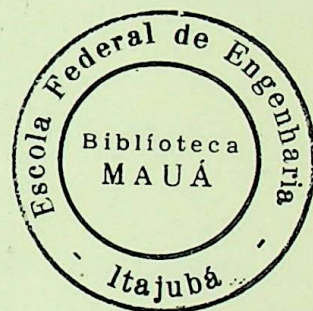


TESE

383

- JOSÉ EDISON MENDONÇA DE LA-ROCQUE -

IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO PARA O
ELO DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE
CONTÍNUA EM UM PROGRAMA
DE ESTABILIDADE
TRANSITÓRIA



ORIENTADOR: PROF. JOÃO ROBERTO COGO

CO-ORIENTADOR: PROF. JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA

TRABALHO DE DISSERTAÇÃO APRESENTADO A COMISSÃO DE
PÓS-GRADUAÇÃO DA ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ COMO
PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGE
NHARIA ELÉTRICA.

ITAJUBÁ, AGOSTO DE 1983

DEDICATÓRIA

A meus pais, Jorge La-Rocque e
Mary La-Rocque, e minha querida noiva Hē
lia Maria Vieira de Castro.

CLASS. 621.3.05:621.3.024(043.2)

CUTT. L 326 i

TOMBO 383

AGRADECIMENTOS

À UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ (UFPA), responsável pelo programa que tornou possível a realização deste trabalho.

Ao Professor José Carlos de Oliveira pela idéia que deu origem a este trabalho.

Aos colegas e amigos do CESE - 81, CESE - 82 e CESE - 83 em especial aos Eng^{os}. José do Carmo Laranjeiras e Gustavo Arruda, pelo companheirismo, incentivo e colaboração.

Aos pais de minha noiva, Hélio Vilela de Castro e Dulcimar Vieira de Castro pelo incentivo, pela dedicação e pela amizade dedicada.

À senhorita Mariléna Moreno de Oliveira, pela dedicação quando da datilografia deste trabalho.

A todos os funcionários da EFEI em especial ao funcionário José Hilton de Mendonça, pela amizade e pela dedicação demonstradas durante a realização deste trabalho.

Ao Professor João Roberto Cogo pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, responsáveis pelo bom ambiente sempre encontrado.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO I - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	03
1.1 - Introdução	03
1.2 - Equações para o regime permanente	08
CAPÍTULO II - CONTROLE PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA	20
2.1 - Introdução	20
2.2 - Meios Básicos de Controle	20
2.3 - Características da Corrente de referência dos reguladores de corrente	27
2.4 - Potência de Controle (P_0).....	28
2.5 - Controle de Frequência	29
2.6 - Amortecimento	30
2.7 - Interrelação entre o Controle e a Proteção	31
2.8 - Falhas de Operação	32
CAPÍTULO III - ESTRUTURAÇÃO DOS CONTROLES EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA	36
3.1 - Introdução	36
3.2 - Controlador de Disparo ("Firing Control")	36
3.3 - Controle da Corrente	41
3.4 - Controle da Ignição e Extinção	50
3.5 - O Controlador Principal ("Master Control")	55
CAPÍTULO IV - CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM DIGITAL DA INTERLIGAÇÃO AC/DC/AC PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE ELETROMECÂNICA	59
4.1 - Introdução	59
4.2 - Filosofia do Controle para Análise da Estabilidade Transitória	59
4.2.1 - Filosofia do Controle usada no Programa de Estabilidade Transitória	62
4.2.2 - Representação da Característica Estática dos Elos de Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Contínua	63
4.3 - Rotina para solução do Elo DC usada no programa	67

4.3.1 - Controle Básico	71
4.3.2 - Limites Mínimos de Tensão e Ângulo ...	79
4.4 - Característica do "Controle Principal" ou "Master Control"	84
4.4.1 - Aspectos Físicos da Modulação ou "Con- trole de Amortecimento" ou "Damping Control"	84
4.4.2 - Considerações Práticas à respeito da Mo- dulação	87
4.5 - Rotina para Modulação do Elo DC usada no Programa ..	89
4.5.1 - Função de Transferência da Modulação .	91
4.5.2 - Escolha do Sinal de Entrada - δREL ..	93
4.5.3 - Definição δREL	94
4.5.4 - Função de Transferência	95
4.5.5 - Representação dos Integradores	96
4.5.6 - Representação Digital da Função de Trans- ferência	96
CAPÍTULO V - RESULTADOS E CONCLUSÕES	99
5.1 - Introdução	99
5.2 - Resultados e Conclusões	99
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES GERAIS	136
APÊNDICE A - Lógica do Bloqueio e Desbloqueio do Elo DC ...	139
APÊNDICE B - Descrição Geral do Programa de Estabilidade Transitória da EFEI e dados para o Elo DC	143
APÊNDICE C - Uso do Plotter no Programa de Estabilidade	161
APÊNDICE D - Dados para as Simulações	165
APÊNDICE E - Relação entre as Rotinas DC Implementadas e o Programa de Estabilidade	190
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	192

SIMBOLOGIA

V_{dr}	- Tensão contínua no retificador
α ou α_r	- Ângulo de ignição (ou disparo) das válvulas do retificador
I_d	- Corrente na linha de Corrente Contínua
V_{dor}	- Tensão contínua para $\alpha = 0^\circ$ e $I_d = 0$
X_{cr}	- Reatância de comutação, para o retificador
R_{cr}	- Resistência equivalente de comutação, para o retificador
δ	- Ângulo de extinção das válvulas do retificador
μ_r	- Ângulo de comutação das válvulas do retificador
V_{di}	- Tensão contínua no inversor
γ ou γ_o	- Ângulo de extinção das válvulas do inversor
α_i	- Ângulo de ignição (ou disparo) das válvulas do <u>inversor</u>
V_{doi}	- Tensão contínua para $\gamma = 0^\circ$ ou $\alpha_i = 180^\circ$ e $I_d = 0$
X_{ci}	- Reatância de Comutação, para o inversor
R_{ci}	- Resistência equivalente de comutação para o inversor
μ_i	- Ângulo de comutação das válvulas do inversor
β	- Ângulo de avanço das válvulas do inversor
R_d	- Resistência da linha de corrente contínua

- L_d - Indutância do reator de alisamento da linha de corrente contínua
- P_r - Potência ativa do retificador
- Q_r - Potência reativa do retificador
- P_i - Potência ativa do inversor
- Q_i - Potência reativa do inversor
- E_{acr} - Tensão AC eficaz entre fases, no primário do transformador do retificador
- E_{aci} - Tensão AC eficaz entre fases, no primário do transformador do inversor.
- V_{acr} - Tensão AC eficaz entre fases, no secundário do transformador do retificador
- V_{aci} - Tensão AC eficaz entre fases, no secundário do transformador do inversor
- V_r - Tensão AC eficaz entre fases na barra do retificador
- V_i - Tensão AC eficaz entre fases na barra do inversor
- Δ_{Id} - Margem de corrente
- Δ_I - Variação da ordem de corrente provocada pela modulação do elo DC
- I_{fict} - Corrente máxima fictícia capaz de circular no elo DC

I - INTRODUÇÃO

A atualidade do trabalho que se apresenta, decorre em grande parte da proximidade do comissionamento do primeiro sistema de transmissão de corrente contínua em Alta Tensão (CCAT) no Brasil.

Por outro lado como a política energética nacional pode dirigir-se a exploração de recursos hídricos distantes dos principais centros de consumo, pode-se prever possibilidades de construção de novas ligações em corrente contínua [35].

Desta forma torna-se necessário o desenvolvimento de métodos e modelos matemáticos capazes de representar acuradamente o desempenho estático e dinâmico de tais sistemas [35].

É sabido que a Região Norte (Bacia Amazônica) de verá tornar-se em breve um grande parque gerador ainda que fracamente consumidor. Em contrapartida, os principais centros de carga do país estão situados nas regiões Sudeste e Sul, ou seja, a milhares de quilômetros de distância. Abre-se, desta forma, um campo de aplicação de razoáveis proporções para sistemas em corrente contínua no Brasil [35].

Em termos de planejamento de sistemas elétricos de potência, vários estudos devem ser conduzidos antes da implantação de um novo esquema em particular. Estes estudos envolvem basicamente a utilização de programas de fluxo de carga, de curto circuito e programas de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos.

O presente trabalho tem por objetivo efetuar a inclusão em um programa de estabilidade transitória do modelo, já desenvolvido na literatura [17], representativo dos efeitos dinâmicos de elos de corrente contínua.

Este estudo foi conduzido no sentido de incluir elos de transmissão em corrente contínua (denominado elo DC) em um sistema de corrente alternada (denominado AC), somente para transmissões ponto-a-ponto, postergando para um futuro próximo, a possibilidade de inclusão de interconexões DC a multiterminais.

Para inclusão de um modelo do elo DC em um programa de estabilidade transitória, foram utilizadas as rotinas já desenvolvidas pela literatura [17], as quais são explicadas de uma maneira didática neste trabalho. O programa de estabilidade ele

tromecânica utilizado, foi o programa desenvolvido no Departamento de Engenharia Elétrica da EFEI (Escola Federal de Engenharia de Itajubá) [1], mas poderia ser qualquer outro programa análogo, pois as rotinas DC desenvolvidas possuem um caráter geral [17].

Nestas rotinas DC são utilizadas técnicas de controle de sistemas DC, proporcionando aos elos, inclusive sua participação no amortecimento do sistema global AC/DC.

O programa obtido com a inclusão do modelo do elo DC visa ser utilizado em estudos de planejamento de sistemas AC/DC.

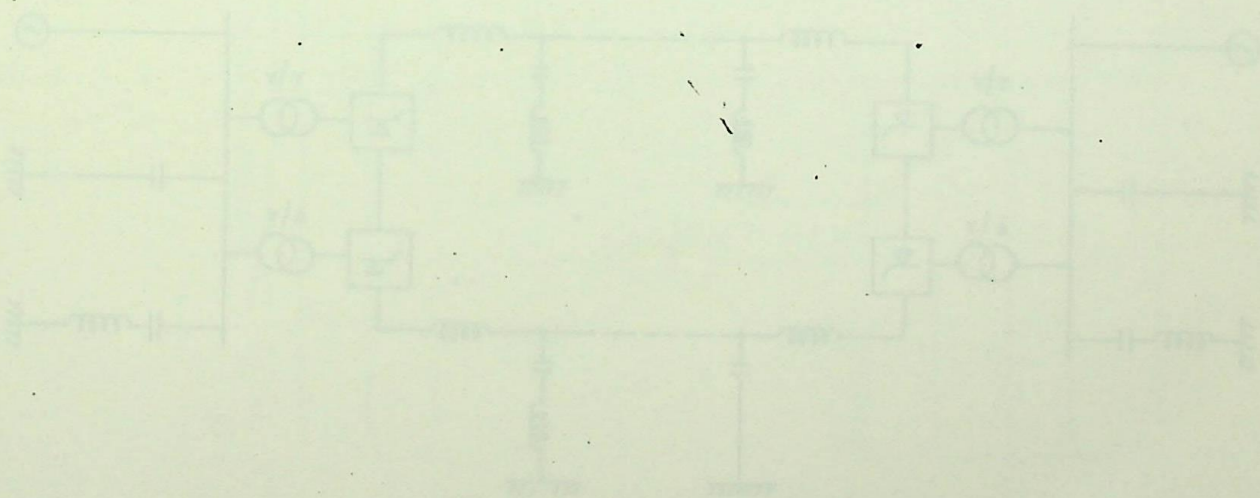
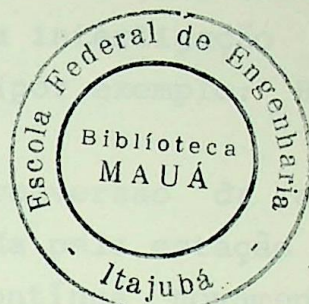


FIGURA 1.1 - Diagrama esquemático dos componentes de uma ligação elétrica em transmissão de energia elétrica em Alta Tensão (ACAT).

CAPITULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Introdução

Atualmente as ligações em corrente contínua apresentam-se como uma solução na área de transmissão de grandes blocos de energia a grande distância, bem como na interligação de sistemas elétricos de diferentes frequências (por exemplo: Brasil 60 Hz e Paraguai 50 Hz).

Essas ligações que envolvem a conversão da corrente alternada em corrente contínua, realizada pela estação retificadora e posterior conversão da corrente contínua novamente em corrente alternada, realizada pela estação inversora, permitem interligar sistemas elétricos sem estabelecer entre eles, qualquer vínculo de tensão, frequência ou sequência de fases.

As estações conversoras são formadas por pontes conversoras, as quais estão associados transformadores, reatores, filtros, bancos de capacitores, compensadores síncronos ou compensadores estáticos, além de sistemas de controle, proteção e supervisão das conversoras, como indica na figura 1.1.

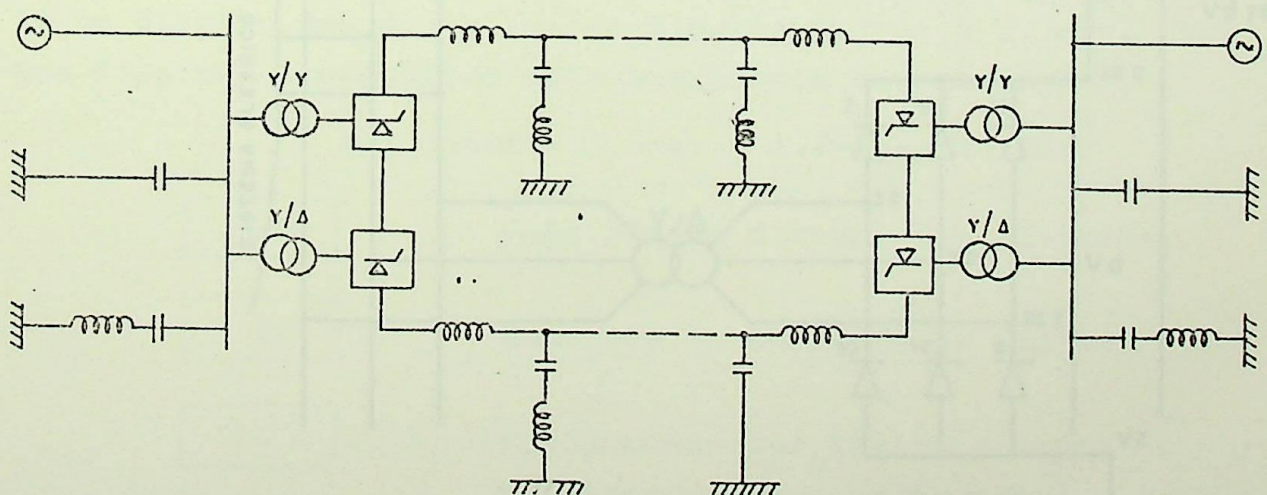
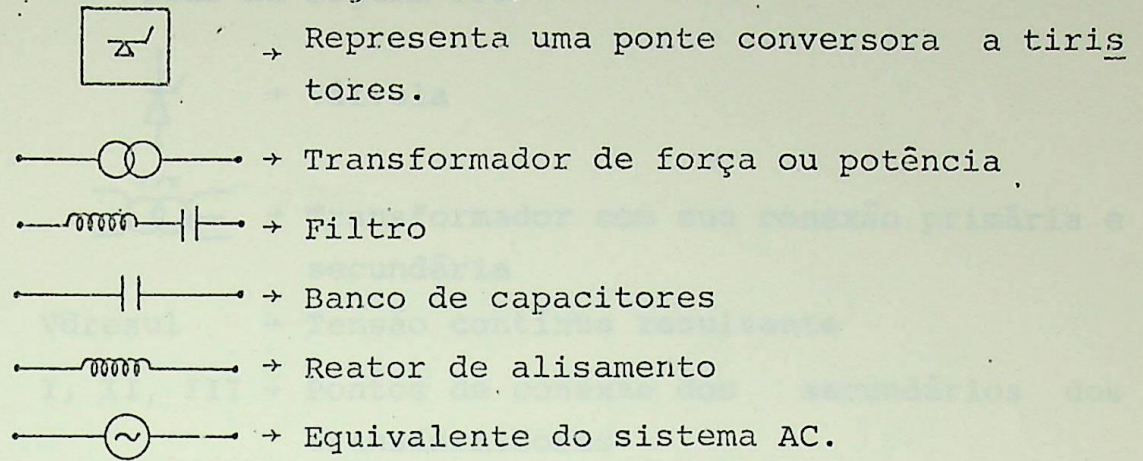


FIGURA 1.1 - Diagrama esquemático dos componentes de uma ligação típica em transmissão de corrente contínua em Alta Tensão (CCAT).

Onde na figura 1.1, tem-se:



As pontes conversoras são compostas de válvulas, modernamente, formadas por tiristores ligados em série, agrupas das segundo um arranjo denominado "Ponte de Graetz" [2] de 6 pulsos, ou associação série de pontes de 6 pulsos, formando pontes de 12 pulsos, como mostrado na figura 1.2.

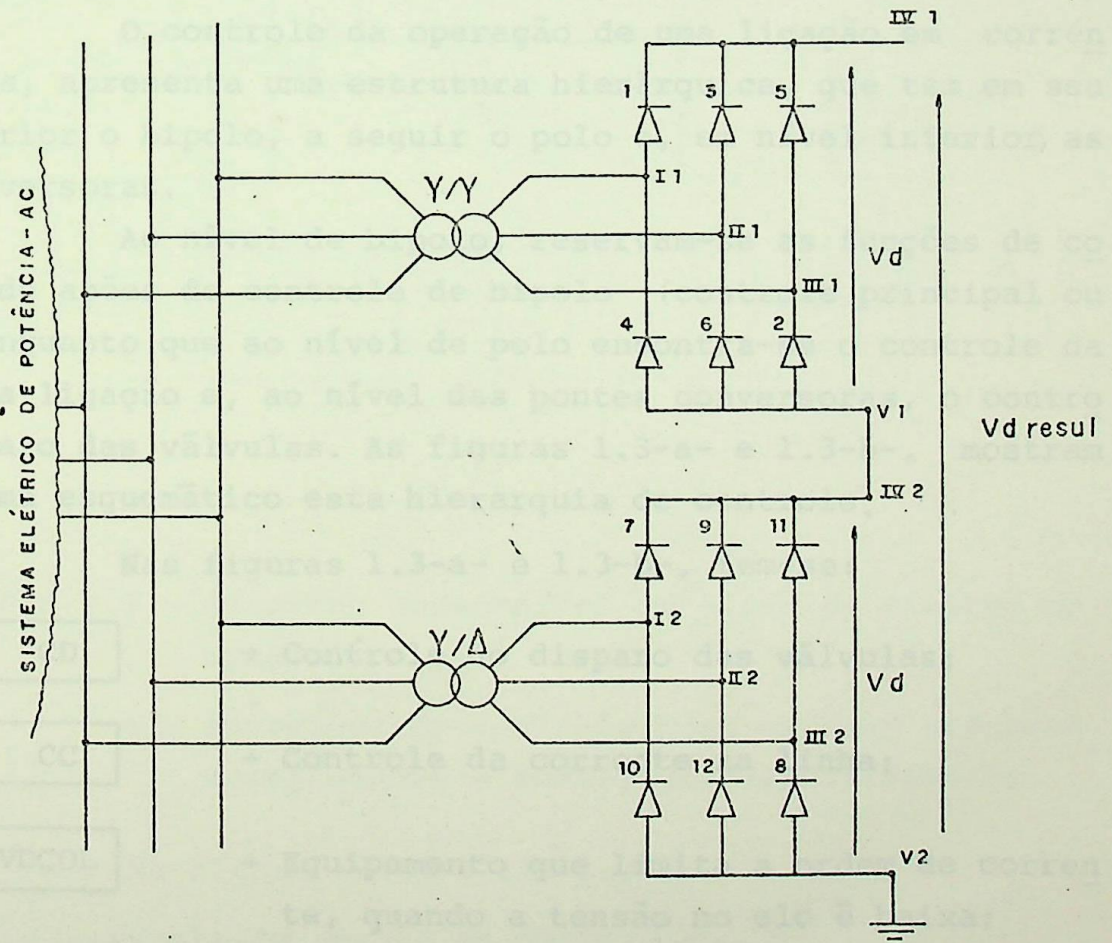
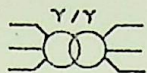


FIGURA 1.2 - Arranjo de 2 grupos conversores de 6 pulsos em série, formando uma conversora de 12 pulsos.

Onde na figura 1.2



→ Válvula



→ Transformador com sua conexão primária e secundária

Vdresul → Tensão contínua resultante

I, II, III → Pontos de conexão dos secundários dos transformadores

IV, V → Terminais da ponte conversora 1-4, 3-6, 5-2, 7-10, 9-12, 8-11- Ramo das pontes constituídos por válvulas.

As pontes conversoras podem ainda ser ligadas em série ou em paralelo, formando polos e a associação de dois polos forma um bipolo, como mostra a figura 1.3-b-.

O controle da operação de uma ligação em corrente contínua, apresenta uma estrutura hierárquica, que tem em seu nível superior o bipolo, a seguir o polo e, em nível inferior, as pontes conversoras.

Ao nível de bipolo, reservam-se as funções de coordenação de ações de controle de bipolo (controle principal ou mestre), enquanto que ao nível de polo encontra-se o controle da corrente na ligação e, ao nível das pontes conversoras, o controle de disparo das válvulas. As figuras 1.3-a- e 1.3-b-, mostram num diagrama esquemático esta hierarquia de controle.

Nas figuras 1.3-a- e 1.3-b-, tem-se:

CD

→ Controle do disparo das válvulas;

CC

→ Controle da corrente na linha;

VDCOL

→ Equipamento que limita a ordem de corrente, quando a tensão no elo é baixa;

CP

ou

MESTRE

→ Controle principal ou controle da potência a ser despachada (ordem de potência para o elo).

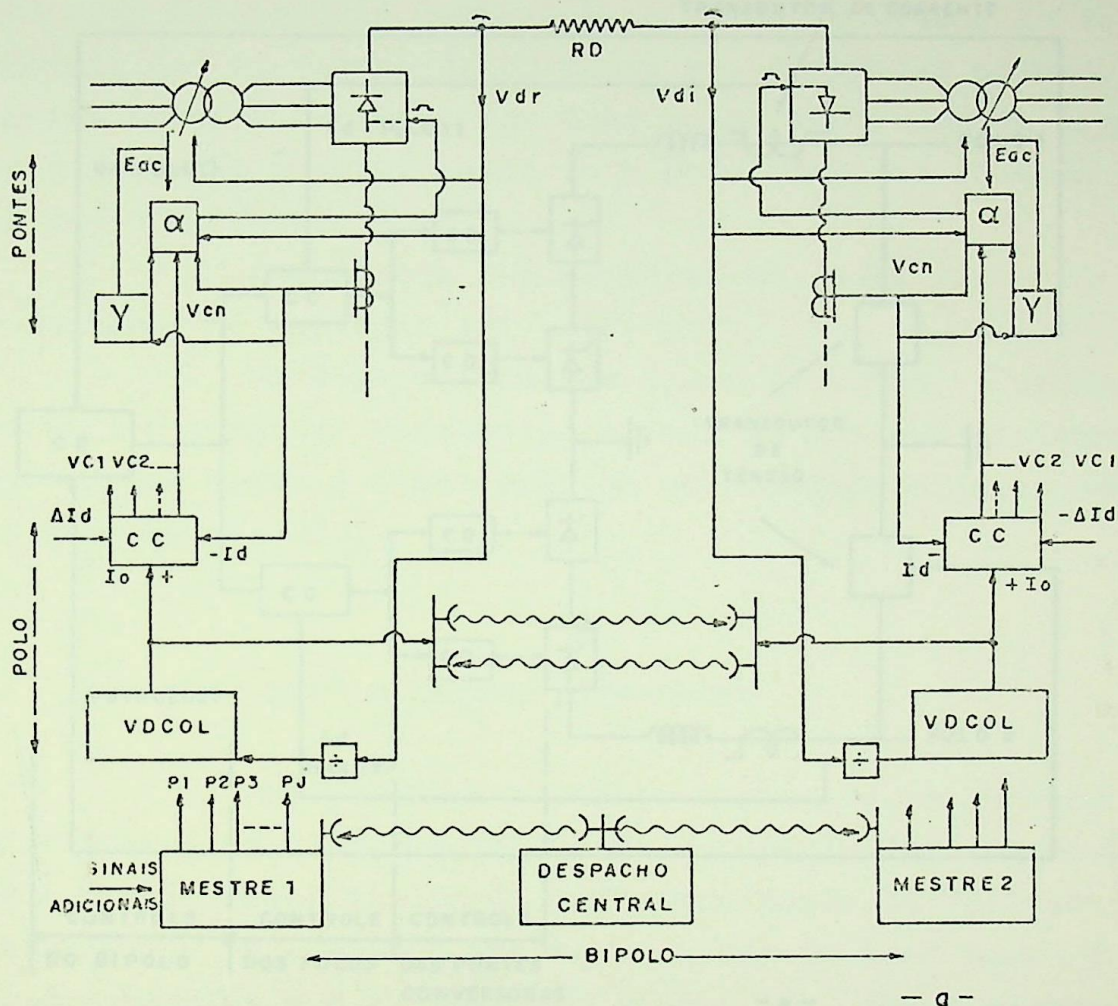


FIGURA 1.3 - Diagrama esquemático em bloco do sistema de controle

a - Estrutura do controle para as duas estações: retificadora e inversora respectivamente.

Na figura 1.3-a-, tem-se:

α - controle do ângulo de disparo α

γ - controle do ângulo de extinção γ

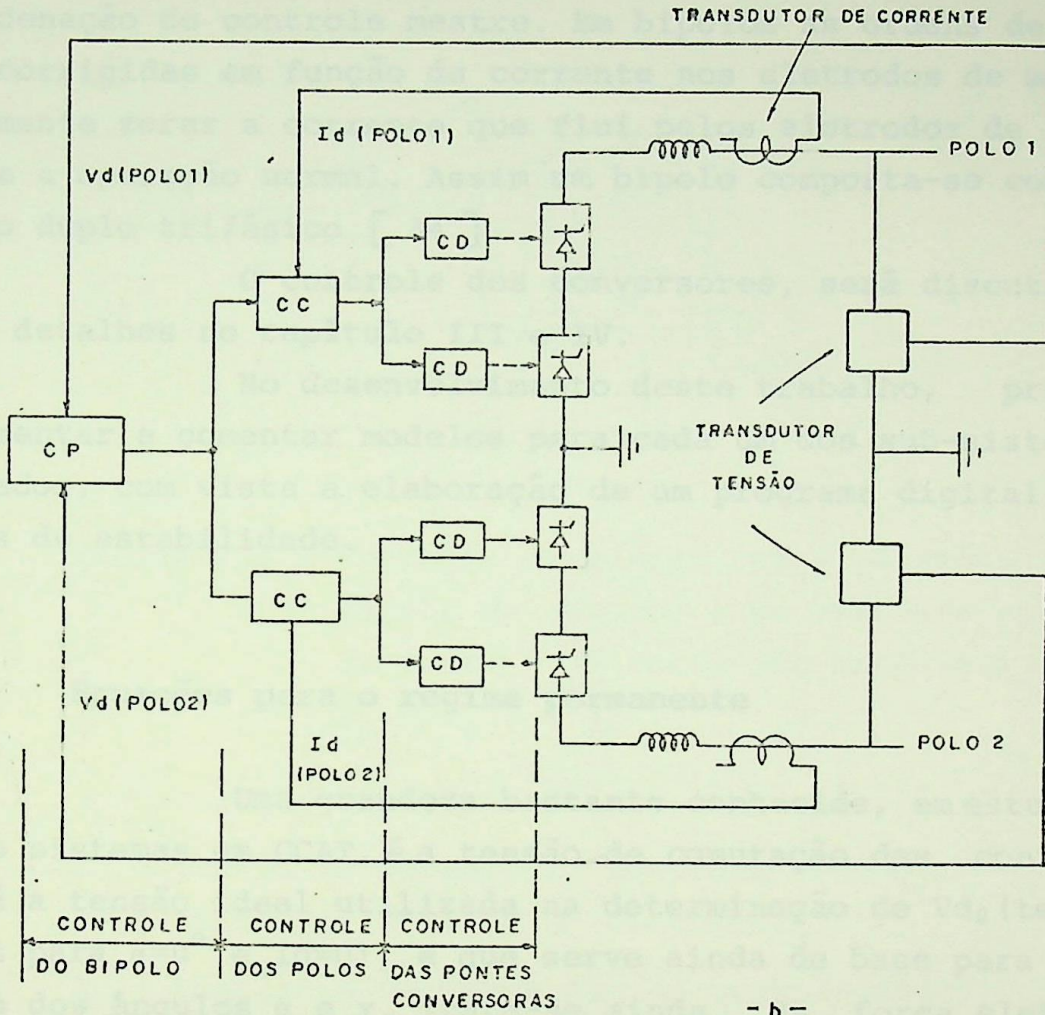


FIGURA 1.3 - Diagrama esquemático em bloco do sistema de controle

b - Estrutura simplificada do controle, somente para uma estação conversora.

Ao "controle mestre" cabe o comando geral do elo DC, regulando o fluxo de energia e processando os sinais adicionais destinados à estabilização e/ou controle de frequência dos sistemas AC associados.

O controle dos polos é o nível operacional do elo DC. Cada polo é controlado independentemente dos demais, sob a coordenação do controle mestre. Em bipolos as ordens de corrente são corrigidas em função da corrente nos eletrodos de modo a praticamente zerar a corrente que flui pelos eletrodos de terra durante a operação normal. Assim um bipolo comporta-se como um circuito duplo trifásico [34].

O controle dos conversores, será discutido com mais detalhes no capítulo III e IV.

No desenvolvimento deste trabalho, pretende-se apresentar e comentar modelos para cada um dos sub-sistemas mencionados, com vista a elaboração de um programa digital para estudos de estabilidade.

1.2 Equações para o regime permanente

Uma grandeza bastante conhecida, em estudos envolvendo sistemas em CCAT, é a tensão de comutação das conversoras, que é a tensão ideal utilizada na determinação de V_{d0} (tensão contínua para $\alpha=0^\circ$ e $I_d=0$), e que serve ainda de base para a definição dos ângulos α e γ . Trata-se ainda, da força eletromotriz que comanda o processo de comutação entre válvulas durante o funcionamento das conversoras. Neste caso a própria tensão da barra de alimentação, considerando-se conversores ligados diretamente a uma fonte ideal de tensão (barra infinita). É importante notar que o termo "ideal", acima citado, refere-se a forma puramente senoidal, sem distorções da tensão, mesmo considerando-se o conceito de tensão equivalente thevenin, para efeito de queda de tensão na frequência fundamental. Será portanto a tensão equivalente thevenin vista da barra AC do conversor, considerados os efeitos de outras cargas e fontes nas vizinhanças. Seu posicionamento é crucial para a determinação das reatâncias de comutação (X_c) e dos tempos de desionização ou extinção.

Na figura 1.4, desprezando-se a queda de tensão através das reatâncias durante a comutação, tem-se $E = E_s$.

A reatância X_c , a qual determina a corrente na fase da comutação, é constituída de duas partes. Uma parte X_t , que é individual para cada conversor, e caracterizada principalmente pela reatância do transformador, mas pode incluir outros elementos, como o reator de alisamento da válvula.

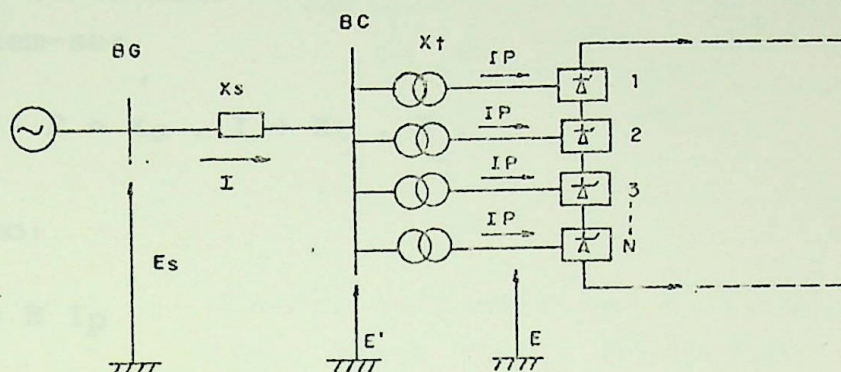


FIGURA 1.4 - Conexão de pontes com N válvulas com igual ângulo de disparo a um circuito com tensão da fonte E_s e reatância de fase X_s : $E = E_s$; $X_c = X_t + N X_s$

Onde na figura 1.4

- E → Tensão no secundário do transformador;
- X_s → Reatância de fase do circuito;
- X_c → Reatância de dispersão de transformador;
- I → Corrente do circuito de suprimento de energia;
- I_p → Corrente nos transformadores;
- BC → Barra de comutação;
- BG → Barra do gerador;
- E_s → Tensão de saída do gerador;
- E' → Tensão no primário do transformador.

A reatância do circuito X_s é comum para todas as pontes e, onde existem N pontes com igual ângulo de disparo, a reatância do circuito é multiplicada pelo número N e desta forma será parte da reatância X_c [3]. Como a comutação se processa em fração de um ciclo, a reatância subtransitória do gerador deve ser usada.

Da figura 1.4, considerando-se a queda de tensão através das reatâncias tem-se:

$$E' - E = X_t \cdot I_p \quad (I)$$

$$E' = E_s - X_s \cdot I \quad (II)$$

de: (I) e (II)

obtem-se:

$$E_s - E = X_s \cdot I + X_t \cdot I$$

como:

$$I = N I_p$$

logo:

$$E_s - E = X_s \cdot N I_p + X_t \cdot I_p$$

$$\frac{E_s - E}{I_p} = N X_s + X_t$$

$$Z = N X_s + X_t$$

onde Z: Impedância do circuito, até as pontes conversoras.

Por definição a reatância de comutação (X_C), é a reatância que vai da ponte conversora, até o primeiro ponto onde a tensão pode ser considerada senoidal [3]. Logo, neste caso:

$$X_C = Z$$

portanto:

$$X_C = X_t + N \cdot X_s$$

Note que, como não existem filtros na barra de comutação (BC) da figura 1.4, a reatância de comutação inclui a reatância do circuito, até a barra do gerador (BC), onde a tensão pode ser considerada senoidal.

Na figura 1.5, existem duas fontes de tensão no circuito, uma das quais poderia ser, por exemplo, um compensador síncrono para o suprimento de reativos.

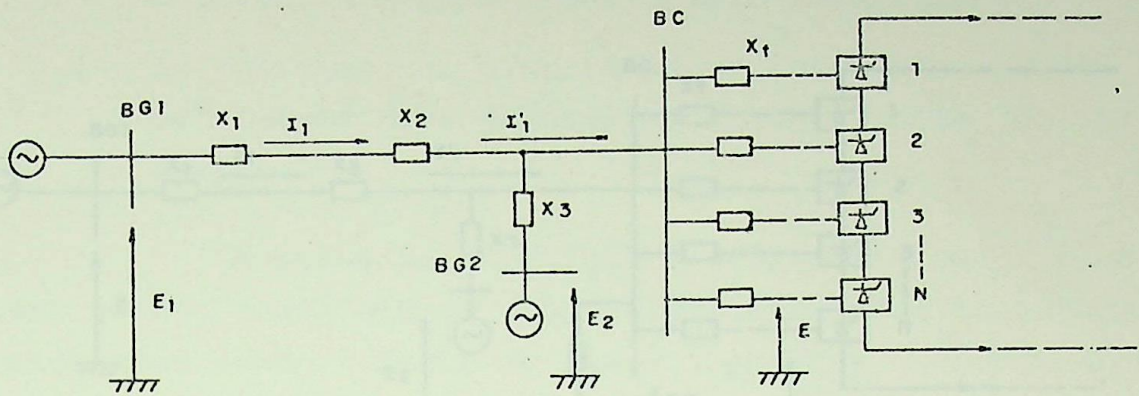


FIGURA 1.5 - Conexão de pontes com N válvulas, operando com o mesmo ângulo de disparo, à um circuito com duas fontes de tensão E_1 e E_2 com corrente de carga I_1 .

Onde na figura 1.5, tem-se:

E - tensão no secundário do transformador.

Da figura 1.5, pode-se obter a fonte equivalente de thevenin para a barra de comutação (BC), a qual é dada por:

$$E_{TH} = E_1 \cdot \frac{X_3}{X_1 + X_2 + X_3} + E_2 \cdot \frac{X_1 + X_2}{X_1 + X_2 + X_3}$$

A tensão no secundário do transformador, é dada por:

$$E = E_{TH} - j I_1 \cdot \frac{X_1 \cdot X_3}{X_1 + X_2 + X_3}$$

Logo, neste caso, a reatância de comutação será:

$$X_C = X_t + N \cdot \frac{(X_1 + X_2) X_3}{X_1 + X_2 + X_3}$$

Na figura 1.6, o circuito mostrado na figura 1.5 é complementado com filtros, localizados na barra de comutação (BC), e considerados bem dimensionados para absorção dos componentes harmônicos característicos. Neste caso a reatância de fase do circuito, deixa de ter influência na comutação, pois a tensão pode ser considerada senoidal na barra em questão. Por conseguinte a reatância de comutação será influenciada unicamente pe

la reatância de dispersão do transformador (X_t), logo $X_c = X_t$.

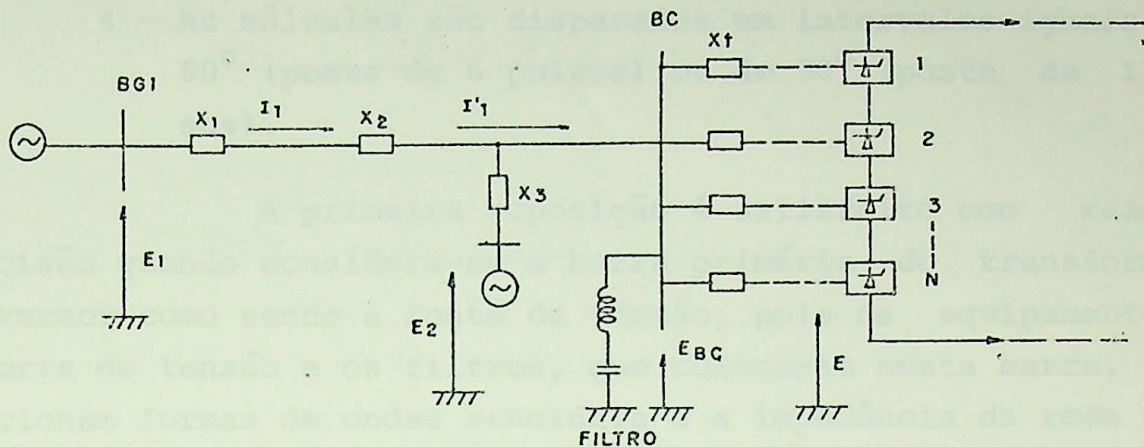


FIGURA 1.6 - Como a figura 1.5, mas com a inclusão de filtros na barra de comutação BC.

Onde na figura 1.6, tem-se:

EBC - Tensão na barra de comutação.

O desenvolvimento das equações matemáticas correspondentes a ligação em corrente contínua em regime permanente, é bastante longo, todavia, a literatura técnica [2,3], mostra com certo grau de detalhes tal desenvolvimento. Neste trabalho utilizou-se as equações já desenvolvidas [2,3], tendo-se o cuidado de comentar as hipóteses e limitações impostas no seu estabelecimento.

Como as grandezas associadas as redes de corrente alternada são tratadas apenas em valor eficaz (RMS), as equações para o regime permanente são também utilizadas na simulação dinâmica do sistema em corrente contínua.

As equações que regem o comportamento da transmissão em corrente contínua em regime permanente, são baseados nas seguintes suposições [2]:

- 1 - Fonte de tensão alternada equilibrada e senoidal em série com a rede representada por indutâncias também equilibradas;
- 2 - Reator de alisamento ("smoothing reactor") com indutância suficiente para que a corrente na linha DC seja constante e sem ondulação ("ripple");

- 3 - As válvulas apresentam resistência nula quando diretamente polarizadas (queda de tensão interna nula) , e infinita quando inversamente polarizadas;
- 4 - As válvulas são disparadas em intervalos iguais de 60° (ponte de 6 pulsos) ou de 30° (ponte de 12 pulsos).

A primeira suposição é satisfeita com razoável precisão quando considera-se a barra primária do transformador conversor como sendo a fonte de tensão, pois os equipamentos de suporte de tensão e os filtros, que coloca-se nesta barra, proporcionam formas de ondas senoidais e a impedância da rede é pequena comparada à impedância do transformador da ponte conversora. Os desequilíbrios da rede AC não são considerados em estudos de estabilidade.

A ondulação na forma de onda da corrente contínua é desprezível, porém a indutância do reator de alisamento deve ser levada em consideração na modelagem do elo por limitar a taxa de variação da corrente contínua durante os transitórios ocasionados por faltas internas ou externas ao elo.

A terceira suposição é satisfeita quando levam-se em conta que a queda de tensão interna é da ordem de 0,12% por ponte de 6 pulsos (aproximadamente 0,6 Kv por polo no projeto de Itaipu). A corrente inversa é da ordem de miliamperes, portanto face a nominal do elo DC é desprezível.

A quarta hipótese é satisfeita apenas se a tensão do lado AC constituir um regime simétrico e equilibrado de tensões trifásicas. Caso contrário, os sistemas de controle do tipo "simétrico" apresentarão diferentes ângulos de ignição ou extinção entre válvulas da mesma ponte conversora e sistemas de controle do tipo "individual" apresentarão espaçamento entre disparos diferentes de 60° (ou 30°).

As equações básicas podem ser utilizadas na medida em que os estudos de fluxo de potência e estabilidade não levem em conta os desequilíbrios da tensão alternada.

A análise do circuito elétrico formado durante a comutação e a forma de onda da tensão no elo, também durante a comutação, permitem a dedução das equações listados a seguir [2]:

- 1 - Para o retificador

$$V_{dr} = V_{dor} \cdot \cos \alpha - \frac{3}{\pi} \cdot X_{cr} \cdot I_d \quad (1.1)$$

$$V_{dr} = \frac{V_{dor}}{2} (\cos\alpha + \cos\delta) \quad (1.2)$$

$$\delta = \alpha + \mu_r \quad (1.3)$$

$$R_{cr} = \frac{3}{\pi} X_{cr} \quad (1.4)$$

2 - Para o inversor

$$V_{di} = V_{doi} \cdot \cos\gamma - \frac{3}{\pi} \cdot X_{ci} \cdot I_d \quad (1.5)$$

$$V_{di} = - V_{doi} \cdot \cos\alpha_i + \frac{3}{\pi} \cdot X_{ci} \cdot I_d \quad (1.6)$$

$$V_{di} = \frac{V_{doi}}{2} (\cos\gamma + \cos\beta) \quad (1.7)$$

$$\beta = \gamma + \mu_i \quad (1.8)$$

$$R_{ci} = \frac{3}{\pi} \cdot X_{ci} \quad (1.9)$$

Onde:

V_{dr} = tensão contínua no retificador;

$$V_{dor} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{acr}$$

α = ângulo de ignição (ou disparo) das válvulas do reti
ficador;

X_{cr} = reatância de comutação, para o retificador;

R_{cr} = resistência equivalente de comutação para o retifi
cador;

I_d = corrente na linha de corrente contínua;

δ = ângulo de extinção das válvulas do retificador;

μ_r = ângulo de comutação das válvulas do retificador;

V_{di} = tensão contínua no inversor;

$$V_{doi} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{aci}$$

γ = ângulo de extinção das válvulas do inversor;

X_{ci} = reatância de comutação, para o inversor;

R_{ci} = resistência equivalente de comutação para o inver
sor;

α_i = ângulo de ignição (ou disparo) das válvulas do in
versor;

μ_i = ângulo de comutação das válvulas do inversor;
 β = ângulo do avanço das válvulas do inversor.

A figura 1.7 ilustra a relação entre os diversos ângulos nomeados.

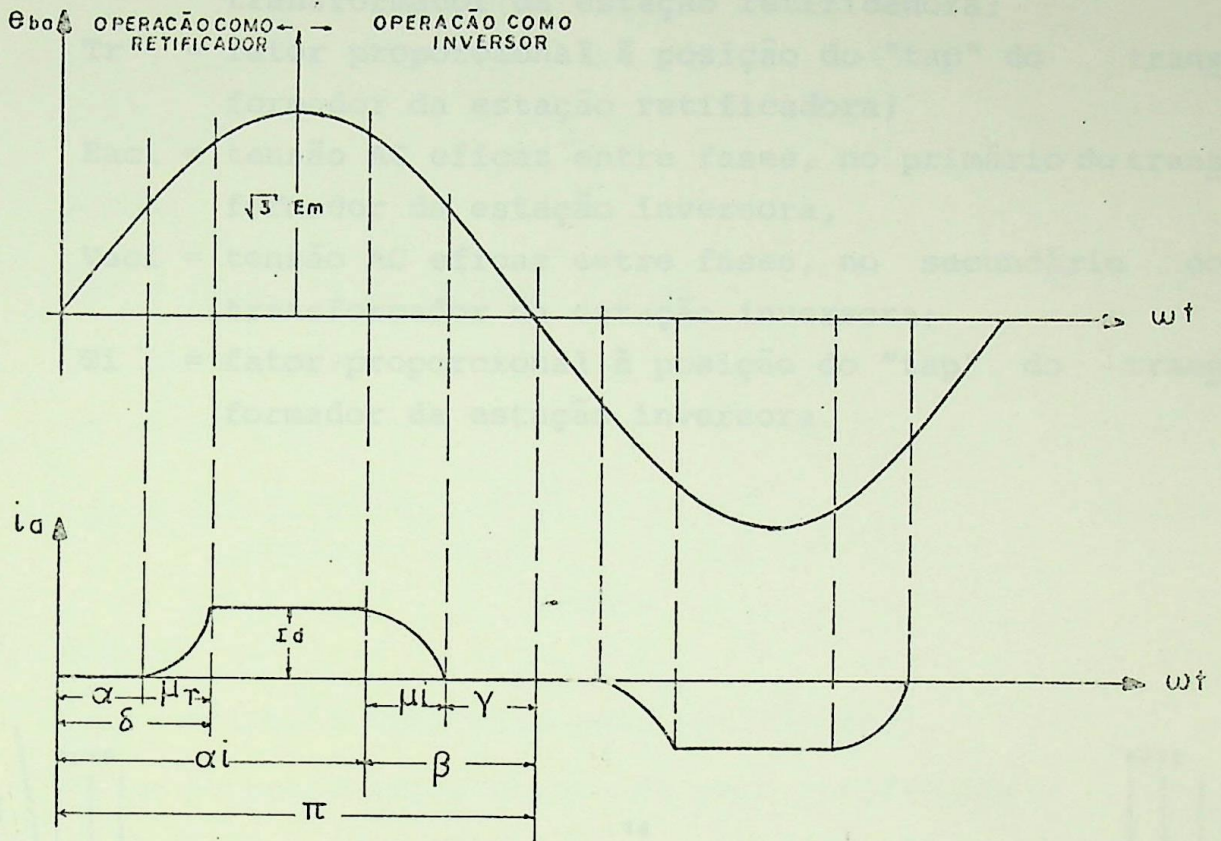


FIGURA 1.7 - Relação entre os diversos ângulos das pontes retificadora e inversora.

Em regime permanente, o elo deve ainda satisfazer à equação:

$$I_d = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_d} \quad (1.10)$$

Onde:

R_d : - resistência da linha de corrente contínua.

Admitindo que os lados primários do transformador (BPTR e BPTI na figura 1.8), sejam fontes de tensão senoidais e equilibradas, as tensões V_{dr} e V_{di} podem ser escritas como:

$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{acr} = K_r \cdot E_{acr} \cdot T_r \quad (1.11)$$

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{aci} = K_i \cdot E_{aci} \cdot T_i \quad (1.12)$$

Onde:

$$K_r = K_i = \frac{3\sqrt{2}}{\pi};$$

E_{acr} = tensão AC eficaz entre fases, no primário do transformador, da estação retificadora;

V_{acr} = tensão AC eficaz entre fases, no secundário do transformador da estação retificadora;

Tr = fator proporcional à posição do "tap" do transformador da estação retificadora;

E_{aci} = tensão AC eficaz entre fases, no primário do transformador da estação inversora,

V_{aci} = tensão AC eficaz entre fases, no secundário do transformador da estação inversora;

Ti = fator proporcional à posição do "tap" do transformador da estação inversora.

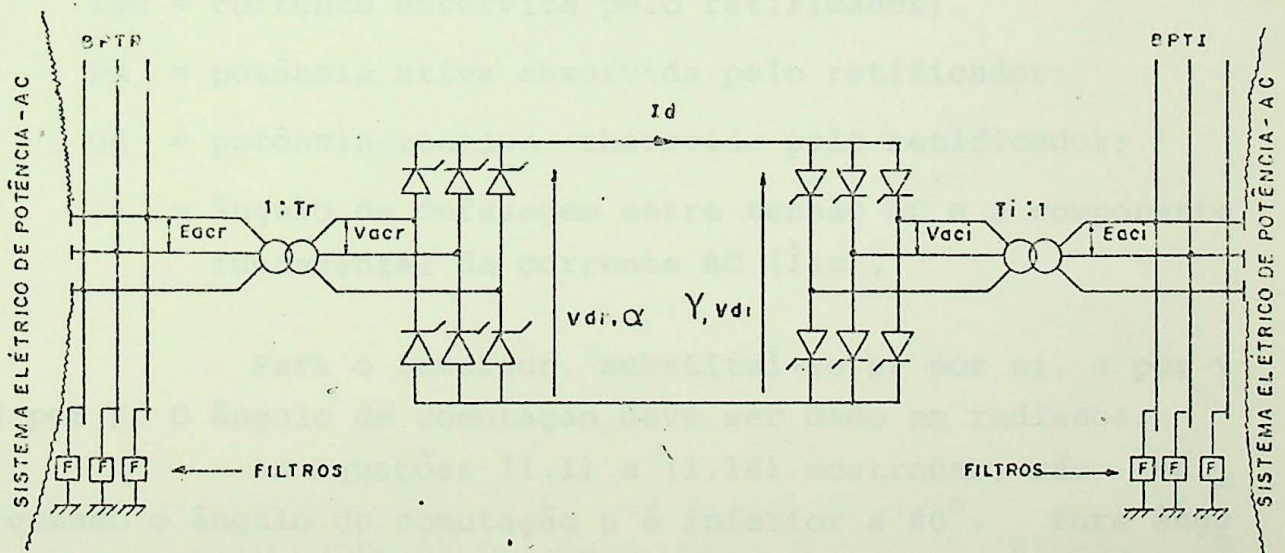


FIGURA 1.8 - Representação simplificada de um elo CC e sistema AC.

BPTR - barra primária do transformador retificador;

BPTI - barra primária do transformador inversor.

As relações exatas que relacionam as grandezas

alternadas (no primário do transformador) e contínuas no retificador [2] são:

$$|I_{ac}| \cdot \cos\phi_r = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d \cdot \frac{\cos\alpha + \cos\delta}{2} \quad (1.13)$$

$$|I_{ac}| \cdot \sin\phi_r = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d \cdot \frac{2\mu_r + \sin 2\alpha - \sin 2\delta}{4(\cos\alpha - \cos\delta)} \quad (1.14)$$

sendo:

$$\dot{I}_{ac} = |I_{ac}| \cdot \cos\phi - j |I_{ac}| \cdot \sin\phi \quad (1.15)$$

$$Q_d = P_d \cdot \operatorname{tg}\phi \quad (1.16)$$

$$P_d = V_d \cdot I_d \quad (1.17)$$

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{2\mu_r + \sin 2\alpha - \sin 2\delta}{\cos 2\alpha - \cos 2\delta} \quad (1.18)$$

onde:

$\dot{I}_{ac}$ = corrente absorvida pelo retificador;

P_d = potência ativa absorvida pelo retificador;

Q_d = potência reativa absorvida pelo retificador;

ϕ = ângulo de defasagem entre tensão AC e a componente fundamental da corrente AC ($\dot{I}_{ac}$).

Para o inversor, substitui-se μ_r por μ_i , α por γ e δ por β . O ângulo de comutação deve ser dado em radianos.

As equações (1.1) a (1.18) mostradas, são válidas quando o ângulo de comutação μ é inferior a 60° . Para ângulos de comutação superiores a 60° , as equações tornam-se bastante complexas [5], não tendo também grande sentido prático, introduzi-las nas simulações já que tais ângulos ocorrem apenas em situações anormais de operação das pontes: sobre-carga, curto-circuito DC (na linha DC) ou tensão no lado AC muito baixa, situação que normalmente resulta em falhas de comutações sucessivas.

As relações entre grandezas alternadas e contínuas podem ser grandemente simplificadas ao admitir-se, na equação (1.13) as seguintes aproximações, que levam a erros da ordem de 1,1% para ângulos de ignição inferiores a 30° [2]:

$$I_{ac} \cong \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d \quad (1.19)$$

$$\cos\phi_r = \frac{\cos\alpha + \cos\delta}{2} \quad (1.20)$$

Das equações (1.1), (1.2) e (1.11), tem-se:

$$V_{dor} \cdot \cos\alpha - \frac{3}{\pi} \cdot X_{cr} \cdot I_d = \frac{V_{dor}}{2} (\cos\alpha + \cos\delta)$$

logo:

$$\cos\alpha + \cos\delta = 2\cos\alpha - 2 \cdot \frac{3}{\pi} \cdot X_{cr} \cdot \frac{I_d}{V_{dor}}$$

$$\cos\delta = \cos\alpha - \frac{2 R_{cr} I_d}{3\sqrt{2} \cdot E_{acr} \cdot Tr}$$

$$\cos\delta = \cos\alpha - \frac{2\pi}{3\sqrt{2}} \cdot \frac{R_{cr} \cdot I_d}{E_{acr} \cdot Tr} \quad (1.21)$$

$$\delta = \arccos \left[\cos\alpha - K \cdot \frac{R_{cr} \cdot I_d}{E_{acr} \cdot Tr} \right]$$

onde:

$$K = \frac{2\pi}{3\sqrt{2}}$$

A potência ativa na barra ligada ao primário do transformador da conversora, pode ser escrita:

$$P_{ac} = S_{ac} \cdot \cos\phi = 3 \cdot U_{ac} \cdot I_{ac} \cdot \cos\phi = V_{dr} \cdot I_d$$

onde: U_{ac} - tensão alternada fase-neutro eficaz

sendo:

$$S = 3 \cdot U_{ac} \cdot I_{ac}$$

considerando que:

$$I_{ac} \cong \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d, \text{ tem-se:}$$

$$S = 3 \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_{acr} \cdot I_d = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{acr} \cdot I_d$$

como $\sqrt{3} \cdot U_{ac} = V_{ac}$ (tensão alternada fase-fase eficaz):

$$S = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{acr} \cdot I_d$$

ou

$$S = V_{dor} \cdot I_d \quad (1.22)$$

Uma vez calculada as potências ativas e aparente ou a potência aparente e o fator de potência, fica fácil calcular a potência reativa:

$$Q = V_{dor} \cdot I_d \cdot \sin\phi_r$$

onde:

$$\sin\phi_r = \frac{2\mu_r + \sin 2\alpha - \sin 2\delta}{4(\cos\alpha - \cos\delta)}$$

$$\mu_r = \delta - \alpha$$

Para o inversor, trocam-se os índices (r) por (i), α por γ e δ por β .

CAPITULO II

CONTROLE PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

2.1 Introdução

Neste capítulo, discute-se o modo de controle, normalmente, utilizado nas transmissões em corrente contínua sob condições normais [2]. Este controle, no entanto, não é usado somente para a transmissão normal de energia em corrente contínua, mas também, para eliminar faltas nas pontes conversoras e na linha de transmissão.

Neste capítulo, discute-se, também, os sinais adicionais, provenientes da rede AC, que são utilizados pelo controle, com a finalidade de melhorar a estabilidade transitória dos sistemas AC. Mostra-se ainda a relação existente entre o controle e a proteção.

2.2 Meios Básicos de Controle

Das equações (1.1), (1.5) e (1.10), pode-se escrever:

$$V_{dr} = V_{dor} \cdot \cos\alpha - R_{cr} \cdot I_d$$

$$V_{di} = V_{doi} \cdot \cos\gamma - R_{ci} \cdot I_d$$

$$I_d = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_d}$$

$$I_d \cdot R_{dc} = V_{dor} \cdot \cos\alpha - R_{cr} \cdot I_d - (V_{doi} \cos\gamma - R_{ci} I_d)$$

$$I_d \cdot R_{dc} = V_{dor} \cos\alpha - V_{doi} \cos\gamma - (R_{cr} - R_{ci}) I_d$$

$$(R_{dc} + R_{cr} - R_{ci}) I_d = V_{dor} \cos\alpha - V_{doi} \cos\gamma$$

$$I_d = \frac{V_{dor} \cos \alpha - V_{doi} \cos \gamma}{R_d + R_{cr} - R_{ci}} \quad (2.1)$$

onde:

$$R_{cr} = \frac{3}{\pi} \cdot X_{cr} \rightarrow \text{Resistência equivalente de comutação do retificador;}$$

$$R_{ci} = \frac{3}{\pi} \cdot X_{ci} \rightarrow \text{Resistência equivalente de comutação do inversor.}$$

A equação (2.1) mostra que na prática o I_d pode ser controlado através da variação dos ângulos de disparo e extinção das válvulas ou através da variação das tensões V_{dor} e V_{doi} pela alteração na posição dos "taps" dos transformadores das pontes conversoras.

Quanto ao problema da velocidade de controle, enquanto que, variações de α ou γ tomariam tempos da ordem de 1 a 10 [ms], a mudança de taps toma tempos da ordem de 5 a 6 segundos por estágio [30]. Embora a existência desta diferença nos tempos de resposta, os dois métodos são utilizados em conjunto. O controle de ignição é inicialmente utilizado para uma ação rápida a qual é seguido por variações de tap, isto é feito para que os valores do ângulo de disparo (α) e da tensão (no inversor) retornem aos valores normais.

Pela rapidez que altera-se os valores de α e γ , o controle básico da ligação em corrente contínua, é exercido pelo controle de disparo, que comanda a ignição, ou indiretamente, a extinção das válvulas. A corrente que circula na linha CC é mantida constante através de "reguladores de corrente", que atuam coordenadamente sobre os ângulos de ignição das válvulas conversoras.

O sistema de controle para um sistema de transmissão em corrente contínua deverá apresentar as seguintes características [2,5] :

- 1 - Limitar a corrente máxima ($I_{d\max}$), deste modo evitar os danos nas válvulas e outros dispositivos;
- 2 - Limitar as flutuações da corrente (I_d) quando da ocorrência de flutuações na tensão (AC) de alimentação;

- 3 - Conservar fator de potência tão alto quanto possível;
- 4 - Evitar falhas de comutação no inversor;
- 5 - Assegurar suficiente tensão direta nos terminais da válvula para garantir seu disparo.

Uma forma segura de obter-se o disparo simultâneo dos tiristores em série que compõem a válvula, é retardar o disparo dos mesmos até que certo nível de tensão direta, nos seus terminais, seja atingido. Esse retardo implica em valores mínimos do ângulo α , os quais normalmente são da ordem de 5° a 7° . A operação nestes limites é dita de modo de operação a "Ângulo de Ignição Constante" ("Controle de Ângulo de Ignição Constante - CIA").

De modo a evitar flutuações na corrente (I_d), é necessário que, em regime permanente, o ângulo de ignição da ponte retificadora permaneça bem acima dos valores mínimos. Essa condição porém, se opõe a condição de alto fator de potência, que exige valor pequeno do ângulo de disparo. Uma solução de compromisso é atingida mantendo-se o ângulo de disparo entre limites definidos (por exemplo: entre 12.5° e 17.5° no elo de Itaipu), através do controle de "tap" do transformador da retificadora.

Também para o inversor as exigências de máximo fator de potência e baixo risco de falhas de comutação se opõem. Para maximizar o fator de potência, o ângulo de extinção deve ser o menor possível. No entanto, os riscos de falha de comutação levam a valores mínimos de ângulo de extinção entre 16° e 18° , sendo cerca de 7° necessários para que a válvula readquira sua capacidade de bloqueio e 10° referentes a margens de segurança, por este motivo, procura-se manter o ângulo de extinção constante e igual ao valor mínimo em qualquer regime de operação, caracterizando o controle tipo "Ângulo de Extinção Constante" ("Controle do Ângulo de Extinção Constante - CEA") na inversora.

Ainda com a finalidade de limitar as flutuações da corrente em consequência de flutuações da tensão alternada, o inversor também recebe um regulador de corrente, que só entra em operação quando a ordem de corrente do retificador excede a corrente na linha, isto é, quando o controle de corrente do retificador tenta manter a ordem recebida e o ângulo α ultrapassa o limite mínimo.

A forma básica de operação dos reguladores de corrente do retificador e inversor (CCr e CCI), é caracterizada por:

Se o valor medido de I_d é menor que a corrente de comando (ordem de corrente), o regulador atua no sistema de geração de pulsos, fazendo com que os mesmos reduzam o ângulo de ignição (α). Com a diminuição do ângulo (α), a tensão do retificador (V_{dr}) aumentará e em consequência a corrente I_d também aumentará, até atingir um valor igual ao de comando ou de referência. Se a corrente medida é maior que a de comando, o efeito do regulador é de aumentar α , desta forma diminuindo V_{dr} e a corrente na linha seria reduzida até o valor da corrente de comando.

A característica da tensão do inversor (V_{di}), pode ser modificada por meio da mudança de tap do transformador conectado ao inversor, ou através de variações do ângulo γ , quando o inversor controla a corrente na linha. Tão logo a mudança de taps seja efetuada o CEA retorna γ ao valor desejado. Obviamente qualquer mudança em V_{doi} , tende a modificar a corrente I_d na linha, porém devido a ação do CCR a corrente é rapidamente retornada ao valor desejado. Os reatores DC colocados junto ao retificador e inversor impedem rápidas variações de I_d , isto facilita a operação dos reguladores de corrente.

De um modo geral, em regime permanente, pode-se dizer que o retificador controla a corrente e o inversor controla a tensão na linha DC.

A corrente de referência para o inversor é denotada por I_{do2} , neste trabalho, enquanto que a referência para o retificador é denominada I_{do1} . A diferença entre as correntes de comando do retificador e inversor é chamada "margem de corrente" a qual é normalmente representada por ΔI_d . O valor de ΔI_d é de 10 a 15% da corrente nominal (I_{dn}), porém a tendência é diminuir tal valor. Esta faixa de valores é devido a eventuais erros dos aparelhos de medição e de controle.

De modo a evitar erros de operação, quando os valores da "corrente de referência" forem alterados, o procedimento a ser executado será:

- 1 - Para aumentar a ordem de corrente, primeiro deve-se aumentar a ordem de corrente do retificador e posteriormente a do inversor;
- 2 - Para diminuir a ordem de corrente, primeiro deve-se reduzir a ordem de corrente do inversor e posteriormente a do retificador.

A figura 2.1 mostra a característica estática de um elo com controle de corrente constante nas pontes retificadora e inversora (CCr e CCI), ângulo de ignição constante na retificadora (CIAr) e ângulo de extinção constante na inversora (CEAi).

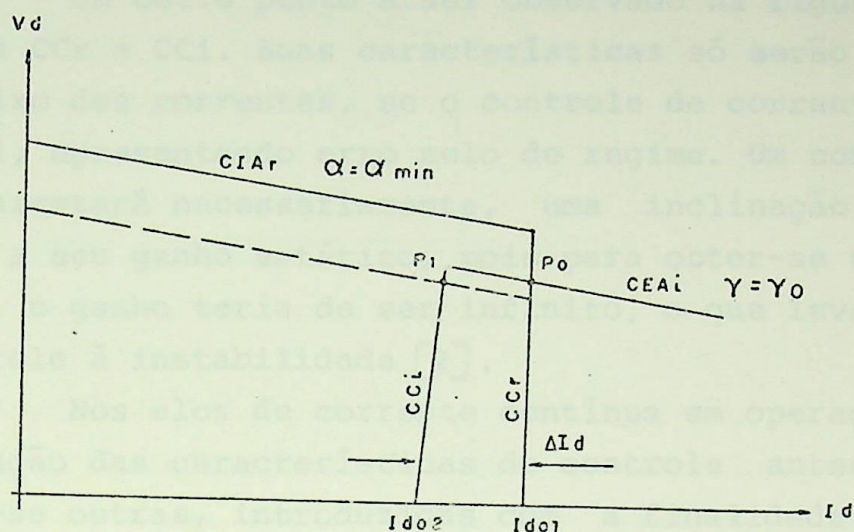


FIGURA 2.1 - Característica Estática Básica

Da figura 2.1, algumas observações podem ser obtidas:

- 1 - CIAr - Controle do "Ângulo de Ignição Constante" - o qual é responsável pelo segmento "quase horizontal" da característica de controle de um retificador;
- 2 - CCI e CCr - Controle de Corrente Constante - responsável pelo segmento "quase vertical";
- 3 - CEAi - Controle do "Ângulo de Extinção Constante" - responsável pelo segmento "quase horizontal" de um conversor operando como inversor.

Os pontos estáveis de operação do elo com as características mostradas, são definidos pelas interseções das características CCr e CEAi ou CIAr e CCI (por exemplo P_0 e P_1 na figura 2.1). Se a referência de corrente do retificador I_{d01} for reduzida a um valor inferior a referência da inversora, I_{d02} , não haverá ponto de cruzamento possível entre as características da retificadora e da inversora, e ambos os reguladores de corrente tentarão, simultaneamente, controlar a corrente na linha DC. Na estação inversora, o regulador de corrente atuará no sentido de reduzir a tensão V_{di} através da redução de α_i (ou aumento de γ), de modo a aumentar a corrente na linha DC. O regulador de corren

te também atuará no sentido de reduzir a tensão V_{dr} (através do aumento de α), para evitar o crescimento da corrente provocado pela diminuição de V_{di} e, em consequência, rapidamente as tensões V_{dr} e V_{di} irão a zero, provocando o colapso da transmissão [36].

Um outro ponto a ser observado na figura 2.1 é com relação a CCr e CCi . Suas características só serão perpendiculares ao eixo das correntes, se o controle de corrente for do tipo integral, apresentando erro nulo de regime. Um controle proporcional acarretará necessariamente, uma inclinação reduzida proporcional a seu ganho estático, pois para obter-se uma inclinação de 90° , o ganho teria de ser infinito, o que levaria o sistema de controle à instabilidade [2].

Nos elos de corrente contínua em operação, além da implementação das características de controle antes mencionadas encontra-se outras, introduzidas com a finalidade de melhorar o desempenho dinâmico, quando da ocorrência de perturbações internas ou externas ao elo, ou ainda proteger as válvulas das estações conversoras. É o caso do controle à "Ângulo de Ignição Constante", aplicado a inversora ($CIAi$), que tem a finalidade de limitar a um valor mínimo o ângulo de disparo das válvulas da estação inversora. Apesar de semelhante ao controle $CIAr$, este controle apresenta outras funções, como evitar que a inversora torne-se retificadora, ou tenha seu ângulo maior que 90° , face a ocorrência de faltas na linha de corrente contínua [16].

Uma modificação da característica estática básica da inversora é introduzida pelo "Controle do Erro de Corrente" ("current error control" - CEC) [6].

Quando a resistência equivalente de comutação da inversora excede a resistência da linha de corrente contínua, as características da retificadora e da inversora podem apresentar mais de um ponto de cruzamento, como indicado na figura 2.2, provocando instabilidade de controle da ligação CCAT conhecida como "three point cross-over instability" [7].

O controle do erro de corrente modifica a característica estática da inversora no intervalo definido pela margem de corrente, como se indica na figura 2.3, eliminando o problema.

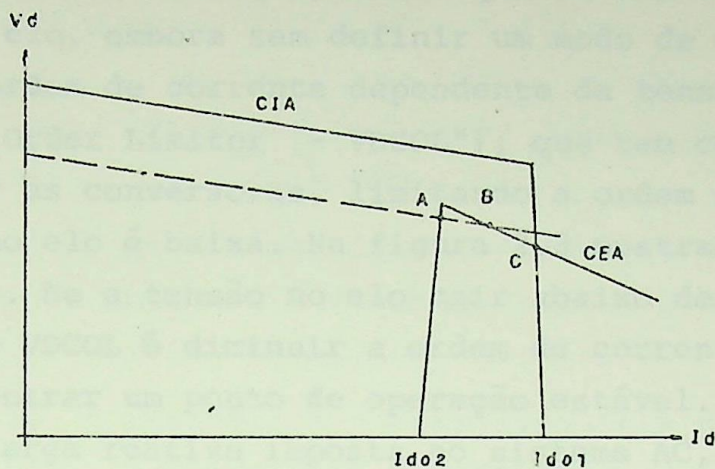


FIGURA 2.2 - Múltiplos cruzamentos entre as características estáticas da retificadora e inversora

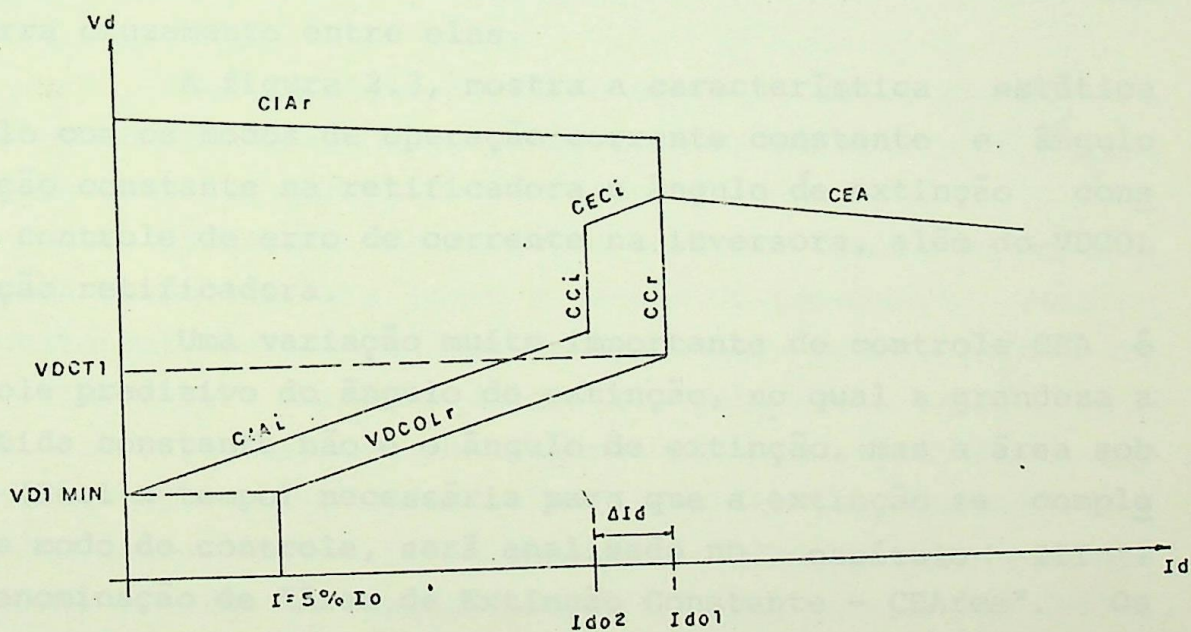


FIGURA 2.3 - Característica estática composta de CIA, CC e VDCOL na Retificadora e CIA, CC e CEA na inversora. I_0 - corrente nominal do elo; $VDC1$ - tensão mínima para manter I_{do1} ; $VD1 MIN$ - tensão mínima para desligamento do elo.

Um equipamento que altera a característica estática do elo, embora sem definir um modo de controle, é o limitador da ordem de corrente dependente da tensão ("Voltage Dependent Current Order Limiter - VDCOL"), que tem como função primordial proteger as conversoras, limitando a ordem de corrente quando a tensão no elo é baixa. Na figura 2.3 mostra-se a característica do VDCOL. Se a tensão no elo cair abaixo de $VDCT_1$. A função do controle VDCOL é diminuir a ordem de corrente progressivamente, até encontrar um ponto de operação estável. Esta atitude visa aliviar a carga reativa imposta ao sistema AC, quando a tensão encontra-se muito baixa, além de servir como proteção do equipamento conversor. Se a tensão DC for menor que VD_{1MIN} ou $I_d < 5\%$ da corrente nominal, o elo automaticamente, será desenergizado [17].

O VDCOL pode ser incluído em ambas as estações conversoras, ou apenas na retificadora, neste caso deve-se ter o cuidado de manter o ângulo mínimo de ignição da inversora (característica CIAi), sempre acima da característica do VDCOL, sem que ocorra cruzamento entre elas.

A figura 2.3, mostra a característica estática de um elo com os modos de operação corrente constante e ângulo de ignição constante na retificadora e ângulo de extinção constante e controle de erro de corrente na inversora, além do VDCOL na estação retificadora.

Uma variação muito importante de controle CEA é o controle preditivo do ângulo de extinção, no qual a grandeza a ser mantida constante não é o ângulo de extinção, mas a área sob a curva ($E_{aci} \times \text{tempo}$) necessária para que a extinção se complete. Este modo de controle, será analisado no capítulo III, com a denominação de "Área de Extinção Constante - CEArea". Os controles CEA e CEArea têm características estáticas iguais, porém apresentam diferenças no comportamento dinâmico da conversora.

2.3 Características da corrente de referência dos reguladores de corrente.

Conforme mencionado anteriormente, os reguladores de corrente atuam no sentido de igualar a corrente da linha

DC (I_d), a um valor de referência, denominado ordem de corrente ou corrente de referência para o elo de corrente contínua.

De uma forma geral o valor da corrente de referência é estabelecida a partir de três sinais de entradas em um comparador. Estes sinais são:

- i - P_0 - Potência definida pelo centro de despacho de carga (CDC). Este valor poderá ser estabelecido de forma manual ou automática.
- ii - frequência - correspondente a um sinal proporcional à frequência proveniente do lado AC, do elo DC.
- iii - Amortecimento - de modo a contribuir para uma melhoria da estabilidade transitória dos sistemas AC.

Os três itens anteriores serão discutidos em maiores detalhes nas seções seguintes.

2.4 Potência de Controle (P_0) [30]

Uma condição comum de operação de um elo DC, é de que o mesmo transmita um valor de potência fixada pelo Centro de Despacho de Carga (CDC).

Embora o controle com corrente constante aproxime-se desta característica (caso a tensão V_d permaneça praticamente constante), um controle de potência mais preciso, será efetuado, variando-se a corrente do elo DC, pois neste caso, pode-se compensar alterações na resistência do elo, variações na tensão do elo que provoquem mudanças nos taps dos transformadores, fazendo com que os mesmos ultrapassem seus limites. Pode-se ainda compensar a saída de operação de um ou mais grupos de válvulas.

A potência definida pelo centro de despacho de cargas será representada por P_0 e será igual a potência de referência do elo, caso outros sinais (que afetem a potência de referência) não forem utilizados.

Uma vez definido o valor da potência de referência, o controle pode ser realizado por dois processos básicos: o primeiro, será medir a potência ativa do lado AC ou DC e compará-la com P_0 e efetuar a correção necessária no erro de potência. O segundo método consiste na utilização do sistema de controle com

corrente constante, que apresenta respostas mais rápidas, sendo possível a inclusão direta de limites para as correntes. Para este segundo método, o controle de potência vem unicamente complementá-lo, definindo o valor de sua corrente de referência (I_{do}). O valor de I_{do} é obtido utilizando-se P_0 e dividindo-se por V_d , que é a tensão medida no elo DC. Este valor de corrente é então utilizado em ambos os conversores do elo DC, isto é, para o retificador e inversor.

Para que tal informação seja transmitida simultaneamente, em um tempo bastante rápido, há a necessidade de um sistema de telecomunicações operando continuamente. Em muitas instalações ao invés de se enviar um sinal correspondente ao valor da corrente de referência pelo sistema de telecomunicações, tem-se a transmissão direta de um sinal proporcional a potência requerida. O motivo do uso destes últimos sistemas é que a potência de referência (P_0) varia mais lentamente que a corrente de referência (I_{do}) e como resultado o canal de telecomunicações pode ser mais simples.

Para a definição do valor de P_0 , utiliza-se não apenas o valor da potência definida pelo centro de despacho de carga, mas também, de sinais adicionais proporcionais a frequência e às variações dos ângulos de potência do sistema AC. Estes novos sinais são discutidos a seguir com mais detalhes.

2.5 Controle de Frequência

O controle de frequência de "um dos sistemas AC" utilizando-se de um elo DC, constitui uma importante característica da técnica de Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Contínua.

Em termos conceituais a frequência de um sistema AC é determinada pelo controle da potência de entrada das máquinas primárias (unidades geradoras). Se a frequência do sistema for baixa, as potências de entrada destas unidades são temporariamente aumentadas e o excesso de potência mecânica sobre a potência elétrica aumentará a velocidade das máquinas e consequentemente a frequência. O oposto ocorre no caso da frequência do sistema estar elevada.

Se a potência nominal de uma linha DC é da mesma ordem ou maior que a potência de geração do sistema AC, ao qual

o elo se encontra ligado, então a linha DC poderá contribuir para uma regulação da frequência daquele sistema AC.

De uma forma básica poder-se-ia imaginar o controle de frequência do sistema AC junto ao retificador ou junto ao inversor.

Um circuito para detecção de desvios da frequência (com relação a um valor de referência), é instalado junto ao terminal no qual se deseja controlar a frequência. Este sinal de erro é então utilizado para alterar o valor da potência de referência do elo DC. Deve-se considerar que um valor de frequência abaixo do normal deverá acionar um aumento do ângulo de avanço (β) ou diminuição de (α) se o conversor opera como inversor. Isto aumentará a potência recebida pelo sistema AC e em consequência aumentará a sua frequência. Se por outro lado a estação for caracterizada por um retificador, o aumento de sua frequência será conseguido as custas de um aumento de (α).

2.6 Amortecimento

Em adição aos sinais comentados nas duas seções precedentes é comum utilizar um terceiro sinal com a finalidade de melhorar a estabilidade transitória dos sistemas AC. Esta característica dos elos DC, tem sido explorada em muitas instalações existentes.

Um sistema de Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Contínua, tem uma importante propriedade que o destaca dos sistemas AC, que é seu rápido tempo de resposta, devido a ação do controle. Para ter-se uma idéia, um sistema DC típico, é capaz de alterar sua potência (de um valor correspondente a sua potência nominal), com um tempo de resposta da ordem de 50 [ms] (tempo de resposta da linha DC mais 20 [ms] de atraso normal, nos canais de telecomunicações). Esta ordem de tempo é sem dúvida muito mais rápida que a ação dos controles nos campos dos geradores ou das turbinas.

Os sinais utilizados, para melhorar as condições de estabilidade, são obtidos a partir da medição de frequências ou da diferença entre os ângulos das barras. O uso destes sinais, está baseado no fato que, perturbações em grandes sistemas AC, causam oscilações da frequência, em torno do valor síncrono, bem co

mo, oscilações dos ângulos de potência (δ) entre as várias máquinas síncronas do sistema. A frequência natural das oscilações de δ é da ordem de 1 [Hz] exceto onde tem-se interconexões de dois grandes sistemas AC, através de um elo de interligação de baixa capacidade de curto-circuito. Neste último caso, as oscilações estão em torno de 0,3 [Hz].

Os efeitos de amortecimento natural do sistema é causado principalmente pelos enrolamentos amortecedores das máquinas, os quais entretanto, contribuem muito pouco para amortecer oscilações da ordem de 1 [Hz] e muito menos aquelas da ordem de 0,3 [Hz].

Um elo DC pode oferecer excelente amortecimento, para as oscilações de frequência, devido a perturbações súbitas ou flutuações contínuas. Os sinais de controle para amortecimento das oscilações não afetam a potência da linha DC, durante o regime permanente, entretanto, durante as perturbações, há uma modulação da potência DC no sentido de amenizar a perturbação.

O valor da potência DC utilizada para a modulação, é normalmente bastante baixa e praticamente não afeta a operação normal, mesmo para os casos de flutuações contínuas da carga.

Após as considerações feitas nas seções 2.4, 2.5 e nesta, conclui-se que é possível adicionar todos os sinais descritos para o controle do sistema DC. De uma forma geral os sinais tendem a operar individualmente, pois cada forma de controle responde a diferentes frequências, por exemplo:

- os controles para amortecimento respondem para uma faixa de 0,1 a 2 [Hz].
- os controles para frequência respondem para uma faixa de frequência de 0,01 a 0,2 [Hz].
- os controles operando com base no "Centro de Despacho de Carga - (CDC)", introduzem correções absolutas de frequência em minutos.

Para o funcionamento global do sistema de controle, não existem implicações se houver superposição para os diversos tipos de controle. Na verdade, a superposição quando bem projetada constituirá um ponto vantajoso.

Como qualquer elemento da rede elétrica, a ligação em corrente contínua está sujeita a faltas e defeitos, nos equipamentos de conversão (transformadores, conversores, reatores, etc.), ou na linha de corrente contínua, tornando necessário a existência de um sistema de proteção que minimize as consequências desses defeitos.

Com relação a proteção, a ligação em corrente contínua, tem uma característica importante, que é o sistema de controle, este pela influência que tem no elo DC e pela sua rapidez de ação, permite sua utilização como elemento integrante do sistema de proteção.

Normalmente, todo sistema de proteção, quando detecta uma falta, atua diretamente no controle da corrente, reduzindo-a a zero e em seguida retirando de operação o equipamento em falta. No caso de falta na linha DC, o procedimento é análogo. Por exemplo, para um curto-circuito na linha DC, a proteção age no sistema de controle do elo DC, de modo que este retarde o disparo das válvulas da retificadora, e, tão logo a corrente na linha torne-se nula, os pulsos de disparo das válvulas são bloqueados e os disjuntores dos transformadores das conversoras do lado AC são abertos, retirando de operação o polo afetado. O mesmo procedimento é seguido quando ocorrem defeitos nos conversores, mas nestes casos, a conversora em falta é isolada e o polo volta a operar rapidamente.

2.8 - Falhas de Operação

Nesta seção, dar-se-ão noções de alguns tipos de falhas mais comuns, que ocorrem na Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Contínua. Uma análise mais profunda sobre este assunto, foge do objetivo deste trabalho, mas pode ser encontrada, na referência [2].

Existem basicamente três tipos de falhas de operação, para pontes operando com tiristores, que podem ser classificados da seguinte maneira:

- falhas de disparo;
- falha de comutação;
- disparo antecipado.

Para melhor entendimento, a análise será feita de acordo com o tipo de operação da ponte conversora, isto é:

- operação como retificadora;
- operação como inversora.

Para operação da ponte como "retificadora", somente tem sentido falar em falha de disparo e disparo antecipado.

Quanto as falhas de comutação numa ponte retificadora, o que se pode dizer é que estas tem probabilidade reduzida de ocorrer. A maneira mais fácil de se explicar seria com base na equação $\alpha + \gamma + \mu = 180^\circ$. Se, para uma operação normal, $\alpha < 90^\circ$ e $\mu < 60^\circ$ [2], restariam então mais que 30° elétricos para que a válvula que estava apagando deixasse de conduzir. Conforme viu-se anteriormente o tempo correspondente a este ângulo elétrico é suficiente para que ocorra a desionização da válvula. Por isso, este tipo de falha não será analisado.

As principais causas para que aconteça uma falha de disparo são:

- ausência de pulsos para o disparo;
- "disparo antecipado", que pode ocorrer quando a ponte está operando com um ângulo de disparo muito pequeno e, por falha do sistema de controle, um dos pulsos é enviado antecipadamente, podendo acontecer que a tensão aplicada na válvula ainda não seja positiva ocasionando, com isto uma falha de disparo. Vale também a observação feita, para α muito próximo de zero.

De maneira simplificada, pode-se dizer que uma falha de disparo provoca um curto-circuito na ponte e inversão da tensão DC.

Para operação da ponte como "inversora", pode-se ter: falhas de disparo, disparo antecipado e falhas de comutação.

Na ocorrência de "Disparo antecipado", o que pode-se notar, é que a forma de onda da tensão DC será mais distorcida, e consequentemente harmônicos não característicos poderão aparecer.

A ocorrência de "Falha de disparo" no inversor, ocorre somente quando da ausência de pulsos para o disparo. Como consequência deste tipo de falha, ocorre um curto-circuito na ponte.

A ocorrência de "Falha de comutação" no inversor, é basicamente devido aos seguintes fatores:

- tempo de "desionização" insuficiente para válvula que es tá apagando;
- ausência ou diminuição da tensão para comutação, proveniente de, por exemplo, um curto-circuito no sistema AC próximo ao inversor;
- aumento da corrente na linha DC.

Como consequência deste tipo de falta, ocorre um curto-circuito na ponte.

Das faltas anteriormente citadas, a falha de comutação causada pela rede AC, na inversora, é o tipo de falta mais comum nos elos de corrente contínua e uma das mais severas, no que se refere a suas consequências para os sistemas de corrente alternada associados.

A consequência da falha de comutação, é que os terminais da linha DC ligados à conversora são curto-circuitados e a tensão contínua é levada à zero. Em consequência a transfe rência de potência do sistema de corrente contínua para o sistema de corrente alternada no inversor, cessa enquanto durar o curto-circuito. Transitoriamente a corrente no elo cresce, enquanto o controlador de corrente do retificador atua no sentido de manter a corrente no valor estabelecido pelo controlador principal ("Master Control") convenientemente modificada pelo VDCOL. A transfe rência de potência da rede de corrente alternada para o sistema de corrente contínua pelo retificador, não cessa, mas fica bas tante reduzida.

Se a falha de comutação for mantida, isto é, se ocorrerem falhas de comutação sucessivas, o período de condução das válvulas é estendido e o elo é retirado de operação pelo sis tema de proteção. Se as medidas tomadas pelos controles do inver sor forem adequadas e a rede ligada ao inversor suficientemente forte, a transmissão de energia pode se normalizar rapidamente.

As causas mais comuns da falha de comutação, são as quedas rápidas de tensão, causadas por curto-circuitos na re de AC, associada ao inversor. Também desequilíbrios da tensão AC ou distorções na sua forma de onda, ocasionadas por manobras na rede.

Como os programas digitais para estudos de estabilidade dão à rede trifásica uma representação monofásica, os efeitos de desequilíbrios e distorções da tensão na comutação não podem ser devidamente equacionados. No entanto, uma aproximação bastante razoável da falha de comutação será obtida oportunamente.

CAPÍTULO III

ESTRUTURAÇÃO DOS CONTROLES EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

3.1 Introdução

No capítulo anterior, foram mencionados alguns aspectos teóricos relacionados com o controle da conversão AC/DC/AC e suas principais características.

Neste capítulo, será apresentado alguns métodos e técnicas empregadas na implementação prática destes sistemas.

3.2 Controlador de disparo ("Firing Control") [8,9,30]

O Controlador de disparo é responsável pelas ações de controle que determinam os instantes de disparo das válvulas das pontes conversoras, de modo a manter constantes as grandezas controladas que caracterizam os modos de operação citados anteriormente.

Pela rapidez de atuação, o Controlador de disparo torna-se também de extrema valia na proteção do elo contra faltas internas, porém, a análise das possibilidades de proteção que ele oferece, não faz parte do objetivo deste trabalho.

Até recentemente [30], os controladores de disparo usados na transmissão de potência em Elos de Transmissão de Corrente Contínua, eram do tipo "Individual", onde o instante de disparo de cada válvula é determinado a partir do cruzamento por zero da tensão de comutação da válvula, isto é:

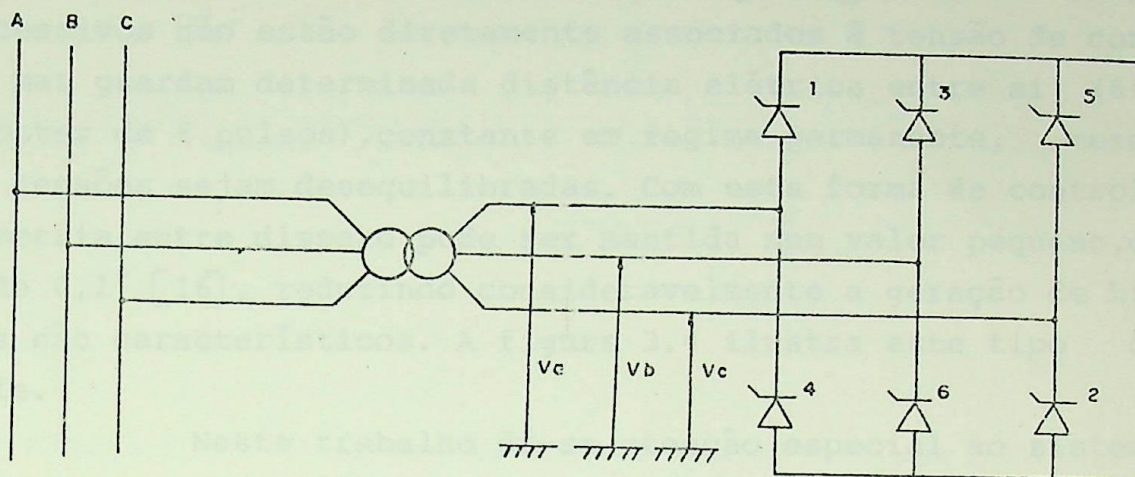
$$V_a = V_b, \dot{V}_b = V_c, V_c = V_a$$

Uma vez que para estes instantes as diferenças :

$$"V_a - V_b", "V_b - V_c" \quad "V_c - V_a"$$

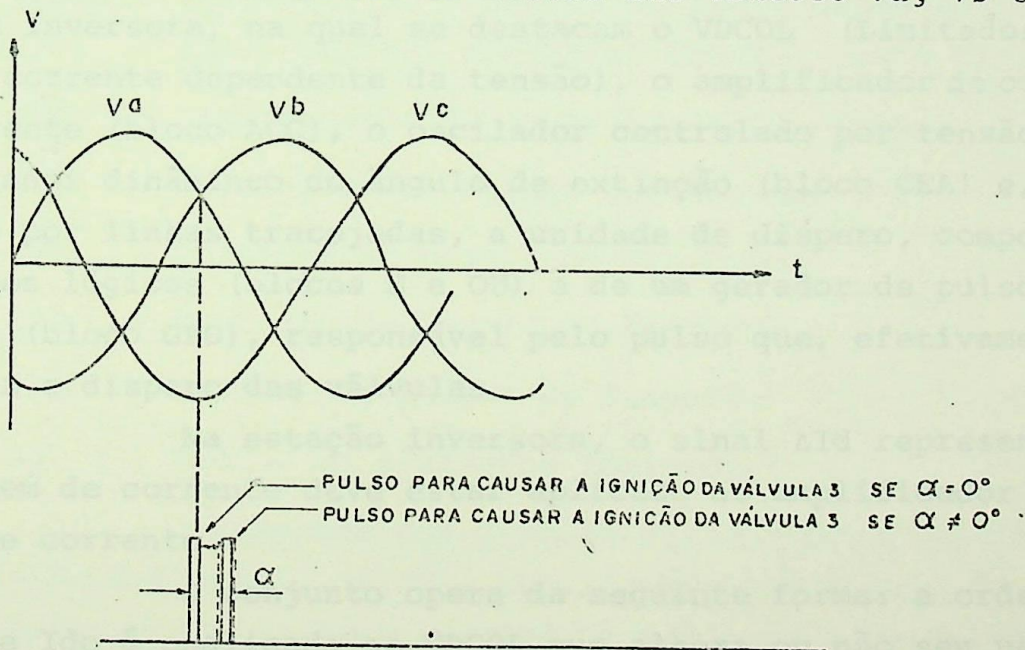
são nulas, o método é normalmente denominado como "método das tensões nulas". Estes pontos em número de 6, corresponderiam aos instantes de geração dos pulsos se o ângulo de ignição fosse nulo ($\alpha = 0^\circ$). Como há necessidade de um atraso na ignição, por moti

vos já comentados anteriormente, o valor de α é adicionado a estes instantes e os pulsos são gerados nestes instantes. A figura 3.1.a e 3.1.b ilustram a base deste método.



- a -

FIGURA 3.1.a) Ponto de medida das tensões V_a , V_b e V_c



- b -

FIGURA 3.1.b) Geração de um pulso no sistema individual

Não é difícil concluir que se o sistema de alimentação é perfeitamente equilibrado e não apresenta distorções harmônicas, os 6 pulsos estarão espaçados de 60° . Caso as tensões V_a , V_b e V_c sejam desequilibradas e/ou distorcidas (devido a tensões harmônicas), os pulsos já não seriam espaçados de 60° . Tal sistema de pulsos desequilibrados, podem levar a sérios inconvenientes, inclusive com geração de harmônicos não característicos,

que podem ser bastante graves em redes fracas, com alta impedância de curto-circuito, [30].

Modernamente os sistemas de geração de pulsos de disparo são do tipo denominado "Simétrico" [10,30], onde os disparos sucessivos não estão diretamente associados à tensão de comutação, mas guardam determinada distância elétrica entre si (60° para pontes de 6 pulsos), constante em regime permanente, mesmo que as tensões sejam desequilibradas. Com esta forma de controle, a assimetria entre disparo pode ser mantida num valor pequeno, da ordem de $0,1^\circ$ [16], reduzindo consideravelmente a geração de harmônicos não característicos. A figura 3.4 ilustra este tipo de controle.

Neste trabalho dá-se atenção especial ao sistema de controle do tipo simétrico, por ser atualmente um dos mais utilizados.

A figura 3.2 mostra esquematicamente um controlador de disparo, que se aplica indistintamente à estação retificadora ou inversora, na qual se destacam o VDCOL (Limitador da ordem de corrente dependente da tensão), o amplificador de controle da corrente (bloco ACC), o oscilador controlado por tensão (VCO), o limitador dinâmico do ângulo de extinção (bloco CEA) e, circundado por linhas tracejadas, a unidade de disparo, composta de elementos lógicos (blocos E e OU) e de um gerador de pulsos de disparo (bloco GPD), responsável pelo pulso que, efetivamente, propicia o disparo das válvulas.

Na estação inversora, o sinal ΔI_d representativo da margem de corrente deve estar aplicado ao amplificador de controle de corrente.

O conjunto opera da seguinte forma: a ordem de corrente I_d é analisada no VDCOL que altera ou não seu valor em função da tensão contínua medida após o reator de alisamento, no inversor ou no retificador. A nova corrente I'_d , que sai do VDCOL (no caso da estação inversora, esta corrente é modificada por ΔI_d), é comparada com a corrente na linha. O erro de corrente (ϵ), é levado ao amplificador de controle de corrente (ACC), que gera uma tensão V_c , proporcional ao erro (ϵ). A tensão V_c , é levada então, a um gerador de pulsos (VCO), cuja frequência de repetição é controlada pela tensão V_c . Durante condições de regime permanente, tal tensão de controle será nula, e o VCO opera com frequência de seis vezes a fundamental, no caso de pontes de 6

pulsos.

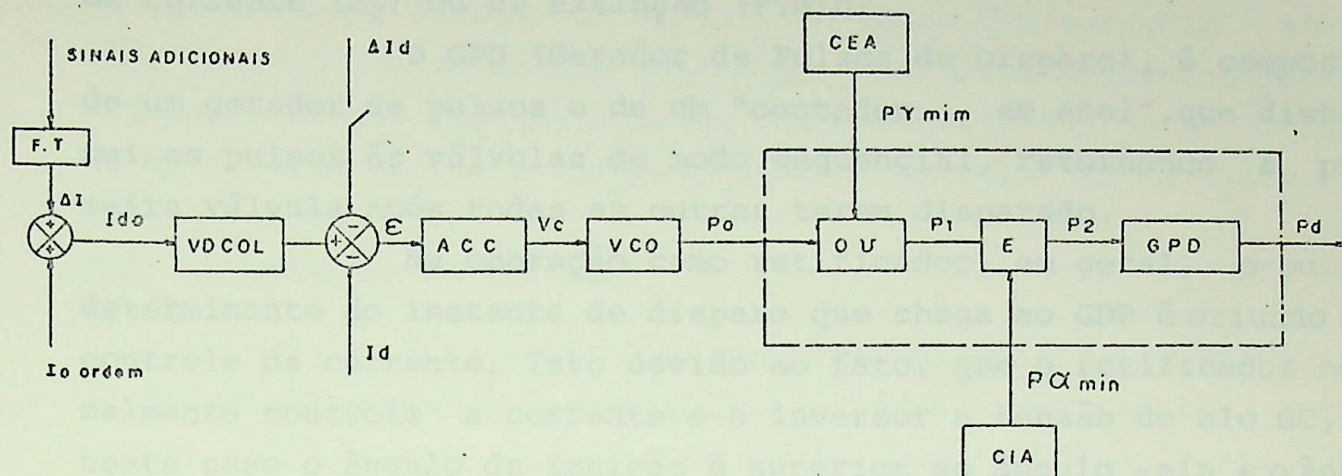


FIGURA 3.2 - Diagrama de blocos básicos de um controlador de disparo.

Onde na figura 3.2, tem-se:

- VDCOL - Limitador da ordem de corrente dependente da tensão ("VOLTAGE DEPENDENT CORRENT ORDER LIMITER");
- ACC - Amplificador de controle de corrente;
- VCO - Oscilador controlado por tensão;
- CEA - Controle do ângulo de extinção;
- CIA - Controle do ângulo de ignição;
- GPD, - Gerador de pulsos de disparo;
- OU, E - Blocos de elementos lógicos.

Juntamente com o pulso P_0 , o bloco CEA (Controle do Ângulo de Extinção), calcula continuamente o ângulo de extinção γ e emite um pulso P_{Ymin} , quando o valor de γ calculado coincide com um valor mínimo fixado (γ_{min}). O bloco lógico OU, se encarrega de selecionar um dos pulsos de acordo com a ordem de chegada, isto é, o que chegar primeiro P_0 ou P_{Ymin} . Deste forma o controle do disparo será feito pelo controle de corrente (P_0) ou pelo controle de extinção (P_{Ymin}).

O bloco CIA (Controle do Ângulo mínimo de ignição), gera um pulso $P_{\alpha min}$, quando o ângulo de ignição (α) coincide com um valor mínimo fixado (α_{min}). O bloco lógico E assegura que só haverá pulso sendo passado ao GPD, para comandar o disparo da válvula, quando existir um mínimo de tensão para ignição (emiss

são de $P_{\alpha min}$) e houver uma ordem de disparo dada pelo controle de corrente (P_0) ou de extinção ($P_{\gamma min}$).

O GPD (Gerador de Pulsos de Disparo), é composto de um gerador de pulsos e de um "contador em anel", que distribui os pulsos às válvulas de modo sequencial, retornando a primeira válvula após todas as outras terem disparado.

Na operação como retificador, em geral, o pulso determinante do instante de disparo que chega ao GDP é oriundo do controle da corrente. Isto devido ao fato, que o retificador normalmente controla a corrente e o inversor a tensão do elo DC, e neste caso o ângulo de ignição é superior ao ângulo α_{min} e o ângulo de extinção (do retificador), muito superior ao γ_{min} . Assim, o pulso $P_{\alpha min}$ chega ao bloco E antes do pulso P_1 , e o pulso P_0 chega ao bloco OU antes do pulso $P_{\gamma min}$. Nas situações em que o inversor assume o controle da corrente, o pulso P_0 chega ao bloco OU antes do pulso $P_{\gamma min}$, e o pulso P_1 chega ao bloco E antes do pulso $P_{\alpha min}$. Neste caso, evidentemente, o disparo se dará quando a condição de α_{min} for satisfeita.

No controlador de disparo, da figura 3.2, nas situações de falta no sistema DC (curto-circuito para terra por exemplo), a corrente na linha pode crescer a valores que obriguem ao controlador de corrente a retardar excessivamente o pulso P_0 . Pode ocorrer então, que o pulso $P_{\gamma min}$ se adiante ao pulso P_0 , comandando o disparo da válvula, neste caso, para evitar uma falha de comutação na retificadora, o que, nesta situação, não constitui inconveniente.

Na operação da inversora, em geral o pulso que chega ao GPD, é oriundo do bloco CEA, uma vez que, o modo normal de operação da inversora é o controle do ângulo de extinção. Neste caso, o pulso $P_{\gamma min}$ chega ao bloco E depois do pulso $P_{\alpha min}$.

Quando o inversor assume o controle da corrente, o controlador da corrente passa a exigir um ângulo de ignição tal que, o ângulo da extinção resultante, é maior que γ_{min} .

Sendo assim, o pulso P_0 , chega ao bloco OU antes do pulso $P_{\gamma min}$, e o pulso P_1 chega ao bloco E, após o pulso $P_{\alpha min}$. Nesta caso, pode ainda ocorrer que P_1 chegue ao bloco E, antes de $P_{\alpha min}$ (situação que ocorre quando de curtos na linha de corrente contínua, por exemplo), porém o disparo só se dará, quando ocorrer o pulso $P_{\alpha min}$.

O CEA, serve ao retificador, como um limite máximo de atraso no disparo da válvula. O bloco CIA serve ao inversor, como um limite máximo de avanço do disparo. Convenientemente ajustados, esses limites impedem que o retificador penetre na faixa de inversão e que o inversor penetre na faixa de retificação.

3.3 Controle da corrente

A filosofia básica para controlar a corrente, em um elo DC, é manter a corrente do elo igual a corrente de referência (I_{do}), fornecida pelo "Controle Principal" (ou "Master Control") e, dependendo da tensão no elo, modificada pelo VDCOL.

A modificação da ordem de corrente pelo VDCOL tem como uma de suas funções, a proteção térmica das válvulas das estações conversoras, que são dimensionadas, juntamente com o sistema de refrigeração, de forma que a temperatura da junção não ultrapasse certo limite quando o elo opera com corrente nominal (ou com alguma sobrecarga pré-especificada). Nesse dimensionamento leva-se em conta que cada válvula conduz corrente apenas durante um terço do ciclo da tensão alternada (120°). Durante certas faltas porém, algumas válvulas conduzem durante todo o ciclo, o que pode levar ao aquecimento excessivo das mesmas. A característica estática de VDCOL é mostrada na figura 2.3, a redução de corrente é feita de maneira proporcional ao valor da tensão contínua (na retificadora ou inversora).

Outro aspecto importante no controle da corrente, é a ação do VCO (Oscilador Controlado por tensão).

O VCO é um circuito gerador de pulsos com uma frequência de repetição que é função de uma tensão de entrada [10], constituído de um gerador de rampa, um comparador e de um detector de nível, que emite um pulso P_0 quando o valor da rampa (U_r) atinge certa referência U_c . O pulso P_0 comanda o início de nova rampa, como ilustra na figura 3.3.

A frequência dos pulsos P_0 é alterada através de uma tensão de entrada que modifique a inclinação da rampa ou a referência U_c [4], sendo esta última a forma como se apresenta o VCO no regulador de corrente de Itaipu.

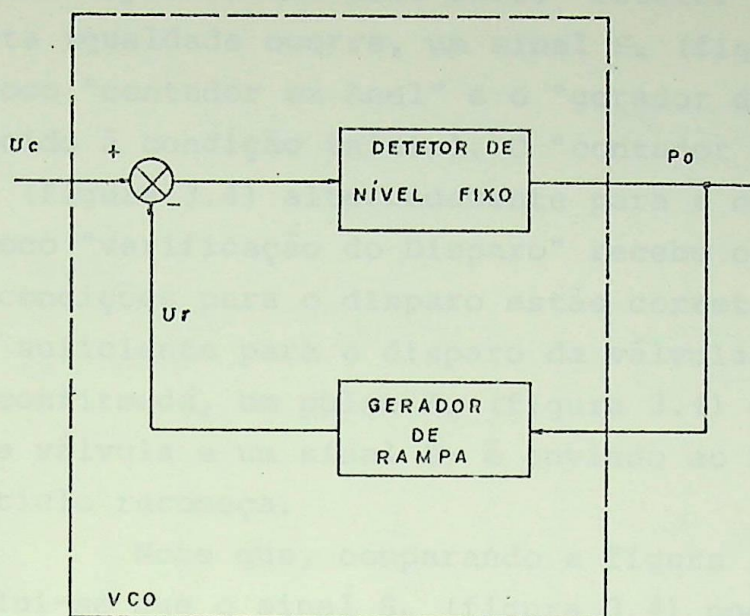


FIGURA 3.3 - Oscilador controlado por tensão (VCO)

A figura 3.4, mostra o princípio de operação do VCO. Conforme mencionado anteriormente, se existir uma diferença entre a corrente de referência e a corrente I_d (valor atual), haverá um sinal de erro (ϵ), o qual com a utilização de um amplificador fornece a tensão VC. Esta tensão é adicionada a uma tensão de referência V_o , fornecendo, então, uma tensão S_8 (figura 3.4), que corresponde a tensão de alimentação do bloco denominado por "gerador de função rampa". Este bloco gera uma tensão de saída S_3 (figura 3.4), em forma de rampa, a qual é iniciada no instante que chega os pulsos S_2 (figura 3.4). Os pulsos S_2 são gerados no bloco denominado por "oscilador 60° ", que sincroniza estes pulsos num espaçamento de 60° elétricos, na frequência da rede, e só os libera com a chegada do sinal S_1 e S_7 . O sinal S_1 , é proveniente do bloco denominado "Detetor de tensões iguais", que tem a função de verificar o cruzamento de duas tensões de fase da rede AC (por exemplo, V_a e V_b na figura 3.1.b). Neste instante o sinal S_1 é liberado.

O sinal S_7 (figura 3.4), é proveniente do bloco denominado "verificação do disparo", que tem a função de verificar se existe tensão suficiente (tensão mínima) para que a válvula seja disparada. Se esta condição for satisfeita, o sinal S_7 é liberado.

A tensão de saída do "gerador de função rampa" S_3 , é iniciada com um valor nulo e aumenta linearmente até atin

gir um valor especificado pelo bloco "Detetor de Nível Fixo". Quando esta igualdade ocorre, um sinal S_4 (figura 3.4) é enviado para o bloco "contador em Anel" e o "gerador de função rampa" é restabelecido à condição inicial. O "contador em anel" distribui pulsos S_5 (figura 3.4) alternadamente para a comutação das válvulas. O bloco "verificação do Disparo" recebe o sinal S_5 e verifica se as condições para o disparo estão corretas, isto é, se existe tensão suficiente para o disparo da válvula. Caso esta condição seja confirmada, um pulso S_6 (figura 3.4) é liberado para o disparo da válvula e um sinal S_7 é enviado ao bloco "oscilador 60°" e o ciclo recomeça.

Note que, comparando a figura 3.2 com a figura 3.4, conclui-se que o sinal S_4 (figura 3.4) pode ser P_0 ou P_{ymin} (figura 3.2), dependendo da ordem do disparo ser dada pelo controle de corrente ou de extinção.

Na figura 3.4, teremos:

V_o - tensão proporcional ao ângulo de ignição das válvulas;

V_c - tensão proporcional ao erro de corrente (ϵ), onde K é uma constante do amplificador;

$V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ - Equivalente as válvulas da ponte conversora;

f_{rede} - frequência da rede AC;

V - tensão da rede AC;

I_d - valor atual da corrente na linha DC;

I_{ref} - corrente de referência para linha DC.

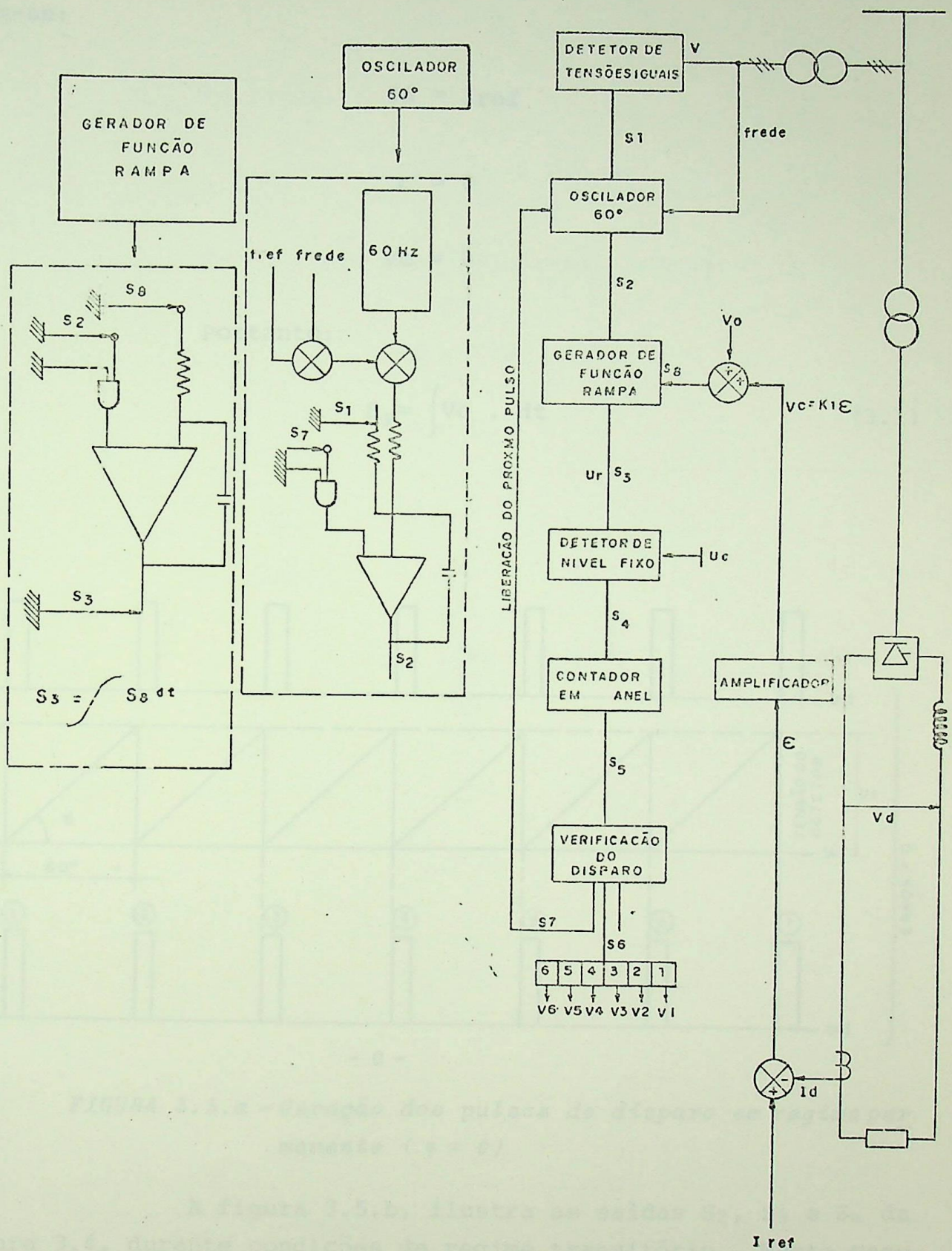


FIGURA 3.4 - Diagrama de blocos de um sistema de controle de corrente constante utilizando o sistema de geração de pulsos tipo "simétrico" (pulsos igualmente espaçados)

A figura 3.5.a, ilustra as saídas S_2 , S_3 e S_4 da figura 3.4, durante condições de regime permanente. Neste caso tem-se:

$$I_d = I_{ref}$$

$$\epsilon = 0$$

$$V_c = 0$$

Portanto:

$$S_3 = \int V_o \cdot dt \quad (3.1)$$

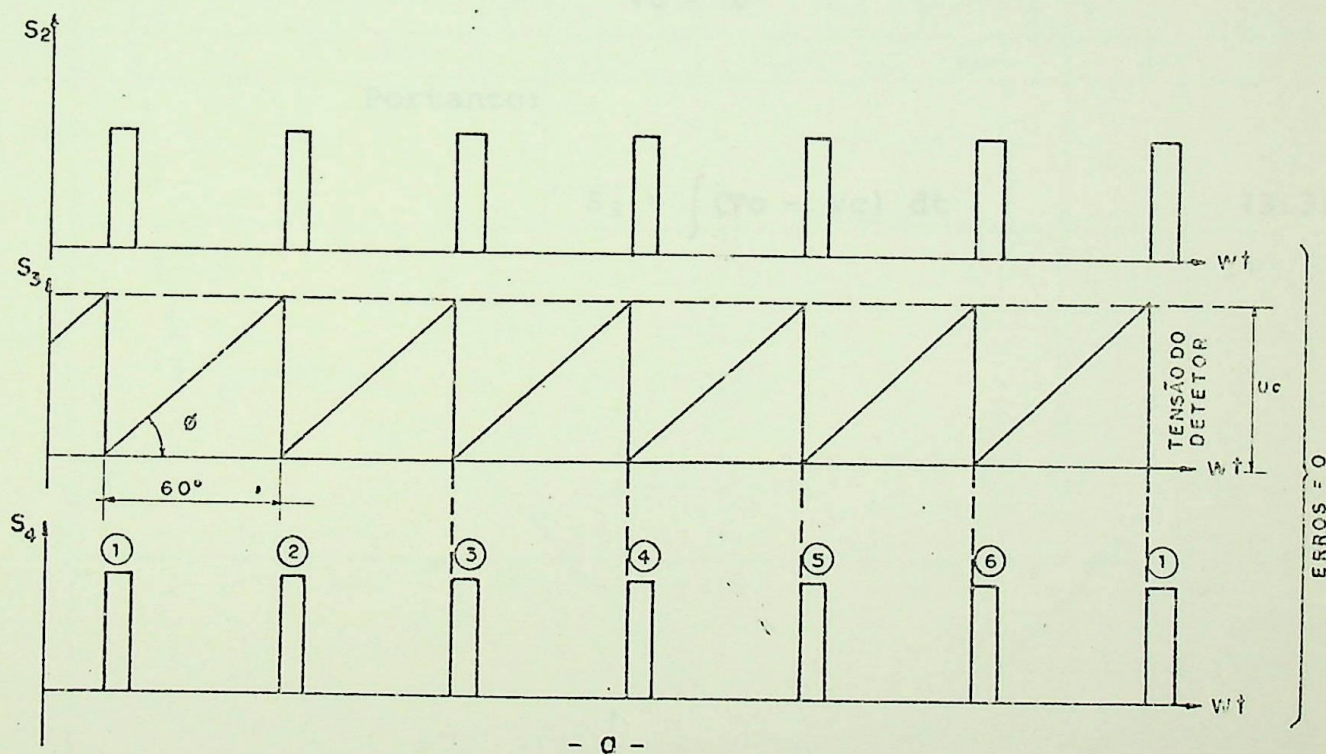


FIGURA 3.5.a - Geração dos pulsos de disparo em regime permanente ($\epsilon = 0$)

A figura 3.5.b, ilustra as saídas S_2 , S_3 e S_4 da figura 3.4, durante condições de regime transitório. Neste caso tem-se:

$$I_d < I_{ref}$$

$$\varepsilon > 0$$

$$V_c > 0$$

Portanto:

$$S_3 = \int (V_o + V_c) dt \quad (3.2)$$

Se I_d for menor que I_{ref} , tem-se

$$I_d > I_{ref}$$

$$\varepsilon < 0$$

$$V_c < 0$$

Portanto:

$$S_3 = \int (V_o - V_c) dt \quad (3.3)$$

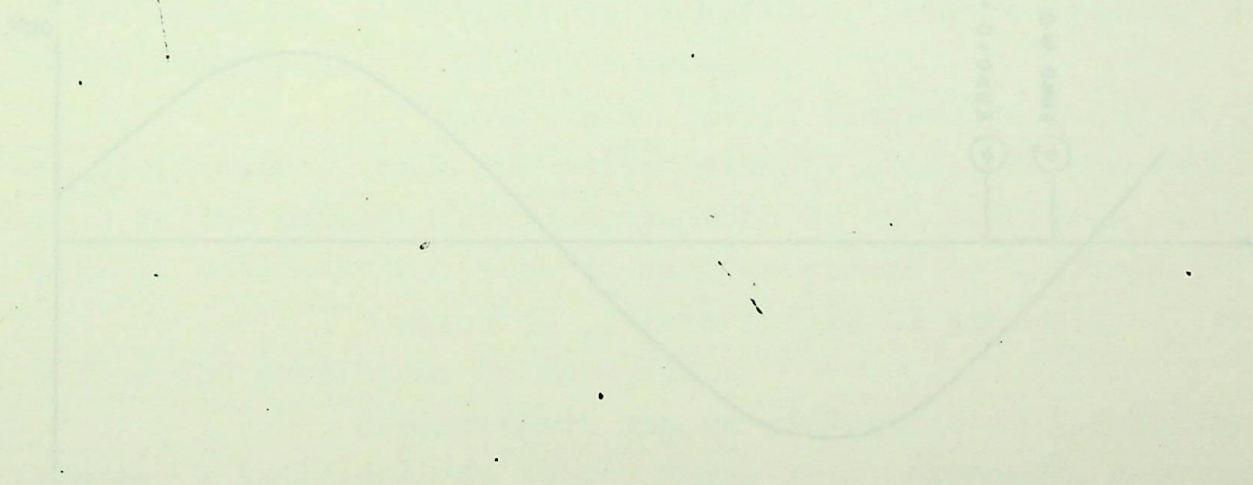
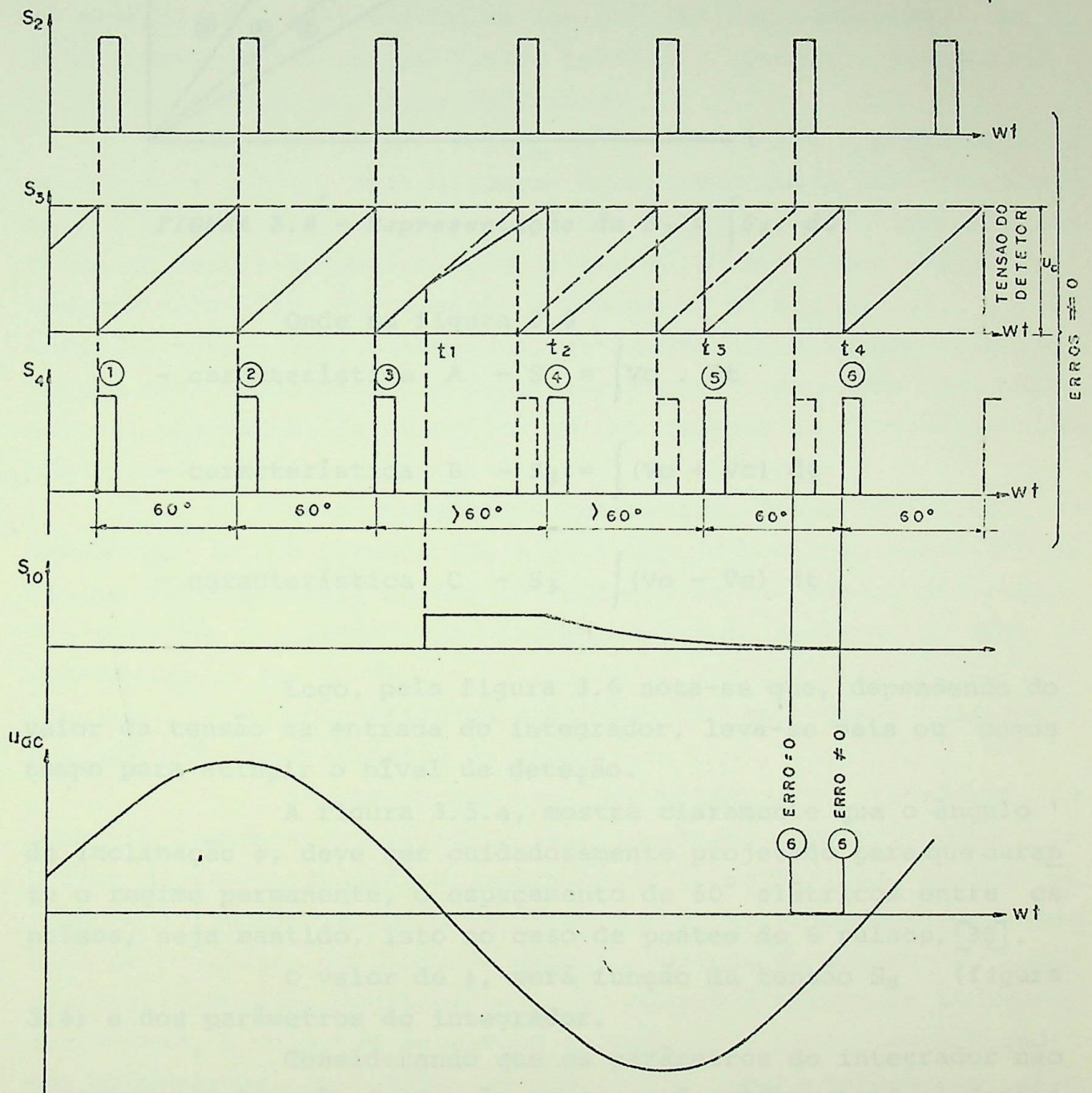


FIGURA 3.5.3 - Variação dos pulsos de disparo quando ocorre uma variação na corrente de referência I_d .

Representando-se as equações (3.1), (3.2) e (3.3) em um mesmo gráfico, temos a figura 3.6.



- b -

FIGURA 3.5.b - Geração dos pulsos de disparo quando ocorre variação na corrente de linha I_d ($\epsilon \neq 0$)

Representando-se as equações (3.1), (3.2) e (3.3) em um mesmo gráfico, tem-se a figura 3.6.

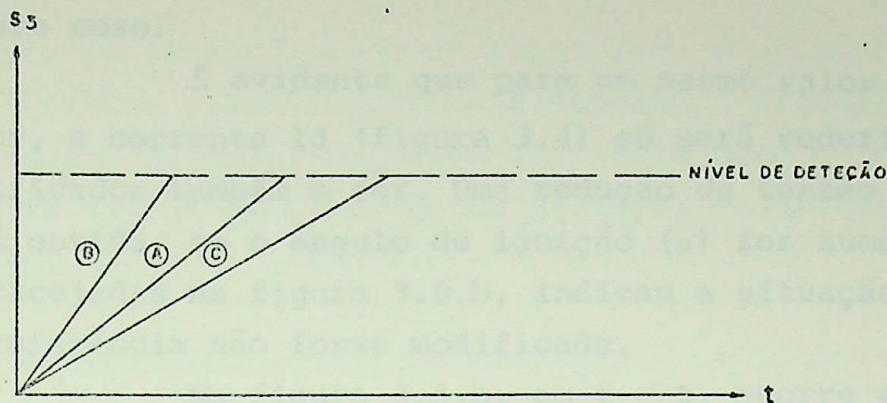


FIGURA 3.6 - Representação de $S_3 = \int S_8 . dt$

Onde na figura 3.6

- característica A - $S_3 = \int V_o . dt$

- característica B - $S_3 = \int (V_o + V_c) dt$

característica C - $S_3 = \int (V_o - V_c) dt$

Logo, pela figura 3.6 nota-se que, dependendo do valor da tensão na entrada do integrador, leva-se mais ou menos tempo para atingir o nível de detecção.

A figura 3.5.a, mostra claramente que o ângulo ' de inclinação ϕ , deve ser cuidadosamente projetado para que durante o regime permanente, o espaçamento de 60° elétricos entre os pulsos, seja mantido, isto no caso de pontes de 6 pulsos, [30].

O valor de ϕ , será função da tensão S_3 (figura 3.4) e dos parâmetros do integrador.

Considerando que os parâmetros do integrador não variam, a inclinação da função rampa será unicamente dependente da tensão S_3 .

A inclinação da rampa, deve ser tal que a frequência dos pulsos S_4 seja $(6.f_0)$, sendo f_0 a frequência da rede alternada ligada a conversora. Em outras palavras, a cada ciclo da tensão alternada, 6 pulsos S_4 , igualmente espaçados de 60° elétricos, serão emitidos (figura 3.5.a).

Para ilustrar duas características importantes do VCO, veja o que ocorre quando a corrente de referência é reduzida em degrau. A figura 3.5.b, mostra a operação do sistema

para este caso.

É evidente que para um mesmo valor de tensão no inversor, a corrente I_d (figura 3.4) só será reduzida, se a tensão do retificador também o for. Uma redução da tensão do retificador só será obtida, se o ângulo de ignição (α) for aumentado. As linhas tracejadas na figura 3.5.b, indicam a situação, caso a corrente de referência não fosse modificada.

Na figura 3.5.b, em $t = t_1$ ocorre a perturbação e em $t = t_2$ e $t = t_3$, dois disparos sucessivos com intervalos superiores a 60° elétricos. A partir de $t = t_4$, quando a corrente na linha DC iguala a nova referência, as válvulas voltam a disparar equidistantemente. Neste caso, a tensão S_8 da figura 3.4, é reduzida ($S_8 = V_o - V_c$), o ângulo ϕ , da figura 3.5.a também será reduzido e como consequência o espaçamento entre os pulsos será maior que 60° elétricos. Isto implica em uma redução da frequência dos pulsos, como mostra a figura 3.5.b.

Se a corrente de referência, fosse aumentada, a tensão S_8 , também o seria ($S_8 = V_o + V_c$), e o efeito seria contrário ao anterior. Este efeito de variação de frequência dos pulsos, é o processo utilizado para manter a corrente na linha DC (I_d) constante.

Outro tipo de distúrbio que pode ser considerado, é a variação da frequência da rede.

Admite-se que num dado momento, a frequência da rede AC, ligada a retificadora seja aumentada para f_1 . Como os pulsos S_4 estão igualmente espaçados de 60° elétricos, medidos em relação à frequência inicial f_0 os pontos de cruzamento das tensões de comutação deslocam-se para a esquerda dos pulsos de disparos com velocidade constante e proporcional à diferença $\Delta f = f_1 - f_0$. Neste caso, o valor do ângulo de ignição (α), medido em relação aos cruzamentos das tensões de comutação, cresce também com velocidade constante ocasionando uma redução da corrente na linha DC. Aparece então uma contribuição positiva V_c (figura 3.4), reduzindo o espaçamento entre disparos. Fica claro, no entanto, que como o espaçamento entre disparos está associado à frequência inicial f_0 , haverá continuamente uma diferença entre I_d e I_{REF} (figura 3.4) ocasionando um valor permanente de V_c para reduzir a zero essa diferença.

O exemplo de VCO comentado anteriormente corresponde a um dos tipos existentes no mercado. No caso, foi utiliza

da a variação da inclinação da rampa para a produção do efeito de sejado. Existem outros tipos de sistemas de produção de pulsos que empregam, por exemplo, um valor constante para a inclinação da rampa e as variações de α são produzidas por modificações da tensão' do detetor (caso de Itaipu).

3.4 Controle da ignição e extinção

Apresenta-se, nesta seção, maiores detalhes da ação dos limitadores dinâmicos dos ângulos de disparo e extinção, mencionados anteriormente, que a literatura técnica [2,3] denomina de controle da ignição e da extinção.

Tais elementos, constituem blocos essenciais, ligados a Unidade de Disparo, encarregada de gerar trem de pulsos P_d de disparo dos tiristores. Como já foi mencionado, os pulsos P_d podem ter três origens diferentes, caracterizadas por P_0 , P_{amin} ou P_{ymin} , cada uma correspondendo a um modo de controle diferente.

A geração dos pulsos P_0 , foi examinada na seção anterior. Analisa-se agora, como são gerados os sinais P_{amin} e P_{ymin} .

O sinal P_{amin} , é gerado através da comparação da tensão direta nos terminais da válvula a ser disparada (tensão de comutação, E_c), com uma referência fixa (tensão mínima necessária para o disparo da válvula, E_{REF}). Quando E_c iguala E_{REF} , um elemento monoestável operando como "detetor de zeros" passa a apresentar como saída, um nível positivo de tensão, representativo de P_{amin} , como ilustra a figura 3.7.

A tensão direta nos terminais da válvula, neste tipo de controle, é determinada a partir da medida da tensão AC na barra primária do transformador da ponte conversora, devidamente modificada em função da posição dos "tap's" e do grupo de conexão do transformador.

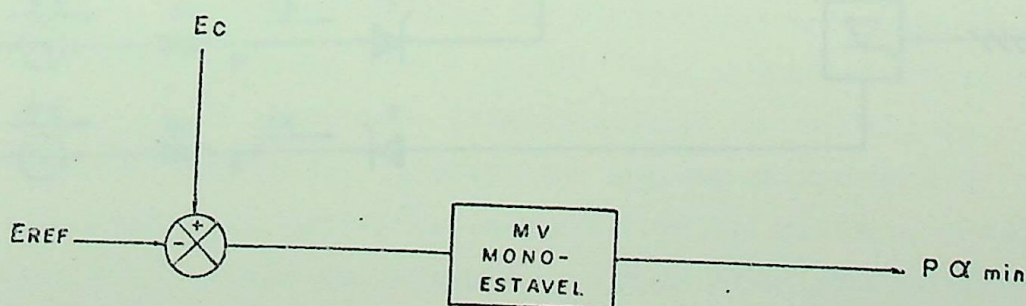


FIGURA 3.7 - Obtenção do sinal P_{amin}

Note que, se a referência de tensão (E_{REF}) tiver valor constante, o ângulo mínimo de ignição (α_{min}), deixa de ser fixo (5° por exemplo no sistema de Itaipu), e passa a ser função da amplitude da tensão de comutação (E_c). Por exemplo, na figura 3.7, se a referência for ajustada de modo que $\alpha_{min} = 5^\circ$, para condições nominais do sistema. Quando a tensão E_c , for superior a nominal, sua igualdade com E_{REF} , acontecerá num tempo menor, que para as condições nominais. Consequentemente, α_{min} será menor que 5° , em caso contrário, α_{min} será maior que 5° .

Essa característica de controle, que pode ser chamada de tensão mínima de ignição, difere da "clássica" CIA [2], na medida que exige um valor mínimo de tensão nos terminais da válvula, ao invés de um ângulo mínimo de ignição constante, para permitir o disparo. É portanto mais compatível com a utilização de tiristores em série formando uma válvula, já que é necessário certa tensão mínima nos terminais da cadeia de tiristores para assegurar o disparo de todos os tiristores.

Analisa-se agora, a geração do sinal P_{ymin} . Para facilitar a exposição, considere, inicialmente, a situação de operação normal, quando a estação inversora controla o ângulo de extinção γ .

O primeiro pulso a chegar ao bloco "Unidade de Disparo" é P_{amin} e o disparo fica condicionado ao pulso P_1 (figura 3.2).

Para facilitar a explicação do controle, utiliza-se a comutação da válvula 1 para a válvula 3, como ilustra a figura 3.8.

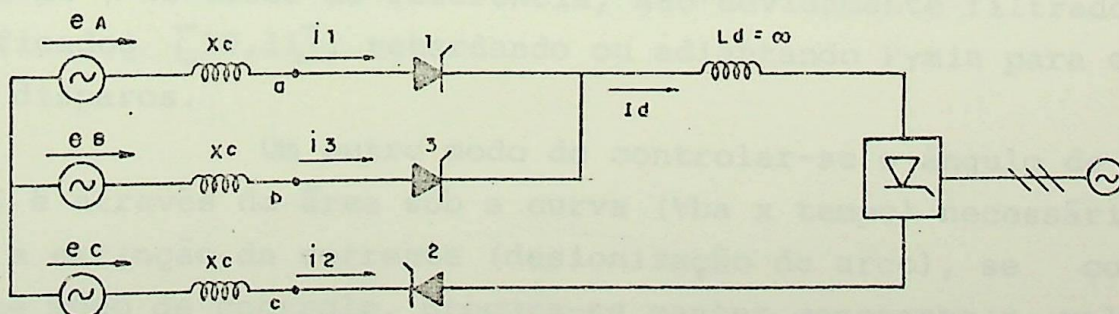


FIGURA 3.8 - Circuito da ponte conversora durante a comutação da válvula 1 para a 3

Na estação inversora, a corrente de linha (I_d) é modificada pela margem de corrente (ΔI_d), como ilustra a figura 3.2. Por este motivo, na comutação da válvula 1 para a válvula 3, por exemplo, o controlador de corrente da inversora observa um erro constante e igual a $(-\Delta I_d)$ e procura atrasar o disparo da válvula 3, de modo a aumentar a tensão na inversora e tornar nulo esse erro. O sinal P_{ymin} , determina então o instante de disparo, limitando o atraso proposto pelo controlador de corrente a um ângulo α_i , tal que a extinção da válvula 1, ocorra com ângulo γ_{min} .

É importante reconhecer que controlar o ângulo de extinção, significa escolher o instante de ignição da válvula 3 (próxima válvula a disparar), de modo que a comutação da corrente da válvula 1 (válvula em condução), para a válvula 3, fique concluída num tempo correspondente a um ângulo γ escolhido (γ_{min}), antes que a válvula 1 fique novamente polarizada.

A dificuldade reside em conhecer o tempo entre o disparo da válvula 3 e o cruzamento por zero da tensão de comutação da válvula 1, antes que esse cruzamento ocorra.

Sob a curva da tensão AC, correspondente a tensão de comutação da válvula 1 em processo de extinção (V_{ba} na figura 3.9), pode-se distinguir duas áreas, uma relativa a transferência da corrente da válvula 1 para a válvula 3 (área de "Sobreposição") e outra relativa a margem de comutação da válvula 1, compreendida entre o final do período de sobreposição e o cruzamento por zero da tensão de comutação da válvula 1 (figura 3.9)

No controle CEA "clássico", mantém-se constante o ângulo de extinção γ através de um sistema realimentado, onde se compara o valor medido de γ com uma referência fixa γ_{min} . Os desvios de γ do valor de referência, são devidamente filtrados e amplificados [10,11], retardando ou adiantando P_{ymin} para os próximos disparos.

Um outro modo de controlar-se o ângulo de extinção, é através da área sob a curva (V_{ba} x tempo) necessária para que a extinção da corrente (desionização do arco), se complete. Neste modo de controle, procura-se manter constante o valor da área, necessária a extinção, através de um sistema preditivo realimentado [4], onde se compara o valor previsto de área necessária a extinção, com uma área de referência A_{min} e o erro medido de previsão corrige as próximas previsões (este é o tipo de controle usado no elo de Itaipu).

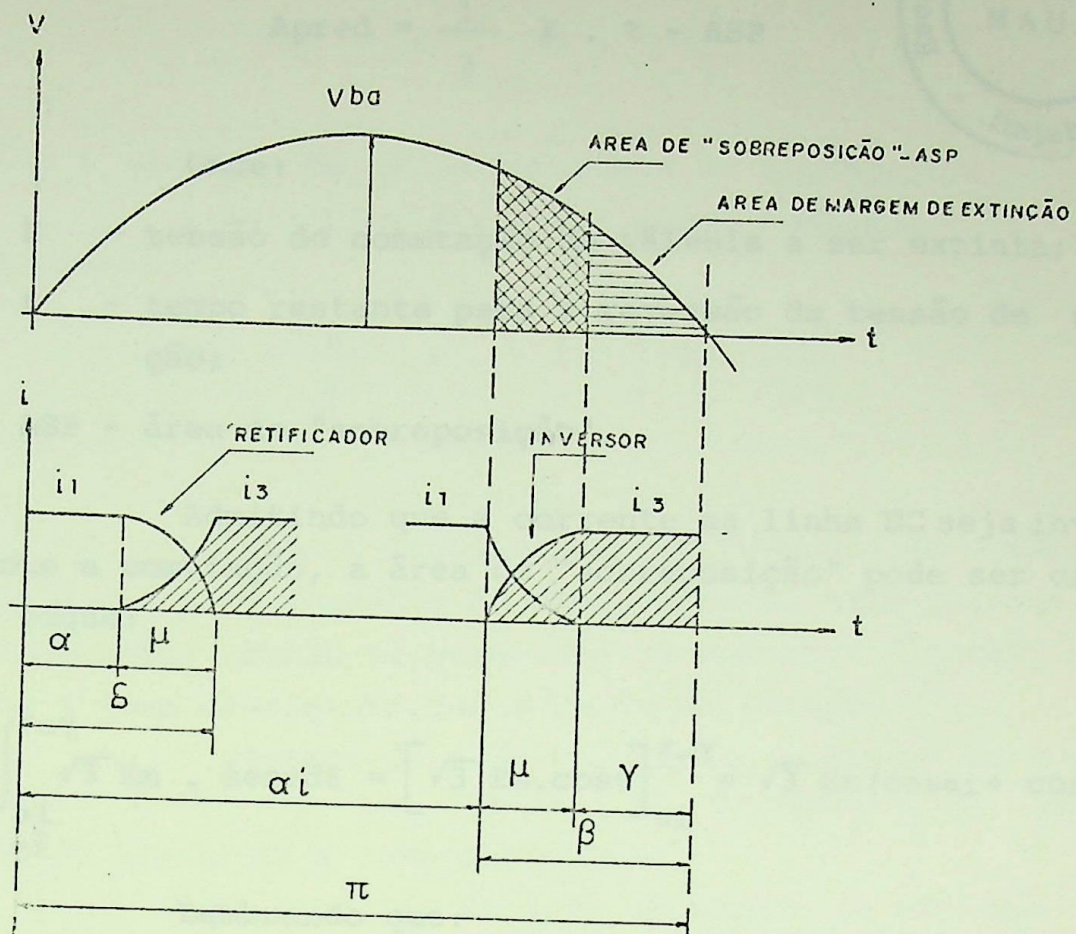


FIGURA 3.9 - Identificação de áreas sob a curva de tensão de comutação

A previsão é executada, monitorando-se continuamente a tensão de comutação da válvula a ser extinta e o tempo que falta para a reversão desta tensão. A área sob a curva Tensão de comutação x tempo é obtida aproximando-se a área da senóide pela área de um triângulo, como mostra a figura 3.10. Subtraindo-se dessa área a área relativa à "sobreposição", chega-se a área necessária a extinção prevista:

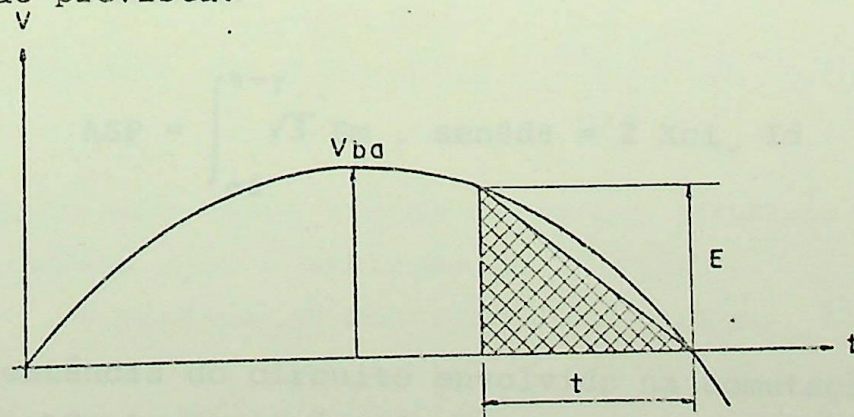
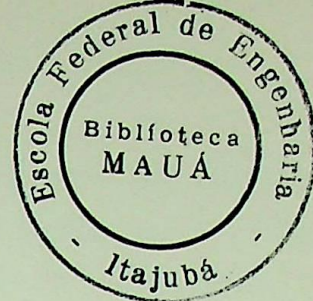


FIGURA 3.10 - Aproximação da área sob a curva de Tensão de comutação (E)



$$\text{Apred} = \frac{1}{2} E \cdot t - \text{ASP}$$

Onde:

E - tensão de comutação da válvula a ser extinta;

t - tempo restante para a reversão da tensão de comutação;

ASP - área de "sobreposição".

Admitindo que a corrente na linha DC seja invariante durante a comutação, a área de "sobreposição" pode ser calculada como segue:

$$\text{ASP} = \int_{\alpha_i}^{\pi-\gamma} \sqrt{3} E_m \cdot \sin\theta d\theta = \left[\sqrt{3} E_m \cdot \cos\theta \right]_{\alpha_i}^{\pi-\gamma} = \sqrt{3} E_m (\cos\alpha_i + \cos\gamma)$$

Lembrando que:

$$\cos\alpha_i + \cos\gamma = \frac{2 R_{ci} \cdot I_d}{V_{doi}}$$

Onde:

$$R_{ci} = \frac{3}{\pi} \cdot X_{ci}$$

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

Resulta:

$$\text{ASP} = \int_{\alpha_i}^{\pi-\gamma} \sqrt{3} E_m \cdot \sin\theta d\theta = 2 X_{ci} \cdot I_d$$

onde X_c é a reatância do circuito envolvido na comutação e I_d a corrente na linha DC. As variações de I_d durante a comutação podem ser levadas em conta alterando-se a expressão anterior para:

$$ASP = 2X_c \cdot \left(I_d + \frac{K I_d}{2} \right)$$

onde $K I_d$ é a variação de I_d no intervalo da comutação.

A área prevista é calculada continuamente, fazendo uso da expressão:

$$A_{pred} = \frac{1}{2} \cdot E \cdot t - K \left(I_d + \frac{K I_d}{2} \right)$$

O tempo t restante para a reversão da tensão de comutação é estimado a partir da observação do meio período da tensão de comutação, usando-se para isso um contador digital reinitializado a cada cruzamento por zero dessa tensão.

O disparo da próxima válvula a entrar em condução (por exemplo, a válvula 3 na figura 3.8), é liberado no momento em que A_{pred} iguala-se a referência A_{min} .

Essa previsão da área de margem de extinção apresenta, mesmo em regime permanente, dois tipos de erros. O primeiro se relaciona com a aproximação da área da senóide pela área de um triângulo, erro este que tende a aumentar com o aumento da área de referência e com as distorções da forma de onda da tensão de comutação. O segundo se relaciona com a constante K usada no cálculo da área de comutação, que sendo única e fixa, não acompanha os desequilíbrios inerentes aos transformadores dos conversores e rede AC.

Para contornar esses problemas, a previsão de área é realimentada com o erro de previsão, corrigindo-se o disparo de cada válvula individualmente:

$$A_{pred} = \frac{1}{2} E t - K \left(I_d + \frac{K I_d}{2} \right) + \epsilon A$$

onde ϵA é a diferença entre a área de margem prevista e a área de margem real, medida após a extinção da válvula.

O sistema de controle da extinção, também existe na estação retificadora, para limitar o atraso do disparo das válvulas em situações extremas, como por exemplo, durante a partida das conversoras, ou ordem de retardo do disparo, comandada pela proteção do elo.

A introdução da característica estática de controle (CEC), mencionada no capítulo II, também é realizada pelo "Controle de Ignição e Extinção". Neste caso é suficiente introduzir um elemento adicional de controle capaz de aumentar o ângulo mínimo de extinção, quando a corrente na linha CC situa-se entre as referências I_{d01} e I_{d02} .

Na prática, essa modificação da característica pode ser implementada simplesmente acrescentando-se a referência do ângulo mínimo de extinção (ou da área mínima de extinção), um fator proporcional a diferença entre I_{d01} e I_d . A limitação da diferença entre I_{d01} e I_d a valores positivos, impede a ação do CEC no sentido de reduzir o ângulo mínimo de extinção.

3.5 O Controlador Principal ("Master Control")

Sabe-se que, tradicionalmente a operação dos sistemas elétricos é baseada no controle da potência ativa gerada e da potência ativa que flui nas linhas que interligam áreas distintas desses sistemas. O elo DC, como elemento integrante do sistema não foge a esta regra, portanto há interesse de se controlar a potência ativa a ser transmitida pelo elo DC, e do ponto de vista de controle do elo, que essa potência transmitida se vincule a referência de corrente a ser utilizada pelo controlador de corrente do elo. Ao controle que cabe esta função dá-se o nome de "Controle Principal" (ou "Master Control").

Deve-se observar que o controle da potência transmitida não exclui a facilidade de se controlar outras grandezas associadas aos sistemas de corrente alternada, como desvios transitórios da frequência da rede, o consumo de reativos pelas conversoras, etc, [12,13], bastando para isso modular convenientemente a referência da potência.

O controlador principal também, através da mesa de controle do elo, centraliza e coordena diversas ações de controle que alteram o estado operativo do elo, como as alterações na ordem de potência para re-despacho do elo, partida ou parada das conversoras, etc.

O controle da potência não é exercido diretamente sobre os ângulos, porque isto dificultaria a imposição de limites a corrente no elo, grandeza esta que afeta mais seriamente as válvulas.

O método mais usual para o controle da potência [4,6,14], é da maneira como segue.

O controle de potência, recebe diretamente da mesa de controle ou do centro de operações do sistema (através de canais específicos de telecomunicações), uma potência de referência denominada ordem de potência. Usando esta potência recebida e a tensão DC, medida em uma das extremidades da linha (no retificador ou no inversor), o controle determina a referência de corrente denominada ordem de corrente, como ilustra a figura 3.11.

A ordem de corrente determinada no controle de potência, é então, utilizada para controlar as grandezas do elo de corrente contínua, do modo explicado anteriormente.

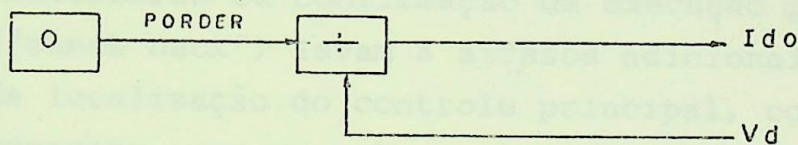


FIGURA 3.11 - Controle da potência em malha aberta

A ordem de potência pode ser estabelecida para cada polo ou bipolo do elo, sendo esse aspecto um critério do projeto. Nos elos em que não existe restrição à circulação da corrente de retorno pelo solo, é usual que a referência de potência seja independente para cada polo, obtendo-se a referência de corrente pela divisão da ordem de potência por um sinal proporcional a tensão polo-terra.

A ordem de corrente resultante é limitada em seu valor máximo, em função da capacidade das válvulas. Essa limitação pode ser rígida ou não, dependendo da sobrecarga permitida pelas válvulas. Por exemplo, no elo de Itaipu, é admitida sobrecarga de 25% da corrente nominal durante 5 [segundos], seguida de 15% durante 20 [segundos]. A partir daí, limita-se a ordem de corrente ao valor nominal.

Dada a insensibilidade natural do elo de corrente contínua em relação a frequência da rede AC, é conveniente prever uma limitação de ordem de potência em regime permanente, tomando

por base a geração disponível, frequência da rede doadora, etc.

Um controlador principal como o descrito poderia existir em cada uma das estações conversoras, sendo necessário que ambos recebessem a mesma ordem de potência e mesmo sinal de tensão Vd. A dificuldade em referir-se Vd a um mesmo ponto da linha DC, compensando exatamente a resistência ôhmica da linha para evitar perda de margem de corrente, leva à localização do Controlador Principal numa das conversoras (conversora "mestre", ou "lead").

A ordem de corrente não é calculada continuamente, mas a intervalos discretos de 10 ou 20 [ms]. O valor amostrado é então transmitido a outra conversora ("escrava" ou "trail"), através de canais de telecomunicação. O atraso envolvido na codificação e decodificação dos sinais de micro-ondas contendo a ordem de corrente, é da ordem de 20 ms [15].

Algumas manobras que exigem execução simultânea das duas conversoras ou confirmação da execução por uma das conversoras ("check back") levam a atrasos adicionais propositais, dependendo da localização do controle principal, como a alteração da ordem de corrente, por exemplo.

O aumento da ordem de corrente, por ser uma manobra que aumenta a margem de corrente, pode ser executada imediatamente se o controle principal estiver localizado na estação retificadora. Caso esteja na estação inversora, a manobra só deve ser executada após confirmação pela retificadora.

Reduções na ordem de corrente são executadas primeiramente na inversora, de modo a garantir a margem de corrente. Se o controlador principal estiver na retificadora, há necessidade então de se esperar a confirmação da manobra pela inversora, o que introduz um atraso adicional para a realização do comando.

Defeitos no sistema de telecomunicações ou no controlador principal, não obrigam a retirada de operação das conversoras. Nesses casos, os riscos de perda da margem de corrente são evitados "fixando-se" a última ordem de corrente aceita por ambas as estações conversoras, com o auxílio de um equipamento de memória que se mantém atualizado com a última ordem aceita.

Os sinais adicionais recebidos no controlador principal, que possibilitam ao elo o controle transitório de outras grandezas, com o objetivo de melhorar o desempenho dinâmico do sistema AC/DC, será analisado no próximo capítulo.

CAPÍTULO IV

CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM DIGITAL DA INTERLIGAÇÃO AC/DC/AC PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE ELETROMECÂNICA

4.1 Introdução

Uma das principais características da atuação dos elos de transmissão em corrente contínua, é o reforço que os mesmos oferecem ao amortecimento de oscilações eletromecânicas, entre máquinas síncronas componentes de uma rede de corrente alternada.

A maneira pela qual este reforço é efetuado, baseia-se no princípio da modulação de potência transmitida pelo elo, de modo a aumentar ou diminuir o fluxo de potência quando de uma aceleração ou desaceleração de determinadas máquinas do sistema.

Neste capítulo, está indicada a experiência obtida, na inclusão da representação dinâmica de elos DC, em um programa de estabilidade transitória, no caso, o da EFEI [1].

4.2 Filosofia do controle para análise da estabilidade transitória

Os programas de estabilidade transitória em geral são compostos basicamente de duas partes principais, que trocam "informações" continuamente: a resolução das equações da rede ("Solução direta da rede") e, a resolução no tempo das equações diferenciais das máquinas.

Na simulação dos elos DC tem-se da mesma maneira duas atividades principais:

- i - o ajuste dos parâmetros de regime dos elos, face a resolução das equações da rede AC;
- ii - a determinação da potência a ser transmitida pelos elos, face às variações da frequência nas barras converSORAS.

A seguir, serão descritos de maneira mais detalhada estas etapas mencionadas.

Nesta filosofia de controle, para ajustar-se os

Onde na figura 4.1, os segmentos 1 a 8 correspondem a:

- 1, 4, 6 e 8 - característica do retificador
 - 2, 3, 5, 7 e 8 - característica do inversor
 - 1 - controle do ângulo de ignição no retificador (CIA);
 - 2 - controle do ângulo de extinção no inversor (CEA);
 - 3 - transição do controle de corrente do retificador para o inversor (CEC);
 - 4 - controle de corrente no retificador (CCr);
 - 5 - controle de corrente no inversor (CCi);
 - 6, 7 e 8 - são acionados, quando da redução das tensões DC, por ocasião de faltas.
- P_0 - ponto de operação do elo DC.

Sob o ponto de vista do sistema AC, os elos DC têm um comportamento equivalente ao de uma carga de potência ou corrente constante, conforme o tipo de controle empregado. É desta maneira, nesta filosofia de controle, que a rotina de solução da rede AC deve considerar os equivalentes (P,Q) referentes ao elo.

É sabido, que cargas de P ou I constantes apresentam um comportamento mais próximo a realidade sob o ponto de vista de estabilidade em relação às de impedância constante. Sendo assim, muita atenção deve ser dada ao tratamento matemático das iterações da rede AC com o Elo em Corrente Contínua (Elo DC).

Com relação ao tratamento matemático, se o Elo em Corrente Contínua fosse considerado em sua totalidade, isto é, considerando todas as funções de transferência relativas a seus controles, haveria um grande número de constantes de tempo envolvidas, ou seja, uma grande quantidade de equações a serem integradas a cada novo intervalo de tempo, podendo aumentar consideravelmente os custos de computação. Como o objetivo deste trabalho não implica em resultados extremamente precisos, admite-se, naturalmente, algumas simplificações.

Por estas razões e levando-se em conta o tipo de problema em geral estudado, e sua escala de tempo (dentro da faixa 1 - 10 [segundos], com intervalos de 10 a 50 [ms]), a adoção de simplificações que não influam diretamente nos resultados pode ser de extrema utilidade, levando o programa a uma redução nos seus custos operacionais.

4.2.1 Filosofia do controle usada no programa de estabilidade transitória

A filosofia do controle usada no programa desenvolvido, foi da seguinte maneira [17]:

- a - o programa parte inicialmente dos resultados obtidos de um fluxo de carga, do sistema em estudo. Estes resultados entram como dados no programa de estabilidade de transitória;
- b - a linha de transmissão em Corrente Contínua é representada somente por uma resistência, porém o efeito da indutância da linha na variação da corrente foi considerado;
- c - é assumido que os canais de telecomunicações entre terminais estão sempre em serviço. Para o atraso devido a transmissão dos sinais, considera-se um valor típico de 20[ms] nas simulações;
- d - admite-se todas as demais limitações intrínsecas a representação monofásica, equivalente ao sistema trifásico;
- e - o programa desenvolvido, só trata de faltas no sistema AC.

Na filosofia utilizada pelo programa desenvolvido, devem ficar evidenciados os seguintes tópicos [17]:

- i - A margem de corrente ($I_{d_{\text{retificador}}} - I_{d_{\text{inversor}}}$) deverá ser mantida sempre positiva e constante, muito embora novas estratégias de operação estejam surgindo, e desta forma esta premissa pode ser violada [16];
- ii - Se as tensões AC, em pelo menos um dos terminais do elo DC, cair abaixo de um valor permitido para uma operação à plena carga das pontes conversoras, o elo deverá diminuir a sua ordem de corrente "instantaneamente", desde que esta diminuição não acarrete uma tensão operativa DC, inferior a um valor mínimo. Abaixo deste, a corrente se fará zero havendo assim a interrupção da transmissão da ener

gia. Na prática, isto não é totalmente verdadeiro, desde que, há um certo lapso de tempo para mudança da ordem de corrente do elo. A sequência de operação para a "parada" do elo, varia com o fabricante. No decorrer deste capítulo, são descritos duas filosofias básicas;

- iii - Quando o elo DC, diminui sua ordem de corrente, como mencionado no item ii, há um intervalo de tempo, para o estabelecimento do valor nominal da corrente. Isto deve-se basicamente ao fato, de o sistema AC ligado ao elo, "suportar" uma determinada velocidade de restabelecimento por parte do elo DC. Uma velocidade maior, poderá acarretar uma perturbação no sistema AC, de maneira que ocorra falha de comutação no inversor e, como consequência, uma nova diminuição da corrente do elo. Portanto, o estabelecimento da corrente nominal do elo DC, é feito com base em uma rampa, cuja inclinação deve ser selecionada com base em estudos mais aprofundados, e sua faixa de variação situa-se entre:

$$\frac{1 \text{ PU } [\text{MW}]}{50 [\text{ms}]} \quad \text{até} \quad \frac{1 \text{ PU } [\text{MW}]}{300 [\text{ms}]} \quad [17].$$

É interessante observar-se, que uma boa representação da Modulação ("Controle de Amortecimento" ou "Damping Control"), isto é, dos sinais adicionais fornecidos ao elo, para que estes amortecem efetivamente as oscilações no sistema AC, deve-se ter os sinais de ordem de potência ou corrente, atuando efetivamente. Pode ser muito importante em estudos de alternativas AC/DC, fornecer para o projetista do sistema de controle DC, informações bastante úteis, acerca da escolha conveniente do sinal de ordem.

4.2.2 Representação da característica estática dos elos de transmissão de energia elétrica em corrente contínua.

A característica de operação $V_d \times I_d$, corresponde a representação do controle físico principal existente no elo

DC. Por isto, o projeto da mesma depende, exclusivamente, do fabricante.

Entretanto, dentre as características mais usadas, encontra-se a da figura 4.2. O programa desenvolvido, além desta característica admite outras mais simplificadas, para os quais a análise subsequente também se aplica o fluxograma usado para desenvolver esta característica, é mostrado na figura 4.10.

A lógica de disparo, resolve as equações do Elo em Corrente Contínua, determinando os ângulos de ignição (α no retificador) e extinção (γ no inversor). A partir das tensões AC nas barras retificadora e inversora, obtidas da iteração da rede AC, a lógica de disparo calcula uma corrente máxima fictícia (I_{fict}), capaz de circular no elo se $\alpha = \alpha_{min}$ e $\gamma = \gamma_{min}$, da seguinte maneira:

$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{acr} \cdot \cos \alpha_{min} - R_{cr} \cdot I_{fict} \quad (4.1)$$

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{aci} \cdot \cos \gamma_{min} - R_{ci} \cdot I_{fict} \quad (4.2)$$

Onde V_{acr} e V_{aci} representam as tensões, em valores eficazes, entre fases no secundário do transformador das pontes retificadora e inversora respectivamente.

Subtraindo membro a membro (4.1) e (4.2), tem-se:

$$V_{dr} - V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} (V_{acr} \cdot \cos \alpha_{min} - V_{aci} \cdot \cos \gamma_{min}) - (R_{cr} - R_{ci}) I_{fict}$$

Onde observa-se que o termo a esquerda da igualdade nada mais é que $R_d \cdot I_{fict}$. Então:

$$(R_d + R_{cr} - R_{ci}) \cdot I_{fict} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} (V_{acr} \cdot \cos \alpha_{min} - V_{aci} \cdot \cos \gamma_{min})$$

e finalmente:

$$I_{fict} = \frac{\frac{3\sqrt{2}}{\pi} (V_{acr} \cdot \cos \alpha_{min} - V_{aci} \cdot \cos \gamma_{min})}{R_d + R_{cr} - R_{ci}} \quad (4.3)$$

considerando:

$$V_{acr} = Tr \cdot E_{acr}$$

$$V_{aci} = Ti \cdot E_{aci}$$

$$\gamma_{min} = \gamma_0$$

onde:

E_{acr} e E_{aci} representam os valores eficazes da tensão entre fases no primário do transformador das pontes retificadora e inversora, respectivamente.

Tr e Ti representam os taps dos transformadores das pontes retificadora e inversora, respectivamente.

Logo:

$$I_{fict} = \frac{\frac{3\sqrt{2}}{\pi} (Tr \cdot E_{acr} \cdot \cos \alpha_{min} - Ti \cdot E_{aci} \cdot \cos \gamma_{min})}{R_d + R_{cr} - R_{ci}} \quad (4.4)$$

Obtida I_{fict} através da equação (4.3) ou (4.4), compara-se seu valor com a ordem de corrente I_{do1} do retificador e com a corrente I_{do2} ($I_{do2} = I_{do1} - \Delta I_d$) do inversor.

Se $I_{fict} \geq I_{do1}$ a lógica de disparo, toma como variáveis de controle $\gamma = \gamma_0$ e I_{do1} , determinando em seguida os valores de V_{di} , V_{dr} e α_r :

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot Ti \cdot E_{aci} \cdot \cos \gamma_0 - R_{ci} \cdot I_{do1}$$

$$V_{dr} = V_{di} + R_{dc} \cdot I_{do1}$$

$$\alpha_r = \arccos \left[\frac{\pi}{3\sqrt{2} \cdot Tr \cdot E_{acr}} (V_{dr} + R_{cr} \cdot I_{do1}) \right] \quad (4.5)$$

Esse procedimento caracteriza que o controle de corrente fica definido pela estação retificadora.

Se $I_{do2} < I_{fict} < I_{do1}$, a lógica de disparo toma como variável de controle $\alpha_r = \alpha_{min}$, determinando os valores de I_d e γ que satisfazem as equações de regime do Elo em Corrente Contínua. Esse procedimento caracteriza o "Controle do Erro de

Corrente (CEC)", que será visto com mais detalhes no decorrer deste capítulo, inclusive as equações de regime do elo, utilizadas neste caso.

Se $I_{fict} \leq I_{d02}$ a lógica de disparo toma como variáveis de controle $\alpha = \alpha_{min}$ e I_{d02} , determinando V_{dr} , V_{di} e γ .

$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot Tr \cdot E_{acr} \cdot \cos \alpha_{min} - R_{cr} \cdot I_{d02}$$

$$V_{di} = V_{dr} - R_d \cdot I_{d02}$$

$$\gamma = \arccos \left[\frac{\pi}{3\sqrt{2} \cdot T_i \cdot E_{aci}} (V_{di} + R_{ci} \cdot I_{d02}) \right] \quad (4.6)$$

Isso caracteriza o controle de corrente na estação inversora, que passa a trabalhar com $\gamma > \gamma_0$.

Em qualquer das três situações descritas, a operação do elo fica completamente definida, restando somente calcular as potências ativa e reativa transportadas e/ou consumidas pelo elo.

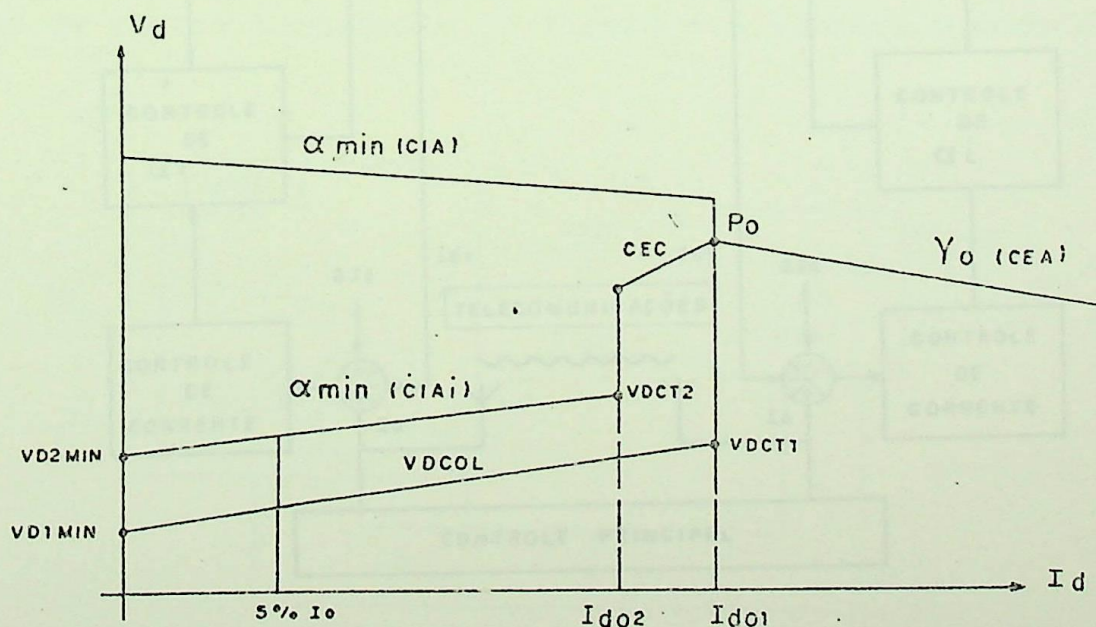


FIGURA 4.2 - Característica estática do elo DC utilizada no programa desenvolvido [17]

4.3 Rotina para solução do elo DC usada no programa

Normalmente representa-se Elos de Transmissão em Corrente Contínua e respectivos controles principais, conforme o esquema da figura 4.3 [6, 17].

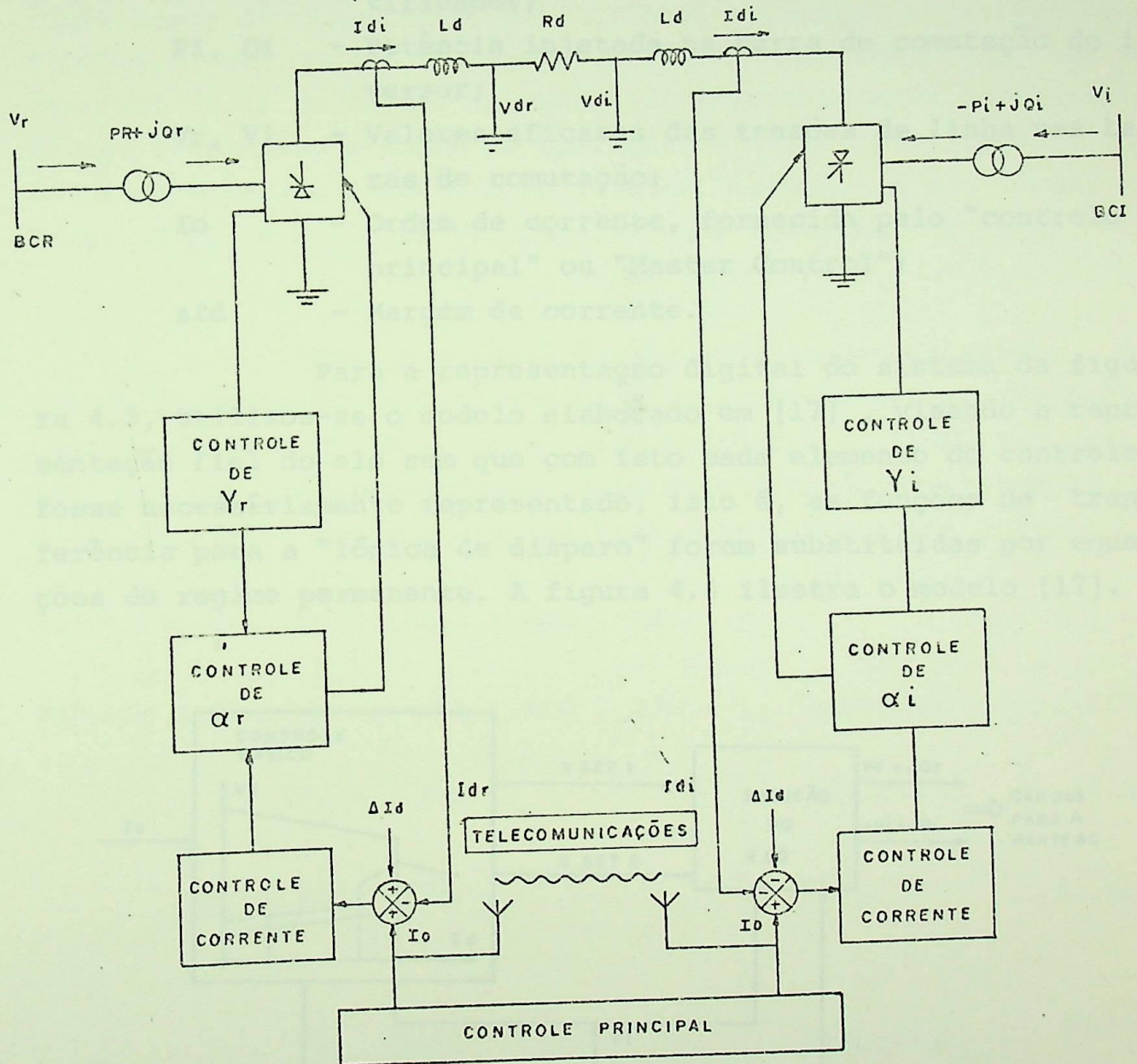


FIGURA 4.3 - Controle básico de um polo para transmissão em corrente contínua [6, 17]

onde:

- BCR - Barra de comutação do retificador;
- BCI - Barra de comutação do inversor;
- L_d - Reator de linha;
- R_d - Resistência da linha;
- V_{dr}, V_{di} - Tensões DC;
- I_{dr}, I_{di} - Correntes na linha DC;
- α, γ - Ângulos de disparo e de extinção
- P_r, Q_r - Potência injetada na barra de comutação do re-
tificador;
- P_i, Q_i - Potência injetada na barra de comutação do in-
versor;
- V_r, V_i - Valores eficazes das tensões de linha nas bar-
ras de comutação;
- I_o - Ordem de corrente, fornecida pelo "controle
principal" ou "Master Control";
- ΔI_d - Margem de corrente.

Para a representação digital do sistema da figura 4.3, utilizou-se o modelo elaborado em [17], visando a representação fiel do elo sem que com isto cada elemento do controle fosse necessariamente representado, isto é, as funções de transferência para a "lógica de disparo" foram substituídas por equações de regime permanente. A figura 4.4 ilustra o modelo [17].

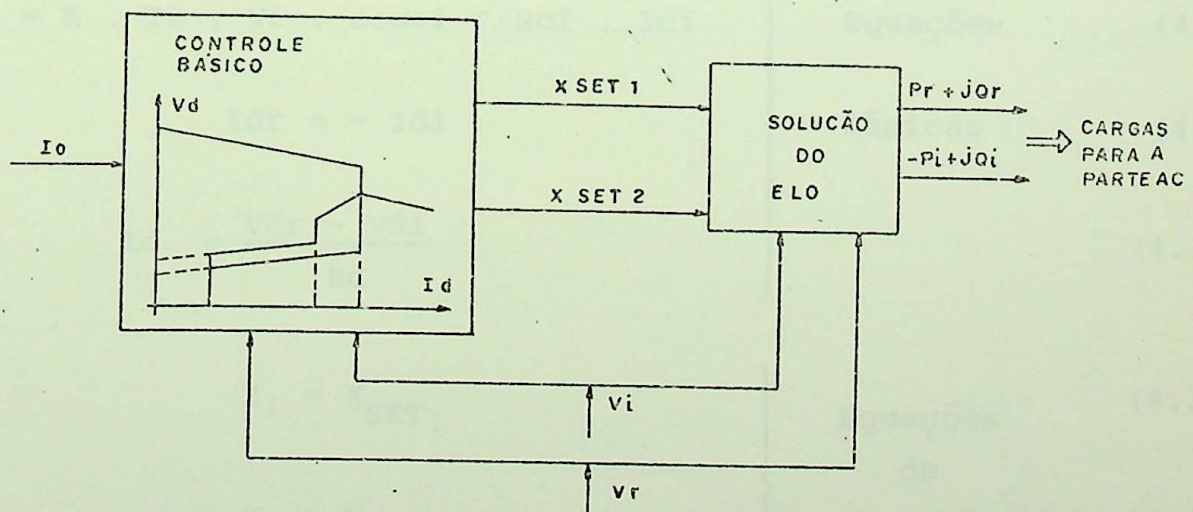


FIGURA 4.4 - Modelo usado no programa digital [17]

No modelo indicado na figura 4.4, o "controle básico" é representado pela característica $V_d \times I_d$. O procedimento chamado "Solução do elo", descreve o comportamento da linha, das pontes conversoras, e calcula as potências injetadas nas barras de comutação. Potências estas calculadas de tensões V_r e V_i da iteração atual AC, convergidas, e que servirão para o cálculo das novas tensões das barras da iteração posterior.

De posse das tensões V_r e V_i , da iteração atual AC correspondente, e em conjunto com a corrente de ordem I_0 , proveniente do controle principal, e de posse da corrente máxima fictícia capaz de circular no elo (I_{fict}), calculada a partir das tensões AC das barras retificadora (V_r) e inversora (V_i), com as equações (4.3) ou (4.4). As equações correspondentes ao controle básico determinam o ponto de operação na característica $V_d \times I_d$, e fornecem para o procedimento chamado "Solução do Elo", dois valores (X_{SET_1} e X_{SET_2} na figura 4.4), que podem ser os pares:

$$(\alpha_r, \gamma_i), (I_{dr}, \gamma_i), (\alpha_r, I_{di}), \text{ etc.}$$

Para a solução das equações representativas do Elo de Transmissão em Corrente Contínua, tem-se quatro equações básicas (4.7) a (4.10), porém seis variáveis ($V_{dr}, V_{di}, I_{dr}, I_{di}, \alpha_r, \gamma_i$), logo necessita-se mais duas equações de controle (4.11) e (4.12). Desta forma o sistema fica determinado por:

$$V_{dr} = K \cdot T_r \cdot V_r \cdot \cos \alpha_r - R_{cr} \cdot I_{dr} \quad (4.7)$$

$$V_{di} = K \cdot T_i \cdot V_i \cdot \cos \alpha_i - R_{ci} \cdot I_{di} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Equações} \\ \text{Básicas} \end{array} \right\} \quad (4.8)$$

$$I_{dr} = - I_{di} \quad (4.9)$$

$$I_d = \frac{V_{dr} - V_{di}}{R_d} \quad (4.10)$$

$$X_1 = X_{SET_1} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Equações} \\ \text{de} \end{array} \right\} \quad (4.11)$$

$$X_2 = X_{SET_2} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Controle} \end{array} \right\} \quad (4.12)$$

Onde;

T_r, T_i = Taps dos transformadores

$$K = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}$$

R_d = Resistência da linha de transmissão em corrente contínua

R_{cr}, R_{ci} = Resistências de comutação.

4.3.1 Controle básico

A característica de operação $V_d \times I_d$, corresponde a representação do controle físico principal existente no Elo de Transmissão em Corrente Contínua. Por isto, o projeto do mesmo depende, exclusivamente do fabricante.

Dentre os mais usados, situa-se o da figura 4.2.

Para condições nominais de operação, o elo deve ser projetado para trabalhar, a maior parte do tempo, no ponto P_0 (Figura 4.2). Neste ponto, a corrente iguala-se a I_{d01} e o inversor mantém-se no seu ângulo de extinção mínimo (acarretando menor consumo de potência reativa pela ponte inversora). Nesta situação, o sistema encontra-se no modo "Normal de operação", onde $X_{SET1} = I_{d01}$ e $X_{SET2} = \gamma_0$. Neste caso a ponte retificadora varia o seu ângulo de disparo (α) e controla a corrente.

Admitindo-se que nesta situação, a tensão A_c do inversor caia progressivamente, para que o elo não seja desenergizado, o controle é obrigado a reduzir sua ordem de corrente. A figura 4.5 ilustra esta situação.

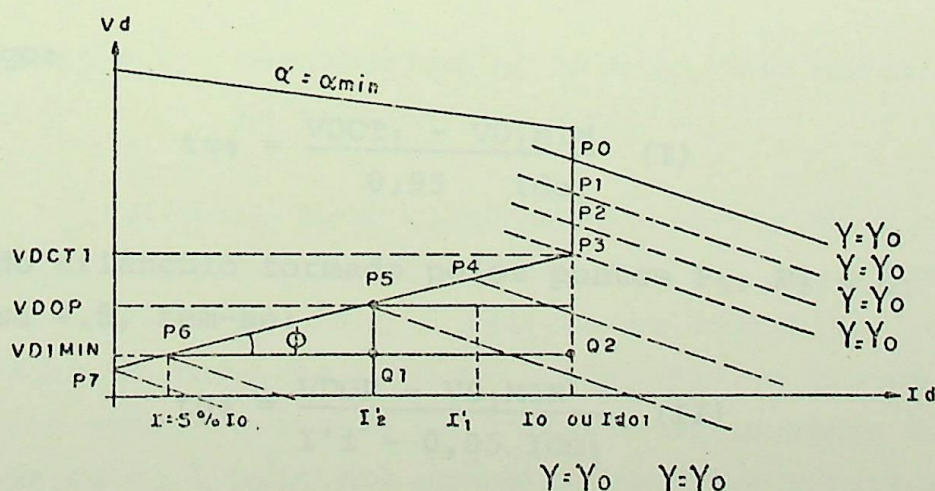


FIGURA 4.5 -- Característica Estática $V_d \times I_d$, com queda de tensão no inversor [17]

Durante a transição de P_0 a P_3 , o elo permanece no modo de operação normal, mantendo $X_{SET1} = I_{do1}$ e $X_{SET2} = \gamma_0$, sendo nesta situação, necessário determinar os valores de V_{di} , V_{di} e α_i .

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot T_i \cdot V_i \cdot \cos \gamma_0 - R_{ci} \cdot I_{do1} \quad (4.13)$$

$$V_{di} = V_{di} + R_d \cdot I_{do1} \quad (4.14)$$

$$\alpha_r = \arccos \left[\frac{\pi}{3\sqrt{2} \cdot T_r \cdot V_r} (V_{dr} + R_{cr} \cdot I_{do1}) \right] \quad (4.15)$$

Quando a tensão de operação do elo (V_{DOP} na figura 4.5), cair abaixo de um valor pré-determinado V_{DCT1} , o controle diminuirá a ordem de corrente, progressivamente, para I'_1 , I'_2 , I'_3 , etc, até encontrar um ponto de operação estável.

Esta atitude visa aliviar a carga reativa imposta ao sistema AC, quando a tensão encontra-se muito baixa, além de servir como proteção do equipamento conversor. Este ramo é chamado de modo de operação "com tensão reduzida no inversor", onde $X_{SET1} = I'_i$ e $X_{SET2} = \gamma_0$. Para o novo valor da corrente I'_i , o controle determina os valores de V_{di} , V_{dr} e α_r , com as equações (4.13) a (4.15).

A equação que determina I'_i , é deduzida da seguinte maneira:

- do triângulo formado pelos pontos P_6 , P_3 e Q_2 na figura 4.5, tem-se:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{V_{DCT1} - V_{D1MIN}}{I_{do1} - 5\% I_{do1}}$$

logo:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{V_{DCT1} - V_{D1MIN}}{0,95 I_{do1}} \quad (I)$$

- do triângulo formado pelos pontos P_6 , P_5 e Q_1 na figura 4.5, tem-se:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{V_{DOP} - V_{D1MIN}}{I'_i - 0,05 I_{do1}} \quad (II)$$

igualando-se (I) e (II), tem-se:

$$\frac{VDCT_1 - VD_1 MIN}{0,95 I_{do1}} = \frac{VDOP - VD_1 MIN}{I'i - 0,05 I_{do1}}$$

logo:

$$I'i = I_{do1} \left[0,95 \left(\frac{VDOP - VD_1 MIN}{VDCT_1 - VD_1 MIN} \right) + 0,05 \right] \quad (4.16)$$

Se a tensão de operação do elo (VDOP) for menor que $VD_1 MIN$ ou $I_d < 5\%$ da corrente nominal (I_o ou I_{do1}), o elo , automaticamente será desenergizado.

Por outro lado, caso a tensão AC do retificador, diminua e a do inversor se mantenha aproximadamente constante, o lugar geométrico dos pontos de operação é descrito pela figura 4.6.

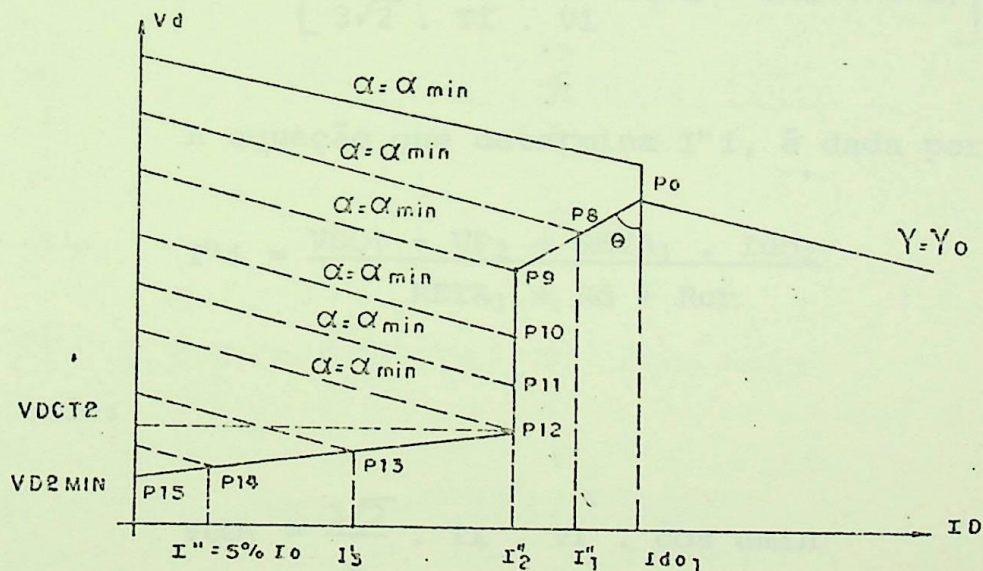


FIGURA 4.6 - Característica $V_d \times I_d$, com queda de tensão no retificador [17]

O ponto P_0 é abandonado a partir do momento em que, ao tentar controlar a corrente em I_{do1} , o ângulo de disparo (α) deva ser menor que α_{min} . O sistema de controle, passa a diminuir a ordem de corrente para I''_1 , I''_2 , etc, e mantém $\alpha \hat{=} \alpha_{min}$. Para que isto ocorra o ângulo de extinção do inversor não será mais mantido em γ_0 , mais irá aumentar conforme a necessidade.

A fim de eliminar a "instabilidade dos três pon

tos (three point cross-over instability)" no controle [19], os fabricantes elaboraram o segmento de reta (P_0 - P_9) denominado "CEC" (Controle de Erro de Corrente), e definido no programa como modo de operação "Gama Corrigido". O ângulo θ (figura 4.6) é projetado de tal maneira que em P_0 o inversor tenha $\gamma = \gamma_0$ e em P_9 tenha $\gamma \cong \gamma_0 + 10^\circ$ (valor prático, no caso de Itaipu).

Para este modo de controle, tem-se:

$X_{SET1} = I''i$ e $X_{SET2} = \alpha_{min}$. Para o novo valor de corrente $I''i$, o controle determina os valores de V_{dr} , V_{di} e γ como segue:

$$V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot Tr \cdot Vr \cdot \cos \alpha_{min} - R_{cr} \cdot I''i \quad (4.17)$$

$$V_{di} = V_{dr} - R_d \cdot I''i \quad (4.18)$$

$$\gamma = \arccos \left[\frac{\pi}{3\sqrt{2} \cdot T_i \cdot V_i} (V_{di} + R_{ci} \cdot I''i) \right] \quad (4.19)$$

A equação que determina $I''i$, é dada por [17]:

$$I''i = \frac{VDO_1 - VP_2 + RETA_1 \cdot I_{do2}}{RETA_1 + R_d + R_{cr}} \quad (4.20)$$

onde:

$$VDO_1 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot Tr \cdot Vr \cdot \cos \alpha_{min}$$

$$RETA_1 = \frac{V_{di} - VP_2}{I_{do1} - I_{do2}}$$

$$V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot T_i \cdot V_i \cdot \cos \gamma_0 - R_{ci} \cdot I_{do1}$$

$$VP_2 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot T_i \cdot V_i \cdot \cos (\gamma_0 + 10^\circ) - R_{ci} \cdot I_{do2}$$

Convém notar que os valores para determinar I''_i , são da iteração atual AC, e a equação (4.20) somente é usada se $I_{do2} < I_{fict} < I_{do1}$.

A partir do ponto P_9 até P_{12} , a corrente fica constante e igual a ordem do inversor (I_{do2}). Este trecho caracteriza o controle da corrente pelo inversor, onde $X_{SET1} = I_{do2}$ e $X_{SET2} = \alpha_{min}$, e o controle determina os valores de V_{dr} , V_{di} e γ através das equações (4.17) a (4.19). Este trecho no programa desenvolvido, é denominado de modo de operação "Reduzido".

Quando a tensão de operação do elo (VDOP) cair abaixo de $VDCT_2$, a ordem de corrente, agora controlada pelo inversor, será diminuída mantendo-se $\alpha_r = \alpha_{min}$. Este trecho é denominado no programa desenvolvido de "Alfa/Alfa Reduzido", onde $X_{SET1} = I''_2$ e $X_{SET2} = \alpha_{min}$.

Para o novo valor de corrente I''_2 , o controle determina os valores de V_{dr} , V_{di} e γ através das equações (4.17) a (4.19).

A equação que determina I''_2 , é dada por [17]:

$$I''_2 = \frac{VDO_1 - VDCT_2 + RETA_2 \cdot I_{do2}}{RETA_2 + R_d + R_{cr}} \quad (4.21)$$

onde:

$$VDO_1 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot Tr \cdot V_r \cdot \cos \alpha_{min}$$

$$RETA_2 = \frac{VDCT_2 - VD2MIN}{I_{do2} - 5\% I_o}$$

Note que os valores para determinar I''_2 , são da iteração atual AC, e a equação (4.21) somente é usada se $I_{fict} < I_{do2}$. Esta corrente, I''_2 , é menor do que a corrente deduzida anteriormente I''_i .

Alguns fabricantes, no entanto, a partir do momento que a tensão de operação do elo (VDOP) torna-se inferior a $VDCT_2$, abandonam o controle de corrente no inversor passando a controlar α_i num valor mínimo (em geral da ordem de 110°), de modo que este terminal não tenda a operar como um segundo retificador.

Caso a tensão de operação do elo (VDOP) seja menor que VD2MIN ou $I_d < 5\%$ da corrente nominal (I_o), o elo também será desenergizado.

4.3.2 Limites mínimos de tensão e ângulo

Para um melhor entendimento, da seção precedente, pretende-se, nesta seção, dar uma explicação mais detalhada sobre os limites mínimos de tensão e ângulo lá mencionados.

- VDCT₁

É a tensão mínima do inversor, a partir da qual, o elo será desenergizado (característica simples) ou este operará sob o modo de tensão reduzida no inversor (característica composta), com o intuito de aliviar o consumo de reativos impostos ao sistema AC. Estas duas características mencionadas, serão explicadas no decorrer desta seção.

Esta tensão não pode ser negativa, nem maior ou igual que a tensão de operação do elo. Recomenda-se um valor entre zero e 0.5 PU, considerando a tensão nominal igual a 1.0 PU.

- VD₁MIN

Tensão de desligamento do inversor. Esta não pode ser negativa, nem maior do que VDCT₁.

Recomenda-se um valor entre zero e 0.3 PU, considerando a tensão nominal do elo igual a 1.0 PU. Para o caso da utilização da característica composta, este valor deverá ser menor do que VDCT₁. Por outro lado, quando se deseja trabalhar com a característica simples, este valor deverá ser, obrigatoriamente, igual a VDCT₁.

- VDCT₂

É a tensão mínima do retificador a partir da qual a ordem de corrente será diminuída mantendo-se o ângulo de disparo do inversor igual ao mínimo. Para este caso, característica composta, utiliza-se um valor maior que zero, ou seja, maior ou igual a $\frac{3}{\pi} X_t \cdot I_{d02}$, onde:

X_t = reatância do transformador

I_{d02} = ordem de corrente do inversor.

Para que a característica simples seja utilizada,

este valor deverá ser zero.

- $\text{ALFMIN} = \alpha_i$

É o ângulo de ignição mínimo do inversor. Este valor não pode ser menor do que 90° , nem maior ou igual a 180° . Para característica composta recomenda-se um valor entre 110° a 130° . Este valor, só deve ser utilizado no programa, caso não tenha sido selecionado algum valor para VDCT2. Para a característica simples este valor deve estar zerado.

Característica Composta

Antes de descrever a maneira pela qual é determinado o ponto VD2MIN (figura 4.7), convém lembrar que os segmentos de reta (VDCT1-VD1MIN) e (VDCT2-VD2MIN) nunca ocorrem simultaneamente. Para o melhor entendimento da característica composta deve-se ter em mente os seguintes conceitos:

- Para perturbações no sistema AC do lado do terminal inversor, o lugar geométrico dos pontos de operação está mostrado na figura 4.5.
- Para perturbações no sistema AC do lado do terminal retificador, o lugar geométrico dos pontos de operação está mostrado na figura 4.6.
- Mesmo que a perturbação afete ambos os terminais, sempre haverá um para o qual a perturbação se manifeste de maneira mais intensa.

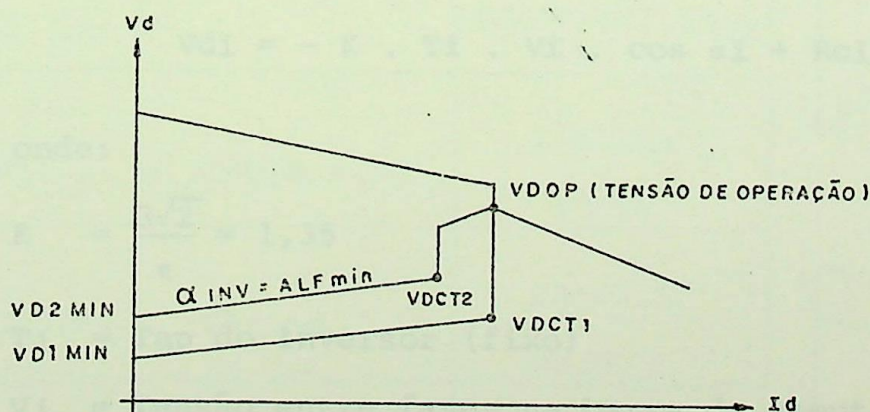


FIGURA 4.7 - Característica Composta [17]

Portanto pode-se concluir que estes segmentos de reta (VDCT1-VD1MIN), (VDCT2-VD2MIN) são, no âmbito do modelo matemático proposto, independentes, e a escolha de seus pontos limi

tes depende, exclusivamente de quem for utilizar o modelo, desde que respeitadas as condições impostas anteriormente para os mesmos.

Como para a determinação do ponto de tensão mínima de desligamento (VD2MIN), não há necessidade do segmento de reta VDCTi-VD1MIN, este será omitido, e a característica composta neste caso reduz-se a figura (4.8).

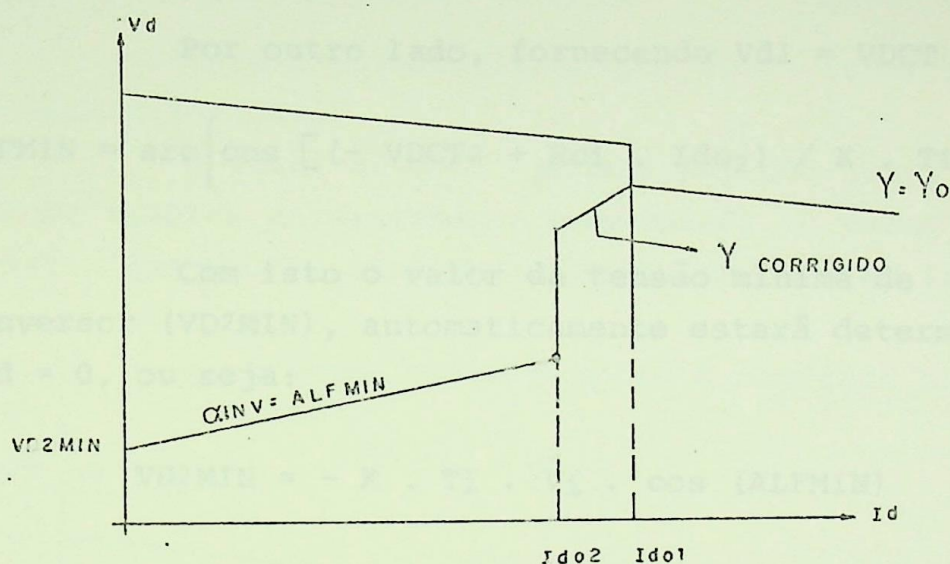


FIGURA 4.8 - Característica composta, sem o segmento de reta (VDCT1- VD1MIN) [17]

Na parte inferior da figura (4.8), a equação abaixo determina os pontos de mínima tensão, VDCT e VD MIN, em característica composta:

$$V_{di} = - K \cdot T_i \cdot V_i \cdot \cos \alpha_i + R_{ci} \cdot I_d$$

onde:

$$K = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} = 1,35$$

T_i = Tap do inversor (fixo)

V_i = Tensão entre fases na barra de comutação do inversor

R_{ci} = Resistência de comutação no inversor = $\frac{3}{\pi} X_{ci}$

Temos então uma equação e três variáveis V_{di} , I_d $\cos \alpha_i$. Portanto a especificação de uma variável apenas determi

na a equação plena da reta. Como admite-se a corrente I_d ser a variável independente, a escolha de apenas uma entre V_{di} e $\cos \alpha_i$ torna-se necessária.

Como exemplo, fazendo $I_d = I_{do2}$ (ordem de corrente do inversor) e fornecendo $\alpha_i = \text{ALFMIN}$, tem-se:

$$VDCT_2 = -K \cdot T_i \cdot V_i \cdot \cos(\text{ALFMIN}) + R_{ci} \cdot I_{do2}$$

Por outro lado, fornecendo $V_{di} = VDCT$, temos que:

$$\text{ALFMIN} = \arccos \left[\frac{(-VDCT_2 + R_{ci} \cdot I_{do2})}{K \cdot T_i \cdot V_i} \right]$$

Com isto o valor da tensão mínima de desligamento do inversor (VD_{2MIN}), automaticamente estará determinado, fazendo $I_d = 0$, ou seja:

$$VD_{2MIN} = -K \cdot T_i \cdot V_i \cdot \cos(\text{ALFMIN})$$

A tabela 4.1 ilustra as possibilidades de utilização da característica composta.

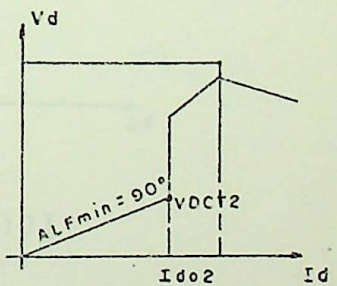
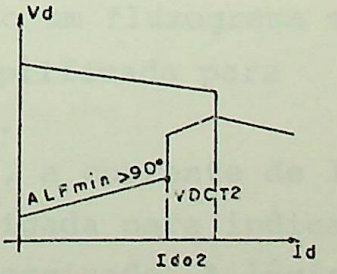
$VDCT_2$	ALFMIN	OBSERVAÇÕES	
$0 < VDCT_2$ e $VDCT_2 \leq R_{ci} \cdot I_{do2}$	ZERADO	SUPÕE $VDCT_2 = R_{ci} \cdot I_{do2}$	
ZERADO	$\text{ALFMIN} = 90^\circ$	CALCULA $VDCT_2$	
$VDCT_2 > R_{ci} \cdot I_{do2}$	ZERADO	CALCULA ALFMIN	
ZERADO	$90^\circ < \text{ALFMIN}$ e $\text{ALFMIN} < 180^\circ$	CALCULA $VDCT_2$	

TABELA 4.1 - Possibilidade de utilização da característica composta [17]

Note que para apenas uma das duas variáveis $VDCT2$ e $ALFMIN$, deve ser atribuído um valor, permanecendo a outra zerada.

Para todas as possibilidades relacionadas acima as tensões $VDCT1$ e $VD1MIN$ podem assumir as faixas de valores anteriormente mencionados.

Característica Simples

Esta é caracterizada por $VDCT1$ igual a $VD1MIN$, $VDCT2$ e $ALFMIN$ zerados.

O valor de $VDCT1$ poderá ser não nulo, mas dentro da faixa de valores anteriormente mencionada, o valor de $VD1MIN$, quando maior que $VDCT1$, será feita necessariamente, igual ao de $VDCT1$.

A característica simples é mostrada na figura (4.9).

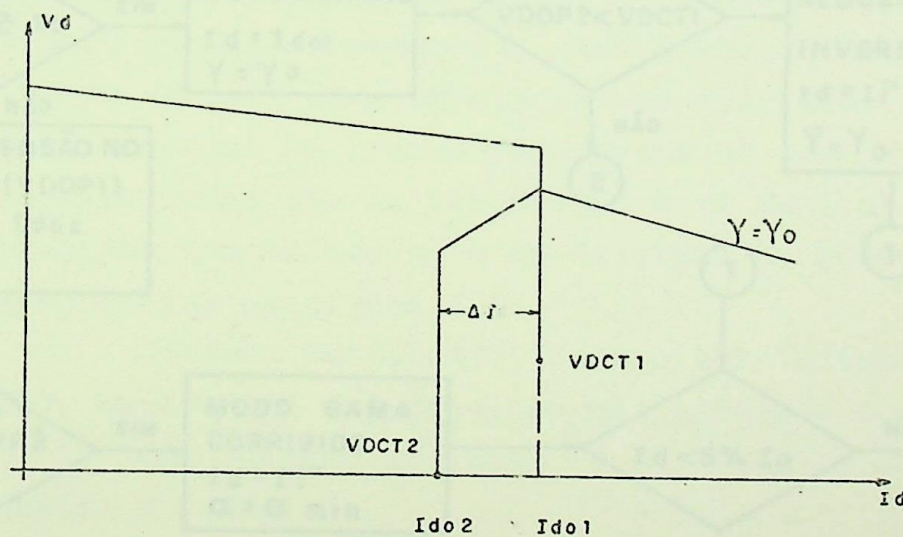


FIGURA 4.9 - Característica simples [17]

4.3.3 Fluxograma para o controle básico

Na figura (4.10), é apresentado um fluxograma em termos de diagramas de blocos, e de forma simplificada para o controle básico descrito nas seções anteriores.

No bloco denominado "Bloqueio", a corrente de linha (I_d) é feita igual a zero, e uma chave é ligada para indicar ao bloco "Solução do elo" que o elo está desenergizado. A lógica para o bloqueio e desbloqueio do elo, encontra-se no apêndice A.

O bloco que apresenta a função de transferência $F(S) = 1/(1 + ST_{dC})$, colocado na saída do controle básico (Figura 4.10), simula o comportamento dinâmico de "controle de disparo" e da linha de corrente contínua. Tal bloco representa, em outras palavras, o tempo necessário para o elo igualar sua corrente (I_d) ao sinal denominado ordem de corrente (por volta de 50ms [19, 20, 21]), após um desequilíbrio de I_d , com relação a ordem de corrente. O valor de T_{dc} , não é um dado de entrada para o programa, mas pré-programado.

O bloco que apresenta a função de transferência $F(S) = 1/(1 + ST_{pC})$, simula o transdutor da tensão V_{di} , levada ao "Controle Principal" ou "Master Control".

A constante de tempo T_{pC} , é um dado de entrada no programa. Tal constante representa, o tempo necessário para a medição da tensão V_{di} .

O bloco denominado "Solução do elo", corresponde a rotina que simulã a lógica de disparo, isto é, calcula os ângulos α e γ , das pontes conversoras. Além disso, calcula-se também neste bloco as potências injetadas nas barras de comutação, utilizando as equações de regime permanente do elo DC. Estas potências são calculadas com as tensões V_r e V_i da iteração atual AC. Um fluxograma simplificado, e em diagrama de blocos, desta rotina é apresentado na figura 4.11.

O bloco denominado "Controle Principal" ou "Master Control", será visto com detalhes nas próximas seções.

Com relação a figura 4.11, tem-se os seguintes esclarecimentos a fazer:

1) Chaves

MODO ϕ $\rightarrow$ Modo Normal de operação

MODO 1 $\rightarrow$ Modo Reduzido

MODO 2 $\rightarrow$ Modo Alfa/Alfa Reduzido

MODO 3 $\rightarrow$ Modo Gama Corrigido (CEC)

MODO 4 $\rightarrow$ Link Desenergizado (Bloqueio)

MODO 5 $\rightarrow$ Modo tensão reduzido no inversor

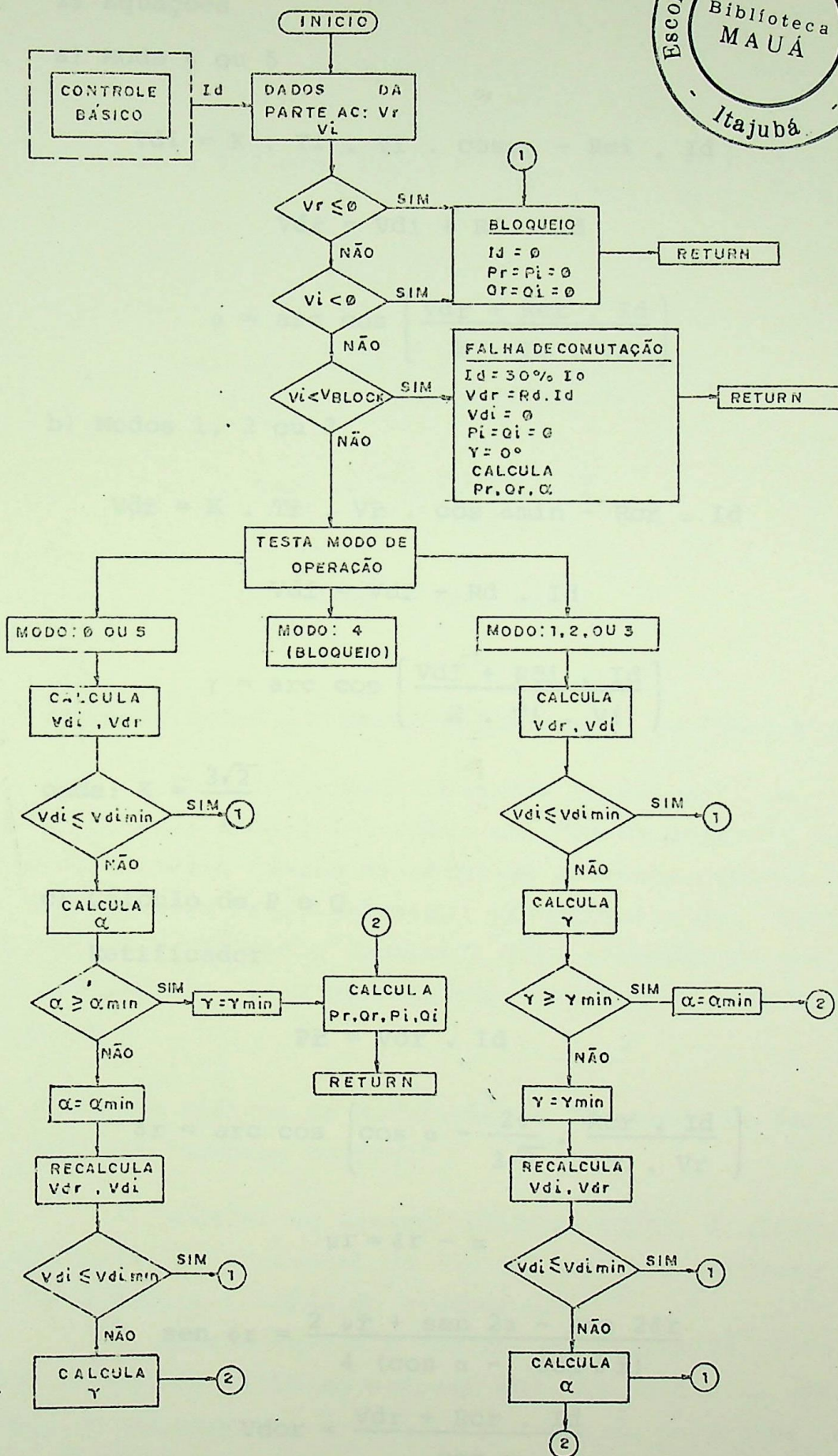
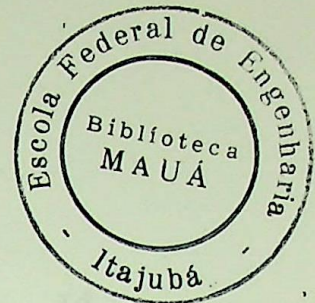


FIGURA 4.11 - Fluxograma para rotina de solução do elo DC.

2) Equações

a) Modo ϕ ou 5

$$V_{di} = K \cdot T_i \cdot V_i \cdot \cos \gamma_0 - R_{ci} \cdot I_d$$

$$V_{dr} = V_{di} + R_d \cdot I_d$$

$$\alpha = \arccos \left(\frac{V_{dr} + R_{cr} \cdot I_d}{K \cdot T_r \cdot V_r} \right)$$

b) Modos 1, 2 ou 3

$$V_{dr} = K \cdot T_r \cdot V_r \cdot \cos \alpha_{min} - R_{cr} \cdot I_d$$

$$V_{di} = V_{dr} - R_d \cdot I_d$$

$$\gamma = \arccos \left(\frac{V_{di} + R_{ci} \cdot I_d}{K \cdot T_i \cdot V_i} \right)$$

$$\text{onde: } K = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}$$

c) Cálculo de P e Q

Retificador

$$P_r = V_{dr} \cdot I_d$$

$$\delta_r = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2\pi}{3\sqrt{2}} \cdot \frac{R_{cr} \cdot I_d}{T_r \cdot V_r} \right)$$

$$\mu_r = \delta_r - \alpha$$

$$\sin \phi_r = \frac{2 \mu_r + \sin 2\alpha - \sin 2\delta_r}{4 (\cos \alpha - \cos \delta_r)}$$

$$V_{dor} = \frac{V_{dr} + R_{cr} \cdot I_d}{\cos \alpha}$$

$$Q_r = V_{dor} \cdot I_d \cdot \sin \phi_r$$

Inversor

$$P_i = V_{di} \cdot I_d$$

$$\delta_i = \arccos \left(\cos \gamma - \frac{2\pi}{3\sqrt{2}} \cdot \frac{R_{ci} \cdot I_d}{T_i \cdot V_i} \right)$$

$$\mu_i = \delta_i - \gamma$$

$$\sin \phi_i = \frac{2 \mu_i + \sin 2\gamma - \sin 2\delta_i}{4 (\cos \gamma - \cos \delta_i)}$$

$$V_{doi} = \frac{V_{di} + R_{ci} \cdot I_d}{\cos \gamma}$$

$$Q_i = V_{doi} \cdot i_d \cdot \sin \phi_i$$

4.4 Característica do "Controle Principal" ou "Master Control"

Entende-se por "Controle Principal" ou "Master Control", o local onde é calculada a ordem de corrente de operação do elo, a qual é função da ordem de potência nominal, da tensão DC e dos sinais estabilizantes, provenientes do "Controle de Amortecimento" ou "Damping Control". Este elemento do controle pode estar localizado tanto no terminal retificador quanto no terminal inversor.

4.4.1 Aspectos físicos da Modulação ou "Controle de Amortecimento" ou "Damping Control"

Modular um sistema híbrido AC/DC, é alterar a ordem de potência (ou corrente) do elo DC, segundo parâmetros representativos das perturbações do sistema AC.

Admite-se que o sistema da figura (4.12) num dado instante, sofra uma falta no sistema AC². As potências geradas P_{G1} e P_{G2} , encontravam-se em equilíbrio com as potências consumidas e transmitidas P_{L1} , P_{L2} e P_{AC} , P_{DC} , respectivamente, antes da perturbação. Matematicamente tem-se:

- antes da perturbação:

$$P_{G1}^0 = P_{G1} = P_{L1}^0 + P_{AC}^0 + P_{DC}^0$$

$$P_{G2}^0 = P_{G2} = P_{L2}^0 - P_{AC}^0 - P_{DC}^0$$

onde:

P_{G1}^0 e P_{G2}^0 - Potências mecânicas das máquinas

P_{G1} e P_{G2} - Potências elétricas fornecidas pelas máquinas

- durante a perturbação, as potências geradas P_{G1} e P_{G2} sofrerão o seguinte desequilíbrio:

$$\Delta P_1 = P_{G1} - P'_{G1}$$

$$\Delta P_2 = P_{G2} - P'_{G2}$$

onde:

P'_{G1} e P'_{G2} - Potências de saída das máquinas, durante a perturbação.

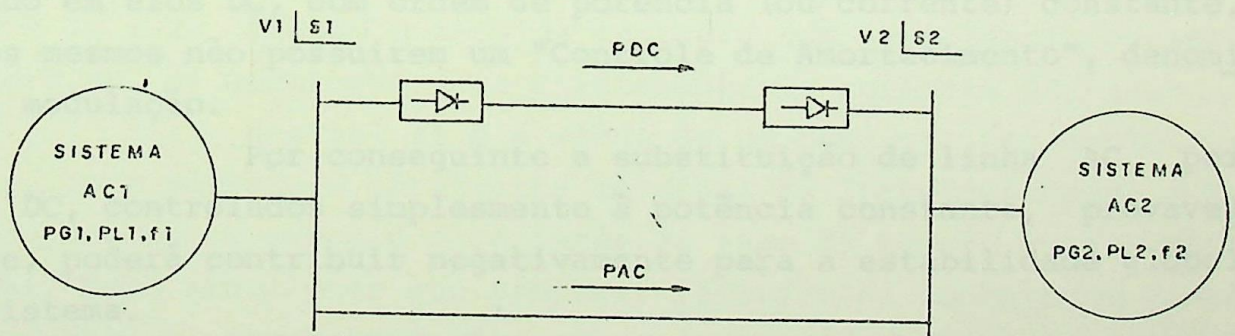


FIGURA 4.12- Sistema hipotético, constituído de dois sistemas AC, interligados por um elo DC em paralelo com uma linha AC.

Devido a falta no sistema AC₂, há uma queda de tensão no sistema global (AC₁, AC₂ e nas barras de interligação), causando uma diminuição nas potências elétricas de saída das máquinas P_{G1} e P_{G2} , que passam a fornecer P'_{G1} e P'_{G2} .

Como as potências mecânicas das máquinas PG_1 e PG_2 , são mantidas constantes devido a lentidão de atuação dos reguladores de velocidade, ocorre um desequilíbrio de potências no sistema ΔP_1 e ΔP_2 . Como ΔP_1 e ΔP_2 são positivos, os dois sistemas tenderão a acelerar. Absorvendo as diferenças de potências sob forma de aumento da energia cinética das máquinas, ou seja, as máquinas tenderão a acelerar.

Caso a aceleração de AC_2 , seja maior que de AC_1 , a diferença angular $(\delta_1 - \delta_2)$ diminuirá, forçando a potência transmitida

$$PAC = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \cdot \text{sen}(\delta_1 - \delta_2),$$

também a diminuir, injetando assim menos potência no sistema AC_2 , e conseqüentemente, diminuindo a potência elétrica fornecida pelo sistema AC_1 . Em conseqüência desta diminuição, da potência fornecida por AC_1 , o desequilíbrio ΔP_1 , aumentará forçando, com isto, uma aceleração no sistema AC_1 e uma desaceleração no sistema AC_2 .

Nota-se claramente, que a linha AC (figura 4.12), possui um caráter estabilizador, tentando, caso a frequência f_2 seja maior que a frequência f_1 , diminuir a potência injetada no sistema AC_2 , ou aumentá-la em caso contrário ($f_1 > f_2$).

Este efeito estabilizador, entretanto, não é verificado em elos DC, com ordem de potência (ou corrente) constante, se os mesmos não possuírem um "Controle de Amortecimento", denominado modulação.

Por conseguinte a substituição de linha AC por elos DC, controlados simplesmente à potência constante, provavelmente, poderá contribuir negativamente para a estabilidade global do sistema.

Com a introdução da modulação no elo DC, esta situação pode ser contornada, desde que, esta esteja devidamente calibrada, ou seja, se AC_2 acelera em relação a AC_1 , PDC deve diminuir, aumentando ΔP_1 em AC_1 e diminuindo ΔP_2 em AC_2 , ou vice-versa, procurando sempre fazer $f_1 - f_2$ tender a zero, da maneira mais rápida possível.

Procedimento análogo toma lugar para faltas no sistema AC_1 .

Para faltas na linha paralela AC, ocasionando desligamento da mesma, e como conseqüência provocando aceleração no

sistema AC_1 e desaceleração no sistema AC_2 . Nesta situação, somente o elo DC tentará manter o sincronismo entre os dois sistemas (AC_1 e AC_2). Dependendo da potência máxima permitida ao elo DC, a modulação positiva (aumento de PDC) pode ou não ser efetiva na tentativa de manutenção do sincronismo entre os sistemas. Em todo o caso, se só for permitida modulação no sentido negativo (diminuição de PDC), o elo DC, ainda assim contribui consideravelmente para o amortecimento das oscilações.

Assim como em alguns sistemas existentes no mundo, qualquer sistema híbrido AC/DC pode auxiliar sua parte AC, bastando para isto que sua potência máxima seja projetada em conjunto com a modulação positiva adequada, visto que a modulação negativa não contém restrições no seu âmbito de atuação.

No entanto, o caso em que a influência benéfica da modulação é fortemente sentida, situa-se no de elos DC entre dois sistemas AC isolados eletricamente [21], isto é, sem linha paralela AC.

4.4.2 Considerações Práticas a respeito da modulação

A potência de regime a ser transmitida pelo elo DC, P_0 é determinada pelo despacho de carga. A modulação da corrente DC (quando o controle for de corrente constante) ΔI , é o valor que se adiciona ao de I_0 , ficando a nova ordem de corrente igual a $I_d = I_0 + \Delta I$. Quando o tipo de controle for de potência constante, o sinal de modulação atua diretamente na potência DC, ΔP .

O sinal ΔI é a saída de um conjunto de amplificadores, cuja entrada é geralmente um sinal de frequência puro ou derivado (como por exemplo a variação da fase da tensão numa dada barra). Este sinal pode ser simples, retirado de somente uma barra conversora, ou composto da diferença de sinais entre o retificador e o inversor. A seleção da melhor alternativa depende dos problemas apresentados pelo sistema em estudo.

Na figura (4.13) apresenta-se um diagrama de iteração [17] da modulação com a ordem de corrente. Assumindo-se que o controle principal ("Master Control") esteja situado junto ao terminal inversor, que é o caso no qual o sistema gerador é uma usina isolada (caso de Itaipu).

O sinal de controle correspondente a ordem I_d , deverá atingir ambas as estações "simultaneamente", principalmente

se ela atuar no sentido de diminuir a margem de corrente. O atraso devido ao envio do sinal pelo canal de telecomunicação, pode ser compensada no outro terminal (no caso da figura 4.13, seria o inversor) mediante um atraso forçado, até que haja confirmação do recebimento, pelo terminal distante (no caso, o retificador).

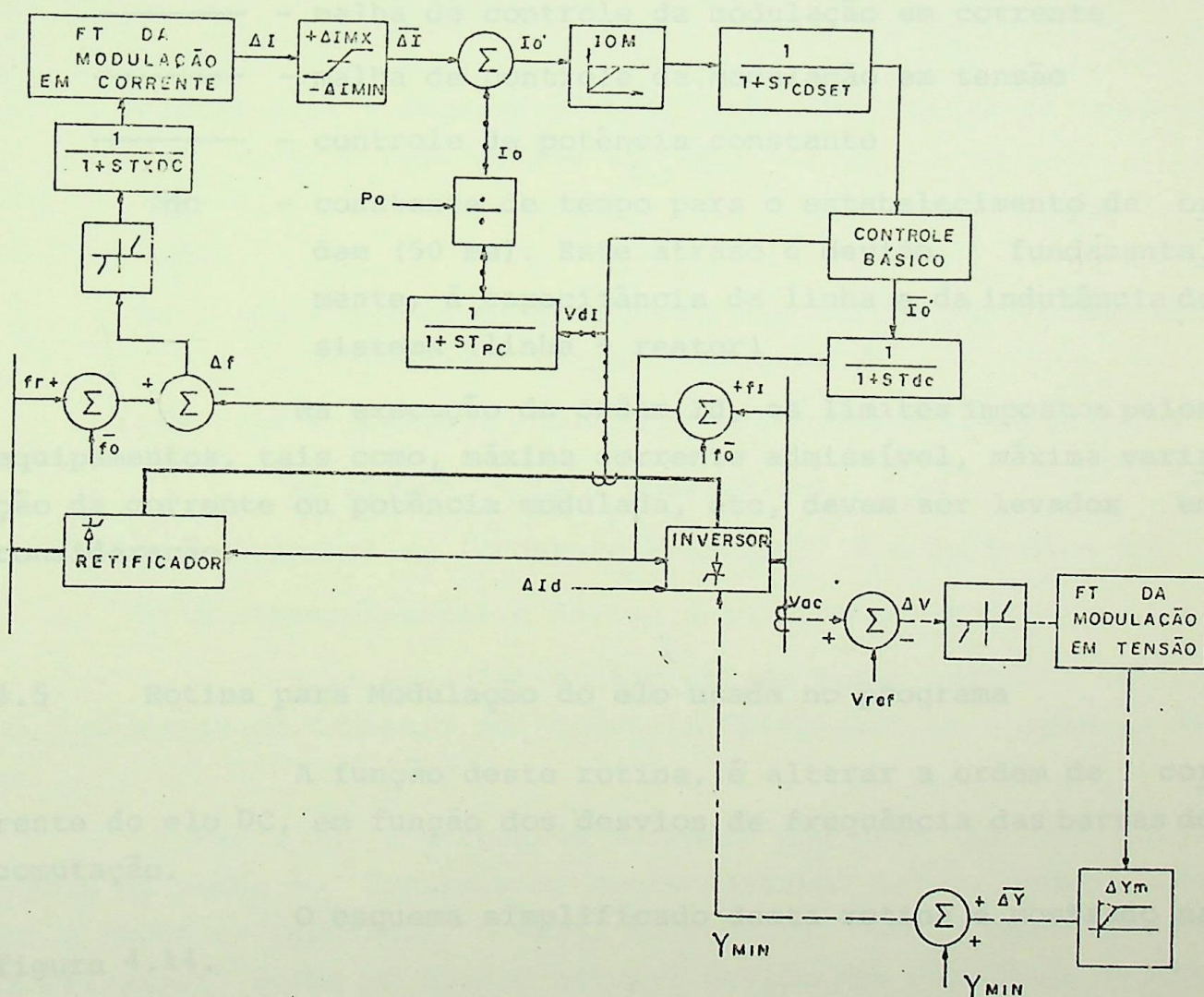


FIGURA 4.13 - Diagrama simplificado do "Master Control" [17]

Na figura 4.13, têm-se:

TXDC - constante de tempo, em segundos, do sistema de aquisição do(s) valor(es) da(s) frequência(s) na(s) barra(s) do(s) conversor(es) utilizado(s) no processo de modulação do elo.

TPC - constante de tempo, em segundos, do processo de medição de tensão V_d (do terminal inversor) para o controle de potência constante do elo.

TCDSET - constante de tempo, em segundos, para transmissão da ordem de corrente, até os controles de polo ("Telecom delay").

————— - sistema de transmissão em corrente contínua

————— - malha de controle da modulação em corrente

----- - malha de controle da modulação em tensão

—•—•—•— - controle de potência constante

τ_{dc} - constante de tempo para o estabelecimento da ordem (50 ms). Este atraso é devido, fundamentalmente, à capacitância da linha e da indutância do sistema (linha + reator)

Na execução da ordem I_d , os limites impostos pelos equipamentos, tais como, máxima corrente admissível, máxima variação da corrente ou potência modulada, etc, devem ser levados em consideração.

4.5 Rotina para Modulação do elo usada no programa

A função deste rotina, é alterar a ordem de corrente do elo DC, em função dos desvios de frequência das barras de comutação.

O esquema simplificado desta rotina é mostrado na figura 4.14.

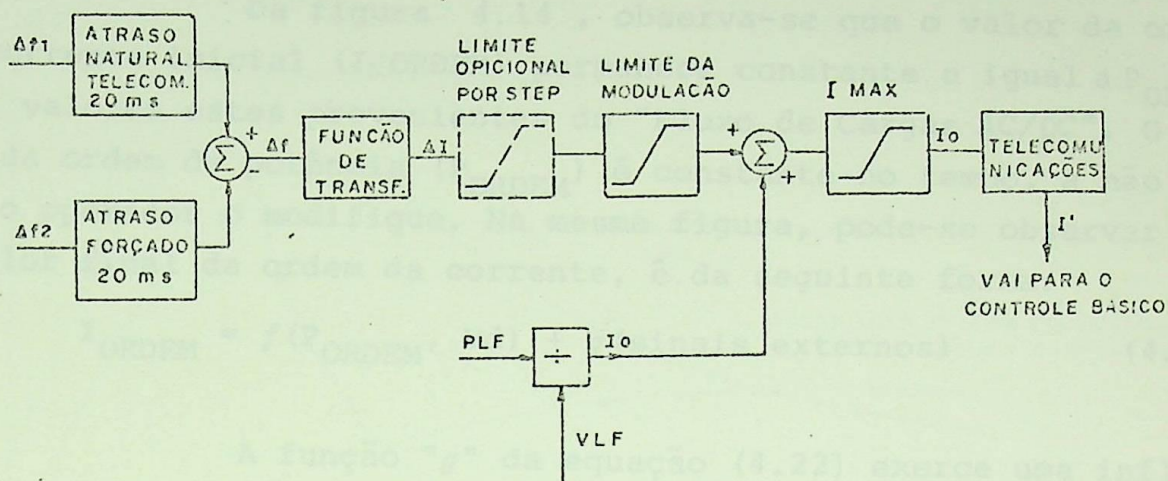


FIGURA 4.14 - Esquema simplificada para rotina de modulação do elo CC [17]

onde:

Δf_1 , Δf_2 = desvio de frequência das barras retificadora e inversora respectivamente.

PLF, VLF = potência e tensão provenientes do fluxo de carga.

Da figura 4.14, observa-se:

- o terminal do "Controle Principal" é o de índice 2
- o atraso natural é devido a telecomunicação.

Para amostrar sinais Δf_i no mesmo instante de tempo, coloca-se no terminal de "Controle Principal" um atraso de 20 ms.

c) Desde que a margem de corrente não pode ser violada, os sinais de saída do "Controle de Amortecimento" devem, juntos, chegar a ambos os terminais. O sinal do terminal oposto ao do "Controle Principal" sofre um atraso natural devido aos canais de telecomunicação. O valor deste é da ordem de 20 a 30 ms para uma linha de transmissão de comprimento médio. Por conseguinte o sinal proveniente do terminal no qual o "Controle Principal" se localiza, é atrasado propositadamente no mesmo valor, para que as informações atinjam os seus objetivos simultaneamente (TCDSET na figura 4.13), ou seja, a ordem de corrente deve atingir ambas as estações

conversora ao mesmo tempo.

4.5.1 Função de transferência da modulação

Da figura 4.14, observa-se que o valor da ordem de corrente inicial ($I_{0\text{ORDEM}}$) permanece constante e igual a P_{ORDEM}/V_d , valores estes provenientes do "Fluxo de Cargas AC/DC". O valor da ordem de potência (P_{ORDEM}) é constante no tempo, a não ser que o operador o modifique. Na mesma figura, pode-se observar que o valor final da ordem da corrente, é da seguinte forma:

$$I_{\text{ORDEM}} = f(P_{\text{ORDEM}}, V_d) + g(\text{siniais externos}) \quad (4.22)$$

A função "g" da equação (4.22) exerce uma influência sobre I_{ORDEM} denominada MODULAÇÃO. Portanto o valor de I_{ORDEM} tem duas componentes básicas: uma de regime (f) e uma transitória (g).

Dentre os sinais utilizados como variáveis da função "g" destacam-se os de frequência das barras de comutação (figura 4.13).

A função "g" é representada por uma função de transferência FT que é, em geral, da seguinte forma [17]:

$$FT = \frac{K \cdot S (1 + ST_4)}{(1 + ST_1) (1 + ST_2) (1 + ST_3)} \quad (4.23)$$

onde:

K = ganho de FT

T_1, T_2, T_3, T_4 = constantes de tempo em segundos

Convém ressaltar que a resposta de "g" (ΔI) deve ter uma característica não retentiva e de forte atuação no princípio, para a resposta ao degrau. Com isto, aconselha-se a utilização de um polo duplo no projeto da função "g", conforme a figura 4.15.

É conveniente ressaltar que, a utilização de um zero em T_4 , não só reforça os efeitos desejados mencionados, como melhora a resposta em frequência, eliminando frequências espúrias na corrente DC para altas frequências, como ilustra a figura 4.15.

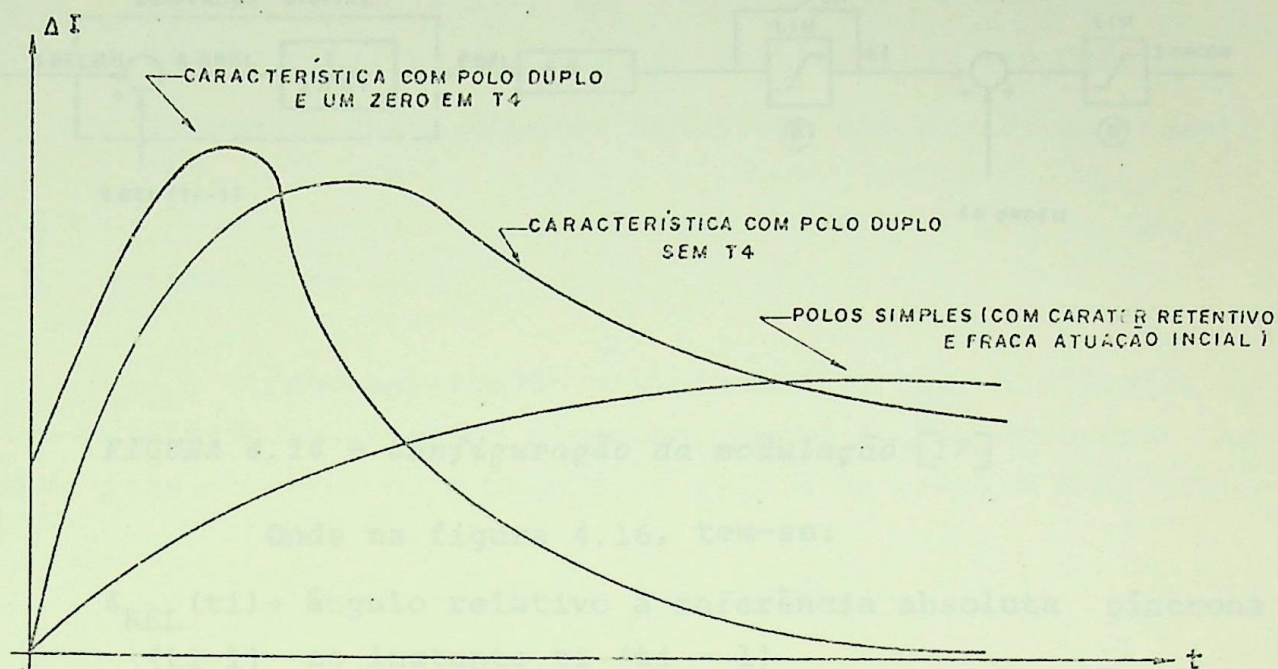


FIGURA 4.15 - Resposta da função $g(\Delta I)$, a um degrau unitário [17]

De acordo com as últimas pesquisas realizadas quanto a escolha da melhor função de transferência para modulação de interconexões de corrente contínua em sistemas AC, verificou-se [34] que funções do tipo:

$$\frac{KS}{(1 + ST_1) (1 + ST_2)}$$

ou

$$\frac{K \cdot S (1 + ST_4)}{(1 + ST_1) (1 + ST_2) (1 + ST_3)}$$

são as que melhor estabelecem as condições de operação do sistema global, favorecendo, tanto a estabilidade dinâmica quanto a transitória, para a seguinte configuração de modulação (figura 4.16).

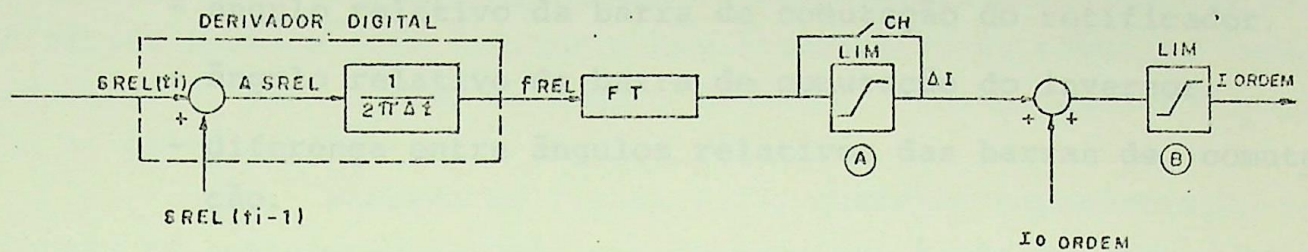


FIGURA 4.16 - Configuração da modulação [17]

Onde na figura 4.16, tem-se:

$\delta_{REL}(ti) \rightarrow$ ângulo relativo a referência absoluta síncrona
(ti-1) no instante ti (ti - 1)

FT $\rightarrow$ função de transferência

ΔI $\rightarrow$ variação da ordem de corrente

(A) $\rightarrow$ limitador da variação da ordem de corrente (opcional)

I_{0ORDEM} $\rightarrow$ ordem de corrente pré-falta

(B) $\rightarrow$ limitador da ordem de corrente

I_{ORDEM} $\rightarrow$ ordem de corrente atual.

4.5.2 Escolha do sinal de entrada - δ_{REL}

Dentre os ângulos possíveis para a utilização como entrada do sistema de modulação, apresentam-se os seguintes:

- de eixo das máquinas
- das barras
- diferença entre duas barras quaisquer do sistema

O ângulo de eixo das máquinas não foi adotado, embora melhor represente as oscilações do sistema, por não ser usual na prática, devido a distorções nas medidas ocasionadas pela frequência natural de oscilações dos eixos das máquinas [21].

Dependendo da configuração do sistema será escolhido o melhor sinal de entrada que se adapte ao mesmo. O programa tem previsão para os seguintes sinais:

- ângulo relativo da barra de comutação do retificador.
- ângulo relativo da barra de comutação do inversor.
- diferença entre ângulos relativos das barras de comutação.

4.5.3 Definição de δ_{REL}

Como mencionado anteriormente, δ_{REL} é o ângulo relativo a referência absoluta síncrona. Nesta seção, apresenta-se um modo para obter-se este ângulo, o qual é da maneira como segue:

$$[\delta_{REL}]_i = [\delta_{ABS}]_i - \omega_0 (t_i - t_0) \quad (4.24)$$

para $t_i > t_0$

onde:

$[\delta_{ABS}]_i \rightarrow$ ângulo absoluto no instante

$$[\delta_{ABS}]_i = \int_{t_0}^{t_i} \omega_i dt + \delta_0 \quad (4.25)$$

$\omega_0 \rightarrow$ velocidade angular da referência síncrona em t_0 - na falta

$t_i \rightarrow$ instante de tempo

$t_0 \rightarrow$ instante de falta ou religamento

$\omega_i \rightarrow$ velocidade angular para o instante t_i

$\delta_0 \rightarrow$ ângulo fasorial em t_0 .

logo:

$$[\delta_{REL}]_i = \int_{t_0}^{t_i} (\omega_i - \omega_0) dt + \delta_0 \quad (4.26)$$

Desde que não haja mudança topológica no circuito a equação anterior (4.26) é perfeitamente válida tanto para o ângulo de máquina quanto para o de barra.

No caso de faltas ou religamento a equação (4.26), é válida somente para indicar o ângulo relativo da máquina, sendo necessário, para o caso de ângulo de barra, reinicializar o ângulo δ_0 de $t_0 -$ para $t_0 +$.

Baseado na figura 4.17, qualquer representação de função de transferência pode ser conseguida, bastando para isso que sejam zeradas as constantes não desejadas.

4.5.4 Função de transferência

A figura 4.17 mostra a representação analítica da função de transferência.

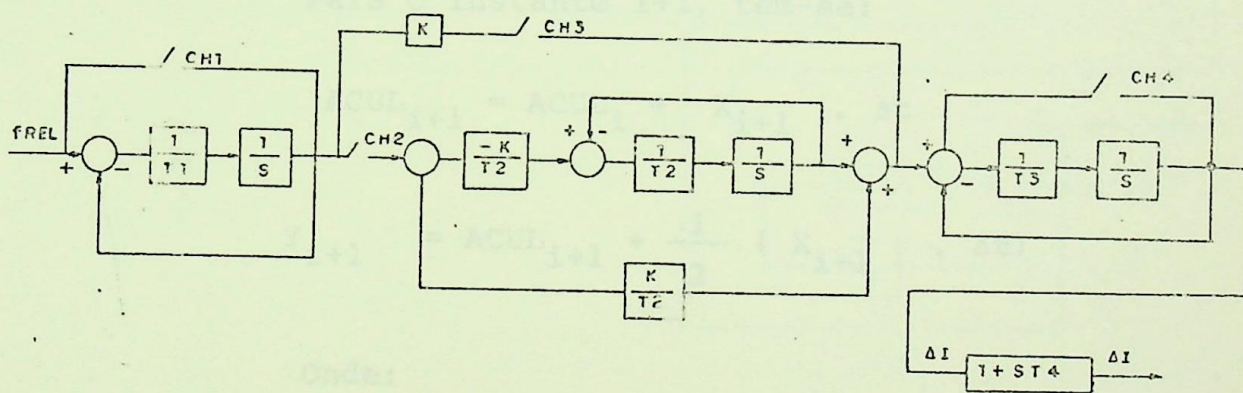


FIGURA 4.17 - Representação analítica da função de transferência, equação (4.23) [17]

Onde na figura 4.17, tem-se:

f_{REL} → frequência relativa [Hz]

T_1, T_2, T_3, T_4 → constantes de tempo [SEG]

K → ganho [PU.AMP/Hz]

ΔI → variação de corrente [PU.AMP]

$\frac{1}{S}$ → integrador

S → derivador

4.5.5 Representação dos integradores

Dentre os métodos utilizados para integração digital o de "TUSTIN" revelou-se eficiente, preciso e simples, não comprometendo o custo computacional. A figura 4.18 representa o método.

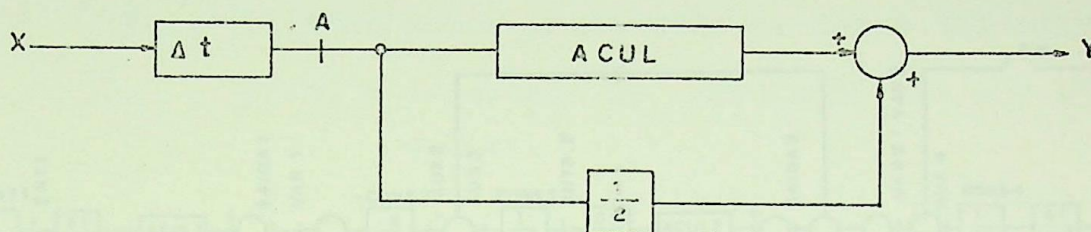


FIGURA 4.18 - Integração pelo método de "TUSTIN"

Para o instante $i+1$, tem-se:

$$ACUL_{i+1} = ACUL_i + X_{i+1} \cdot \Delta t$$

$$Y_{i+1} = ACUL_{i+1} + \frac{1}{2} (X_{i+1} \cdot \Delta t)$$

Onde:

Δt = passo de integração

$$X_i = \frac{dy_i}{dt}$$

$ACUL_i$ = valor do acumulador para o instante i .

Ao acumulador é estabelecido valor inicial zero, logo após a rotina de leitura de dados DC.

4.5.6 Representação digital da função de transferência

Baseado no esquema da figura 4.19, fica estabelecido o diagrama de blocos da simulação digital para a função de transferência sem um zero em T^4 . Para obtermos a saída ΔI no instante t_i , o ciclo de processamento $f_{REL}/\Delta I$ deve ser realizado tantas vezes quanto for o valor de IVZ, figura 4.19, [17]. O valor de IVZ é direta

to, para $N \leq 2 \rightarrow K = 3$

$N > 2 \rightarrow K = 1$

$IVZ = K \cdot NPOLO \cdot R$

Onde:

$NPOLO$ = número de polos da FT

R = relação entre intervalos de tempo ($DT/DTING$)

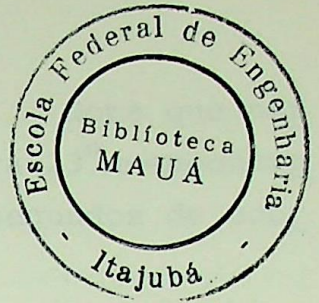
$DTING$ = intervalo de integração das equações de máquinas.

DT = intervalo de tempo utilizado para controlar as iterações da parte AC com a rotina DC.

Convém notar que, a variável DT controla o número de vezes que a rotina DC é chamada para interagir com a parte AC.

No programa desenvolvido, seu valor é um dado de entrada, e é o mesmo utilizado para controlar o tempo de impressão dos resultados (variável "PINT" no programa de Estabilidade transitória da EFEI [1]).

CAPÍTULO V



RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.1 Introdução

Como o objetivo deste trabalho é obter informações da experiência adquirida na implementação do modelo desenvolvido na literatura técnica [17] do elo de Transmissão em Corrente Contínua para programas de Estabilidade Eletromecânica es colheu-se para teste, o sistema mostrado nas figuras 5.1 e 5.17, com a finalidade de aquilatar os resultados obtidos.

Os parâmetros da linha e transformador, máquina, regulador de tensão e do elo de corrente contínua (elo DC), para o sistema da figura 5.1, são representados nas tabelas (5.1), (5.2), (5.3), (5.4) e (5.5) respectivamente.

O banco de filtros colocado nas barras 1 e 2 totalizando 5050 [MVAR], tem o objetivo de procurar eliminar as harmônicas do sistema AC e fornecer parte do reativo para os conversores.

O elo de transmissão em corrente contínua representa um polo de um sistema bipolar com capacidade de 2500 [MW]. Tal sistema possui controles de corrente e ângulo de extinção constantes. Os conversores são conectados no sistema AC através de transformadores com taps variáveis sob carga.

Discute-se a estabilidade transitória do sistema quando um curto circuito trifásico é dado na barra 2 com duração de 100 [mseg] antes dos disjuntores operarem para removê-lo.

Durante a falta há um bloqueio do elo DC e nenhuma potência é transmitida pelo mesmo, como pode ser observado na listagem emitida pelo programa (Apêndice D).

5.2 Resultados e Conclusões

A figura 5.3 mostra a variação do ângulo interno da máquina com o tempo ($\delta = f(t)$), sem utilizar modulação de potência do elo DC. Note que nesta situação encontra-se um ângulo de 13.9° no primeiro swing após 0,3 segundos de ocorrência da falta, e o ângulo inicial (pré-falta) é de 10.65° .

A figura 5.4 mostra a característica $\delta = f(t)$ com

o elo DC substituído por uma linha AC equivalente. Note que nesta situação o ângulo inicial (pré-falta) passa para 23° e encontra-se um ângulo de 30° no primeiro swing após 0,45 segundos de ocorrência da falta.

A figura 5.5 por outro lado, mostra a mesma característica $\delta = f(t)$ para o sistema com o elo DC, e usando um circuito de controle externo (modulação). As funções de transferência usadas pelo circuito externo, foi vista com detalhes no capítulo IV. De maneira a facilitar a análise do desempenho destas funções, far-se-á um breve resumo das funções usadas no estudo.

- forma geral da Função de Transferência

$$FT = \frac{KS (1 + ST_4)}{(1 + ST_1) (1 + ST_2) (1 + ST_3)}$$

- função F_1 : $T_4 = T_2 = T_3 = 0$

$$F_1 = \frac{KS}{1 + ST_1}$$

- função F_2 : $T_4 = T_3 = 0$

$$F_2 = \frac{KS}{(1 + ST_1) (1 + ST_2)}$$

- função F_3 : $T_4 = 0$

$$F_3 = \frac{KS}{(1 + ST_1) (1 + ST_2) (1 + ST_3)}$$

- função F_4

$$F_4 = \frac{KS (1 + ST)}{(1 + ST_1) (1 + ST_2) (1 + ST_3)}$$

A figura 5.5 mostra o desempenho no sistema em análise utilizando-se a função F_4 para o circuito de controle externo, e como sinal de entrada a variação de frequência e tensão da barra do inversor. Nota-se na figura 5.5, claramente, a influência do circuito de controle externo para estabilizar o sistema. Toda

via o primeiro swing é similar ao da figura 5.3, devido a baixa tensão AC impedindo a potência DC de alcançar ou exceder o valor desejado. Os valores específicos dos ganhos e constantes de tempo utilizados são também apresentados na figura 5.5, mas cabe ressaltar que tais valores são características do problema particular em análise.

O efeito da mudança de funções para o circuito externo é sentido nas figuras 5.6, 5.7 e 5.8 notando assim a superioridade em termos de controle das funções F_3 e F_4 sobre F_1 e F_2 para o sistema em estudo.

Para os casos citados, o elo DC atuou com controle de potência constante, ou seja, comportou-se como uma carga de potência constante para o sistema AC.

Quando o elo DC atua com controle de corrente constante, ou seja, comporta-se como uma carga de corrente constante para o sistema AC, há uma oscilação de $\delta = f(t)$, maior no segundo swing a uma oscilação menor no terceiro swing. Também nota-se que as funções de transferência F_2 , F_3 e F_4 comportam-se da mesma maneira, para o sistema em particular e a função F_1 comporta-se, praticamente do mesmo modo que no caso do controle em potência constante, como ilustram as figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12.

Para observar-se o desempenho do elo DC, por um período maior, efetuou-se quatro simulações por um período de 10 segundos, nas seguintes condições:

- i - elo DC substituído por linha AC equivalente, figura 5.13.
- ii - sistema AC com elo DC sem modulação e controle de potência constante, figura 5.14.
- iii - sistema AC com elo DC modulando tensão e com controle de potência constante, figura 5.15.
- iv - sistema AC com elo DC modulando potência e tensão e com controle de potência constante, figura 5.16.

Para o sistema em particular, as melhores condições operacionais são obtidas com as funções F_3 e F_4 e com modulação combinada de potência e tensão respectivamente. Observa-se também que para o elo DC sem modulação, as condições de estabilidade do sistema tendem a piorar, por ser o elo DC uma carga de potência ou corrente constante para o sistema AC.

Para observar-se o desempenho do programa desenvolvido, efetuou-se algumas simulações com um sistema de maior porte que o da figura 5.1. Este sistema está ilustrado nas figuras 5.17 e 5.18 e os resultados obtidos para uma falta trifásica na barra 3, através de uma impedância de falta $Z_F = 0 + j0,01 \text{ [p.u.]}$ durante 100 [mseg], considerando o elo DC com modulação e sem modulação e controle de potência constante, estão apresentados nas figuras 5.19 a 5.30. O elo DC usado neste sistema, apresenta as mesmas características do elo DC usado no sistema da figura 5.1 e as funções de transferências utilizadas para modulação do elo DC, foram F_2 , F_3 e F_4 .

Os dados do sistema e do elo DC utilizados nas simulações, estão ilustrados no apêndice D

Pelos resultados obtidos com o sistema de maior porte, nota-se claramente a influência da modulação na estabilidade do sistema e também o desempenho do programa desenvolvido.

Baseado nas figuras apresentadas, claramente nota-se um amortecimento, consideravelmente mais acentuado, nos sistemas com modulação, em particular, aqueles que usam as funções de transferência F_3 e F_4 .

Por serem os elos DC semelhantes as cargas de potência ou corrente constante quanto ao comportamento dinâmico, e baseado no efeito estabilizador inerente das linhas AC, obtêm-se oscilações menores no caso AC que em qualquer um dos casos com elo de corrente contínua. Este fato, vai de encontro a um consenso geral de que, na maioria dos casos, a introdução dos elos de corrente contínua com modulação, não afeta o primeiro swing das máquinas, podendo inclusive piorá-la [37], e, desde que a modulação seja devidamente ajustada, o comportamento dinâmico do sistema (2º swing em diante), melhora sensivelmente a estabilidade do sistema elétrico.

Entretanto, o comportamento transitório pode ser modificado, com o ajuste de outros parâmetros do sistema, sejam estes em corrente alternada ou com elos de corrente contínua. Como exemplo cita-se tempo de religamento AC ou velocidade de restabelecimento dos elos DC.

PARÂMETROS DE LINHA E TRANSFORMADORES					
DE	PARA	R	x	C	OBS.
1	2	0.00110	0.00630	0.0	
3	2	0.0	0.00140	0.0	

TABELA 5.1 - Parâmetros de linha e transformador (em PU,
 $P_{base} = 100 \text{ MVA}$ - $V_{base} = 345 \text{ KV}$)

PARÂMETRO	VALOR
	GERADOR (BARRA 3)
T'do (seg)	7.40
T"do (seg)	0.0
T"qo (seg)	7.40
Inércia H	31.66
x _d	0.8979
x _q	0.646
x' _d	0.2995
x' _q	0.646
x'' _d	0.2995
x'' _q	0.646
MVA _{base}	615.

TABELA 5.2 - Parâmetros da máquina ligada a barra 3.

OBS.: Os valores das reatâncias e da constante de inércia (H) são dados em PU, na base da máquina.

PARÂMETRO	VALOR
	GERADOR (BARRA 3)
K_A	400
T_A (seg)	0.05
T_B (seg)	0.0
T_F (seg)	1.0
$\dot{K}_E$	-0.24
T_E (seg)	0.95
T_D (seg)	0.0
V_{MAX}	4.14
V_{MIN}	-4.14
K_F	0.04
E_{FDMAX}	3.870
E_{FDMIN}	-3.870
$SE_{0.75MAX}$	0.484
SE_{MAX}	1.31

TABELA 5.3 - Dados relativo ao regulador de tensão da máquina ligada a barra 3.

PARÂMETROS DA LINHA DC			
DE	PARA	$R(\Omega)$	$X(mH)$
1	2	5.00	950.0

TABELA 5.4 - Parâmetro da linha de corrente contínua (incluindo reatores de alisamento).

DESCRIÇÃO	VALOR
Ordem de Potência (MW) ou Corrente (AMP.)	2500.
Corrente na Linha DC (AMP.)	4164.
ALPHA Ângulo de Ignição da Retificadora (GRÁUS)	14.06
GAMA Ângulo de Extinção da Inversora (GRÁUS)	17.0
Pr Potência Ativa na Retificadora (MW)	2500.
Qr Potência Reativa na Retificadora (MVAR)	1613.
Pi Potência Ativa na Inversora (MW)	-2415.00
Qi Potência Reativa na Inversora (MVAR)	1661.0
Rd Resistência da Linha DC (Ω)	5.00
Xcr Reatância de Comutação na Retificadora (Ω)	11.65
Xci Reatância de Comutação na Inversora (Ω)	11.71
Tensão Base do Elo DC (KV)	600.
Tr TAP do Transformador na Retificadora (PU)	0.797
Ti TAP do Transformador na Inversora (PU)	0.812

TABELA 5.5 - Parâmetros do Elo DC, por polo.

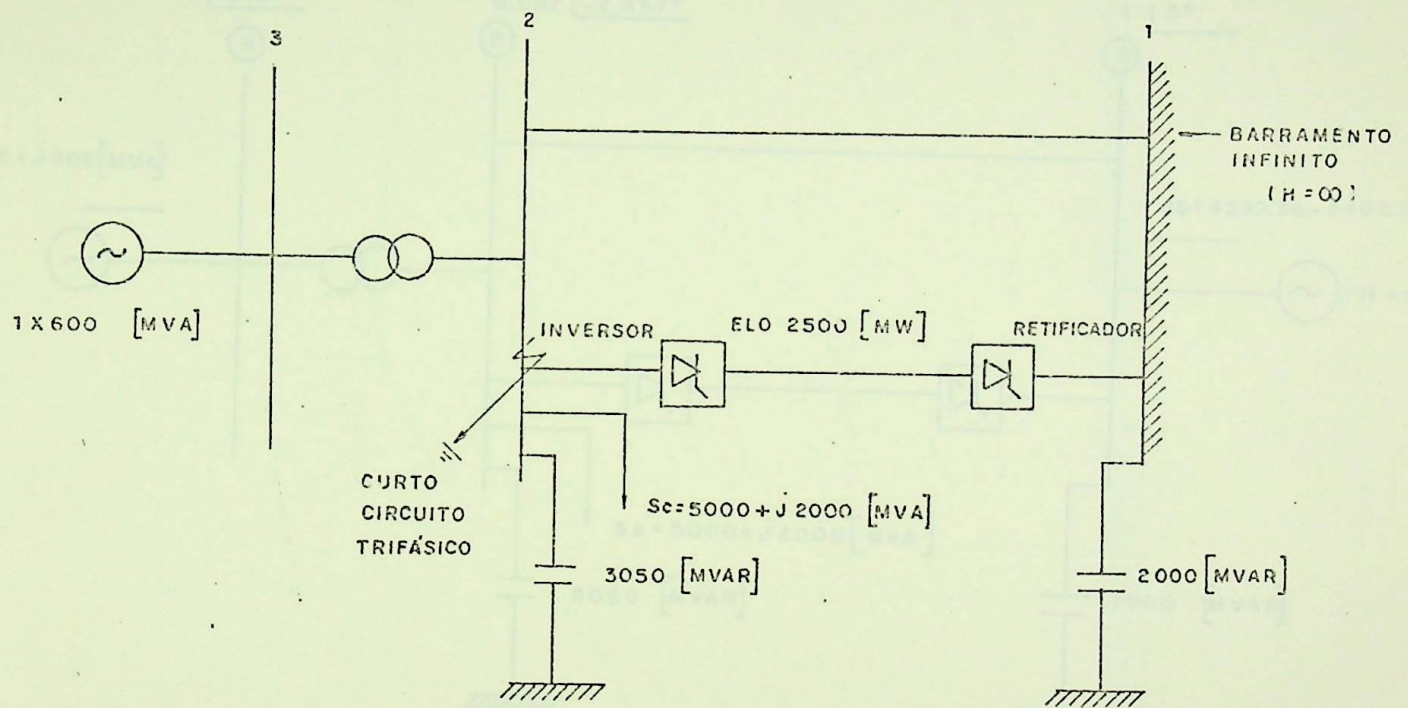


FIGURA 5.1 - Sistema em Análise

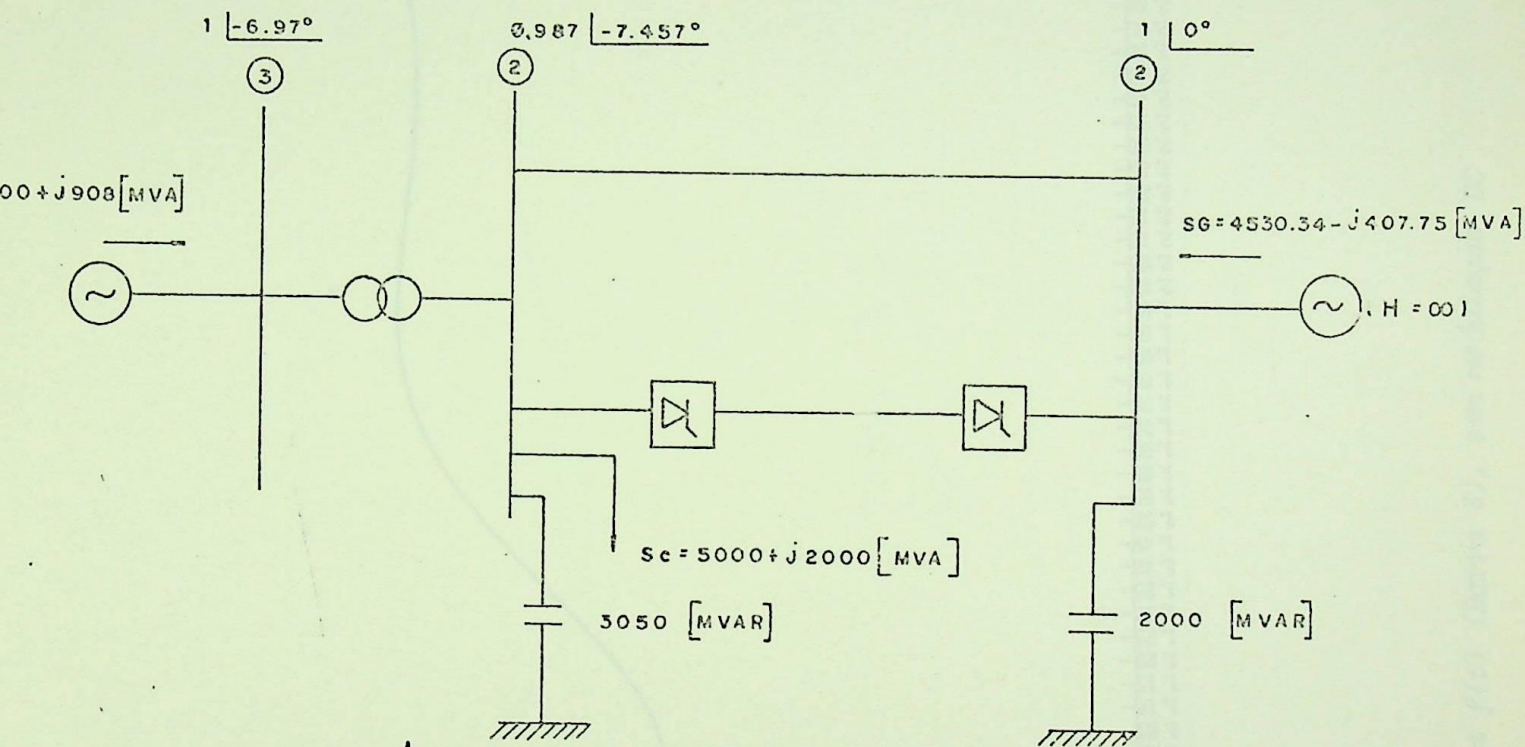


FIGURA 5.2 - Caso Base de Fluxo de Potência do Sistema .
Potência Ativa dada em [MW] e Potência Real
tiva em [MVAR] .

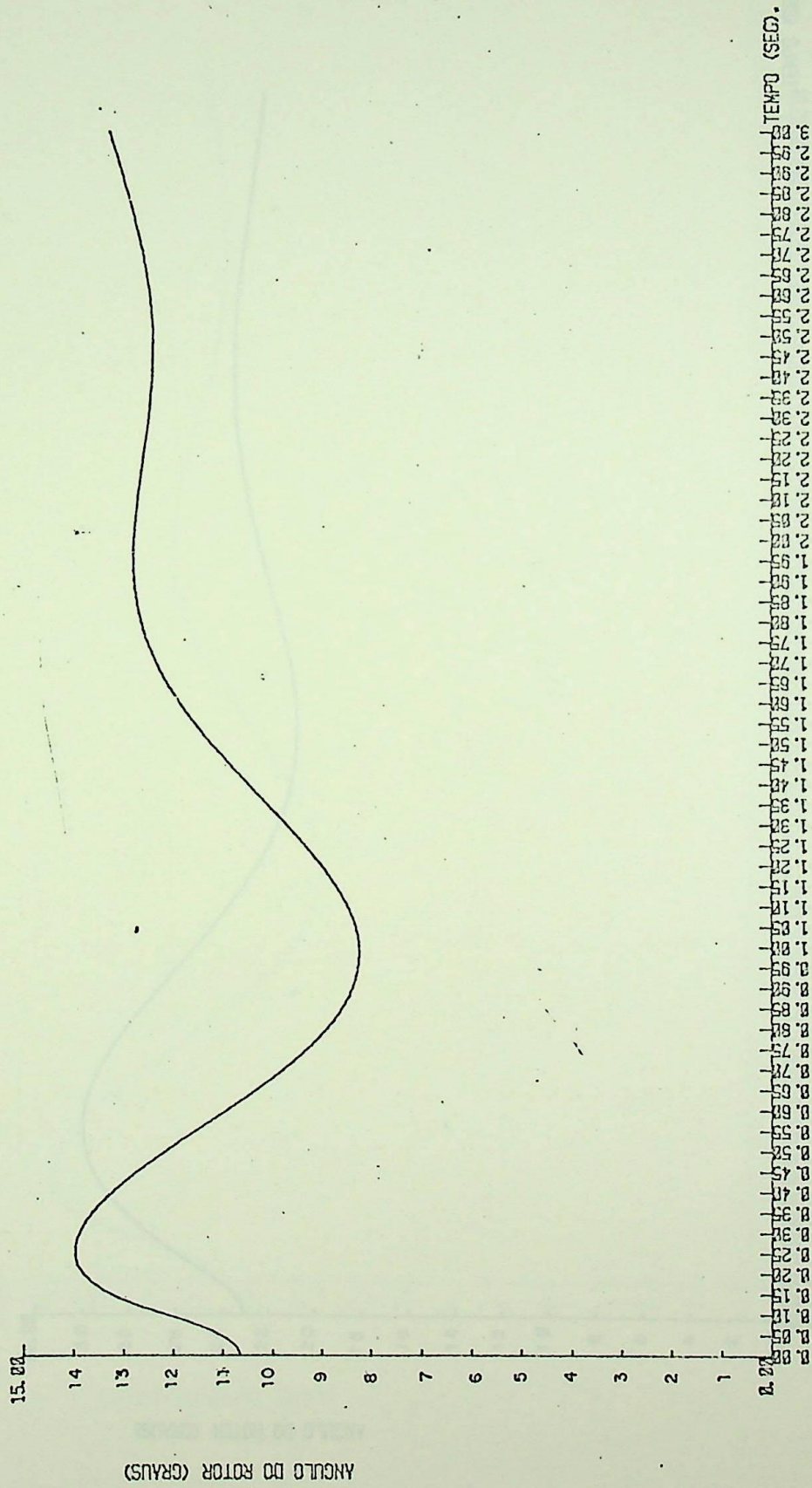


FIGURA 5.3 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), sem modulação DC

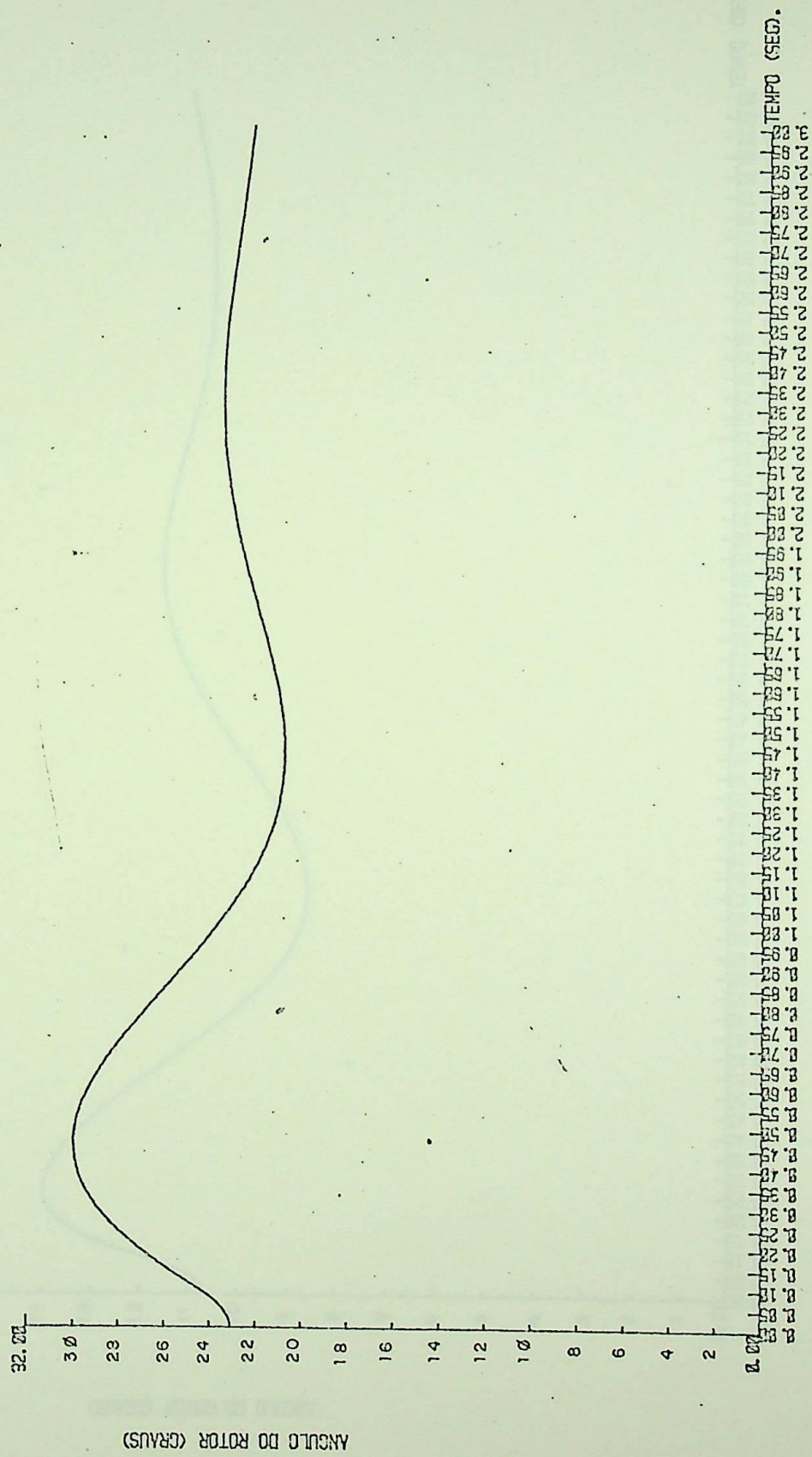


FIGURA 5.4 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), com elo DC substituído por linha AC equivalente

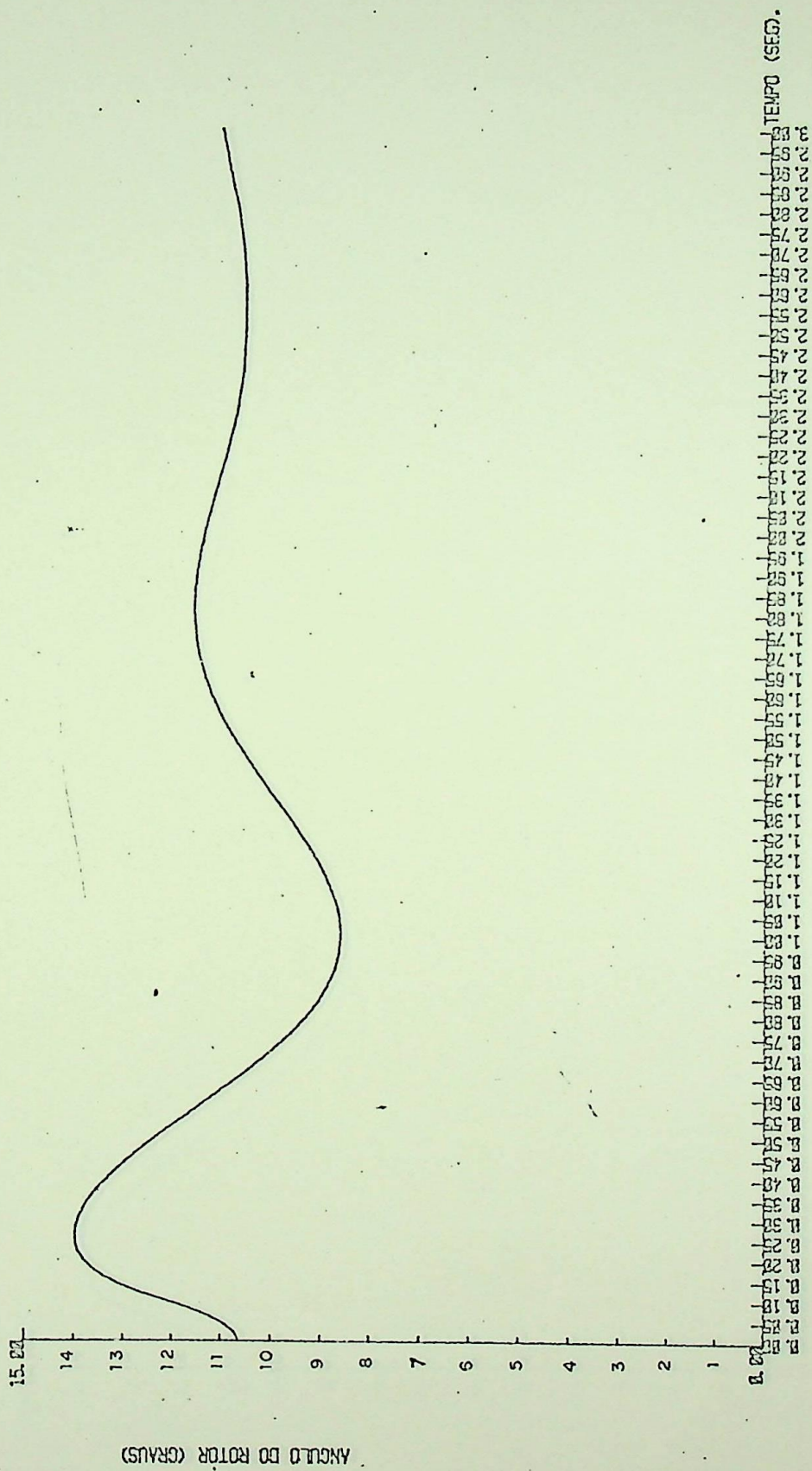


FIGURA 5.5 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Função de Transferência: F_4
- Modulação de Potência: $K_e = 400$, $T_1 = 0.113$, $T_2 = 0.053$, $T_3 = 0.032$, $T_4 = 0.020$
- Modulação de Tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.158$, $T_2 = 0.045$, $T_3 = 0.032$, $T_4 = 0.020$

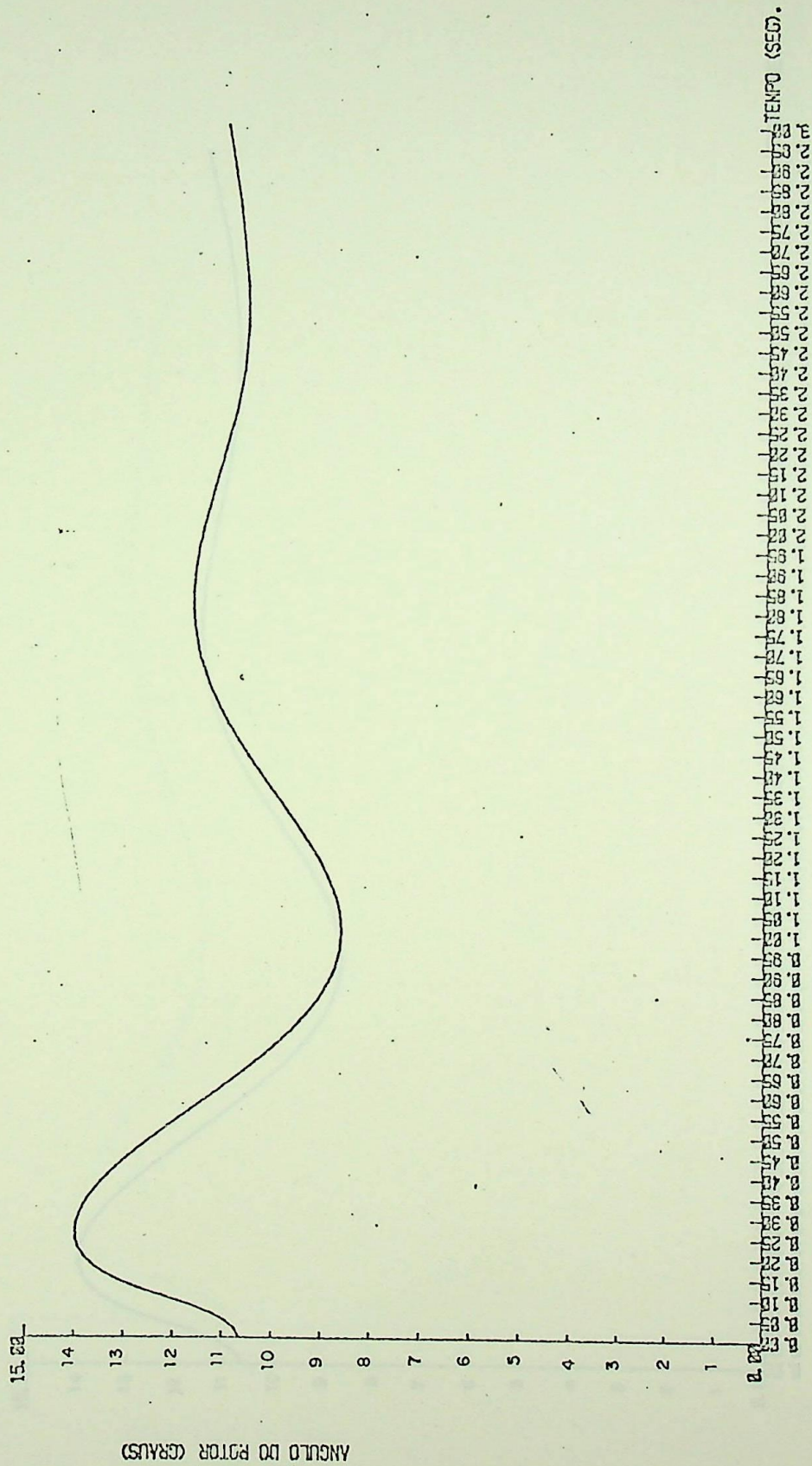


FIGURA 5.6 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de Transferência: $\bar{P}_3$
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de Potência: $K_c = 400$, $T_1 = 0.113$, $T_2 = 0.053$, $T_3 = 0.032$
- Modulação de Tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.158$, $T_2 = 0.045$, $T_3 = 0.032$

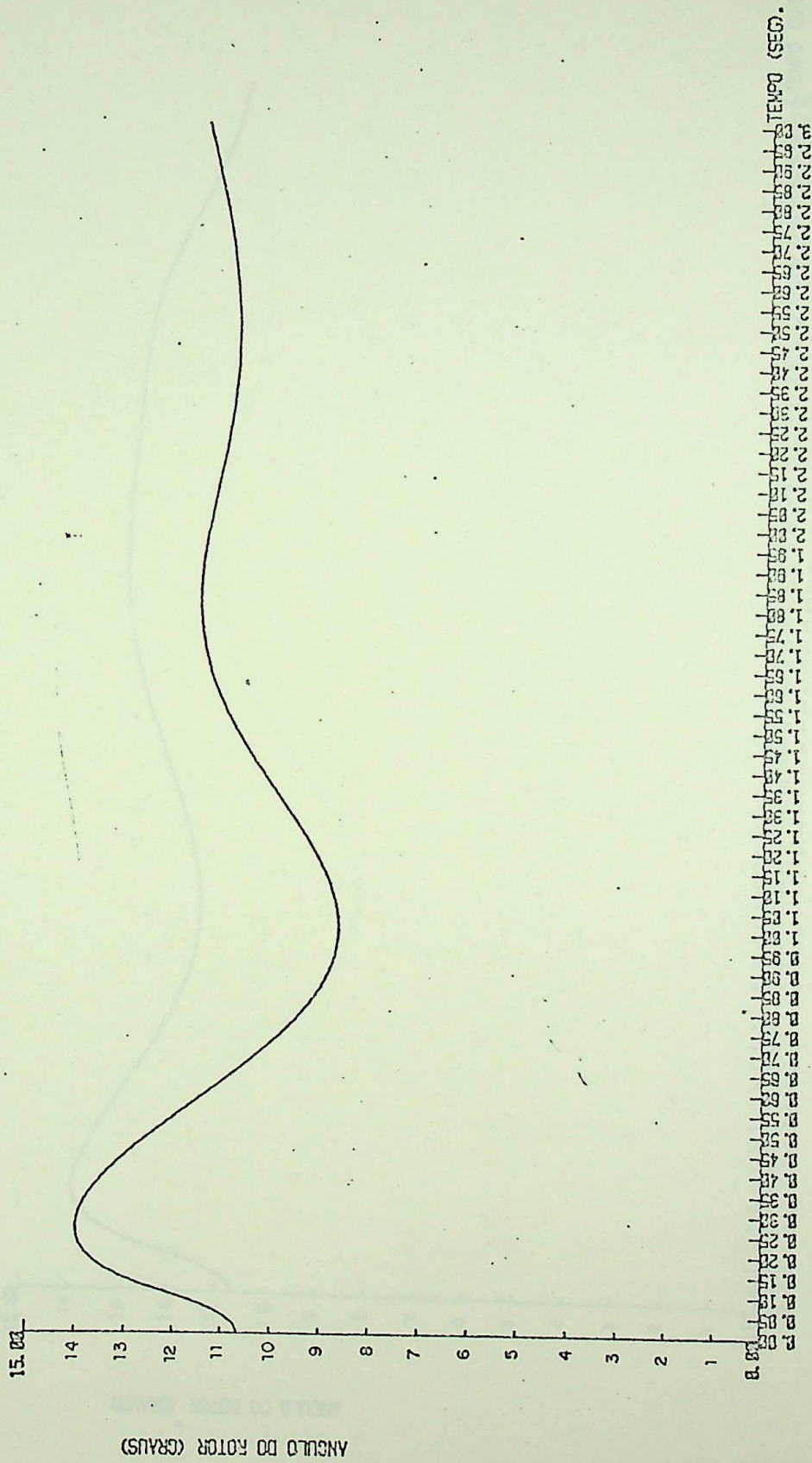


FIGURA 5.7 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de Transferência: F_2
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de potência: $K_c = 400$, $T_1 = 0.113$, $T_2 = 0.053$
- Modulação de tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.158$, $T_2 = 0.045$

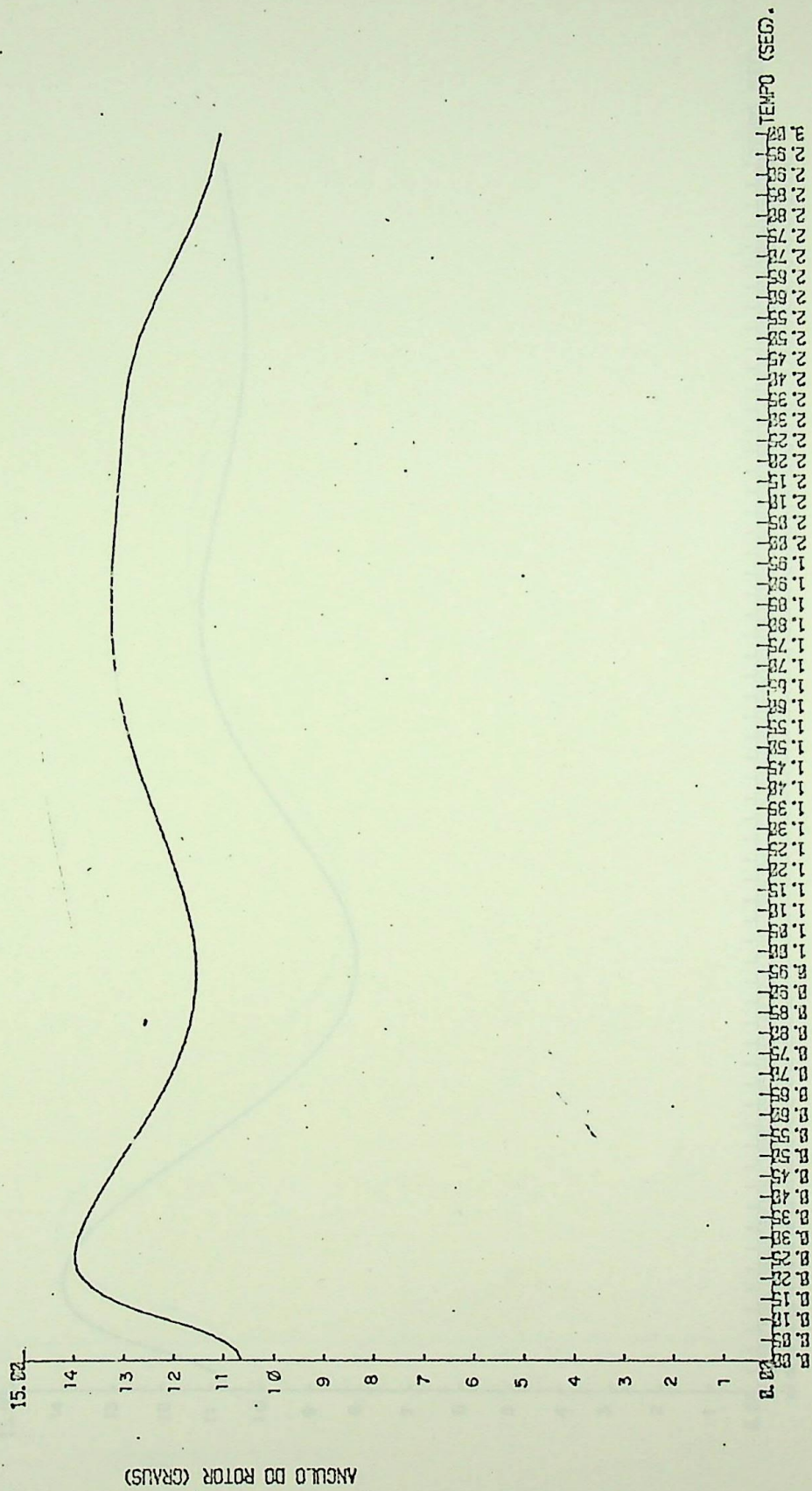


FIGURA 5.8 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_1
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de potência: $K_v = 400$, $T_1 = 0.113$
- Modulação de tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.158$

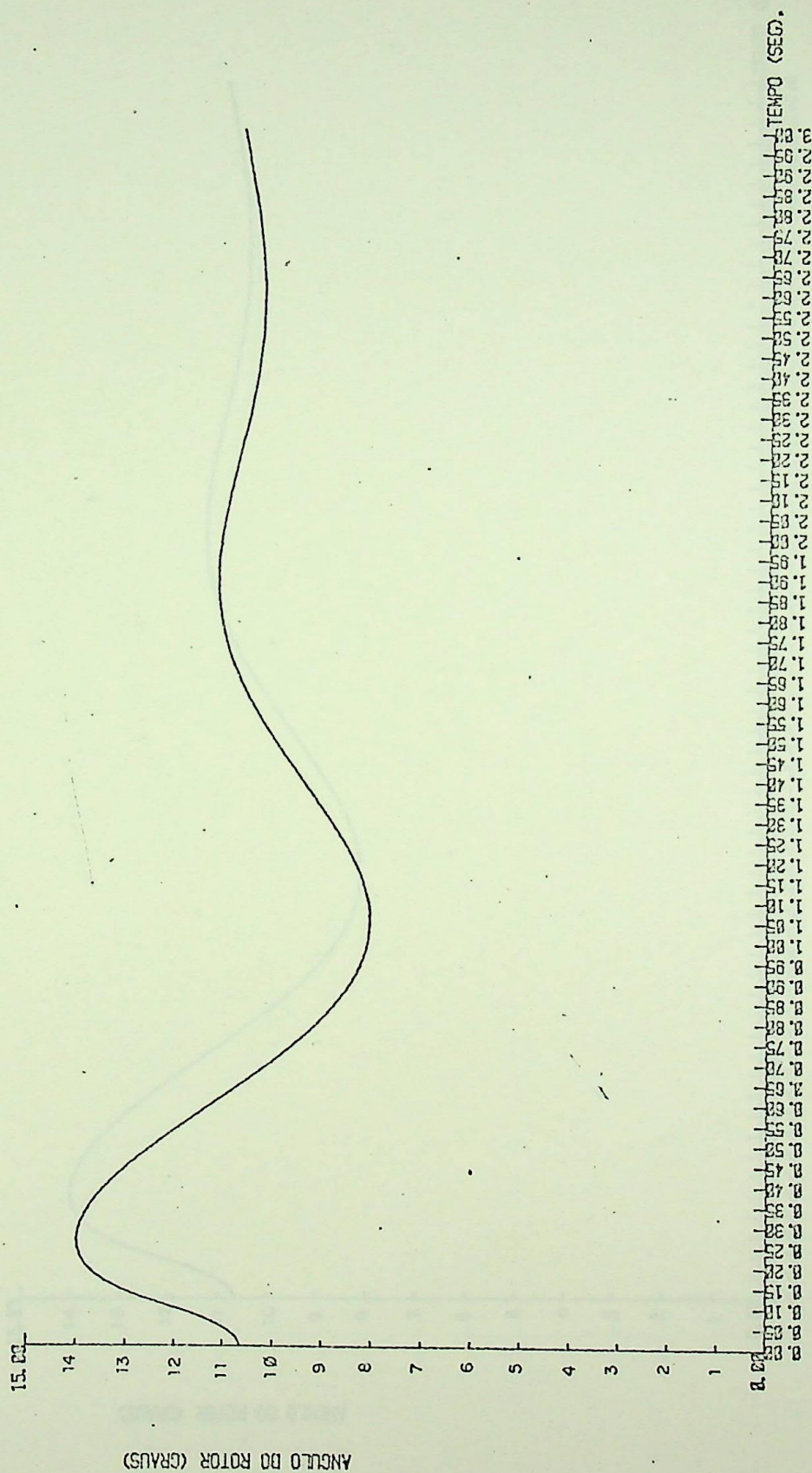


FIGURA 5.9 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de Transferência: F_4
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de potência: $K_3 = 400$, $T_1 = 0.115$, $T_2 = 0.053$, $T_3 = 0.032$, $T_4 = 0.020$
- Modulação de tensão: $K_3 = 400$, $T_1 = 0.158$, $T_2 = 0.045$, $T_3 = 0.032$, $T_4 = 0.020$

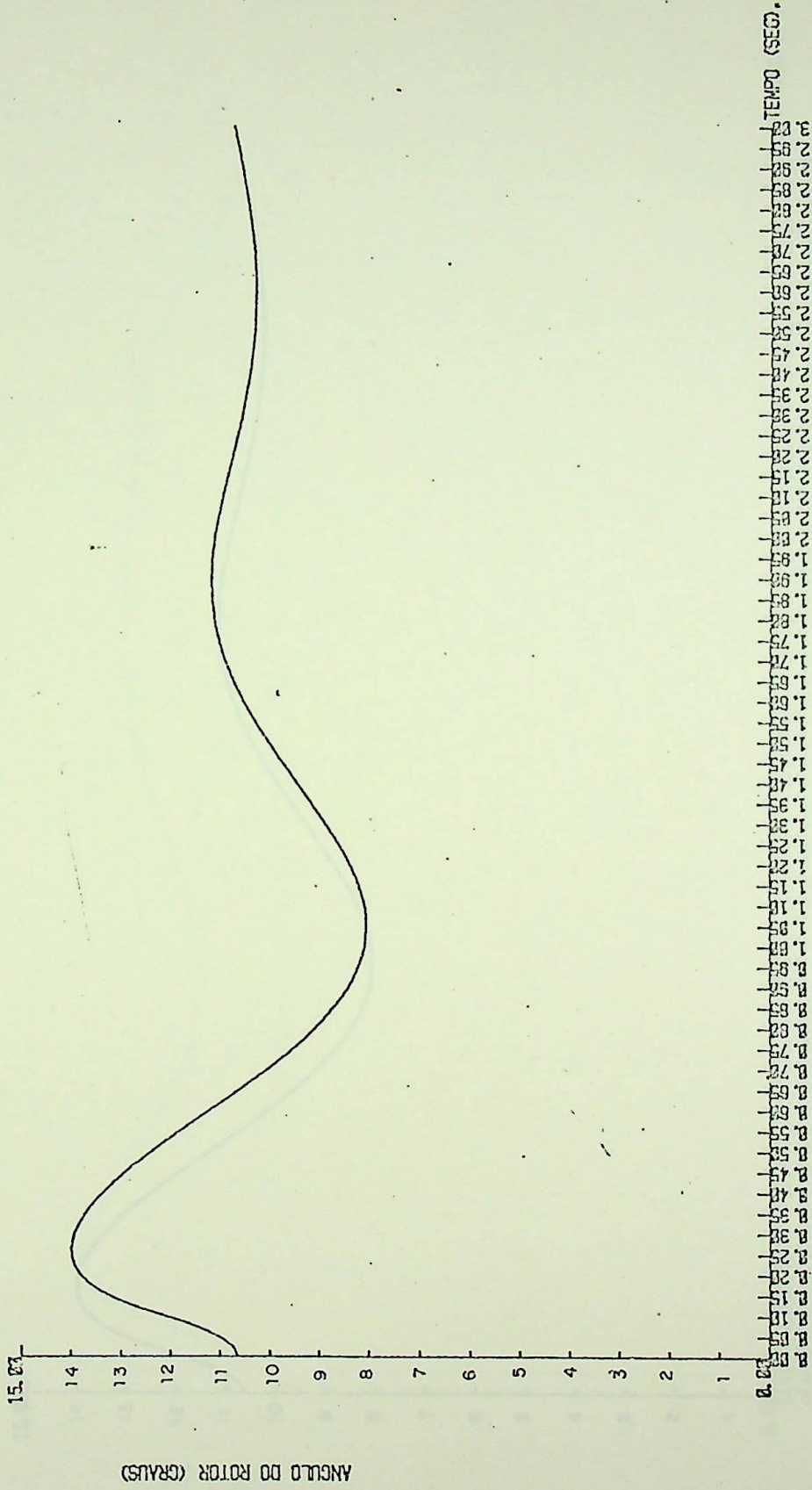


FIGURA 5.10 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_3
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de potência: $V_e = 40\%$, $T_1 = 0.113$, $T_2 = 0.053$, $T_3 = 0.032$
- Modulação de tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.158$, $T_2 = 0.045$, $T_3 = 0.032$

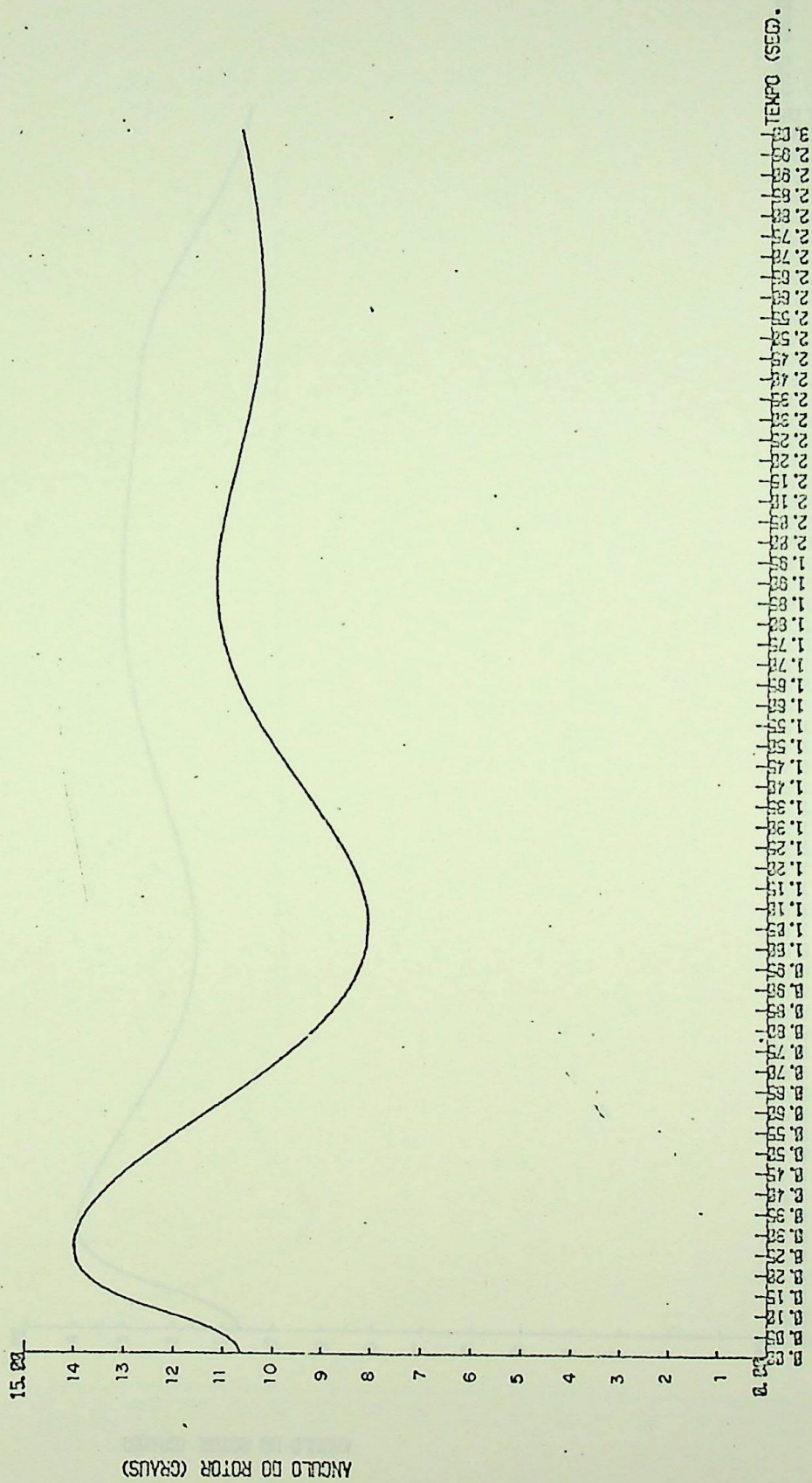


FIGURA 5.11 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_2
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de potência: $K_c = 400$, $T_1 = 0.113$, $T_2 = 0.053$
- Modulação de tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.158$, $T_2 = 0.045$

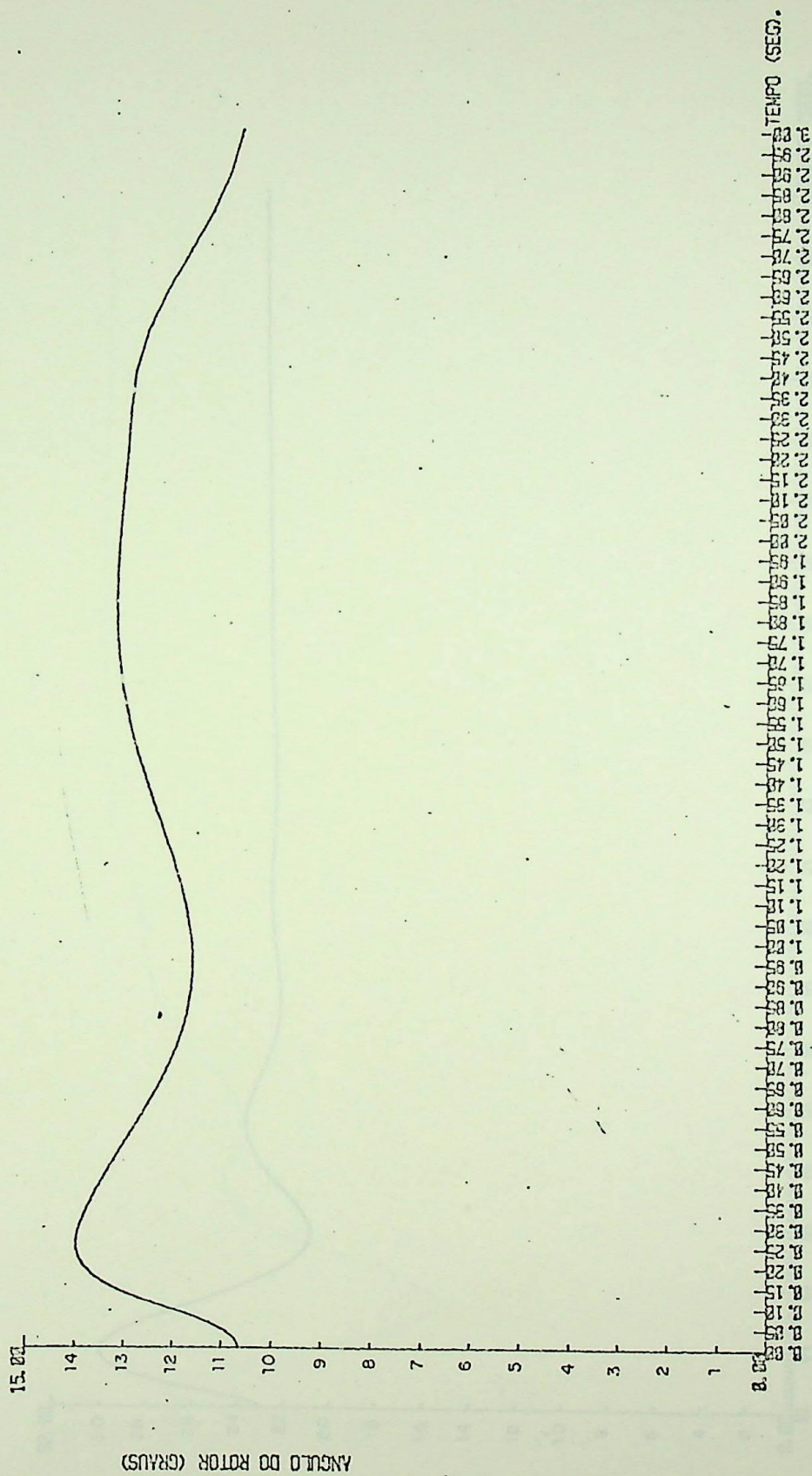


FIGURA 5.12 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de Transferência: F_1
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de potência: $i_c = 400$, $T_1 = 0.113$
- Modulação de tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.159$

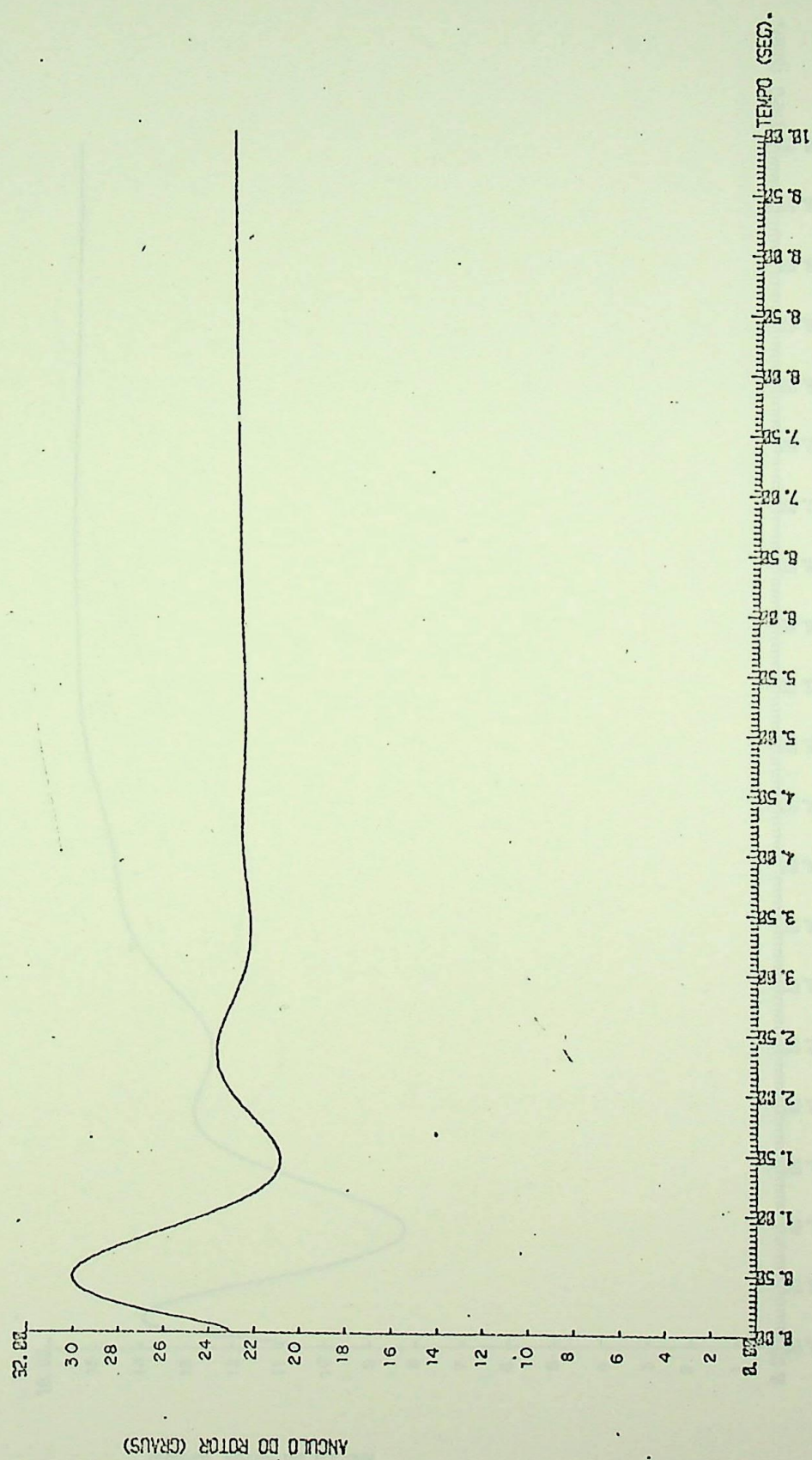


FIGURA 5.13 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), com elo DC substituído por linha AC equivalente

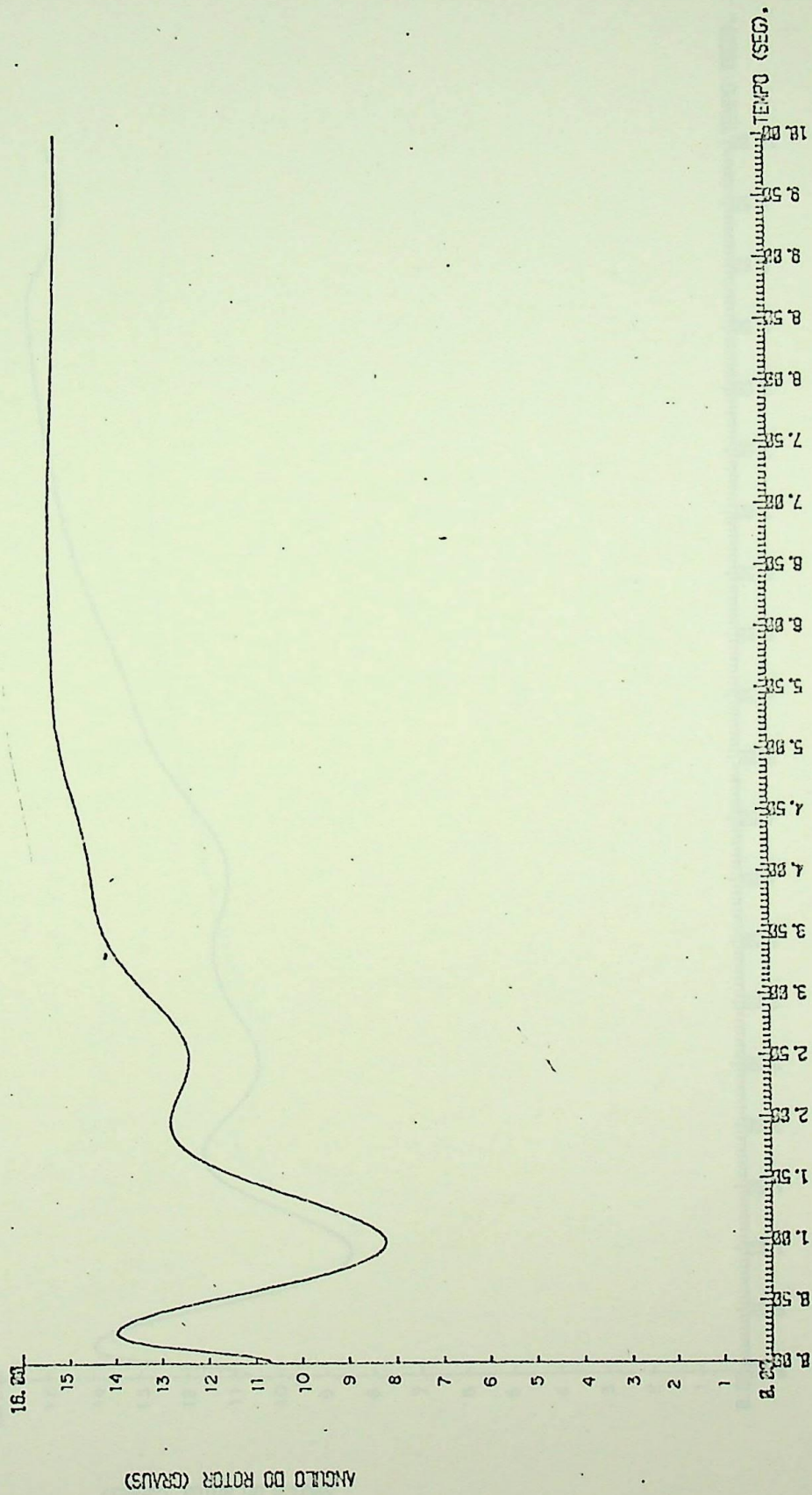


FIGURA 5.14 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), sem modulação DC

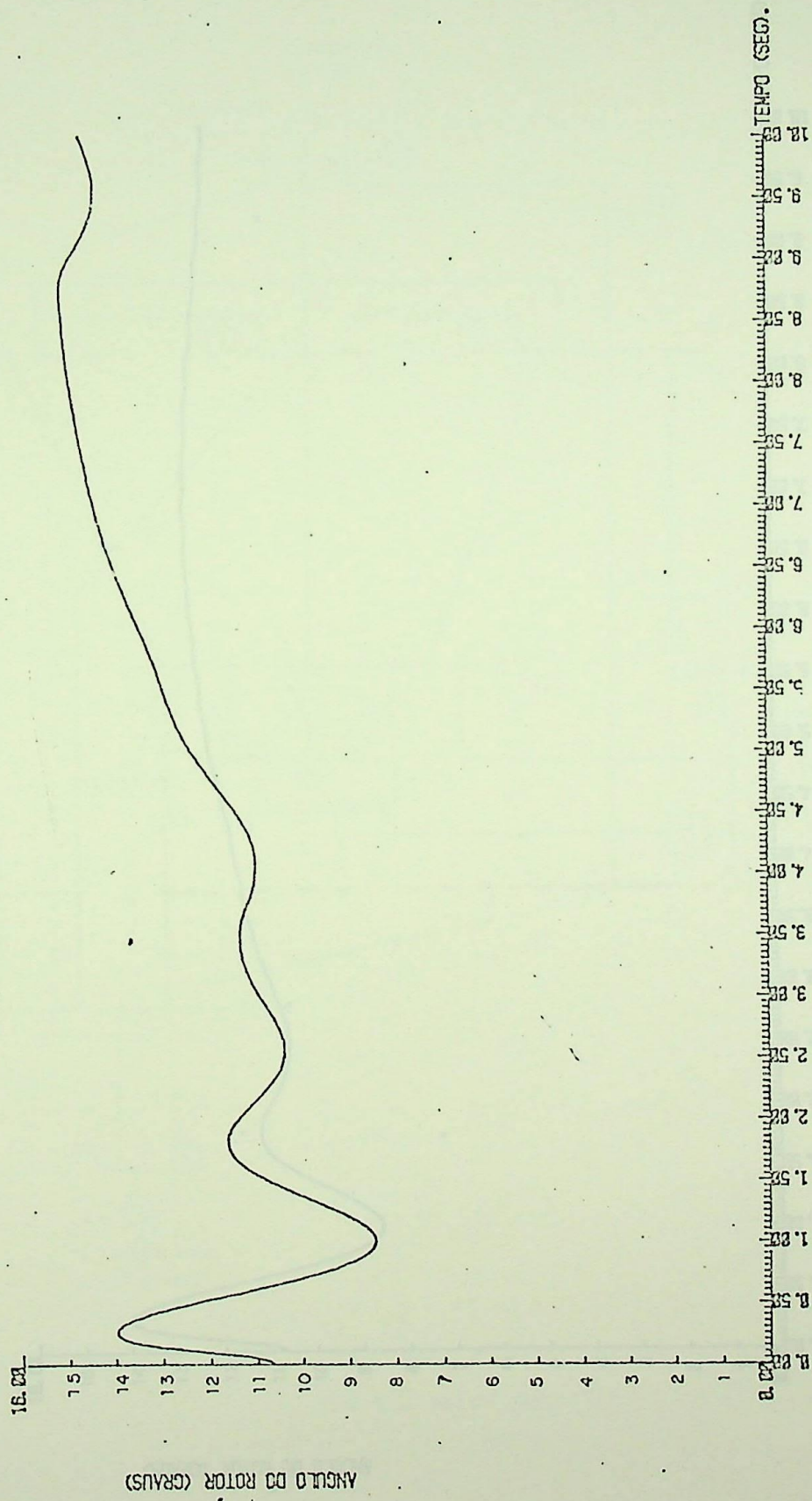


FIGURA 5.15 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), para elo DC com modulação de tensão

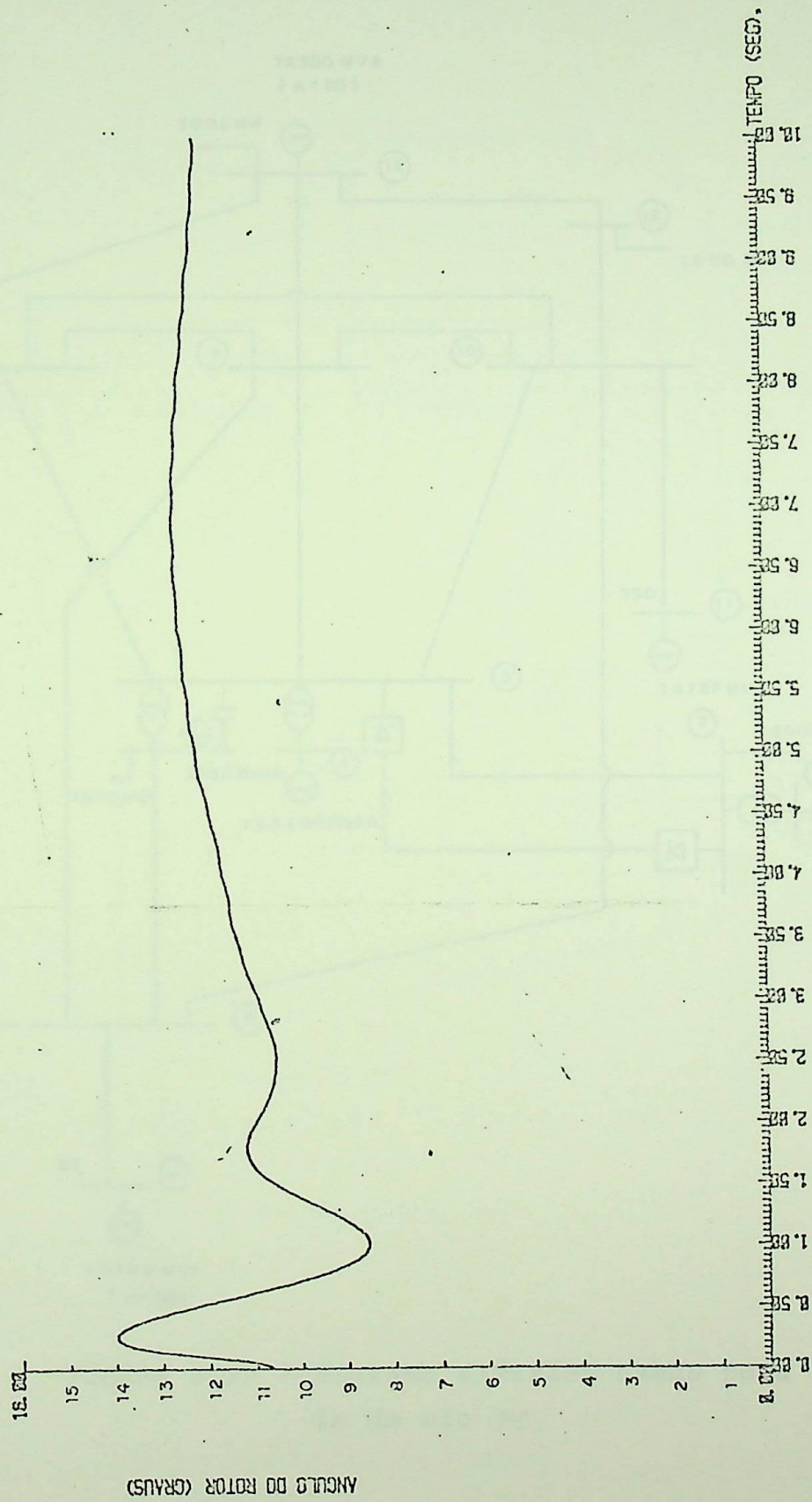


FIGURA 5.16 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 3), para elo DC com modulação de potência e tensão

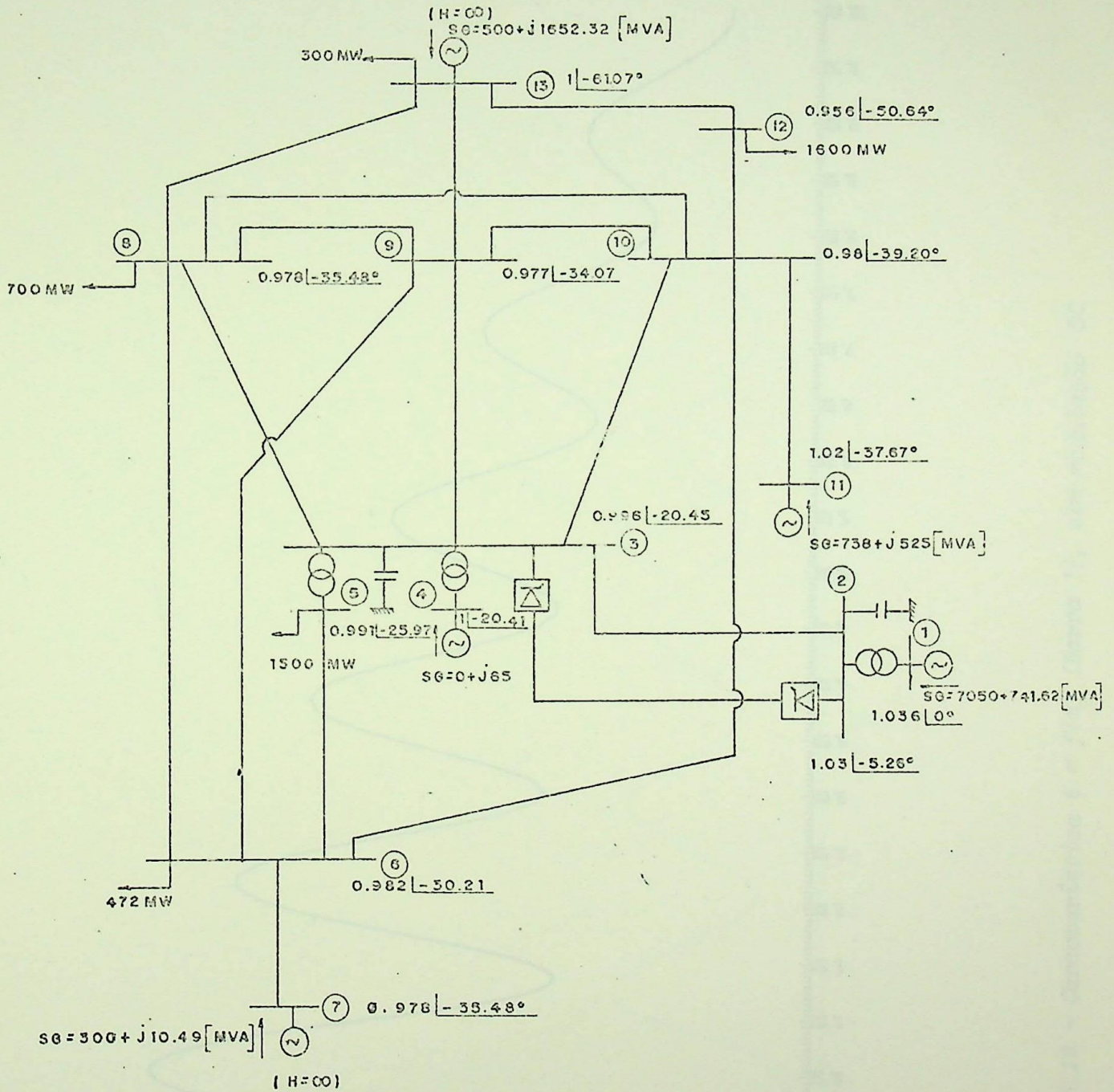


FIGURA 5.18 - Caso Base de Fluxo de Potência do Sistema. Potência Ativa dada em [MW] e Potência Reativa em [MVAR].

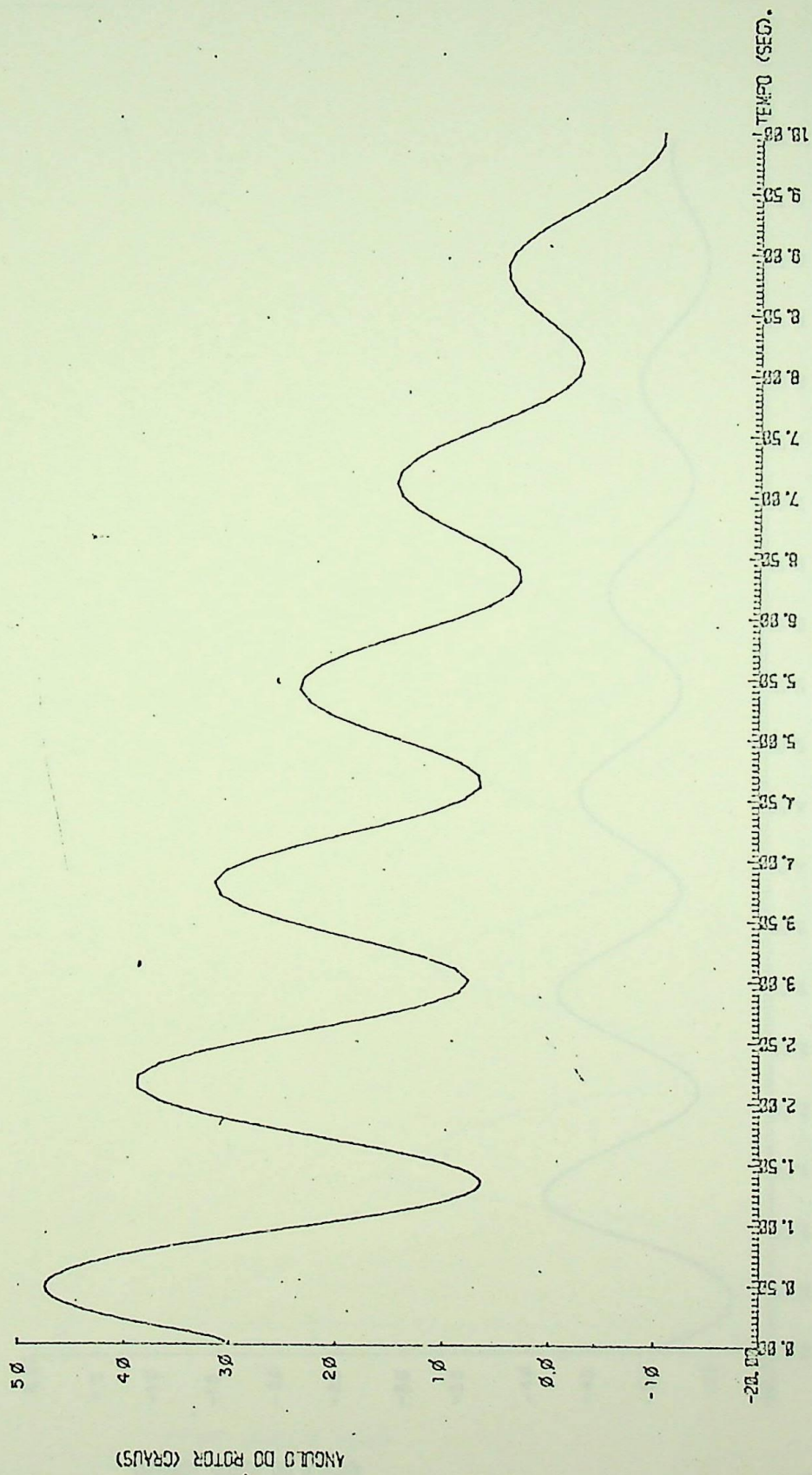


FIGURA 5.19 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 1), sem modulação DC

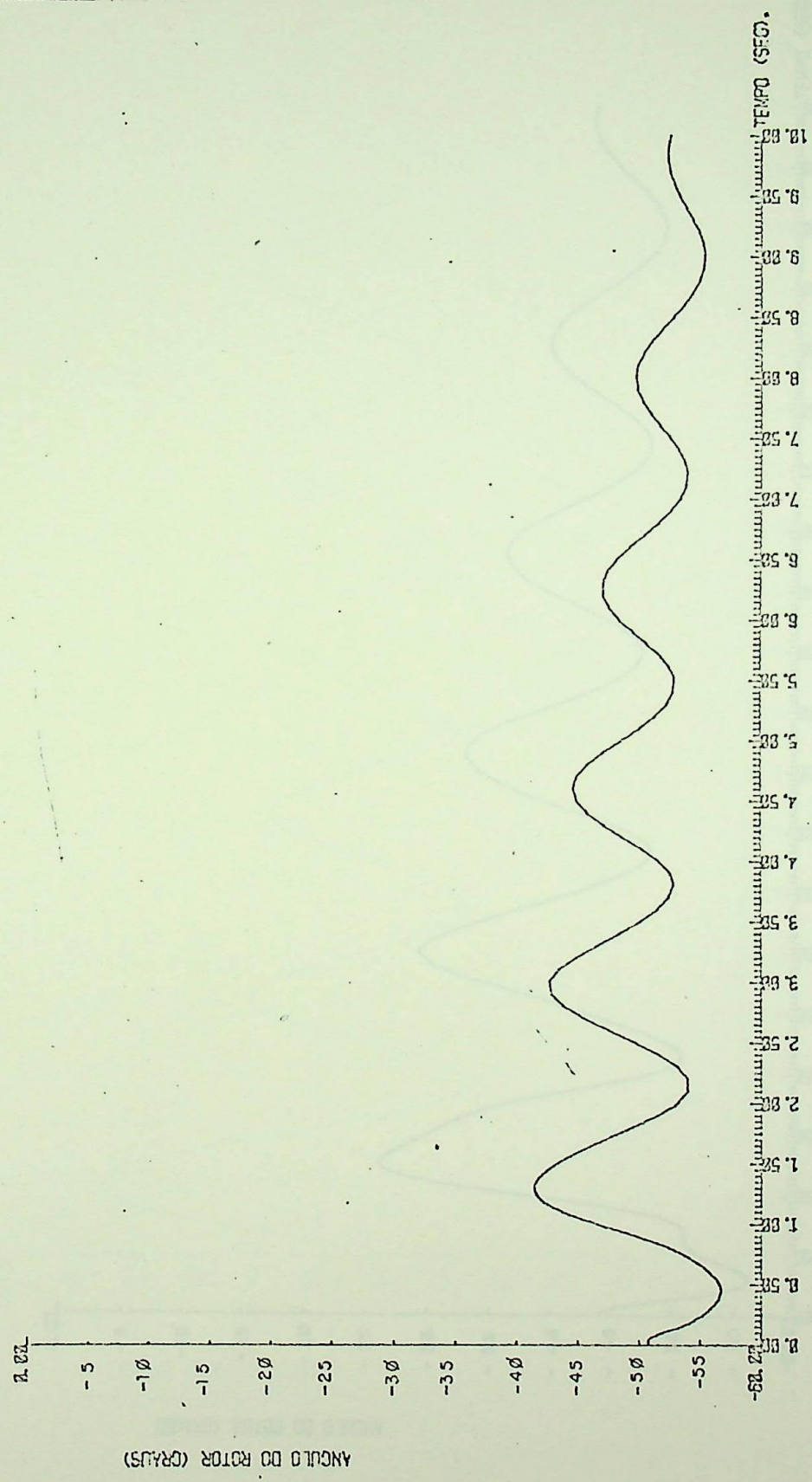


FIGURA 5.20 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 4), sem modulação DC

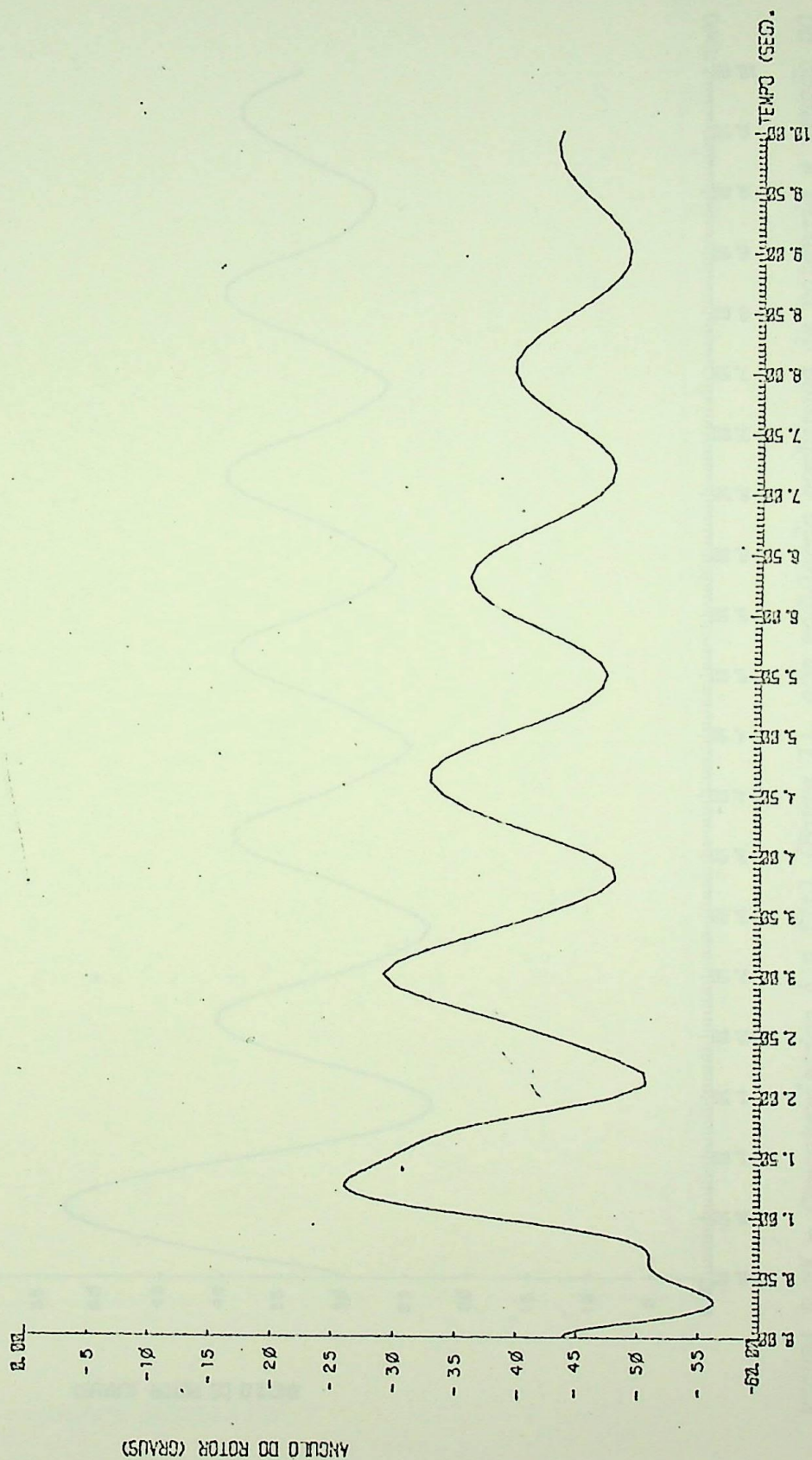


FIGURA 5.21 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 11), sem modulação DC

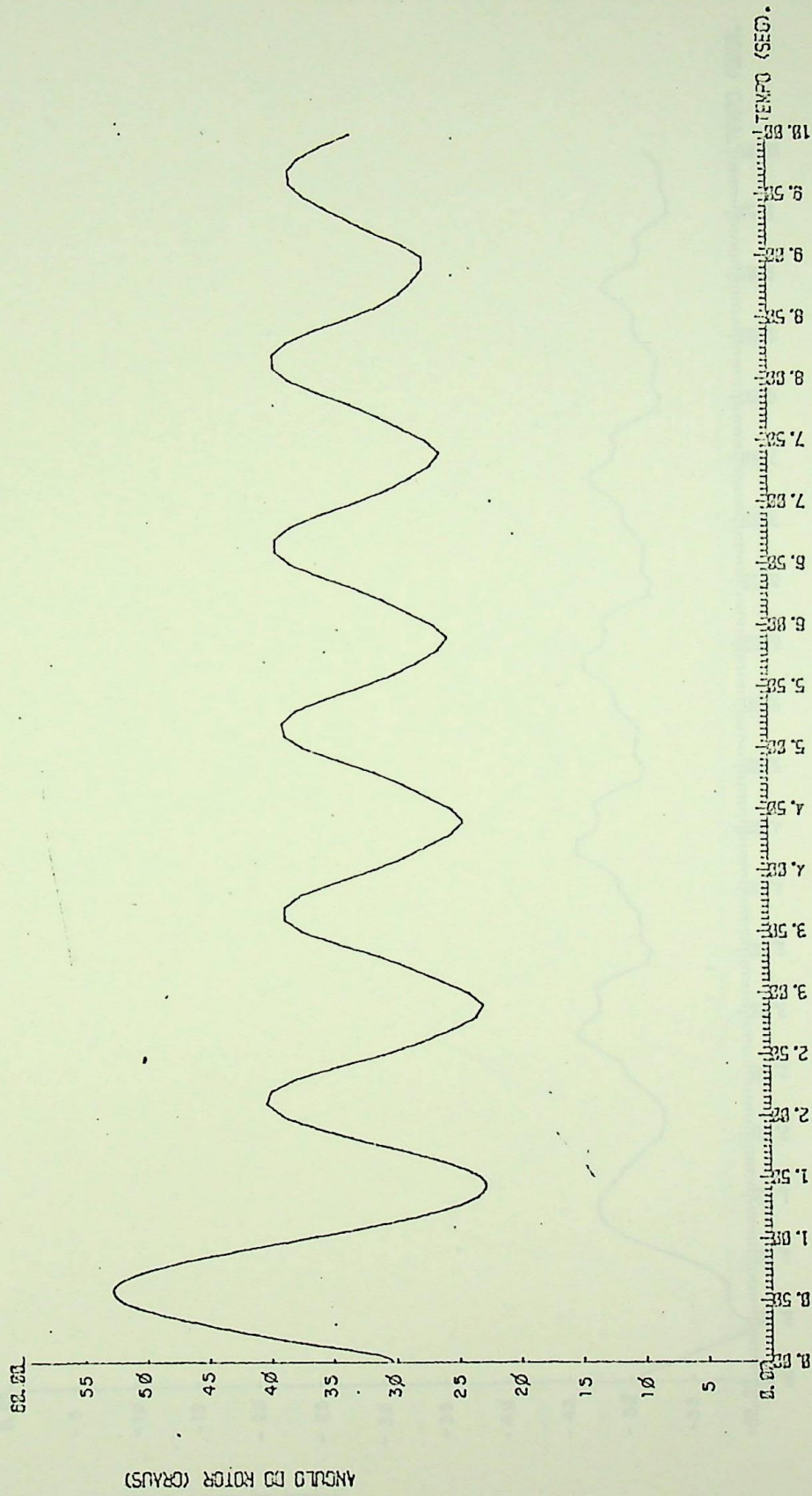


FIGURA 5.22 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 1), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_4
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de potência: $K_c = 400$, $T_1 = 0.0113$, $T_2 = 0.0055$, $T_3 = 0.032$, $T_4 = 0.010$
- Modulação de tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.158$, $T_2 = 0.045$, $T_3 = 0.032$, $T_4 = 0.10$



FIGURA 5.23 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 4), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_4
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de potência: $K_e = 400$, $T_1 = 0.113$, $T_2 = 0.053$, $T_3 = 0.032$, $T_4 = 0.010$
- Modulação de tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.158$, $T_2 = 0.045$, $T_3 = 0.032$, $T_4 = 0.010$

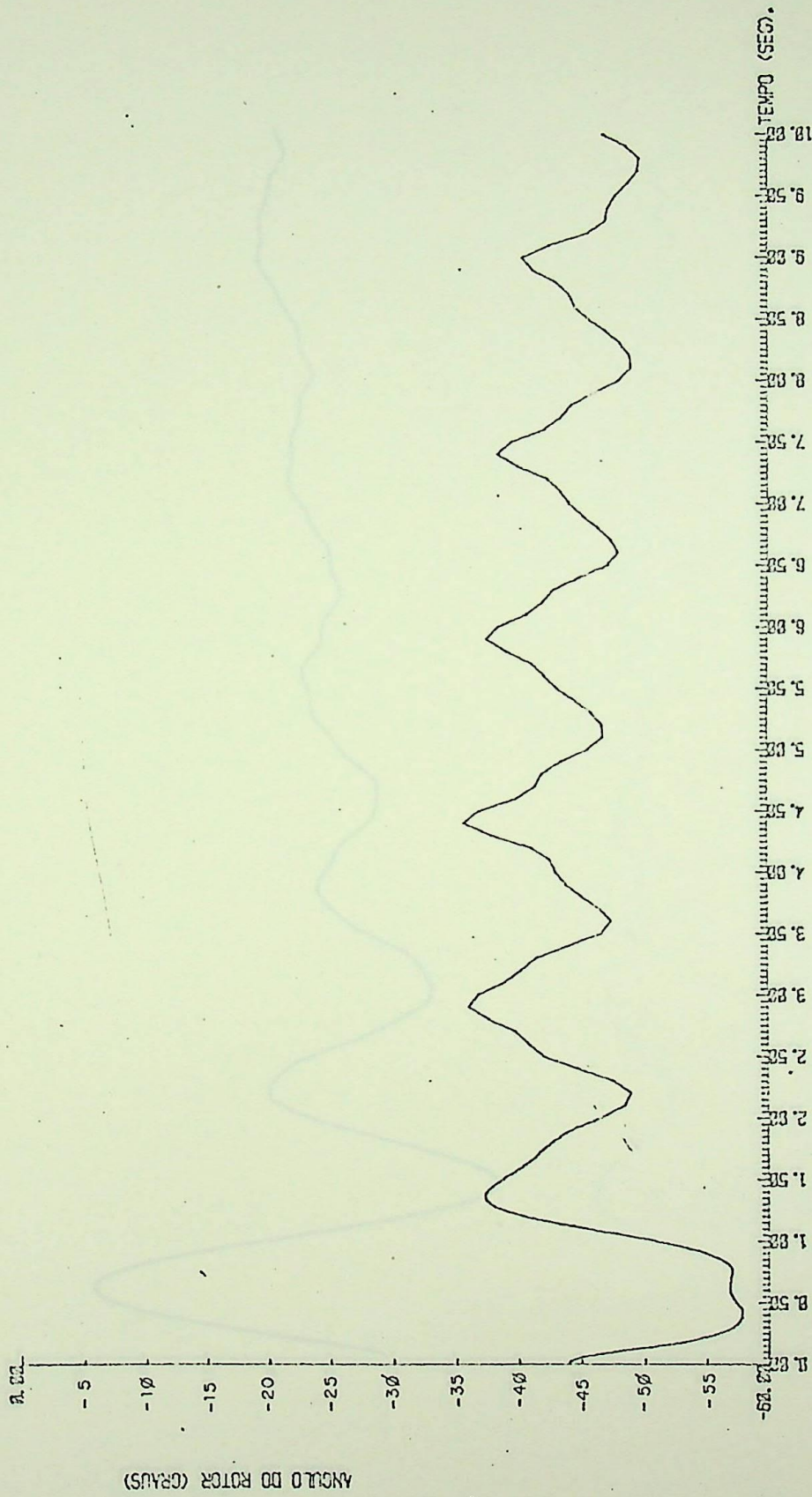


FIGURA 5.24 - Características $\delta = f(t)$ (Barra 11), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_4
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de Potência: $K_e = 400$, $T_1 = 0.113$, $T_2 = 0.053$, $T_3 = 0.032$, $T_4 = 0.010$
- Modulação de tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.158$, $T_2 = 0.045$, $T_3 = 0.032$, $T_4 = 0.010$

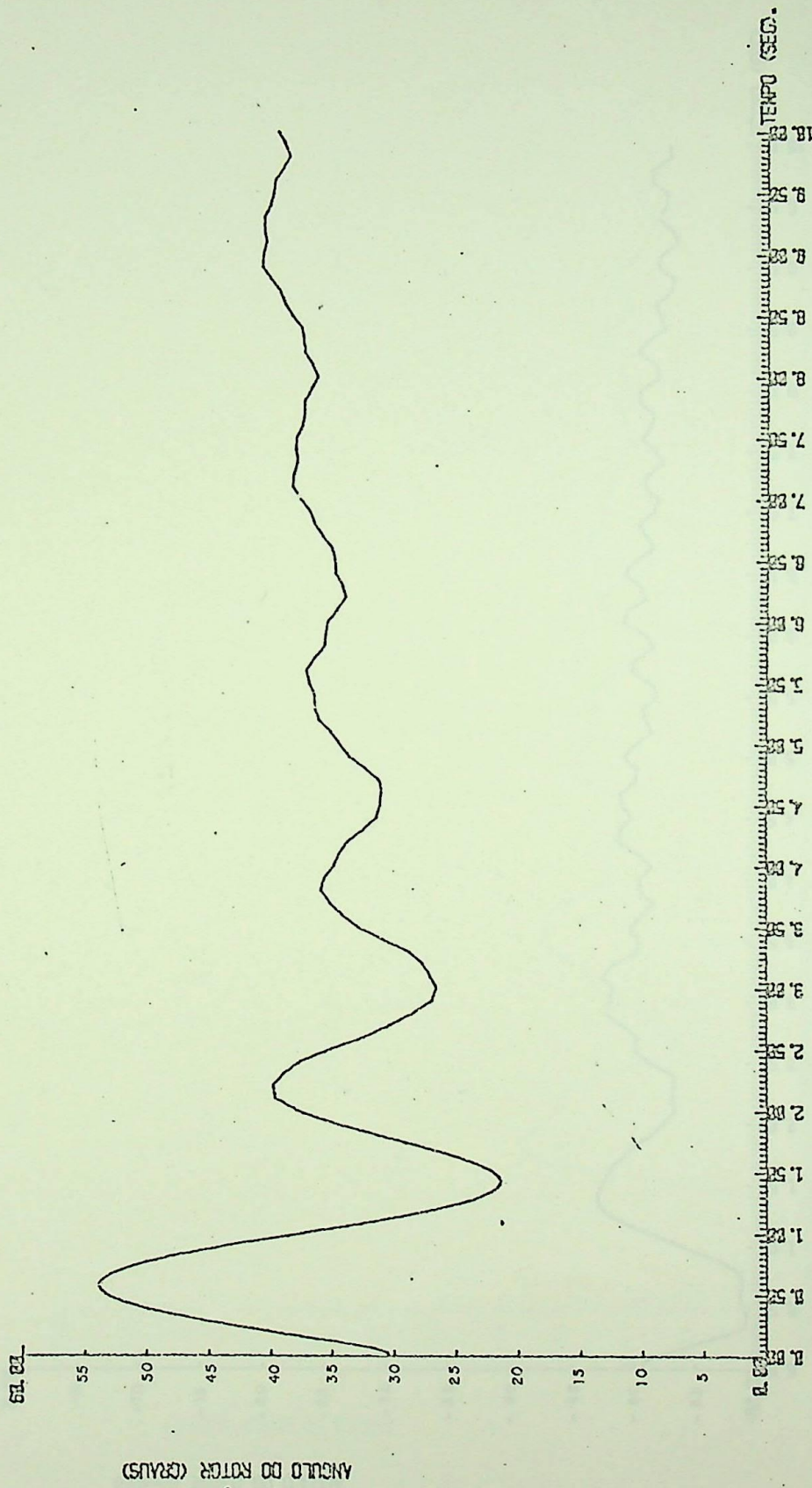


FIGURA 5.25 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 1), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_3
- Sinal de entrada: Tensão e variação de frequência
- Modulação de Potência: $K_e = 400$, $T_1 = 0.038$, $T_2 = T_3 = 0.011$
- Modulação de Tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.058$, $T_2 = T_3 = 0.018$

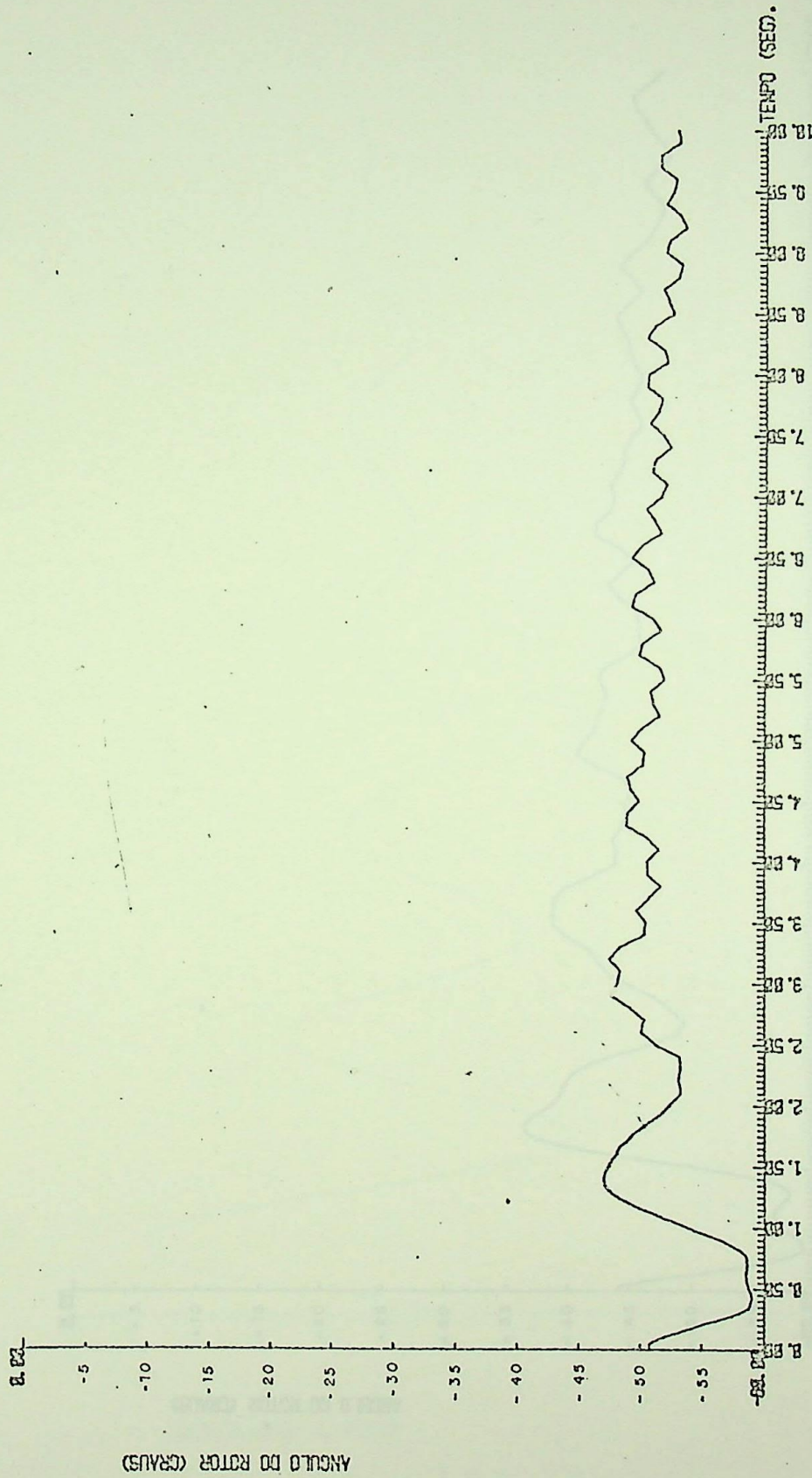


FIGURA 5.26 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 4), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_3
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de Potência: $K_c = 400$, $T_1 = 0.038$, $T_2 = T_3 = 0.11$
- Modulação de Tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.033$, $T_2 = T_3 = 0.018$



FIGURA 5.27 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 11), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_3
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de Potência: $K_E = 400$, $T_1 = 0.038$, $T_2 = T_3 = 0.011$
- Modulação de Tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.058$, $T_2 = T_3 = 0.018$

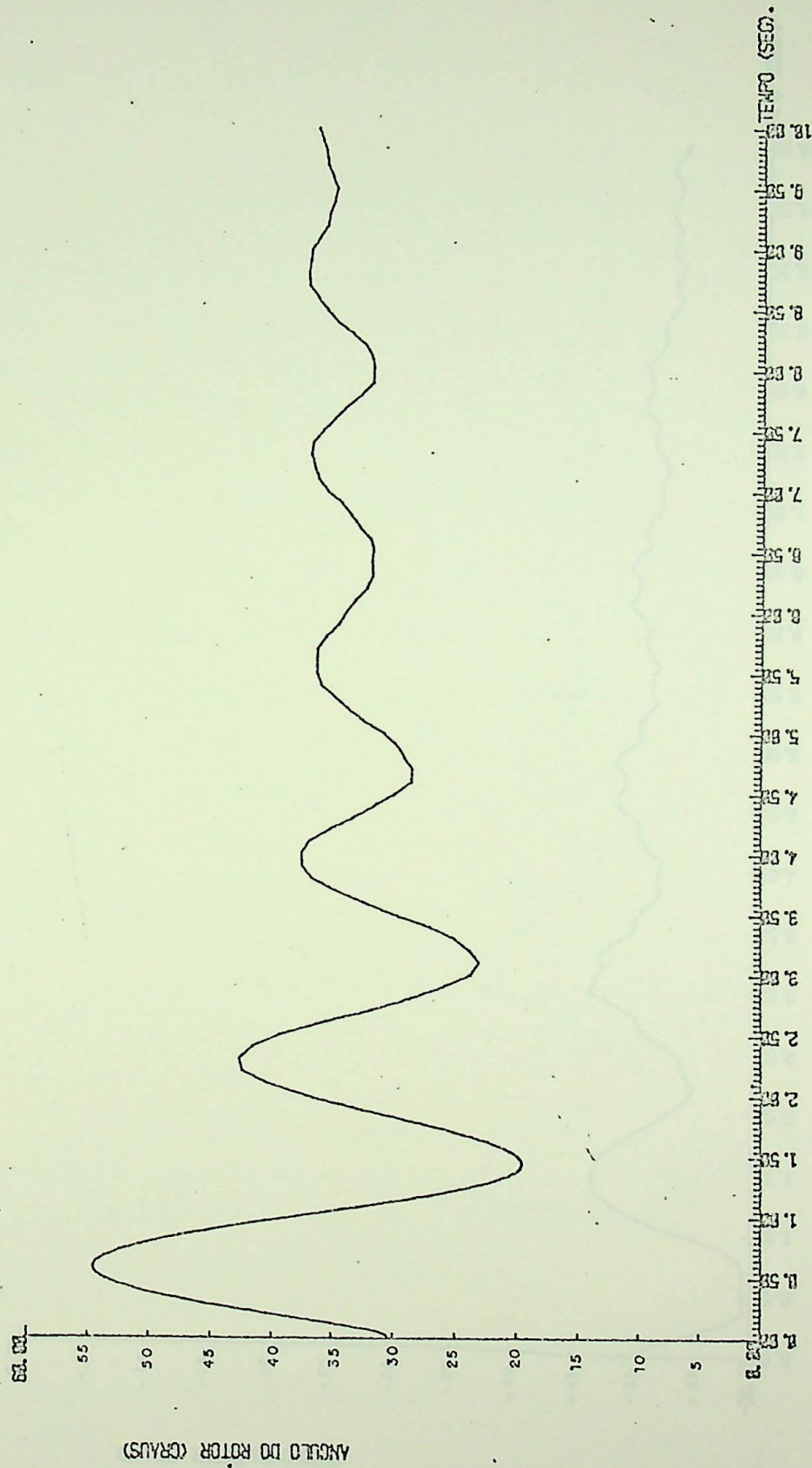


FIGURA 5.28 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 1), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_2
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência.
- Modulação de Potência: $K_c = 400$, $T_1 = 0.038$, $T_2 = 0.001$
- Modulação de Tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.058$, $T_2 = 0.008$



FIGURA 5.29 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 4), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_2
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de Potência: $K_e = 400$, $T_1 = 0.038$, $T_2 = 0.001$
- Modulação de tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.058$, $T_2 = 0.008$

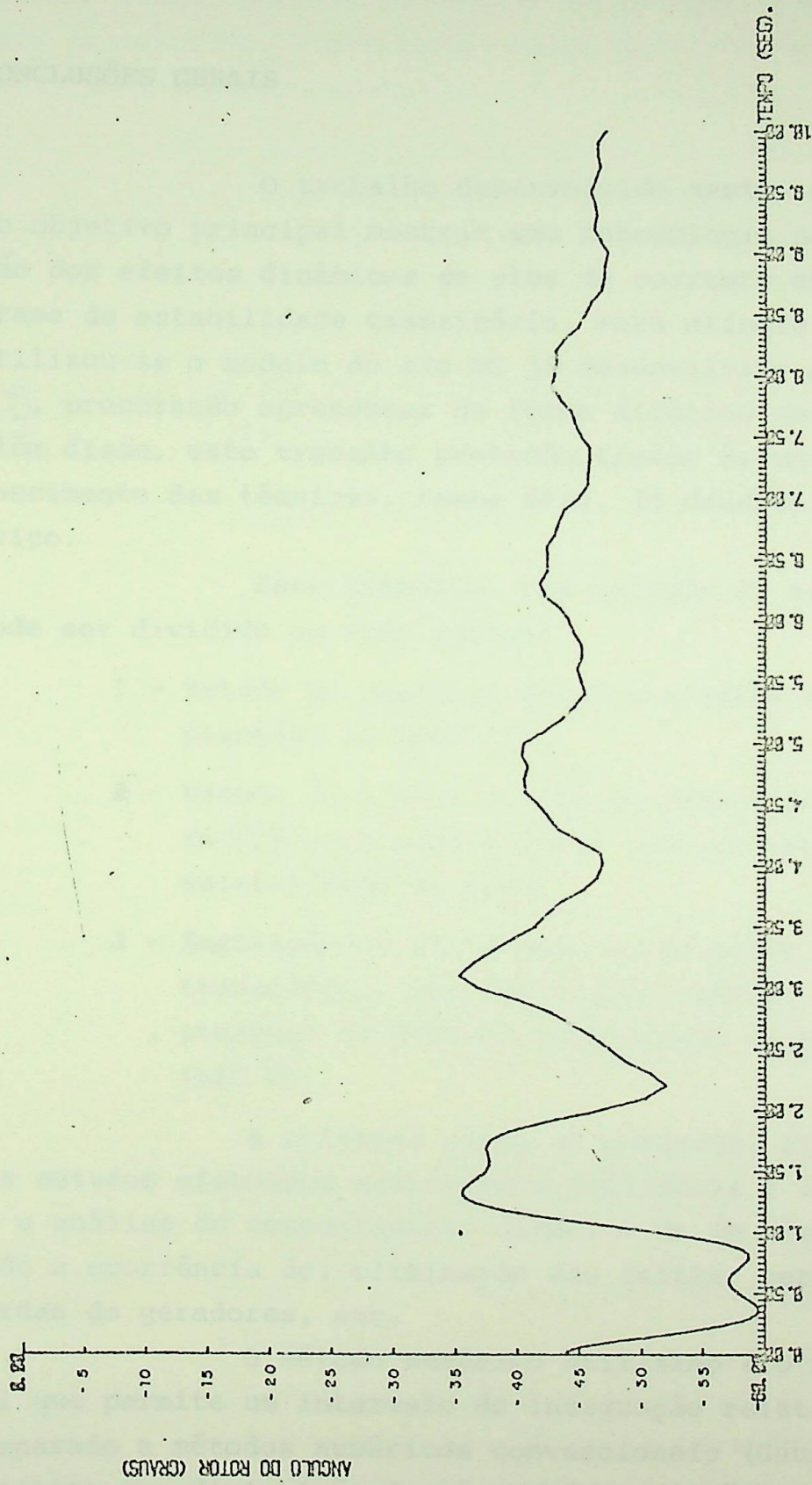


FIGURA 5.30 - Característica $\delta = f(t)$ (Barra 11), com modulação combinada de potência e tensão DC

- Função de transferência: F_2
- Sinal de entrada: tensão e variação de frequência
- Modulação de potência: $K_c = 400$, $T_1 = 0.238$, $T_2 = 0.001$
- Modulação de tensão: $K_g = 400$, $T_1 = 0.058$, $T_2 = 0.008$

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES GERAIS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação tem como objetivo principal mostrar uma metodologia para efetuar a inclusão dos efeitos dinâmicos de elos de corrente contínua, em um programa de estabilidade transitória. Para atingir-se este objetivo, utilizou-se o modelo do elo DC já desenvolvido pela literatura [17], procurando apresentar da forma didática seu desenvolvimento. Além disso, este trabalho pretende trazer às universidades, o conhecimento das técnicas, nesta área, já desenvolvidas no setor elétrico.

Este trabalho, com relação ao seu desenvolvimento, pode ser dividido em três partes:

- 1 - Estudo do programa de estabilidade transitória já implantado na EFEI [1].
- 2 - Estudo do modelo do elo DC desenvolvido pela literatura [17] para possibilitar sua inclusão no programa de estabilidade da EFEI.
- 3 - Ampliação da eficiência do programa de estabilidade transitória, possibilitando análise de sistemas com a presença de Elos de Transmissão em Corrente Contínua (elo DC).

A primeira parte da pesquisa, através dos diversos estudos efetuados mostraram a eficiência e flexibilidade quanto a análise do comportamento dinâmico de um sistema elétrico, devido a ocorrência de: eliminação das faltas, perdas de linhas, perdas de geradores, etc.

O método numérico utilizado é o método trapezoidal que permite um intervalo de integração relativamente grande comparado a métodos numéricos convencionais (Gauss) [1]. Isto possibilita uma diminuição do número de iterações, bem como do tempo de processamento de cálculo. A precisão dos resultados também são superiores se comparados ao método numérico convencional.

A segunda parte da pesquisa, através dos diversos estudos efetuados mostraram a eficiência do modelo do elo DC, de

envolvido pela literatura [17]. Pelo fato de tal modelo possuir aspecto geral, pode-se adaptá-lo em qualquer programa de estabilidade transitória. Porém este modelo apresenta alguns pontos de vantagens, como por exemplo:

- i - a estrutura do modelo tendo como base o polo e não o bipolo, impede a transferência automática de potência de um polo para o outro do mesmo bipolo nas situações de falta num dos polos ou em grupos de válvulas do polo.
- ii - a não representação das constantes de tempo inerentes ao VDCOL limita a validade da simulação de falta na linha de corrente contínua ou nos sistemas AC doador ou receptor, quando o VDCOL atua como elemento de proteção. Também limita a validade da simulação da recuperação do elo após faltas internas e externas e falhas de comutação.
- iii - a representação do sistema de telecomunicações representa apenas o tempo de transmissão de sinais mas não a amostragem da ordem de corrente.

A terceira parte da pesquisa, foi a inclusão do modelo do elo DC no programa de estabilidade da EFEI. Esta inclusão foi feita da seguinte maneira:

- i - o programa de estabilidade fornece as tensões e ângulos das barras de comutação para o modelo do elo DC.
- ii - o modelo do elo DC de posse das tensões e ângulos, calcula a modulação de potência para o elo, determina as potências ativa e reativa necessárias para operação do elo e as fornece de volta ao programa de estabilidade.
- iii - o programa de estabilidade recebe a potência ativa e reativa do elo DC, e as considera como uma carga de potência ou corrente constante, de acordo com o tipo de controle do elo DC, nas barras de comutação.

Este é o processo utilizado para iteração entre o programa de estabilidade e o modelo do elo DC. Os resultados obtidos com esta inclusão, foram analisados no Capítulo V.

Finalmente como sugestões para outros trabalhos de desenvolvimento do programa apresentado nesta dissertação, citar-se-ia:

- Inclusão das funções de transferência na lógica de disparo do modelo do elo DC.
- Inclusão da possibilidade de analisar-se faltas na linha DC.
- Inclusão do bipolo como base na estrutura do modelo do elo DC, possibilitando controle da potência transmitida pelo elo DC.
- Inclusão da possibilidade de estudos de sistemas AC/DC multiterminais.
- Modificação do programa de estabilidade, de maneira a possibilitar a análise de dois sistemas que sejam interligados somente pelo elo DC, pois na versão atual este tipo de análise não é possível de ser executada.

APÊNDICE A - LÓGICA DE BLOQUEIO E DESBLOQUEIO DO ELO DC

Na ocorrência de uma falta em uma barra do sistema AC, ocorre variações de tensão. Se a tensão em qualquer das barras de comutação cair abaixo de um valor crítico, que depende do tipo de característica utilizada (composta ou simples, ver seção 4.3.2), o sistema DC comporta-se como na figura (A.1).

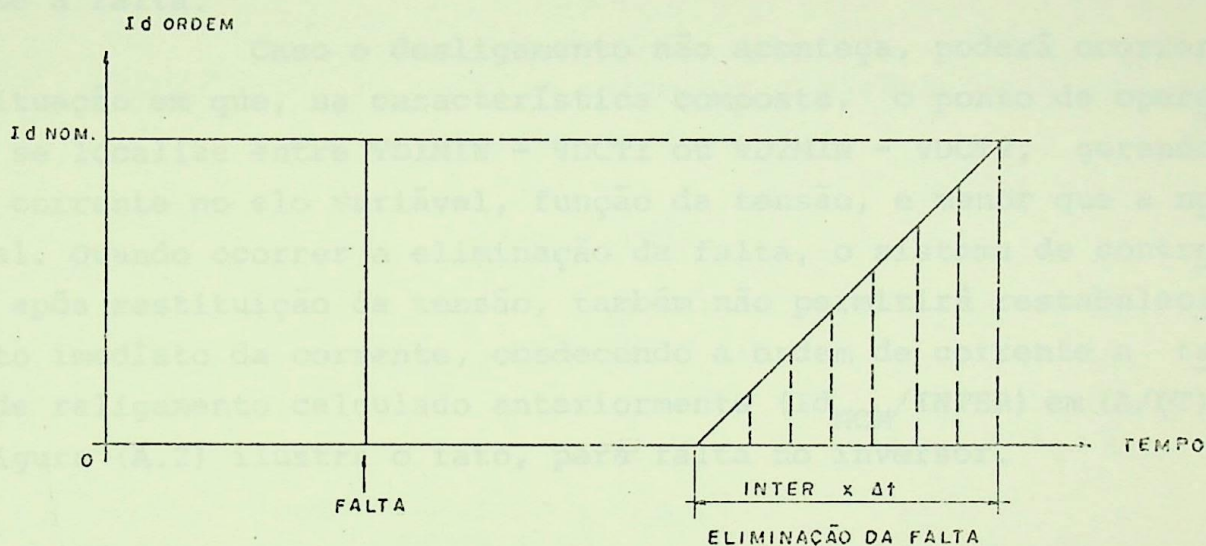


FIGURA A.1 - Reconstituição da operação do elo DC (Desbloqueio).

Onde na figura A.1:

INTER - Número de intervalos de tempo (Δt) para atingir a ordem de corrente nominal no religamento automático.

No instante em que a falta é aplicada, o elo, ao desligar-se, permanece neste estado até o momento da eliminação da falta, devido a subtensão na barra de comutação. Quando a tensão AC se recupera, o elo passa a ter condições de transmitir potência nominal novamente. Entretanto, não lhe é permitido o religamento, a potência plena de imediato. Sendo assim, faz-se com que o sistema de controle suba a sua ordem de potência (ou corrente) em forma de rampa, obedecendo a uma taxa pré-determinada de MW/S (A/S).

Sendo assim, para uma ordem de corrente de, por

exemplo, 1000 A, intervalo de tempo de 10 ms e taxa de religamento de 100 A/10 ms, o valor de INTER será 10. Consequentemente, o tempo total para o religamento, a partir da eliminação, será de 100 ms mais o atraso indutivo (aproximadamente 50 ms).

Convém mencionar que somente para faltas severas e próximas das barras de comutação é que a desenergização automática do elo, pode ocorrer, dependendo, evidentemente, dos valores de VD1MIN e VD2MIN (característica composta) ou VDCT1 (característica simples), adotados. Em outras palavras, é um sinal de tensão que indicará se o elo poderá ou não transmitir potência durante a falta.

Caso o desligamento não aconteça, poderá ocorrer a situação em que, na característica composta, o ponto de operação se localize entre VD1MIN - VDCT1 ou VD2MIN - VDCT2, gerando uma corrente no elo variável, função da tensão, e menor que a nominal. Quando ocorrer a eliminação da falta, o sistema de controle, após restituição da tensão, também não permitirá restabelecimento imediato da corrente, obedecendo a ordem de corrente a taxa de religamento calculado anteriormente ($I_{d_{NOM}}/INTER$) em (A/PT). A figura (A.2) ilustra o fato, para falta no inversor.

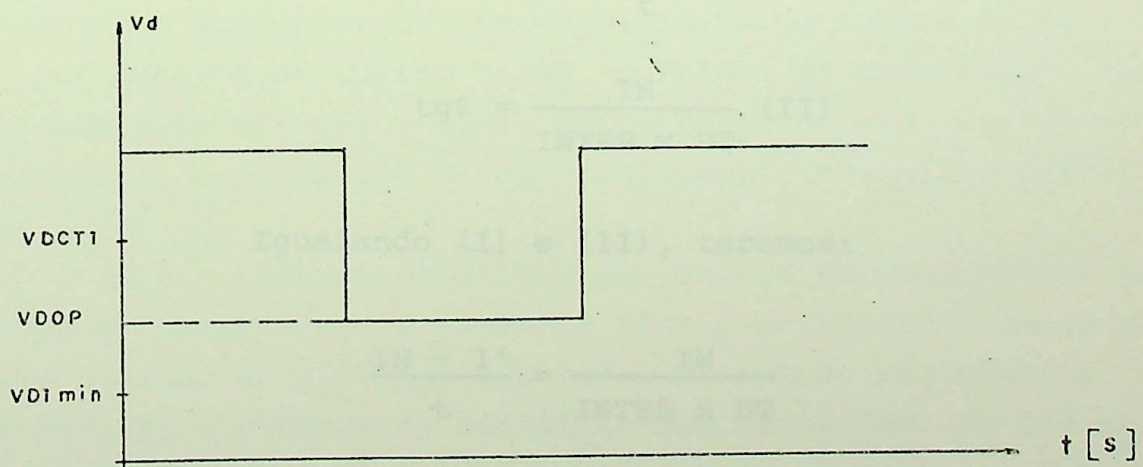


FIGURA A.2 - a) Gráfico mostrando a tensão da operação do elo ($VDOP$), abaixo de $VDCT1$ e acima de $VD1MIN$;

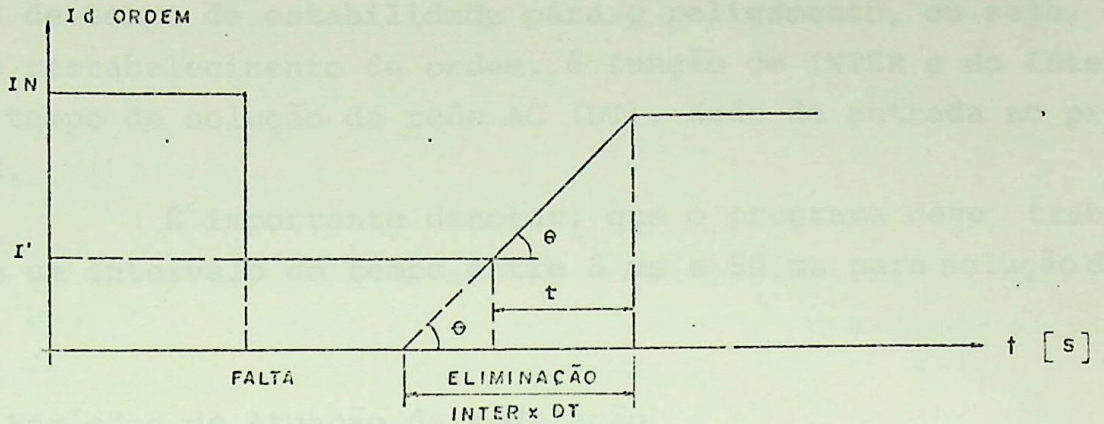


FIGURA A.2 - b) Gráfico mostrando o restabelecimento da corrente nominal (I_N).

$$I' = f(V_d)$$

$$t = INTER \times DT \times \frac{I_N - I'}{I_N}$$

$$\text{tg} \theta = \frac{I_N}{INTER \times DT} \quad [A/S]$$

Onde na figura A.2:

$$\text{tg} \theta = \frac{I_N - I'}{t} \quad (I)$$

$$\text{tg} \theta = \frac{I_N}{INTER \times DT} \quad (II)$$

Igualando (I) e (II), teremos:

$$\frac{I_N - I'}{t} = \frac{I_N}{INTER \times DT}$$

$$t = INTER \times DT \times \frac{I_N - I'}{I_N} \quad [S] \rightarrow \text{tempo necessário ao restabelecimento de } I_N.$$

Deve ser ressaltado que INTER é o número de intervalos de tempo de estabilidade para o religamento, ou seja, o tempo de restabelecimento da ordem, é função de INTER e do intervalo do tempo de solução da rede AC (DT), dado de entrada no programa AC.

É importante denotar, que o programa deve trabalhar com um intervalo de tempo entre 5 ms e 50 ms para solução da rede.

A.1-1) Períodos de Atuação da Modulação

Segundo as últimas conclusões sobre o assunto, o "controle de amortecimento" ("Damping Control"), permanece conectado ao sistema de controle principal ("Master Control"), sendo sobrepujado apenas por aqueles hierarquicamente superiores, o sinal advindo do sistema de modulação torna-se efetivo apenas durante o tempo em que a corrente na linha DC permaneça acima de um valor pré-determinado, isto é:

$$Id_k \geq \frac{(INTER - 1)}{INTER} \times Id_{NOM}$$

Este valor de corrente (Id_k) corresponde ao último degrau de restabelecimento da ordem de corrente após uma perturbação no sistema.

Está claro que, quando o elo desliga por subtensão ou tem a sua ordem de corrente diminuída abaixo de Id_k , também, por motivos de tensão baixa, o "sinal da modulação" não é utilizado para alterar a ordem de corrente do elo, apesar de que, fisicamente, o "controle de amortecimento" ("Damping Control") continua ativo.

Convém ressaltar que existe um compromisso entre o tempo de religamento a potência plena, devido ao impacto que pode ser causado no sistema, e o tempo máximo de religamento, depois do qual a atuação da modulação não irá colaborar nos instantes mais críticos para o sistema (até o 3º SWING). Por isto a escolha do número de "intervalos de tempo (DT) no religamento" (INTER) é extremamente importante e uma condição de projeto, do responsável pelo estudo.

APÊNDICE B - DESCRIÇÃO GERAL DO PROGRAMA DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA DA EFEI E DADOS PARA O ELO DC

1 - DESCRIÇÃO GERAL

O programa de estabilidade transitória implementado na EFEI [1], fornece a resposta dinâmica do sistema elétrico de potência face a distúrbios devidos a:

- chaveamentos
- faltas

O princípio básico da resolução do problema, é o processo normal de integração numérica (passo a passo), tomando como ponto de partida uma condição equilibrada de operação do sistema. Em outras palavras, supõe-se que antes do distúrbio o sistema estava em um ponto de operação estável.

O processo numérico usado envolve modernas técnicas computacionais, de tal forma que grandes sistemas de potência possa ser estudado de modo eficiente.

O programa contém quatro modelos diferentes para a máquina síncrona. Para cada máquina do sistema, o programa escolhe, automaticamente, o modelo mais conveniente, de acordo com o conjunto de dados fornecidos pelo usuário..

O modelo mais detalhado usado neste programa, envolve o efeito da saliência transitória e sub-transitória, saturação e reguladores de tensão e velocidade. Pode-se ainda usar diferentes representações de reguladores para diferentes máquinas, por exemplo, reguladores de velocidade para geradores térmicos e hidráulicos.

Motores e compensadores síncronos podem também ser representados. Os motores de indução são representados pelos modelos dinâmicos, os mais detalhados, incluindo o efeito transitório característico da posição de barras no rotor ou rotor com gaiola de esquilo duplo.

Pode-se também especificar, vários tipos de ca

racterísticas, torque de carga x velocidade. Outras cargas são representadas por impedância fixas.

Linhas de transmissão e transformadores com taps (em fase) fora do nominal, são representados por seus circuitos pi-equivalente na sequência positiva.

O programa aceita qualquer número de linhas, transformadores ou shunts em paralelo, e qualquer número e combinações de máquinas síncronas e de indução, cargas caracterizadas por impedância fixa e compensação estática em cada barra. Naturalmente, o termo "qualquer" anteriormente citado, está relacionado a capacidade do computador a ser utilizado pelo usuário, ou seja, o programa é limitado pela capacidade de memória do computador.

O programa também determina a frequência média do sistema elétrico e a frequência de todos os barramentos com geradores, bem como a frequência individual de cada gerador.

A rejeição ou restauração de cargas, pode ser feita com base na frequência média ou na frequência da barra de geração utilizada como referência. A rejeição não deliberada de carga também é possível, pois o programa permite representação de relé de tensão (sub-tensão ou sobre-tensão).

As condições das máquinas são impressas durante a solução em qualquer intervalo do tempo especificado. Em adição, as tensões nas barras do sistema, os fluxos de potências em ramos especificados podem ser obtidos se desejados. Pode-se especificar qualquer sequência de falta e chaveamento.

As barras do sistema podem ter nomes com caracteres alfa-numérico.

A integração numérica das equações diferenciais é feita pelo método trapezoidal implícito, o qual é numericamente estável. Como resultado o programa trabalha satisfatoriamente, mesmo quando as máquinas ou seus sistemas de controle tenham pequenas constantes de tempo, sem a necessidade de diminuir-se, devido a isto, o passo de integração.

Para qualquer condição inicial de operação especificada de regime permanente, o programa permite uma série de

faltas diferentes e chaveamento serem feitos automaticamente, um após outro. Qualquer número de estudos distintos (partida de motor, curto-circuito, etc), podem ser feitos um após o outro, automaticamente.

A precisão de uma condição especificada de operação, em regime permanente, é verificada pelo programa antes de começar o cálculo passo a passo.

Os dados de impedância para cada máquina síncro-na podem ser fornecidos pelo usuário na própria base da máquina, ou na base do sistema. As impedâncias para cada máquina de indução podem ser representadas na base da máquina ou do sistema ou ainda em ohms. O programa aceita dados relativos a máquina de indução em três formas diferentes, dependendo dos dados disponíveis pelo usuário.

2 - REPRESENTAÇÃO DO ELO D.C.

Os princípios fundamentais do funcionamento de um elo D.C., e seu controle básico, já foram descritos no capítulo IV.

Uma rotina para simular o elo DC, foi incorporada no programa de estabilidade, descrito na seção anterior, e de um modo geral, tem a seguinte relação com o mesmo:

- 1 - Recebe informações relativas as barras de comutação (tensão e ângulo das barras);
- 2 - Fornece as potências ativa e reativa, relacionadas com as barras da estação retificadora e inversora respectivamente. Sendo que a barra da estação retificadora, consome potência ativa e reativa, enquanto que a barra da estação inversora, fornece potência ativa e consome potência reativa.

Um esquema simplificado, mostrando as filosofias de controle das modulações, possíveis de serem representadas nesta rotina, é mostrado na figura 4.13.

Houve a preocupação para uma representação que

acomodasse a simulação dos controles do sistema de Itaipu.

2.1 - Modulação em Corrente

A modulação em corrente é aquela que, recebendo informações de frequência elétrica nas barras em que estão conectadas os conversores AC/DC, modula o valor da corrente de ordem do elo DC no intuito de favorecer a estabilidade do sistema.

Convém destacar a atuação de alguns blocos existentes na malha de controle desta modulação:

- I - Constante de tempo (T_{XDC}): representando aquela associada com a medição e aquisição das informações relativas a frequência das barras.
- II - Constante de tempo (T_{CDSET}): representando aquela associada ao envio da ordem de corrente determinada no "Controle Principal" ou "Master Control" até os controles de polo.
- III - Uma faixa de banda morta determinando que todo valor de sinal medido que estiver dentro de determinada faixa, em torno de zero, não será considerado pela modulação.

2.2 - Modulação em Tensão (Gama)

A modulação em tensão é aquela que, ao receber informações da tensão AC da barra em que está conectado o inversor, modula o valor do ângulo mínimo de extinção (γ_{min}) do inversor, com intuito de estabilizar a variação de tensão naquela barra. Visto que o ângulo mínimo de extinção do inversor, quando em regime permanente, já é o menor possível (γ_{omin}) dentro de condições seguras, a fim de se minimizar a absorção de potência reativa pelo conversor, esta modulação só é permitida para valores positivos (aumento de γ_{min}).

O bloco representativo da banda morta, foi também aqui incluído.

2.3 - Modulação Combinada

A modulação combinada, é aquela que consiste em uma operação simultânea das duas modulações acima descritas.

Tem como objetivo combinar as vantagens dos dois esquemas de modulação, que são: amortecer as excursões dos ângulos rotóricos de máquinas e estabilizar a variação de tensão na barra inversora.

As funções de transferências das modulações representáveis (ver capítulo IV) são da forma:

$$G(s) = \frac{KS (1 + ST4)}{(1 + ST1)(1 + ST2)(1 + ST3)}$$

Deve-se destacar que o controle em potência constante pode ser substituído por um controle em corrente, que consiste em manter o valor de I_0 constante.

Uma variação da modulação em corrente, é a modulação em potência, que consiste em ter-se à saída da função de transferência um sinal de variação de potência (ΔP), que sendo dividido pela tensão CC (V_d), cujo valor é transmitido segundo a constante de tempo T_{pc} ; obtém-se o valor de variação de ordem de corrente (ΔI); a ser adicionado à ordem I_0 .

2.4 - Simulação de Indicação de Falha de Comutação.

Uma maneira aproximada, de simular-se o fenômeno da falha de comutação, em um programa digital, é através da tensão AC da estação inversora. Se esta tensão, for inferior a um valor mínimo, estabelecido para o bloqueio da ponte conversora (este valor, é chamado de "VBLOCK" no programa desenvolvido), o programa acusa, que ocorreu falha de comutação na estação inversora.

Foi incluído, neste modelo, a variável EXTMIN que representa a mínima margem de extinção (sempre menor que o valor de γ_{min}), a qual quando ultrapassada irá indicar que houve falha de comutação. Este "check" é realizado, quando de mudanças do modo de operação, em geral, resultantes de variações na tensão AC de um intervalo de tempo para o seguinte. Deixando o valor de EXTMIN em zero, este mecanismo é desativado.

3 - COMO USAR A ROTINA DC

Ao programa de estabilidade transitória já implementado na EFEI [1], foram acrescentados alguns cartões na entrada de dados, precedendo a todos os cartões já existentes, isto é, no início do programa, com o objetivo de controlar a saída dos dados de estabilidade e a utilização ou não utilização da rotina DC.

Os usuários do programa, devem estar cientes que, fora estas pequenas mudanças, os dados da entrada, continuam exatamente como indicado no manual do programa.

Os seguintes cartões foram acrescentados no início do programa:

1º) CARTÃO: controle da impressão - 1 cartão com 5 variáveis inteiras, que são: N1, N2, N3, N4, N5 - Format (5 I5).
onde:

N1 - Número de barras, que o usuário deseja tensão e ângulo.

N2 - Número de linhas, que o usuário deseja o fluxo de potência.

N3 - Número de máquinas síncronas, que o usuário deseja informações (tensão, corrente, etc).

N4 - Número de motores de indução, que o usuário deseja informações (tensão, corrente, etc.)

N5 - Se $\neq 0$, é fornecida a frequência do sistema.

Se = 0, a saída é suprimida.

2º) CARTÃO: Nome das barras, que deseja-se obter informações -
Format (A8)

OBS.: este cartão só é usado se N1 $\neq 0$.

3º) CARTÃO. Nome das linhas, que deseja-se obter informações -
Format (2 A8)

OBS.: este cartão só é usado se N2 $\neq 0$.

49) CARTÃO: Nome da barra e número da máquina síncrona conecta da a esta barra, que deseja-se obter informações - Format (A8, I3)

OBS.: este cartão só é usado se N3 $\neq$ 0.

59) CARTÃO: Nome da barra e número do motor de indução conectado a esta barra, que deseja-se obter informações - Format (A8, I3)

OBS.: este cartão só é usado se N4 $\neq$ 0.

69) CARTÃO: Cartão de controle para a rotina DC - 1 cartão com 6 variáveis inteiras, que são: NLKEST, IITYPE, KDCKEY, KDBGDC, LDEBUG, IOFF - Format (6 I5).

OBS.: este cartão só é usado se NLKEST $\neq$ 0.

onde:

NLKEST - Número de elos DC existente no sistema. Se NLKEST = 0, a rotina DC não é utilizada e o programa roda normalmente para a estabilidade.

IITYPE - Função para ler os dados do elo DC.

Se IITYPE = 20 $\rightarrow$ ler dados do elo DC

Se IITYPE = 21 $\rightarrow$ ler modificações nos dados do elo DC

KDCKEY - Estando este campo em branco, ou zerado, a listagem dos resultados, do elo DC, por intervalo de impressão será emitida. Caso este campo tenha um valor diferente de zero esta listagem será omitida.

KDBGDC - Se diferente de zero, implica em impressão de um sumário a respeito da modulação do elo DC. Se igual a zero, esta listagem será omitida.

LDEBUG - Se igual a zero a listagem final dos resultados, do elo DC, não será impresso. Se diferente de zero, esta listagem será impressa.

IOFF - Se diferente de zero, os resultados intermediários do elo DC, serão gravados em um arquivo para serem plotados. Se igual a zero estes resultados não serão gravados.

OBS.: Os dois últimos cartões da massa de dados para o estudo de estabilidade são:

35 - END STUD

36 - END

O cartão acima descrito (cartão 6), aparece novamente, após o cartão (35) (END STUD). Com valores nulos, para finalizar o programa ou com dados para função 20 ou 21.

3.1 - Entrada de dados para a Rotina D.C.

O programa principal, entrega o controle de leitura para a rotina DC, sempre que lê o código 20 através da variável IITYPE.

O arquivo de dados para a rotina DC, é feito da seguinte maneira:

1º) CARTÃO: ler o número de elos existente no sistema (variável inteira). Este número deve ser igual ao número lido na estabilidade (NLKEST), caso contrário a execução será cancelada. - Formato livre (*).

2º) CARTÃO: Nome da barra da estação retificadora - Format (A8)

3º) CARTÃO:

Vdr	α	α_{min}	Rcr	Pr	
-----	----------	----------------	-----	----	---

 - Format livre (*)

Vdr - Tensão DC na retificadora, em [PU], proveniente do fluxo de carga.

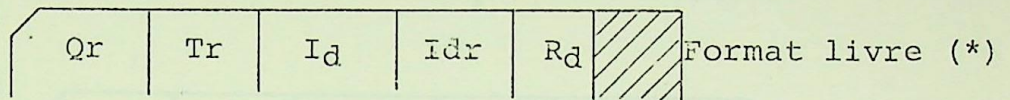
α - ângulo de disparo do retificador, em [graus], proveniente do fluxo de carga.

$\alpha_{\min}$ - ângulo mínimo de disparo do retificador.

Pr - Potência ativa do retificador, em [MW], proveniente do fluxo de carga.

Rcr - Resistência equivalente de comutação do retificador, em [PU].

4º) CARTÃO:



Qr - Potência reativa consumida pelo retificador, em [MVAR], proveniente do fluxo de carga.

Tr - Tap do transformador do retificador, em [PU], proveniente do fluxo de carga.

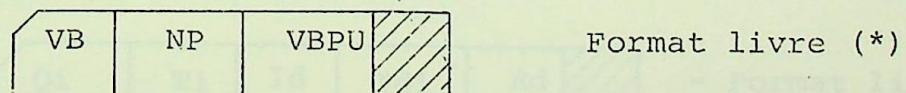
OBS.: este valor permanece fixo durante a execução do programa.

Id - Corrente na linha DC, em [Ampère], proveniente do fluxo de carga.

Idr - igual a Id

Rd - Resistência da linha DC, em [PU] na base da linha.

5º) CARTÃO:



VB - tensão base, em [KV]

$$VB = V_p \times N_p$$

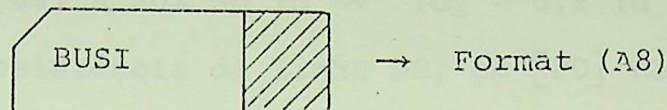
onde:

V_p - tensão em [KV] por polo

NP - Número de polos considerado no estudo

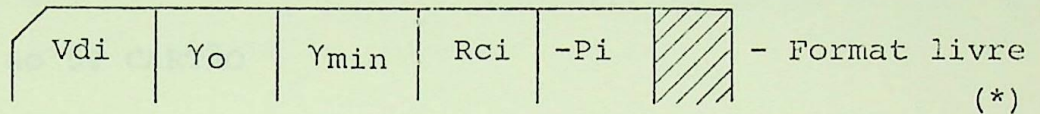
VBPU - tensão em [PU] do elo CC

69) CARTÃO:



BUSI → Nome da barra da estação inversora

79) CARTÃO:



Vdi - tensão DC na inversora, em [PU], proveniente do fluxo de carga.

γ_0 - ângulo de extinção (gama) nominal, em [graus], proveniente do fluxo de carga.

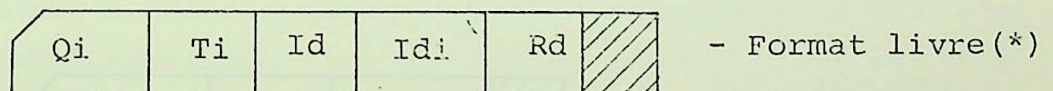
γ_{min} - igual a γ_0

Rci - Resistência equivalente de comutação do inversor, em [PU].

Pi - Potência ativa do inversor, em [MW].

OBS.: este valor entra com sinal negativo.

89) CARTÃO:



Qi - Potência reativa consumida pelo inversor, em [MVAR], proveniente do fluxo de carga.

Ti - Tap do transformador do inversor, em [PU], proveniente do fluxo de carga.

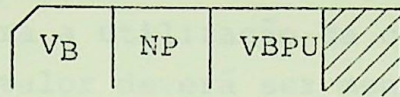
OBS.: vale a mesma observação feita para TR.

Id - corrente na linha DC, em [Ampère], proveniente do fluxo de carga.

I_{di} - igual a 90% do $I_d \Rightarrow I_{dI} = 0,9 I_d$

R_d - Resistência da linha DC, em [PU] na base da linha.

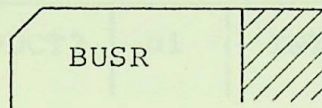
9º) CARTÃO:



- Format livre (*)

- igual ao 5º CARTÃO

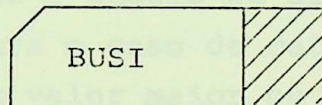
10º) CARTÃO:



- Format (A8)

BUSR -- Nome da barra do retificador

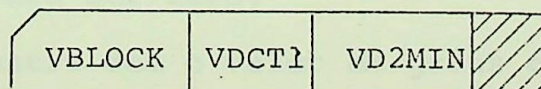
11º) CARTÃO:



-- Format (A8)

BUSI - Nome da barra do inversor

12º) CARTÃO:



- Format livre(*)

V_{BLOCK} - tensão AC de bloqueio do inversor, em [PU], abaixo da qual ocorre falha de comutação.

$VDCT1$ - tensão DC mínima do inversor, em [PU], abaixo da qual o elo será desenergizado (característica simples), ou operará sob o modo de tensão reduzida no

inversor (característica composta). Esta tensão não pode ser negativa nem maior ou igual à tensão de operação do elo.

VD2MIN - tensão DC de desligamento do inversor, em [PU]. Para a utilização da característica composta, este valor deverá ser menor que a tensão mínima. Para a utilização da característica simples, este valor deverá ser, obrigatoriamente, igual à tensão mínima. Esta não pode ser negativa nem maior do que a tensão mínima do inversor.

139) CARTÃO:

VDCT2	α_i	INTER	CONTROLE	MODULAÇÃO	
-------	------------	-------	----------	-----------	--

- Format livre (*)

VDCT2 - tensão DC mínima do retificador, em PU, abaixo da qual a ordem de corrente será diminuída, mantendo - se o ângulo de disparo do inversor igual ao mínimo. Para o caso de característica composta, utiliza - se um valor maior ou igual $a = \frac{3}{\pi} \cdot X_t \cdot I_{di}$

onde

X_t : reatância do transformador

I_{di} : ordem de corrente do inversor

Para o caso de característica simples este valor deverá ser zero.

α_i - entre com o valor em graus do alfa mínimo do inversor. Este valor não pode ser menor que 90° , nem maior ou igual a 180° . Para característica composta recomenda-se um valor entre 110° e 130° ; este campo deve ser utilizado caso não tenha sido selecionado algum valor para a tensão mínima do retificador. Para característica simples este campo deve ser zero.

INTER - entre com o número de intervalos de tempo necessários para atingir a ordem de corrente nominal durante o religamento automático do elo (após a eliminação da falta).

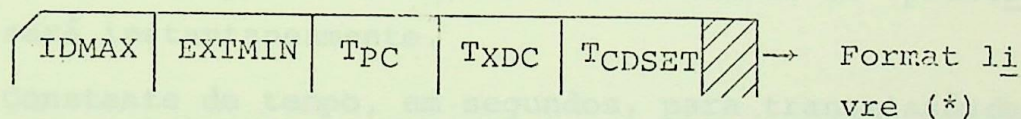
CONTROLE - entre com o tipo de controle a ser usado pelo elo:

- ϕ - se controle em corrente constante
- 1 - se controle em potência constante

MODULAÇÃO - entre com o tipo de modulação a ser usada pelo elo:

- ϕ - se modulação em corrente
- 1 - se modulação em potência
- 2 - se modulação em tensão (gama)
- 3 - se modulação combinada (em corrente e tensão simultaneamente)
- 4 - se modulação coordenada (mesmo sinal para as FT's)
- 5 - se modulação inibida

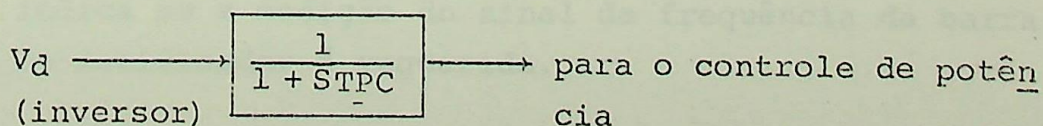
149) CARTÃO:



IDMAX - Entre com o valor, em [ampêres], da corrente máxima transmitível pelo elo cc; não sendo admitido valor acima deste, durante a simulação, mesmo sob o efeito da modulação e/ou controle em potência.

EXTMIN - Entre com o valor, em graus, do ângulo de extinção abaixo do qual ocorre falha de comutação no conversor inversor caso não se queira simular este fenômeno, deixe este campo zerado.

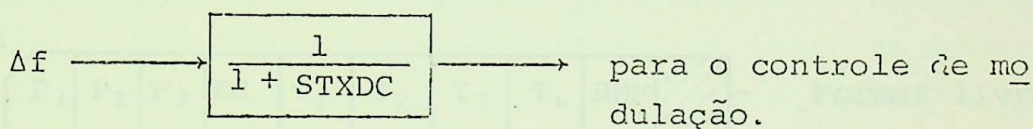
TPC - constante de tempo, em segundos, do processo de medição de tensão V_d (do terminal inversor) para o controle de potência constante do elo.



Se este valor for relativamente alto, por exemplo 0,5 seg, o elo terá quase que um comportamento de controle em corrente constante, durante um distúrbio, apesar de estar ajustado para controle em potência.

Se este valor for nulo, este processo será considerado instantâneo.

TXDC - constante de tempo, em segundo, do sistema de aquisição do (s) valor (es) da(s) frequência(s) na (s) barra(s) do(s) conversor(es) utilizado(s) no processo de modulação do elo. Funciona como um filtro do sinal de entrada da função de transferência da modulação.

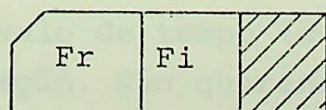


Se este campo for nulo, esta transmissão se processará instantaneamente.

TCDSET - Constante de tempo, em segundos, para transmissão da ordem de corrente. Caso este campo tenha um valor nulo, assumir-se-á o valor "default" de 0.020 segundos.

OBS.: Se as constantes de tempo informadas forem não nulas, deve-se tomar o cuidado para que o intervalo de integração, seja menor que a menor constante de tempo usada. Esta observação é também extendida aos cartões (16) e (17).

159) CARTÃO:



- Format livre (*)

Fr - indica se a medição do sinal de frequência da barra do retificador é requerida.

entre com: ϕ para que o sinal seja utilizado

1 para que o sinal não seja utilizado

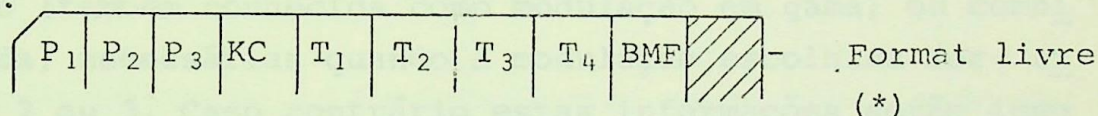
Fi - indica se a medição do sinal de frequência da barra do inversor é requerida.

entre com: ϕ para que o sinal seja utilizado

1 para que o sinal não seja utilizado

OBS.: Este cartão e o próximo (cartão 16), contém informações para a modulação em corrente ou potência ou combinada, necessárias, portanto, quando a modulação escolhida, for do tipo ϕ , 1 ou 3. Caso contrário estas informações serão ignoradas, mas a presença do cartão é obrigatória, mesmo que zerado.

169) CARTÃO:



P_1 - Margem de Modulação Superior: entre com a máxima variação positiva de potência, em $[MW]$, imposta pela modulação. Este limite é opcional. Caso não se queira fixar tal limite, entra-se com zero.

P_2 - Margem de Modulação Inferior: entre com a máxima variação negativa de potência, em $[MW]$, e acompanhada de sinal negativo, imposta pela modulação. Caso não se queira fixar tal limite, entra-se com zero.

P_3 - Máxima variação absoluta de Potência: entre com o valor absoluto da máxima variação de potência, em $[MW]$, por intervalo de tempo (de balanço de carga), imposta pela modulação. Não querendo fixar tal limite entre com zero.

A função de transferência aqui representável é da forma:

$$G(s) = \frac{Kc \ s \ (1 + sT_4)}{(1 + sT_1) (1 + sT_2) (1 + sT_3)}$$

K_C - Ganho da Função de Transferência: entre com o ganho K_C da função de transferência $G(s)$ em P.U de potência por Hz.

T_1, T_2, T_3, T_4 - Constantes de Tempo da Função de Transferência: estes valores, em segundos, devem ser maiores ou iguais a zero.

BMF - Banda Morta: entre com o valor da "banda morta" na medição do sinal de entrada ("Slip" de frequência), em Hz, para a F.T.

Caso este valor seja nulo, será adotado o valor "default" de 0.025 Hz.

179) CARTÃO:

Este cartão contém informações para a modulação em tensão (também conhecida como modulação em gama) ou combinada, necessárias quando a modulação escolhida for tipo 2 ou 3. Caso contrário estas informações serão ignoradas, mas a presença deste cartão é obrigatório, mesmo que zerado.

GMAX	G_1	G_2	G_3	KG	T_1	T_2	T_3	T_4	BMG	- Format livre (*)
------	-------	-------	-------	----	-------	-------	-------	-------	-----	-----------------------

GMAX - Gama Máximo: entre com o máximo valor, em [graus], que o ângulo gama mínimo do inversor pode assumir, não sendo admitido valor acima deste, durante a simulação, mesmo sob o efeito da modulação.

G_1 - Margem de Modulação Superior: entre com a máxima variação positiva, em [graus], do ângulo gama mínimo do inversor imposta pela modulação. Este limite é opcional. Caso não se queira fixar tal limite, entra-se com zero.

G_2 - Margem de Modulação Inferior: entre com o limite inferior, em [graus], da variação de gama mínimo do inversor imposta pela modulação. Este valor não pode ser negativo. Caso não se queira fixar tal limite, entra-se com zero.

G_3 - Máxima variação absoluta de Gama: entre com o valor absoluto da máxima variação de gama mínimo do inversor, em [graus], por intervalo de tempo (do balanço de carga), imposta pela modulação. Não querendo fixar tal limite entre com zero.

A modulação em gama implementada neste programa não permite variações negativas, ou seja, sua saída é sempre maior ou igual a zero. Esta filosofia foi adotada considerando-se que o inversor já opera, em condições de regime, num gama mínimo, no intuito de minimizar a absorção de reativos pelo conversor.

A função de transferência aqui representável, é a mesma que para a modulação em corrente, ou seja:

$$G(s) = \frac{KG S (1 + ST_4)}{(1 + ST_1)(1 + ST_2)(1 + ST_3)}$$

KG - Ganho da Função de Transferência: entre com o ganho KG da função de transferência $G(s)$, em [graus] por P.U. de tensão.

T_1, T_2, T_3, T_4 - Constantes de tempo da Função de Transferência: estes valores, em segundos, devem ser maiores ou iguais a zero.

BMG -- Banda Morta: entre com o valor da "banda morta" na medição do sinal de desvio de tensão (AC da barra inversora), em [PU], para a F.T.. Caso este campo permaneça com valor nulo, será adotado um valor "default" de 0.001 P.U.

OBS.: os cartões (2) a (17) são dados para um único elo cc, se houver mais de um elo cc no sistema, estes cartões devem ser repetidos de forma sequencial, isto é, após os dados do primeiro elo repete-se novamente os cartões (2) e (17) para o segundo e assim sucessivamente.

3.2 - Função 21 - Modificação das Condições dos Elos cc

O cartão de operação 21 faz com que o programa leia os cartões que se seguem, isto é, após o último cartão (17),

e que modificam a ordem de corrente dos elos cc ou aplicam faltas nos mesmos, durante a simulação. Quando o programa encontra o cartão de operação 21 são processados as alterações indicadas nos cartões subsequentes até que um cartão com os dígitos 9999 (coluna $\phi 1 - \phi 4$) seja encontrado.

1 - Entre com a Função 21 no cartão (6) dos dados de estabilidade.

2 - Os campos dos cartões contendo as modificações devem ser preenchidos como abaixo:

NELO	MOD	
------	-----	--

-Format livre (*)

NELO - Número de Elo cc: entre com o número do elo cc que se deseja modificar. Este número está associado à ordem de entrada dos dados do elo, que foram fornecidos sob a função 2 ϕ .

MOD - Entre com o valor da nova ordem de potência (em MW), ou de corrente (em Ampères) do elo cc, conforme o tipo de controle (potência ou corrente constante, respectivamente) escolhido para o mesmo. Caso este valor seja nulo, considera-se que uma falta é aplicada à linha de transmissão cc, com sua consequente desenergização.

3 - É possível colocar tantos cartões 21 quanto se queira durante a simulação.

APÊNDICE C - USO DO PLOTTER NO PROGRAMA DE ESTABILIDADE

1 - COMO USAR O PROGRAMA

Um programa para plotar as variáveis do programa de estabilidade, foi desenvolvida na EFEI. Para utilizá-lo, o usuário deve obedecer a seguinte sequência:

- i - Rodar o programa de estabilidade.
- ii - Montar um arquivo de dados, com as variáveis a serem plotadas. Este arquivo foi denominado "FILEGRAF".
- iii - chamar o programa do ploter, com os seguintes comandos:

: PLOTTER PARM1, PARM2, PARM3

onde:

PARM1 - Arquivo de dados do programa de estabilidade

PARM2 - Número lógico do terminal, em que o usuário encontra-se.

PARM3 - Valor constante e igual a 2.

Após este comando, aparecerá no terminal uma mensagem solicitando o título do caso em estudo.

Após entrar com a mensagem ou branco, o programa fará uma pausa. Para reiniciá-lo, entre com o comando "RESUME". Após plotar o primeiro gráfico o programa para novamente. Para reiniciá-lo entre com "RESUME", e assim sucessivamente, até o último gráfico ser plotado.

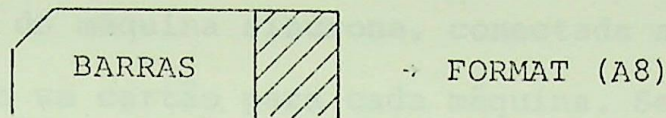
Os dados relativos a escala dos gráficos, são solicitados pelo programa. Portanto para cada gráfico há possibilidade de termos escala diferente.

Este programa foi desenvolvido para ser utilizado no computador da EFEI, um HP-3000, logo seu uso não se aplica a outros computadores, a não ser que seja adaptado para os mesmos.

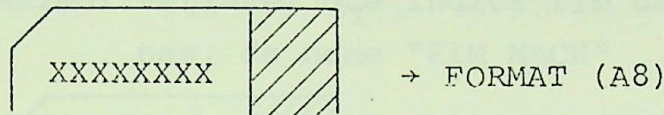
2 - COMO MONTAR O ARQUIVO FILEGRAF

1º) CARTÃO: Variável de controle das barras do sistema,

de nome "BARRAS".

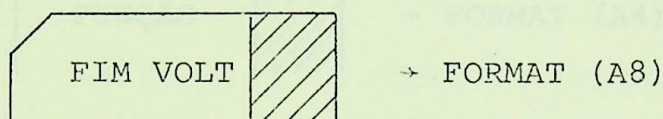


2º) CARTÃO: Nome da barra, para ser feito o gráfico de sua tensão.

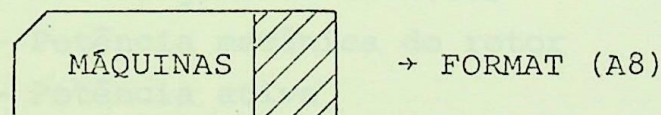


OBS.: é usado um cartão para cada barra. Se o usuário não deseja gráfico de tensão este cartão não é necessário.

3º) CARTÃO: Variável que indica fim dos dados de barra, de nome "FIM VOLT".

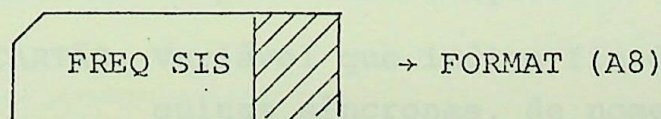


4º) CARTÃO: Variável de controle das máquinas do sistema, de nome "MÁQUINAS".

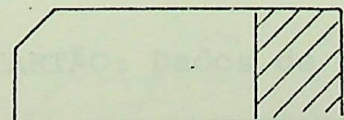


Os cartões (5) e (6) são relativos ao gráfico da frequência do sistema, se este gráfico não é desejado, os cartões (5) e (6) não são necessários.

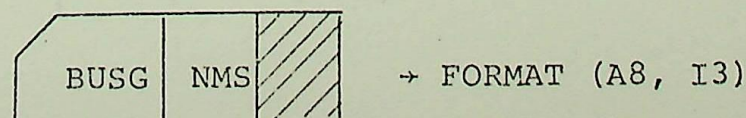
5º) CARTÃO: Variável de controle, para plotar a frequência do sistema, de nome "FREQ SIS".



6º) CARTÃO: Cartão em branco, só aparece junto com o cartão (5).



7º) CARTÃO: Dados da máquina síncrona.

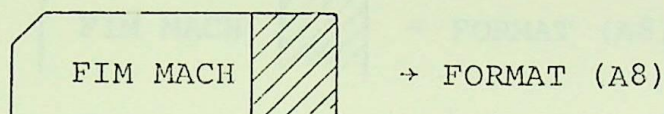


BUSG - Nome da barra em que está conectada a máquina síncrona.

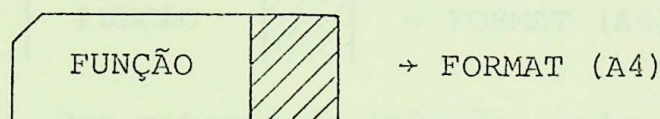
NMS - Número da máquina síncrona, conectada a barra BUSG.

OBS.: é usado um cartão para cada máquina. Se o usuário não de seja gráfico de máquinas síncronas, este cartão permanece em branco.

8º) CARTÃO: Variável que indica fim das máquinas síncronas, de nome "FIM MACH"



9º) CARTÃO: Função da máquina síncrona a ser plotada. Este cartão é de uso obrigatório, mesmo que em branco.

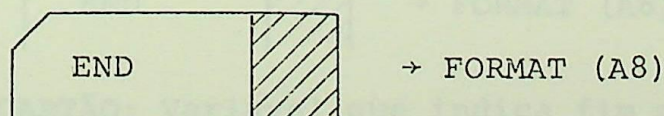


Das máquinas síncronas, podem ser plotadas as seguintes funções:

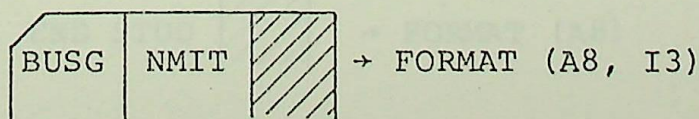
SPXT - Escorregamento do rotor
PMXT - Potência mecânica do rotor
PAXT - Potência ativa
PRXT - Potência reativa
VTXT - Tensão terminal
CTXT - Corrente terminal
FGXT - Frequência do gerador
ANXT - Ângulo do rotor

OBS.: é usado um cartão para cada função.

10º) CARTÃO: Variável que indica fim das funções de máquinas síncronas, de nome "END".



11º) CARTÃO: Dados de motor de indução

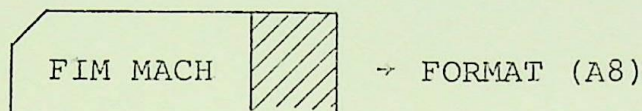


BUSG - Nome da barra em que está conectado o motor.

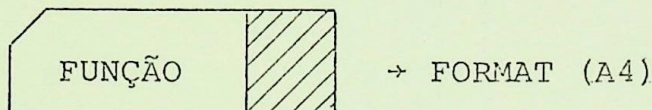
NMIT - Número do motor, conectado a barra BUSG.

OBS.: é usado um cartão para cada motor. Se o usuário não deseja gráfico de motor, este cartão permanece em branco.

12º) CARTÃO: Variável que indica fim dos motores de indução, de nome "FIM MACH".



13º) CARTÃO: Função do motor de indução a ser plotado. Este cartão é de uso obrigatório, mesmo que em branco.

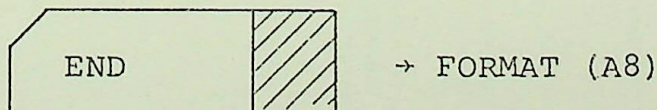


Dos motores de indução, podem ser plotados as seguintes funções:

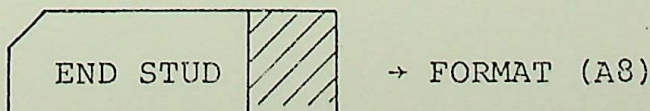
SPXT - Escorregamento do rotor
FMXT - Potência mecânica do rotor
PAXT - Potência ativa
PRXT - Potência reativa
VTXT - Tensão terminal
CTXT - Corrente terminal
TCXT - Torque da carga
TMXT - Torque do motor

OBS.: é usado um cartão para cada função.

14º) CARTÃO: Variável que indica fim das funções dos motores de indução, de nome "END".



15º) CARTÃO: Variável que indica fim do estudo, de nome "END STUD"



APÊNDICE D - DADOS PARA AS SIMULAÇÕES

Estudo de Estabilidade com Elo DC

Dados de entrada do sistema

SISTEMA ELETRICO DE POTENCIA - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA

CARACTERISTICAS GERAIS DO SISTEMA

ANALISE DE ESTABILIDADE - SISTEMA DA FIGURA 5.1
PERTURBACAO :
IMPEDANCIA DE FALTA : ZF = 0.0 + j 0.0
FREQUENCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
N.V.A. BASE = 100.0 M.V.A.

DADOS DO SISTEMA EM ESTADO PERMANENTE

DADOS DO FLUXO DE CARGA

I	BARRA	TENSAO	ANG.	MW GER	MVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR	I
I	1	1.00000	.00000	4530.00000	-407.75000	.00000	-2000.00000	I
I	2	.93700	-7.45700	.00000	.00000	5000.00000	-1050.00000	I
I	3	1.00000	-6.97000	600.00000	902.00000	.00000	.00000	I

OB.S.: OS DADOS ACIMA INCLUEM OS MOTORES DE INDUCCAO.

DADOS DAS LINHAS

I	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP	I
I	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	I
I	1	2	.00110	.00630	.00000	.00	I
I	3	2	.00000	.00140	.00000	.00	I

OB.S.: IMPEDANCIA SHUNT DESIGNADA POR - *

* D A D O S L I N K D C *

Estudo de Estabilidade com Elo DC Dados do elo DC

```

----- BARRA D01 CONVERSOR ----->1
VDC <PU>          ANGULO <GRAUS>      ANG. MIN <GRAUS>      RC = XT*3/PI <PU>      PDDC <MW>
1.000             14.00                5.00                .003100              2500.00
.
QDDC <MVAR>      TAP <PU>             QDDC <AMPERE>        COSSET <AMPERE>        RDDC <PU>
1613.00          .797                 4164.00              4164.00               .001400
.
TENSÃO BASE <KV>  NUMERO DE LINHAS      VPDDC <PU>
600.00           1                    1.000
  
```

```

----- BARRA D02 CONVERSOR ----->2
VDC <PU>          ANGULO <GRAUS>      ANG. MIN <GRAUS>      RC = XT*3/PI <PU>      PDDC <MW>
.966             17.00                17.00                .003100              -2415.00
.
QDDC <MVAR>      TAP <PU>             QDDC <AMPERE>        COSSET <AMPERE>        RDDC <PU>
1661.00          .812                 4164.00              3747.60               .001400
.
TENSÃO BASE <KV>  NUMERO DE LINHAS      VPDDC <PU>
600.00           1                    1.000
  
```

```

***** LINK DC 1      2      *****
VBLOCK <PU>-----VDCT1 <PU>-----VDCT2 <PU>-----ALFMIN <GRAU>-----NUM. INTERV.-----CONTROLE-----MODULACAO-----
.400             .500             .200             .500             .00             7             POTENCIA      COMBIN.
CORRENTE MAXIMA    ANGULO MINIMO    *-----CONSTANTES DE TEMPO <SEG>-----*
<AMPERE>          EXTINCAO <GRAU>    CONT. POTENCIA    MEDICAO FREQUENCIA    TRANSM. OPDEN
5250.00           .00             .300             .020             .020
  
```


Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados do elo DC

MODULACAO .
EM
CORRENTE .

----- LIMITADORES <MU> -----		GANHO <PU MW/Hz>	*-CONSTANTES DE TEMPO <SEC>--*			*COMPOSICAO DO SINAL* RETIFICADOR INVERSOR		
SUPERIOR	INFERIOR		MAX./STEP	T1	T2		T3	T4
.750.00	-750.00	.00	.113	.053	.032	.010	NÃO	SIM

MODULACAO .
EM
TENSAO .

----- LIMITADORES <GRAU> -----		GANHO <GRAU/PU>	*-CONSTANTES DE TEMPO <SEC>--*				
SUPERIOR	INFERIOR		MAX./STEP	T1	T2	T3	T4
13.00	.00	.00	.153	.045	.032	.010	

*** DADOS DOS LINKS DC O.K.***

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados das máquinas

Linhas monitoradas

I	BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	RESISTENCIA P.U.	REACTANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.	I
I	1	2	.00110	.00630	.00000	.00	I
I	3	2	.00000	.00140	.00000	.00	I

Dados das máquinas síncronas

Parâmetros das máquinas

I	BARRA NOME	MAQUINA NO	MVA CONST. BASE INERC.	TRANSITORIA EIXO-D	SINCRONA EIXO-Q	REACTANCIAS (P.U.)	SUBTRANSITORIA EIXO-Q	POT- ARM.	RESIST. (P.U.)	O/C TCS (SEGS)	FATOR
I	1	1	100.00	INFIN.	.0001	.0001	.0001	.0001	.0000	INFIN.	.0000
I	3	2	615.00	31.660	.2995	.6460	.8979	.6460	.2995	7.40	.0000

I	NOME DA BARRA	MAQ POTENCIA DE SAIDA DA MAQUINA NO.	NW	MYAR	FATOR AMORTECIMENTO	I
I	1	1	4530.34000	-407.75000	.00	I
I	3	2	600.00000	908.00000	2.00	I

Dados do regulador automático de tensão

NOME DA MQ	AVR	FILTRO	REG.	CS.T.	REG.	CS.T.	EXCITADOR	F/BK	F/BK	CS.T.	LIMITE	EXCITADOR	SATUR.(SE)
BARRA	NO	TIPO	C.T.	GANHO	TA	TB	MAX	MIN	TAXA	GANHO	C.T.	GANHO	TF
3	2	1	.0000	400.00	.050	.000	4.140	-4.140	99.99	-.240	.950	.040	1.000

REG.AUT.TENSÃO CONTROLA BARRA LOCAL EXCETO ONDE OUTRA FOR ESPECIFICADA

* NOTA : QUALQUER PARÂMETRO NAO ESSENCIAL OMITIDO DOS DADOS *
* DE ENTRADA ASSUME VALORES APROPRIADOS PARA UTILIZACAO NOS *
* PROCESSOS DE CALCULO COMO MOSTRADO ACIMA. *
* UM VALOR INDICADO COMO SENDO 9.999 OU 99.99 E NA REALIDADE *
* 9999. *

CARGAS SHUNT

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados das cargas

I	BARRA	MEGAWATTS	MEGAVARS	I
I	1	.00000	-2000.00000	I
I	2	5000.00000	-1050.00000	I

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados de chaveamento e processamento

SISTEMA 1 CASO NO. 1

MAQ. REF. = NO. 1 NA BARRA 1
STEP DE INTEGRACAO (SEG) = .010000
DURACAO DO ESTUDO (SEG) = 10.000000
INTERVALO DE IMPRESSAO (SEG) = .020000
ANGULO LIMITE DA MAQ. SINC. = 540. GRAUS

ESPECIFICACAO DAS OPERACOES DE CHAVEAMENTO

TEMPO CHAVEAMENTO	CHAVEAMENTO IN/OUT	BARRA ENVIANDO	BARRA RECEBENDO	RESISTENCIA P.U.	REATANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.
.0000	IN	2	*	.00000	.00010		
.1000	OUT	2	*	.00000	.00010		

CONDICOES INICIAIS

MAQUINAS SINCRONAS

NO. DA BARRA	MAQ NO.	ANG. ROTOR GRAUS	ESCORREG. ROTOR P.U.	POTENCIA MECANICA MW	POT. DE SAIDA ATIVA MW	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TENSAO DE CAMPO P.U.	CORRENTE DE CAMPO P.U.	FREQUENCIA GERADOR HZ
1	1 *	.26 *	.0000	4530.340	4530.410	1.000	45.487	1.000	1.000	60.000
3	2	10.65	.0000	600.000	604.385	1.001	10.883	2.432	2.432	60.000

REFERENCIA A MAQUINA DESIGNADA PELO - * 0 ANGULO DESTA MAQUINA E RELATIVO AO SISTEMA ZERO

REGULADORES AUTOMATICOS DE TENSAO

NOME DA MAQ BARRA	BARRA	I/P FILTRO	AMPLIFICADOR	FEEDBACK
	NO. CONTR. VOLTS	SINAL	SINAL	SINAL
3	2	1.001	.432	.000

FREQUENCIA DA BARRA DO GERADOR
BARRA (1) FREQUENCIA = 60.000HZ
BARRA (3) FREQUENCIA = 60.000HZ

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Processamento

FREQUENCIA DO SISTEMA=60.000HZ

TAXA DE MUDANCA= .000

TENSAO NAS BARRAS

BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO	BARRA	TENSAO	ANGULO
1	1.000	-0.0	2	.989	-7.70	3	1.001	-7.20

FLUXO DAS LINHAS

ENVIANDO			RECEBENDO-FIM			RECEBENDO-FIM					
BARRA	BARRA	P.U.	BARRA	P.U.	POTENCIA	BARRA	P.U.	POTENCIA			
ENVIANDO	RECEBENDO	P.U.	ENVIANDO	RECEBENDO	P(U)	ENVIANDO	RECEBENDO	P(U)			
1	2	.00110	.00630	1.000	-0.20.938	2092.42	-40.14	.989	-7.7 20.738	2045.20	-318.33
3	2	.00000	.00140	1.001	-7.2 10.903	610.49	904.85	.989	-7.7 10.903	610.49	883.21

LINK	BARRA RET/INV	VAC (PU)	VDDC (PU)	CDDC (PU)	CDSTH	VDCT1/2(PU)	PDDC (PU)	QDDC (PU)	MOLDC
1	1	1.0000	.9942	24.984	.9960	.5000	24.839	9.749	0
2	2	.9895	.9592	24.984	.9563	.5000	-23.965	12.370	

RELATORIO DE LINKS DC

LINK DC	1	2
BARRA TERMINAL	1	2
TENSAO AC	1.000 PU	.989 PU
TENSAO DC	.994 PU	.959 PU
POTENCIA DC	596.52 KW	575.54 KW
CONSUMO DE REATIVO	2483.92 MVAR	-2396.54 MV
ANGULO DE DISPARO E EXTINCAO	974.95 NVAR	1237.01 NVAR
ANGULO DE CONUTACAO	5.1 GRAUS	17.0 GRAUS
FACTOR DE POTENCIA	26.4 GRAUS	18.6 GRAUS
TAP DO TRANSFORMADOR	.93	.89
	1.255	1.231

*** LINK SOB MODO DE OPERACAO NORMAL.

SHUNT DE IMPEDANCIA .00000 +J .00010 P.U. FOI APLICADO A BARRA 2 AO TEMPO DE .0000 SEGUNDOS

Estudo de Estabilidade com Elo DC Relatório de saída do elo DC

SUMARIO DOS LINKS DC

LINK = 1

RETIFICADOR

1

INVERSOR

2

TEMPO SEG	TENSÃO AC PU	TENSÃO DC PU	POTÊNCIA MW	ALFA GRAUS	CORRENTE AMP	TENSÃO AC PU	TENSÃO DC PU	POTÊNCIA MW	GAMA GRAUS
.000	1.000	.994	2483.924	5.13	4164.000	.999	.959	-2396.536	17.00
.020	.986	.000	.000	90.00	.000	.018	.000	.000	90.00
.040	.967	.000	.000	90.00	.000	.018	.000	.000	90.00
.060	.937	.000	.000	90.00	.000	.018	.000	.000	90.00
.080	.937	.000	.000	90.00	.000	.018	.000	.000	90.00
.100	.937	.000	.000	90.00	.000	.018	.000	.000	90.00
.120	1.002	.000	.000	90.00	.000	1.026	.000	.000	90.00
.140	1.002	1.057	255.766	5.00	401.210	1.026	1.563	-255.955	17.94
.160	1.002	1.057	575.453	5.00	907.160	1.028	1.650	-571.505	18.92
.180	1.002	1.047	904.818	5.00	1439.927	1.029	1.035	-894.368	19.69
.200	1.002	.983	1218.516	18.71	2066.702	1.027	.965	-1196.989	27.00
.220	1.001	.966	1532.330	19.66	2644.934	1.016	.943	-1497.071	27.00
.240	1.001	.954	1852.994	19.70	3237.381	1.010	.927	-1800.171	27.00
.260	1.001	.941	2166.743	19.93	3837.403	1.003	.909	-2092.526	27.00
.280	1.001	.928	2285.584	20.82	4023.454	.995	.898	-2166.877	27.00
.300	1.000	.927	2305.201	21.07	4104.440	.993	.894	-2200.678	27.00
.320	1.000	.926	2318.441	21.23	4174.787	.992	.892	-2218.535	27.00
.340	1.000	.925	2329.186	21.27	4197.255	.991	.891	-2230.599	27.00
.360	1.000	.924	2333.803	21.30	4217.249	.990	.889	-2249.165	27.00
.380	1.000	.924	2341.127	21.34	4231.283	.990	.888	-2251.233	27.00
.400	1.000	.924	2347.978	21.34	4236.893	.990	.888	-2257.503	27.00
.420	1.000	.923	2355.135	21.36	4251.621	.989	.888	-2264.031	27.00
.440	1.000	.923	2362.654	21.38	4267.090	.989	.887	-2270.885	27.00
.460	1.000	.922	2370.949	21.39	4284.082	.989	.886	-2278.449	27.00
.480	1.000	.922	2378.839	21.41	4300.419	.988	.886	-2285.631	27.00
.500	1.000	.922	2386.127	21.43	4315.576	.988	.885	-2292.261	27.00
.520	1.000	.921	2392.939	21.45	4329.758	.988	.885	-2298.456	27.00
.540	1.000	.921	2399.353	21.46	4343.127	.988	.884	-2304.285	27.00
.560	1.000	.920	2405.421	21.48	4355.792	.987	.884	-2309.798	27.00
.580	1.000	.920	2411.179	21.49	4367.827	.987	.883	-2315.026	27.00
.600	1.000	.920	2416.649	21.51	4379.277	.987	.883	-2319.992	27.00
.620	1.000	.919	2421.851	21.52	4390.178	.987	.882	-2324.712	27.00
.640	1.000	.919	2426.799	21.54	4400.559	.987	.882	-2329.200	27.00
.660	1.000	.919	2431.509	21.55	4410.441	.986	.882	-2333.471	27.00
.680	1.000	.919	2435.991	21.56	4419.851	.986	.881	-2337.535	27.00
.700	1.000	.918	2440.260	21.57	4428.810	.986	.881	-2341.404	27.00
.720	1.000	.918	2444.325	21.58	4437.337	.986	.881	-2345.083	27.00
.740	1.000	.918	2448.196	21.59	4445.452	.986	.881	-2348.593	27.00
.760	1.000	.918	2451.889	21.60	4453.174	.986	.880	-2351.942	27.00

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados de entrada do sistema

SISTEMA ELETRICO DE POTENCIA - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA

CARACTERISTICAS GERAIS DO SISTEMA

ANALISE DE ESTABILIDADE - SISTEMA DA FIGURA 5.17
PERTURBACAO : CURTO-CIRCUITO NA BARRA 3
IMPEDANCIA DE FALTA : ZF = 0.0 + j 0.010
FREQUENCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
M.V.A. BASE = 100.0 M.V.A.

DADOS DO SISTEMA EM ESTADO PERMANENTE

DADOS DO FLUXO DE CARGA

I	BARRA	TENSAO	ANG.	MW GER	MVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR	I
I	1	1.03600	.00000	7050.00000	741.62000	.00000	.00000	I
I	2	1.03000	-5.26000	.00000	.00000	.00000	-2000.00000	I
I	3	.99600	-20.55000	.00000	.00000	.00000	-3050.00000	I
I	4	1.00000	-20.41000	.00000	65.00000	.00000	.00000	I
I	5	.99100	-25.97000	.00000	.00000	1500.00000	.00000	I
I	6	.98200	-30.21000	.00000	.00000	472.00000	.00000	I
I	7	1.00000	-22.36400	300.00000	10.45000	.00000	.00000	I
I	8	.97800	-35.49000	.00000	.00000	700.00000	.00000	I
I	9	.97700	-34.07000	.00000	.00000	300.00000	.00000	I
I	10	.93000	-39.20000	.00000	.00000	.00000	.00000	I
I	11	1.02000	-37.67000	738.00000	525.00000	.00000	.00000	I
I	12	.95600	-50.64000	.00000	.00000	1600.00000	.00000	I
I	13	1.00000	-61.07100	500.00000	1652.32000	3000.00000	.00000	I

OBS.: OS DADOS ACIMA INCLUEM OS MOTORES DE INDUCCAO.

DADOS DAS LINHAS

I	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP	I
I	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	I

Estudo de Estabilidade com Elo DC

Dados do elo DC

1	2	.00000	.00140	.00000	.00
2	3	.00110	.00530	.00000	.00
3	4	.00000	.00710	.00000	.00
4	5	.00000	.00460	.00000	.00
5	6	.00120	.01730	.44420	.00
6	7	.00080	.01230	.33340	.00
7	8	.00190	.02620	.62050	.00
8	9	.00030	.01230	.05200	.00
9	10	.00740	.04440	.00000	.00
10	11	.00030	.05520	.00000	.00
11	12	.00150	.05670	.00000	.00
12	13	.00310	.05680	.00000	.00
13	14	.00150	.02200	.00000	.00
14	15	.02530	.05340	.00000	.00
15	16	.00030	.01510	.00000	.00
16	17	.01720	.04350	.00000	.00
17	18	.00110	.00530	.00000	.00
18	19	.00200	.00500	.00000	.00
19	20	.00250	.01280	.00000	.00

OBS.: IMPEDÂNCIA SHUNT DESIGNADA POR - K

CHDS LINK DC

```

-----BARRA 00 CONVERSOR----->2-----
VDC <PU>          ANGULO <GRAUS>      ANG. MIN <GRAUS>      RC = XT*3/PI <PU>      PDDC <MMU>
1.000              14.00                5.00                .003100                2500.00
.....
QDDC <MVAR>      TAP <PU>              CDDC <AMPERE>      CDSET <AMPERE>      RDDC <PU>
1613.00          .797                  4164.00            4164.00              .001400
.....
TENSÃO BASE <KV>      NÚMERO DE LINHAS      VPUDC <PU>
600.00              1                  1.000

```

BARRA DO CONVERSOR -----3

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados do elo DC

VDC <PU> .966
ANGULO <GRAUS> 17.00
ANG. MIN <GRAUS> 17.00
RC = XT*3/PI <PU> .003100
PDOC <MW> -2415.00

QDOC <NVAR> 1661.00
TAP <PU> .812
CDOC <AMPERE> 4164.00
CDOSET <AMPERE> 3747.60
RDOC <PU> .001400

TENSAO BASE <KV> 200.00
NUMERO DE LINHAS 1
VPUDC <PU> 1.000

***** LINK DC 2 3 *****

VBLOCK <PU> .400
VDC1 <PU> .500
VDMIN <PU> .200
VDC2 <PU> .500
ALFMIN <GRAU> .00
HUM. INTERV. 7
POTENCIA INIBIDA

CORRENTE MAXIMA <AMPERE> 5250.00
ANGULO MINIMO EXTINCAO <GRAU> .00
CONSTANTES DE TEMPO <SEG> .020
CONT. POTENCIA MEDICAO FREQUENCIA TRANSM. ORDEM

MODULACAO EM
CORRENTE
LIMITADORES <MW> SUPERIOR 750.00
INFERIOR -750.00
GANHO <PU MU/HZ> .00
CONSTANTES DE TEMPO <SEG> T1 .113
T2 .053
T3 .032
T4 .010
COMPOSICAO DO SINAL* RETIFICADOR INVERSOR NAO SIM

MODULACAO EM
TENSAO
LIMITADORES <GRAU> SUPERIOR 13.00
INFERIOR .00
GANHO <GRAU/PU> .00
CONSTANTES DE TEMPO <SEG> T1 .153
T2 .045
T3 .032
T4 .010

*** DADOS DOS LINKS DC O.K.***

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados das máquinas.

LINHAS MONITORADAS

I	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REATORCIA	SUSCEPTANCIA	TAP	I
I	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	I
I	1	2	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	2	3	.00110	.00630	.00000	.00	I
I	3	4	.00000	.00710	.00000	.00	I
I	3	5	.00000	.00460	.00000	.00	I
I	3	8	.00120	.01730	.44420	.00	I
I	3	9	.00030	.01290	.38340	.00	I
I	3	10	.00190	.02620	.62050	.00	I
I	6	7	.00740	.04440	.00000	.00	I
I	8	13	.02530	.05340	.00000	.00	I

DADOS DAS MAQUINAS SINCRONHAS

PARAMETROS DAS MAQUINAS

I	BARRA	MAQUINA	NVA	CONST.	TRANSITORIA	SINCRONHA	REATORCIAS	POT	ARM.	TRANSITORIA	SUBTRANSITORIA	SATURACAO	I
I	NO	MODEL	BASE	INER.	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	I
I	1	4	7412.00	4.400	.3200	.9000	.7050	.2430	.0000	.0000	.0000	.0000	I
I	4	2	1200.00	1.600	.3700	1.7000	1.0000	.2200	.123	.0000	.0000	.0000	I
I	7	3	400.00	INFIN.	.0001	.0001	.0001	.0001	.0000	INFIN.	INFIN.	.0000	I
I	11	4	737.00	5.070	.1000	.9000	.6800	.2400	.0000	.0000	.0000	.0000	I
I	13	5	100.00	INFIN.	.0001	.0001	.0001	.0001	.0000	.0000	INFIN.	.0000	I

I	NOME DA	MAQ	POTENCIA	DE	SAIDA	DA	MAQUINA	FATOR	I
I	BARRA	NO.	NO	NO	NO	NO	NO	AMORTECIMENTO	I
I	1	1	7050.00000				741.62000	.00	I
I	4	2	.000000				65.00000	.00	I
I	7	3	300.00000				10.43000	.00	I
I	11	4	738.00000				525.00000	.00	I
I	13	5	500.00000				1652.32000	.00	I

DADOS DO REGULADOR AUTOMATICO DE TENSAO

HOME DA	MAQ	AVR	FILTRO	REG.	REG.	CS.T.	REG.	CS.T.	EXCITADOR	F/BK	F/BK	CS.T.	LIMITE	EXCITADOR	SATUR.(SE)			
BARRA	NO	TIPO	C.T.	CANHO	TA	TB	MAX	MIN	TAXA	CANHO	C.T.	GANHO	TF	TD	MAX	MIN	.75MAX	MAX
1	1	1	.0000	400.00	.100	10.000	6.000	-9.999	99.99	1.000	1.000	1.000	1.000	.000	6.000	-5.390	.000	.000
4	2	1	.0000	400.00	.100	10.000	8.000	-9.999	99.99	1.000	1.000	1.000	1.000	.000	8.000	-6.400	.000	.000
11	4	1	.0000	400.00	.100	10.000	6.000	-9.999	99.99	1.000	1.000	1.000	1.000	.000	6.000	-5.390	.000	.000

REG.AUT.TENSAO CONTROLA BARRA LOCAL EXCETO ONDE OUTRA FOR ESPECIFICADA

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados das cargas

* NOTA : QUALQUER PARAMETRO NAO ESSENCIAL OMITIDO DOS DADOS *
* DE ENTRADA ASSUME VALORES APROPRIADOS PARA UTILIZACAO NOS *
* PROCESSOS DE CALCULO COMO MOSTRADO ACIMA. *
* UM VALOR INDICADO COMO SENDO 9.999 OU 99.99 E NA REALIDADE *
9.999. *

CARGAS SHUNT

I	BARRA	MEGAWATTS	MEGAVARS	I
I	2	.00000	-2000.00000	I
I	3	.00000	-3050.00000	I
I	5	1500.00000	.00000	I
I	6	472.00000	.00000	I
I	8	700.00000	.00000	I
I	9	300.00000	.00000	I
I	12	1600.00000	.00000	I
I	13	3000.00000	.00000	I

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados de chaveamento e processamento

SISTEMA 1 CASO NO. 1

MAQ. REF. = NO. 1 NA BARRA 1
STEP DE INTEGRACAO (SEG) = .010000
DURACAO DO ESTUDO (SEG) = 10.000000
INTERVALO DE IMPRESSAO (SEG) = .020000
ANGULO LIMITE DA MAQ.SINC. = 540.0000

ESPECIFICACAO DAS OPERACOES DE CHAVEAMENTO

TEMPO CHAVEAMENTO	CHAVEAMENTO IN/OUT	BARRA ENVIANDO	BARRA RECEBENDO	RESISTENCIA P.U.	REATANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.
.0000	IN	3	*	.00000	.01000		
.1000	OUT	3	*	.00000	.01000		

CONDICOES INICIAIS

MAQUINAS SINCRONAS

HOME DA BARRA	MAQ NO.	ANG. ROTOR GRAUS	ESCORREG. ROTOR P.U.	POTENCIA MECANICA MW	POT. DE SAIDA ATIVA MW	REATIVA NVAR	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TENSAO DE CAMPO P.U.	CORRENTE DE CAMPO P.U.	FREQUENCIA GERADOR HZ
1	1 *	30.38 *	.0000	7050.000	7049.715	752.646	1.036	69.426	1.387	1.387	50.000
4	2	-50.79	.0000	.000	.002	64.903	1.000	.650	6.589	6.589	50.000
7	3	-52.73	.0000	300.000	300.000	10.489	1.000	3.002	1.000	1.000	50.000
11	4	-43.99	.0000	733.000	733.044	524.953	1.020	8.879	1.866	1.866	50.000
13	5	-91.42	.0000	500.000	500.016	1652.325	1.000	17.263	1.002	1.002	50.000

REFERENCIA A MAQUINA DESIGNADA PELO - * O ANGULO DESTA MAQUINA E RELATIVO AO SISTEMA ZERO

REGULADORES AUTOMATICOS DE TENSAO

HOME DA MAQ BARRA	NO.	BARRA CONTR. VOLT	1/P FILTRO SINAL	AMPLIFICADOR SINAL	FEEDBACK SINAL
1	1	1.035	1.036	1.387	.000
4	2	1.000	1.000	6.589	.000
11	4	1.020	1.020	1.866	.000

Estudo de Estabilidade com Elo DC Processamento

FREQUENCIA DA BARRA DO GERADOR
BARRA (1)) FREQUENCIA =60.000HZ
BARRA (4)) FREQUENCIA =60.000HZ
BARRA (7)) FREQUENCIA =60.000HZ
BARRA (11)) FREQUENCIA =60.000HZ
BARRA (13)) FREQUENCIA =60.000HZ

FREQUENCIA DO SISTEMA=60.000HZ

TAXA DE RUJDAJCA= .000

TENSÃO NAS BARRAS

BARRA	TENSÃO	ÂNGULO	BARRA	TENSÃO	ÂNGULO	BARRA	TENSÃO	ÂNGULO
1	1.036	.09	2	1.030	-5.13	3	.995	-20.41
5	.990	-25.94	6	.982	-30.19	7	1.000	-22.36
9	.977	-34.06	10	.980	-39.19	11	1.020	-37.67
13	1.000	-61.07				12	.953	-50.63

FLUXO DAS LINHAS

ENVIANDO				RECEBENDO-FIM			
BARRA	BARRA	R	X	TENSÃO	POTENCIA	TENSÃO	POTENCIA
ENVIANDO	RECEBENDO	P.U.	P.U.	P.U.	(MW)	P.U.	(MW)
1	2	.00000	.00140	1.036	1.036	1.030	6998.94
2	3	.00110	.00639	1.030	-5.2	.995	-20.4
3	4	.00000	.00710	.995	-20.4	1.000	-20.4
3	5	.00000	.00469	.995	-20.4	.990	-25.9
3	8	.00120	.01730	.995	-20.4	.977	-35.5
3	9	.00080	.01290	.995	-20.4	.980	-39.2
3	10	.00190	.02620	.995	-20.4	1.000	-22.4
6	7	.00740	.04440	.982	-30.2	1.000	-61.1
8	13	.02530	.05840	.977	-35.5	1.000	-61.1

LINK	BARRA(RET/INV)	VAC (PU)	VDDC (PU)	QOSTH	VDCT1/2(PU)	PDDC (PU)	QDDC (PU)	MOLDC
1	2	1.0304	1.0010	.9728	.5000	25.009	11.597	0
3	3	.9950	.9660	.9563	.5000	-24.135	12.429	0

SHUNT DE IMPEDANCIA .00000 +J .01000 P.U. FOI APLICADO A BARRA 3 AO TEMPO DE .0000 SEGUNDOS

LINK	BARRA(RET/INV)	VAC (PU)	VDDC (PU)	QOSTH	VDCT1/2(PU)	PDDC (PU)	QDDC (PU)	MOLDC
1	2	.9132	.6720	.7628	.5000	15.730	17.842	0
3	3	.6813	.6370	.2563	.5000	-15.916	9.493	0
LINK	BARRA(RET/INV)	VAC (PU)	VDDC (PU)	QOSTH	VDCT1/2(PU)	PDDC (PU)	QDDC (PU)	MOLDC
1	2	.8930	.6626	.7702	.5000	16.553	17.314	0

Estudo de Estabilidade com Elo DC Relatório de saída do elo DC

***** SUMARIO DOS LINKS DC *****
LINP = 1

TEMPO SEG	RETIFICADOR				INVERSOR				GAINA GRAUS
	TENSAO AC PU	TENSAO DC PU	POTENCIA MW	ALFA GRAUS	CORRENTE AMP	TENSAO AC PU	TENSAO DC PU	POTENCIA MW	
	2				3				
.000	1.030	1.001	2500.875	13.40	4164.000	.995	.966	-2413.487	17.00
.020	.913	.672	1678.984	40.29	4164.000	.681	.677	-1591.596	17.00
.040	.893	.663	1655.330	39.63	4164.000	.672	.628	-1567.942	17.00
.060	.890	.659	1664.558	39.66	4207.744	.670	.624	-1575.325	17.00
.080	.886	.654	1678.776	39.64	4277.344	.665	.618	-1586.565	17.00
.100	.880	.648	1694.630	39.66	4359.800	.660	.611	-1598.831	17.00
.120	.875	.643	1713.602	9.34	4448.095	.982	.947	-2527.883	17.00
.140	1.005	.985	2827.602	12.34	4538.972	.994	.958	-2609.880	17.00
.160	1.028	.996	2713.716	12.50	4576.500	.987	.950	-2607.785	17.00
.180	1.022	.988	2713.345	12.50	4576.500	.987	.944	-2595.287	17.00
.200	1.019	.983	2701.036	13.12	4580.610	.982	.940	-2576.290	17.00
.220	1.017	.978	2681.524	13.65	4569.442	.977	.936	-2556.315	17.00
.240	1.015	.974	2660.787	14.13	4552.853	.973	.932	-2537.169	17.00
.260	1.013	.970	2640.846	14.56	4535.496	.969	.929	-2519.649	17.00
.280	1.011	.967	2622.534	14.94	4519.270	.966	.926	-2504.018	17.00
.300	1.009	.964	2606.297	15.27	4504.818	.963	.924	-2490.330	17.00
.320	1.008	.962	2592.036	15.56	4492.250	.961	.922	-2478.539	17.00
.340	1.007	.959	2579.760	15.80	4481.465	.958	.920	-2468.565	17.00
.360	1.006	.958	2569.372	16.01	4472.285	.957	.918	-2460.313	17.00
.380	1.005	.956	2560.770	16.17	4464.513	.955	.917	-2453.680	17.00
.400	1.004	.955	2553.842	16.30	4457.952	.954	.916	-2448.562	17.00
.420	1.004	.954	2548.475	16.40	4452.412	.953	.916	-2444.856	17.00
.440	1.004	.953	2544.558	16.47	4447.712	.952	.916	-2442.455	17.00
.460	1.004	.954	2541.977	16.50	4443.684	.952	.916	-2441.262	17.00
.480	1.005	.954	2540.626	16.51	4440.170	.953	.916	-2441.262	17.00
.500	1.005	.954	2540.399	16.49	4437.026	.953	.917	-2441.175	17.00
.520	1.006	.955	2541.193	16.44	4434.115	.954	.918	-2442.100	17.00
.540	1.006	.956	2542.909	16.38	4431.313	.955	.919	-2443.841	17.00
.560	1.007	.958	2545.454	16.28	4428.506	.957	.921	-2446.612	17.00
.580	1.008	.960	2548.741	16.17	4425.592	.958	.923	-2450.028	17.00
.600	1.010	.962	2552.687	16.04	4422.476	.960	.925	-2454.113	17.00
.620	1.011	.964	2557.221	15.89	4419.074	.963	.927	-2458.793	17.00
.640	1.013	.967	2562.276	15.72	4415.310	.965	.930	-2464.082	17.00
.660	1.015	.970	2567.797	15.53	4411.118	.968	.933	-2469.729	17.00
.680	1.017	.973	2573.734	15.33	4406.437	.971	.936	-2475.874	17.00
.700	1.019	.977	2580.045	15.11	4401.215	.974	.940	-2482.417	17.00
.720	1.022	.981	2586.691	14.88	4395.403	.978	.944	-2489.321	17.00
.740	1.024	.985	2593.638	14.63	4388.961	.982	.948	-2496.553	17.00
.760	1.027	.989	2600.849	14.38	4381.851	.986	.952	-2504.078	17.00
.780	1.030	.994	2608.283	14.10	4374.041	.990	.957	-2511.957	17.00
.800	1.034	.999	2615.891	13.82	4365.501	.995	.962	-2519.841	17.00

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados de entrada do sistema

SISTEMA ELETRICO DE POTENCIA - ESTUDO DE ESTABILIDADE TRANSITORIA

CARACTERISTICAS GERAIS DO SISTEMA

ANALISE DE ESTABILIDADE - SISTEMA DA FIGURA 5.17
PERTURBACAO : CURTO-CIRCUITO NA BARRA 3
IMPEDECENCIA DE FALTA : ZF = 0.0 + j 0.010
FREQUENCIA DO SISTEMA = 60.00 HERTZ
N.V.A. BASE = 100.0 M.V.A.

DADOS DO SISTEMA EM ESTADO PERMANENTE

DADOS DO FLUXO DE CARGA

I	BARRA	TENSAO	ANG.	MW GER	MVAR GER	CARGA MW	CARGA MVAR	I
I	1	1.03600	.00000	7050.00000	741.62000	.00000	.00000	I
I	2	1.03000	-5.26000	.00000	.00000	96.300	-2000.00000	I
I	3	.99600	-20.45000	.00000	.00000	.00000	-3050.00000	I
I	4	1.00000	-20.41000	.00000	65.00000	.00000	.00000	I
I	5	.99100	-25.97000	.00000	.00000	1500.00000	.00000	I
I	6	.98200	-30.21000	.00000	.00000	472.00000	.00000	I
I	7	1.00000	-22.36400	300.00000	10.49000	.00000	.00000	I
I	8	.97800	-35.43000	.00000	.00000	700.00000	.00000	I
I	9	.97700	-34.07000	.00000	.00000	300.00000	.00000	I
I	10	.98000	-39.20000	.00000	.00000	.00000	.00000	I
I	11	1.02000	-37.67000	738.00000	525.00000	.00000	.00000	I
I	12	.95600	-50.64000	.00000	.00000	1600.00000	.00000	I
I	13	1.00000	-61.07100	500.00000	1652.32000	3000.00000	.00000	I

Obs.: OS DADOS ACIMA INCLUEM OS MOTORES DE INDUCCAO.

DADOS DAS LINHAS

I	BARRA	BARRA	RESISTENCIA	REACTANCIA	SUSCEPTANCIA	TAP	I
I	EMISSORA	RECEPTORA	P.U.	P.U.	P.U.	P.C.	I

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados do elo DC

I	1	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	2	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	3	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	4	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	5	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	6	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	7	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	8	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	9	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	10	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	11	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	12	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	13	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	14	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	15	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	16	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	17	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	18	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	19	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	20	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	21	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	22	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	23	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	24	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	25	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	26	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	27	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	28	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	29	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	30	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	31	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	32	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	33	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	34	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	35	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	36	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	37	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	38	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	39	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	40	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	41	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	42	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	43	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	44	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	45	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	46	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	47	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	48	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	49	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	50	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	51	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	52	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	53	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	54	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	55	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	56	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	57	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	58	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	59	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	60	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	61	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	62	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	63	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	64	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	65	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	66	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	67	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	68	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	69	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	70	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	71	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	72	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	73	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	74	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	75	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	76	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	77	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	78	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	79	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	80	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	81	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	82	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	83	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	84	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	85	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	86	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	87	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	88	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	89	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	90	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	91	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	92	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	93	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	94	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	95	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	96	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	97	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	98	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	99	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	100	.00000	.00140	.00000	.00	I

OBS.: IMPEDANCIA SHUNT DESIGNADA POR - *

* DADOS LINK DC *

----- BARRA 00 CONVERSOR ----->2

VDC <PU>	ANGULO <GRAUS>	ANG. MIN <GRAUS>	PC = XT*3/PI <PU>	PDDC <MW>
1.000	14.00	5.00	.003100	2500.00
QDDC <MVAR>	TAP <PU>	CDDC <AMPERE>	CDSET <AMPERE>	RDDC <PU>
1613.00	.797	4164.00	4164.00	.001400

TENSAO BASE <KV>	NUMERO DE LINHAS	VPUDC <PU>
600.00	1	1.000

----- BARRA 00 CONVERSOR ----->3

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados do elo DC

VDC (PU)	ANGULO (GRAUS)	ANG. MIN (GRAUS)	PC = XT*3/PI (PU)	PODC (MW)
.966	17.00	17.00	.003100	-2415.00
QDDC (MVAR)	TAP (PU)	CDDC (AMPERE)	CDSET (AMPERE)	RODC (PU)
1661.00	.812	4164.00	3747.60	.001400
TENSÃO BASE (KV)	NÚMERO DE LINHAS	VPDC (PU)		
500.00	1	1.000		

LINK DC 2	3	*****		
VBLOCK (PU)	VDCT1 (PU)	VDCT2 (PU)	ALFMIN (GRAU)	NUM. INTERV.-----CONTROLE-----MODULAÇÃO
.400	.500	.200	.00	7 POTENCIA COMBIN.
CORRENTE MÁXIMA (AMPERE)	ÂNGULO MÍNIMO EXTINGUIÇÃO (GRAU)	*****		
5250.00	.00	CONT. POTENCIA	MÉDIA FREQÜÊNCIA	CONSTANTES DE TEMPO (SEG)-----* TRANSM.ORDEN
		.300	.020	.020
MODULAÇÃO EM CORRENTE	LIMITADORES (MW)	GANHO (PU MW/Hz)	CONSTANTES DE TEMPO (SEG)	*COMPOSIÇÃO DO SINAL* RETIFICADOR INVERSOR
	SUPERIOR INFERIOR	MAX./STEP	T1 T2 T3 T4	NAO SIM
	750.00 -750.00	.00	.113 .053 .032 .010	
MODULAÇÃO EM TENSÃO	LIMITADORES (GRAU)	GANHO (GRAU/PU)	CONSTANTES DE TEMPO (SEG)	
	SUPERIOR INFERIOR	MAX./STEP	T1 T2 T3 T4	
	13.00 .00	.00	.158 .045 .032 .010	

*** DADOS DOS LINKS DC O.K.***				

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados das máquinas

LINHAS MONITORADAS

I	BARRA EMISSORA	BARRA RECEPTORA	RESISTENCIA P.U.	REATANCIA P.U.	SUSCEPTANCIA P.U.	TAP P.C.	I
I	1	2	.00000	.00140	.00000	.00	I
I	2	3	.00110	.00520	.00000	.00	I
I	3	4	.00000	.00710	.00000	.00	I
I	3	5	.00000	.00460	.00000	.00	I
I	3	8	.00120	.01730	.44420	.00	I
I	3	9	.00080	.01290	.38340	.00	I
I	3	10	.00190	.02620	.62060	.00	I
I	6	7	.00740	.04440	.00000	.00	I
I	8	13	.02530	.05340	.00000	.00	I

DADOS DAS MAQUINAS SINCRONHAS

PARAMETROS DAS MAQUINAS

I	BARRA	MAQUINA NO	MVA CONST. BASE INERC.	TRANSITORIA SINCRONA	REATANCIAS (P.U.)	POT- ARM.	RESIST. (P.U.)	O/C TCS (SEGS)	FATOR
I	NONE	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
I	1	4	7412.00	4.400	.3200	.3200	.7050	.2430	.2430
I	4	2	1200.00	1.600	.3700	.3700	1.0000	.2200	.2200
I	7	3	100.00	INFIN.	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001
I	11	4	737.00	5.070	.1000	.1000	.6300	.2400	.2400
I	13	5	100.00	INFIN.	.0001	.0001	.0001	.0001	.0001

I	NONE DA BARRA	MAQ POTENCIA DE SAIDA DA MAQUINA	FATOR
I	1	7050.00000	.00
I	4	65.00000	.00
I	7	10.49000	.00
I	11	525.00000	.00
I	13	1652.32000	.00

DADOS DO REGULADOR AUTOMATICO DE TENSÃO

REG. CS.T.	REG. TA	REG. TB	REG. TC	REG. TD	REG. TE	REG. TF	REG. TG	REG. TH	REG. TI	REG. TJ	REG. TK	REG. TL	REG. TM	REG. TN	REG. TO	REG. TP	REG. TQ	REG. TR	REG. TS	REG. TT	REG. TU	REG. TV	REG. TW	REG. TX	REG. TY	REG. TZ
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

REG.AUT.TENSÃO CONTROLA BARRA LOCAL EXCETO ONDE OUTRA FOR ESPECIFICADA

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados das cargas

* NOTA : QUALQUER PARÂMETRO NÃO ESSENCIAL OMITIDO DOS DADOS *
* DE ENTRADA ASSUME VALORES APROPRIADOS PARA UTILIZAÇÃO NOS *
* PROCESSOS DE CÁLCULO COMO MOSTRADO ACIMA. *
* UM VALOR INDICADO COMO SENDO 9.999 OU 99.99 É NA REALIDADE *
* 9995. *

CARGAS SHUNT

I	BARRA	MEGAWATTS	MEGAVARS	I
I	2	.00000	-2000.00000	I
I	3	.00000	-3050.00000	I
I	5	1500.00000	.00000	I
I	6	472.00000	.00000	I
I	8	700.00000	.00000	I
I	9	300.00000	.00000	I
I	12	1600.00000	.00000	I
I	13	3000.00000	.00000	I

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Dados de chaveamento e processamento

SISTEMA 1 CASO NO. 1

MAQ. REF. = NO. 1 NA BARRA 1
STEP DE INTEGRAÇÃO (SEG) = .010000
DURAÇÃO DO ESTUDO (SEG) = 10.000000
INTERVALO DE IMPRESSÃO (SEG) = .020000
ÂNGULO LIMITE DA MAQ. SINC. = 540. GRAUS

ESPECIFICAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE CHAVEAMENTO

TEMPO CHAVEAMENTO	CHAVEAMENTO IN/OUT	BARRA ENVIANDO	BARRA RECEBENDO	RESISTENCIA P.U.	REATANCIA P.U.	SUSCETANCIA P.U.	TAP P.C.
.0000	IN	3	*	.00000	.01000		
.1000	OUT	3	*	.00000	.01000		

CONDIÇÕES INICIAIS

MAQUINAS SINCRONAS

NOME DA BARRA	MAQ NO.	ANG. ROTOR GRAUS	ESCORREG. ROTOR P.U.	POTENCIA MECANICA MW	POT. DE SAÍDA ATIVA MW	POT. REATIVA MVAR	TENSAO TERMINAL P.U.	CORRENTE TERMINAL P.U.	TENSAO DE CAMPO P.U.	CORRENTE DE CAMPO P.U.	FREQUENCIA GERADOR HZ
1	1 *	30.38 *	.0000	7050.000	7049.715	752.646	1.036	68.426	1.337	1.337	60.000
4	2	-50.79	.0000	.000	.002	64.903	1.000	.650	6.589	6.589	60.000
7	3	-52.73	.0000	300.000	300.000	10.489	1.000	3.002	1.000	1.000	60.000
11	4	-43.99	.0000	738.000	738.044	524.953	1.020	8.879	1.866	1.866	60.000
13	5	-91.42	.0000	500.000	500.016	1652.325	1.000	17.263	1.002	1.002	60.000

REFERENCIA A MAQUINA DESIGNADA PELO - * 0 ÂNGULO DESTA MAQUINA E RELATIVO AO SISTEMA ZERO

REGULADORES AUTOMATICOS DE TENSAO

NOME DA MAQ BARRA	NO.	CONTR.	VOLTS	I/P FILTRO SINAL	AMPLIFICADOR SINAL	FEEDBACK SINAL
1	1	1.036	1.036	1.337	.000	.000
4	2	1.000	1.000	6.589	.000	.000
11	4	1.020	1.020	1.866	.000	.000

Estudo de Estabilidade com Elo DC

Processamento

FREQUENCIA DA BARRA DO GERADOR
 BARRA (1)) FREQUENCIA = 60.000HZ
 BARRA (4)) FREQUENCIA = 60.000HZ
 BARRA (7)) FREQUENCIA = 60.000HZ
 BARRA (11)) FREQUENCIA = 60.000HZ
 BARRA (13)) FREQUENCIA = 60.000HZ

 FREQUENCIA DO SISTEMA=60.000HZ
 TAXA DE RUJDO= .000

TENSAO NAS BARRAS

BARRA	TENSAO	ANGULO	* R	BARRA	TENSAO	ANGULO	* X	BARRA	TENSAO	ANGULO	* R	BARRA	TENSAO	ANGULO	* X
1	1.036	.09		2	1.030	-5.18		3	.995	-20.41		4	1.000	-20.41	
5	.990	-25.94		6	.982	-30.19		7	1.000	-22.36		8	.977	-35.46	
9	.977	-34.06		10	.980	-39.19		11	1.020	-37.67		12	.956	-50.63	
13	1.000	-61.07													

FLUXO DAS LINHAS

ENVIANDO-FIM				RECEBENDO-FIM			
BARRA ENVIANDO	BARRA RECEBENDO	R P.U.	X P.U.	BARRA ENVIANDO	BARRA RECEBENDO	R P.U.	X P.U.
1	2	.00000	.00140	1	0.036	1.036	.1
2	3	.00110	.00630	1	0.030	1.030	-5.2
3	4	.00000	.00710	1	.995	1.030	-20.4
3	5	.00000	.00460	1	.995	1.030	-20.4
3	8	.00120	.01730	1	.995	1.030	-20.4
3	9	.00030	.01290	1	.995	1.030	-20.4
3	10	.00190	.02620	1	.995	1.030	-20.4
6	7	.00740	.04440	1	.982	1.030	-30.2
8	13	.02530	.05840	1	.977	1.030	-35.5

LINK	BARRA<RET/INV>	VAC (PU)	VDDC (PU)	COSTH	VDCT1/2<PU>	PDDC (PU)	QDDC (PU)	MOLDC
1	2	1.0304	24.984	.9728	.5000	25.009	11.587	0
	3	.9950	24.984	.9563	.5000	-24.135	12.429	

SHUNT DE IMPEDIANCIA .00000 +J .01000 P.U. FOI APLICADO A BARRA 3 AO TEMPO DE .0000 SEGUNDOS

LINK	BARRA<RET/INV>	VAC (PU)	VDDC (PU)	COSTH	VDCT1/2<PU>	PDDC (PU)	QDDC (PU)	MOLDC
1	2	.9132	24.984	.7628	.5000	16.790	17.842	0
	3	.6813	24.984	.9563	.5000	-15.916	9.493	

LINK	BARRA<RET/INV>	VAC (PU)	VDDC (PU)	COSTH	VDCT1/2<PU>	PDDC (PU)	QDDC (PU)	MOLDC
1	2	.8930	24.984	.7702	.5000	16.553	17.314	0

Estudo de Estabilidade com Elo DC
Relatório de saída do elo DC

SUMÁRIO DOS LINKS DC

LINK = 1

RETIFICADOR										INVERSOR									
2										3									
TEMPO SEG	TENSÃO AC PU	TENSÃO DC PU	POTENCIA MW	ALFA GRaus	CORRENTE AMP	TENSÃO AC PU	TENSÃO DC PU	POTENCIA MW	OMIA GRAUS	TEMPO SEG	TENSÃO AC PU	TENSÃO DC PU	POTENCIA MW	OMIA GRAUS					
.000	1.030	1.001	2500.875	13.40	4164.000	.995	.966	-2413.487	17.00										
.020	.913	.672	1678.984	40.29	4164.000	.631	.637	-1591.596	17.00										
.040	.893	.663	1655.330	39.63	4164.000	.672	.628	-1567.942	17.00										
.060	.890	.659	1664.558	39.66	4207.744	.670	.624	-1575.325	17.00										
.080	.886	.654	1678.776	39.64	4277.344	.665	.618	-1586.565	17.00										
.100	.880	.648	1697.609	39.66	4368.029	.660	.611	-1601.247	17.00										
.120	1.005	.984	2636.533	9.29	4464.807	.982	.947	-2536.113	17.00										
.140	1.028	.996	2724.953	12.30	4560.313	.994	.958	-2620.119	17.00										
.160	1.021	.988	2716.353	12.49	4584.051	.986	.949	-2610.445	17.00										
.180	1.019	.983	2700.403	13.12	4580.248	.982	.944	-2594.670	17.00										
.200	1.017	.978	2679.544	13.65	4565.863	.977	.940	-2574.474	17.00										
.220	1.015	.978	2695.544	28.18	4548.337	.973	.940	-2591.260	30.00										
.240	.988	.845	2295.967	29.07	4531.018	.950	.806	-2192.495	30.00										
.260	.986	.842	2291.874	29.17	4533.735	.936	.804	-2187.678	30.00										
.280	.984	.838	2289.159	29.31	4549.821	.931	.800	-2183.827	30.00										
.300	.981	.834	2287.304	29.44	4571.353	.927	.796	-2181.932	30.00										
.320	.978	.830	2287.637	29.56	4595.528	.923	.791	-2181.258	30.00										
.340	.975	.826	2288.846	29.68	4620.939	.919	.787	-2181.227	30.00										
.360	.972	.822	2290.556	29.78	4646.951	.915	.782	-2181.721	30.00										
.380	.970	.818	2292.740	29.87	4673.306	.911	.778	-2182.663	30.00										
.400	.967	.816	2300.894	29.75	4699.827	.908	.776	-2189.563	29.77										
.420	.965	.808	2519.425	19.89	4726.439	.905	.849	-2406.835	19.25										
.440	.981	.921	2626.740	16.90	4782.654	.935	.831	-2512.898	17.00										
	.982	.923	2638.022	16.93	4762.281	.927	.833	-2523.718	17.00										
.460	.982	.921	2631.031	17.10	4758.912	.925	.831	-2516.839	17.00										
.480	.982	.920	2623.142	17.23	4750.135	.924	.830	-2509.421	17.00										
.500	.981	.905	2573.301	19.87	4739.694	.923	.865	-2460.073	19.69										
.520	.977	.886	2513.412	22.13	4729.122	.917	.846	-2400.694	21.60										
.540	.973	.882	2499.719	22.15	4722.122	.913	.843	-2387.335	21.63										
.560	.974	.900	2548.811	19.46	4720.612	.913	.860	-2435.429	19.79										
.580	.978	.916	2595.032	17.54	4721.931	.919	.876	-2432.657	17.00										
.600	.982	.920	2606.707	17.35	4720.699	.924	.881	-2434.391	17.00										
.620	.982	.921	2606.762	17.20	4715.395	.924	.882	-2434.693	17.00										
.640	.983	.923	2606.857	17.21	4707.979	.926	.883	-2435.150	17.00										
.660	.984	.908	2560.699	19.94	4699.500	.923	.863	-2449.339	19.96										
.680	.981	.885	2491.123	22.86	4690.746	.923	.846	-2380.227	22.88										
.700	.977	.869	2443.954	24.51	4683.210	.919	.830	-2333.320	24.52										
.720	.975	.874	2456.801	23.71	4685.724	.918	.835	-2346.142	23.72										
.740	.978	.895	2518.352	21.11	4691.697	.922	.855	-2407.412	21.26										
.760	.984	.914	2577.882	18.86	4698.659	.930	.875	-2466.612	19.37										

APÊNDICE E - RELAÇÃO ENTRE AS ROTINAS DC IMPLEMENTADAS E O PROGRAMA DE ESTABILIDADE

O princípio básico que norteou a implementação de subrotinas FORTRAN que simulassem elos de corrente contínua em redes de corrente alternada para programas de estabilidade foi o da modularidade, que torna simples a adaptação das subrotinas desenvolvidas pela literatura [17], em qualquer programa de estabilidade transitória.

Por motivos anteriormente descritos foi utilizado o programa de estabilidade transitória da EFEI [1], o qual sofreu o acréscimo de seis rotinas referentes ao modelo do elo DC, e pequenas modificações nas rotinas AC já existentes.

As rotinas AC alteradas, tem como modificação principais as seguintes:

SYSTEM - Acessar a rotina que ler os dados necessários ao elo DC e os transfere para o programa de estabilidade.

- Acessar a rotina que inicializa dados e parâmetros referentes à modulação do elo DC.

As demais rotinas do programa de estabilidade não sofreram modificações substanciais, que mereçam descrição especial.

A influência do elo DC no programa de estabilidade, foi colocada no programa principal e não nas rotinas que fazem parte do referido programa. A maneira como foi implementado o elo DC no programa de estabilidade é explicada a seguir.

Interação AC/DC

Após serem lidos todos os dados do sistema em estudo, inclusive dados do elo DC quando este existir no sistema. O programa de estabilidade segue normalmente até encontrar a rona "SOL" cuja função é calcular a solução iterativa das máquinas e as tensões e ângulos das barras do sistema usando a regra

trapezoidal e a matriz Z do sistema esparso fatorado.

Antes do programa chamar a rotina "SOL" a influência do elo DC é inserida na matriz Y do sistema na forma de carga, nas barras em que o elo está conectado. Esta carga é considerada de potência constante ou corrente constante de acordo com o controle que estiver sendo usado para transmissão pelo elo DC. A matriz Y é então modificada, sem contudo haver mudanças na Topologia do sistema. Devido a este fato não é necessário reordenar a matriz Y , mas somente efetuar-se os cálculos referentes a fatoração desta matriz e assim obter-se a matriz Z para a nova condição de carga do sistema. Isto é feito chamando-se a rotina BIFA 3. Como esta rotina só efetua os cálculos referentes a fatoração, ela pode ser usada dentro do processo iterativo sem que isto provoque um grande aumento no tempo de computação.

Após ser inserida a influência do elo DC no sistema, a rotina "SOL" é chamada para encontrar a nova condição das máquinas do sistema e também as novas tensões e ângulos das barras do sistema.

Com as novas tensões e ângulos das barras do sistema é chamada a rotina DC que calcula os ângulos α e γ das pontes conversoras e também as potências injetadas nas barras de comutação, que servirão para o cálculo das novas tensões das barras do sistema na iteração posterior. Em seguida é chamada a rotina DC que efetua a modulação do elo DC para a iteração posterior. Esta rotina, sucintamente falando, altera a ordem de corrente do elo DC, função dos desvios de frequência das barras de comutação, que são calculadas a partir da variação do ângulo de fase das barras de comutação. Com isto, o ciclo iterativo é completado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- |01| - Chull G. Shin - "Simulação Digital para Estudos de Estabilidade Transitória e Rejeição de Carga em Sistemas Elétricos de Potência" - Tese de Mestrado, EFEI, 1981, Itajubá - MG - Brasil.
- |02| - E.W. Kimbark - "Direct Current Transmission" - Vol. I, Wiley Interscience.
- |03| - E. Uhlmann - "Power Transmission by Direct Current", Ed. Springer - Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1975.
- |04| - A. Ekstrom; G. Liss - "A Refined HVDC Control System", IEEE Trans. Pas, Vol. Pas-89, nº 516, May/June 1970, PP. 723-732.
- |05| - Nilson L.V. Gôes - "Análise, Modelagem e Simulação de Fontes e Fluxo Harmônico em Sistemas Elétricos" - Tese de Mestrado, EFEI, 1981, Itajubá - MG - Brasil.
- |06| - R. Jotten; J.P. Bowles; G. Liss; C.J.B. Martin; E. Rumps - "Control in HVDC Systems the State of the Art. Part I: Two Terminal System". Cigré, Report 14-10, Agosto/1978.
- |07| - G.K. Carter; C.E. Grund; H.H. Happ; R.Y. Pohl - "The Dynamics of AC/DC Systems with Controlled Multi-Terminal HVDC Transmission" - IEEE Pes Summer Meeting, Portland, Oregon, Julho, 1976 (Discussão de J.D. Ainsworth).
- |08| - M.Z. Tarnawsky - "HVDC Transmission Control Schemes", Manitoba Power Conference - EHVDC, Winnipeg, Manitoba, Agosto, 1971.
- |09| - J.P. Bowles - "Control Systems for HVDC Transmission", Report CEA, September, 1975, Edmonton.
- |10| - J.D. Ainsworth - "The Phase-Locked Oscillator - A New Control System for Controlled Static Converters", IEEE Vol. Pas-87, nº 3, Março 1968, PP 859-865
- |11| - E. Rumph; S. Ranade - "Comparison of Suitable Systems for HVDC Stations Connected to Weak A.C. Systems Part I. New Control Systems", IEEE Trans. Pas, Vol. Pas-91, 1972.
- |12| - R.W. Raywood, K.J. Ralls, - "Use of HVDC for Improving AC

- System Stability and Speed Control", Manitoba Power Conference, EHVDC, Junho 6-11, 1971, Winnipeg, Canadá.
- |13| - N.G. Hingorani; S.L. Wilsson; L. Cresap; E. Pohl; C. Grund-
"Active and Reative Power Modulation of HVDC Systems",
IEEE International Conference on Over-Voltage and
Compensation in Integrated AC/DC Systems", Julho 9-11,
1980, Winnipeg, Canadá.
- |14| - W. Becker; S. Ranade; E. Rumpf; T. Wess - "Control System
for the Cabora-Bassa HVDC Scheme, Design Criteria
Simulator Studies", Cigré Report 14-06, 1976.
- |15| - A. Ekstrom; L.E. Juhlin; G. Liss - "Parallel Conection of
Corection of Convertors for HVDC", IEEE Pes Summer Meeting,
México City, Julho 17-22, 1977.
- |16| - L. Begstrom; L. Juhlin; G. Liss; S. Svensson - "Simulator
Study of Multiterminal HVDC System Performance", IEEE
Winter Meeting, 1978 - Paper F 78 - 027 - 5.
- |17| - M. Szechtman, A.P. Guarini; E.S. Sobrinho - "Programa de
Estabilidade Eletromecânica - Versão DC" - Relatório Fi
nal - CEPEL 07/79.
- |18| - G. Moltgen - "Line Commutated Thyristor Converters",
Siemens - Ptman Publishing, 1972.
- |19| - G.D. Breuer Et Al: "The Dynamic Performance of AC Systems
With HVDC Transmission Links" - Cigré 1976 - 14-02.
- |20| - G.K. Carter Et Al: "The Dynamics of AC/DC Systems with
Controlled Multiterminal HVDC Systems" - IEEE Vol. Pas 96
March/April/1977.
- |21| - J.D. Ainsworth and C.J.B. Martin: "The Influence of HVDC
Links on AC Power Systems" - CEG, Journal - Vol.
- |22| - R.L. Cresap Et Al: "Operating Experience with Modulation
on the Pacific HVDC Intertie " - IEEE - Pas - 97 - July/
Aug/1978.
- |23| - G. Fahmy - "Analitical Methods for Multiterminal AC/DC
Systems", Ph.D. Thesis, Waterloo University, Ontário,
Canadá, Fev/1977.
- |24| - P.L. Dandeno; R.L. Hauth; and R.P. Schutz - "Effect of
Synchronous Machine Modeling in Large Scale System

Studies", IEEE Trans. Pas, Vol. Pas.92, nº 2, March/April 1973, PP. 572-582.

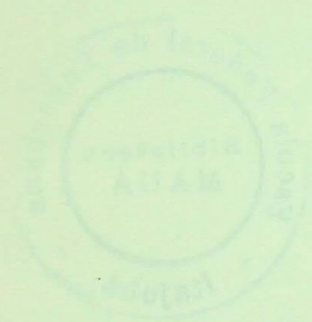
- |25| - J.G.C. Barros; M. Szechtman; G. Gambirasio; W. Pó; R.C. Zerbini; F.F. Boin - "Simulador em Elo de Transmissão em Corrente Contínua" - 4º Congresso Brasileiro de Automática, 1982, Campinas - São Paulo - Brasil.
- |26| - E.F. Figueiredo; A.S. Pedroso; J.B.S. Silva; J.A. Jardini - "Sistema de Transmissão de Itaipu Comportamento Dinâmico do Sistema AC/CC" - VI SNPTEE, 1981 - Camboriú - SC - Brasil.
- |27| - E.F. Figueiredo; M.Z. Taam Filho; H. Porangaba; S. Svensson - "Sistema de Transmissão de Itaipu em Corrente Contínua - Transitórios Eletromecânicos e Estabilidade"-VI SNPTEE, 1981, Camboriú - SC - Brasil.
- |28| - M.Z. Taam Filho; J.B.G. Soares Neto; P. Martin; L.B. Reis, T. Peterson - "Sistema de Transmissão de Itaipu em Corrente Contínua - Compensação Reativa das Estações Conversoras" - VI SNPTEE, 1981, Camboriú - SC - Brasil.
- |29| - P.C.A. Fernandes; D.O. Camponês do Brasil; J.B. Veiga; L. F.B. Ferreira - "Programa Digital para Cálculo das Condições em Regime Permanente do Elo de Corrente Contínua de Itaipu" - VI SNPTEE, 1981, Camboriú - SC - Brasil.
- |30| - J.C. Oliveira, J.R. Cogo - "Transmissão em Corrente Contínua" - Curso Básico de Transmissão em Corrente Contínua realizado pela EFEI-FUPAI-ELETROBRÁS, Itajubá - MG - Brasil.
- |31| - G.D. Breuer; J.F. Luini; C.C. Young - "Studies of Large AC/DC Systems on the Digital Computer", IEEE Trans. Pas, Vol. Pas-85, November 1966, PP. 1107-1115.
- |32| - James; F. Clifford; A.H. Schmidt, Jr. - "Digital Representation of a DC Transmission Systems and its Controls", IEEE Pica Conference, Denver, Colorado, Maio 18-21, 1969.
- |33| - D.P. Control; J.A. Schassbergen; R.A. Fernandes - "The Use of Voltage Feedback in HVDC Converter Control", IEEE Trans. Pas, Vol. Pas-95, nº 5, September/October 1976.
- |34| - J.G.C. Barros - "Tópicos sobre a Operação e o Controle de

Interligações CCAT a dois Terminais", Curso Avançado de Transmissão em Corrente Contínua (CATCC), realizado pela EFEI-FUPAI-ELETROBRÁS, Itajubá-MG-Brasil.

- |35| - R.P. Pinheiro - "A Eletronorte, Planejamento e o Projeto Tucuruí", Palestra do Chefe do Departamento de Planejamento Elétrico da Eletronorte, realizada na EFEI em 20/09/82, Itajubá - MG - Brasil.
- |36| - Juarez C. Lopes - "Modelagem de Ligações em Corrente Contínua", Tese de Mestrado, COPPE-UFRJ, 1982, Rio de Janeiro - RJ - Brasil.
- |37| - M. Szechtman; A.P. Guarini; E.S. Sobrinho; J.G.C. Barros - "Programa de Estabilidade Eletromecânica com Inclusão de Elos de Transmissão em Corrente Contínua" - IV SNPTEE, 1979, Recife - PE - Brasil.



DATA	02 / 01 / 19 84
PROC.	-
PED.	-
LIV.	CPG / EFEI
NCR\$	Loaga



EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200383



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA