	1000.0
					345.4
					0.0
					14.53

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA	REATIVA
	MW	MVAR
SERIE	0.0	15.82
SHUNT		-1.29
TCTAL	0.0	14.53

Tabela 5.8

SOLUCAO DO FLUXO DE CARGA

\*\*\* SISTEMA CA DO LADO DO INVERSOR (ETCC TIE-LINE) \*\*\*

TENSORES E POTENCIAS DE BARRAS

ACNE	TIPO	TENSAO	GERACAO	CARGA	REATIVA
		MAGNITUDE (P.U.)	ANGULO (GRAUS)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
BARRA3	REF.	1.0000	0.0	269.5	-202.9
BARRA9	PQ	0.9759	-16.26	0.0	0.0
BARRA8	PV	1.0100	-12.63	250.0	296.3
BARRA7	PQ	0.9814	-5.50	0.0	0.0
BARRA6	PC	0.9898	-12.99	0.0	0.0
BARRA5	PC	0.9859	-10.89	0.0	0.0
BARRA4	PQ	0.9768	-12.45	0.0	0.0
BARRA2	PV	1.0000	-1.77	900.0	291.0
BARRA11	PQ	0.9377	-17.24	0.0	0.0
BARRA10	PQ	0.9835	-5.55	0.0	0.0
BARRA1	PQ	0.9792	-13.76	500.0	0.0
				1919.5	324.4
				1800.1	400.7
					0.0

\*\*\* SISTEMA CA DO LADO DO INVERSOR (ETCC TIE-LINE) \*\*\*

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA	BARRA	N.	POTENCIA	EMITIDA	POTE.	RECEBIDA	PERDAS NAS LINHAS
EMISSORA	RECEPTORA		ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)
BARRA6	BARRA9	10	889.7	85.0	880.3	37.1	8.97
BARRA8	BARRA6	10	250.0	296.3	246.9	313.6	3.11
BARRA7	BARRA6	10	480.8	-64.4	476.2	-67.3	4.58
BARRA7	BARRA5	10	701.4	-62.6	697.3	-91.7	4.10
BARRA5	BARRA6	10	235.1	-57.0	234.6	-21.9	0.52
BARRA7	BARRA4	10	671.2	-1.3	665.6	-39.7	5.62
BARRA4	BARRA6	10	38.0	-62.6	37.9	-58.1	0.08
BARRA5	BARRA4	10	39.7	5.5	39.6	17.3	0.05
BARRA2	BARRA7	10	900.0	291.0	900.0	227.4	0.0
BARRA3	BARRA11	10	269.5	-262.9	181.6	-223.4	87.61
BARRA6	BARRA11	10	105.9	81.3	105.8	71.6	0.06
BARRA5	BARRA11	10	25.2	-17.9	25.2	41.1	0.00
BARRA4	BARRA11	10	137.0	62.8	136.6	61.6	0.37
BARRA7	BARRA10	10	18.5	-44.5	18.5	-45.0	0.0
BARRA10	BARRA11	10	18.5	-45.0	18.5	49.0	0.00
BARRA1	BARRA9	10	321.7	-27.5	319.2	-37.1	2.50
BARRA5	BARRA1	10	93.4	-22.2	91.8	-16.5	1.59
BARRA4	BARRA1	10	30.3	-22.7	30.0	-11.4	0.32

PERDAS DO SISTEMA

	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)
SERIE	119.48	449.83
SHUNT		-526.10
TOTAL	119.48	-76.26

Tabela 5.9

### 5.5.3 - Sistema c.a. Industrial contendo motores de indução e cargas retificadoras, modeladas dinamicamente.

Para este estudo optou-se por um sistema industrial contendo 56 barras. Através das tabelas 5.10 e 5.11 é possível identificar a topologia e as cargas constituintes do referido sistema. Como pode ser verificado as cargas que compõem o sistema são do tipo potência constante e especiais. Estas últimas subdividem-se em cargas retificadoras e motores de indução. As tabelas de numeros 5.12 a 5.31 fornecem os dados das cargas especiais bem como os correspondentes parametros calculados. Na tabela 5.32 tem-se, finalmente, o resultado do fluxo de carga obtido após quatro iterações do fluxo c.a/cargas especiais.

A título de ilustração, tem-se na tabela 5.33 o resultado do fluxo de carga para o referido sistema, considerando, entretanto, que as potências representativas das cargas especiais são obtidas a partir da consideração de uma potência ativa  $P$  constante com a qual se obtém a potência reativa para um fator de potência típico considerado. Este procedimento é prática usual nos estudos de fluxo de carga de sistemas c.a com este tipo de carga conectado. Os erros resultantes, entre os dois procedimentos, podem ser facilmente observados por comparação entre as tabelas 5.32 e 5.33. Para o caso, tem-se erros de tensão de até 4%, e de potência reativa de até 25%.

POTÊNCIAS ATIVAS EM MW E REATIVAS EM MVARs					
RELAÇÃO DE BARRAS	GERADAS		CONSUMIDAS		
	ATIVA	REATIVA	ATIVA	REATIVA	CARGA ESPECIAL
BARRA 1	BARRA DE	FOLGA			
BARRA 2	-	-	0,1	0,1	
BARRA 3	-	-	0,2	0,3	MIT
BARRA 4	5,0	-	-	-	
BARRA 5	5,0	-	-	-	
BARRA 6	-	-	0,2	0,2	
BARRA 7	-	-	0,1	0,1	
BARRA 8	-	-	0,4	0,3	
BARRA 9	-	-	-	-	
BARRA 10	-	-	-	-0,282	MIT
BARRA 11	-	-	-	-	
BARRA 12	-	-	-	-	
BARRA 13	-	-	-	-	
BARRA 14	-	-	4,0	4,2	MIT
BARRA 15	-	-	-	-3,3	MIT
BARRA 16	-	-	-	0,1	MIT
BARRA 17	-	-	0,4	0,2	
BARRA 18	-	-	0,6	0,5	
BARRA 19	-	-	-	-	
BARRA 20	-	-	-	-	MIT
BARRA 21	-	-	-54,7	-30,7	CARGA cc
BARRA 22	-	-	9,6	9,3	

Tabela 5.10

BARRA 23	-	-	-	-	
BARRA 24	-	-	5,1	10,1	
BARRA 25	-	-	0,3	0,3	
BARRA 26	-	-	0,1	0,1	
BARRA 27	-	-	-	0,1	MIT
BARRA 28	-	-	-	-	
BARRA 29	-	-	2,7	3,5	MIT
BARRA 30	-	-	-	-	
BARRA 31	-	-	-62,4	-44,5	CARGA cc
BARRA 32	-	-	-	-	
BARRA 33	-	-	0,5	0,3	MIT
BARRA 34	-	-	-	-10,9	MIT
BARRA 35	-	-	-	-	
BARRA 36	-	-	-	-	
BARRA 37	-	-	-	-	
BARRA 38	-	-	0,2	0,2	
BARRA 39	-	-	-	-	
BARRA 40	-	-	-	0,4	MIT
BARRA 41	-	-	-	-	
BARRA 42	-	-	0,5	1,0	MIT
BARRA 43	-	-	-	-	
BARRA 44	-	-	2,3	0,9	MIT
BARRA 45	-	-	-	0,4	MIT
BARRA 46	-	-	0,1	0,5	MIT
BARRA 47	-	-	-	-	
BARRA 48	-	-	-	-	

Tabela 5.10

BARRA 49	-	-	-	-	
BARRA 50	-	-	-	-	
BARRA 51	-	-	-	-	
BARRA 52	-	-	-	0,2	MIT
BARRA 53	-	-	1,1	0,6	
BARRA 54	-	-	0,8	0,9	MIT
BARRA 55	-	-	0,6	1,0	MIT
BARRA 56	-	-	-	-	

Tabela 5.10

\*\*\* SISTEMA CA INDUSTRIAL C/ 18 MOTORES CA E DUAS CARGAS REFRIGERACAO \*\*\*

-----  
 DACCS DAS LINHAS DO SISTEMA CA  
 -----

EMISSORA	BARRA RECEPTORA	RESIST. P.U.	REACTANCIA P.U.	SUSCEPT. TOTAL P.U.
I BARRA1	I BARRA50	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA50	I BARRA49	I 0 I 0.00290	I 0.10500	I 0.0
I BARRA50	I BARRA49	I 0 I 0.00290	I 0.11100	I 0.0
I BARRA50	I BARRA45	I 0 I 0.00290	I 0.11000	I 0.0
I BARRA49	I BARRA13	I 0 I 0.00330	I 0.01990	I 0.0
I BARRA13	I BARRA12	I 0 I 0.02850	I 0.04240	I 0.0
I BARRA12	I BARRA11	I 0 I 0.07010	I 0.58150	I 0.0
I BARRA12	I BARRA10	I 0 I 0.07170	I 1.00410	I 0.0
I BARRA12	I BARRA37	I 0 I 0.04850	I 0.06500	I 0.0
I BARRA37	I BARRA36	I 0 I 0.07260	I 1.01610	I 0.0
I BARRA37	I BARRA35	I 0 I 0.07140	I 1.00010	I 0.0
I BARRA13	I BARRA15	I 0 I 0.01130	I 0.29300	I 0.0
I BARRA13	I BARRA14	I 0 I 0.07180	I 1.00540	I 0.0
I BARRA13	I BARRA14	I 0 I 0.07260	I 1.01610	I 0.0
I BARRA13	I BARRA48	I 0 I 0.00120	I 0.00720	I 0.0
I BARRA37	I BARRA48	I 0 I 0.03920	I 0.06210	I 0.0
I BARRA49	I BARRA46	I 0 I 0.17010	I 1.15920	I 0.0
I BARRA46	I BARRA47	I 0 I 0.07190	I 1.00680	I 0.0
I BARRA47	I BARRA46	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA48	I BARRA44	I 0 I 0.07170	I 1.00410	I 0.0
I BARRA48	I BARRA44	I 0 I 0.07210	I 1.00540	I 0.0
I BARRA46	I BARRA45	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA46	I BARRA43	I 0 I 0.00390	I 0.02320	I 0.0
I BARRA45	I BARRA43	I 0 I 0.00070	I 0.00400	I 0.0
I BARRA49	I BARRA40	I 0 I 0.13640	I 1.11670	I 0.0
I BARRA43	I BARRA42	I 0 I 0.07060	I 0.93810	I 0.0
I BARRA43	I BARRA42	I 0 I 0.07030	I 0.93420	I 0.0
I BARRA43	I BARRA41	I 0 I 0.07150	I 1.00140	I 0.0
I BARRA41	I BARRA40	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA40	I BARRA39	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA40	I BARRA38	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA42	I BARRA56	I 0 I 0.00350	I 0.02110	I 0.0
I BARRA32	I BARRA56	I 0 I 0.00030	I 0.00170	I 0.0
I BARRA49	I BARRA53	I 0 I 0.13160	I 1.09570	I 0.0
I BARRA56	I BARRA55	I 0 I 0.07140	I 1.00010	I 0.0
I BARRA56	I BARRA54	I 0 I 0.07130	I 0.99600	I 0.0
I BARRA54	I BARRA53	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA53	I BARRA52	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA53	I BARRA51	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA49	I BARRA32	I 0 I 0.00050	I 0.00330	I 0.0
I BARRA32	I BARRA34	I 0 I 0.01140	I 0.29540	I 0.0
I BARRA32	I BARRA34	I 0 I 0.01130	I 0.29260	I 0.0
I BARRA32	I BARRA33	I 0 I 0.07160	I 1.00280	I 0.0
I BARRA32	I BARRA33	I 0 I 0.07110	I 0.99480	I 0.0
I BARRA32	I BARRA30	I 0 I 0.00230	I 0.01370	I 0.0
I BARRA30	I BARRA31	I 0 I 0.01120	I 0.29140	I 0.0
I BARRA30	I BARRA31	I 0 I 0.01120	I 0.29100	I 0.0
I BARRA30	I BARRA29	I 0 I 0.07120	I 0.99750	I 0.0
I BARRA30	I BARRA28	I 0 I 0.07120	I 0.99610	I 0.0
I BARRA28	I BARRA27	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA9	I BARRA27	I 0 I 0.19510	I 1.22680	I 0.0
I BARRA27	I BARRA26	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA27	I BARRA25	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA24	I BARRA30	I 0 I 0.00460	I 0.02770	I 0.0
I BARRA49	I BARRA24	I 0 I 0.00180	I 0.01090	I 0.0
I BARRA49	I BARRA24	I 0 I 0.00180	I 0.01090	I 0.0
I BARRA24	I BARRA23	I 0 I 0.01120	I 0.29100	I 0.0
I BARRA24	I BARRA22	I 0 I 0.01120	I 0.29000	I 0.0
I BARRA24	I BARRA22	I 0 I 0.01130	I 0.29260	I 0.0
I BARRA24	I BARRA21	I 0 I 0.01140	I 0.29740	I 0.0
I BARRA24	I BARRA21	I 0 I 0.01130	I 0.29300	I 0.0
I BARRA24	I BARRA20	I 0 I 0.07220	I 1.01030	I 0.0
I BARRA24	I BARRA19	I 0 I 0.07300	I 1.02140	I 0.0
I BARRA19	I BARRA18	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA9	I BARRA18	I 0 I 0.18030	I 1.19500	I 0.0
I BARRA18	I BARRA17	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA18	I BARRA16	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA5	I BARRA9	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA4	I BARRA5	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA9	I BARRA3	I 0 I 0.06870	I 0.96100	I 0.0
I BARRA9	I BARRA3	I 0 I 0.06860	I 0.96020	I 0.0
I BARRA3	I BARRA2	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA3	I BARRA8	I 0 I 0.59300	I 4.15120	I 0.0
I BARRA3	I BARRA8	I 0 I 0.59600	I 4.17760	I 0.0
I BARRA3	I BARRA8	I 0 I 0.59960	I 4.19740	I 0.0
I BARRA8	I BARRA7	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0
I BARRA8	I BARRA6	I 0 I 0.0	I 0.00010	I 0.0

```

=====
I  MDELAGEM MOTOR DE INCUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 16
I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA
I
I  TC = 11140.6 + 0.0* WR + 0.0 WR**2
I
=====
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM VCLTS           = 4160.000
I
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM PU               = 0.967
I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGNDC     = 94.250
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0515
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS  = 0.0421
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1532
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS   = 0.1262
I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS     = 4.5946
I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS    = INFINITA
I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS    = 0.0
I
=====
    
```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU I CORRENTES AMPERES I ESCORREGAMENTO I PERDAS EM KWATTS I TORQUE I FATOR I RENDI I ROTACAO I
I  ATIVA I REATIVA I ESTATOR I ROTOR I MAXIMO I OPERA. I ESTATOR I ROTOR I N X M I POTENCIA I MENTO I RPM I
I  0.01091 6.0341 1513.2301 156.271 10.15071 0.0029 1 40.6881 3.0811 11140.610.3050241 0.95951 897.40671
I
=====
    
```

(b) Resultados

Tabela 5.12

```

=====
I  MDELAGEM MOTOR DE INCUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 29
I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA
I
I  TC = 23099.2 + 0.0* WR + 0.0 WR**2
I
=====
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM VCLTS           = 4160.000
I
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM PU               = 0.907
I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGNDC     = 94.250
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0515
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS  = 0.0421
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1532
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS   = 0.1262
I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS     = 4.5946
I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS    = INFINITA
I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS    = 0.0
I
=====
    
```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU I CORRENTES AMPERES I ESCORREGAMENTO I PERDAS EM KWATTS I TORQUE I FATOR I RENDI I ROTACAO I
I  ATIVA I REATIVA I ESTATOR I ROTOR I MAXIMO I OPERA. I ESTATOR I ROTOR I N X M I POTENCIA I MENTO I RPM I
I  0.02231 0.0305 1578.0781 347.295 10.15071 0.0070 1 51.6201 15.2161 23099.210.5898441 0.97001 893.75681
I
=====
    
```

(b) Resultados

Tabela 5.13

```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAC - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 3  I
I  EQUACAO CE TORQUE CE CARGA  I
I  TC = 3E596.8 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
I  =====  I
I  TENSÃO NA BARRA DC MOTOR EM VOLTS = 4160.000  I
I  TENSÃO NA BARRA DC MOTOR EM PU = 0.976  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM CHMS = 0.0542  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0421  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0932  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM CHMS = 0.0962  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM CHMS = 4.5946  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
I  =====  I

```

## (a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU | CORRENTES AMPERES | ESCORREGAMENTO | PERDAS EM KWATTS | TORQUE | FATOR | RENDI | ROTACAO |
I  =====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====
I  ATIVA | REATIVA | ESTATOR | ROTOR | MAXIMO | OPERA. | ESTATOR | ROTOR | IN X M | POTENCIAL | MENC | RPM |
I  =====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====
I  0.0373 | 0.0359 | 735.946 | 534.745 | 10.2155 | 10.0099 | 28.0151 | 36.0741 | 38596.310 | 7198371 | 0.96671 | 891.1221 |
I  =====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====

```

## (b) Resultados

Tabela 5.14

```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 10  I
I  EQUACAO CE TORQUE CE CARGA  I
I  TC = 24485.0 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
I  =====  I
I  TENSÃO NA BARRA DC MOTOR EM VOLTS = 4160.000  I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM PU = 0.949  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM CHMS = 0.0515  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0421  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0932  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM CHMS = 0.0962  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM CHMS = 4.5946  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
I  =====  I

```

## (a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU | CORRENTES AMPERES | ESCORREGAMENTO | PERDAS EM KWATTS | TORQUE | FATOR | RENDI | ROTACAO |
I  =====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====
I  ATIVA | REATIVA | ESTATOR | ROTOR | MAXIMO | OPERA. | ESTATOR | ROTOR | IN X M | POTENCIAL | MENC | RPM |
I  =====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====
I  0.02361 | 0.0334 | 598.4731 | 347.343 | 10.2163 | 10.0066 | 55.3261 | 15.2211 | 24489.010 | 5777551 | 0.97021 | 894.11231 |
I  =====+=====+=====+=====+=====+=====+=====+=====

```

## (b) Resultados

Tabela 5.15

```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAIOLA SIMPLES... BARRA N. 14  I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA  I
I  TC = 46881.7 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
I  I
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 4160.000  I
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM PU = 0.940  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0515  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0421  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0932  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0962  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 4.5946  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
I  I
=====

```

## (a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU | CORRENTES AMPERES | ESCORREGAMENTO | PERDAS EM KWATTS | TORQUE | FATOR | RENDI | ROTACAO |
I  ATIVA | REATIVA | ESTATOR | ROTOR | MAXIMO | OPERA. | ESTATOR | ROTOR | N X M | POTENCIAL | MENTO | RPM |
I  0.0453 | 0.0342 | 837.564 | 677.312 | 10.2163 | 10.0131 | 108.466 | 57.875 | 46881.7 | 10.793005 | 0.9433 | 888.2585 |
I  I
=====

```

## (b) Resultados

Tabela 5.16

```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAIOLA SIMPLES... BARRA N. 15  I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA  I
I  TC = 99608.5 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
I  I
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 13800.000  I
I  TENSAC NA BARRA DO MOTOR EM PU = 0.938  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1034  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0785  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.3098  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.2358  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 9.2963  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
I  I
=====

```

## (a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU | CORRENTES AMPERES | ESCORREGAMENTO | PERDAS EM KWATTS | TORQUE | FATOR | RENDI | ROTACAO |
I  ATIVA | REATIVA | ESTATOR | ROTOR | MAXIMO | OPERA. | ESTATOR | ROTOR | N X M | POTENCIAL | MENTO | RPM |
I  0.0964 | 0.1756 | 852.906 | 435.312 | 10.1439 | 10.0048 | 247.389 | 44.615 | 99608.5 | 10.481207 | 0.9697 | 895.7703 |
I  I
=====

```

## (b) Resultados

Tabela 5.17

```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 27  I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA  I
I  TC = 13236.1 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
I  =====
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 4160.000  I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM PU = 0.969  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 54.250  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0515  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0421  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1532  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.1262  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 4.5946  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
I  =====

```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU | CORRENTES AMPERES | ESCORREGAMENTO | PERDAS EM KWATTS | TORQUE | FATOR | RENDI | ROTACAO |
I  ATIVA | REATIVA | ESTATOR | ROTOR | MAXIMO | OPERA. | ESTATOR | ROTOR | N X M | POTENCIAL | MENTC | RPM |
I  0.01291 0.0342 | 523.8851 185.463 | 0.150710.0035 | 42.3951 4.3391 | 13236.110.3527601 | 0.96381 896.91671 |
I  =====

```

(b) Resultados

Tabela 5.18

```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 33  I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA  I
I  TC = 30482.7 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
I  =====
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 4160.000  I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM PU = 0.967  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 54.250  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0515  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0421  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1532  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.1262  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 4.5946  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
I  =====

```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU | CORRENTES AMPERES | ESCORREGAMENTO | PERDAS EM KWATTS | TORQUE | FATOR | RENDI | ROTACAO |
I  ATIVA | REATIVA | ESTATOR | ROTOR | MAXIMO | OPERA. | ESTATOR | ROTOR | N X M | POTENCIAL | MENTC | RPM |
I  0.02941 0.0350 | 655.7771 430.651 | 0.150710.0081 | 66.4291 23.4021 | 30482.710.6433571 | 0.96541 892.71631 |
I  =====

```

(b) Resultados

Tabela 5.19

```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 40  I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA  I
I  TC = 15644.6 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 4160.000  I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM PU = 0.971  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0515  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0421  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1532  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.1262  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 4.5946  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
=====

```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU  I  CORRENTES AMPERES  I  ESCORREGAMENTO  I  PERDAS EM KWATTS  I  TORQUE  I  FATOR  I  RENDI  I  ROTACAO  I
I  ATIVA  I  REATIVA  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  MAXIMO  I  OPERA.  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  N X M  I  POTENCIA  I  MENC  I  RPM  I
I  0.0190  I  0.0346  I  564.150  I  275.143  I  10.1507  I  10.0052  I  49.162  I  9.551  I  19644.8  I  10.481403  I  0.9691  I  895.4048  I
=====

```

(b) Resultados

Tabela 5.20

```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 52  I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA  I
I  TC = 18356.6 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 4160.000  I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM PU = 0.938  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0515  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0421  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1532  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.1262  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 4.5946  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
=====

```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU  I  CORRENTES AMPERES  I  ESCORREGAMENTO  I  PERDAS EM KWATTS  I  TORQUE  I  FATOR  I  RENDI  I  ROTACAO  I
I  ATIVA  I  REATIVA  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  MAXIMO  I  OPERA.  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  N X M  I  POTENCIA  I  MENC  I  RPM  I
I  0.0178  I  0.0323  I  545.224  I  266.130  I  10.1507  I  10.0052  I  45.919  I  8.935  I  18356.6  I  10.481787  I  0.9691  I  895.3597  I
=====

```

(b) Resultados

Tabela 5.21



```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 55
I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA
I
I  TC = 55010.0 + 0.0* WR + 0.0 WR**2
I
=====
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM VCLTS      = 4160.000
I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM PU          = 0.943
I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1033
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0786
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.3099
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.2358
I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 9.2965
I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA
I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0
I
=====

```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU | CORRENTES AMPERES | ESCORREGAMENTO | PERDAS EM KWATTS | TORQUE | FATOR | RENDI | ROTACAO |
I  ATIVA | REATIVA | ESTATOR | ROTOR | MAXIMO | OPERA. | ESTATOR | ROTOR | N X M | POTENCIAL | PLNTO | RPM |
I  0.0543 | 0.0261 | 886.437 | 836.503 | 10.144 | 110.0319 | 243.487 | 165.184 | 55010.0 | 10.909301 | 0.92471 | 871.3721 |
I
=====

```

(b) Resultados

Tabela 5.24

```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 44
I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA
I
I  TC = 52948.5 + 0.0* WR + 0.0 WR**2
I
=====
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM VCLTS      = 4160.000
I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM PU          = 0.963
I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1033
I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0786
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.3099
I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.2358
I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 9.2965
I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA
I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0
I
=====

```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU | CORRENTES AMPERES | ESCORREGAMENTO | PERDAS EM KWATTS | TORQUE | FATOR | RENDI | ROTACAO |
I  ATIVA | REATIVA | ESTATOR | ROTOR | MAXIMO | OPERA. | ESTATOR | ROTOR | N X M | POTENCIAL | PLNTO | RPM |
I  0.0521 | 0.0255 | 835.206 | 783.477 | 10.144 | 110.0290 | 216.156 | 144.767 | 52948.5 | 10.890178 | 0.93071 | 873.9380 |
I
=====

```

(b) Resultados

Tabela 5.25

```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 42  I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA  I
I  TC = 65570.3 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
I  I  I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 4160.000  I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM PU = 0.964  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250  I
I  RESISTENCIA DO ENFOLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1033  I
I  RESISTENCIA DO ENFOLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0786  I
I  REATANCIA DO ENFOLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.3099  I
I  REATANCIA DO ENFOLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.2358  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 5.2965  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
=====
    
```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU  I  CORRENTES AMPERES  I  SCORREGAMENTO  I  PERDAS EM KWATTS  I  TORQUE  I  FATOR  I  RENDI  I  ROTACAO  I
I  ATIVA  I  REATIVA  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  MAXIMO  I  OPERA.  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  N X M  I  POTENCIAL  I  MENTC  I  RPM  I
I  0.06511  0.0211  11039.3231  589.795  10.144110.0374  334.7191  231.0511  65570.310.9022991  0.91321  866.35751
=====
    
```

(b) Resultados

Tabela 5.26

```

=====
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAICLA SIMPLES... BARRA N. 46  I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA  I
I  TC = 27545.9 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
I  I  I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 4160.000  I
I  TENSÃO NA BARRA DO MOTOR EM PU = 0.947  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250  I
I  RESISTENCIA DO ENFOLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0515  I
I  RESISTENCIA DO ENFOLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0421  I
I  REATANCIA DO ENFOLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1532  I
I  REATANCIA DO ENFOLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.1262  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 4.5946  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
=====
    
```

(a) Dados

```

=====
I  POTENCIAS EM PU  I  CORRENTES AMPERES  I  SCORREGAMENTO  I  PERDAS EM KWATTS  I  TORQUE  I  FATOR  I  RENDI  I  ROTACAO  I
I  ATIVA  I  REATIVA  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  MAXIMO  I  OPERA.  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  N X M  I  POTENCIAL  I  MENTC  I  RPM  I
I  0.02661  0.0334  1625.6881  357.008  10.150710.0077  60.4731  19.8941  27545.910.6221101  0.96981  893.15411
=====
    
```

(b) Resultados

Tabela 5.27

```

+-----+
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAIOLA SIMPLES... BARRA N. 45  I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA  I
I  TC = 11136.4 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
+-----+
I  TENSAO NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 4160.000  I
I  TENSAO NA BARRA DO MOTOR EM PU = 0.947  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0515  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0421  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1532  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.1262  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 4.5946  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
+-----+

```

(a) Dados

```

+-----+
I  POTENCIAS EM PU  I  CORRENTES AMPERES  I  ESCORREGAMENTO  I  PERDAS EM KWATTS  I  TORQUE  I  FATOR  I  RENDI  I  ROTACAO  I
I  ATIVA  I  REATIVA  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  MAXIMO  I  OPERA.  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  N X M  I  POTENCIAL  I  MENTO  I  RPM  I
+-----+
I  0.01091  0.0327  I  504.760  I  159.501  I  10.1507  I  10.0031  I  39.3561  3.2101  11136.4  I  0.947  I  0.96  I  997.2952  I
+-----+

```

(b) Resultados

Tabela 5.28

```

+-----+
I  MODELAGEM MOTOR DE INDUCAO - GAIOLA SIMPLES... BARRA N. 20  I
I  EQUACAO DE TORQUE DE CARGA  I
I  TC = 19351.7 + 0.0* WR + 0.0 WR**2  I
+-----+
I  TENSAO NA BARRA DO MOTOR EM VOLTS = 4160.000  I
I  TENSAO NA BARRA DO MOTOR EM PU = 0.948  I
I  VELOCIDADE ANGULAR EM RADIANS P/ SEGUNDO = 94.250  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.0515  I
I  RESISTENCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.0421  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR EM OHMS = 0.1532  I
I  REATANCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR EM OHMS = 0.1262  I
I  REATANCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = 4.5946  I
I  RESISTENCIA DO RAMO MAGNETIZANTE EM OHMS = INFINITA  I
I  PERDAS POR ATRITO E VENTILACAO EM WATTS = 0.0  I
+-----+

```

(a) Dados

```

+-----+
I  POTENCIAS EM PU  I  CORRENTES AMPERES  I  ESCORREGAMENTO  I  PERDAS EM KWATTS  I  TORQUE  I  FATOR  I  RENDI  I  ROTACAO  I
I  ATIVA  I  REATIVA  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  MAXIMO  I  OPERA.  I  ESTATOR  I  ROTOR  I  N X M  I  POTENCIAL  I  MENTO  I  RPM  I
+-----+
I  0.01871  0.0230  I  555.3571  277.698  I  10.1507  I  10.0053  I  47.6491  9.7291  19351.7  I  0.948  I  0.96  I  855.2466  I
+-----+

```

(b) Resultados

Tabela 5.29

```

=====
I SISTEMA DC COM CORRENTE CONSTANTE
I BARRA NO. 21
=====
I TENSÃO NA BARRA EM KV = 2.60
I TENSÃO NA BARRA EM PU = 0.92
I CORRENTE DESEJADA (KA) = 28.57
I FATOR DE CORRENTE MÁXIMA = 1.03
I FATOR DE CORRENTE MÍNIMA = 0.97
I ÂNGULO DE IGNICAC MÍNIMO = 5.00 GRAUS
I POTÊNCIA BASE DO SISTEMA = 100.0000 MVA
I TENSÃO BASE EM KV = 2.6000
I TENSÃO PRIMÁRIA EM PU = 0.9212
I FATOR DE TENSÃO MÁXIMA = 1.2000
I FATOR DE TENSÃO MÍNIMA = 0.8000
I RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO = 1.0000
I TENSÃO DA BATERIA = 2.8000
I RESISTÊNCIA DA LINHA = 0.0
I RESISTÊNCIA DA CARGA = 0.0100
I RESISTÊNCIA DO TRAFÓ (CHMS) = 0.0
I REATÂNCIA DO TRAFÓ (CHMS) = 0.0280
=====
    
```

(a) Dados

```

=====
I POTÊNCIAS NA ÂNGULO POSICACI ÂNGULO TENSÃO CORRENTE FATOR
I BARRA PRIMÁRIA ICMLTACAO IDU TAP ALFA DC DC DE
I EM PU ((GRAUS) I TRAFÓ ((GRAUS) I (KV) I (KA) IPOTENCIAI
I ATIVA I REATIVA I I I I I I
=====
I 0.882 I 0.685 I 48.112 I 1.195 I 5.056 I 3.091 28.570 I 0.798 I
=====
    
```

(b) Resultados

Tabela 5.30

```

=====
I SISTEMA DC COM CORRENTE CONSTANTE
I BARRA NO. 31
=====
I TENSÃO NA BARRA EM KV = 2.60
I TENSÃO NA BARRA EM PU = 0.56
I CORRENTE DESEJADA (KA) = 25.57
I FATOR DE CORRENTE MÁXIMA = 1.03
I FATOR DE CORRENTE MÍNIMA = 0.97
I ÂNGULO DE IGNICAC MÍNIMO = 5.00 GRAUS
I POTÊNCIA BASE DO SISTEMA = 100.0000 MVA
I TENSÃO BASE EM KV = 2.6000
I TENSÃO PRIMÁRIA EM PU = 0.9636
I FATOR DE TENSÃO MÁXIMA = 1.2000
I FATOR DE TENSÃO MÍNIMA = 0.8000
I RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO = 1.0000
I TENSÃO DA BATERIA = 2.8000
I RESISTÊNCIA DA LINHA = 0.0
I RESISTÊNCIA DA CARGA = 0.0100
I RESISTÊNCIA DO TRAFÓ (CHMS) = 0.0
I REATÂNCIA DO TRAFÓ (CHMS) = 0.0280
=====
    
```

(a) Dados

```

=====
I POTÊNCIAS NA ÂNGULO POSICACI ÂNGULO TENSÃO CORRENTE FATOR
I BARRA PRIMÁRIA ICMLTACAO IDU TAP ALFA DC DC DE
I EM PU ((GRAUS) I TRAFÓ ((GRAUS) I (KV) I (KA) IPOTENCIAI
I ATIVA I REATIVA I I I I I I
=====
I 0.781 I 0.576 I 45.710 I 1.110 I 5.214 I 3.061 25.570 I 0.813 I
=====
    
```

(b) Resultados

Tabela 5.31

## SOLUCAO DO FLUXO DE CARGA

\*\*\* SISTEMA CA INDUSTRIAL C/ 18 MOTORES CA E 2 CARGAS REIFICADORAS \*\*\*

## TENSOES E PCTENCIAS DE BARRAS

BARRA	TIPO	TENSÃO		GERAÇÃO		CARGA		REATIVA SHUNT
		MAGNITUDE (P.U.)	ÂNGULO (GRAUS)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	
BARRA1	REF.	1.0500	0.0	148.7	172.1	0.0	0.0	0.0
BARRA9	PC	1.0000	-4.51	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA8	PC	0.5668	-6.28	0.0	0.0	0.4	0.3	0.0
BARRA7	PC	0.5668	-6.28	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
BARRA6	PC	0.5668	-6.28	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0
BARRA56	PQ	0.9879	-3.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA55	PQ	0.9434	-6.55	0.0	0.0	6.0	3.6	0.0
BARRA54	PQ	0.9386	-7.04	0.0	0.0	8.3	4.6	0.0
BARRA53	PQ	0.9386	-7.04	0.0	0.0	1.1	0.6	0.0
BARRA52	PQ	0.9385	-7.04	0.0	0.0	1.8	3.4	0.0
BARRA51	FC	0.5366	-7.04	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA50	PQ	1.0498	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA5	PV	1.0000	-4.51	5.0	11.1	0.0	0.0	0.0
BARRA49	PQ	0.9897	-2.52	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA48	PQ	0.9851	-2.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA47	PQ	0.9474	-4.75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA46	PC	0.9474	-4.75	0.0	0.0	2.7	3.8	0.0
BARRA45	PC	0.9474	-4.75	0.0	0.0	1.1	3.6	0.0
BARRA44	FC	0.5633	-5.29	0.0	0.0	7.5	3.5	0.0
BARRA43	PQ	0.9886	-2.97	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA42	PQ	0.9642	-4.56	0.0	0.0	7.0	4.2	0.0
BARRA41	PQ	0.9714	-4.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA40	PQ	0.9714	-4.25	0.0	0.0	1.9	3.8	0.0
BARRA4	PV	1.0000	-4.51	5.0	11.1	0.0	0.0	0.0
BARRA39	FC	0.5714	-4.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA38	FC	0.5714	-4.25	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0
BARRA37	PQ	0.5842	-3.11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA36	PQ	0.5842	-3.11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA35	PQ	0.9842	-3.11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA34	PQ	0.5746	-4.21	0.0	0.0	14.2	8.2	0.0
BARRA33	PQ	0.9671	-3.94	0.0	0.0	3.4	3.8	0.0
BARRA32	PC	0.9881	-3.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA31	PQ	0.5628	-4.46	0.0	0.0	15.7	13.0	0.0
BARRA30	PQ	0.9847	-3.12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA29	PQ	0.9761	-5.75	0.0	0.0	3.9	3.9	0.0
BARRA28	PQ	0.9073	-5.97	0.0	0.0	4.9	6.6	0.0
BARRA27	PQ	0.9688	-4.17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA26	FC	0.5688	-4.17	0.0	0.0	1.3	3.5	0.0
BARRA25	PC	0.5688	-4.17	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
BARRA24	PQ	0.5852	-3.07	0.0	0.0	5.1	10.1	0.0
BARRA23	PQ	0.9766	-3.45	0.0	0.0	2.3	2.8	0.0
BARRA22	PQ	0.9706	-3.88	0.0	0.0	9.0	5.3	0.0
BARRA21	PQ	0.9213	-6.06	0.0	0.0	33.5	37.7	0.0
BARRA20	PQ	0.9484	-4.08	0.0	0.0	1.9	3.3	0.0
BARRA2	PC	0.5761	-5.75	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
BARRA19	PC	0.5671	-4.23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA18	PQ	0.5671	-4.23	0.0	0.0	0.6	0.5	0.0
BARRA17	PQ	0.9671	-4.23	0.0	0.0	0.4	0.2	0.0
BARRA16	PQ	0.9671	-4.23	0.0	0.0	1.1	3.5	0.0
BARRA15	PQ	0.9386	-4.75	0.0	0.0	9.0	14.3	0.0
BARRA14	PQ	0.9397	-5.60	0.0	0.0	8.5	7.6	0.0
BARRA13	PQ	0.9847	-3.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA12	PC	0.9832	-3.11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA11	PQ	0.9822	-3.11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA10	PQ	0.9486	-4.43	0.0	0.0	2.4	3.1	0.0

158.7      194.2      157.2      163.6      0.0

Tabela 5.32

\*\*\* SISTEMA CA INDUSTRIAL C/ 18 MOTORES CA E 2 CARGAS RETIFICADORAS \*\*\*

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	N.º	DEFICIENCIA		POTE. RECLIBADA		PERDAS NAS LINHAS		PERCENTAGEM
			ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	
BARRA8	BARRA7	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.00	
BARRA8	BARRA6	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.00	
BARRA56	BARRA55	0	6.0	4.1	6.0	3.6	0.09	0.55	
BARRA56	BARRA54	0	6.5	4.6	6.6	3.9	0.05	0.70	
BARRA9	BARRA53	0	4.4	5.2	4.3	4.7	0.06	0.50	
BARRA53	BARRA54	0	1.5	0.6	1.5	0.6	0.0	0.00	
BARRA53	BARRA52	0	1.8	3.4	1.6	3.4	0.0	0.00	
BARRA53	BARRA51	0	0.0	-0.0	0.0	0.0	0.0	-0.00	
BARRA1	BARRA50	0	148.7	172.1	148.7	172.1	0.0	0.05	
BARRA5	BARRA9	0	5.0	11.1	5.0	11.1	0.0	0.00	
BARRA50	BARRA49	0	45.1	56.8	48.9	51.2	0.15	5.68	
BARRA50	BARRA49	0	45.5	57.4	49.4	51.6	0.15	5.73	
BARRA50	BARRA49	0	50.0	57.9	49.8	52.1	0.15	5.78	
BARRA46	BARRA47	0	2.9	3.5	2.9	3.3	0.02	0.22	
BARRA9	BARRA46	0	1.0	4.4	1.0	4.2	0.03	0.24	
BARRA47	BARRA46	0	2.9	3.3	2.9	3.3	0.0	0.00	
BARRA46	BARRA45	0	1.1	3.6	1.1	3.6	0.0	0.00	
BARRA48	BARRA44	0	3.8	1.9	3.7	1.7	0.01	0.18	
BARRA48	BARRA44	0	3.7	1.9	3.7	1.7	0.01	0.18	
BARRA43	BARRA43	0	3.4	2.5	3.4	2.5	0.00	0.00	
BARRA49	BARRA46	0	24.6	21.7	24.6	21.7	0.01	0.04	
BARRA43	BARRA48	0	12.0	13.0	11.9	13.0	0.01	0.07	
BARRA43	BARRA42	0	3.5	2.2	3.5	2.1	0.01	0.18	
BARRA43	BARRA42	0	3.5	2.3	3.5	2.1	0.01	0.18	
BARRA43	BARRA41	0	2.2	1.6	2.2	1.5	0.01	0.08	
BARRA40	BARRA9	0	0.1	-2.5	0.1	-2.6	0.01	0.07	
BARRA41	BARRA40	0	2.2	1.5	2.2	1.5	0.0	0.00	
BARRA4	BARRA9	0	5.0	11.1	5.0	11.1	0.0	0.00	
BARRA40	BARRA9	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	
BARRA40	BARRA36	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.00	
BARRA48	BARRA37	0	0.7	0.9	0.7	0.9	0.00	0.00	
BARRA37	BARRA36	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA37	BARRA35	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA32	BARRA56	0	9.5	6.2	9.5	6.2	0.00	0.00	
BARRA45	BARRA32	0	46.2	40.3	46.2	40.2	0.02	0.13	
BARRA32	BARRA34	0	7.1	4.3	7.1	4.1	0.01	0.21	
BARRA32	BARRA34	0	7.1	4.4	7.1	4.1	0.01	0.21	
BARRA32	BARRA33	0	1.7	2.0	1.7	1.9	0.00	0.07	
BARRA32	BARRA33	0	1.7	2.0	1.7	1.9	0.00	0.07	
BARRA32	BARRA30	0	19.0	21.4	19.0	21.3	0.02	0.12	
BARRA30	BARRA31	0	7.8	6.8	7.8	6.5	0.01	0.33	
BARRA30	BARRA31	0	7.9	6.8	7.8	6.5	0.01	0.33	
BARRA9	BARRA3	0	2.4	2.3	2.4	2.2	0.01	0.11	
BARRA9	BARRA3	0	2.4	2.3	2.4	2.2	0.01	0.11	
BARRA3	BARRA8	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00	
BARRA3	BARRA8	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00	
BARRA3	BARRA8	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00	
BARRA30	BARRA29	0	5.0	7.4	4.9	6.6	0.06	0.82	
BARRA30	BARRA28	0	1.8	1.4	1.8	1.4	0.00	0.06	
BARRA27	BARRA9	0	0.1	-2.5	0.1	-2.6	0.01	0.08	HIGH
BARRA28	BARRA27	0	1.8	1.4	1.8	1.4	0.0	0.00	
BARRA27	BARRA26	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.00	
BARRA27	BARRA25	0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.00	
BARRA49	BARRA24	0	25.1	35.8	29.0	35.5	0.04	0.24	
BARRA49	BARRA24	0	25.1	35.8	29.0	35.5	0.04	0.24	
BARRA24	BARRA23	0	3.5	1.3	3.5	1.3	0.00	0.00	
BARRA24	BARRA23	0	2.3	2.8	2.3	2.8	0.00	0.04	
BARRA24	BARRA22	0	4.8	4.8	4.8	4.6	0.01	0.14	
BARRA24	BARRA22	0	4.8	4.8	4.8	4.6	0.01	0.14	
BARRA24	BARRA21	0	16.7	20.9	16.6	18.7	0.08	2.20	
BARRA24	BARRA21	0	17.0	21.2	16.9	19.0	0.09	2.23	
BARRA24	BARRA20	0	1.9	3.5	1.9	3.3	0.01	0.16	
BARRA3	BARRA2	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.00	
BARRA24	BARRA19	0	2.0	1.6	2.0	1.5	0.01	0.07	
BARRA9	BARRA18	0	0.0	2.7	0.0	2.7	0.01	0.09	HIGH
BARRA19	BARRA18	0	2.0	1.5	2.0	1.5	0.0	0.00	
BARRA18	BARRA17	0	0.4	0.2	0.4	0.2	0.0	0.00	
BARRA18	BARRA16	0	1.1	3.5	1.1	3.5	0.0	0.00	
BARRA45	BARRA13	0	19.1	21.4	19.1	21.2	0.03	0.17	
BARRA46	BARRA13	0	0.9	4.7	0.9	4.7	0.00	0.00	
BARRA13	BARRA15	0	9.7	15.2	9.6	14.3	0.06	0.99	
BARRA13	BARRA14	0	4.3	4.1	4.2	3.8	0.03	0.37	
BARRA13	BARRA14	0	4.3	4.2	4.3	3.8	0.03	0.37	
BARRA37	BARRA12	0	0.7	0.9	0.7	0.9	0.00	0.00	
BARRA13	BARRA12	0	1.7	2.3	1.7	2.3	0.00	0.00	
BARRA12	BARRA11	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA12	BARRA10	0	2.4	3.2	2.4	3.1	0.01	0.17	

PERDAS DO SISTEMA		
	ATIVA MW	REATIVA MVAR
SERIE	1.35	30.68
SHUNT		0.0
TOTAL	1.35	30.68

Tabela 5.32

SOLUCAO DO FLUXO DE CARGA

\*\*\* SISTEMA CA INDUSTRIAL COM CARGAS MODELADA POR P + JC CONSTANTE \*\*\*

TENSÕES E POTENCIAS DE BARRAS

BARRA	TIPO	TENSÃO		GERAÇÃO		CARGA		REATIVA SHUNT
		MAGNITUDE (P.U.)	ÂNGULO (GRAUS)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	
BARRA1	REF.	1.0500	0.0	148.3	141.2	0.0	0.0	0.0
BARRA9	PC	1.0000	-4.29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA8	PQ	0.9661	-6.06	0.0	0.0	0.4	0.3	0.0
BARRA7	PQ	0.9661	-6.06	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
BARRA6	PQ	0.9661	-6.06	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0
BARRA56	PQ	0.9991	-2.59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA55	PQ	0.9420	-6.43	0.0	0.0	0.0	4.8	0.0
BARRA54	PC	0.9473	-6.89	0.0	0.0	8.3	6.1	0.0
BARRA53	PC	0.9473	-6.89	0.0	0.0	1.1	0.6	0.0
BARRA52	PQ	0.9473	-6.89	0.0	0.0	1.8	1.4	0.0
BARRA51	PQ	0.9473	-6.89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA50	PQ	1.0459	-0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA5	PV	1.0000	-4.25	5.0	6.8	0.0	0.0	0.0
BARRA49	PC	1.0005	-2.90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA48	PQ	0.9974	-3.09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA47	PQ	0.9754	-4.75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA46	PQ	0.9754	-4.75	0.0	0.0	2.7	2.3	0.0
BARRA45	PQ	0.9754	-4.75	0.0	0.0	1.1	0.8	0.0
BARRA44	PQ	0.9702	-5.21	0.0	0.0	7.5	4.6	0.0
BARRA43	PQ	0.9997	-2.55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA42	PC	0.9681	-4.87	0.0	0.0	7.0	5.6	0.0
BARRA41	PC	0.9890	-4.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA40	PC	0.9850	-4.19	0.0	0.0	1.9	1.7	0.0
BARRA4	PV	1.0000	-4.25	5.0	6.8	0.0	0.0	0.0
BARRA39	PQ	0.9890	-4.19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA38	PQ	0.9890	-4.19	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0
BARRA37	PQ	0.9970	-3.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA36	PQ	0.9970	-3.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA35	PC	0.9970	-3.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA34	PC	0.9982	-4.17	0.0	0.0	14.2	0.0	0.0
BARRA33	PQ	0.9855	-3.52	0.0	0.0	3.4	2.4	0.0
BARRA32	PQ	0.9992	-2.58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA31	PQ	0.9755	-4.40	0.0	0.0	15.6	13.1	0.0
BARRA30	PQ	0.9961	-3.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA3	PC	0.9754	-5.53	0.0	0.0	3.9	4.0	0.0
BARRA29	PQ	0.9937	-5.89	0.0	0.0	4.9	5.1	0.0
BARRA28	PQ	0.9896	-4.14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA27	PQ	0.9896	-4.14	0.0	0.0	1.3	1.0	0.0
BARRA26	PQ	0.9896	-4.14	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
BARRA25	PQ	0.9896	-4.14	0.0	0.0	0.3	0.3	0.0
BARRA24	PQ	0.9963	-3.05	0.0	0.0	5.1	10.1	0.0
BARRA23	PQ	0.9879	-3.42	0.0	0.0	2.3	2.8	0.0
BARRA22	PC	0.9819	-3.84	0.0	0.0	9.6	9.3	0.0
BARRA21	PC	0.9933	-5.96	0.0	0.0	33.5	37.8	0.0
BARRA20	PQ	0.9814	-4.10	0.0	0.0	1.9	1.3	0.0
BARRA2	PQ	0.9754	-5.53	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0
BARRA19	PQ	0.9883	-4.21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA18	PQ	0.9883	-4.21	0.0	0.0	0.6	0.5	0.0
BARRA17	PQ	0.9883	-4.21	0.0	0.0	0.4	0.2	0.0
BARRA16	PC	0.9883	-4.21	0.0	0.0	1.1	0.9	0.0
BARRA15	PC	0.9856	-4.72	0.0	0.0	9.6	3.5	0.0
BARRA14	PQ	0.9544	-5.53	0.0	0.0	8.5	7.3	0.0
BARRA13	PQ	0.9974	-3.05	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA12	PQ	0.9964	-3.12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA11	PQ	0.9964	-3.12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
BARRA10	PQ	0.9804	-4.45	0.0	0.0	2.4	1.4	0.0

158.3      154.8      157.1      129.5      0.0

Tabela 5.33

\*\*\* SISTEMA CA INDUSTRIAL COM CARGAS MODELADAS POR P + JU CONSTANTE \*\*\*

FLUXO DE POTENCIA NAS LINHAS

BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	N.	POTENCIA EMITIDA		POTENCIA RECEBIDA		PERDAS NAS LINHAS		PERCENTAGEM
			ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	ATIVA (MW)	REATIVA (MVAR)	
BARRA8	BARRA7	101	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.00	
BARRA8	BARRA6	101	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.00	
BARRA56	BARRA55	101	6.0	5.4	6.0	4.8	0.05	0.66	
BARRA56	BARRA54	101	6.8	4.5	6.7	4.2	0.05	0.70	
BARRA9	BARRA53	101	4.4	4.4	4.4	3.9	0.05	0.42	
BARRA53	BARRA54	101	1.5	1.9	1.5	1.9	0.0	0.00	
BARRA53	BARRA52	101	1.8	1.4	1.6	1.4	0.0	0.00	
BARRA53	BARRA51	101	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA1	BARRA50	101	148.3	141.2	148.3	141.1	0.0	0.04	
BARRA5	BARRA9	101	5.0	6.8	5.0	6.8	0.0	0.00	
BARRA50	BARRA49	101	45.0	46.6	48.8	42.0	0.12	4.60	
BARRA50	BARRA49	101	49.4	47.0	45.3	42.4	0.12	4.64	
BARRA50	BARRA49	101	49.9	47.5	45.7	42.8	0.12	4.69	
BARRA48	BARRA47	101	2.9	1.6	2.9	1.5	0.01	0.11	
BARRA9	BARRA46	101	0.9	1.6	0.9	1.6	0.01	0.04	
BARRA47	BARRA46	101	2.9	1.5	2.9	1.5	0.0	0.00	
BARRA46	BARRA45	101	1.1	0.8	1.1	0.8	0.0	0.00	
BARRA48	BARRA44	101	3.7	2.5	3.7	2.3	0.01	0.20	
BARRA48	BARRA44	101	3.7	2.5	3.7	2.3	0.01	0.20	
BARRA48	BARRA56	101	3.4	2.2	3.4	2.2	0.00	0.00	
BARRA49	BARRA43	101	24.5	16.7	24.5	16.7	0.01	0.04	
BARRA43	BARRA48	101	11.5	7.6	11.9	7.5	0.01	0.05	
BARRA43	BARRA42	101	3.5	3.0	3.5	2.8	0.02	0.21	
BARRA43	BARRA42	101	3.5	3.0	3.5	2.8	0.02	0.21	
BARRA43	BARRA41	101	2.2	0.9	2.2	0.9	0.00	0.06	
BARRA40	BARRA9	101	0.0	-1.0	0.0	-1.0	0.00	0.01	
BARRA41	BARRA40	101	2.2	0.9	2.2	0.9	0.0	0.00	
BARRA4	BARRA9	101	5.0	6.8	5.0	6.8	0.0	0.00	
BARRA40	BARRA35	101	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA40	BARRA38	101	0.2	0.2	0.2	0.2	0.0	0.00	
BARRA48	BARRA37	101	0.6	0.4	0.6	0.4	0.00	0.00	
BARRA37	BARRA36	101	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA37	BARRA35	101	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA32	BARRA56	101	9.5	8.2	9.5	8.2	0.00	0.00	
BARRA49	BARRA32	101	46.1	30.8	46.1	30.7	0.02	0.10	
BARRA32	BARRA34	101	7.1	0.1	7.1	0.0	0.01	0.15	
BARRA32	BARRA34	101	7.1	0.1	7.1	-0.0	0.01	0.15	
BARRA32	BARRA33	101	1.7	1.2	1.7	1.2	0.00	0.04	
BARRA32	BARRA33	101	1.7	1.2	1.7	1.2	0.00	0.04	
BARRA32	BARRA30	101	19.0	19.8	19.0	19.7	0.02	0.10	
BARRA30	BARRA31	101	7.8	6.8	7.8	6.5	0.01	0.32	
BARRA30	BARRA31	101	7.8	6.9	7.8	6.5	0.01	0.32	
BARRA9	BARRA3	101	2.4	2.4	2.4	2.3	0.01	0.11	
BARRA9	BARRA3	101	2.4	2.4	2.4	2.3	0.01	0.11	
BARRA3	BARRA8	101	0.2	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00	
BARRA3	BARRA8	101	0.2	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00	
BARRA3	BARRA8	101	0.2	0.2	0.2	0.2	0.00	0.00	
BARRA30	BARRA29	101	5.0	5.6	4.5	5.1	0.04	0.57	
BARRA30	BARRA28	101	1.8	0.5	1.8	0.5	0.00	0.04	
BARRA27	BARRA9	101	0.1	-0.8	0.1	-0.9	0.00	0.01	
BARRA28	BARRA27	101	1.8	0.5	1.8	0.5	0.0	0.00	
BARRA27	BARRA26	101	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.00	
BARRA27	BARRA25	101	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0	0.00	
BARRA45	BARRA24	101	29.1	33.6	29.0	33.4	0.04	0.22	
BARRA45	BARRA24	101	29.1	33.6	29.0	33.4	0.04	0.22	
BARRA24	BARRA30	101	3.4	0.2	3.4	0.2	0.00	0.00	
BARRA24	BARRA23	101	2.3	2.8	2.3	2.8	0.00	0.04	
BARRA24	BARRA22	101	4.8	4.8	4.8	4.6	0.01	0.14	
BARRA24	BARRA22	101	4.8	4.7	4.8	4.6	0.01	0.13	
BARRA24	BARRA21	101	16.7	20.9	16.6	18.7	0.08	2.14	
BARRA24	BARRA21	101	17.0	21.2	16.9	19.0	0.08	2.18	
BARRA24	BARRA20	101	1.9	1.4	1.9	1.3	0.00	0.05	
BARRA3	BARRA2	101	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.00	
BARRA24	BARRA19	101	2.0	0.7	2.0	0.6	0.00	0.05	
BARRA9	BARRA18	101	0.0	1.0	0.0	1.0	0.00	0.01	
BARRA19	BARRA18	101	2.0	0.6	2.0	0.6	0.0	0.00	
BARRA18	BARRA17	101	0.4	0.2	0.4	0.2	0.0	0.00	
BARRA18	BARRA16	101	1.1	0.5	1.1	0.9	0.0	0.00	
BARRA45	BARRA13	101	19.1	12.5	15.1	12.4	0.02	0.10	
BARRA48	BARRA13	101	0.9	0.5	0.9	0.5	0.00	0.00	
BARRA12	BARRA15	101	9.6	3.8	9.6	3.5	0.01	0.32	
BARRA13	BARRA14	101	4.3	4.0	4.2	3.7	0.02	0.35	
BARRA13	BARRA14	101	4.3	4.0	4.3	3.7	0.03	0.35	
BARRA37	BARRA12	101	0.6	0.4	0.6	0.4	0.00	0.00	
BARRA13	BARRA12	101	1.6	1.1	1.8	1.1	0.00	0.00	
BARRA12	BARRA11	101	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
BARRA12	BARRA10	101	2.4	1.4	2.4	1.4	0.01	0.08	

PERDAS DO SISTEMA

SERIE	ATIVA		REATIVA	
	MW	MVAR	MW	MVAR
SERIE	1.09	25.35		
SHUNT			0.0	
TOTAL	1.09	25.35		

Tabela 5.33

## 5.6 - Conclusões

A contribuição deste capítulo foi no sentido de apresentar, de forma sistemática, a metodologia de incorporação das cargas elétricas analisadas anteriormente, num programa de fluxo de potência existente, cujas características básicas foram fornecidas.

Tendo-se em vista que os desenvolvimentos e discussões sob o ponto de vista de modelos analíticos foram realizados nos capítulos próprios correspondentes, a estrutura aqui discutida teve apenas o carácter de justificar a implementação digital. Desta forma, as conclusões que poderiam ser extraídas do capítulo tem apenas por objetivo ilustrar as aplicações do programa final obtido. Destaca-se, todavia, que na sua forma atual, o programa é bastante original e nada foi encontrado na literatura que se assemelhe aos resultados finais atingidos. Deve-se, porém, ressaltar a existência de programas, mesmo a nível nacional, que consideram parte das cargas aqui modeladas. Este é, por exemplo, o caso de programas que simulam estudos de fluxo de potência com a consideração de interligações em corrente contínua.

Neste campo está, talvez, as maiores possibilidades de desenvolvimentos futuros, pois, indiscutivelmente, outras cargas com as denominadas características especiais, se fazem presentes em sistemas de potência. Como exemplo disto, poder-se-ia citar o caso de sistemas estáticos de compensação, cargas estáticas inversoras, etc.

Quanto aos resultados globais atingidos e a sua significância, o item anterior, onde se apresenta casos numéricos estudados, já considerou estes pontos.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

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

No capítulo II abordou-se, resumidamente, a teoria básica de um ETCC, com vistas, fundamentalmente, à estrutura de sua operação em regime permanente. Com base na formulação desenvolvida, obteve-se um programa digital cuja validade foi comprovada por estudos isolados de um sistema típico. A versatibilidade quanto à variação de parâmetros, como por exemplo, dos taps, em busca de pontos de operação otimizados no que diz respeito às perdas e ao consumo de reativos, foi constatada pelos resultados atingidos. Através das tabelas apresentadas pode-se verificar que, além das potências  $P$  e  $Q$  entregues ao retificador e inversor, várias outras informações operacionais são determinadas e que fornecem uma visão completa do funcionamento do sistema C.C.

Quanto às cargas retificadoras ou cargas C.C, consideradas no capítulo III, a teoria apresentou, inicialmente, uma extensão daquela desenvolvida para os ETCC'(s). Destaque-se, porém, que devido a natureza dos sistemas industriais, optou-se também por considerar os denominados modos anormais de operação, os quais, essencialmente, são definidos por ângulos de comutação superiores a  $60^\circ$ , ou seja, por mais de quatro válvulas conduzindo

do simultaneamente. Com relação a este ponto, é conveniente ressaltar que, embora o assunto tenha interesse acadêmico, sua ocorrência na prática será rara, pois as variáveis de operação normal sempre definirão o modo "A" de operação. Utilizando-se da formulação desenvolvida foi obtido um programa digital com o qual um caso isolado foi estudado. Novamente, a possibilidade de variação de parâmetros, como o tap do transformador, mostrou ser uma medida eficiente para a definição do ângulo de disparo, e conseqüentemente, para a otimização das perdas e da potência reativa consumida pelo retificador. Ressalta-se, finalmente, que a carga simulada obedeceu à configuração de uma f.c.e.m constante. Esta modelagem atende, sem dúvida, à maioria das aplicações industriais.

A operação dos motores de indução foi abordada no capítulo IV, desenvolvendo-se primeiramente um tratamento analítico que levou ao circuito equivalente de um motor tipo gaiola simples. Utilizando-se deste circuito foram desenvolvidas as equações de operação que, com base nos parâmetros do motor e da potência de acionamento especificada, determinam todas as grandezas de funcionamento da máquina.

Dadas as características de operação dos motores de indução, não foi adotado nenhum tratamento relacionado com a otimização do consumo de reativos e das perdas, sendo que, por este motivo, os resultados obtidos são absolutos e dependentes unicamente da potência acionada pelo motor e dos valores dos elementos do modelo equivalente adotado.

Empregando-se o programa digital desenvolvido, foram processados diversos casos isolados, cujos resultados foram ilustrados no próprio capítulo. Das diversas informações ex-

traídas do programa, as que diretamente interessam aos estudos de fluxo de carga são as potências ativa e reativa. Quanto a estas, o ponto mais relevante atingido refere-se ao cálculo mais preciso do reativo associado a uma dada potência ativa. Em outras palavras, isto implica que os reativos podem agora ser calculados, não com base em um fator de potência típico, mas sim, em função da operação e dos parâmetro do motor.

Uma vez desenvolvidos os modelos relatados anteriormente, resta então incorporá-los ao estudo de fluxo de carga de um sistema c.a, objetivo final deste trabalho. Isto foi feito segundo relatado no capítulo V. Conforme destacado ao longo desta dissertação, o método empregado consistiu em incorporar, iterativamente, as cargas especiais num programa de fluxo de carga existente.

Pôde-se observar, a partir dos vários casos estudados, que a convergência só pode ser obtida se a operação do sistema c.a, for tal que as variações das tensões nas barras do sistema c.a não forem acentuadas.

Uma vez obtido o programa principal, procedeu-se a vários testes de verificação, dentre os quais um resumo foi apresentado no capítulo V. Os comentários particulares para cada caso foram feitos e acredita-se ser dispensável qualquer consideração adicional. Resta, finalmente, observar a significância dos resultados globais obtidos, os quais podem ser analisados através do sistema industrial utilizado. Neste, constata-se que utilizando cargas representadas por  $P + jQ$  constantes, o balanço final de potência fornece  $P = 157,1$  (MW) e  $Q_{\text{carga}} = 129,5$  (MVARs). O mesmo processamento, empregando a denominada representação mais exata, fornece  $P_{\text{carga}} = 157,2$  (MW)

e  $Q_{\text{carga}} = 163,6$  (MVARs). Estes resultados indicam que, para o caso, erros superiores a 10% foram encontrados nos estudos clássicos.

Com relação a cargas para estudos futuros, ou prosseguimento a esta linha de trabalho, diversas sugestões aplicáveis a cada capítulo específico já foram realizadas ao longo do texto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - OLIVEIRA, J.C. & COGO, J.R.- Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Contínua - Publicações internas, Escola Federal de Engenharia de Itajubá - 1981
- [2] - KIMBARK, E.W. - Direct Current Transmission - New York, John Wiley, 1971.
- [3] - CASTRILLON, J.L. - Modelagens de Ligações em Corrente Contínua - Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro - 1982.
- [4] - GIESNER, D.B. & ARRILAGA, J. - Operating Modes of the 3 Phase Bridge Converter - Int. J. Elect. Engng. Educ. 1970.
- [5] - ARNOULD D.C.P. & TURNER, K.S. & ARRILAGA, J.- Modeling Rectifier Loads for a Multi-Machine Transient Stability Programme. - IEEE - Trans - on Power Appar Systems, New York - 99(1): 78:85 jan/feb - 1980
- [6] - BARBI, I. - Conversão Eletromecânica de Energia. Publicações internas, UFSC, 1982.
- [7] - SHIN, C.G. - Simulação Digital para Estudos de Estabilidade Transitória e Rejeição de Carga em Sistemas Elétricos de Potência - Tese de Mestrado - Itajubá, 1981
- [8] - JONES, R.W. - Electrical Control Systems. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1953
- [9] - WATERS, S.S. & WILLOUGHBY, R.D. - Modeling Induction Motors for Systems Studies.- IEEE TRANS. ON IND. APPLI., Vol. IA - 19 - NO. 5 - Sept/Octo. 1983

- [10] - BOWLES, J.P. - Control Systems for HVDC. - Report to CEA - HVDC Subsection, Edmuntonton, 1975.
- [11] - BOWLES, J.P. - Alternatives Techniques and Optimisation of Voltage and Reactive Power Control at HVDC Converter Stabilions.- IEEE Conference on Over Voltages and Compensation on Integrated AC-DC Systems, Winnipeg, 1980.
- [12] - NILSSON, A. & EKLUND, L. & HOGBERG, K.E. - Design and testing of HVDC Thyristor Valve. - IEEE Conference Publication 205 on Thyristor and Variable Static Equipment for AC and DC Transmission -, 1981, p.p.- 154 - 157.
- [13] - TYLAVSKY, D.J. & TRUTT, F.C. - The Newton Raphson Load Flow Applied to AC/DC Systems With Commutation Impedance. IEEE TRANS. ON IND. APP. - Vol. IA, 19 - No. 6, nov/dec - 1983.
- [14] - HASSAN, M.M. & STANEK, E.K. - Analysis Techniques in AC/DC Power Systems. - IEEE TRANS. ON IND. APP. Vol. IA. 17, No, 5, PP 473 - 480, sep/oct. 1981
- [15] - REEVE, J. & FAHMY, G. & STCOTT, B. - Versatile Load Flow Method for Multi - Terminal HVDC Systems. - IEEE TRANS. Power APP. Syst., Vol. PAS-96, PP - 925 - 933, Mag 1977.