

JOMAR SALES VASCONCELOS

SIMULAÇÃO DINÂMICA DE ANÉIS CA/CC

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO DE ENERGIA.

**ORIENTADORES: ELIANE MARISE RAPÓSO DE CARVALHO, Mestre
WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph. D.**

Campina Grande, Março de 1990.

A meus pais,
João e Tereza.



V331s Vasconcelos, Jomar Sales.
Simulação dinâmica de anéis CA/CC / Jomar Sales
Vasconcelos. - Campina Grande, 1990.
181 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 1990.
"Orientação : Prof. M.Sc. Eliane Marise Rapôso de
Carvalho, Prof. Dr. Wellington Santos Mota".
Referências.

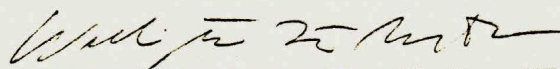
1. Sistemas Elétricos. 2. Sistemas Elétricos CA/CC. 3.
Anéis CA/CC - Simulação Dinâmica. 4. Dissertação -
Engenharia Elétrica. I. Carvalho, Eliane Marise Rapôso de.
II. Mota, Wellington Santos. III. Universidade Federal da
Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.311(043)

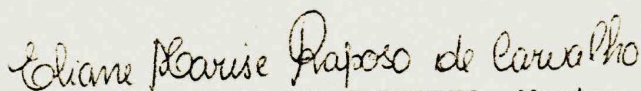
SIMULAÇÃO DINÂMICA DE ANÉIS CA/CC

JOMAR SALES VASCONCELOS

DISSERTAÇÃO APROVADA 21.03.90



WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFPB
Orientador



ELIANE MARISE RAPOSO DE CARVALHO, Mestre, UFPB
Orientadora



WASHINGTON EVANGELISTA DE MACEDO, Mestre, UFPB
Componente da Banca



JOSÉ CALAZANS DE CASTRO, Dr., UFPB
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB

MARÇO - 1990

AGRADECIMENTOS

- Aos professores ELIANE MARISE RAPOSO DE CARVALHO e WELLINGTON SANTOS MOTA, pela idéia inicial, orientação, críticas e revisão final do trabalho.
- Ao engenheiro JOAO VIANA DA FONSECA NETO, pelo auxílio e desenvolvimento do "soft" gráfico utilizado.
- Ao funcionário do sistema de computação "VAX" ANTONIO ALEIXO, pela excelente prestação.
- Ao CNPq (CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO), pelo apoio financeiro.
- À todos que contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia de simulação de estabilidade com inclusão de elo CC.

A adaptação e junção do: simulador de estabilidade, fluxo de carga CA/CC, controle principal (básico) do elo, solução do elo e sistema de amortecimento (modulação), proporcionou a simulação de estabilidade com inclusão de elos CC.

O sistema de modulação, desenvolvido através de funções de transferência, provocou um efeito positivo à estabilidade dos sistemas analisados; constituindo-se como ferramenta principal na contribuição dos elos CC à estabilidade de sistemas de potência.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Revisões bibliográficas e motivação do estudo.....	2
1.3. Contribuição do estudo.....	2
1.4. Conteúdo dos capítulos subsequentes.....	4
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	6
2.1. Introdução.....	6
2.2. Sistemas em corrente contínua.....	6
2.3. Estabilidade em sistemas CC (elos CC).....	7
2.4. Circuitos bloqueadores e capacidade de transmissão dos elos CC	7
2.5. Unidades geradoras.....	8
2.6. Circuitos conversores.....	9
2.7. Circuito equivalente.....	14
2.8. Controle na transmissão CC.....	15
CAPÍTULO 3 - ESTABILIDADE TRANSITÓRIA COM INCLUSÃO DE ELOS CC.....	19
3.1. Introdução.....	19
3.2. Estabilidade em regime transitório.....	20
3.3. Modelagem das máquinas síncronas.....	21
3.4. Equações mecânicas.....	21

3.5. Equações elétricas.....	23
3.6. Considerações sobre a modelagem do elo em corrente contínua.....	25
3.7. Controle básico.....	26
3.8. Característica composta.....	27
3.9. Característica simples.....	29
3.10 Desempenho do controle básico na operação do elo.....	30
3.11 Fluxograma para o controle básico e solução do elo....	38
CAPÍTULO 4 - MODULAÇÃO DO SISTEMA CA/CC.....	43
4.1. Introdução.....	43
4.2. Controle principal.....	44
4.3. Sinal de modulação.....	47
4.4. Limites para o controle da corrente.....	49
4.5. Limites para o controle da tensão.....	49
4.6. Limites para o ângulo de ignição no retificador.....	49
4.7 Períodos de atuação da modulação.....	49
4.8. Representação da modulação por função de transferência.....	49
4.9. Distúrbios no sistema CA.....	53
4.10. Métodos para a inclusão de elos CC.....	58
CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	62
5.1. Introdução.....	62
5.2. Sistema com 3 barras.....	64
5.3. Sistemas com 13 barras.....	107
5.4. Conclusões.....	117
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	118
APÊNDICE A - SIMULAÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS INTERLIGADAS COM A	

REDE DE TRANSMISSÃO CA E MÉTODOS PARA A INCLUSÃO DE ELOS CC	120
A.1. Simulação dinâmica de máquinas síncronas interligadas com a rede de transmissão CA.....	120
A.2. Reguladores e sistema de excitação.....	121
A.3. Simulador digital de estabilidade transitória.....	122
APÊNDICE B - DADOS DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO DE ESTABILIDADE COM INCLUSÃO DE ELOS CC.....	128
B.1. Dados de entrada.....	128
B.2. Dados de saída para o sistema de 3 barras.....	139
B.3. Dados de saída para o sistema de 13 barras.....	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	159
FIGURAS:	
Figura 1.1.....	3
Figura 2.1.....	11
Figura 2.2.....	11
Figura 2.3.....	12
Figura 2.4.....	13
Figura 2.5.....	14
Figura 2.6.....	16
Figura 3.1.....	26
Figura 3.2.....	27
Figura 3.3.....	30
Figura 3.4.....	31
Figura 3.5.....	34
Figura 3.6.....	40
Figura 3.7.....	41
Figura 4.1.....	46

Figura 4.2.....	52
Figura 4.3.....	53
Figura 4.4.....	56
Figura 4.5.....	58
Figura 4.6.....	61
Figura 5.1.....	64
Figura 5.2.....	71
Figura 5.3.....	71
Figura 5.4.....	72
Figura 5.5.....	72
Figura 5.6.....	73
Figura 5.7.....	73
Figura 5.8.....	74
Figura 5.9.....	74
Figura 5.10.....	75
Figura 5.11.....	75
Figura 5.12.....	76
Figura 5.13.....	76
Figura 5.14.....	77
Figura 5.15.....	77
Figura 5.16.....	78
Figura 5.17.....	78
Figura 5.18.....	79
Figura 5.19.....	79
Figura 5.20.....	80
Figura 5.21.....	80
Figura 5.22.....	81

Figura 5.23.....	81
Figura 5.24.....	82
Figura 5.25.....	82
Figura 5.26.....	83
Figura 5.27.....	83
Figura 5.28.....	84
Figura 5.29.....	84
Figura 5.30.....	85
Figura 5.31.....	85
Figura 5.32.....	86
Figura 5.33.....	86
Figura 5.34.....	87
Figura 5.35.....	87
Figura 5.36.....	88
Figura 5.37.....	88
Figura 5.38.....	89
Figura 5.39.....	89
Figura 5.40.....	90
Figura 5.41.....	90
Figura 5.42.....	91
Figura 5.43.....	91
Figura 5.44.....	92
Figura 5.45.....	92
Figura 5.46.....	93
Figura 5.47.....	93
Figura 5.48.....	94
Figura 5.49.....	94

Figura 5.50.....	95
Figura 5.51.....	95
Figura 5.52.....	96
Figura 5.53.....	96
Figura 5.54.....	97
Figura 5.55.....	97
Figura 5.56.....	98
Figura 5.57.....	98
Figura 5.58.....	99
Figura 5.59.....	99
Figura 5.60.....	100
Figura 5.61.....	100
Figura 5.62.....	101
Figura 5.63.....	101
Figura 5.64.....	102
Figura 5.65.....	102
Figura 5.66.....	103
Figura 5.67.....	103
Figura 5.68.....	104
Figura 5.69.....	104
Figura 5.70.....	105
Figura 5.71.....	105
Figura 5.72.....	106
Figura 5.73.....	106
Figura 5.74.....	107
Figura 5.75.....	110
Figura 5.76.....	110

Figura 5.77.....	111
Figura 5.78.....	111
Figura 5.79.....	112
Figura 5.80.....	112
Figura 5.81.....	113
Figura 5.82.....	113
Figura 5.83.....	114
Figura 5.84.....	114
Figura 5.85.....	115
Figura 5.86.....	115
Figura 5.87.....	116
Figura 5.88.....	116
Figura 5.89.....	117
Figura A.1.....	125
Figura A.2.....	125
Figura A.3.....	126

SIMBOLOGIA

- r - Retificador.
- i - Inversor.
- a - Aceleração da máquina síncrona.
- ALFMIN - Ângulo de ignição mínimo do inversor.
- B - Número de pontes.
- CIA - Característica do ângulo de ignição constante.
- CC - Característica da corrente constante.
- CEA - Característica do ângulo de extinção constante no inversor.
- CECi - Característica do erro de corrente para o inversor.
- DT - Intervalo de tempo.
- ea - FEM fase/neutro (fase " a ").
- eb - FEM fase/neutro (fase " b ").
- EAC - Tensão eficaz entre fases no primário do transformador.
- e`d - Tensão interna transitória de eixo direto.
- e`q - Tensão interna transitória de eixo em quadratura.
- Efd - Tensão de campo.
- f - Frequência.
- H - Momento de inércia.
- Id - Corrente contínua.
- Id01 - Corrente contínua no retificador.
- Id02 - Corrente contínua no inversor.
- ΔId - Margem de corrente.
- id - Corrente de eixo direto.
- iq - Corrente de eixo em quadratura.
- Ifict - Corrente máxima fícticia CC.

ΔI - Sinal adicional de corrente.

I_0' - Nova ordem de corrente.

INTER - Número de intervalos de tempo no religamento do elo CC.

I_t - Corrente terminal.

KFT - Ganho da função de transferência da modulação.

Mg - Momento angular.

Pd - Potência transmitida pelo elo CC.

Pa - Potência transmitida pela linha CA.

Pm - Potência mecânica.

Pe - Potência elétrica.

Pr - Potência ativa no retificador.

Pi - Potência ativa no inversor.

Pc - Potência consumida no sistema.

Pca - Potência transmitida pelo sistema CA.

Pdc - Potência transmitida pelo sistema CC.

Qr - Potência reativa no retificador.

Qi - Potência reativa no inversor.

Rc - Resistência de comutação.

Rd - Resistência da linha.

Ra - Resistência de armadura da máquina.

s - Operador de Laplace.

t - Tempo em segundos.

Tr - "Tap" do transformador retificador.

Ti - "Tap" do transformador inversor.

$T'd\theta$ - Constante de tempo transitória no eixo direto.

$T'q\theta$ - Constante de tempo transitória no eixo em quadratura.

TDC - Constante de tempo para o restabelecimento da ordem de

corrente.

TXDC - Constante de tempo para aquisição dos valores de frequência.

TPC - Constante de tempo de medição da tensão no Inversor.

TCDSET - Constante de tempo para a transmissão da ordem de corrente.

T1, T2, T3, T4 - Constantes de tempo da função de transferência do sistema de modulação.

Vd - Tensão contínua.

Va - Tensão alternada.

VDCOL - Característica do limitador de corrente, dependente da tensão no retificador.

VDCT1 - Tensão mínima para manter Id01 no retificador.

VDCT2 - Tensão mínima para manter Id02 no inversor.

VD1MIN - Tensão mínima para que o elo seja desenergizado (retificador).

VD2MIN - Tensão mínima para que o elo seja desenergizado (inversor).

vd - Tensão de eixo direto.

vq - Tensão de eixo em quadratura.

VDOP - Tensão de operação do elo CC.

Vr - Tensão entre fases na barra de comutação do retificador.

Vi - Tensão entre fases na barra de comutação do inversor.

ΔV - Variação de tensão CA na barra inversora.

V1 - Tensão CA no lado do sistema " 1 ".

V2 - Tensão CA no lado do sistema " 2 ".

Vt - Tensão terminal da máquina.

- ω - Velocidade síncrona.
- X_c - Reatância de comutação.
- X_d - Reatância no eixo direto.
- X_q - Reatância no eixo em quadratura.
- X'_d - Reatância transitória no eixo direto.
- X'_q - Reatância transitória no eixo em quadratura.
- X''_d - Reatância subtransitória no eixo direto.
- X''_q - Reatância subtransitória no eixo em quadratura.
- X_p - Reatância de Potier.
- $\cos(\phi)$ - Fator de potência.
- α_r - Ângulo de ignição do retificador.
- μ - Ângulo de comutação.
- γ - Ângulo de extinção no inversor.
- δ - Ângulo de torque da máquina.
- $\Delta\gamma$ - Sinal adicional do ângulo de extinção do inversor.
- δ_1 - Ângulo de fase do sistema " 1 ".
- δ_2 - Ângulo de fase do sistema " 2 ".

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.

Com a construção de usinas hidroelétricas em locais cada vez mais distantes dos centros de carga, proporciona-se a opção por transmissão em corrente contínua por ser uma melhor alternativa se comparada com a transmissão em corrente alternada, no ponto de vista técnico e econômico.

O sistema de transmissão em corrente contínua como parte de um sistema de corrente alternada, está sujeito a distúrbios, como por exemplo: curto-circuitos, perdas de linhas, perda de um polo em um sistema de configuração bipolar, falhas de comutação, falhas de disparo, etc.

Devido a susceptibilidade de ocorrência de distúrbios em sistemas elétricos CA/CC, se torna necessário o estudo do comportamento dinâmico do sistema como um todo.

Um estudo de estabilidade transitória com a inclusão de elo em corrente contínua (elo CC) é apresentado neste trabalho.

O desenvolvimento de um sistema de modulação eficiente no elo CC, proporciona uma influência estabilizadora significativa, na estabilidade transitória do sistema CA.

1.2 REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS E MOTIVAÇÃO DO ESTUDO.

Para inclusão de elos CC em simulação de estabilidade, necessita-se de estudos relacionados com: simulação de estabilidade de sistemas CA [Anderson,1977], conceitos básicos do sistema CC, controle e modulação de elos CC [Kimbark,1971]; adicionando-se neste trabalho um estudo de fluxo de carga CA/CC [Carvalho,1983], utilizado como interligação entre a parte CA e CC do simulador de estabilidade.

O número cada vez maior de sistemas híbridos CA/CC e a necessidade de estudos de estabilidade, motivaram a inclusão de elos CC em simuladores de estabilidade [Mota,1986]; partindo-se das referências citadas anteriormente.

1.3. CONTRIBUIÇÃO DO ESTUDO.

Com a inclusão de elos CC no simulador de estabilidade; adiciona-se neste estudo três contribuições principais:

a. Adaptação do fluxo de carga CA/CC, utilizado como elo de ligação entre as partes CA e CC do simulador de estabilidade, permitindo uma maior precisão na simulação do comportamento do elo CC.

b. Saída de dados da simulação através de gráficos onde observa-se a característica do ângulo de torque, tensão de campo, tensão CA, Tensão CC, corrente CC, potências ativa e reativa, ângulos de ignição e extinção, ângulo de comutação, fator de potência e variação de "tap".

c. Pode-se simular dois sistemas CA diferentes, interligados

com elo CC (sistema de Interligação, mostrado na figura 1.1), onde o conversor retificador é visto como uma carga ativa e reativa positivas para o sistema " 1 " e o conversor inversor como carga ativa negativa e reativa positiva para o sistema "2". Os dados de potências ativa e reativa nas barras conversoras são determinados pelo sistema de controle e modulação a partir dos dados de tensão determinados pelos simuladores de estabilidade " 1 " e " 2 ", com intervalo de integração e tempo de simulação iguais.

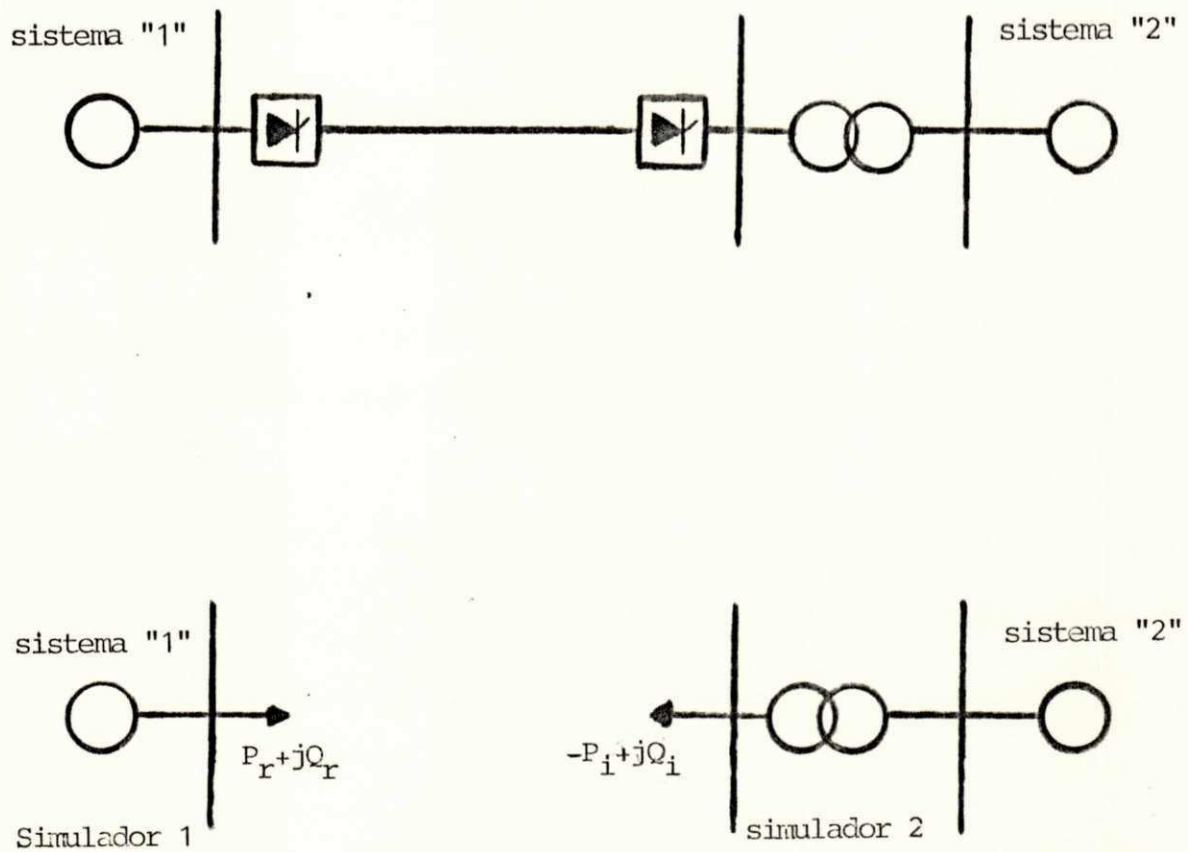


Figura 1.1 - Sistema de interligação.

1.4. CONTEÚDO DOS CAPÍTULOS SUBSEQUENTES.

A modelagem do elo CC e a característica do sistema de controle, compõem o capítulo 2 de "FUNDAMENTOS TEÓRICOS" e são ferramentas básicas para o desenvolvimento do sistema de modulação.

No capítulo 3 de "SIMULAÇÃO DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA COM A INCLUSÃO DO ELO CC", apresenta-se a modelagem de máquinas síncrona com as respectivas equações mecânicas e elétricas; as considerações que devem ser feitas sobre a modelagem em corrente contínua e o comportamento do sistema de controle face a distúrbios no lado CA do conversor retificador ou inversor.

A modulação do sistema CA/CC deve ser especialmente projetada para provocar um efeito estabilizador no sistema CA, na ocorrência de um distúrbio.

O capítulo 4, "MODULAÇÃO DO SISTEMA CA/CC", trata dos tipos de modulação utilizadas, dos aspectos físicos do sistema de modulação, limites e períodos de atuação da modulação e representação do sistema de modulação.

Sistemas de potência, analisados em estudos semelhantes, são apresentados e discutidos, no capítulo 5 de "ANÁLISE DOS RESULTADOS", onde foi aplicado um distúrbio em cada sistema, observando-se a estabilidade transitória com a metodologia desenvolvida neste trabalho.

No capítulo 6 de "CONCLUSÕES" ratifica-se o método

desenvolvido e apresenta-se sugestões para a continuação do estudo.

O método adotado para a simulação transitória com inclusão de elo CC é apresentado no apêndice A e dados de entrada e saída para dois tipos de sistemas estudados é apresentado no apêndice B.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1. INTRODUÇÃO.

A inclusão de elo CC em estudo de estabilidade, requer conhecimentos básicos relacionados com o sistema em corrente contínua.

Neste capítulo de fundamentos teóricos são estudados os sistemas em corrente contínua, destacando-se: estabilidade, circuitos de proteção, circuitos conversores, desenvolvimento das expressões básicas para a modelagem do elo, circuito equivalente e o sistema de controle geral.

2.2. SISTEMAS EM CORRENTE CONTÍNUA (CC).

Os sistemas em corrente contínua podem ser representados da seguinte forma: monopolar, homopolar e bipolar.

O sistema monopolar apresenta apenas um condutor, geralmente de polaridade negativa, utilizando o solo como retorno.

O sistema homopolar apresenta dois ou mais condutores de mesma polaridade e utiliza o solo como retorno.

Ocorrendo uma falta em dos condutores do sistema, o mesmo tem condições de continuar operando com o restantes dos condutores sem grandes prejuízos.

O sistema bipolar apresenta dois condutores de diferentes polaridades. O sistema bipolar pode ser utilizado com apenas um polo, caso ocorra algum distúrbio em um dos polos que constituem o sistema. Neste tipo de configuração, os polos operam com corrente nominal de mesmo valor.

2.3. ESTABILIDADE EM SISTEMAS CC. (ELOS CC)

Os problemas de estabilidade que ocorrem no sistema CA não são observados nos sistemas CC. Dois sistemas CA interligados por um elo CC não operam em sincronismo, até mesmo quando as suas frequências nominais de operação forem idênticas. Os distúrbios no elo CC podem ameaçar a estabilidade CA, quando dois sistemas CA são interconectados por uma ou mais linhas CA operando em paralelo com o elo CC. Este problema pode ser contornado fazendo-se com que o fluxo de potência transmitido pelo elo CC, seja maior que nas linhas CA.

2.4. CIRCUITOS BLOQUEADORES E CAPACIDADE DE TRANSMISSÃO DOS ELOS CC

Os circuitos bloqueadores para sistemas CC não

dispõem das mesmas vantagens proporcionadas pelos circuitos bloqueadores dos sistema CA, os quais bloqueam o circuito quando a corrente passa pelo zero. Os circuitos bloqueadores para sistemas em corrente contínua são construídos de modo a forçar a corrente decrescer para zero; no entanto não existem circuitos bloqueadores para altas tensões e altas correntes.

Assumindo que uma linha CA e uma linha CC dispõem do mesmo tipo de condutor, mesma corrente nominal e a tensão CC é $\sqrt{2}$ do valor eficaz da tensão CA. Então temos:

$$P_d = V_d * I_d \quad (2.1)$$

$$P_a = V_a * I_a * \cos(\phi) \quad (2.2)$$

Sendo o fator de potência ($\cos(\phi)$) igual a 0.945, por exemplo, temos:

$$\begin{aligned} P_d / P_a &= (V_d * I_d) / (V_a * I_a * \cos(\phi)) \\ &= \sqrt{2} / \cos(\phi) \\ &= 3/2 \quad (2.3) \end{aligned}$$

A capacidade de transmissão de potência é dada por:

$$P_d = 2 * p_d \quad (\text{sistema bipolar}) \quad (2.4)$$

$$P_a = 3 * p_a \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} P_d / P_a &= (2 * P_d) / (3 * P_a) \\ &= (2 / 3) * (3 / 2) \\ &= 1 \quad (2.6) \end{aligned}$$

Ou seja; as duas linhas transmitem a mesma ordem de potência, entretanto, o sistema CC tem a vantagem de utilizar apenas dois condutores.

2.5. UNIDADES GERADORAS

Um dos fatores que eleva o custo das unidades

geradoras é o alto momento de inércia necessário para elevar o limite de estabilidade do sistema CA. Este fator não é levado em conta na transmissão CC, uma vez que não ocorre problema com a estabilidade em sistemas CC; como também pode ser escolhido unidades geradoras de frequência diferentes e filtros harmônicos de capacidades menores, reduzindo bastante os custos.

2.6. CIRCUITOS CONVERSORES.

Na análise de sistemas conversores, em regime permanente, leva-se em conta as seguintes suposições:

- a. Fonte de tensão alternada equilibrada, com valor de pico de tensão e frequência constantes e impedâncias desprezadas.
- b. Resistência dos enrolamentos dos transformadores conversores desprezíveis.
- c. O "ripple" da corrente CC é ignorado, ou seja o reator de alisamento tem indutância suficiente para que se tenha uma corrente constante e sem ondulação.
- e. As válvulas são disparadas em intervalos iguais de 60 graus para pontes de 6 pulsos e de 30 graus para pontes de 12 pulsos.

O processo de conversão tanto para a subestação retificadora como para a subestação inversora é realizado através de pontes de seis pulsos (ponte trifásica), contendo um determinado número de tiristores conectados em série e/ou em paralelo, formando uma válvula.

Na figura 2.1 é mostrado a forma de onda do retificador; em (a) a forma de onda da corrente alternada; em

(b) a forma de onda da tensão ânodo-cátodo e em (c) a tensão retificada.

Usando referência de tempo, a tensão de comutação é expressa por :

$$e_a - e_b = \sqrt{2} * E_{acr} * Tr * \text{sen}(wt + \pi / 3) \quad (2.7)$$

A figura 2.2 mostra a forma de onda do tiristor controlado, onde em (a) é a forma de onda da corrente e em (b) é a forma de onda da tensão retificada.

Considerando o ângulo de atraso necessário para garantir a condução de uma única válvula durante a retificação, a tensão média retificada pode ser expressa por :

$$V_{dr} = (1/(\pi / 3)) * \sqrt{2} * Tr * E_{acr} * \text{cos}(wt + \pi / 3) \quad (2.8)$$

$$V_{dr} = V_0 * \text{cos}(\alpha r) \quad (2.9)$$

Na prática a forma de onda retificada sofre uma queda devido a reatância de comutação das válvulas, como pode ser observado na figura 2.3; onde em (a) é a forma de onda da corrente alternada e em (b) é a forma de onda da tensão retificada.

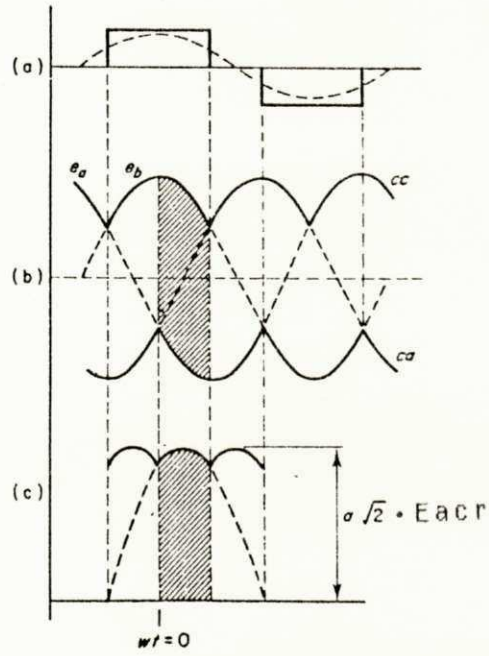


Figura 2.1 - Forma de onda do retificador.

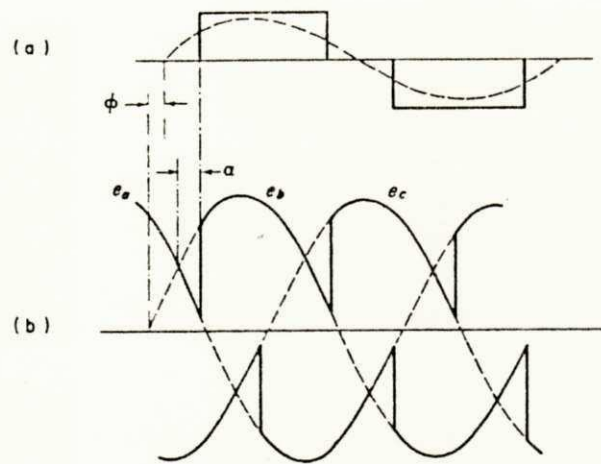


Figura 2.2 - Forma de onda do tiristor.

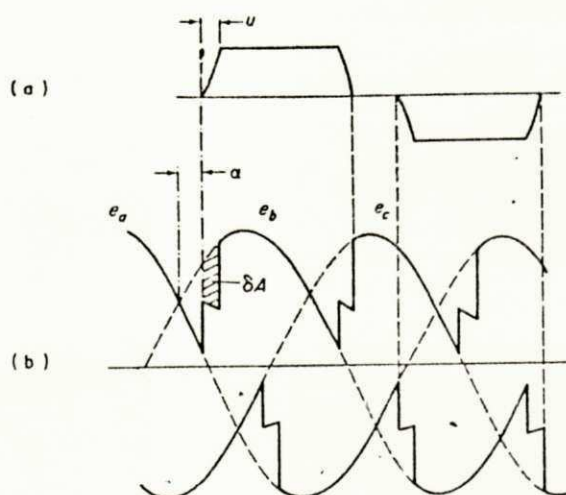


Figura 2.3 - Forma de onda retificada.

A tensão média no retificador é expressa agora por:

$$V_{dr} = (3 * \sqrt{2} / \pi) * E_{acr} * Tr * \cos(\alpha_r) - (3 / \pi) * X_c * I_d \quad (2.10)$$

Sendo,

$$K = (3 * \sqrt{2} / \pi)$$

$$R_{cr} = (3 / \pi) * X_c \quad (2.11)$$

Obtemos:

$$V_{dr} = K * Tr * E_{acr} * \cos(\alpha_r) - R_{cr} * I_d \quad (2.12)$$

Nas expressões acima:

Tr - "Tap" do transformador retificador.

E_{acr} - Tensão eficaz entre fases no primário do transformador conversor.

α_r - Ângulo de ignição ou disparo do retificador.

X_c - Reatância de comutação.

R_{cr} - Resistência equivalente de comutação para o retificador.

A forma de onda do inversor é mostrada na figura 2.4, onde em (a) é a forma de onda da corrente alternada e em

(b) é a forma de onda da tensão CC.

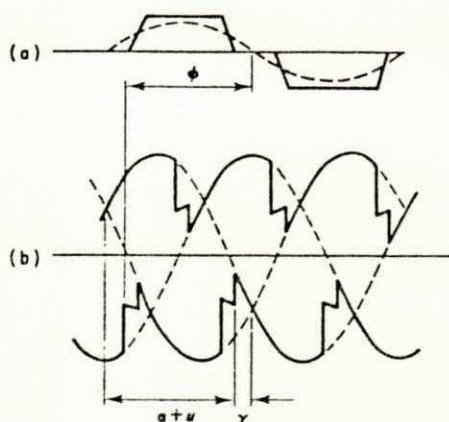


Figura 2.4 - Forma de onda do inversor.

Observando a semelhança entre as formas de onda do retificador e inversor, a tensão média do inversor pode ser obtida por:

$$V_{di} = K * T_i * E_{aci} * \cos(\gamma) - R_{ci} * I_d \quad (2.13)$$

Onde:

T_i - "Tap" do transformador inversor.

E_{aci} - Tensão eficaz entre fases no primário do transformador inversor.

γ - Ângulo de extinção de forma que $(\alpha + \mu \leq 180 - \gamma)$, onde μ é o ângulo de comutação.

R_{ci} - Resistência equivalente de comutação para o inversor.

Das expressões para tensão no retificador e inversor podemos obter a corrente de linha CC por:

$$I_d = (V_{dr} - V_{di})/R_d \quad (2.14)$$

Onde:

R_d - Resistência da linha CC.

2.7 CIRCUITO EQUIVALENTE.

Das expressões 2.12 e 2.13 obtemos o seguinte para conversores de B pontes:

$$V_{dr} = B_r * (V_{dor} * \cos(\alpha_r) - R_{cr} * I_d) \quad (2.15)$$

$$V_{di} = B_i * (V_{doi} * \cos(\gamma) - R_{ci} * I_d) \quad (2.16)$$

Onde:

$$V_{dor} = K * T_r * E_{acr} \quad (2.17)$$

$$V_{doi} = K * T_i * E_{aci} \quad (2.18)$$

O circuito equivalente monofásico para um elo CC de dois terminais é representado na figura 2.5.

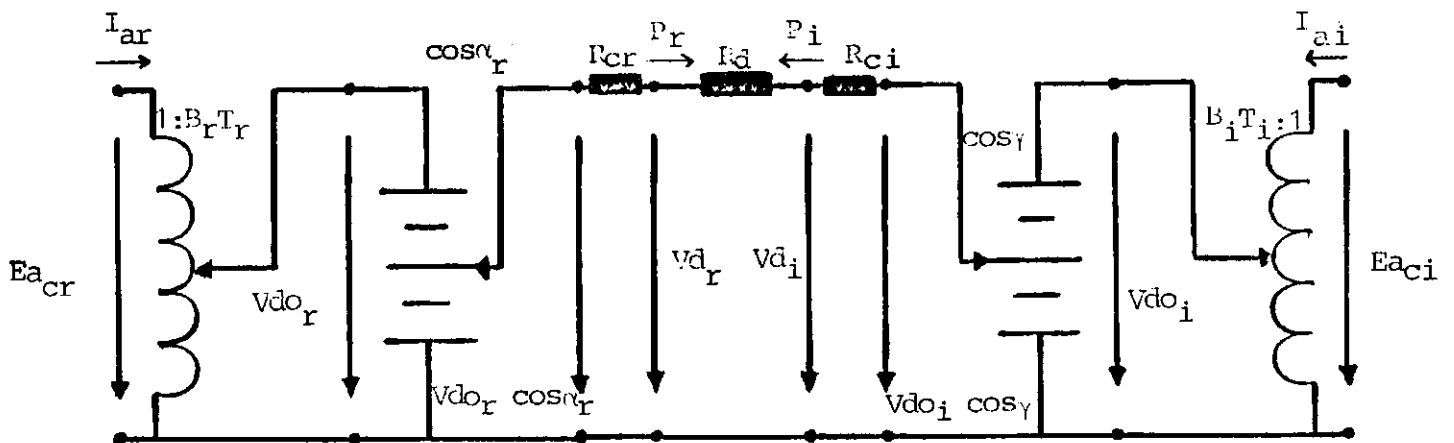


Figura 2.5 - Circuito equivalente.

2.8. CONTROLE NA TRANSMISSÃO CC.

O controle na transmissão CC é indispensável para o bom funcionamento do sistema, devendo apresentar as seguintes características:

- a. Com a finalidade de evitar danos as válvulas e outros dispositivos, deverá haver um limite máximo de corrente.
- b. Evitar flutuações de corrente contínua.
- c. Manter o fator de potência alto, tanto no retificador como no inversor.
- d. Limitar o valor mínimo do ângulo de extinção no inversor, a fim de evitar falhas de comutação.
- e. Manter as tensões nos terminais das barras conversoras, de modo a garantir o disparo das válvulas.

A figura 2.6 mostra a característica estática composta ($V_d \times I_d$).

Onde:

CIAr - Característica do ângulo de ignição constante no retificador.

CIAi - Característica do ângulo de ignição constante no inversor.

CCr - Característica de corrente constante no retificador.

CCi - Característica de corrente constante no inversor.

CEA - Característica do ângulo de extinção constante no inversor.

CECI - Característica do erro de corrente para o inversor.

VDCOL - Característica do limitador de corrente dependente da tensão no retificador.

I_{d01} - Corrente no retificador.

I_{d02} - Corrente no inversor.

ΔI_d - Margem de corrente.

V_{DCT1} - Tensão mínima de operação do inversor.

V_{DCT2} - Tensão mínima de operação do retificador.

V_{D1MIN} - Tensão mínima para que o elo seja desenergizado no inversor.

V_{D2MIN} - Tensão mínima para que o elo seja desenergizado no retificador.

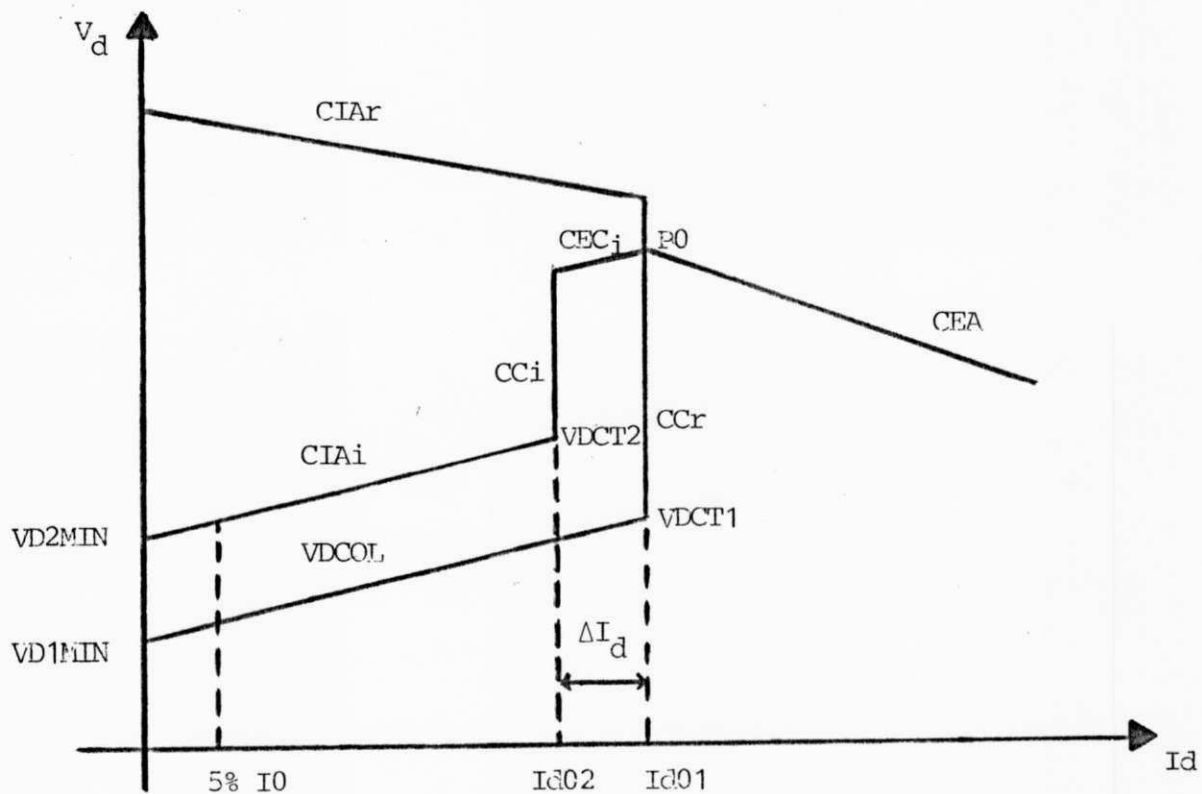


Figura 2.6 - Característica estática V_d X I_d .

O ponto P_0 , interseção das características CIAR, CEA, CCr e CCI, denomina-se de ponto de operação normal do sistema.

Neste ponto a corrente I_d será igual ao valor de I_{d01} e o ângulo de extinção no inversor será mantido no seu valor mínimo, contribuindo assim para um menor consumo de reativos. Deste modo o retificador através do ângulo de disparo controla a corrente e conseqüentemente a potência e o inversor controla a tensão mantendo o ângulo de extinção mínimo.

Em termos de controle podemos ter: controle de corrente constante, controle do ângulo mínimo de ignição constante, controle do ângulo de extinção constante, controle do "tap", controle de frequência e controle de potência.

O controle de corrente é realizado pelo regulador de corrente, um para cada polo do sistema, controlando todas as válvulas nas várias pontes.

O controle do ângulo de ignição mínimo tem a finalidade de manter o ângulo α_r no mínimo prático ($\alpha_r = 5$ graus). [Carvalho, 1986]

As flutuações de corrente são evitadas, fazendo com que o ângulo de ignição permaneça bem acima dos valores mínimos, entretanto, de uma forma a não comprometer o fator de potência.

O controle do ângulo de extinção mínimo é necessário para que ocorra o bloqueio ao mesmo tempo de cada válvula que compõem o inversor. Neste caso há também a necessidade de

evitar falhas de comutação e manter o alto fator de potência. O ângulo de extinção mínimo se encontra numa faixa de 16 a 18 graus. [Carvalho, 1987]

O controle do "tap" no retificador é necessário para manter o ângulo de ignição em valores abaixo de 10 graus. No inversor o controle do "tap" tem a finalidade de manter a tensão no inversor em seu valor especificado. [Kimbark, 1971]

O controle de potência pode ser realizado pelo o controle de corrente, desde que se tenha um limitador de corrente. O limite de corrente poderá variar de 0.1 a 1.2 da corrente nominal. [Kimbark, 1971]

Através do elo CC podemos realizar o controle da frequência do sistema CA, uma vez que uma variação na potência CC, varia a potência fornecida pelas máquinas, aumentando ou diminuindo a velocidade das máquinas e conseqüentemente a frequência.

O ajuste correto dos controles observados acima, como também a colocação de reatores, proporcionam a estabilidade do elo CC, principalmente na ocorrência de distúrbios, tais como: curto-circuito monofásico, faltas nos conversores e energização indevida da linha CC.

CAPÍTULO 3

ESTABILIDADE TRANSITÓRIA COM INCLUSÃO DE ELO CC.

3.1. INTRODUÇÃO.

As cargas, parte do sistema de potência, necessitam de serem alimentadas constantemente com tensões e frequência constantes, ou seja, dentro dos limites permitidos de operação. Os atuais sistemas de geração e transmissão elétrica vêm se tornando cada vez maiores e conseqüentemente sujeitos a índices maiores de distúrbios. Para o bom funcionamento do sistema de potência, um estudo de estabilidade dinâmica torna-se indispensável.

A estabilidade do sistema de potência está ligado ao comportamento dinâmico das máquinas síncronas após a ocorrência de uma perturbação. Se a perturbação não envolve qualquer mudança na configuração do sistema, as máquinas deverão voltar ao mesmo estado de operação inicial. Porém, se houver qualquer mudança na configuração do sistema, tais como: carga, geração, linhas de transmissão, etc., haverá um desbalanço entre geração e carga. Conseqüentemente, as máquinas deverão se estabelecer em um novo ponto de operação. Em qualquer caso, todas as máquinas síncronas interligadas deverão permanecer em sincronismo se o sistema é estável, isto é, operando em paralelo com a mesma velocidade. [Anderson, 1977.]

Uma perda de sincronismo entre as máquinas de um sistema de potência, pode acarretar "blackouts" no sistema. Para prevenir o sistema contra perdas de sincronismo, podemos colocar linhas em paralelo, utilizar disjuntores rápidos, reguladores, colocar resistores em série, compensar os reativos, etc.

Os elos em corrente contínua, tem como uma de suas principais características, a contribuição ao amortecimento de oscilações eletromecânicas entre máquinas síncronas, componentes do sistema de corrente alternada.

Esta característica baseia-se no princípio da modulação da potência transmitida pelo elo. A modulação de um elo em corrente contínua tem como principal finalidade aumentar ou diminuir o fluxo de potência, de acordo com a aceleração ou desaceleração de determinadas máquinas do sistema.

3.2. ESTABILIDADE EM REGIME TRANSITÓRIO.

O estudo da estabilidade em regime transitório se torna necessário quando na ocorrência de grandes distúrbios, tais como: curto-circuito no lado de alta tensão, perda de uma grande unidade geradora, variação súbita de carga, etc.

O período de investigação da estabilidade transitória varia de 1 segundo a 3 segundos.

3.3. MODELAGEM DAS MÁQUINAS SÍNCRONAS.

Podemos modelar a máquina síncrona através de modelos simples, o qual consiste em uma tensão fixa atrás de uma reatância transitória; há modelos mais sofisticados com inclusão da equação de oscilação do rotor, mudanças nos enlaces de fluxos dos enrolamentos do campo e inclusão de reguladores de tensão e velocidade.

No modelo de máquina representado por uma fonte de tensão atrás de uma reatância, modelo de segunda ordem, despreza-se o efeito da saliência e considera o fluxo concatenado no campo como constante.

No modelo de terceira ordem considera-se a saliência e a variação do fluxo concatenado no campo através do regulador de tensão, denominado de modelo de terceira ordem.

No modelo de sexta ordem considera-se o período subtransitório das máquinas.

3.4. EQUAÇÕES MECÂNICAS.

As equações mecânicas que representam a máquina síncrona são obtidas considerando as seguintes suposições:

- a. A velocidade da máquina se mantém dentro dos limites em relação a velocidade síncrona.
- b. Não são incluídos perdas por atrito, ventilação e fatores de amortecimento.
- c. A potência mecânica no eixo tem variação contínua.

A aceleração de uma máquina síncrona é dada por:

$$a = Pa / Mg \quad (3.1)$$

Onde:

P_a - Potência de aceleração.

M_g - Momento angular.

Por outro lado,

$$P_a = P_m - P_e \quad (3.2)$$

Onde:

P_m - Potência mecânica.

P_e - Potência elétrica.

O ângulo de torque, δ , é dado por:

$$\delta = \theta - \omega_0 * t \quad (3.3)$$

Onde:

θ - Ângulo elétrico do rotor.

ω_0 - Velocidade angular síncrona do eixo.

t - Tempo.

Partindo das expressões 3.1, 3.2 e 3.3 obtemos a velocidade angular e a aceleração:

$$d\delta / dt = d\theta / dt - \omega_0 \quad (3.4)$$

$$a = d^2\delta / dt^2 = d^2\theta / dt^2 \quad (3.5)$$

assim,

$$d^2\delta / dt^2 = P_a / M_g = (P_m - P_e) / M_g \quad (3.6)$$

O momento angular M_g , em função do momento de inércia da máquina, é representado da seguinte forma:

$$M_g = H / (\pi * f) \quad (3.7)$$

logo,

$$d^2\delta / dt^2 = ((\pi * f) / H) * (P_m - P_e) \quad (3.8)$$

Onde:

H - Momento de inércia.

f - Frequência.

Observando-se que:

$$d\theta / dt = W \quad (3.9)$$

$$d^2\delta / dt^2 = dW / dt \quad (3.10)$$

Podemos obter as equações diferenciais de primeira ordem que descrevem o movimento mecânico da máquina síncrona, dadas por:

$$dW / dt = ((\pi * f / H) * (P_m - P_e)) \quad (3.11)$$

$$d\delta / dt = W - W_0 \quad (3.12)$$

3.5 EQUAÇÕES ELÉTRICAS.

O simulador de estabilidade utilizado neste trabalho, permite a representação das máquinas síncronas através dos modelos de segunda, terceira e sexta ordem.

Para o modelo de segunda ordem utiliza-se as equações mecânicas 3.11 e 3.12.

Para o modelo de terceira ordem além das equações mecânicas 3.11 e 3.12, adiciona-se a seguinte equação elétrica:

$$de^q / dt = (Efd - Ei) / T^do \quad (3.13)$$

Onde:

$$Ei = e^q + (Xd - X^d) * (id - ikd)$$

Com,

$$ikd = ((X^d - X^{\prime\prime}d) / (X^d - X1)^2) * (Hkd - e^q + (X^d - X1) * id)$$

$$X1 = Xq - X^{\prime\prime}d)$$

No modelo de sexta ordem, utiliza-se as equações (3.11), (3.12), (3.13) e adiciona-se as seguintes equações elétricas:

$$de^d / dt = - E_{iq} / T^d_{do} \quad (3.14)$$

$$d\psi_{kd} / dt = (\psi_{kd} - e^q + (X^d - X_1) * i_d) / T^d_{do} \quad (3.15)$$

$$d\psi_{kq} / dt = (\psi_{kq} - e^d + (X^q - X_1) * i_q) / T^q_{do} \quad (3.16)$$

Onde:

$$E_{iq} = e^d + (X_q - X^q) * i_q - ((X_q - X^q) * (X^q - X^d) / (X^q - X_1)) * E_{ikq}$$

com,

$$E_{ikq} = \psi_{kq} - e^d + (X^q - X_1) * i_q$$

$$X_1 = X_q - X^d$$

Nas equações 3.13 a 3.16 temos:

e^d - Tensão interna transitória no eixo direto.

e^q - Tensão interna transitória no eixo em quadratura.

E_{fd} - Tensão de campo.

T^d_{do} - Constante de tempo transitória no eixo direto.

T^q_{do} - Constante de tempo transitória no eixo em quadratura.

X_d - Reatância do eixo direto.

X_q - Reatância no eixo em quadratura.

X^d - Reatância transitória no eixo direto.

X^q - Reatância transitória no eixo em quadratura.

X^d - Reatância subtransitória no eixo direto.

X^q - Reatância subtransitória no eixo em quadratura.

i_d - Corrente no eixo direto.

i_q - Corrente no eixo em quadratura.

ψ_{kd} - Fluxo concatenado no eixo direto.

ψ_{kq} - Fluxo concatenado no eixo em quadratura.

3.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE A MODELAGEM DO ELO EM CORRENTE CONTÍNUA.

Tendo em vista a inclusão do elo em corrente contínua no estudo de estabilidade, as seguintes considerações devem ser feitas:

- a. A linha de transmissão em corrente contínua é representada por uma resistência.
- b. Assume-se que os canais de telecomunicações entre as barras conversoras estão sempre em serviço.
- c. O sistema trifásico é representado por um monofásico equivalente.
- d. A margem de corrente deverá ser mantida sempre constante.
- e. Uma vez que seja utilizada equações de regime permanente, os elos CC podem ser incorporados à rede CA como cargas concentradas, uma de valor positivo do terminal retificador e outra de sinal negativo do terminal inversor.
- f. Uma simplificação em relação as funções de transferência que representam o controle do elo CC é realizada, uma vez que o objetivo deste trabalho não implica em resultados extremamente precisos.
- g. A solução do elo, compreende o comportamento da linha e das pontes conversoras, fornecendo dados para a solução do fluxo de carga.
- h. Na solução do elo, a corrente nominal do elo na barra inversora tem valor da ordem de 90 % da corrente nominal da barra retificadora. [De La-Rocque, 1983]

3.7. CONTROLE BÁSICO.

Na ocorrência de um distúrbio como uma falta trifásica ou monofásica e, mesmo após a sua eliminação, ocorrem em geral grandes flutuações na tensão das barras do sistema (Principalmente as barras próximas ao local de distúrbio). Desta forma, uma representação detalhada da característica de atuação dos elos deve ser considerada.

A característica estática $V_d \times I_d$ está relacionada com o controle físico existente no elo CC, o projeto da mesma depende, exclusivamente do fabricante.

Dentre as características mais utilizadas, iremos estudar a característica $V_d \times I_d$ mostrada na figura 3.1, onde a característica do retificador é representada por linhas cheia e a característica do inversor por linhas tracejada.

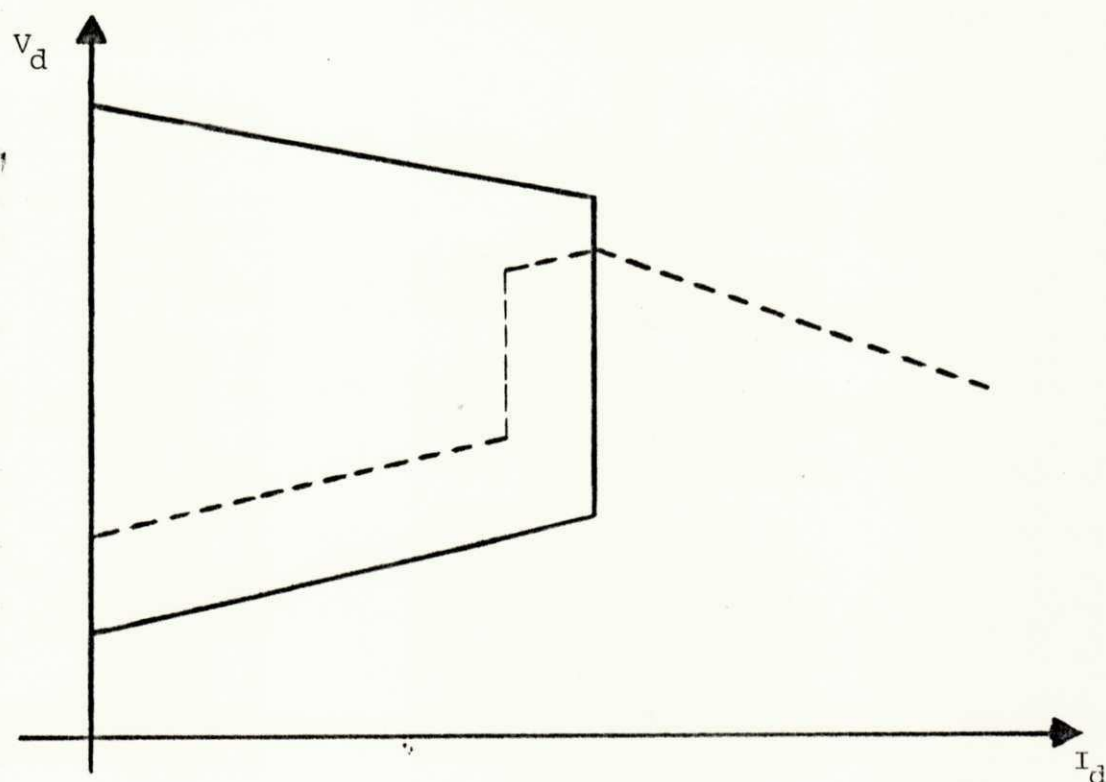


Figura 3.1 - Característica $V_d \times I_d$.

3.8. CARACTERÍSTICA COMPOSTA.

A característica composta é representada pela figura 3.2.

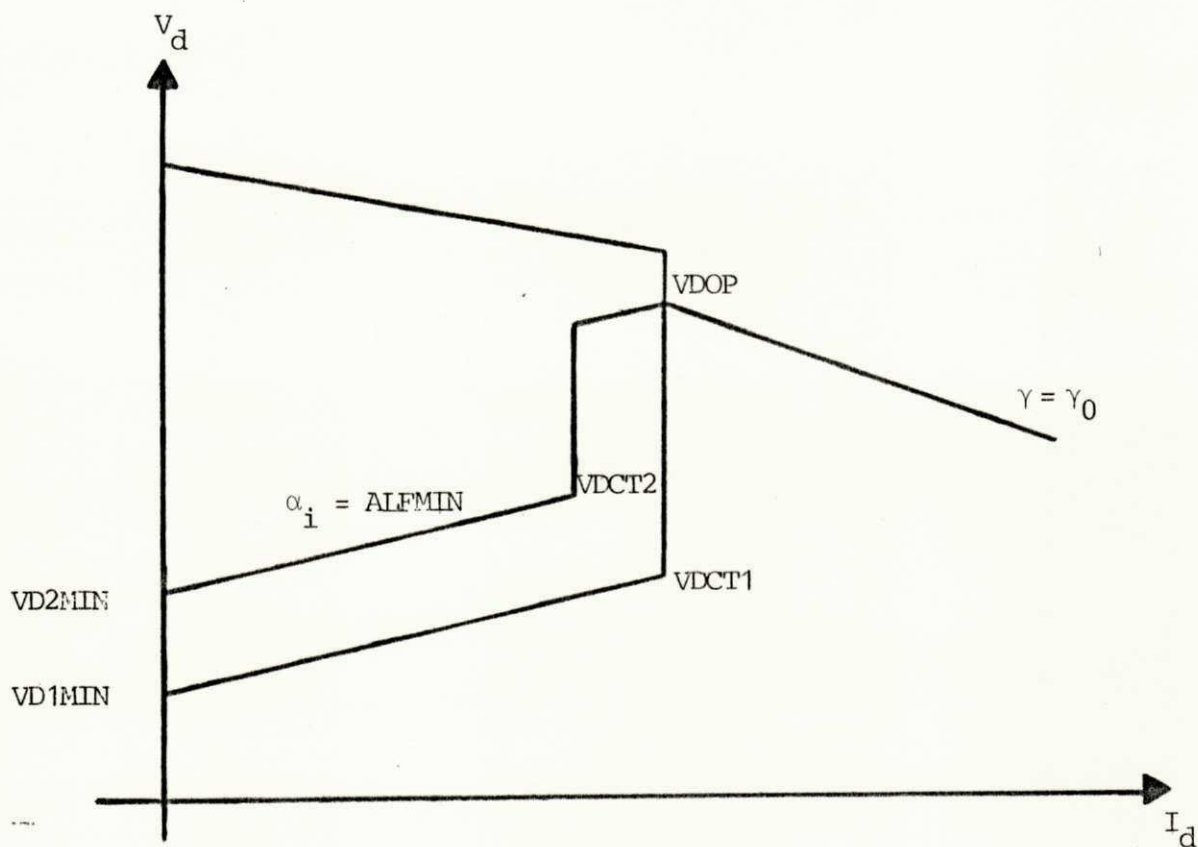


Figura 3.2 - Característica composta \$V_d \times I_d\$.

Onde:

VDOP - Tensão de operação do elo para as condições nominais com corrente igual a \$I_{d01}\$ (corrente no retificador) e ângulo de extinção mínimo no inversor.

VDCT1 - Tensão mínima de operação do inversor. VDCT1 é um dado de entrada na simulação de estabilidade transitoria.

VDCT2 - Tensão mínima de operação do retificador. VDCT2 é determinado por:

$$VDCT2 = - K * T_i * V_i * \cos(ALFMIN) + R_{ci} * I_{d02} \quad (3.25)$$

VD1MIN - Tensão mínima abaixo da qual o inversor será desenergizado. VD1MIN é um dado de entrada para a simulação de estabilidade transitória.

VD2MIN - Tensão mínima a partir da qual a ordem de corrente será diminuída. Neste caso o ângulo de disparo do inversor será igual ao mínimo. VD2MIN é determinado por:

$$VD2MIN = - K * Ti * Vi \cos(ALFMIN) \quad (3.26)$$

ALFMIN - Ângulo de ignição mínimo do inversor. ALFMIN pode ser obtido por:

$$ALFMIN = \arccos(\cos(-VDCT2 + Rci * Id02)/K * Ti * Vi) \quad (3.27)$$

Nas expressões acima:

Ti - "Tap" do transformador inversor.

Vi - Tensão entre fases na barra de comutação do inversor.

Rci - Resistência de comutação no inversor.

Id02 - Corrente no inversor.

Observa-se na característica composta que os segmentos de reta (VDCT1 - VD1MIN) e (VDCT2 - VD2MIN) são, no âmbito do modelo matemático proposto, independentes. A escolha dos pontos limites dependem exclusivamente de quem utilizar o modelo, respeitando as condições impostas.

Para a característica composta recomenda-se um valor entre 110° a 130° para o ângulo de ignição mínimo do inversor. ALFMIN se relaciona com VDCT2 de tal forma que apenas uma das duas variáveis deve ser atribuído um valor e por conseguinte a outra será calculada. [De La-Rocque, 1983]

Podemos utilizar a característica composta nas seguintes possibilidades:

a. Se $VDCT2 > 0$, e $VDCT2 \leq (Rci * Id02)$; ALFMIN deve ser zerado (não ser dado de entrada) e supõe-se:

$$VDCT2 = Rci * Id02 \quad (3.28)$$

b. Se $ALFMIN = 90^\circ$ e $VDCT2$ não ser dado de entrada; calcula-se $VDCT2$.

c. Se $VDCT2 > (Rci * Id02)$ e $ALFMIN$ zerado, calcula-se $ALFMIN$.

d. Se $ALFMIN > 90^\circ$ e $ALFMIN < 180^\circ$ com $VDCT2$ zerado, calcula-se $VDCT2$.

$VDCT1$ é a tensão mínima do inversor, a partir da qual o elo passa a operar sob o modo de tensão reduzida no inversor com a finalidade de aliviar o consumo de reativos impostos ao sistema CA. Recomenda-se um valor entre zero e 0.5 p.u. para $VDCT1$, considerando a tensão nominal do inversor de 1. p.u.. [De La-Rocque, 1983]

3.9. CARACTERÍSTICA SIMPLES.

Podemos determinar a característica simples, partindo da característica composta com as seguintes considerações:

a. $VDCT1$ igual a $VD1MIN$ com valores dentro dos limites mencionados para $VDCT1$.

b. $VDCT2$ e $ALFMIN$ zerados.

Na característica simples o valor atribuído a V_{DCT1} é o mínimo a partir do qual o elo será desenergizado.

3.10. DESEMPENHO DO CONTROLE BÁSICO NA OPERAÇÃO DO ELO.

Para a condição nominal de operação, o elo deve operar com corrente nominal igual a I_{d01} e ângulo de extinção mínimo no inversor. O elo deve permanecer no ponto P_0 .

A condição nominal de operação é mostrada na figura 3.3.

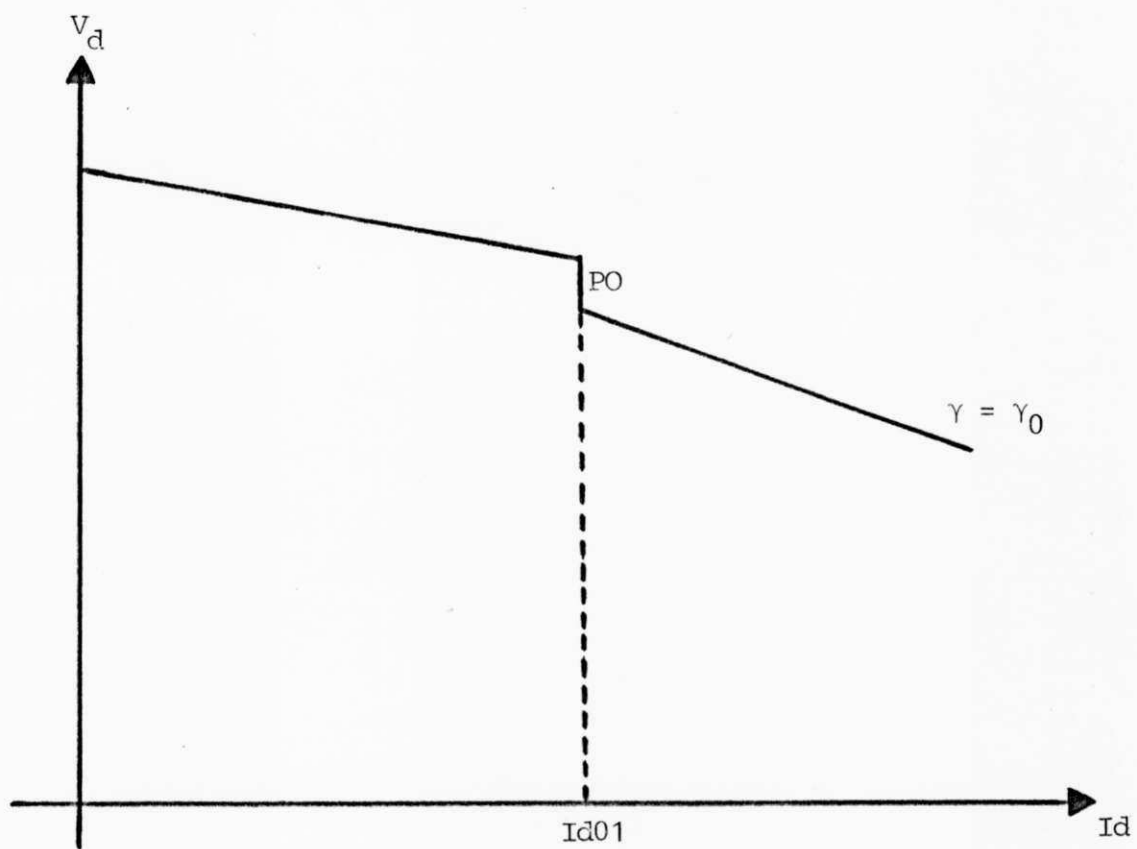


Figura 3.3 - Condição nominal de operação.

Caso a tensão CA do inversor caia progressivamente; quando a tensão CC for menor que o valor de VDCT1, o controle passa a reduzir sua ordem de corrente para que o elo não seja desenergizado.

Esta situação é mostrada na característica Vd X Id da figura 3.4.

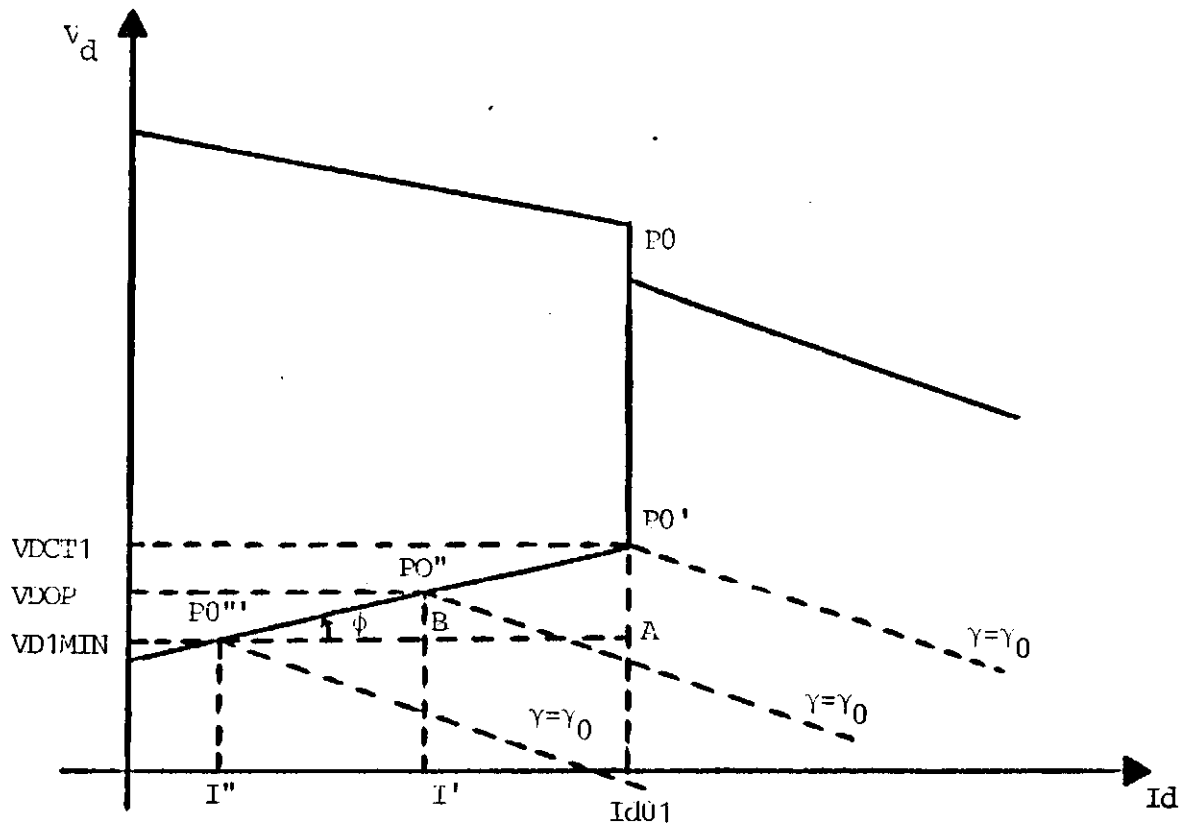


Figura 3.4 - Característica Vd X Id.

Na transição entre P0 e P0'; o elo permanece no modo de operação normal, sendo que os valores para Vdi, Vdr e α_r devem ser determinados por:

$$V_{di} = K * T_i * V_l * \cos(\gamma_0) - R_{cl} * I_{d01} \quad (3.29)$$

$$V_{dr} = V_{di} + R_d * I_{d01} \quad (3.30)$$

$$\alpha_r = \arccos(\cos((1/k * T_r * V_r) * (V_{dr} + R_{cr} * I_{d01}))) \quad (3.31)$$

Entre P0' e P0''' o modo de operação passa a ser

denominado de " tensão reduzida no inversor ", onde a corrente assume o novo valor de operação estável I' , que pode ser determinado da seguinte forma:

a. Do triângulo formado pelos pontos $P0'$; $P0''$ e A; temos:

$$\operatorname{tg} \varphi = (V_{DCT1} - V_{D1MIN}) / (I_{d01} - I') \quad (3.32)$$

$$I' = 0.05 * I_{d01} \quad (3.33)$$

logo,

$$\operatorname{tg} \varphi = (V_{DCT1} - V_{D1MIN}) / (0.95 * I_{d01}) \quad (3.34)$$

b. Do triângulo formado pelos pontos $P0''$; $p0''$ e B; temos:

$$\operatorname{tg} \varphi = (V_{DOP} - V_{D1MIN}) / (I' - 0.05 * I_{d01}) \quad (3.35)$$

Das expressões 3.34 e 3.35 temos:

$$\left(\frac{V_{DCT1} - V_{D1MIN}}{0.95 * I_{d01}} \right) = \left(\frac{V_{DOP} - V_{D1MIN}}{I' - 0.05 * I_{d01}} \right)$$

E I' é expresso por:

$$I' = I_{d01} * (0.95 * ((V_{DOP} - V_{D1MIN}) / (V_{DCT1} - V_{D1MIN})) + 0.05) \quad (3.36)$$

Onde:

V_{di} - Tensão contínua do inversor.

T_i - Tap do transformador inversor.

V_i - Tensão CA entre fases na barra de comutação do inversor.

γ_0 - Ângulo de extinção mínimo do inversor.

R_{ci} - Resistência de comutação do inversor.

I_{d01} - Corrente nominal do retificador.

V_{dr} - Tensão contínua do retificador.

R_d - Resistência da linha de transmissão.

α_r - Ângulo de ignição no retificador.

Tr - "Tap" do transformador retificador.

Ur - Tensão CA entre fases na barra do retificador.

VDCT1 - Tensão mínima de operação do inversor.

VD1MIN - Tensão mínima abaixo do qual o inversor será desenergizado.

I^{lim} - Corrente abaixo da qual o elo será desenergizado.

VDOP - Nova tensão de operação do elo.

Uma outra finalidade da escolha deste modo de operação é o alívio que se processa no sistema CA do ponto de vista da carga reativa; uma vez que a diminuição do fluxo de corrente, acarreta em uma diminuição do fluxo de reativos junto as barras conversoras.

Se a tensão CA do retificador diminuir e a do inversor se manter aproximadamente constante, o ponto de operação P_0 deverá ser modificado quando não for possível manter o ângulo de disparo (α_r) igual ou acima de $\alpha_{r \text{ min}}$, ao controlar a corrente I_{d01} .

A característica $V_d \times I_d$ quando ocorre uma variação na tensão CA no lado do retificador, é mostrada na figura 3.5.

A transição do controle de corrente do retificador para o inversor, pode ser feita segundo a curva $P_0 - P_0^*$. Este modo de operação é denominado de "controle de erro de corrente ou gama corrigido", tendo sua necessidade devido a eliminação da "instabilidade dos três pontos de interseção que aparece na característica", provocando uma indeterminação matemática.

$$V_{dr} = K * Tr * Vr * \cos(\alpha_{rmin}) - R_{cr} * I' \quad (3.42)$$

$$V_{di} = V_{dr} - R_d * I' \quad (3.43)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{1}{k} * T_i * V_i\right) * (V_{di} + R_{ci} * I')$$

(3.44)

Onde:

I_{d02} - Corrente no inversor.

Tr - "Tap" do transformador retificador.

V_r - Tensão CA entre fases na barra do retificador.

α_{rmin} - Ângulo de ignição mínimo do retificador.

I_{d01} - Corrente do retificador.

γ_0 - Ângulo de extinção mínimo do inversor.

T_i - "Tap" do transformador inversor.

V_i - Tensão CA entre fases na barra do inversor.

R_{ci} - Resistência de comutação do inversor.

R_d - Resistência da linha de transmissão.

R_{cr} - Resistência de comutação do retificador.

V_{dr} - Tensão contínua do retificador.

V_{di} - Tensão contínua do inversor.

γ - Ângulo de extinção do inversor.

Caso a tensão de operação do elo continue a cair, o controle determina outro modo de operação denominado de " modo de operação reduzido ", do ponto $P0^4$ ao ponto $P0^5$, onde a corrente permanece constante, igual a ordem do inversor e ângulo de ignição do retificador no seu valor mínimo. Neste modo de controle V_{dr} , V_{di} e γ são determinados por:

$$V_{dr} = K * Tr * Vr * \cos(\alpha_{rmin}) - R_{cr} * I_{d02}$$

(3.45)

$$V_{di} = V_{dr} - R_d * I_{d02} \quad (3.46)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{1}{K} * T_r * V_i\right) * (V_{di} + R_{ci} * I_{d02}) \quad (3.47)$$

Onde:

V_{dr} - Tensão contínua do retificador.

V_{di} - Tensão contínua do inversor.

γ - Ângulo de extinção do inversor.

T_r - "Tap" do transformador retificador.

V_r - Tensão CA entre fases na barra do retificador.

R_{cr} - Resistência de comutação do retificador.

I_{d02} - Corrente do inversor.

R_d - Resistência da linha de transmissão.

V_i - Tensão CA entre fases na barra do inversor.

R_{ci} - Resistência de comutação do inversor.

Quando a tensão de operação do elo cair abaixo do valor de V_{DCT2} , o controle passa a ser denominado de modo de operação " alfa / alfa reduzido ", onde a ordem da corrente será diminuída e o ângulo de ignição do retificador se mantém no mínimo. Na característica $V_d \times I_d$, este modo de operação compreende a curva ($P_o^5 - P_o^6$) mostrada na figura 3.5.

I^* é determinado por:

$$I^* = (V_{D01} - V_{DCT2} + R_2 * I_{d02}) / (R_2 + R_d + R_{cr}) \quad (3.48)$$

Onde:

$$V_{D01} = K * T_r * V_r * \cos(\alpha_{rmin}) \quad (3.49)$$

$$R_2 = (V_{DCT2} - V_{D2MIN}) / (I_{d02} - 0.05 * I_0) \quad (3.50)$$

Onde:

VDCT2 - Tensão mínima do retificador.

Id02 - Corrente no Inversor.

Rd - Resistência da linha de transmissão.

Rcr - Resistência de comutação do retificador.

Tr - "Tap" do transformador retificador.

Vr - Tensão CA entre fases na barra do retificador.

α_{rmin} - Ângulo de ignição mínimo do retificador.

VD2MIN - Tensão mínima no retificador, a partir da qual o elo será desenergizado.

Em todos os modos de operação discutidos, temos que levar em conta a dependência entre a determinação do modo de operação e a corrente máxima fictícia, capaz de circular no elo com α_r igual a α_{rmin} e γ igual γ_{min} . A lógica de disparo calcula esta corrente da seguinte forma:

Temos,

$$V_{dr} = K * V_r * T_r * \cos(\alpha_{rmin}) - R_{cr} * I_{fict} \quad (3.51)$$

$$V_{di} = K * V_i * T_i * \cos(\gamma_{min}) - R_{ci} * I_{fict} \quad (3.52)$$

logo,

$$V_{dr} - V_{di} = K * (V_r * T_r * \cos(\alpha_{rmin}) - V_i * T_i * \cos(\gamma_{min}) - (R_{cr} - R_{ci}) * I_{fict} \quad (3.53)$$

$$R_d * I_{fict} = V_{dr} - V_{di} \quad (3.54)$$

Então:

$$(R_d + R_{cr} - R_{ci}) * I_{fict} = K * (V_r * T_r * \cos(\alpha_{rmin}) - V_i * T_i * \cos(\gamma_{min})) \quad (3.55)$$

e finalmente,

$$I_{fict} = (K * (V_r * T_r * \cos(\alpha_{rmin}) - V_i * T_i * \cos(\gamma_{min})) / (R_d + R_{cr} - R_{ci}) \quad (3.56)$$

Onde:

V_{dr} - Tensão contínua do retificador.

V_{di} - Tensão contínua do inversor.

V_r - Tensão CA entre fases na barra do retificador.

V_i - Tensão CA entre fases na barra do inversor.

T_r - "Tap" do transformador retificador.

T_i - "Tap" do transformador inversor.

α_{rmin} - Ângulo de ignição mínimo do retificador.

γ_{min} - Ângulo de extinção mínimo do inversor.

R_{cr} - Resistência de comutação do retificador.

R_{ci} - Resistência de comutação do inversor.

R_d - Resistência da linha de transmissão.

Se $I_{fict} > I_{d01}$, o modo de operação é o "normal";
ou "reduzido no inversor".

Se $I_{d02} < I_{fict} < I_{d01}$, o modo de operação é o "gama corrigido".

Se $I_{fict} < I_{d02}$, o modo de operação poderá ser "reduzido" ou "alfa / alfa reduzido".

3.11. FLUXOGRAMA PARA O CONTROLE BÁSICO E SOLUÇÃO DO ELO.

Apresentamos na figura 3.6 o fluxograma que representa o controle básico e na figura 3.7 o fluxograma para a solução do elo.

O comportamento dinâmico do controle do elo é

representado pela a função de transferência.

$$F (S) = 1 / (1 + s TDC) \quad (3.57)$$

Tdc é o tempo necessário para o elo igualar sua corrente " Id " ao sinal denominado de ordem de corrente. Segundo as referências [De La-Rocque, 1983] o valor de Tdc está por volta de 50 mS e não deve ser um dado de entrada na simulação de estabilidade.

A função de transferência:

$$F (S) = 1 / (1 + s TPC) \quad (3.58)$$

Representa o transdutor de tensão contínua do inversor ao controle principal. Tpc é o tempo necessário para a medição da tensão nos terminais do inversor.

O bloco denominado de " bloqueio " representa a desenergização do elo, onde a corrente " Id " é zerada, informando ao bloco " solução de elo " que o elo está desenergizado.

O bloco " solução de elo " mostrado na figura 3.7 corresponde a simulação da lógica de disparo, onde a partir de dados CA de tensão e o modo de operação determinado pelo controle básico, calcula o ângulo de ignição e extinção, tensão contínua no retificador e inversor, entrando como dados no fluxo de carga CA/CC. Neste bloco também é simulado o " bloqueio de elo " e " falha de comutação ".

No bloco " falha de comutação " as seguintes modificações são processadas:

$$Id = 0.3 * I0$$

$$Vdr = Rd * Id$$

$$V_{di} = 0.$$

$$P_i = 0.$$

$$Q_i = 0.$$

$$\gamma = 0.$$

P_r , Q_r e α_r são calculados por :

$$P_r = V_{dr} * I_d \quad (3.59)$$

$$\alpha_r = \arccos((V_{dr} + R_{cr} * I_d)/(K * T_r * V_r)) \quad (3.60)$$

$$Q_r = V_{dor} * I_d * \text{sen}(\delta_r) \quad (3.61)$$

Onde:

$$V_{DOr} = (V_{dr} + R_{cr} * I_d)/\cos(\alpha_r) \quad (3.62)$$

$$\text{sen}(\delta_r) = (2 * \mu_r + \text{sen}(2 * \alpha_r) - \text{sen}(\delta_r))/(4 * (\cos(\alpha_r) - \cos(\delta_r))) \quad (3.63)$$

$$\mu_r = \delta_r - \alpha_r \quad (3.64)$$

$$\delta_r = \arccos(\cos(\alpha_r) - (2 * (1/K) * ((R_{cr} * I_d)/(T_r * V_r))) \quad (3.65)$$

Onde:

V_{dr} - Tensão contínua do retificador.

P_r - Potência ativa do retificador.

I_d - Corrente nominal do elo.

α_r - Ângulo de ignição do retificador.

R_{cr} - Resistência de comutação do retificador.

T_r - "Tap" do transformador retificador.

V_r - Tensão CA entre fases na barra do retificador.

Q_r - Potência reativa do retificador.

I_0 - Ordem da corrente determinada pelo o controle principal.

P_i - Potência ativa do inversor.

Q_i - Potência reativa do inversor.

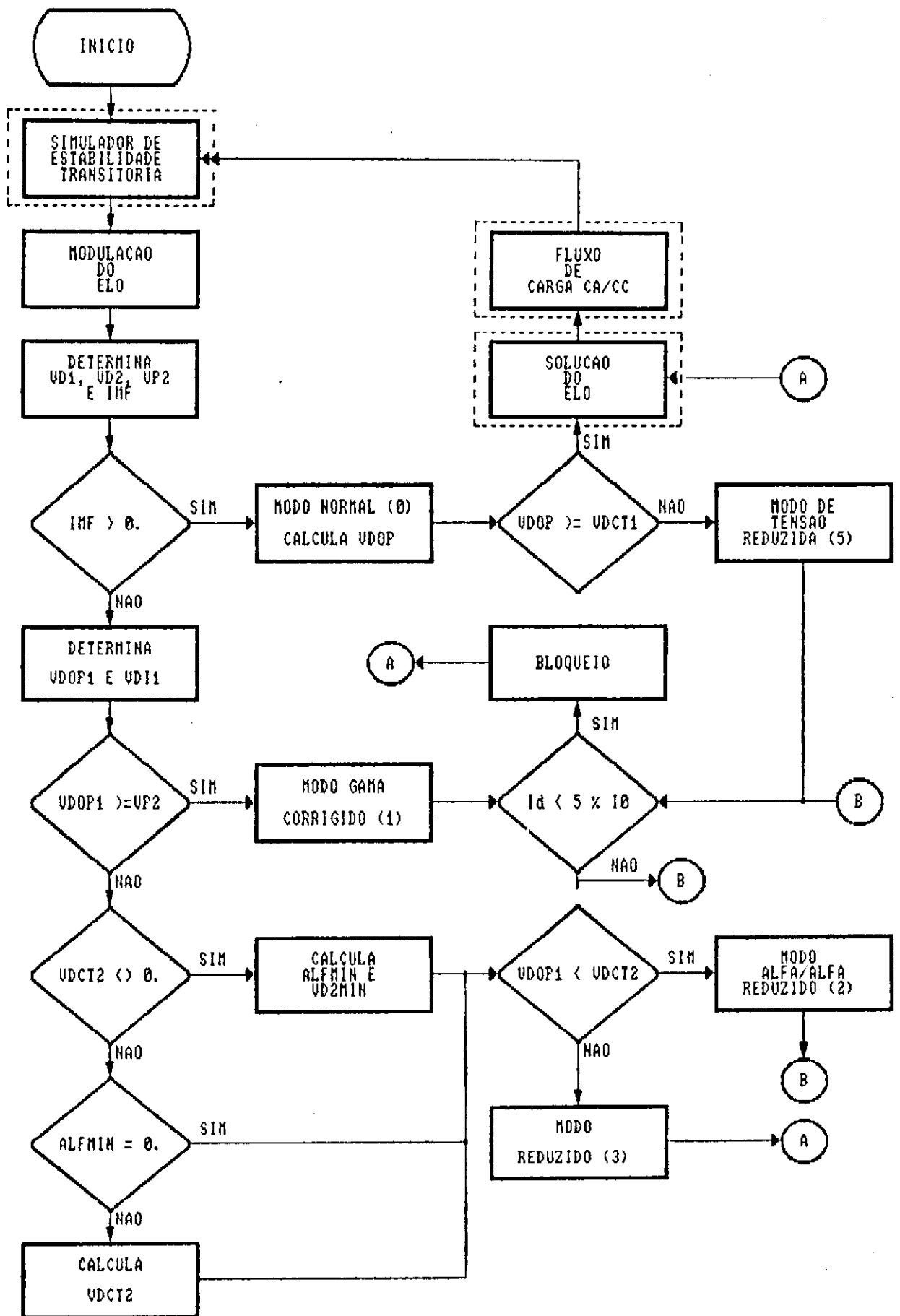


Figura 3.6 - Controle Basico

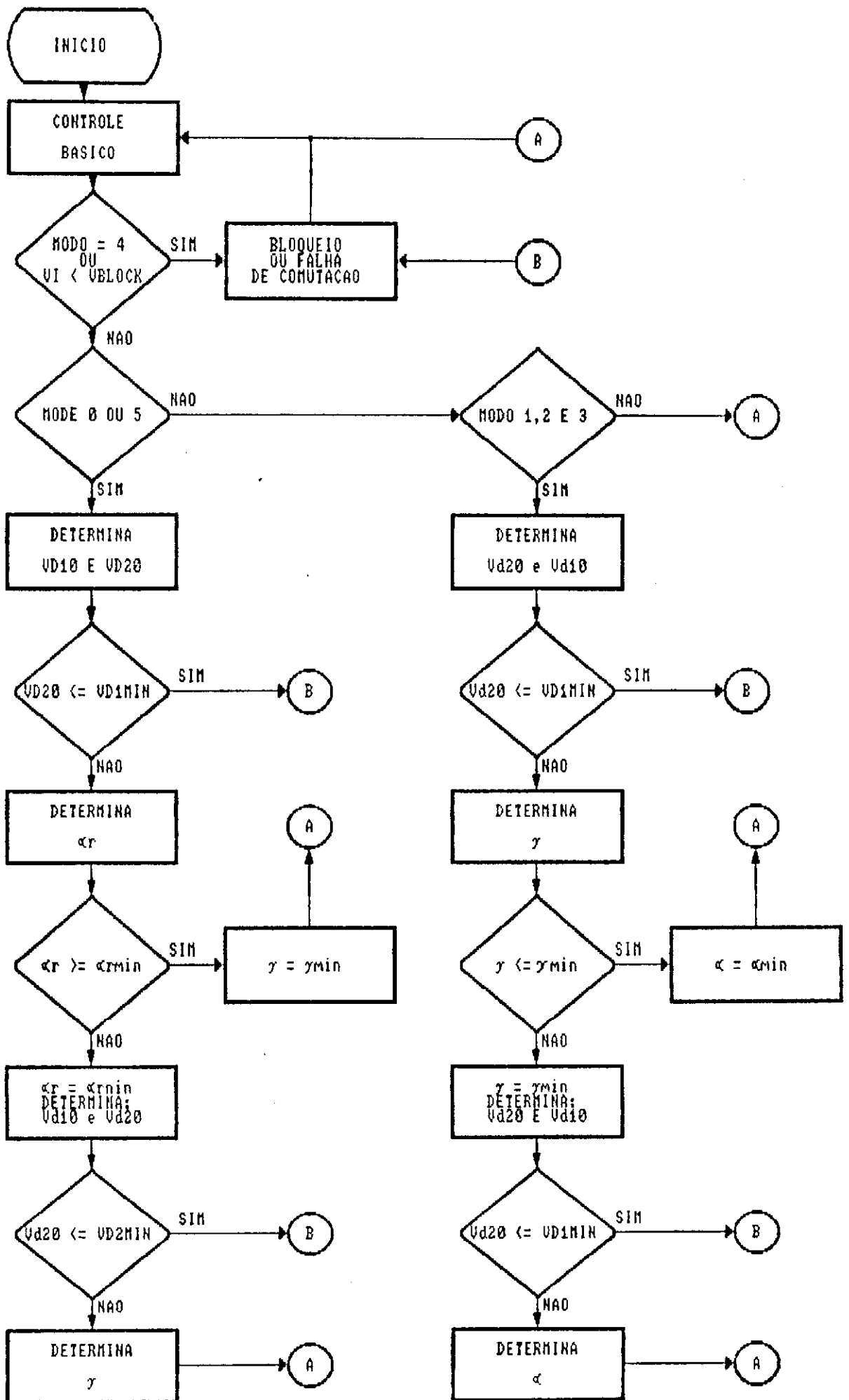


Figura 3.7 - Solução do elo

CAPÍTULO 4

MODULAÇÃO DO SISTEMA CA/CC.

4.1. INTRODUÇÃO.

Modular um sistema híbrido CA/CC, é alterar a ordem de potência (ou corrente) do elo CC, segundo parâmetros representativos das perturbações do sistema CA. [De La-Rocque, 1983]

A modulação da corrente CC é um sinal denominado de ΔI , o qual adiciona-se a corrente de comando I_0 , ficando a nova ordem de corrente expressa por:

$$I_d = I_0 + \Delta I \quad (4.1)$$

Para o controle a potência constante, o sinal de modulação atua diretamente na potência CC.

Pode-se modular o valor do ângulo mínimo de extinção do inversor, com a finalidade de estabilizar a variação de tensão na barra do inversor.

Utiliza-se também a modulação combinada com a operação da modulação em corrente ou em potência com a modulação em tensão. Esta combinação tem como vantagem amortecer as excursões dos ângulos rotóricos das máquinas e estabilizar a variação de tensão na barra inversora.

4.2. CONTROLE PRINCIPAL.

O controle principal tem a finalidade de decidir a ordem de corrente ou potência que será transmitida no elo, os quais são funções dos valores nominais e dos sinais estabilizadores, provenientes do " Controle de Amortecimento ". O controle principal pode ser localizado no terminal retificador ou no terminal inversor.

A eficiência da transmissão em corrente contínua depende de controles precisos e eficazes. O controle principal deve satisfazer os seguintes objetivos:

- a. Permitir o controle do elo CC pelo operador.
- b. Tornar os sistemas CA e CC compatíveis.
- c. Promover o comportamento estável e satisfatório dos sistemas CA.
- d. Garantir a disponibilidade da transmissão de potência, a qual poderá ser máxima no caso de perda parcial de um polo (Configuração bipolar).
- e. O controle principal deve ser projetado para suprir os requisitos específicos de cada sistema, após estudos detalhados do comportamento combinado dos sistemas CA e CC.

O controle principal deverá reunir as seguintes funções principais:

- a. No controle de potência incluir: alteração da ordem de potência solicitada pelos operadores, sinais adicionais calculados automaticamente em resposta as variações nas condições do sistema CA e determinação dos limites de transmissão. O mesmo deverá ocorrer para o controle de

corrente.

b. Permitir o controle do operador sobre a absorção da potência reativa dos conversores e o controle transitório automático do ângulo de extinção para contribuir com a estabilidade do sistema CA.

c. Permitir a manutenção da potência transmitida, através de controle alternativo, como também possibilitar ao operador a alteração da ordem de potência ou corrente, no caso de perda do sistema de controle ou do sistema de telecomunicações.

d. Permitir a compensação automática de potência pela as subseções remanescentes do sistema de transmissão, no caso de perda de uma subseção do elo CC.

e. Controlar a operação de dois polos em paralelo conectados a uma linha.

f. Supervisão de bancos de filtros e capacitores " shunt ".

g. Contribuir para uma rápida e suave recuperação do sistema, quando ocorrer defeitos no sistema CA e CC.

A operação do controle principal deverá está interligada a operação de cada nível de controle descrito numa forma hierárquica:

a. Controle da válvula.

b. Controle do conversor.

c. Controle do polo.

d. Controle do bipolo (no caso de configuração bipolar).

e. Controle da estação.

O diagrama simplificado do controle principal é mostrado na figura 4.1.

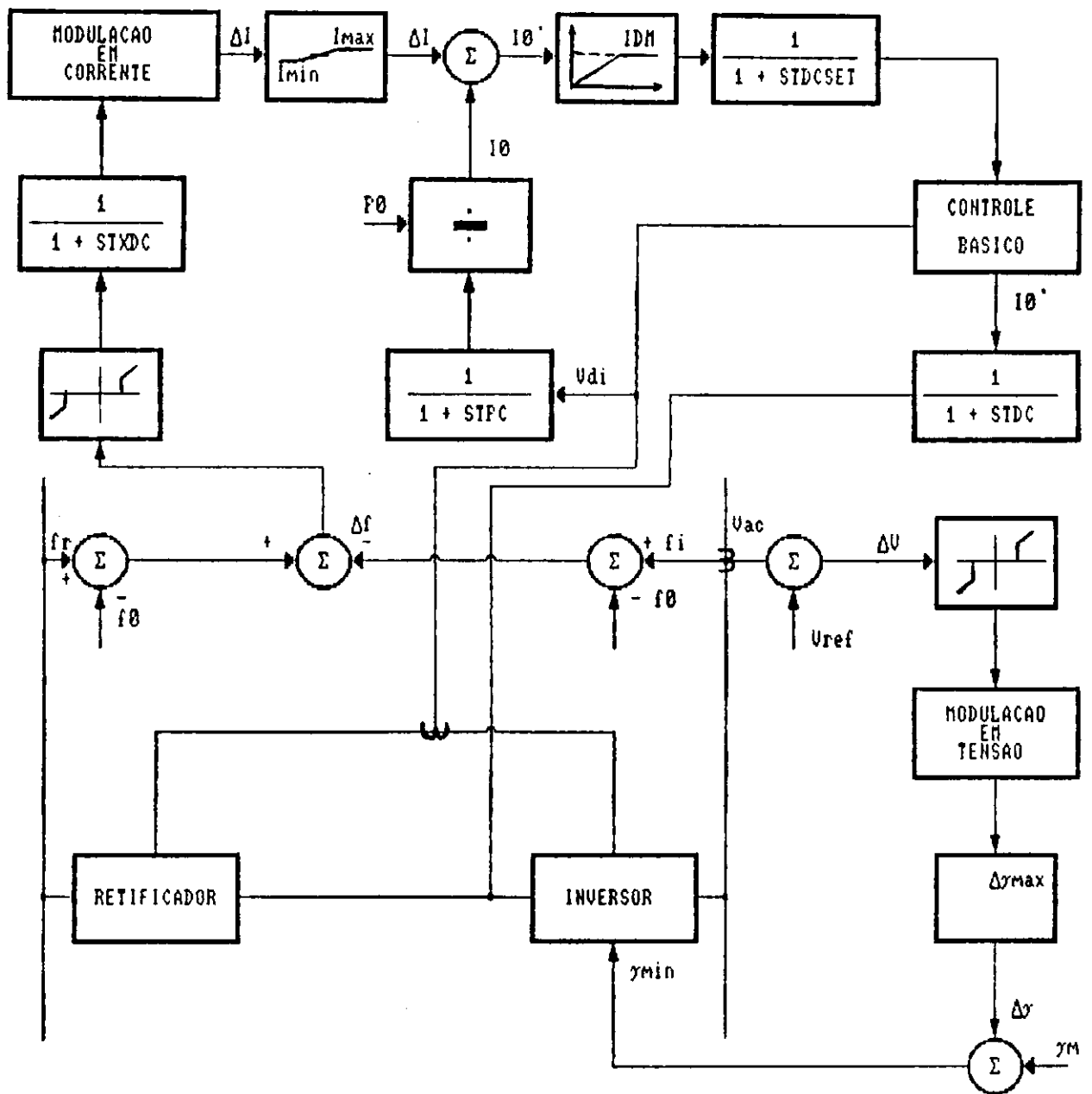


Figura 4.1 - Controle Principal

Na figura 4.1, temos:

TXDC - Constante de tempo para a aquisição dos valores de frequência.

TPC - Constante de tempo de medição da tensão no inversor.

TCDSET - Constante de tempo para a transmissão da ordem de corrente.

TDC - Constante de tempo para o estabelecimento da ordem de corrente.

f_r - Sinal de frequência no retificador.

f_o - Frequência de referência.

ΔI - Sinal adicional de corrente.

P_o - Potência nominal do elo CC.

I_o - Corrente nominal do elo CC.

IDM - Limite máximo de corrente.

V_{ac} - Tensão CA na barra inversora.

V_{ref} - Tensão CA de referência na barra inversora.

ΔV - Variação da tensão CA na barra inversora.

γ_{min} - Ângulo de extinção mínimo.

$\Delta \gamma$ - Sinal adicional do ângulo de extinção.

γ_m - Ângulo de extinção máximo.

V_{di} - Tensão contínua no inversor.

I_o^* - Nova ordem de corrente.

4.3. SINAL DE MODULAÇÃO.

Para a modulação em corrente ou potência podemos utilizar como entrada do sistema de modulação os sinais dos ângulos de eixo das máquinas, das barras ou a diferença entre

duas barras quaisquer do sistema.

Devido as dificuldades e distorções nas medições de ângulos no eixo das máquinas, este tipo de sinal não deve ser utilizado como entrada do sistema de modulação.

Dependendo da configuração do sistema, o sinal de entrada deve ser escolhido de forma que o mesmo indique com precisão o estado do sistema CA.

Quando se utiliza sinais de pontos distantes das barras conversoras, o custo e confiabilidade do sistema de telecomunicação usado, são fatores que devem ser considerados, uma vez que a manutenção da ordem de corrente ou potência em regime permanente depende destes dados.

Para modulação em tensão utiliza-se como sinal de entrada do sistema de modulação, a variação da tensão CA na barra inversora em relação a uma tensão CA de referência.

Para evitar os sinais de ruído que podem ocorrer nos elos de telecomunicações, uma faixa de banda morta faz com que os sinais medidos que estiverem dentro da faixa, em torno de zero, não sejam considerados pela modulação.

Outros sinais suplementares podem ser adicionados ao sistema, como sinais de controle automático de geração onde o elo CC poderá ser utilizado na regulação secundária do sistema 60 Hz ou 50 Hz, contribuindo assim para a manutenção da frequência programada. O objetivo deste controle é proporcionar à transmissão CC um estatismo e um tempo de resposta semelhante aos das máquinas hidráulicas permitindo uma atuação proporcional as outras máquinas do sistema.

4.4. LIMITES PARA O CONTROLE DE CORRENTE.

Geralmente os elos CC têm limites de corrente. O limite máximo de corrente no elo CC deve ser de tal ordem que não ultrapasse a capacidade dos geradores, evitando uma aceleração ou desaceleração dos mesmos. O limite mínimo de corrente, deve ser de regime permanente.

4.5. LIMITES DE CONTROLE EM TENSÃO.

No controle em tensão deverá haver limites para o ângulo de extinção do inversor. Para evitar os riscos de falha de comutação o limite mínimo do ângulo de extinção está entre 16° e 18°); quanto ao limite máximo não ocorre restrições. [Carvalho, 1987]

4.6. LIMITES PARA O ÂNGULO DE IGNIÇÃO DO RETIFICADOR.

O limite mínimo para o ângulo de ignição do retificador deverá ser tal que assegure o início simultâneo de condução para todos os ânodos no caso de válvulas ou tiristores em paralelo, como também não permitir ao inversor operar como retificador.

O limite máximo para o ângulo de ignição deverá impedir a operação do retificador como inversor ou ocorrer falhas de comutação.

4.7. PERÍODOS DE ATUAÇÃO DA MODULAÇÃO.

O valor de corrente (I_{dk}) calculada em 4.2 corresponde ao último degrau de restabelecimento da ordem de

corrente após uma perturbação no sistema; uma vez que após uma perturbação onde ocorreu uma desenergização do elo, o sistema de controle tenta alcançar as condições de potência plena de uma forma suave (em forma de rampa), obedecendo a uma taxa pré-determinada.

$$I_{dk} \geq ((INTER - 1)/INTER) * I_d \quad (4.2)$$

Onde:

INTER - Número de intervalos de tempo no religamento.

I_d - Corrente nominal do elo CC.

O sinal advindo do sistema de modulação torna-se efetivo somente quando o valor da corrente nominal da linha CC for superior ao valor de I_{dk} , apesar de que, fisicamente, o controle de amortecimento permanece conectado ao controle principal.

O período de tempo em que o sistema de modulação não atua, faz com que o mesmo não influa no comportamento do primeiro " swing " da variação do ângulo de torque, após a ocorrência de um distúrbio.

Uma relação entre o tempo de religamento a potência plena e o tempo máximo de religamento deverá existir para que se mantenha a eficiência da modulação nos instantes mais críticos após a perturbação (até o terceiro " swing ").

" INTER " é um dado que deve ser determinado a partir de estudos do comportamento do sistema com perturbações.

4.8. REPRESENTAÇÃO DA MODULAÇÃO POR FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA.

A resposta do sistema de modulação deverá ser de tal

forma que sua característica seja retentiva de forte atuação no princípio, para a resposta ao degrau.

Estudos realizados demonstraram-se a flexibilidade na escolha da função de transferência que representa a modulação. Estas funções variam dos tipos mais simples até aquelas que contém polos duplos.

As funções de transferência, geralmente utilizadas para representar o sistema de modulação são as seguintes: [De La-Rocque, 1983]

$$FT(S) = (K * s)/(1 + s * T1) \quad (4.3)$$

$$FT(S) = (K * s)/((1 + s * T1) * (1 + s * T2)) \quad (4.4)$$

$$FT(S) = (K * s)/((1 + s * T1) * (1 + s * T2) * (1 + s * T3)) \quad (4.5)$$

$$FT(S) = ((K * s) * (1 + s * T4))/((1 + s * T1) * (1 + s * T2) * (1 + s * T3)) \quad (4.6)$$

Onde:

K - Ganho da função de transferência.

T1, T2, T3, T4 - Constantes de tempo da função de transferência.

Na figura 4.2 observamos a resposta ao degrau unitário para:

a. Função de transferência com polos simples, onde observa-se um caráter retentivo e uma fraca atuação inicial.

b. Função de transferência com polo duplo sem zero em T4. Neste caso ocorre retenção ao longo do tempo.

c. Função de transferência com polo duplo e um zero em T4, onde os efeitos desejados são alcançados, como também melhora a

resposta em frequência , eliminando frequências espúrias na corrente CC para altas frequências.

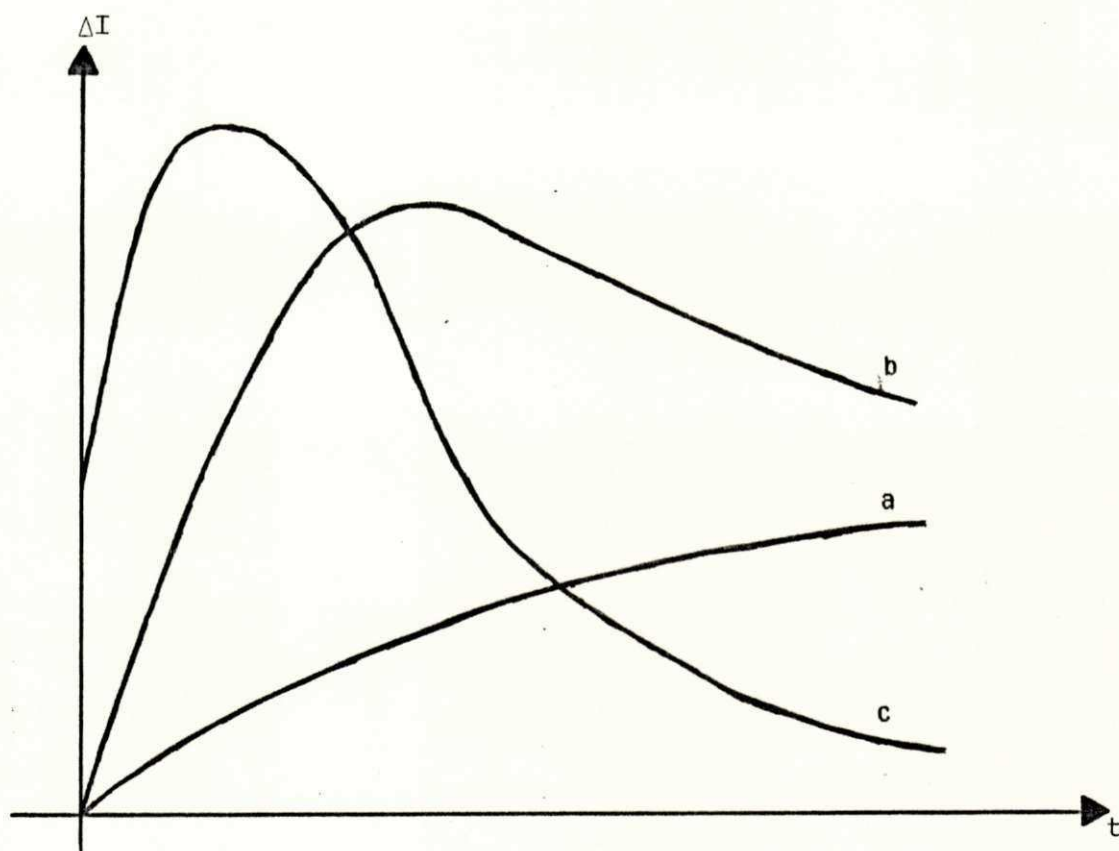


Figura 4.2 - Resposta ao degrau unitário.

Vale salientar que nem sempre a função de transferência com polo duplo é fundamental à estabilização do sistema. A escolha da característica de modulação varia para cada tipo de sistema, como também os valores para as constantes de tempo, baseados nos tempos de atuação do sistema de proteção CA.

Neste trabalho utilizamos o método de Runge-Kutta de quarta ordem , para obtermos a solução do sistema de modulação.

4.9. DISTURBIOS NO SISTEMA CA.

Supondo-se uma perturbação no sistema CA representado na figura 4.3.

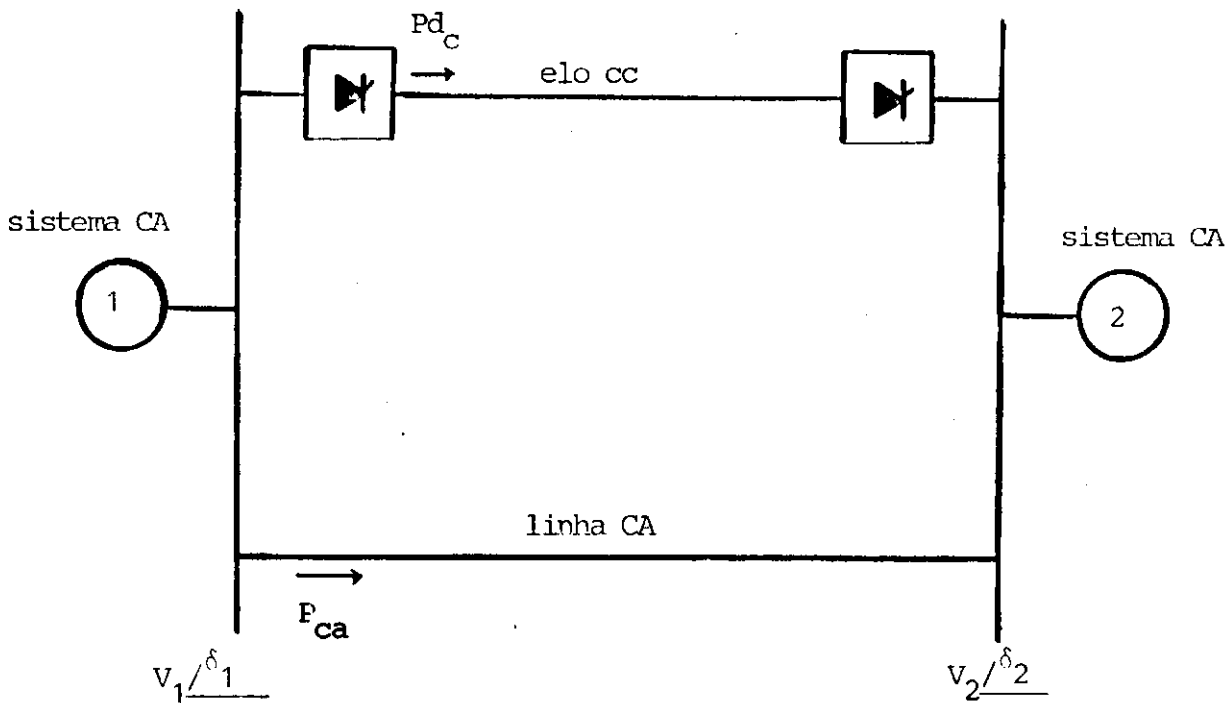


Figura 4.3 - Sistemas CA interligados por um elo CC.

Antes da perturbação temos:

$$P_{m1} = P_{e1} = P_{c1} + P_{ca} + P_{dc} \quad (4.7)$$

$$P_{m2} = P_{e2} = P_{c2} - P_{ca} - p_{dc} \quad (4.8)$$

Onde:

P_{m1} - Potência mecânica das máquinas do sistema " 1 " .

P_{m2} - Potência mecânica das máquinas do sistema " 2 " .

P_{e1} - Potência elétrica fornecida pelas máquinas do sistema " 1 " .

P_{e2} - Potência elétrica fornecida pelas máquinas do sistema " 2 " .

P_{c1} - Potência consumida no sistema " 1 " .

P_{c2} - Potência consumida no sistema " 2 " .

P_{ca} - Potência transmitida pela linha CA.

P_{dc} - Potência transmitida pela linha CC.

Admitindo-se uma perturbação no sistema " 2 ",

temos:

$$P_1 = P_{e1} - P^{\prime}_{e1} \quad (4.9)$$

$$P_2 = P_{e2} - P^{\prime}_{e2} \quad (4.10)$$

Onde:

P^{\prime}_{e1} - Potência de saída das máquinas do sistema " 1 ", durante a perturbação.

P^{\prime}_{e2} - Potência de saída das máquinas do sistema " 2 ", durante a perturbação.

Ou seja, ocorre uma diminuição na potência elétrica de saída das máquinas, devido a queda de tensão em todo o sistema, e a manutenção da potência mecânica das máquinas, devido a lentidão dos reguladores de velocidade. Este efeito provoca a aceleração das máquinas dos dois sistemas. Se a aceleração das máquinas do sistema " 2 " for maior que a do

sistema " 1 ", a potência transmitida CA será diminuída devido o decréscimo da diferença angular entre os dois sistemas.

$$P_{ca} = ((V_1 * V_2)/X) * \text{sen}(\delta_1 - \delta_2) \quad (4.11)$$

Onde:

V_1 - Tensão CA no lado do sistema " 1 ".

V_2 - Tensão CA no lado do sistema " 2 ".

δ_1 - Ângulo de fase da tensão no lado do sistema " 1 ".

δ_2 - Ângulo de fase da tensão no lado do sistema " 2 ".

X - Reatância entre os dois sistemas CA.

Esta diminuição provoca o decréscimo da potência fornecida pelo sistema " 1 ", acelerando as máquinas do sistema " 1 " e desacelerando as do sistema " 2 ".

Este efeito estabilizador observado no sistema CA, quando na ocorrência de um distúrbio, não se verifica nos elos CC com ordem de potência ou corrente constante. Daí a necessidade da inclusão de um sistema de controle que provoque a variação da potência transmitida pelo elo CC, contribuindo assim para a estabilização do sistema CA na ocorrência de faltas. Este sistema de controle é o " controle de amortecimento ou modulação " que estudamos anteriormente.

Desse modo, qualquer sistema híbrido CA/CC pode auxiliar a sua parte CA, bastando que a potência máxima seja projetada em conjunto com a modulação do sistema CC.

Os mesmos efeitos ocorrem se a perturbação se processar no sistema " 1 ".

Falhas do lado CC do sistema são simuladas alterando-se as restrições de operação ou permitindo-se que

estas sejam violadas de uma maneira pré-estabelecida.

Em termos de proteção, a falta no lado CC sensibiliza o sistema de proteção que tem como primeira ação a ativação de medidas de controle que provoquem a extinção da corrente de falta.

Após uma falta onde ocorre o bloqueio do elo CC, a operação de desbloqueio do elo, deverá proceder como mostrado na figura 4.4.

Através da figura 4.4, observa-se que o restabelecimento da corrente se processa em forma de rampa e o tempo necessário para o restabelecimento da corrente nominal do elo é determinado com o auxílio da figura 4.5.

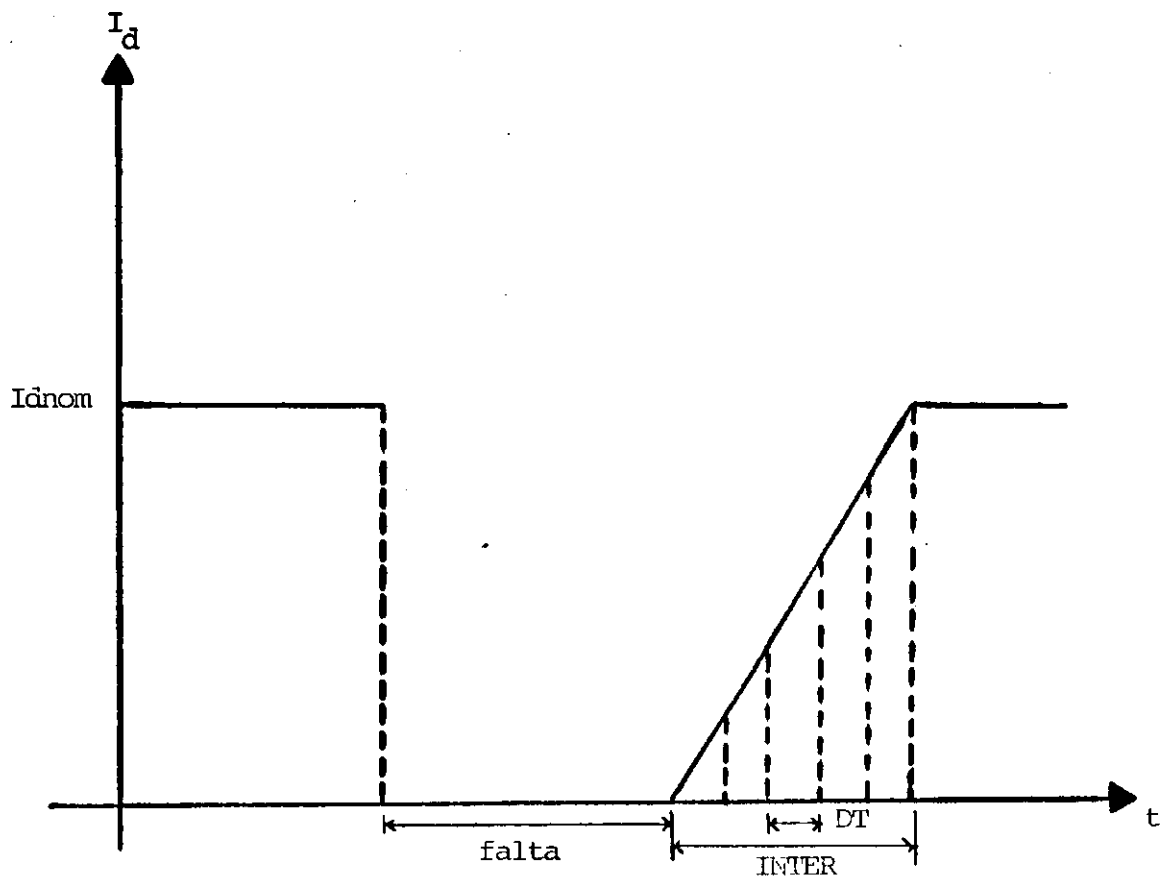


Figura 4.4 - Restabelecimento da corrente no elo CC.

$$I' = f(V_d) \quad (4.12)$$

$$t = \text{INTER} * \text{DT} * ((I_d - I')/I_d) \quad (4.13)$$

$$t_g = I_d / (\text{INTER} * \text{DT}) \quad (4.14)$$

de outra forma,

$$t_g = (I_d - I')/t \quad (4.15)$$

Igualando-se 4.14 e 4.15, temos:

$$((I_d - I')/t) = (I_d / (\text{INTER} * \text{DT}))$$

$$t = \text{INTER} * \text{DT} * ((I_d - I')/I_d) \quad (4.16)$$

Onde:

DT - Intervalo de integração da simulação.

A desenergização do elo só ocorrerá para distúrbios severos e próximos das barras de comutação, dependendo dos valores de VD1MIN e VD2MIN para a característica composta e de VDCT1 para a característica simples. Neste caso $I' = 0$.

Caso o desligamento não ocorra, mas o ponto de operação do elo se localize entre (VD1MIN - VDCT1) ou (VD2MIN - VDCT2), aparecerá uma corrente variável no elo, em função da tensão e menor que a corrente nominal. Neste caso segue-se a mesma lógica de desbloqueio e $I' \neq 0$.

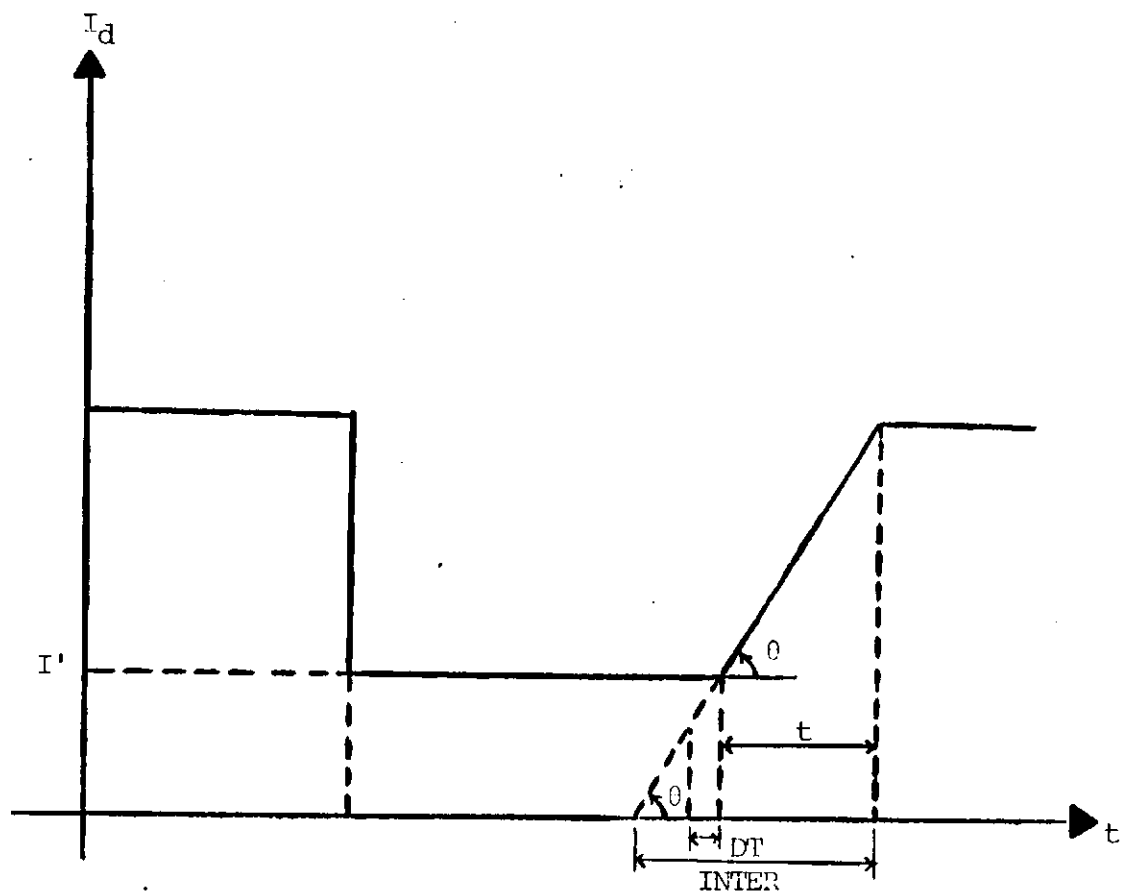


Figura 4.5 - Restabelecimento da corrente no elo CC.

4.10. MÉTODOS PARA A INCLUSÃO DO ELO CC.

Um conjunto formado por equações diferenciais e algébricas podem representar um sistema de potência com inclusão de elos CC. As equações diferenciais representam as máquinas síncronas, os controles das máquinas, o sistema de modulação do elo CC e os circuitos de controle externo. As equações algébricas representam as mudanças de operação dos elos CC.

Dois métodos podem ser utilizados para obtermos a solução da estabilidade:

a. Métodos diretos - baseado na mudança da energia cinética das máquinas e não há necessidade da solução das equações

diferenciais passo a passo.

b. Métodos Indiretos - são divididos em duas categorias: analógico e digital. No método digital os simuladores de estabilidade transitória geralmente alternam integração numérica e solução do fluxo de potência para resolver as equações algébricas.

Neste trabalho o simulador de estabilidade utiliza o método indireto com solução simultânea na sua parte CA e o método numérico utilizado é o de Euler modificado. Na parte CC foi utilizado o método indireto com solução por blocos.

A solução do modelo CC incluído no simulador de estabilidade é realizada da seguinte forma:

Após os dados dos módulos das tensões CA das barras conversoras, fornecido pelo simulador ao controle básico do elo CC; o controle básico, sistema de modulação e solução do elo processam as potências ativa e reativa, que são devolvidos a parte CA como cargas de potência constante.

O sistema de modulação tem a finalidade de determinar a nova ordem de corrente na modulação em corrente e o novo valor do ângulo de extinção na modulação em tensão, a partir do sinal de entrada escolhido.

A nova ordem de corrente e ângulo de extinção são levados ao controle básico que calcula a máxima corrente fictícia.

A corrente máxima fictícia é comparada com a corrente nominal de operação do elo e a partir daí determina-se o modo de operação do elo, o qual poderá ser: modo normal,

modo de tensão reduzida no inversor, modo gama corrigido, modo reduzido, modo alfa/alfa reduzido e bloqueio do elo.

A partir do modo de operação determinado, processa-se a solução do elo onde são determinados os novos valores específicos de tensão CC, ângulo de ignição e extinção. Na solução do elo também se processa o bloqueio do elo e a simulação da falha de comutação.

A partir dos dados da solução do elo, se processa o fluxo de carga CA/CC (fluxograma na figura 4.6), onde é determinado os novos valores de potência ativa e reativa no retificador e inversor, entrando com dados na parte CA do simulador de estabilidade.

O controle básico e a solução do elo utilizam expressões algébricas e a modulação equações diferenciais. O método de integração utilizado para a solução da modulação do elo foi o de Runge-Kutta de quarta ordem implementado por [Guerra,1986], com intervalo de integração relacionado com o intervalo da simulação (parte CA).

O fluxo de carga CA/CC utiliza o método de Newton-Raphson e foi desenvolvido para transmissão CC sem derivação intermediárias, ou seja, multiterminais; onde a partir de um conjunto de equações que caracterizam o funcionamento das linhas de transmissão CC e conversores, determinou-se o modelo matemático para a solução do fluxo de carga CC. Com este fluxo de carga o elo CC pode ser simulado para linhas monopolar, homopolar, bipolar e com polos em paralelo; conversores com pontes de seis e doze pulsos; operando com os seguintes modos

de controle: controle de corrente, controle de potência, controle do ângulo de ignição e controle do ângulo de extinção no retificador ou inversor.

O simulador digital de estabilidade, na sua parte CA, e o fluxo de carga CA/CC sofreram algumas modificações a fim de permitir a simulação da estabilidade com a inclusão do elo CC, associando-se ao controle básico e a solução do elo.

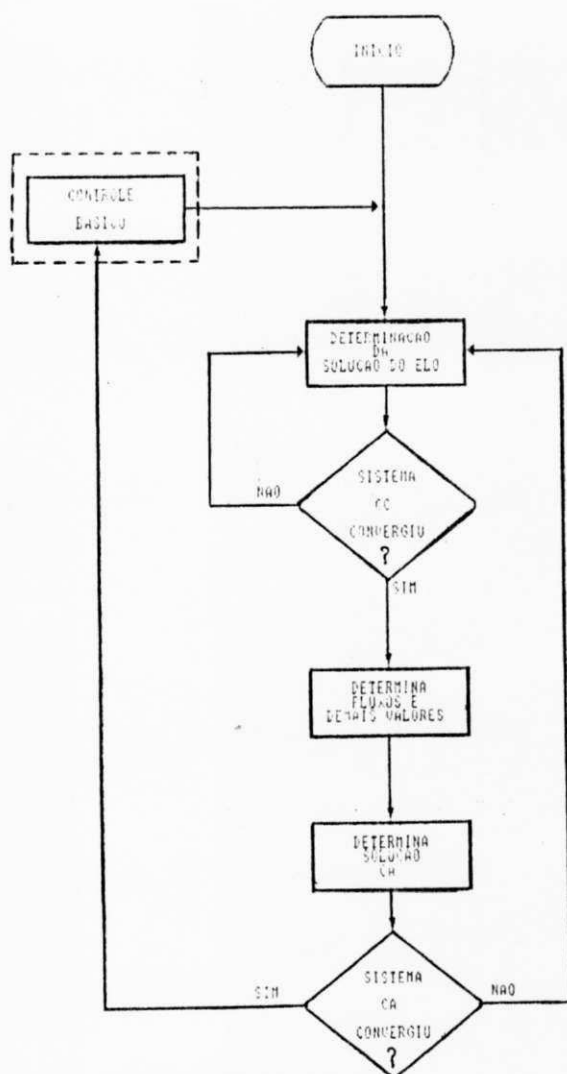


Figura 4.6 - Fluxo de carga CA/CC

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO.

Com a finalidade de observar, discutir e ratificar o método de simulação de estabilidade com inclusão de elo CC abordado neste trabalho; escolheu-se um sistema simples com 3 barras e um sistema de maior porte com 13 barras para a simulação.

O elo de transmissão em corrente contínua incluído no sistema em corrente alternada (sistema de interligação com capacidade de operação em 2500 MW) opera com corrente constante no retificador e ângulo de extinção mínimo no inversor. Os conversores retificador e inversor são conectados ao sistema de corrente alternada através de transformadores LTC.

No sistema de 3 barras, para efeito de simulação, foi aplicado um distúrbio (curto-circuito trifásico com impedância zero) na barra 3 com duração de 100. msec.. O mesmo tipo de distúrbio, com duração de 50 msec., foi aplicado a barra 13 do sistema de 13 barras.

Optou-se pela a representação dos resultados da simulação, através de recursos gráficos, uma vez que os

gráficos oferecem uma maior gama de informação do comportamento do sistema. Pode-se observar através de gráficos, o comportamento do ângulo de torque das máquinas síncronas que compõem o sistema, tensão de campo em todas as máquinas, tensão alternada em todas as barras do sistema, potência ativa e reativa do retificador e inversor, tensão contínua do retificador e inversor, corrente contínua, ângulo de ignição do retificador, ângulo de extinção do inversor, ângulo de comutação do retificador e inversor, fator de potência e variação de "tap" dos transformadores no retificador e inversor.

Estudou-se a simulação com modulação combinada em corrente e tensão e modulação em corrente. O sistema de modulação foi simulado utilizando as seguintes funções de transferência apresentadas no capítulo 4.

$$FT(s) = (K * s) / (1 + s * T1) \quad (4.3)$$

$$FT(s) = (K * s) / ((1 + s * T1) * (1 + s * T2)) \quad (4.4)$$

$$FT(s) = (K * s) / ((1 + s * T1) * (1 + s * T2) * (1 + s * T3)) \quad (4.5)$$

$$FT(s) = ((K * s) * (1 + s * T4)) / ((1 + s * T1) * (1 + s * T2) * (1 + s * T3)) \quad (4.6)$$

Neste capítulo apresenta-se a análise do comportamento do sistema com 3 barras e 13 barras, face ao distúrbio aplicado e características consideradas.

5.2. SISTEMA COM 3 BARRAS.

O sistema de 3 barras é apresentado na figura 5.1.

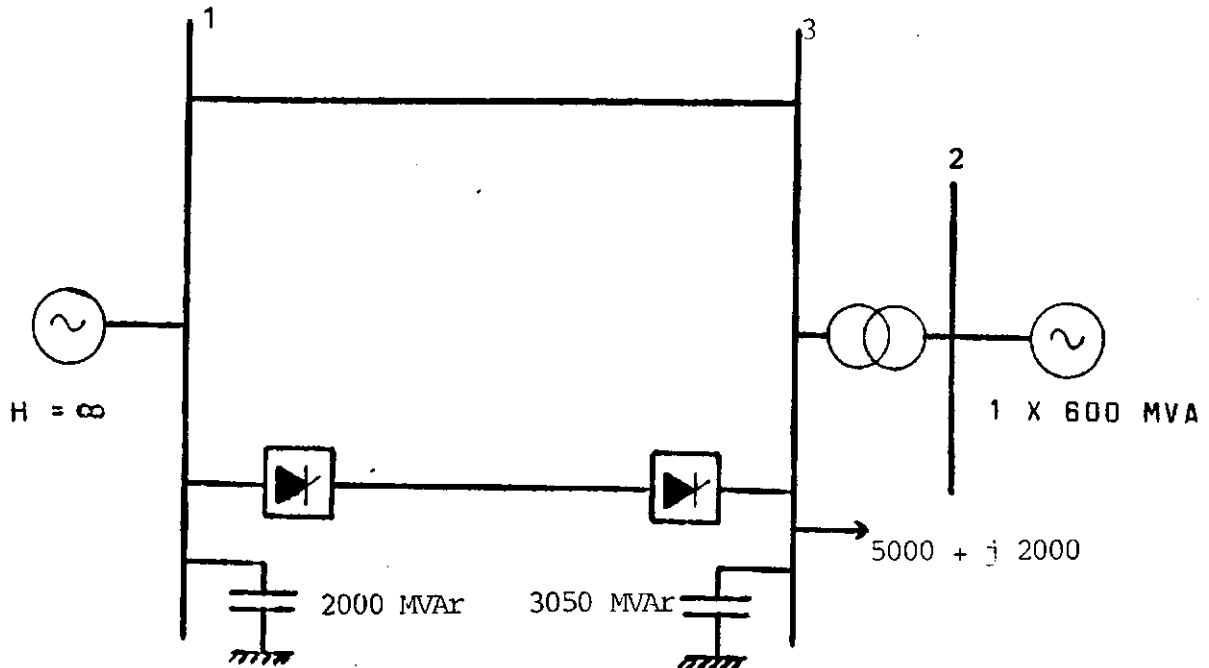


Figura 5.1 - Sistema de 3 barras.

Escolheu-se a máquina na barra 2 para análise, uma vez que a máquina localizada na barra 1 é representada por um barramento infinito.

Na figura 5.2 observa-se a variação do ângulo de torque com o sistema de modulação combinada em corrente e tensão utilizando a função (4.3).

Onde:

Para a modulação em corrente temos,

$$KFT = 400.$$

$$T1 = 0.113$$

e para a modulação em tensão temos,

$$KFT = 400.$$

$$T1 = 0.158$$

Na figura 5.3 observa-se a variação do ângulo de torque com o sistema de modulação combinada em tensão e em corrente utilizando a função (4.4).

Onde:

Para a modulação em corrente temos,

$$KFT = 400.$$

$$T1 = 0.113$$

$$T2 = 0.053$$

e para a modulação em tensão temos,

$$KFT = 400.$$

$$T1 = 0.158$$

$$T2 = 0.045$$

Na figura 5.4 observa-se a variação do ângulo de torque com o sistema de modulação combinada em corrente e tensão utilizando a função (4.5).

Onde:

Para a modulação em corrente temos,

$$KFT = 400.$$

$$T1 = 0.113$$

$$T2 = 0.053$$

$$T3 = 0.032$$

e para a modulação em tensão temos,

$$KFT = 400.$$

$$T1 = 0.158$$

$$T2 = 0.045$$

$$T3 = 0.032$$

Na figura 5.5 observa-se a variação do ângulo de torque com o sistema de modulação combinada em corrente e tensão utilizando a função (4.6).

Onde:

Para a modulação em corrente temos,

$$KFT = 400.$$

$$T1 = 0.113$$

$$T2 = 0.053$$

$$T3 = 0.032$$

$$T4 = 0.020$$

e para a modulação em tensão temos,

$$KFT = 400.$$

$$T1 = 0.158$$

$$T2 = 0.045$$

$$T3 = 0.032$$

$$T4 = 0.020$$

Na figura 5.6 observa-se a variação do ângulo de torque com o sistema de modulação em corrente utilizando a função (4.6).

Onde:

$$KFT = 400.$$

$$T1 = 0.158$$

$$T2 = 0.045$$

$$T3 = 0.032$$

$$T4 = 0.020$$

Da figura 5.2 a 5.6 observou-se que o efeito estabilizador provocado pelo o sistema de modulação não influe no primeiro " swing " da variação do ângulo de torque, após a ocorrência do distúrbio, como foi discutido no capítulo 4. No segundo " swing " a estabilização torna-se observável e sendo mais sensível quando utiliza a função de transferência (4.6) com 3 polos e 2 zeros.

Os valores dados para o ganho e as constantes de tempo T_1 , T_2 , T_3 e T_4 para a solução da modulação são característicos para cada tipo de sistema em estudo.

Nota-se que no segundo " swing " ocorre uma oscilação maior do ângulo de torque, devido a elevação da corrente no elo CC provocada pelo o sistema de modulação.

Para o sistema em estudo conclui-se que o melhor desempenho do sistema de modulação como estabilizador, em termos da variação do ângulo de torque, foi verificado quando se utilizou as funções (4.5) e (4.6), ambas com modulação combinada em corrente e em tensão. O desempenho do sistema de modulação quando se utiliza a modulação em corrente foi idêntico a modulação combinada em corrente e em tensão utilizando a função (4.4); o que comprovou a superioridade do sistema de modulação combinada em corrente e tensão.

Da figura 5.7 a 5.11 observa-se o comportamento da tensão de campo da máquina 2 e conclui-se que ocorreu uma variação dentro dos limites com tendência a estabilizar-se ao longo do tempo. Uma maior variação da tensão de campo foi

observada quando se utilizou o sistema de modulação em corrente devido a elevação da corrente contínua no elo CC, após o distúrbio, e conseqüentemente a elevação da carga de potência constante vista pelo o sistema CA.

As tensões alternada nas barras 1,2 e 3 não sofreram influência do sistema de modulação, apresentando-se praticamente idênticas em relação as simulações com os diferentes tipos de funções utilizadas na modulação. Observou-se que a tensão na barra 3 caiu para zero, durante o distúrbio e conseqüentemente o elo CC foi desenergizado durante o tempo do distúrbio. As figuras 5.12, 5.13 e 5.14 mostram a tensão CA nas barras 1, 2 e 3, respectivamente.

Da figura 5.15 a 5.24 apresenta-se a variação da potência ativa para o retificador e inversor utilizando os cinco modos de modulação em estudo.

Tomando como referência a simulação com modulação, em todos os casos ocorreram uma súbita elevação da potência ativa no retificador e inversor, logo após a retirada do distúrbio, provocado pelo o sistema de modulação e em seguida uma estabilização em um valor inferior ao obtido sem modulação.

A operação do elo CC com modulação em condições nominais especificadas pode ser obtida elevando-se gradativamente a ordem de corrente (por conseqüente a potência CC), emitida pelo o sistema de controle, mas somente quando o sistema estabilizar-se totalmente.

As potências reativa no retificador e inversor são mostradas da figura 5.25 a 5.34. Observa-se que a modulação em tensão provoca um aumento da potência reativa; comprovado pelas

figuras 5.33 e 5.34 que representam a potência reativa no retificador e inversor, respectivamente, onde a potência reativa foi menor que quando se utiliza a modulação combinada. Um suprimento adequado, de potência reativa, deve ser levado em conta no projeto de sistemas que contém elos CC, apesar de que não observou-se uma forte influência na estabilização do sistema, devido ao elevado fluxo de reativos, quando se utiliza modulação combinada em tensão e corrente em relação a modulação apenas de corrente, na estabilidade do sistema.

A corrente CC é mostrada da figura 5.35 a 5.39 para as funções de (4.3) à (4.6) com modulação combinada em corrente e tensão e modulação em corrente; nesta ordem.

Da figura 5.40 a 5.49 apresenta-se o comportamento da tensão contínua no retificador e inversor, durante a simulação. Nas simulações onde utilizou-se a modulação combinada em corrente e tensão foi verificado, sensivelmente, o efeito da modulação em tensão, quando se compara com a modulação em corrente, mostrada nas figuras 5.48 e 5.49. A variação da tensão contínua no retificador e inversor manteve-se dentro dos limites, com tendência a estabilização ao longo do tempo, próximo do valor nominal de pré-falta.

Os ângulos de ignição no retificador e extinção no inversor são mostrados da figura 5.50 a 5.59. Os ângulos de ignição e extinção se mantiveram dentro dos limites durante a simulação. O sistema opera sob o modo de tensão reduzida durante a simulação com α_r igual a α_{rmin} (5°). Nota-se também

que, o ângulo de extinção quando se utiliza a função (4.6) alcança o limite máximo adotado (27°), uma vez que o desvio da tensão CA no inversor, em relação a referência, ainda é significativo, provocando grandes variações no ângulo de extinção.

Em termos de ângulos de ignição e extinção, obteve-se um maior desempenho do sistema de modulação quando se utilizou a função (4.6).

O ângulo de comutação do retificador e inversor mostrou-se estável e dentro dos limites, entretanto ocorreu valores de ordem zero para a modulação combinada em corrente e tensão quando se utilizou as funções (4.3), (4.5) e (4.6), porém não foi sensível ao ponto de ocorrer falha de comutação do retificador ou inversor. As figuras 5.60 a 5.69 mostram o ângulo de comutação para o retificador e inversor,

O fator de potência do retificador e inversor (figuras 5.70 e 5.71, utilizando a função (4.6)) manteve-se acima de 0.75 e a variação de "tap" manteve-se dentro dos limites de 0.85 a 1.15 (figuras 5.72 e 5.73, para a função (4.6)). O mesmo comportamento foi observado, utilizando as outras funções.

O apêndice B apresenta os dados, detalhados, do sistema de 3 barras simulado.

Da figura 5.2 a 5.73 temos:

- - Curva da simulação do sistema sem modulação.
- - Curva da simulação do sistema com modulação.

MC - Modulação em corrente.

MT - Modulação em tensão.

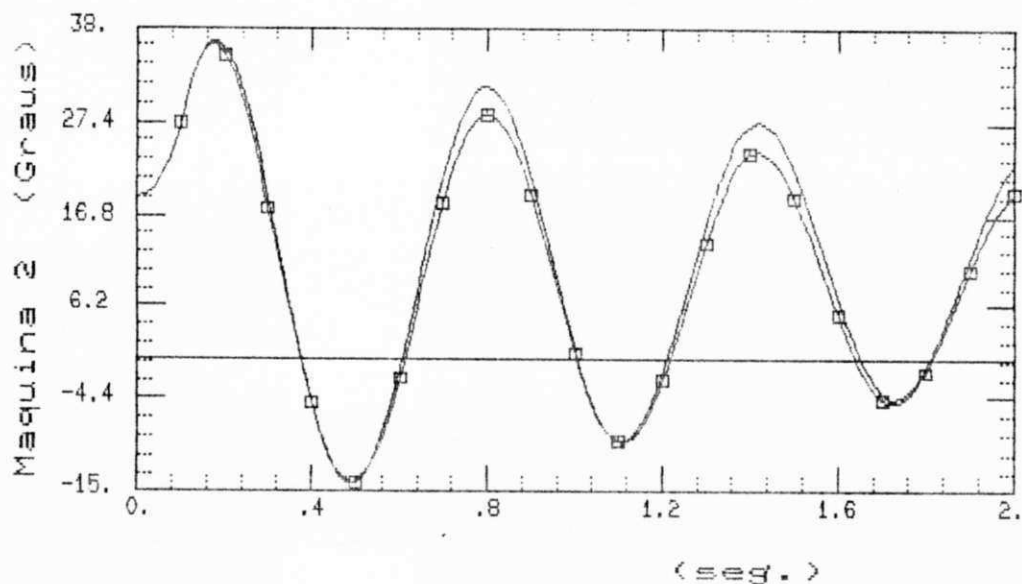


Figura 5.2 - Característica do ângulo de torque (máquina 2) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

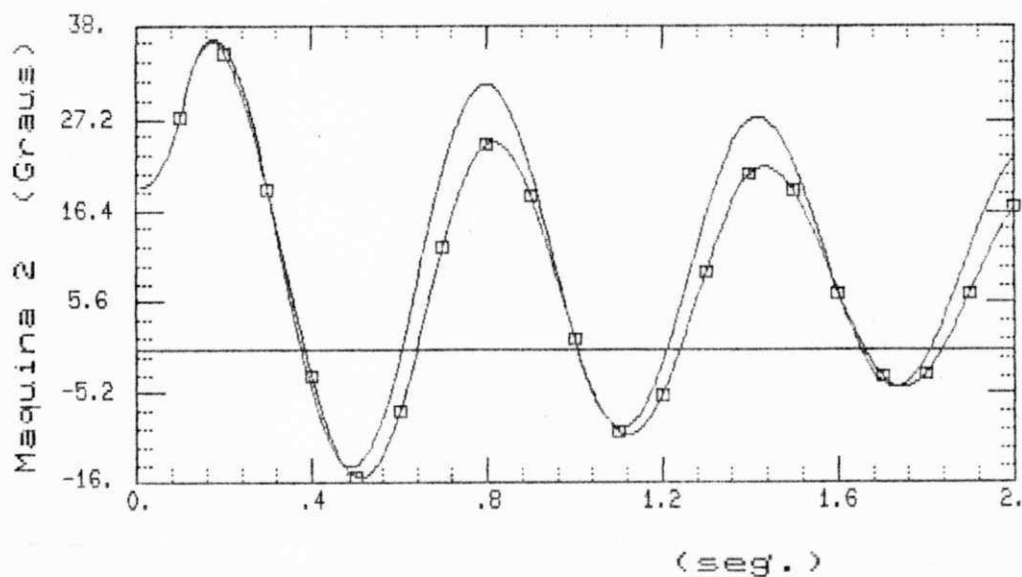


Figura 5.3 - Característica do ângulo de torque (máquina 2) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

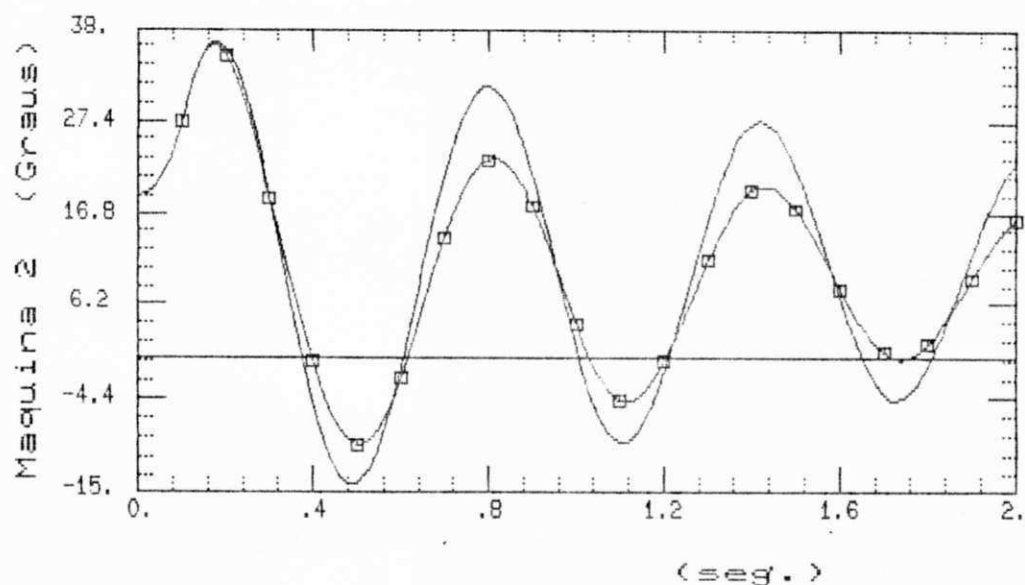


Figura 5.4 - Característica do ângulo de torque (máquina 2)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)

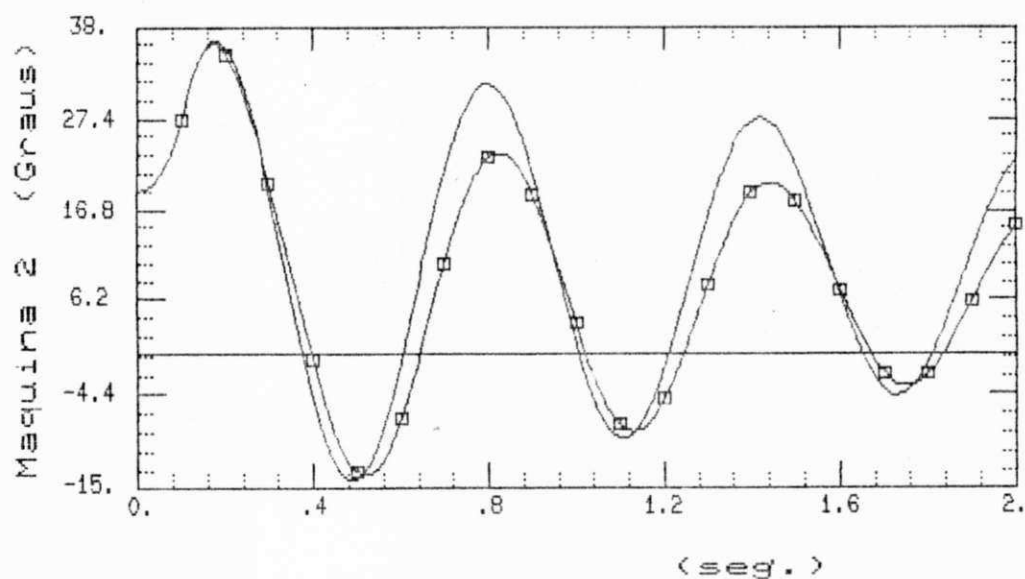


Figura 5.5 - Característica do ângulo de torque (máquina 2)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

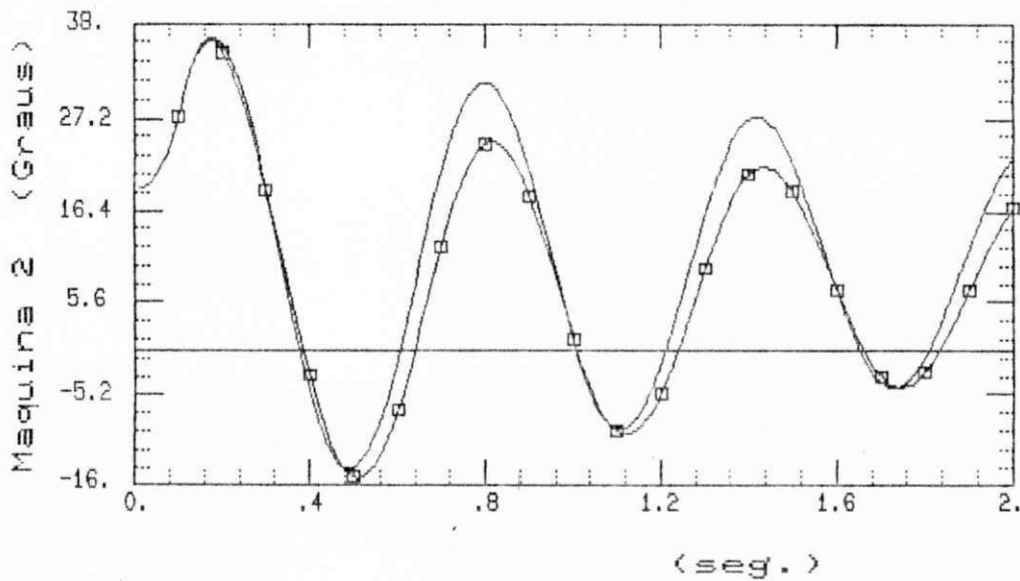


Figura 5.6 - Característica do ângulo de torque (máquina 2)
 com modulação em corrente.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

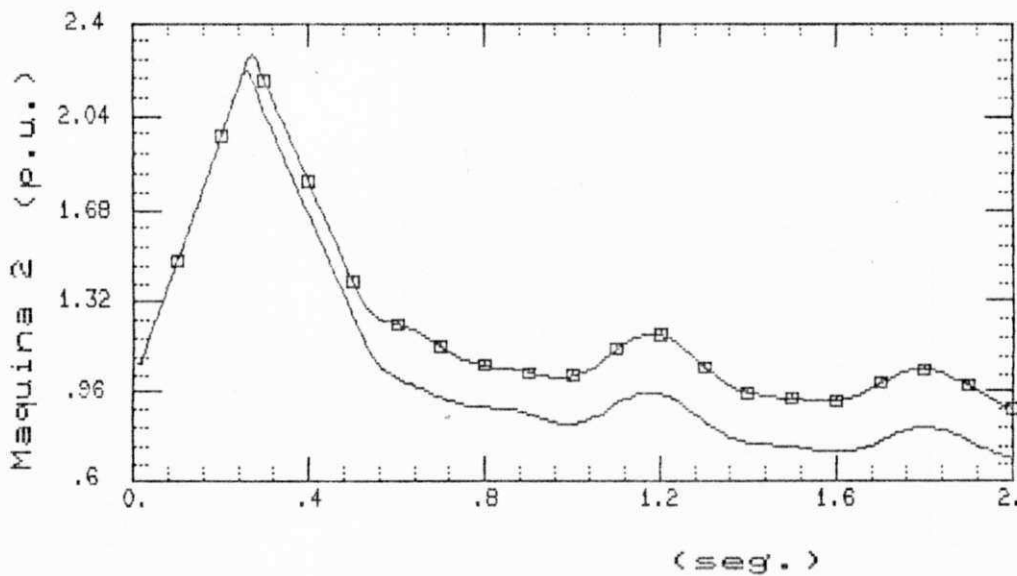


Figura 5.7 - Característica da tensão de campo (máquina 2)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

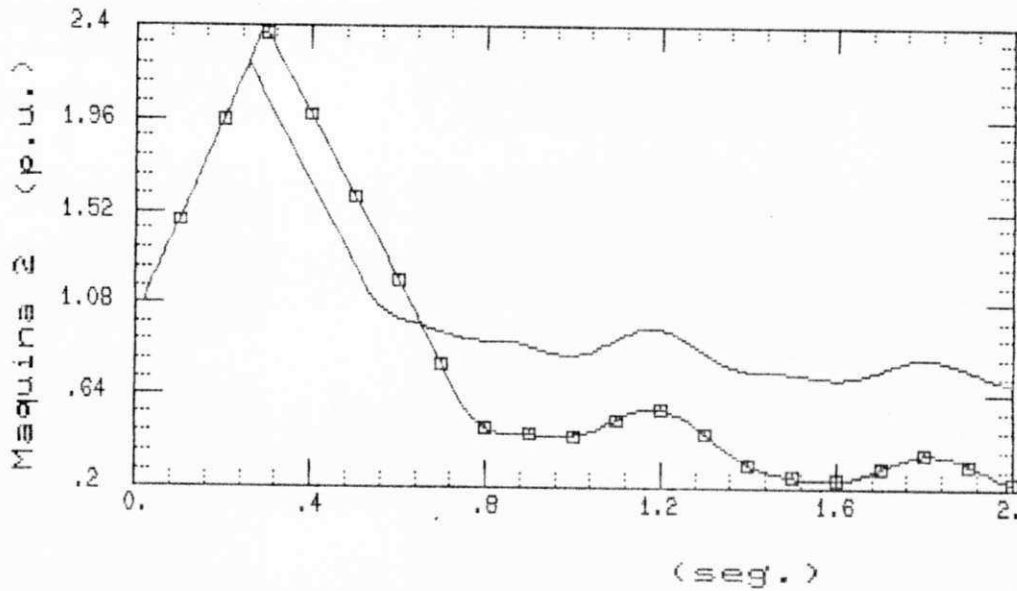


Figura 5.8 - Característica da tensão de campo (máquina 2) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

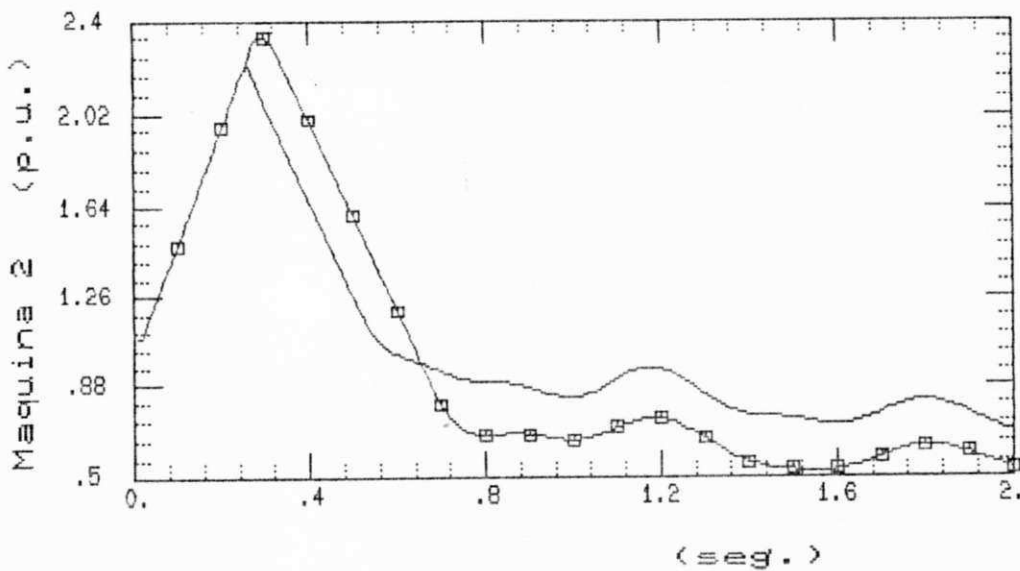


Figura 5.9 - Característica da tensão de campo (máquina 2) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)

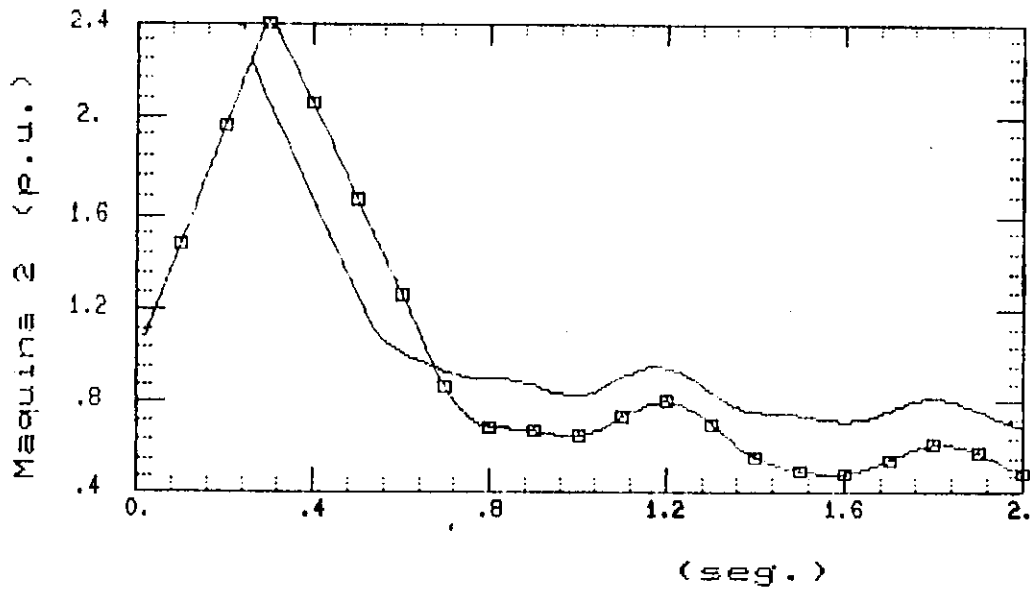


Figura 5.10 - Característica da tensão de campo (máquina 2)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

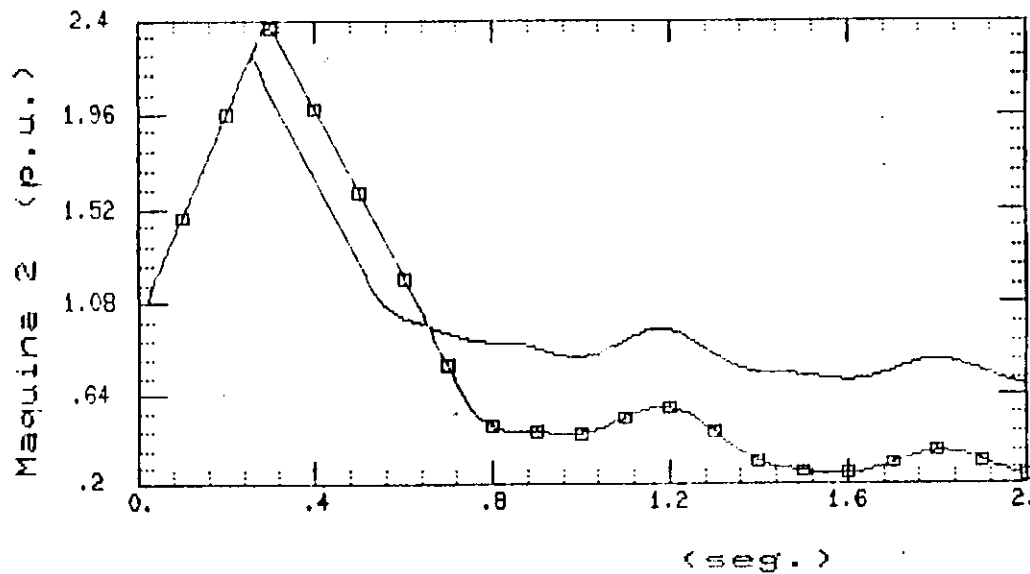


Figura 5.11 - Característica da tensão de campo (máquina 2)
 com modulação em corrente.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

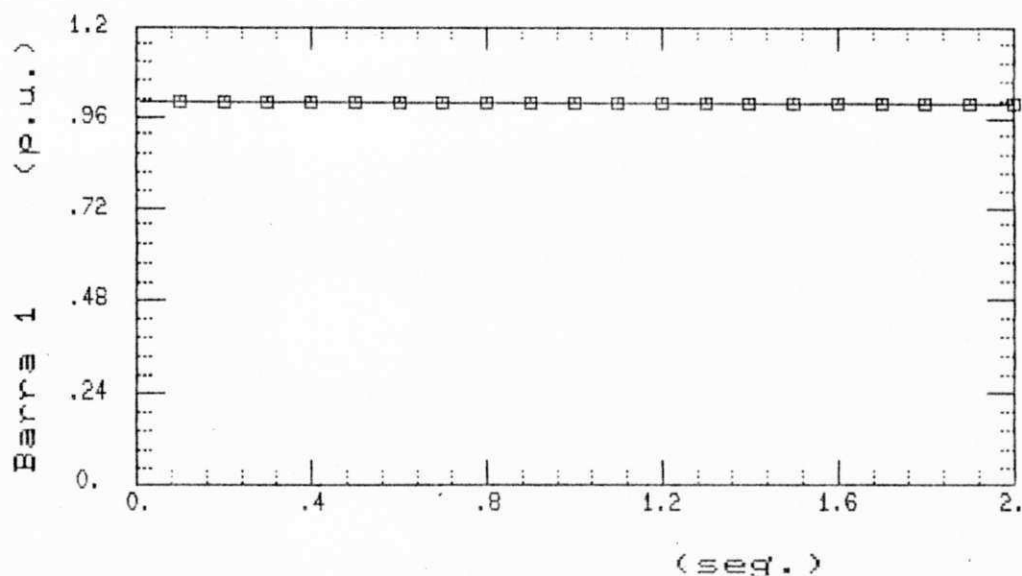


Figura 5.12 - Característica da tensão de CA (barra 1) com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

$T_4=0.020$ (MC) e (MT)

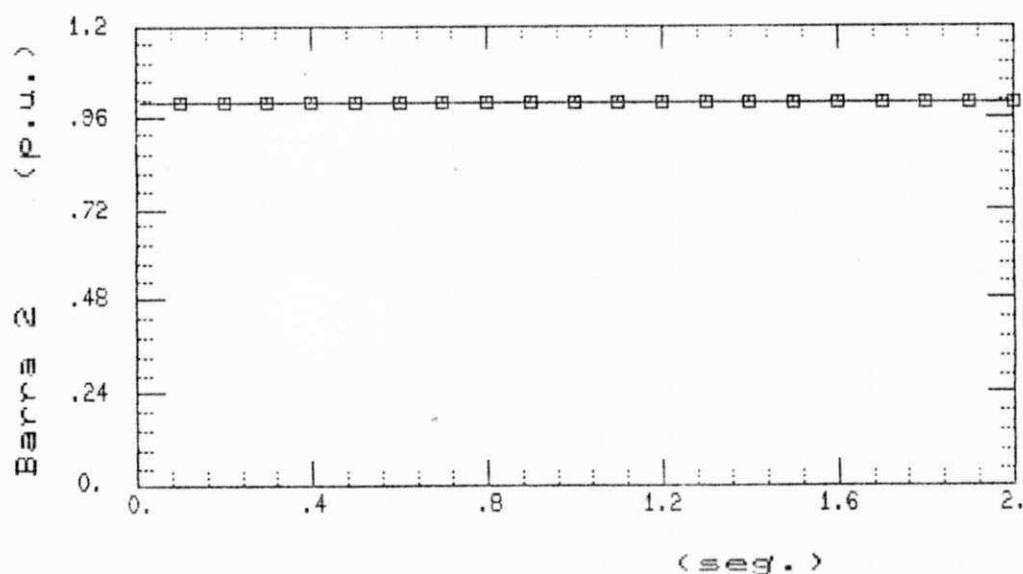


Figura 5.13 - Característica da tensão de CA (barra 2) com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

$T_4=0.020$ (MC) e (MT)

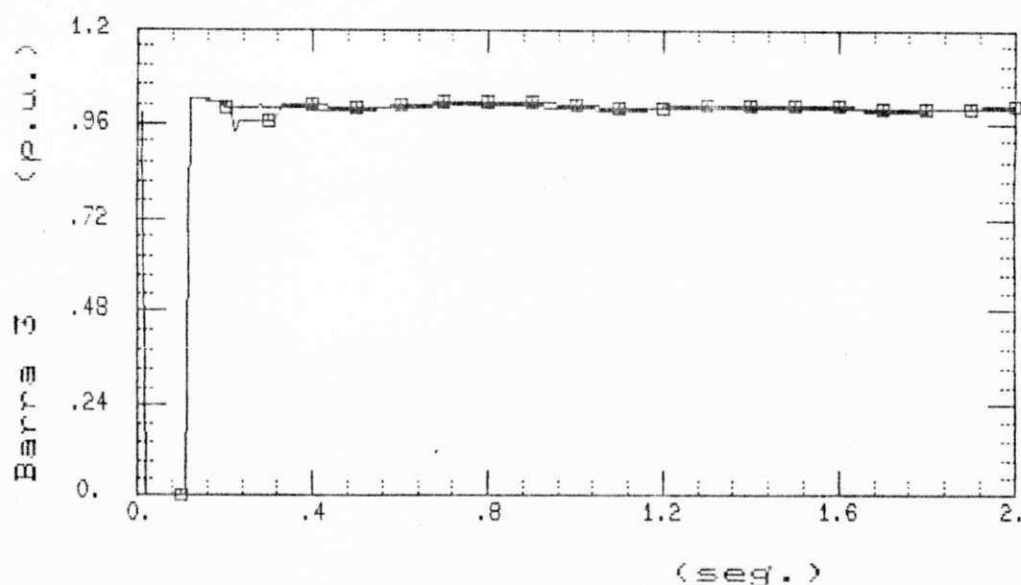


Figura 5.14 - Característica da tensão de CA (barra 3) com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: KFT=400 (MC) e (MT)

Constantes de tempo: T1=0.113 (MC) e T1=0.158 (MT)

T2=0.053 (MC) e T2=0.045 (MT)

T3=0.032 (MC) e (MT)

T4=0.020 (MC) e (MT)

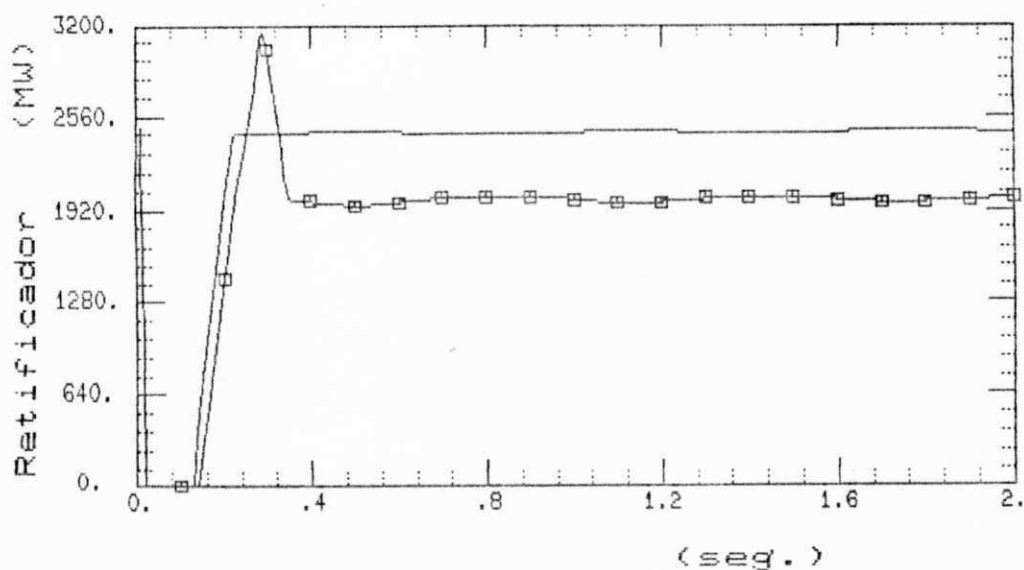


Figura 5.15 - Característica da potência ativa (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.3

Ganho da função de transferência: KFT=400 (MC) e (MT)

Constantes de tempo: T1=0.113 (MC) e T1=0.158 (MT)

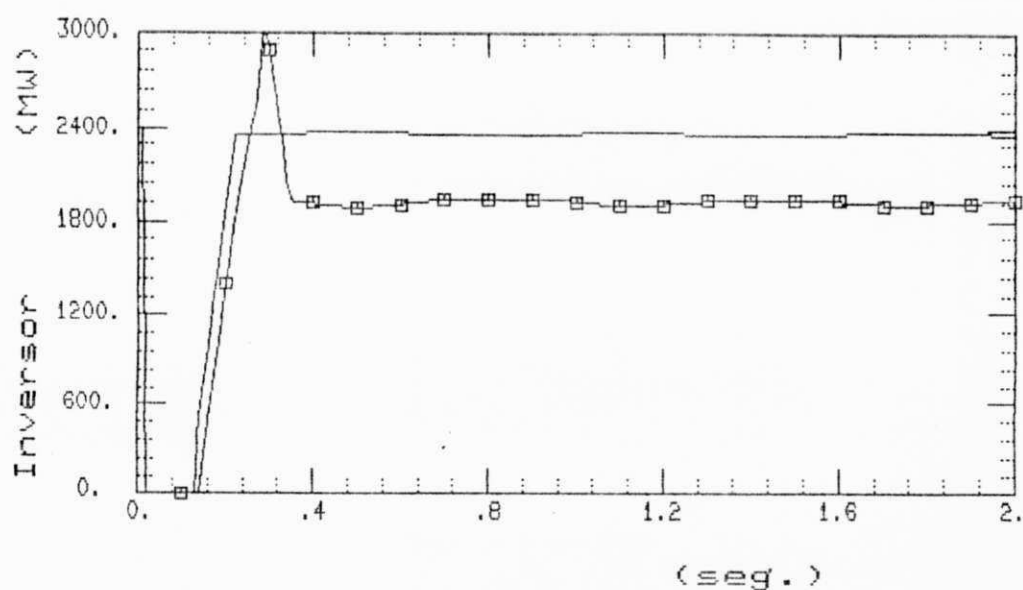


Figura 5.16 - Característica da potência ativa (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

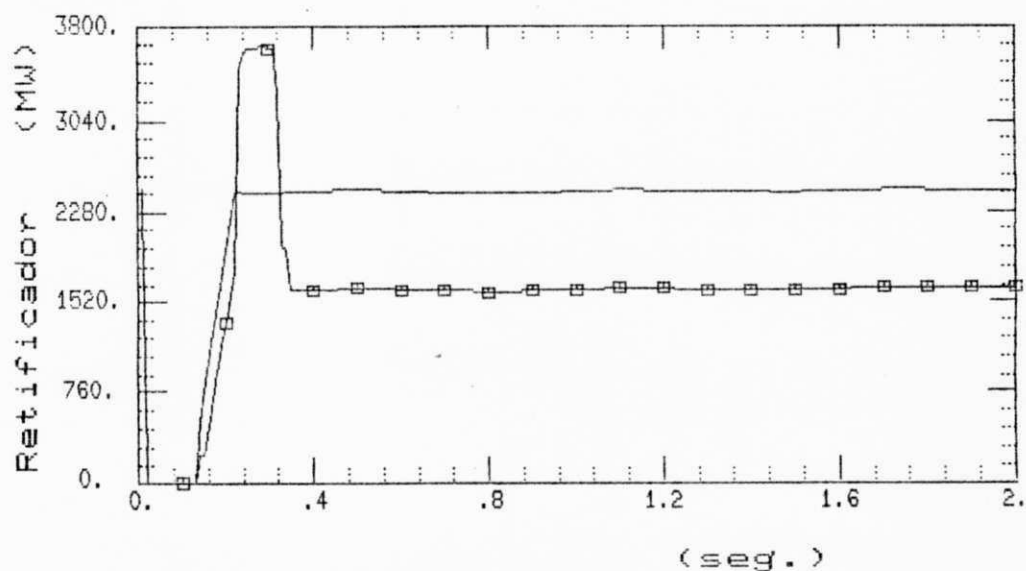


Figura 5.17 - Característica da potência ativa (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

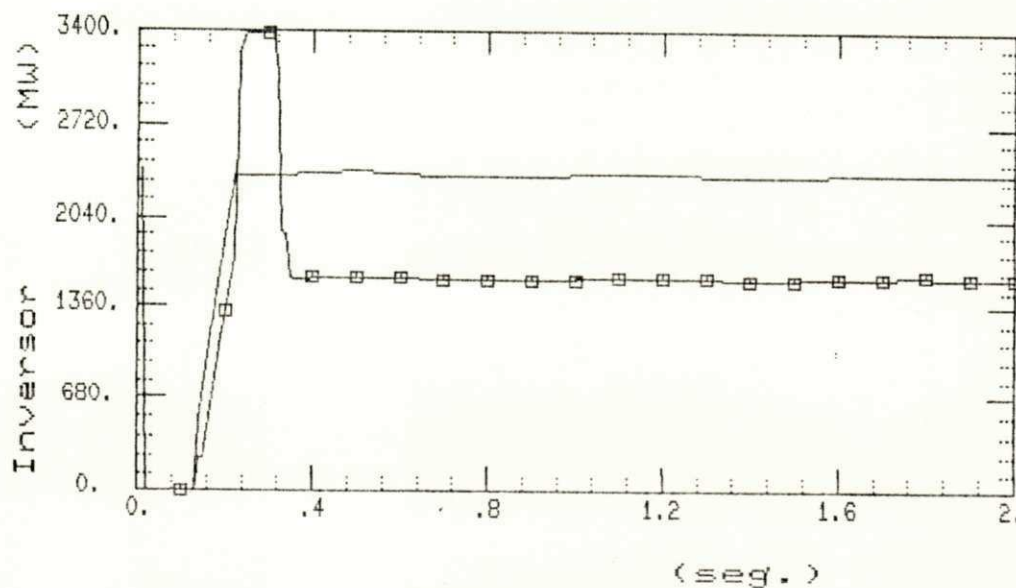


Figura 5.18 - Característica da potência ativa (inversor)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

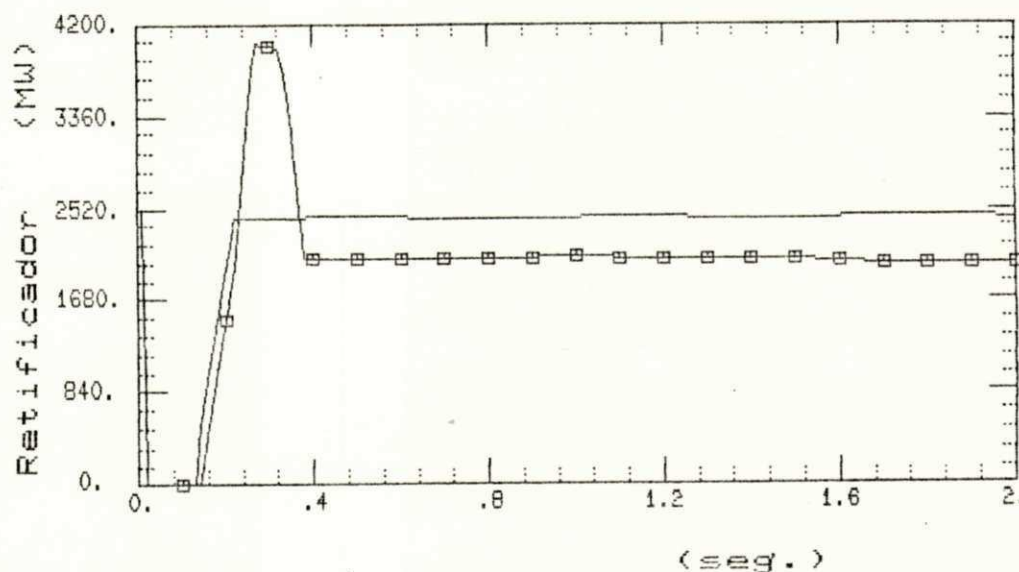


Figura 5.19 - Característica da potência ativa (retificador)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)

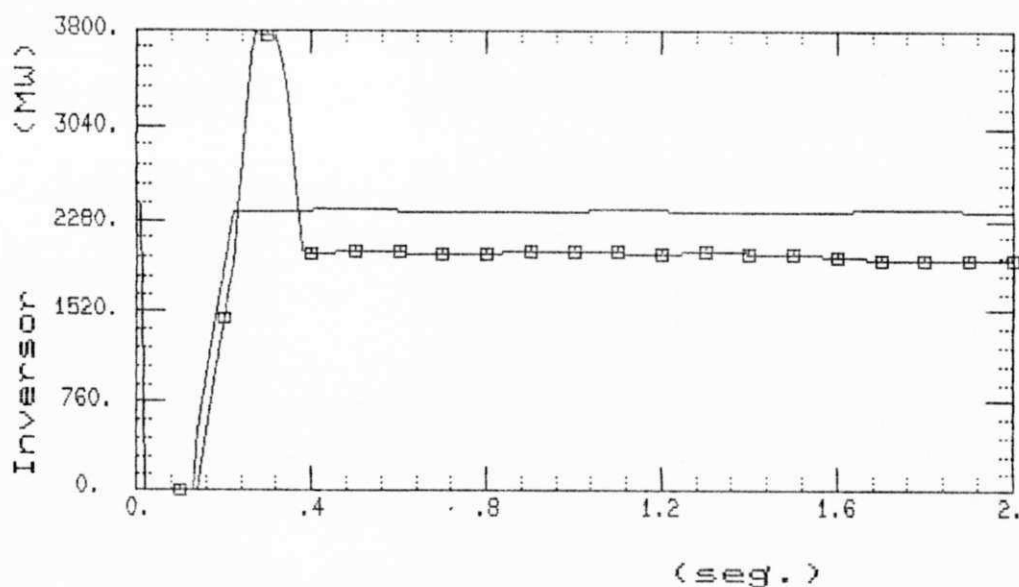


Figura 5.20 - Característica da potência ativa (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: KFT=400 (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: T1=0.113 (MC) e T1=0.158 (MT)
 T2=0.053 (MC) e T2=0.045 (MT)
 T3=0.032 (MC) e (MT)

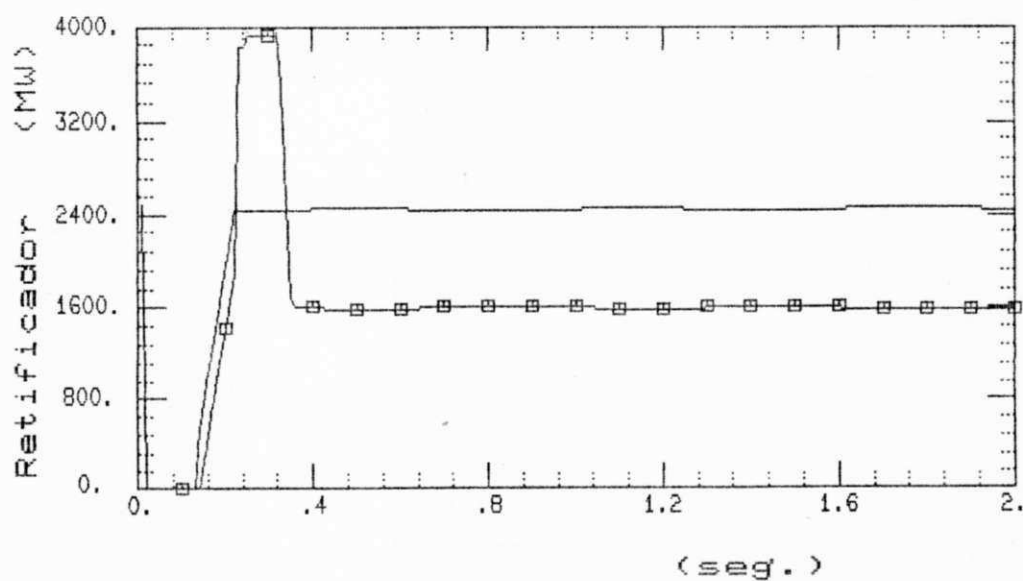


Figura 5.21 - Característica da potência ativa (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: KFT=400 (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: T1=0.113 (MC) e T1=0.158 (MT)
 T2=0.053 (MC) e T2=0.045 (MT)
 T3=0.032 (MC) e (MT)
 T4=0.020 (MC) e (MT)

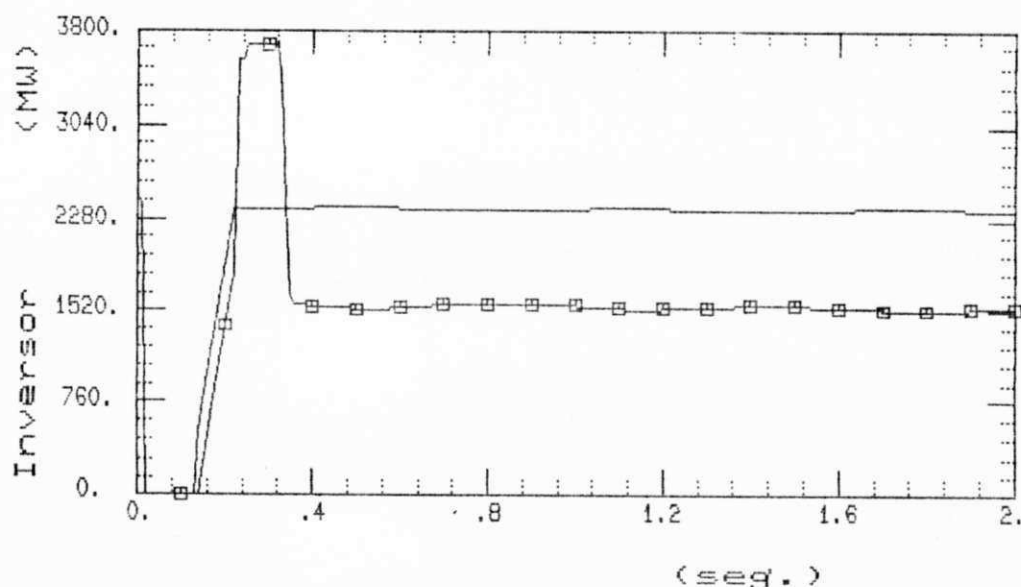


Figura 5.22 - Característica da potência ativa (inversor)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

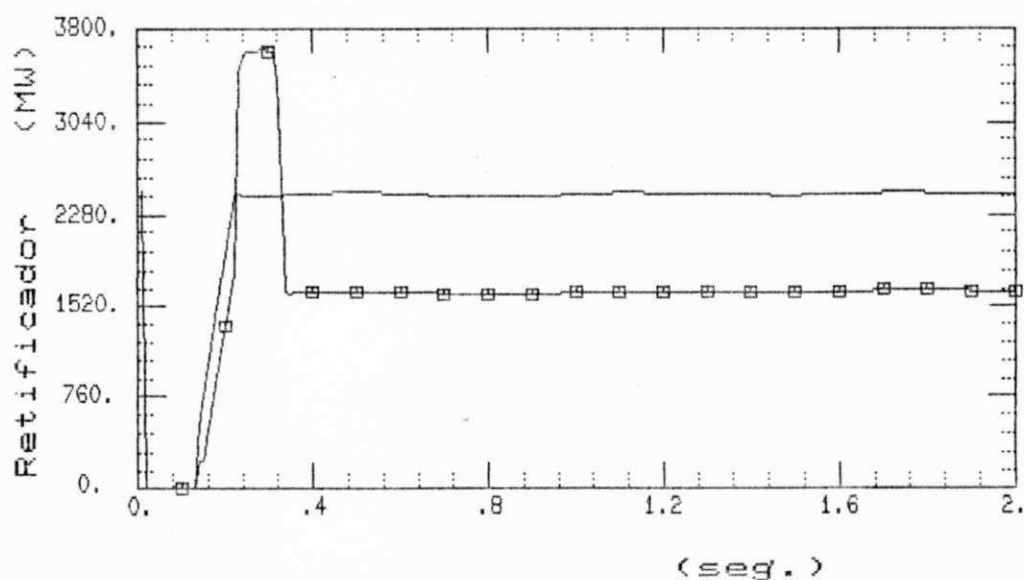


Figura 5.23 - Característica da potência ativa (retificador)
 com modulação combinada em corrente.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

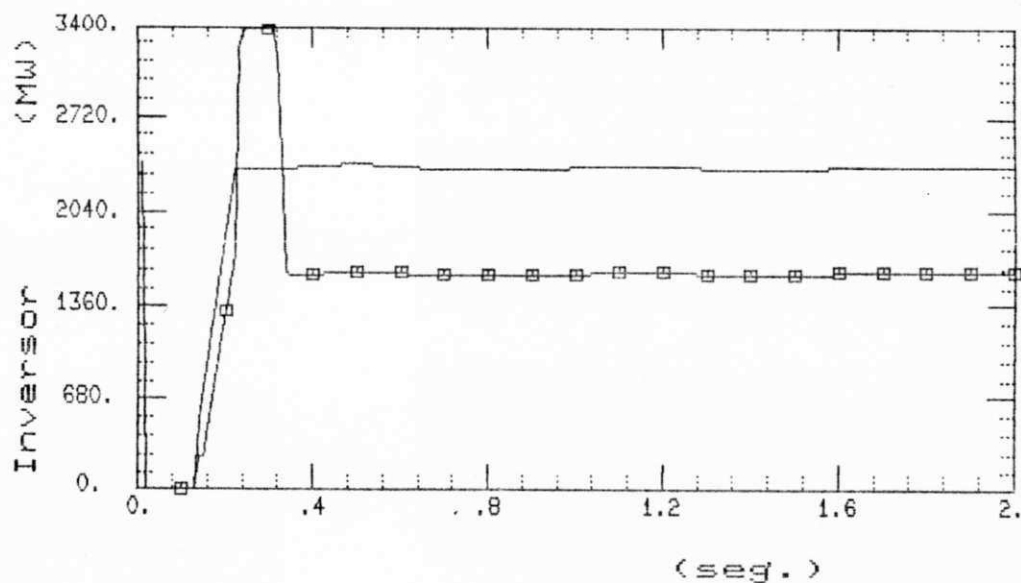


Figura 5.24 - Característica da potência ativa (inversor) com modulação em corrente.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

$T_4=0.020$ (MC) e (MT)

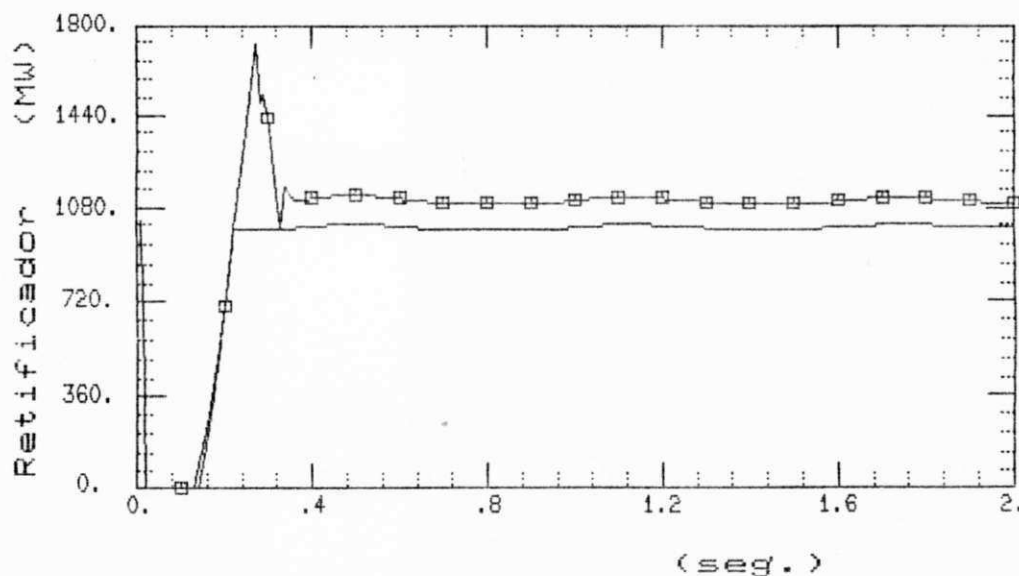


Figura 5.25 - Característica da potência reativa (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.3

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

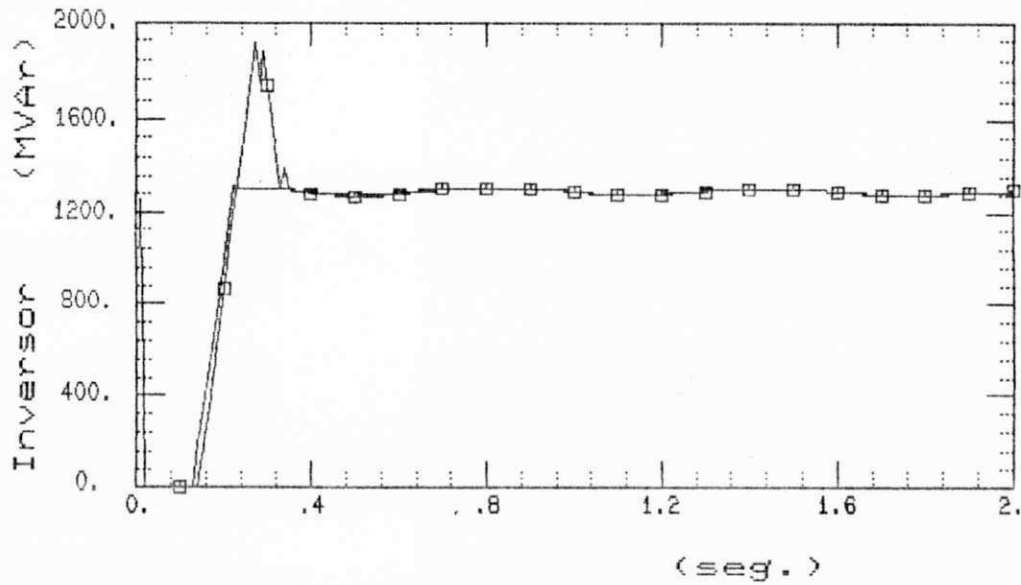


Figura 5.26 - Característica da potência reativa (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

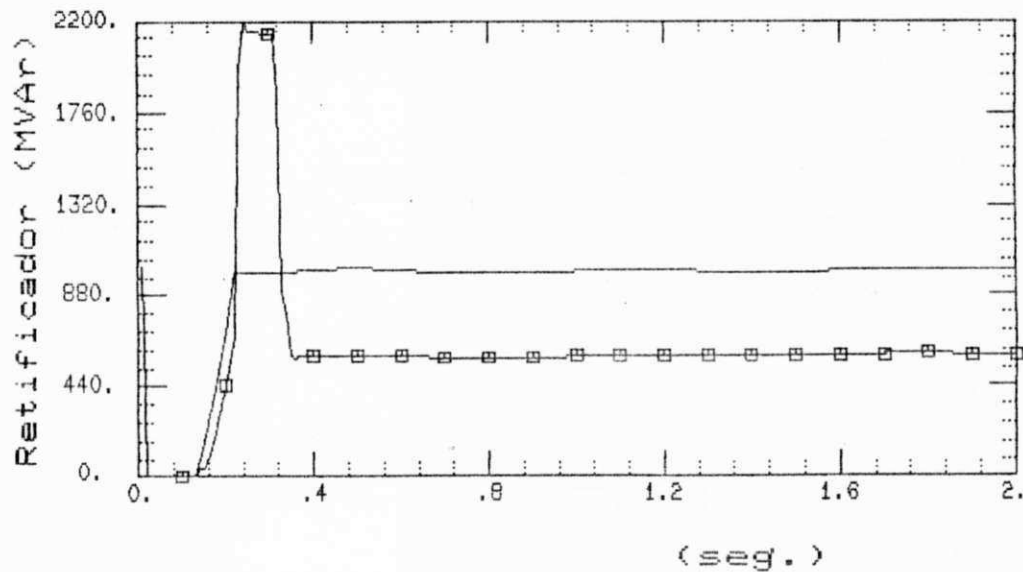


Figura 5.27 - Característica da potência reativa (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

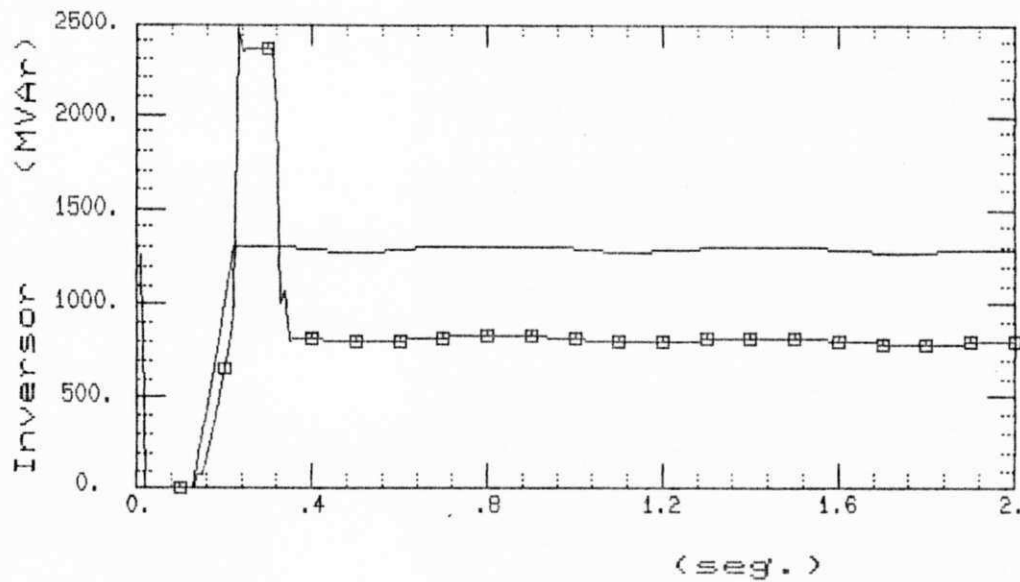


Figura 5.28 - Característica da potência reativa (inversor)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

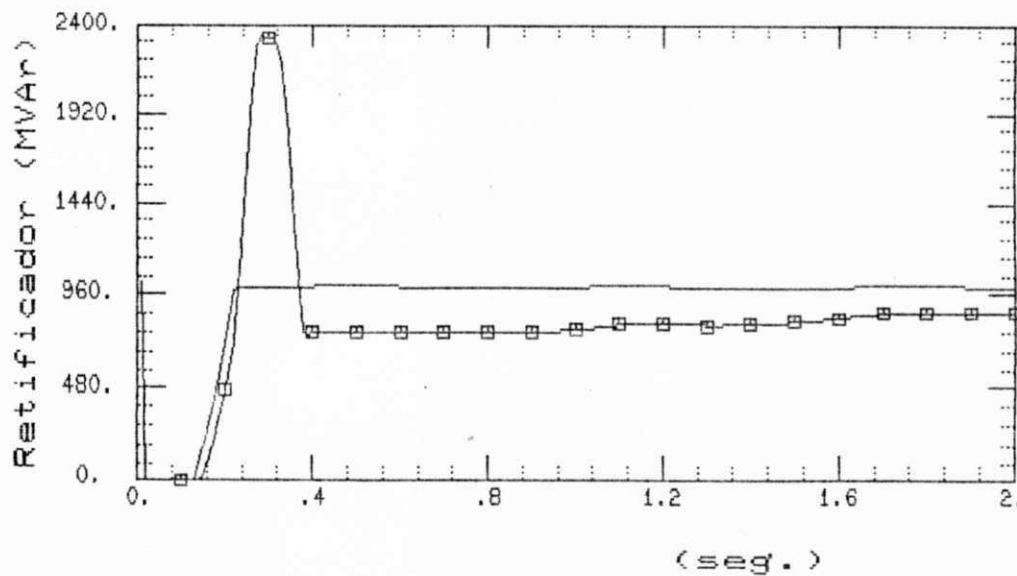


Figura 5.29 - Característica da potência reativa (retificador)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)

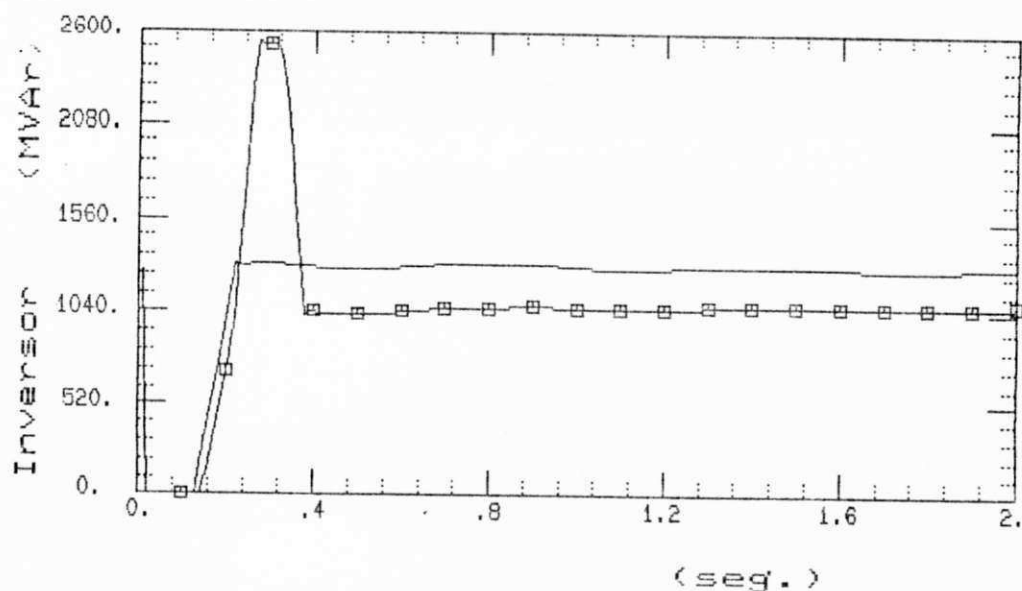


Figura 5.30 - Característica da potência reativa (inversor)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)

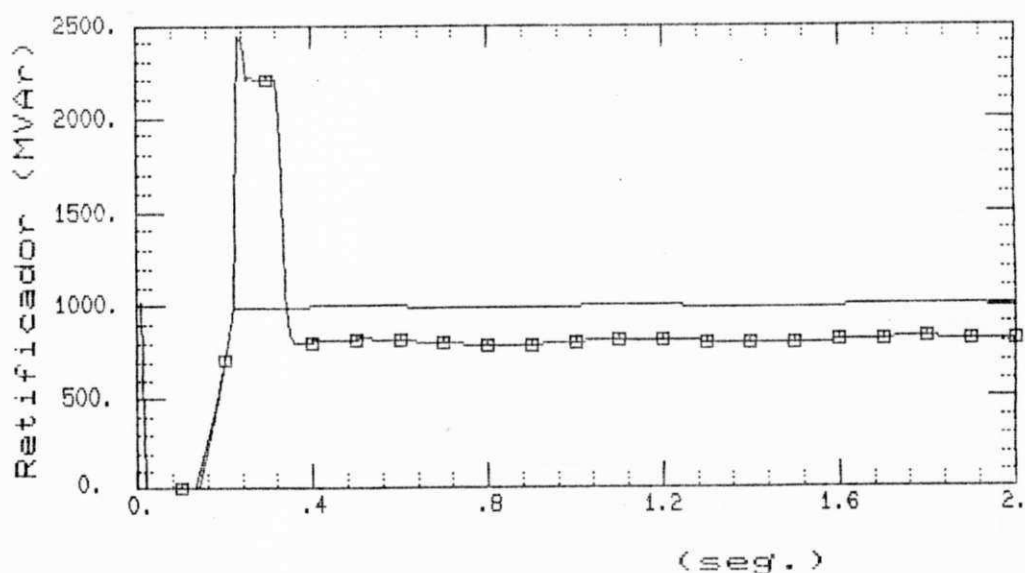


Figura 5.31 - Característica da potência reativa (retificador)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

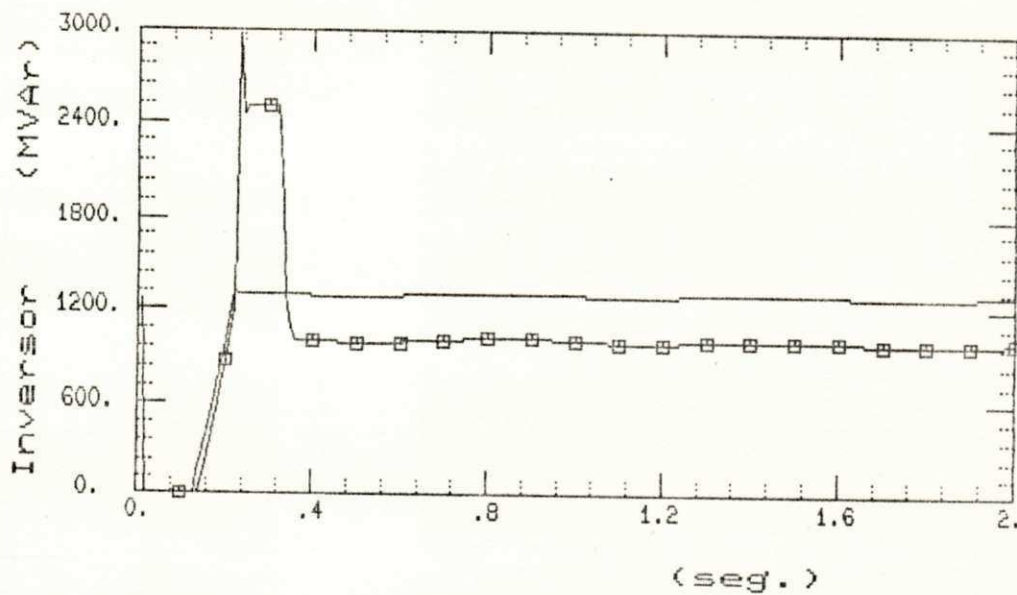


Figura 5.32 - Característica da potência reativa (inversor)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

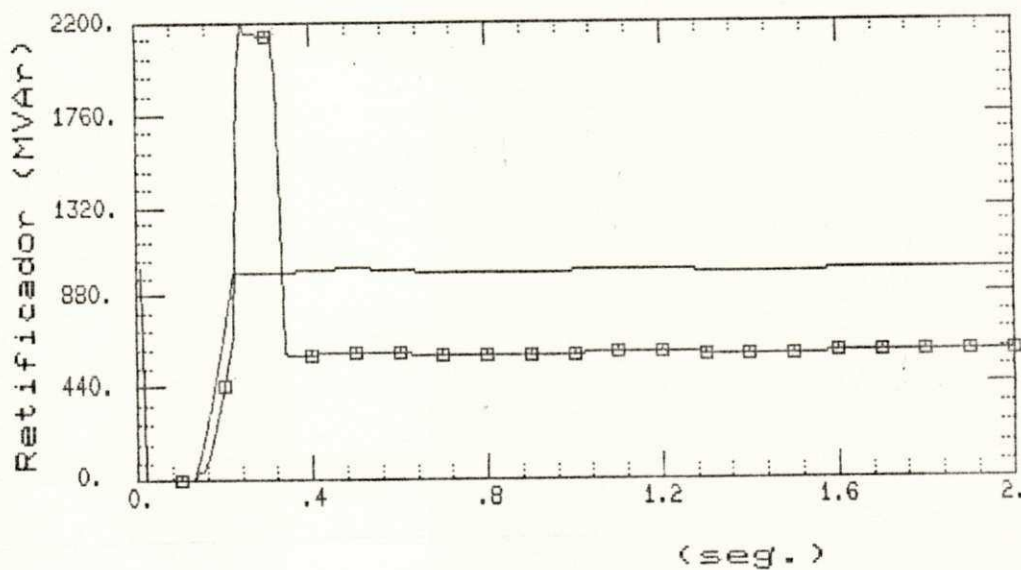


Figura 5.33 - Característica da potência reativa (retificador)
 com modulação em corrente.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

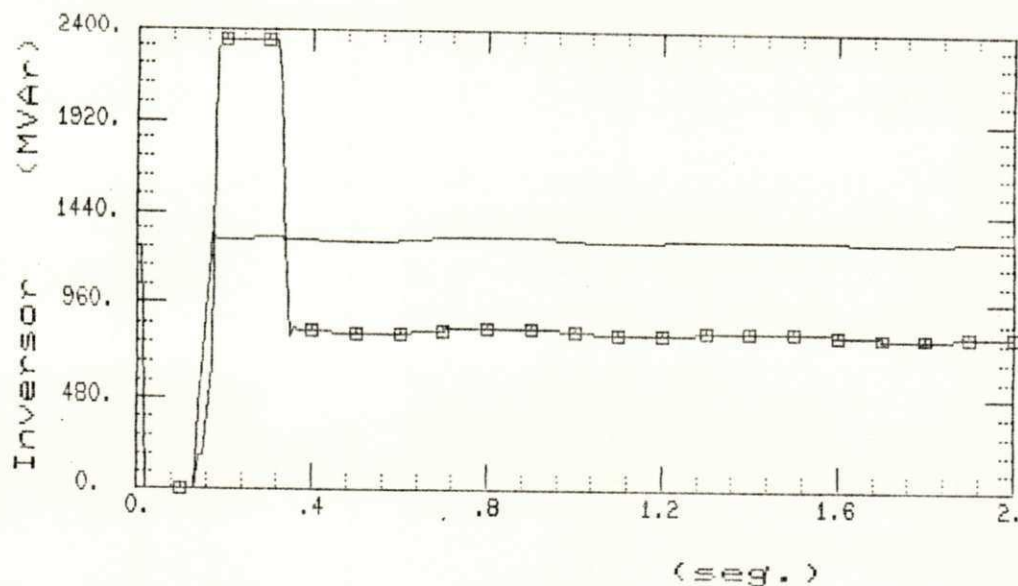


Figura 5.34 - Característica da potência reativa (inversor) com modulação em corrente.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

$T_4=0.020$ (MC) e (MT)

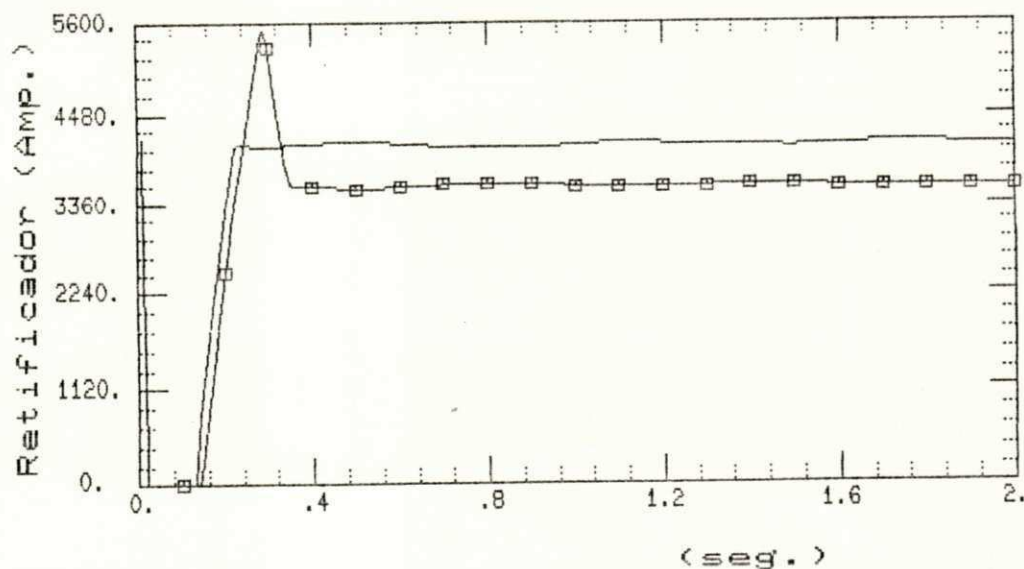


Figura 5.35 - Característica da corrente contínua no elo com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.3

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

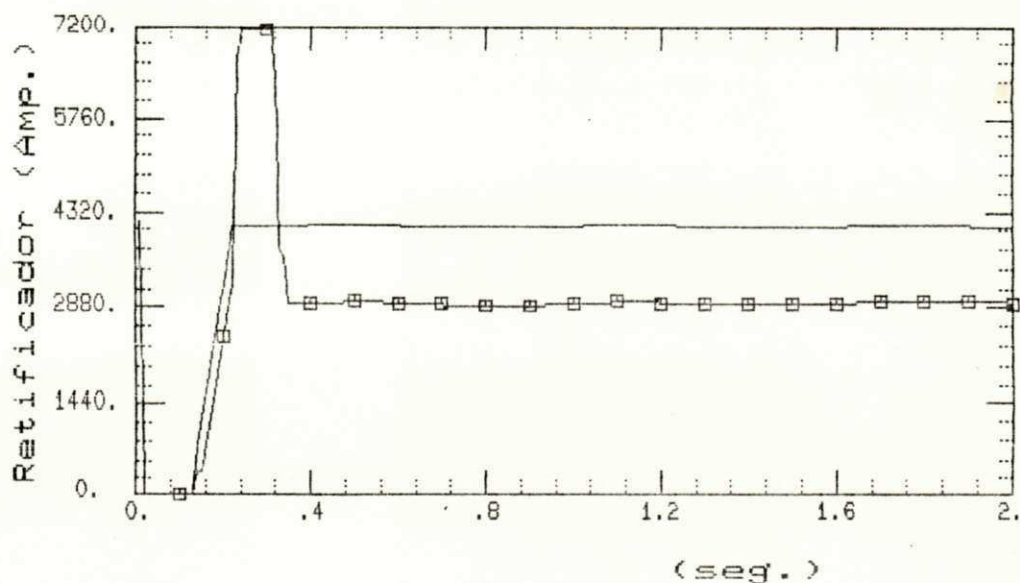


Figura 5.36 - Característica da corrente contínua no elo com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.4

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

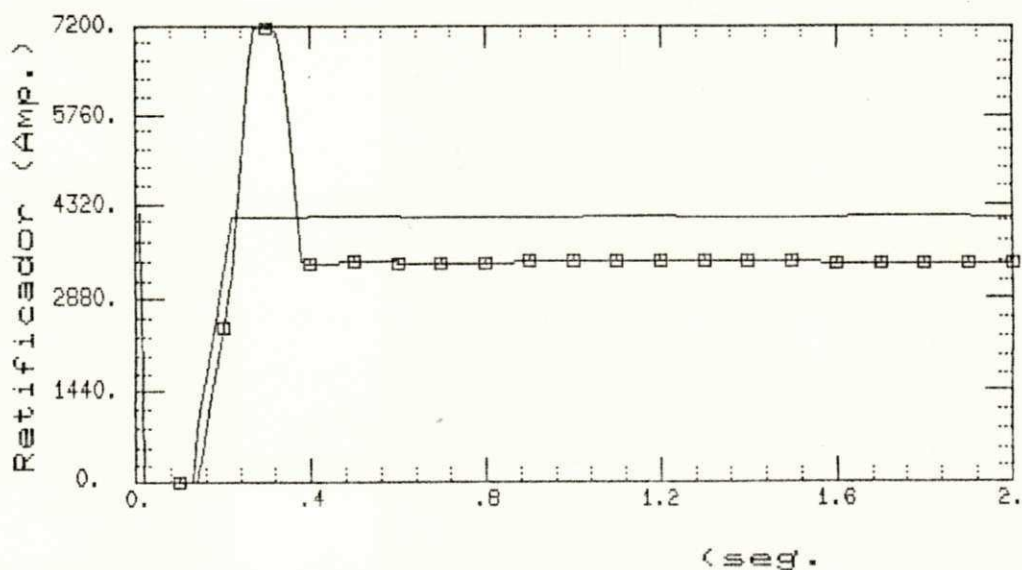


Figura 5.37 - Característica da corrente contínua no elo com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.5

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

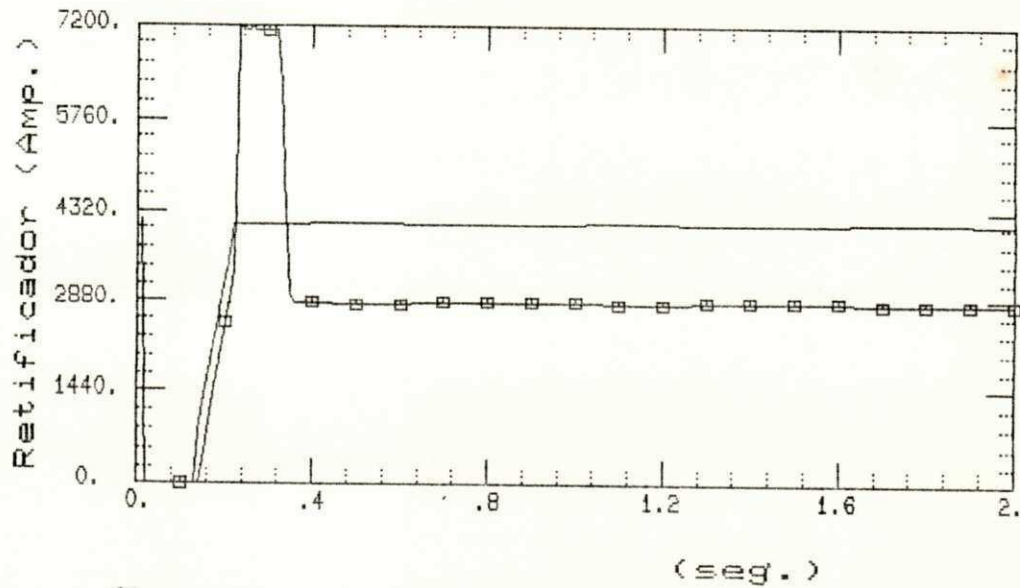


Figura 5.38 - Característica da corrente contínua no elo com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

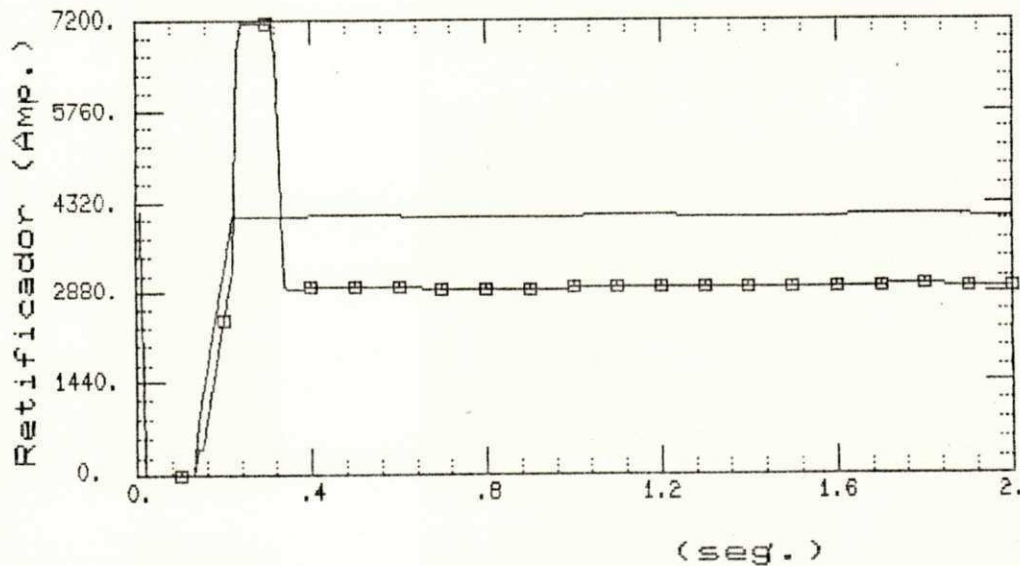


Figura 5.39 - Característica da corrente contínua no elo com modulação em corrente.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

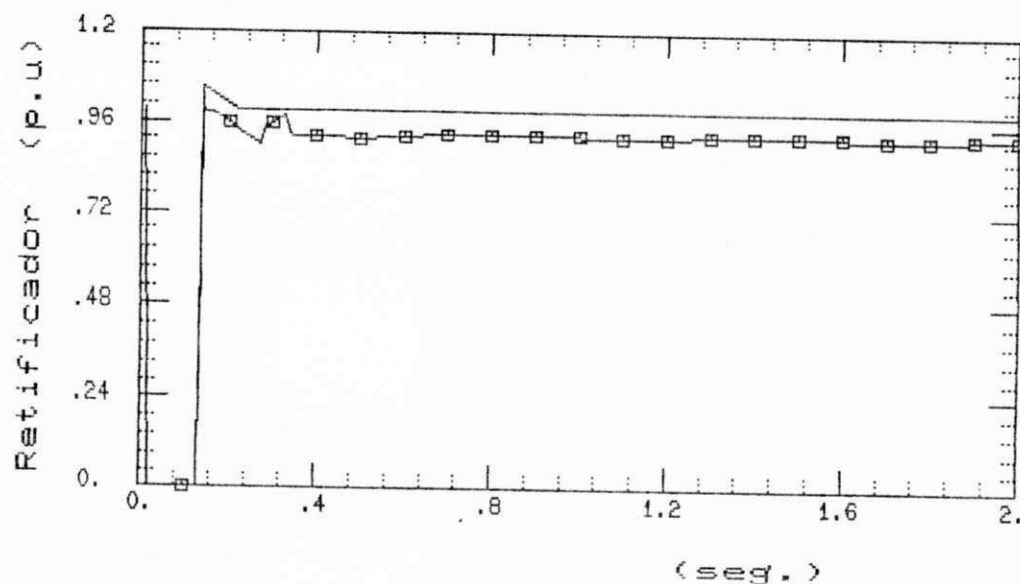


Figura 5.40 - Característica da tensão contínua (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

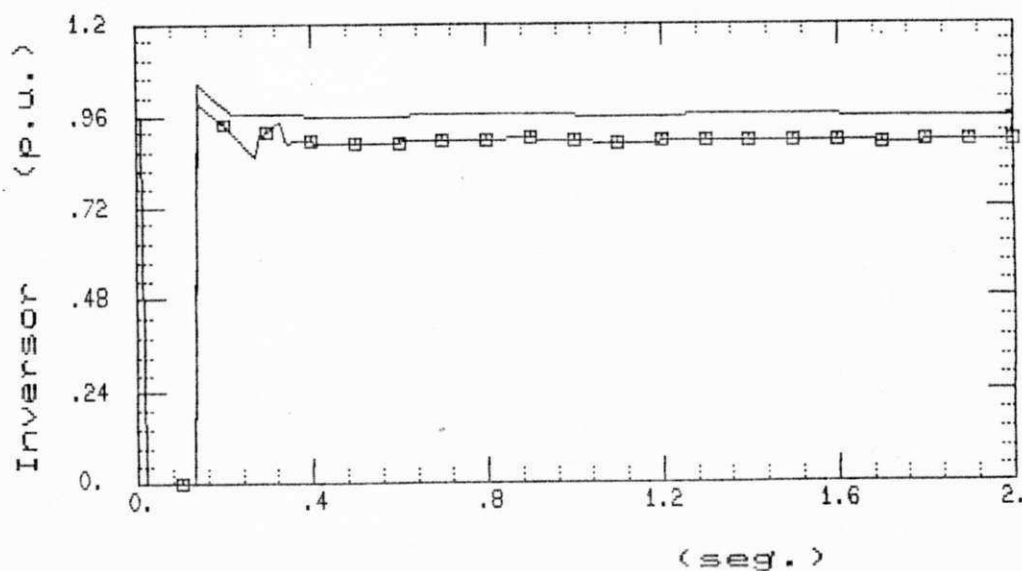


Figura 5.41 - Característica da tensão contínua (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

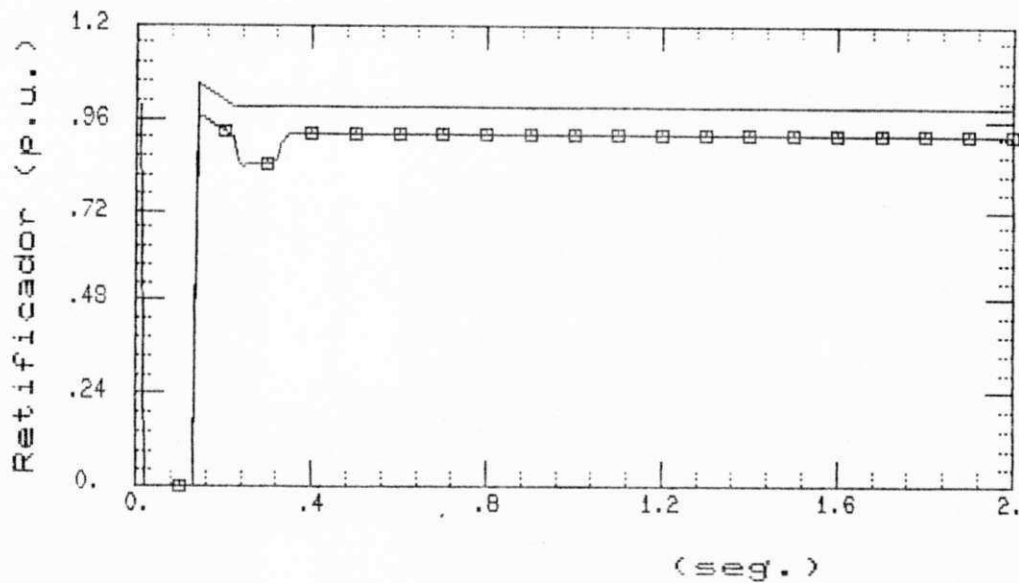


Figura 5.42 - Característica da tensão contínua (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

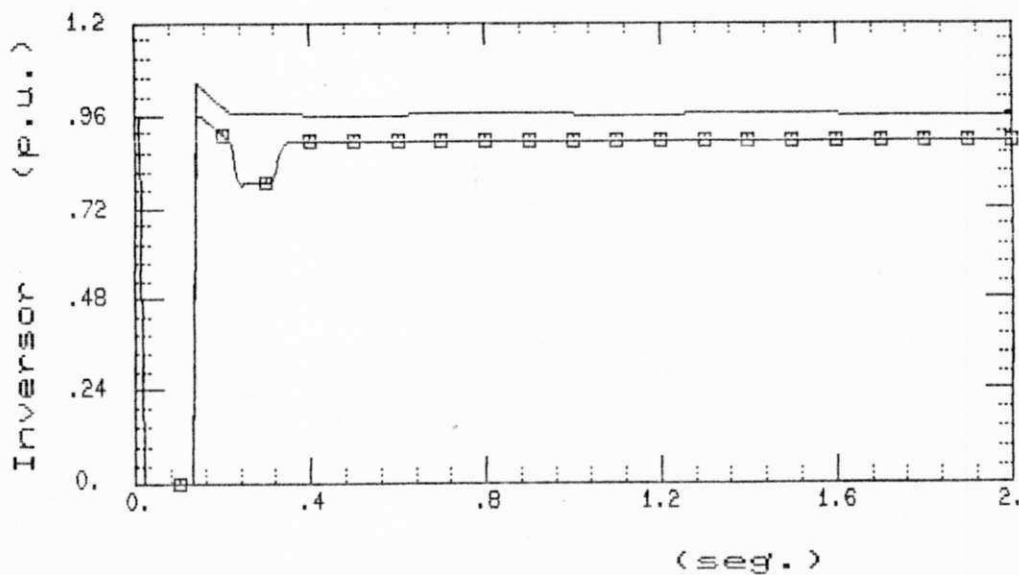


Figura 5.43 - Característica da tensão contínua (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

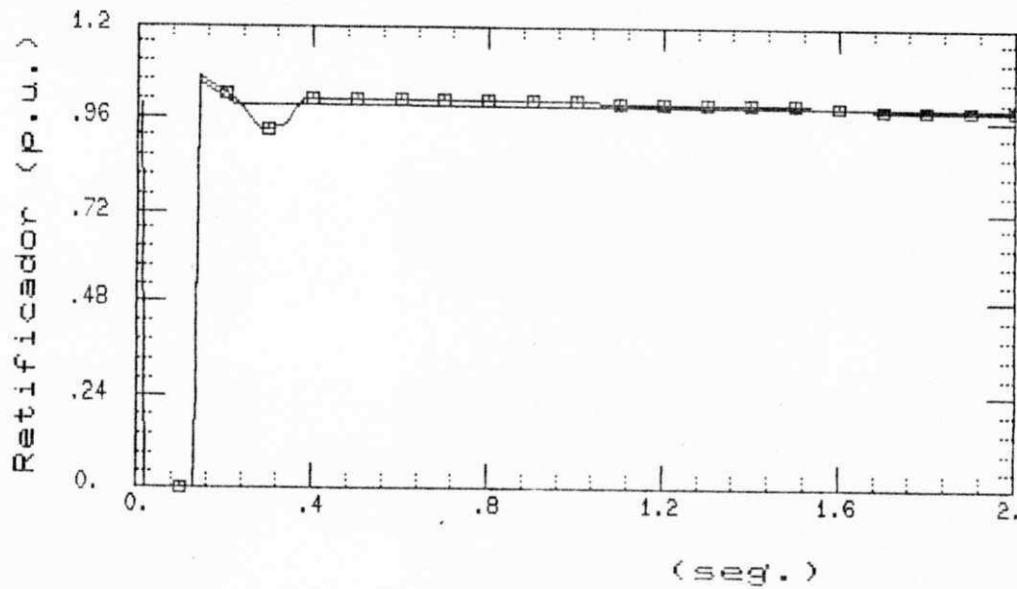


Figura 5.44 - Característica da tensão contínua (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)
 $T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)
 $T3=0.032$ (MC) e (MT)

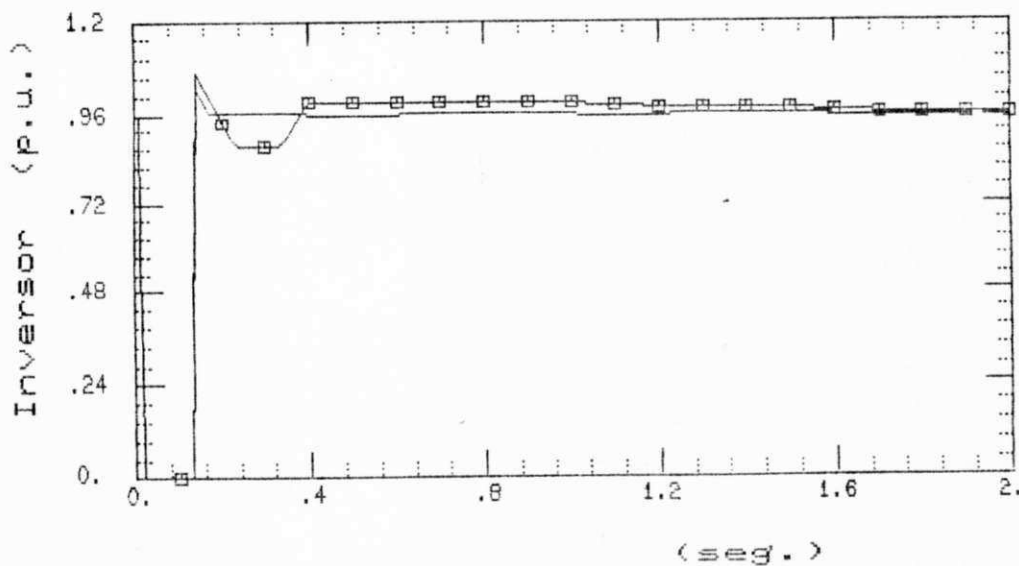


Figura 5.45 - Característica da tensão contínua (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)
 $T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)
 $T3=0.032$ (MC) e (MT)

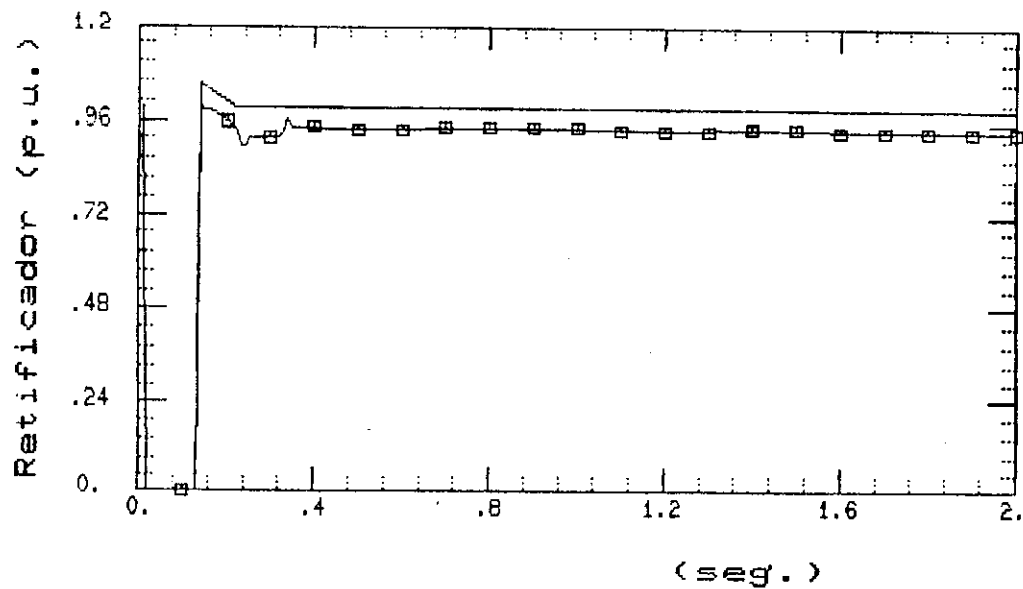


Figura 5.46 - Característica da tensão contínua (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

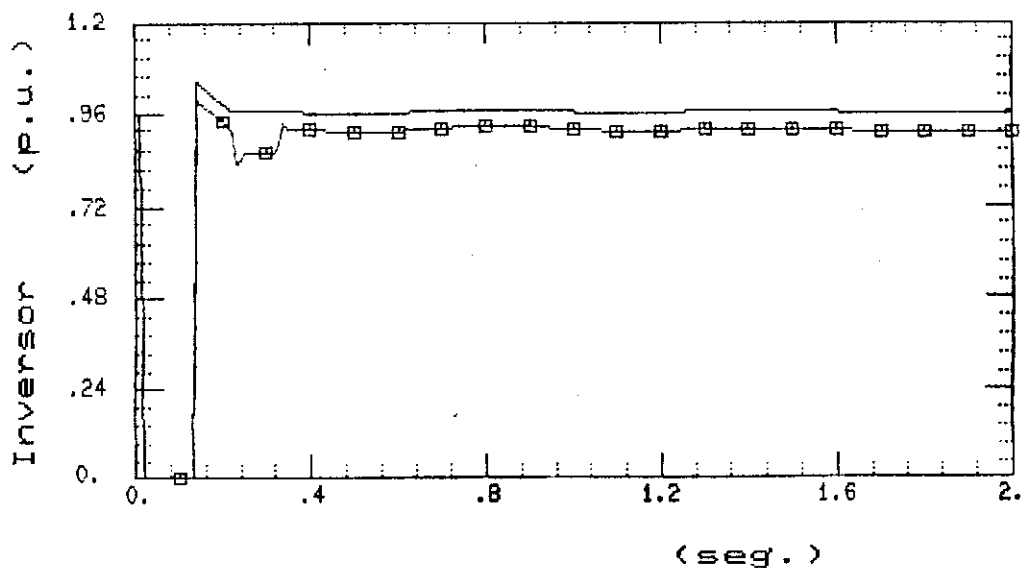


Figura 5.47 - Característica da tensão contínua (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

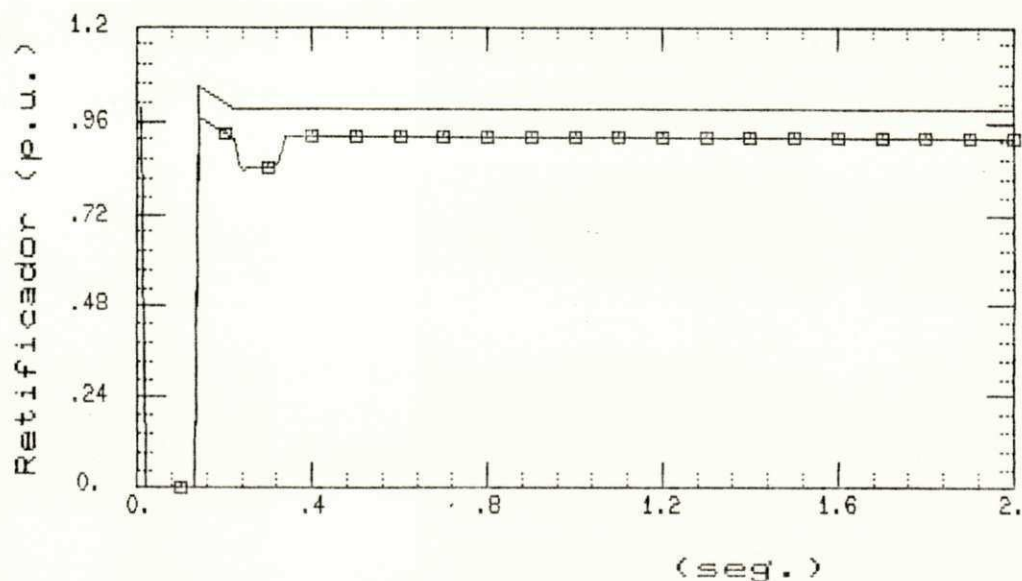


Figura 5.48 - Característica da tensão contínua (retificador) com modulação em corrente.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

$T_4=0.020$ (MC) e (MT)

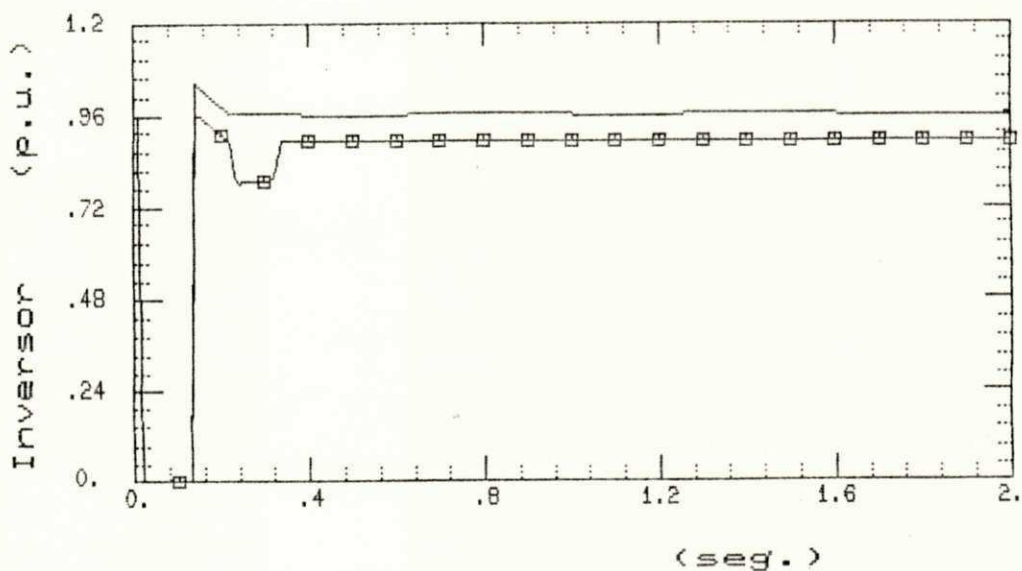


Figura 5.49 - Característica da tensão contínua (inversor) com modulação combinada em corrente.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

$T_4=0.020$ (MC) e (MT)

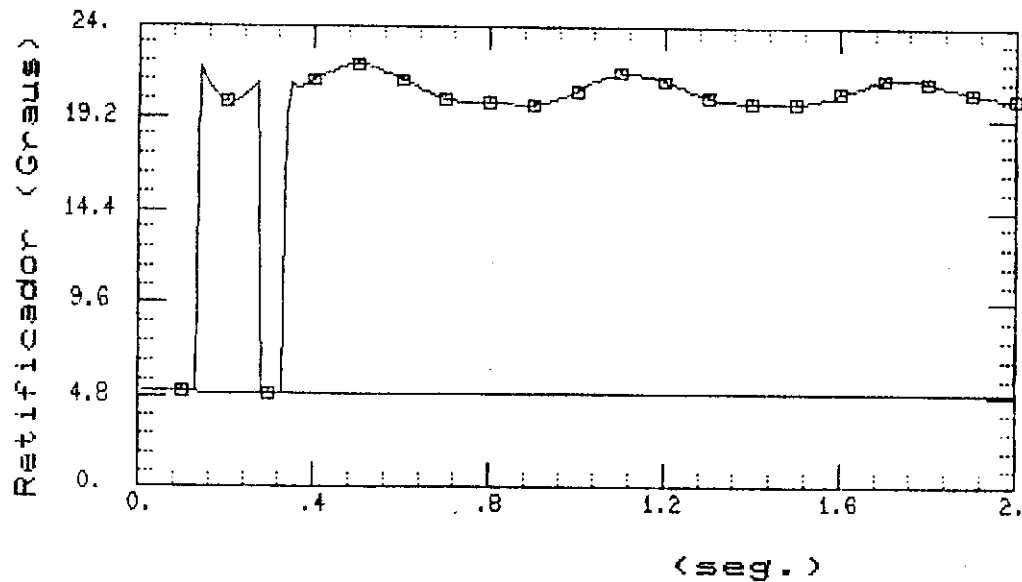


Figura 5.50 - Característica do ângulo de ignição com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

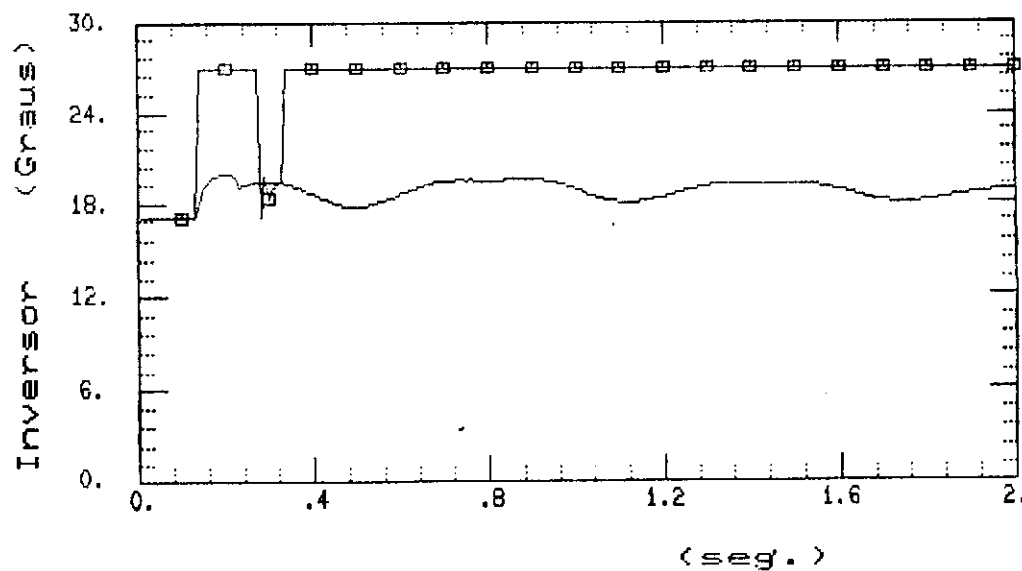


Figura 5.51 - Característica do ângulo de extinção com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

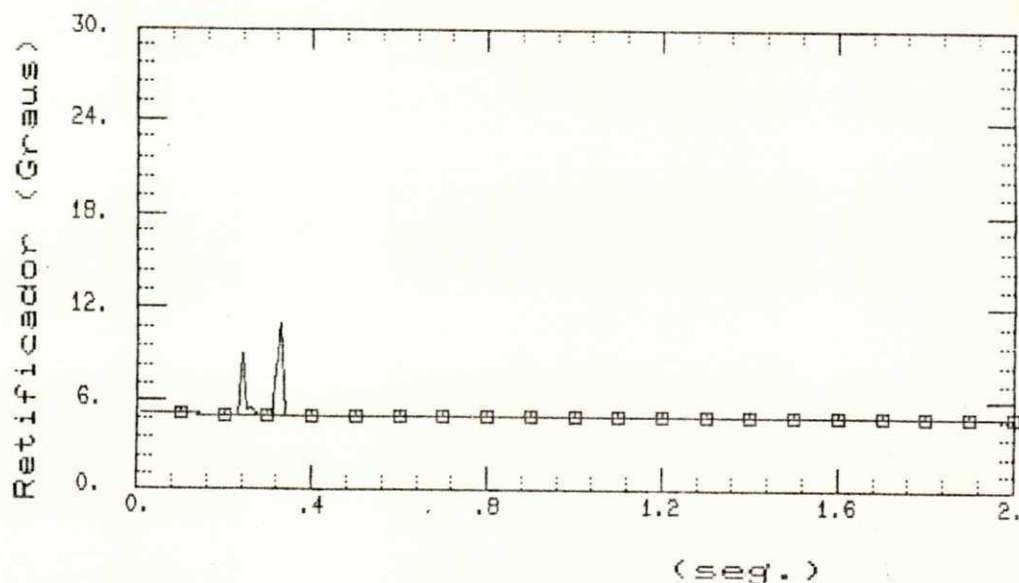


Figura 5.52 - Característica do ângulo de ignição com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.4

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

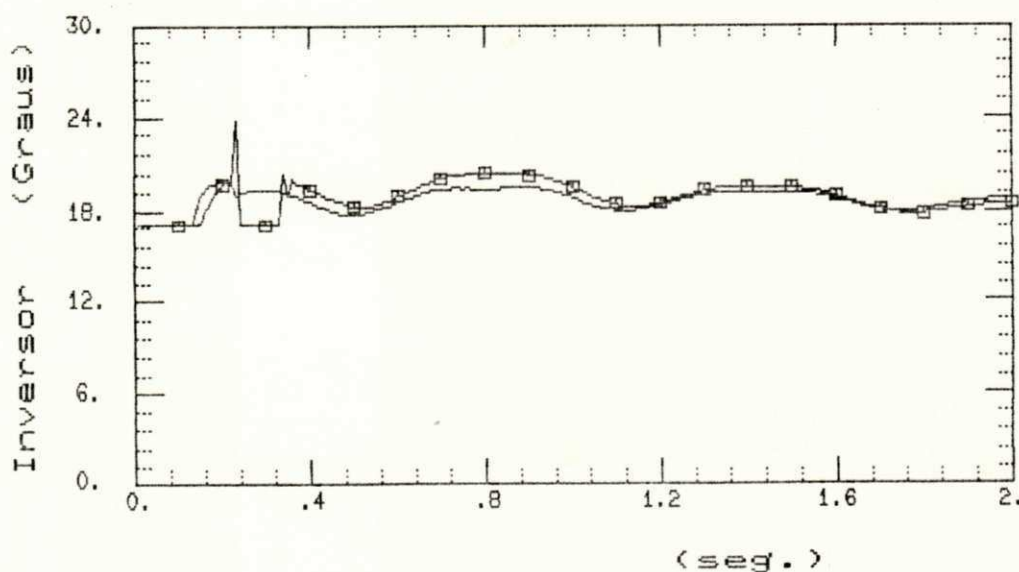


Figura 5.53 - Característica do ângulo de extinção com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.4

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

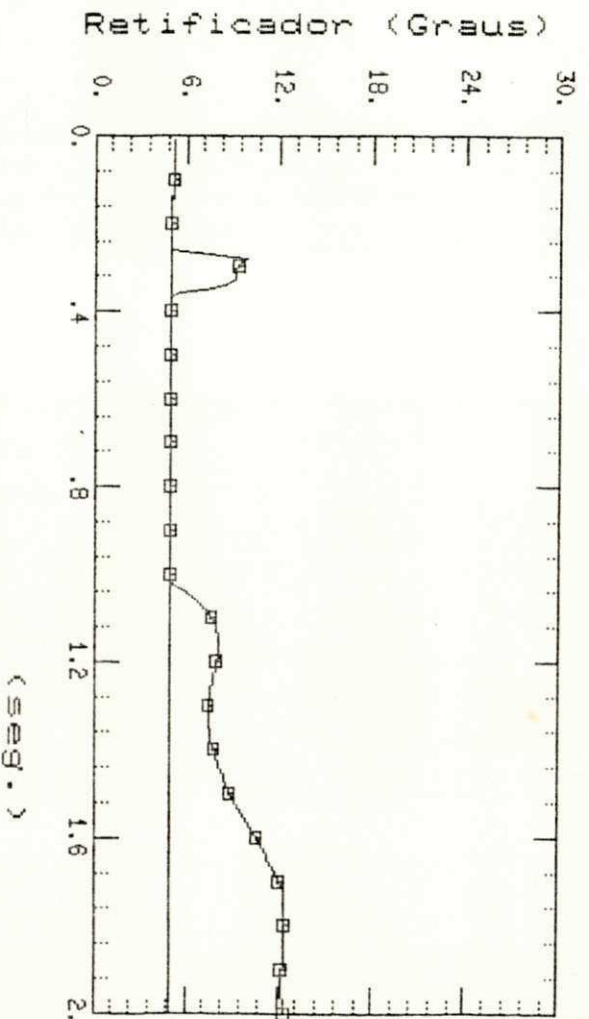


Figura 5.54 - Característica do ângulo de ignição com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: KFT=400 (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: T1=0.113 (MC) e T1=0.158 (MT)
 T2=0.053 (MC) e T2=0.045 (MT)
 T3=0.032 (MC) e (MT)

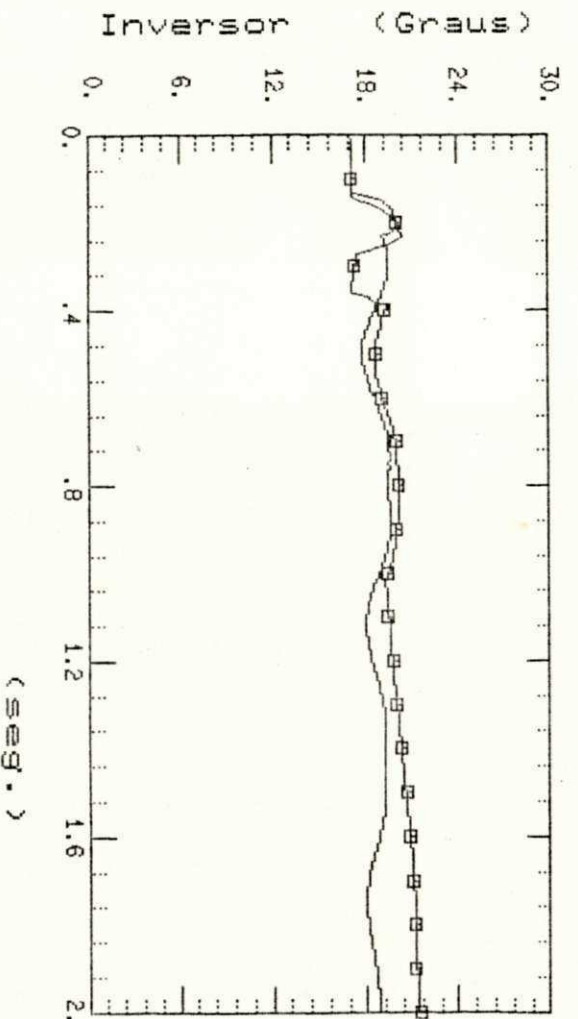


Figura 5.55 - Característica do ângulo de extinção com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: KFT=400 (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: T1=0.113 (MC) e T1=0.158 (MT)
 T2=0.053 (MC) e T2=0.045 (MT)
 T3=0.032 (MC) e (MT)

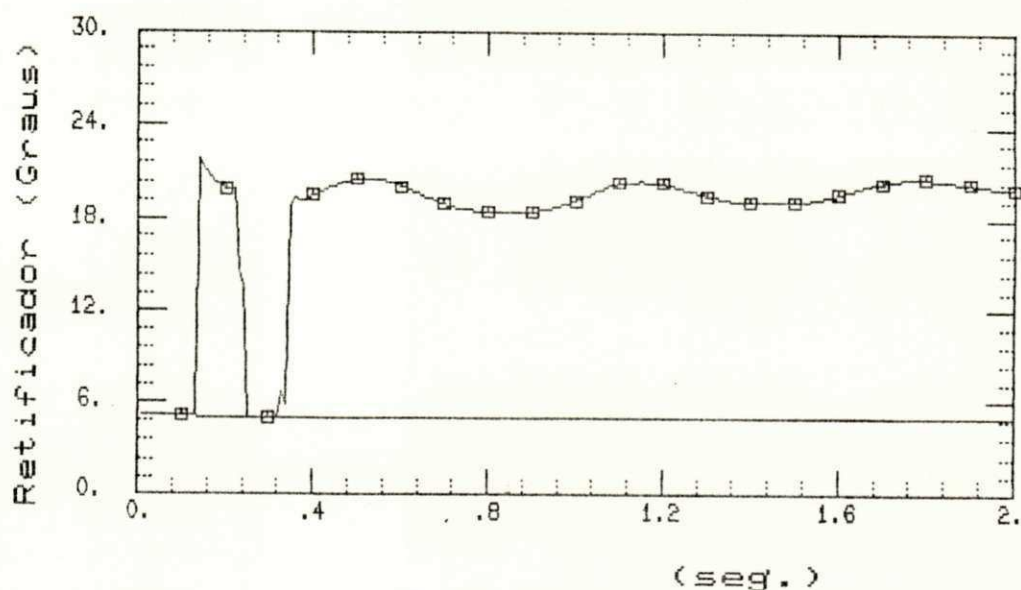


Figura 5.56 - Característica do ângulo de ignição com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)

$T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

$T3=0.032$ (MC) e (MT)

$T4=0.020$ (MC) e (MT)

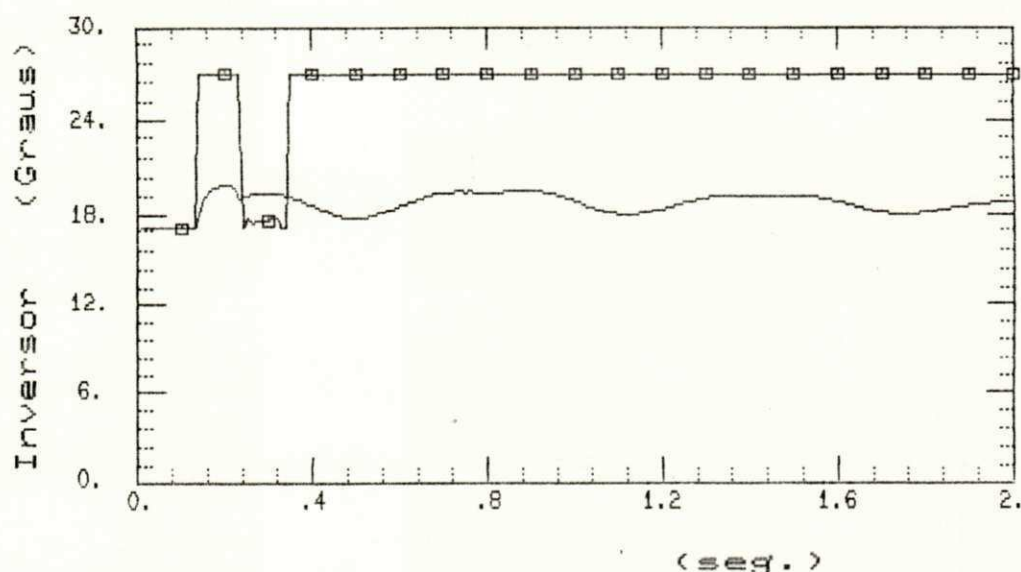


Figura 5.57 - Característica do ângulo de extinção com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)

$T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

$T3=0.032$ (MC) e (MT)

$T4=0.020$ (MC) e (MT)

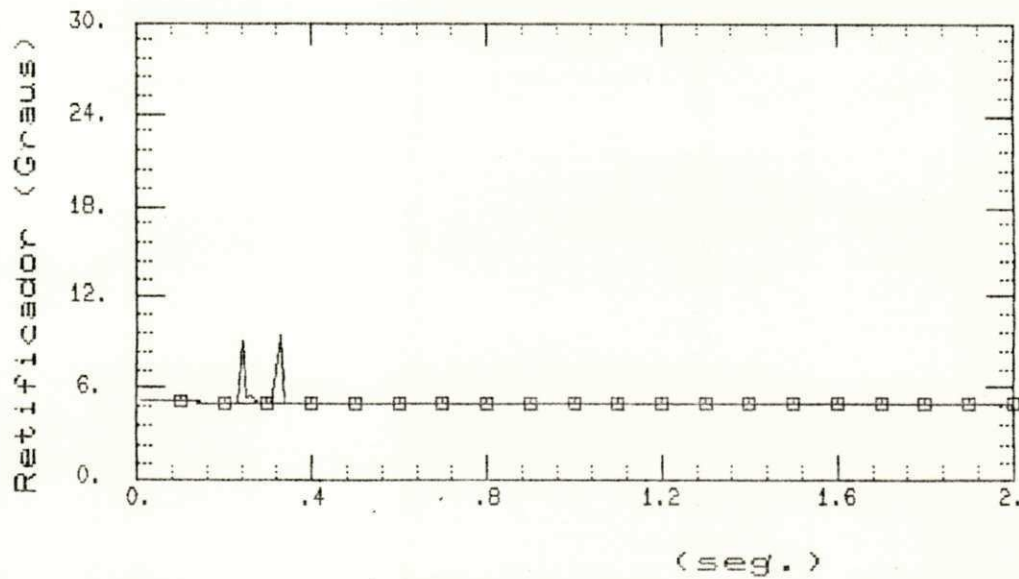


Figura 5.58 - Característica do ângulo de ignição com modulação em corrente.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)

$T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

$T3=0.032$ (MC) e (MT)

$T4=0.020$ (MC) e (MT)

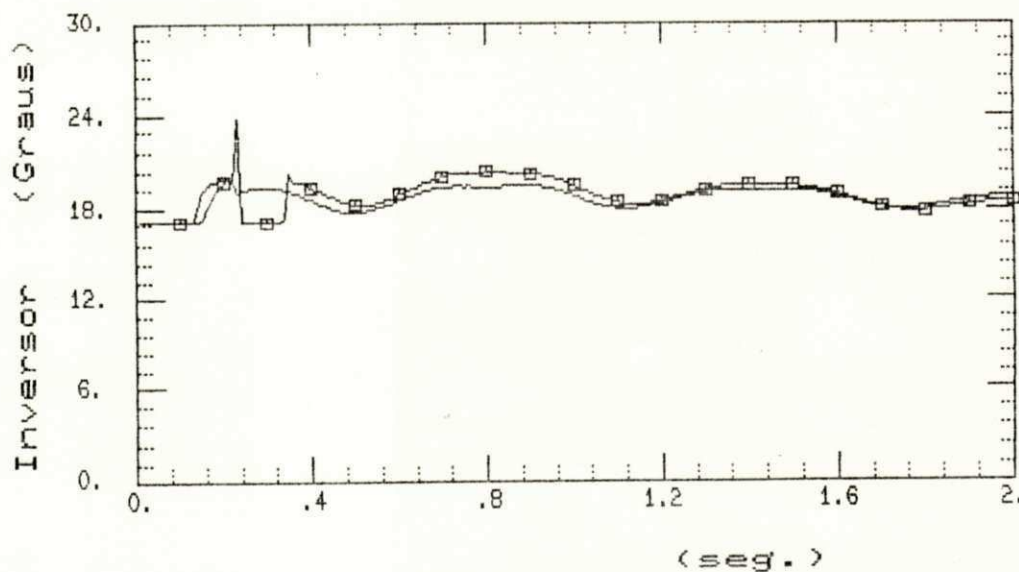


Figura 5.59 - Característica do ângulo de extinção com modulação em corrente.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)

$T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

$T3=0.032$ (MC) e (MT)

$T4=0.020$ (MC) e (MT)

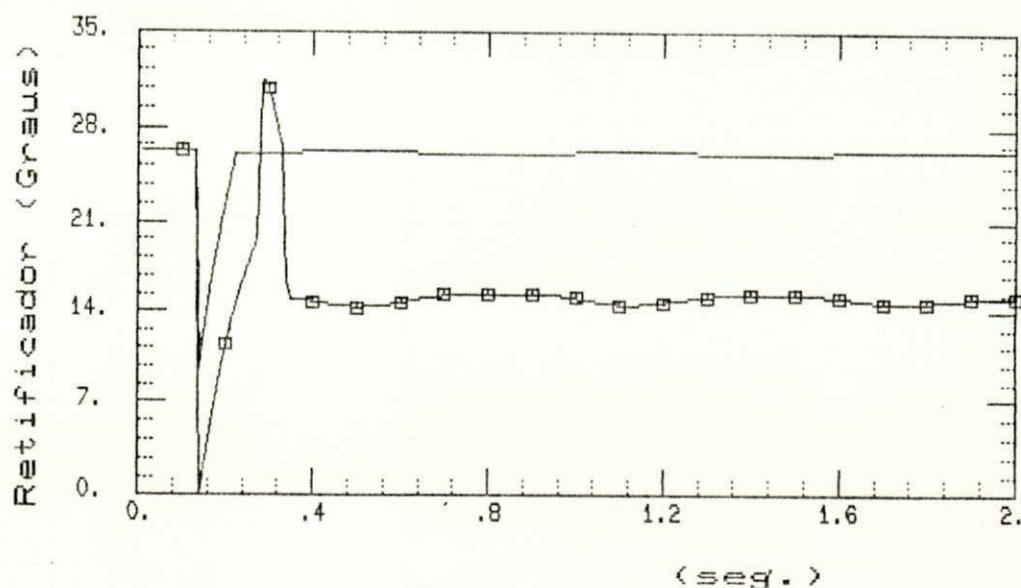


Figura 5.60 - Característica do ângulo de comutação (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

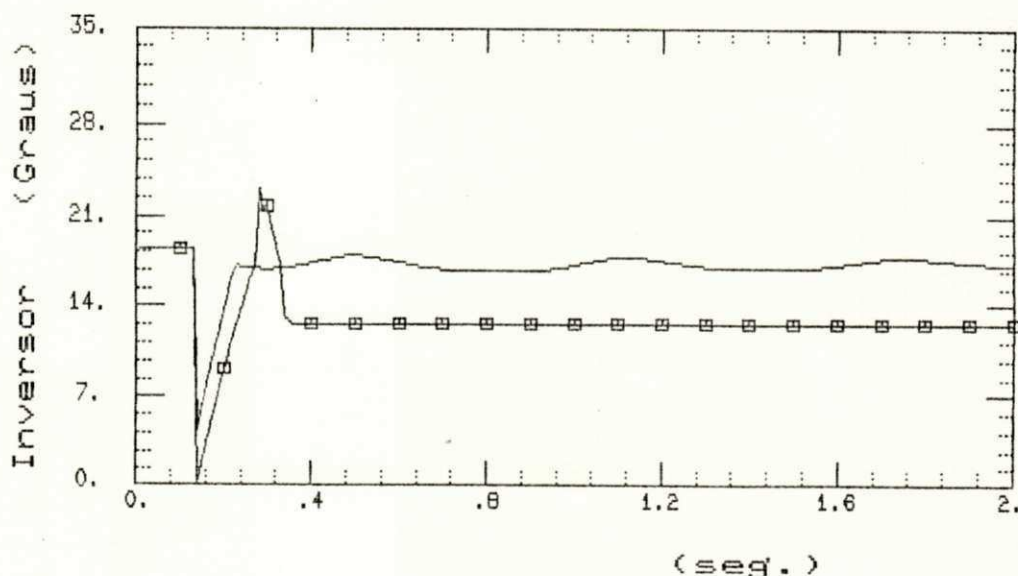


Figura 5.61 - Característica do ângulo de comutação (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

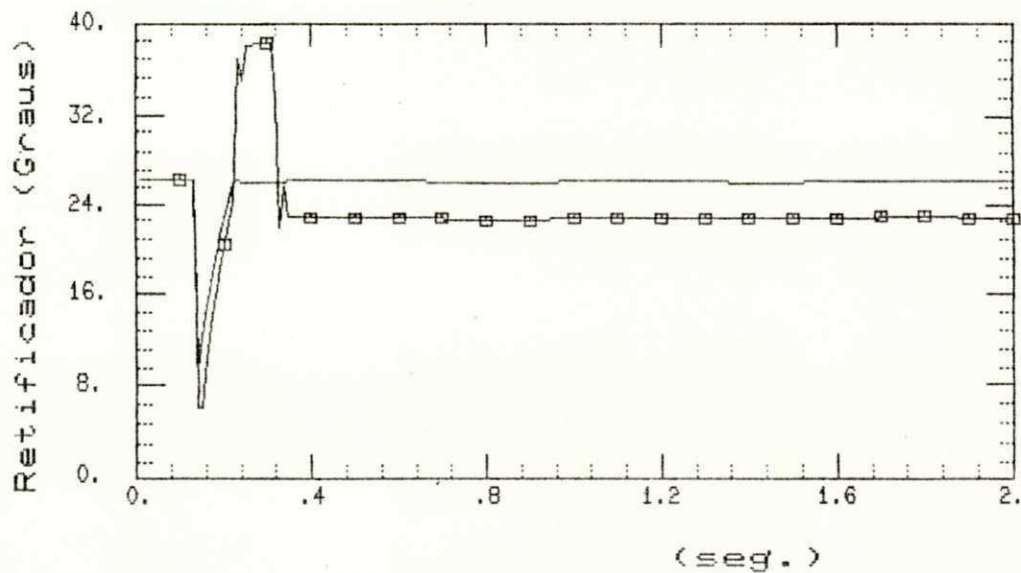


Figura 5.62 - Característica do ângulo de comutação (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

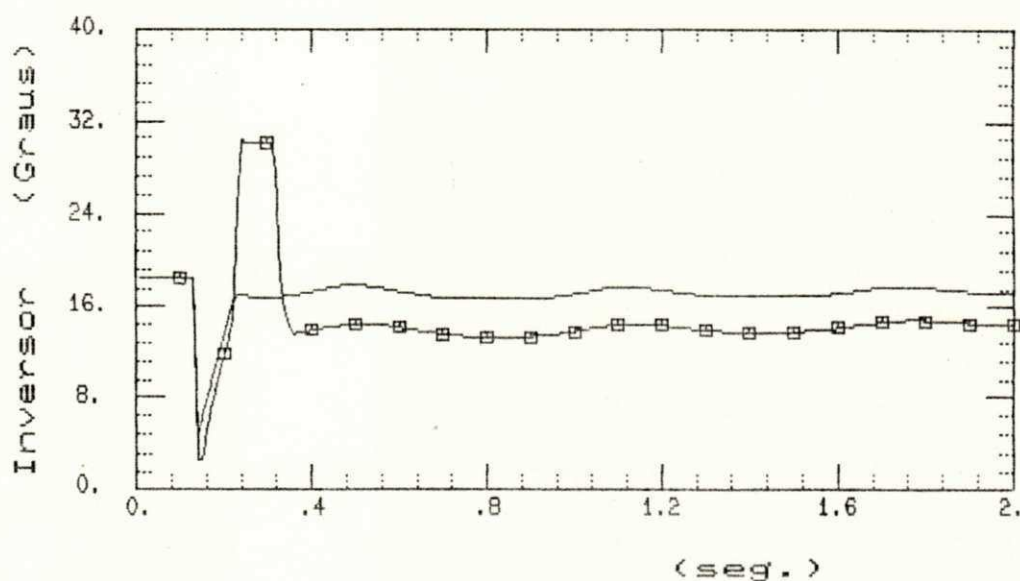


Figura 5.63 - Característica do ângulo de comutação (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

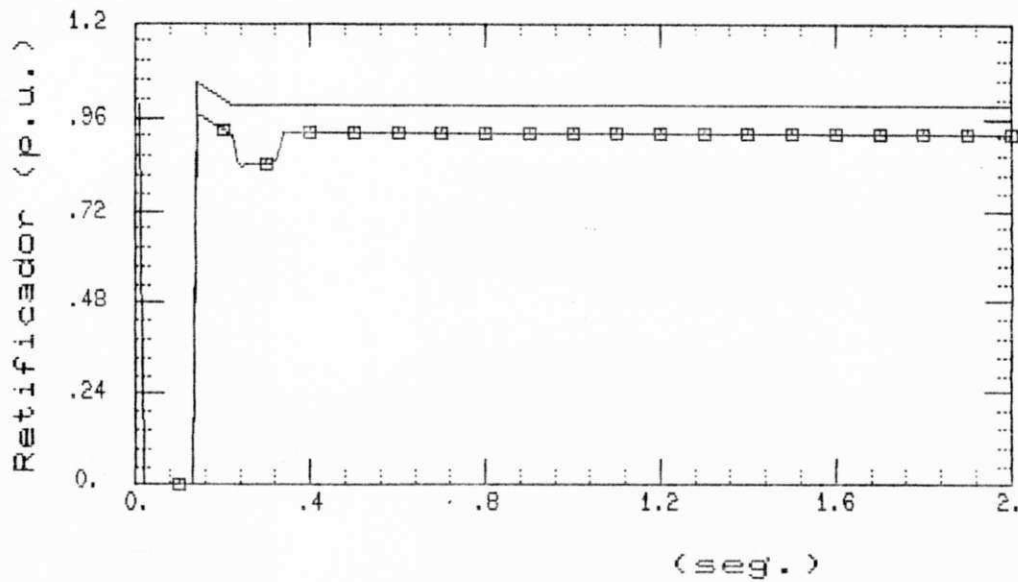


Figura 5.48 - Característica da tensão contínua (retificador) com modulação em corrente.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

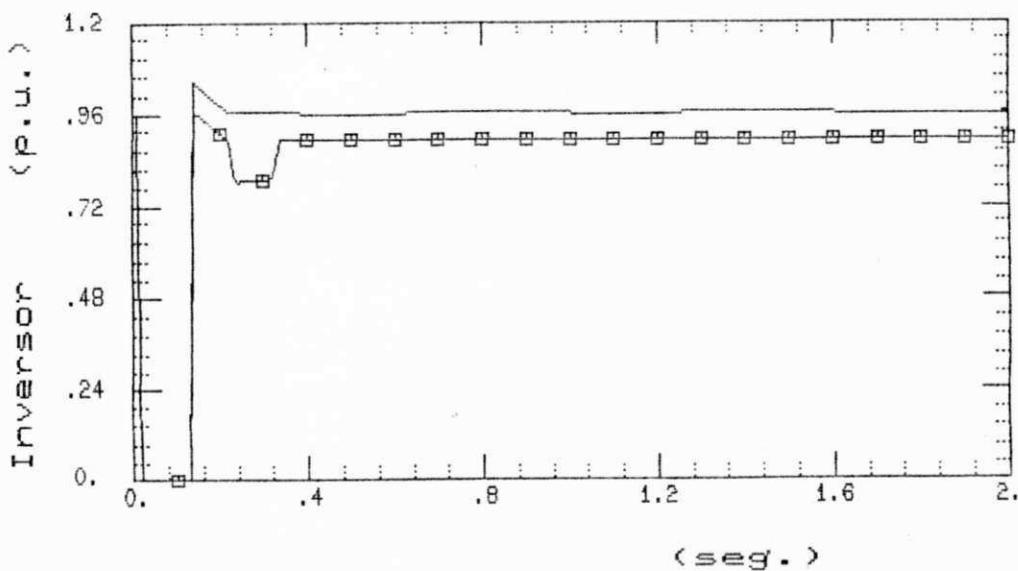


Figura 5.49 - Característica da tensão contínua (inversor) com modulação combinada em corrente.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

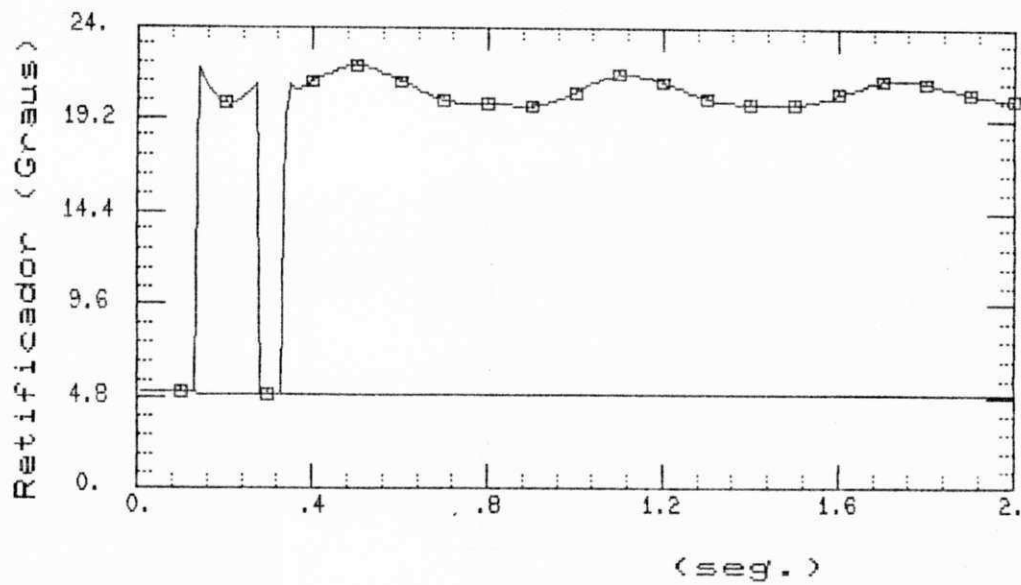


Figura 5.50 - Característica do ângulo de ignição com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

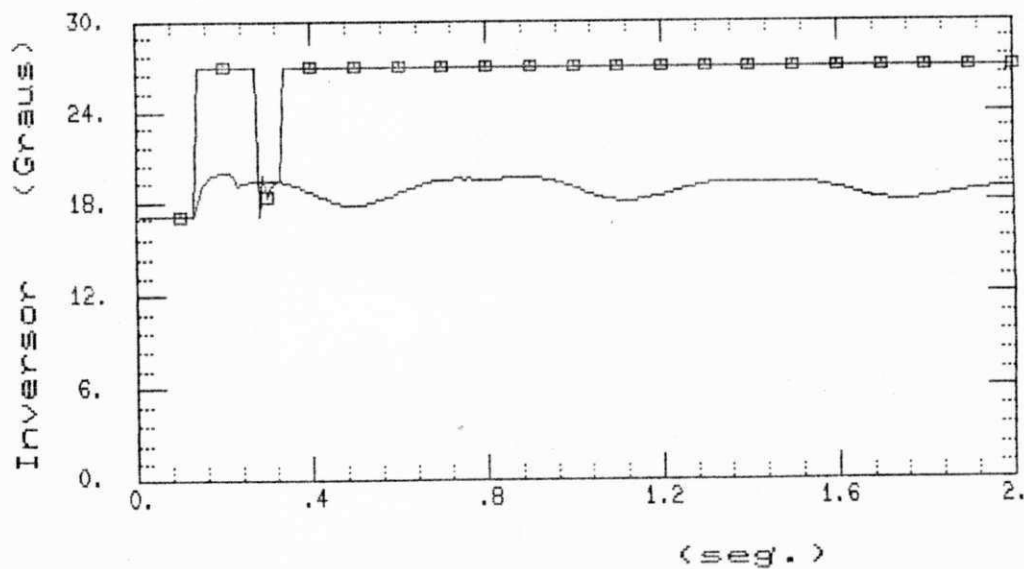


Figura 5.51 - Característica do ângulo de extinção com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

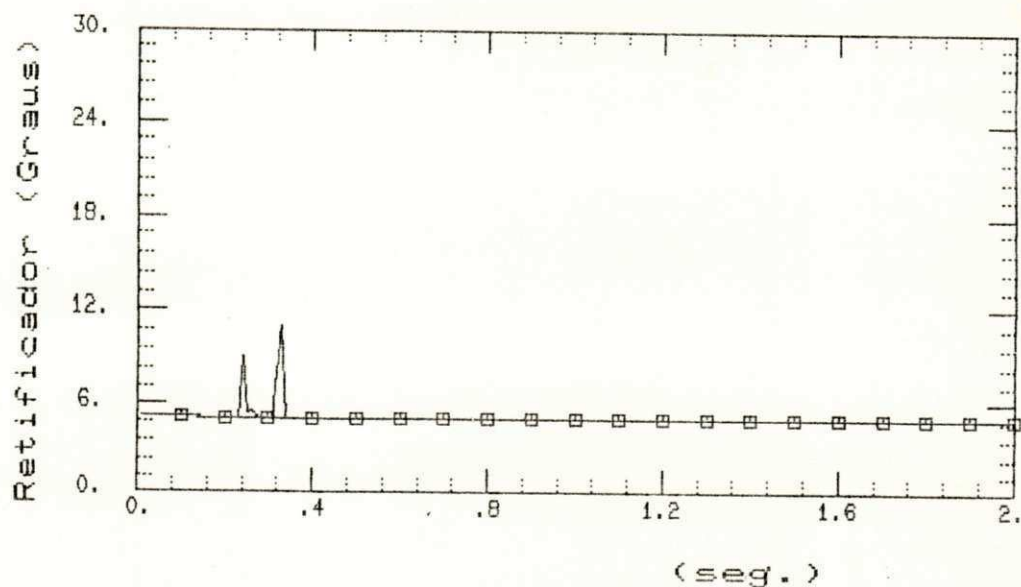


Figura 5.52 - Característica do ângulo de ignição com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)
 $T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

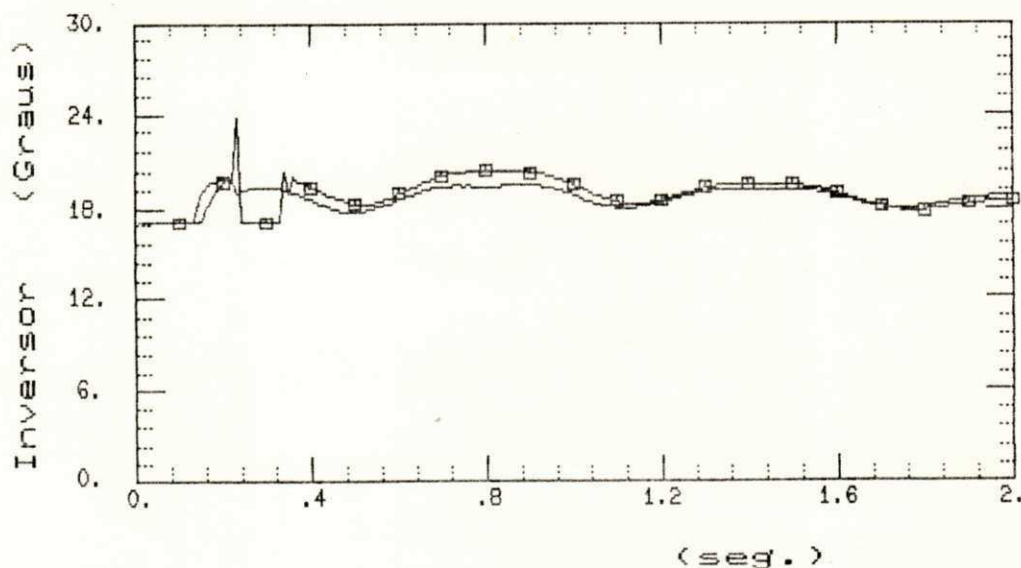


Figura 5.53 - Característica do ângulo de extinção com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)
 $T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

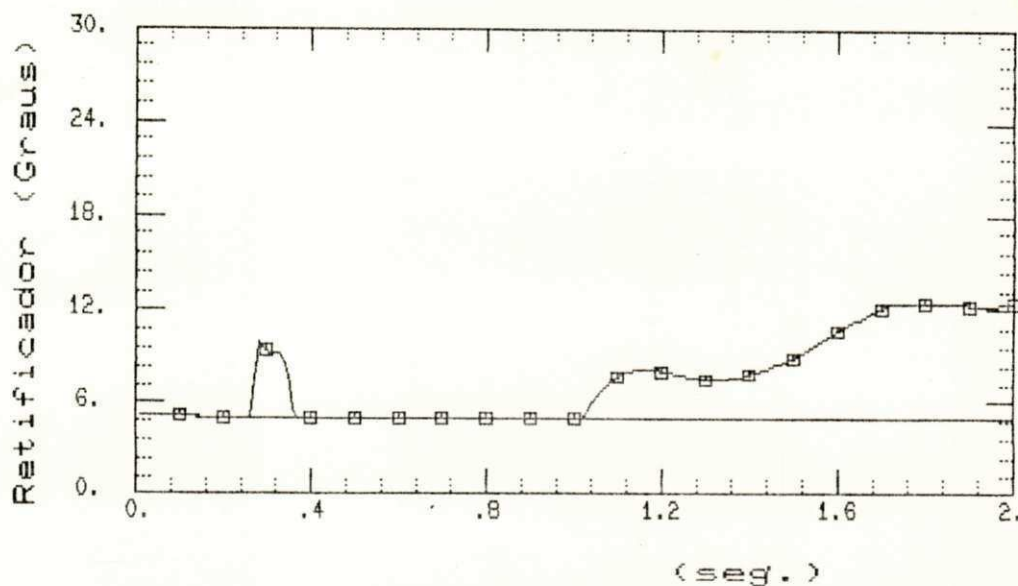


Figura 5.54 - Característica do ângulo de ignição com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.5

Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)

$T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

$T3=0.032$ (MC) e (MT)

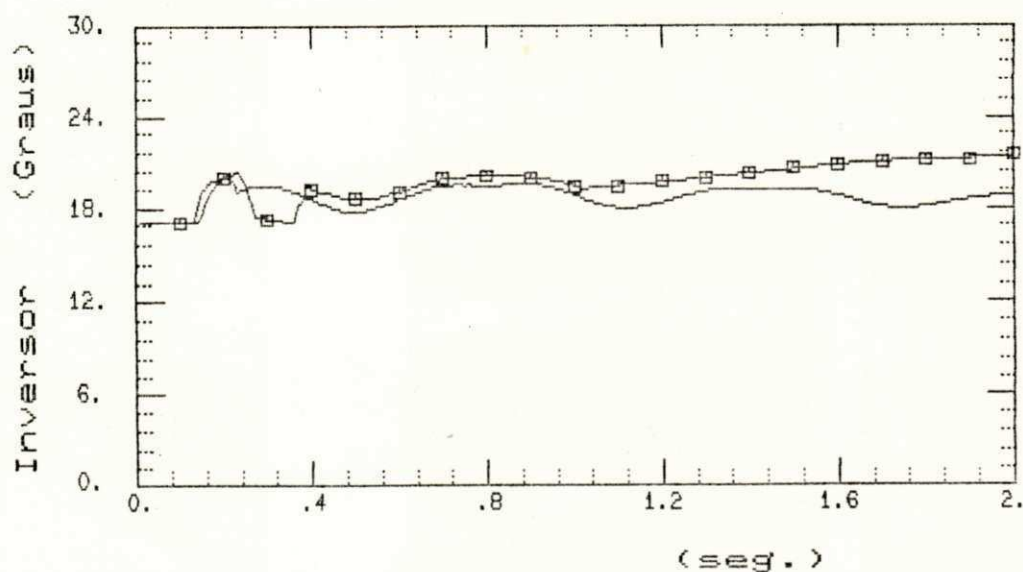


Figura 5.55 - Característica do ângulo de extinção com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.5

Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)

$T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

$T3=0.032$ (MC) e (MT)

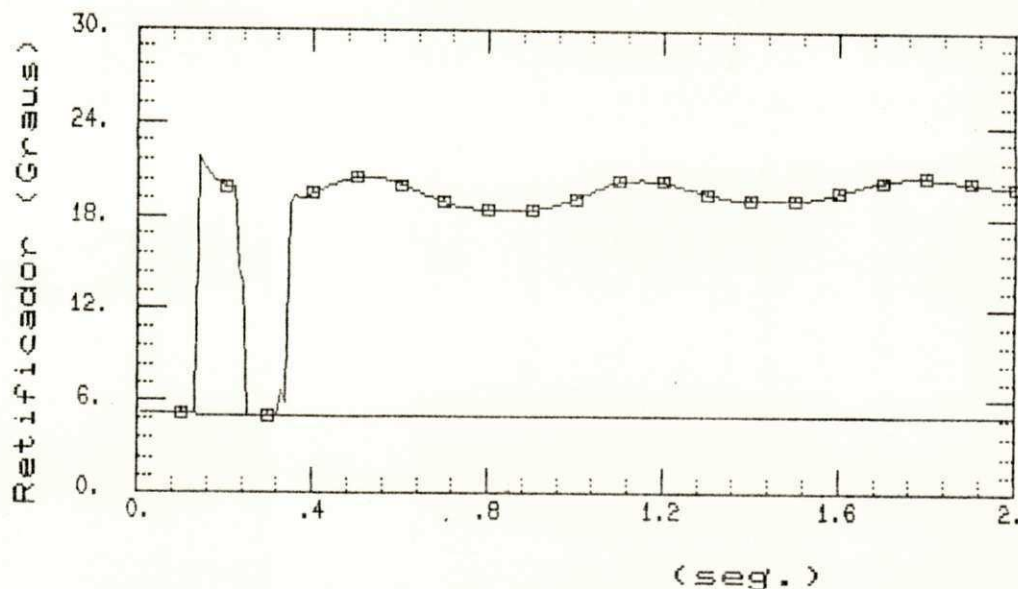


Figura 5.56 - Característica do ângulo de ignição com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)

$T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

$T3=0.032$ (MC) e (MT)

$T4=0.020$ (MC) e (MT)

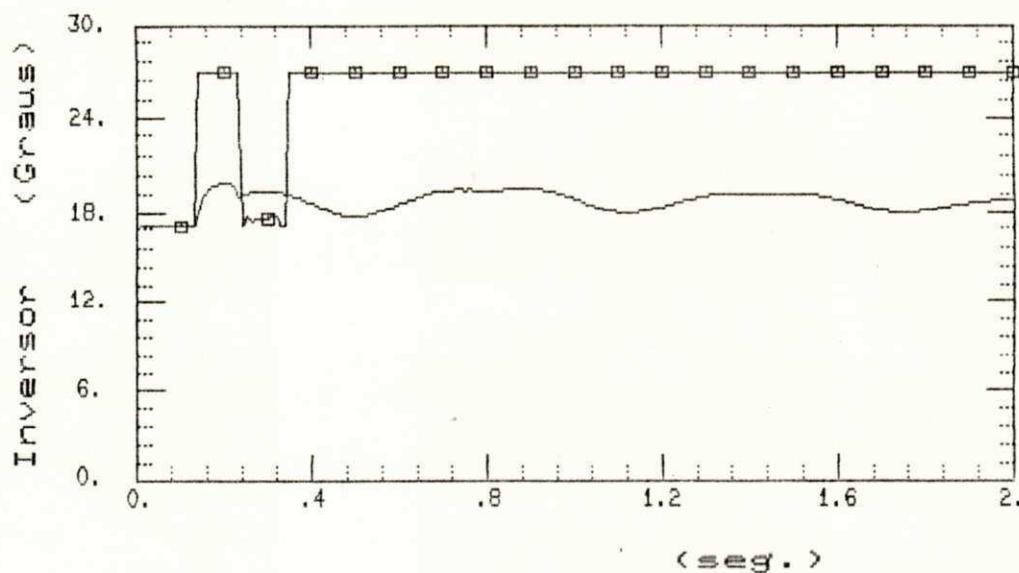


Figura 5.57 - Característica do ângulo de extinção com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)

$T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

$T3=0.032$ (MC) e (MT)

$T4=0.020$ (MC) e (MT)

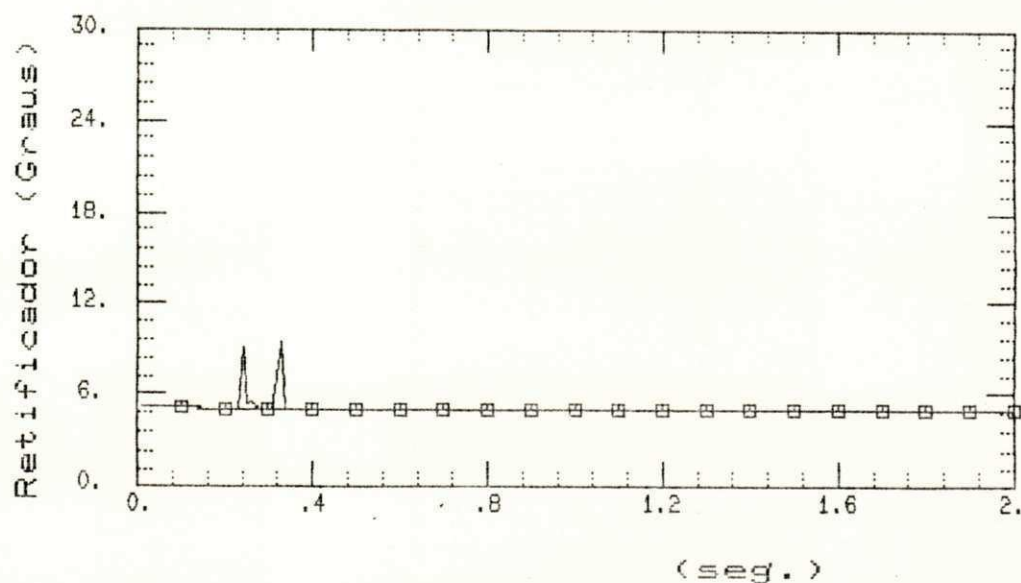


Figura 5.58 - Característica do ângulo de ignição com modulação em corrente.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)

$T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

$T3=0.032$ (MC) e (MT)

$T4=0.020$ (MC) e (MT)

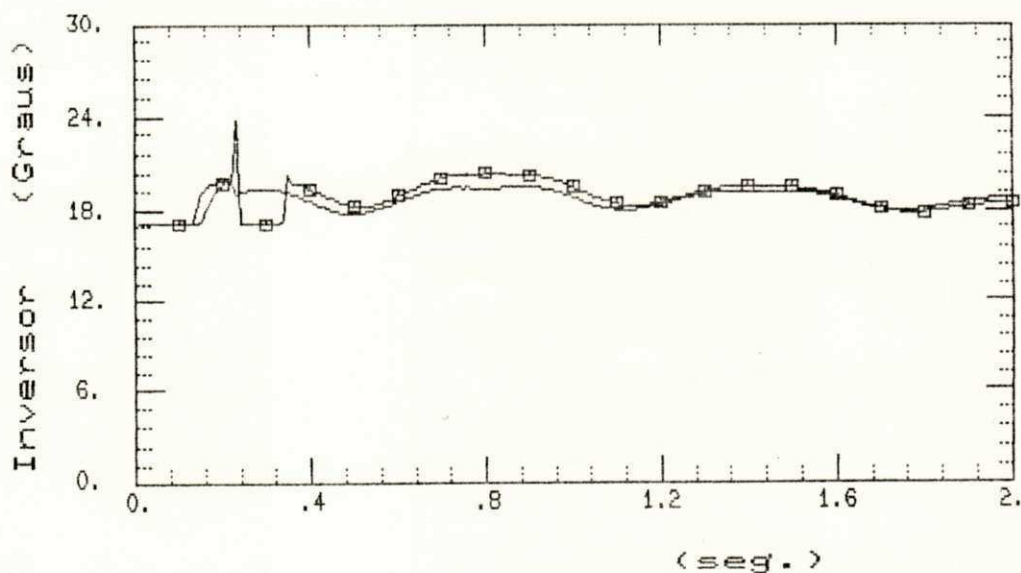


Figura 5.59 - Característica do ângulo de extinção com modulação em corrente.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $KFT=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)

$T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

$T3=0.032$ (MC) e (MT)

$T4=0.020$ (MC) e (MT)

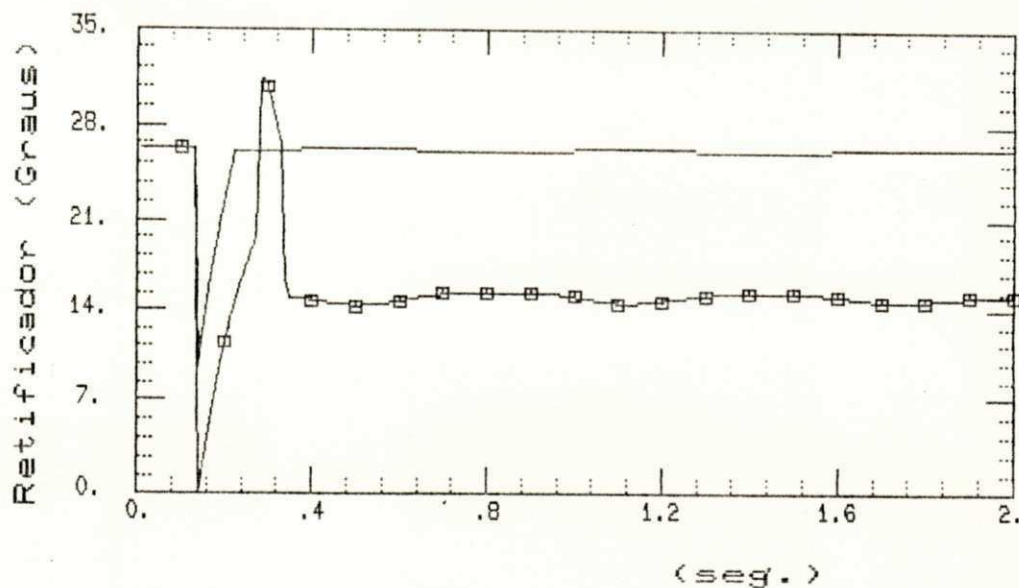


Figura 5.60 - Característica do ângulo de comutação (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

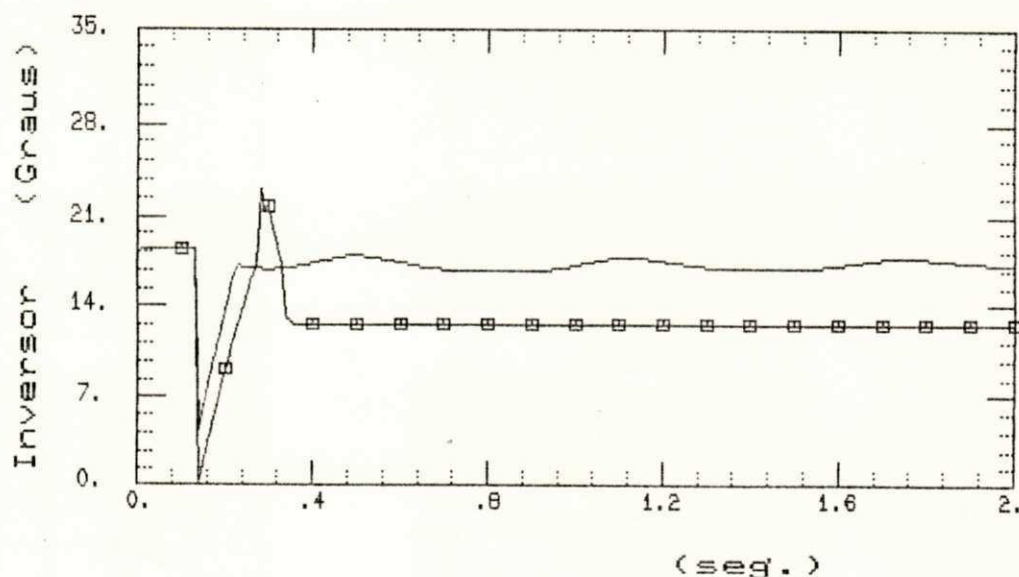


Figura 5.61 - Característica do ângulo de comutação (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

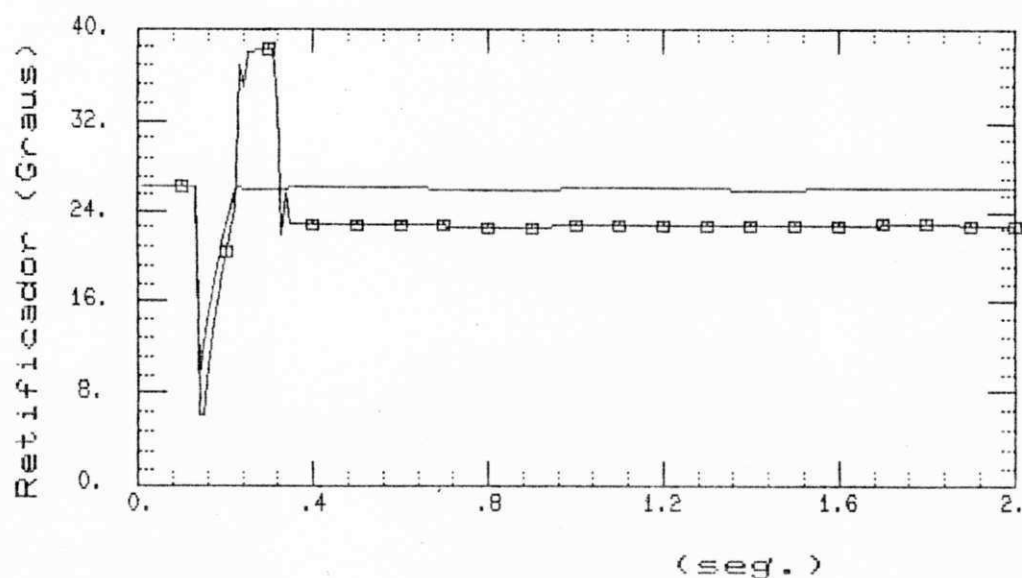


Figura 5.62 - Característica do ângulo de comutação (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

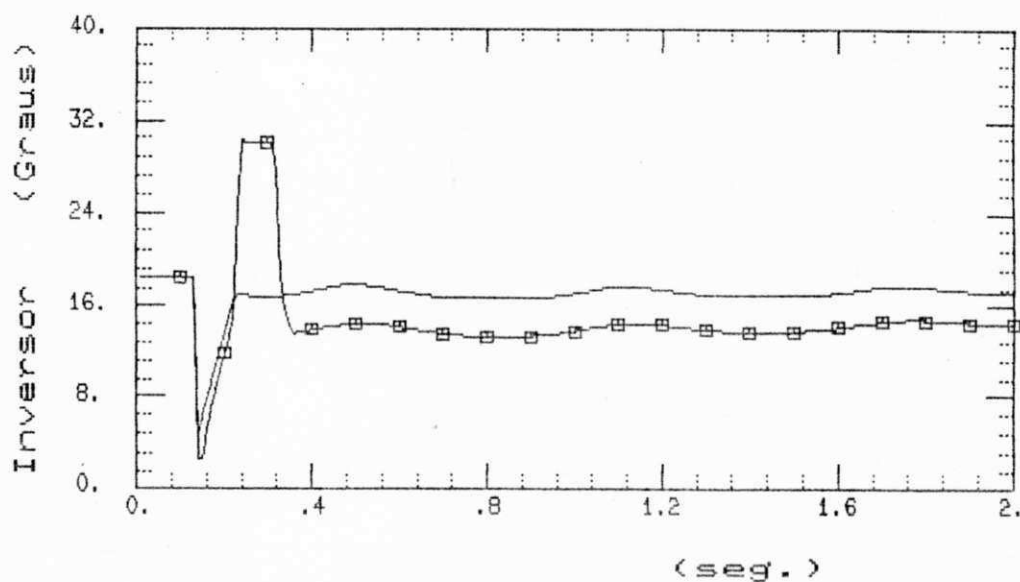


Figura 5.63 - Característica do ângulo de comutação (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

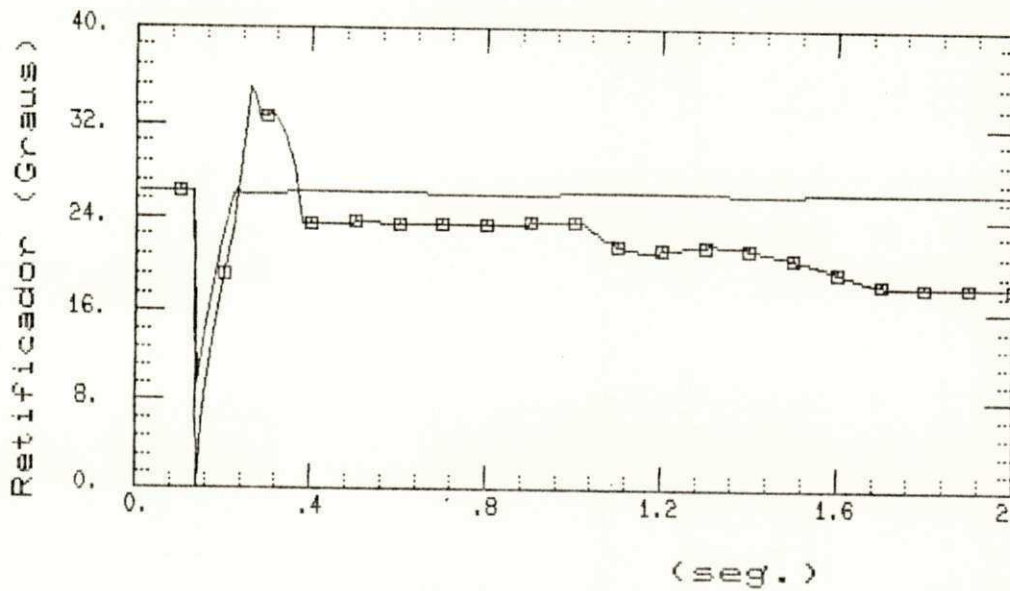


Figura 5.64 - Característica do ângulo de comutação (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)

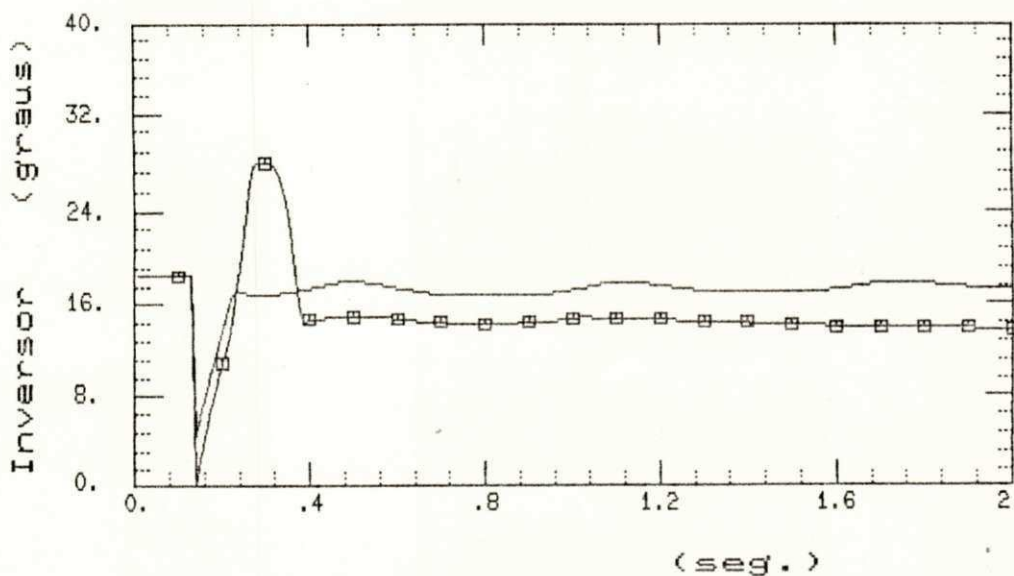


Figura 5.65 - Característica do ângulo de comutação (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)

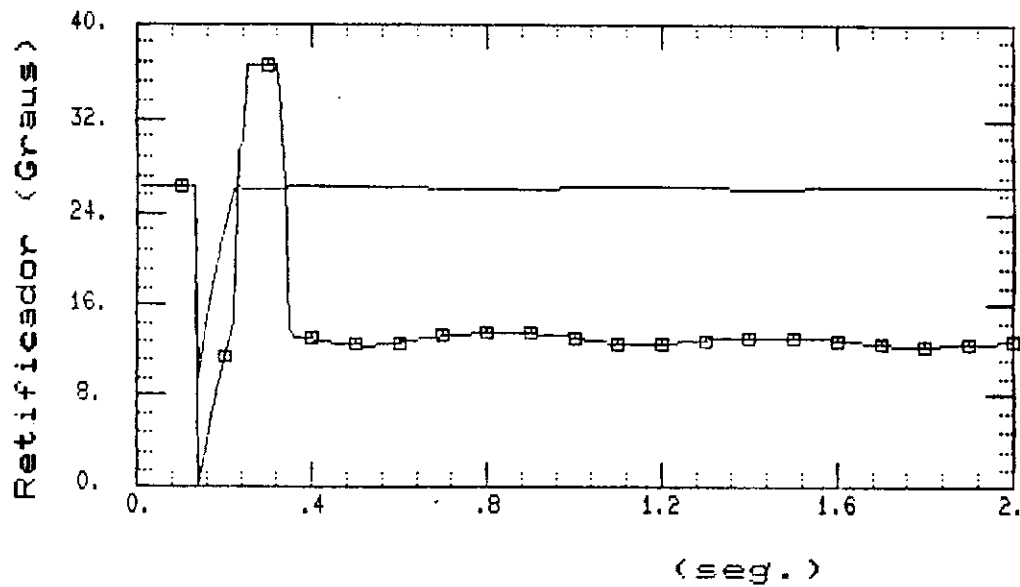


Figura 5.66 - Característica do ângulo de comutação (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

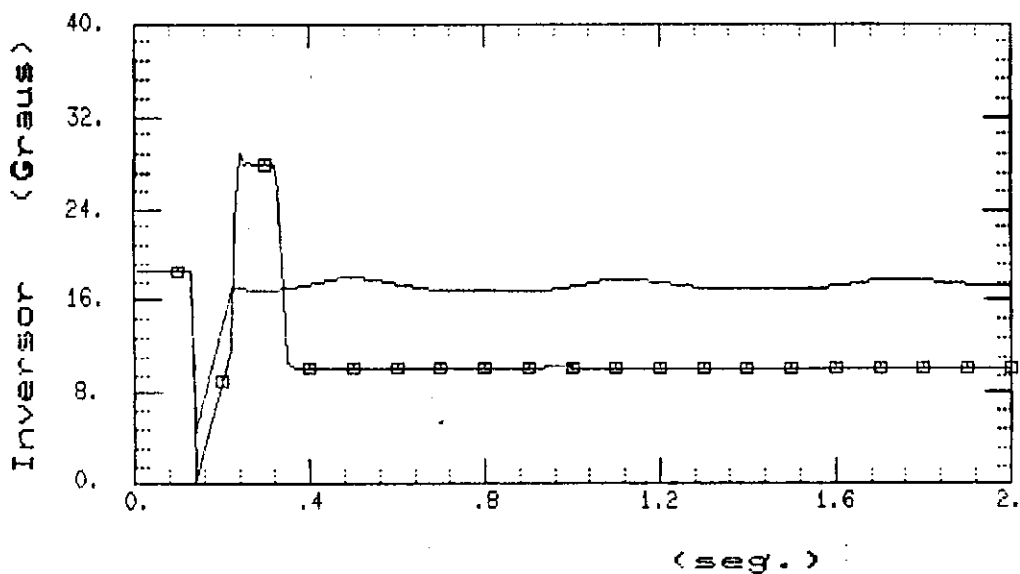


Figura 5.67 - Característica do ângulo de comutação (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

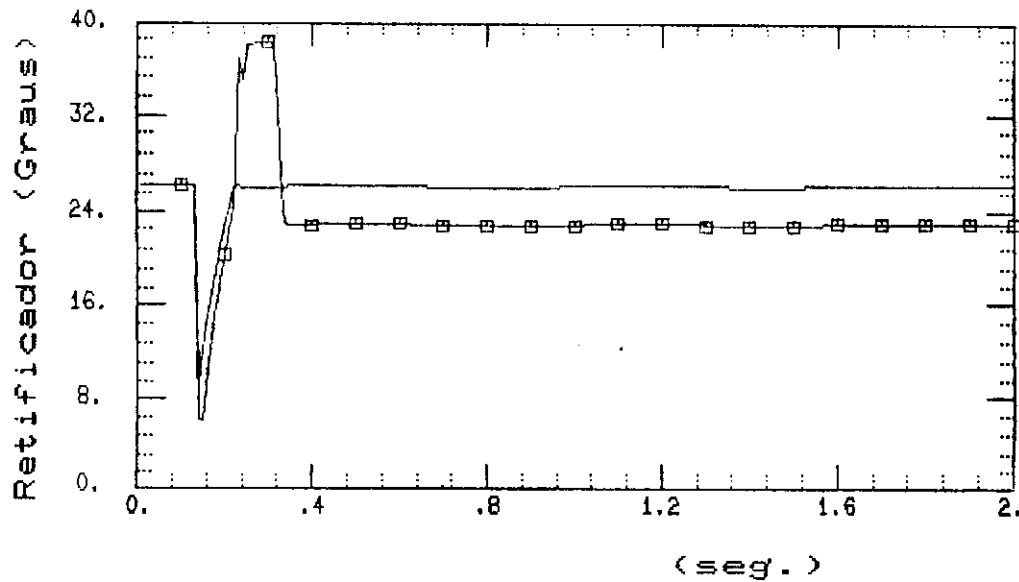


Figura 5.68 - Característica do ângulo de comutação (retificador) com modulação em corrente.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

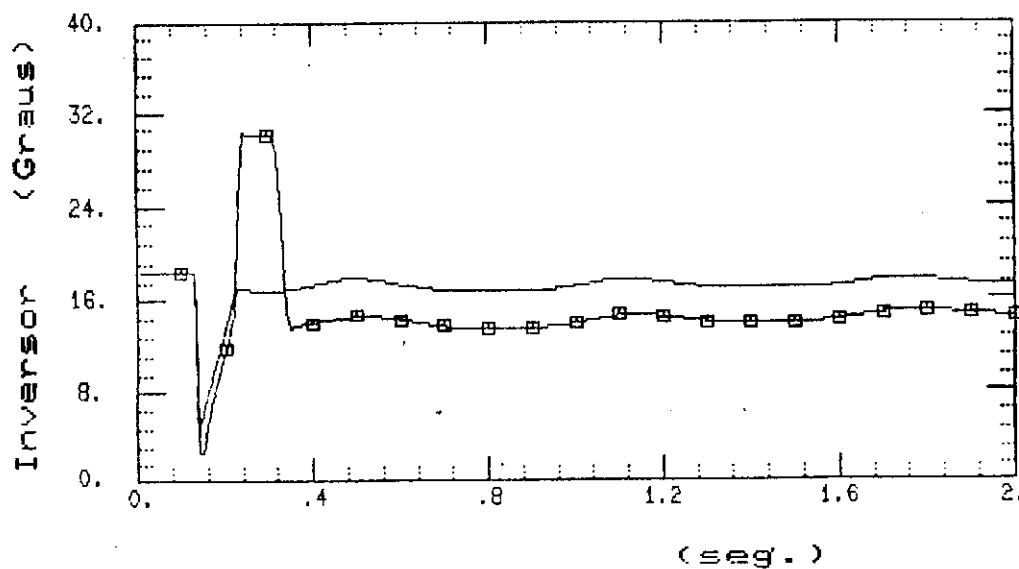


Figura 5.69 - Característica do ângulo de comutação (inversor) com modulação em corrente.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

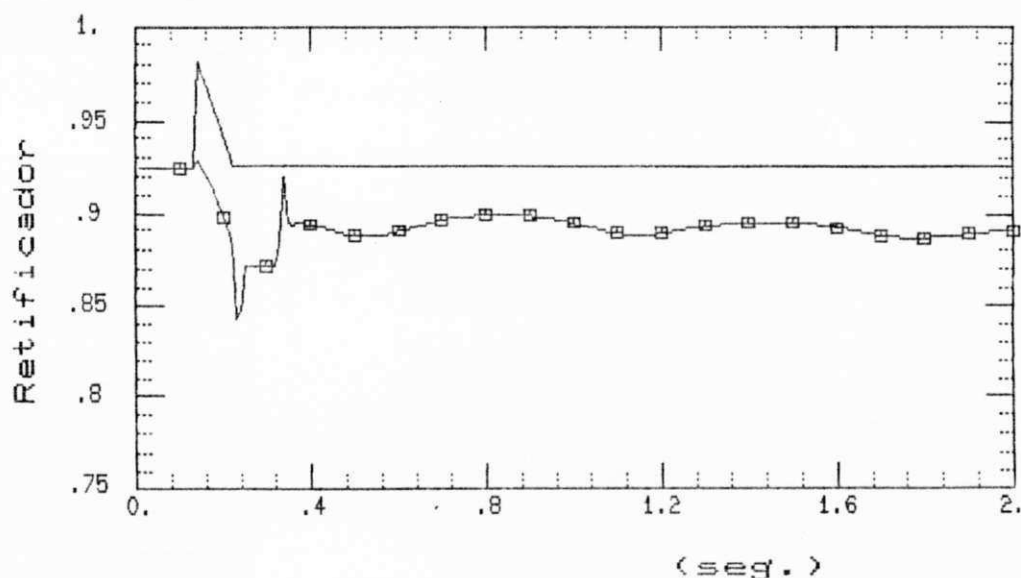


Figura 5.70 - Característica do fator de potência (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

$T_4=0.020$ (MC) e (MT)

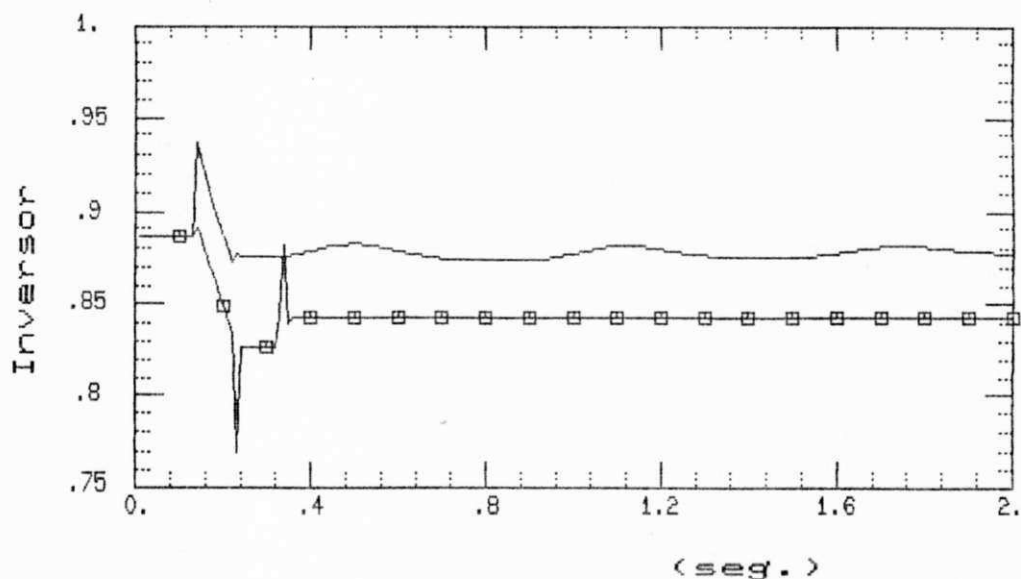


Figura 5.71 - Característica do fator de potência (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=400$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

$T_4=0.020$ (MC) e (MT)

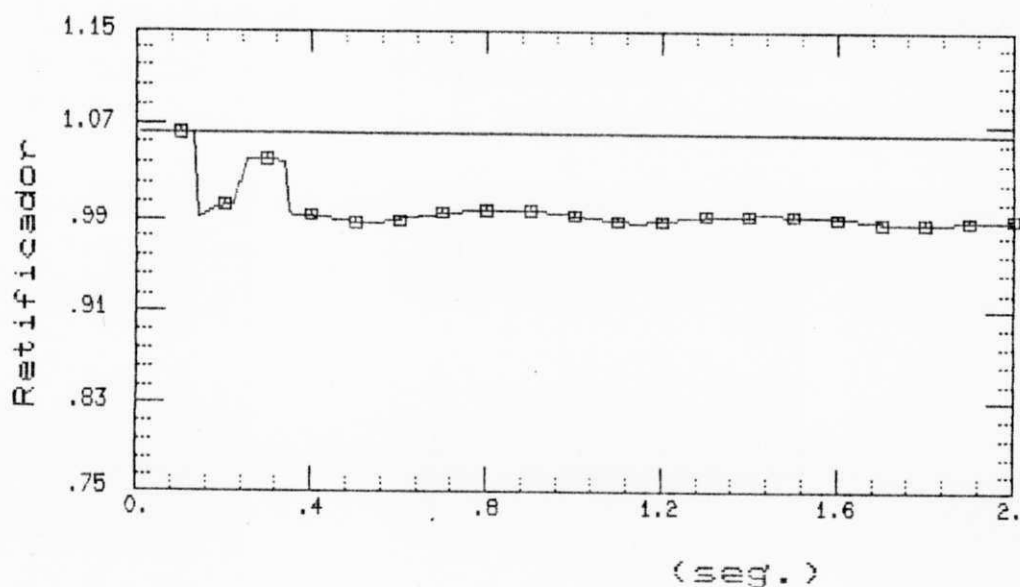


Figura 5.72 - Característica da variação de "tap" (retificador) com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: KFT=400 (MC) e (MT)

Constantes de tempo: T1=0.113 (MC) e T1=0.158 (MT)

T2=0.053 (MC) e T2=0.045 (MT)

T3=0.032 (MC) e (MT)

T4=0.020 (MC) e (MT)

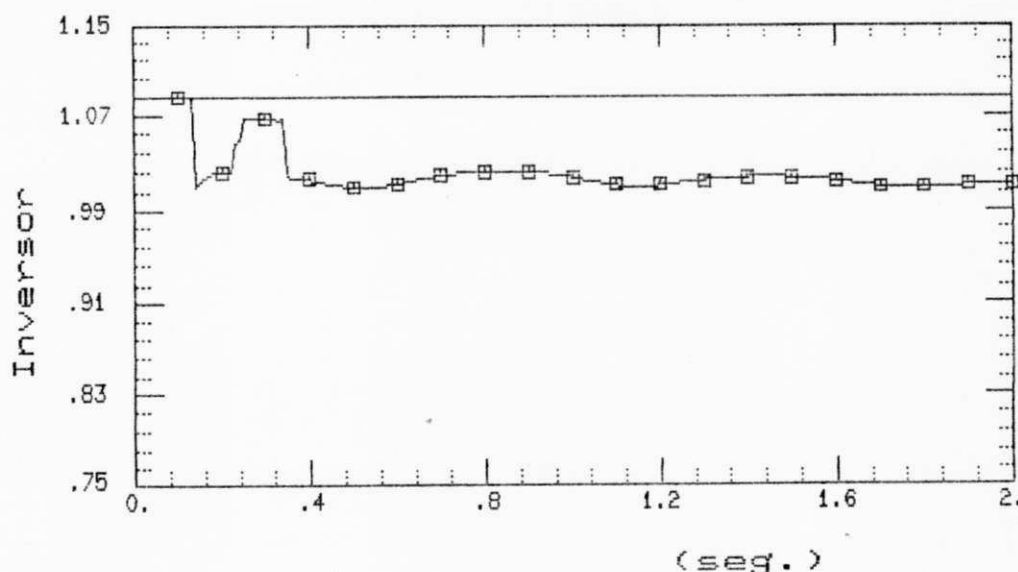


Figura 5.73 - Característica da variação de "tap" (inversor) com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: KFT=400 (MC) e (MT)

Constantes de tempo: T1=0.113 (MC) e T1=0.158 (MT)

T2=0.053 (MC) e T2=0.045 (MT)

T3=0.032 (MC) e (MT)

T4=0.020 (MC) e (MT)

5.3. SISTEMA DE 13 BARRAS.

O sistema de 13 barras, mostado na figura 5.74 é composto de 5 máquinas síncronas e um elo CC operando com potência nominal de 2500 MW e com as mesmas características do elo CC do sistema de 3 barras, incluindo os ganhos e constantes de tempo utilizados pelo o sistema de modulação.

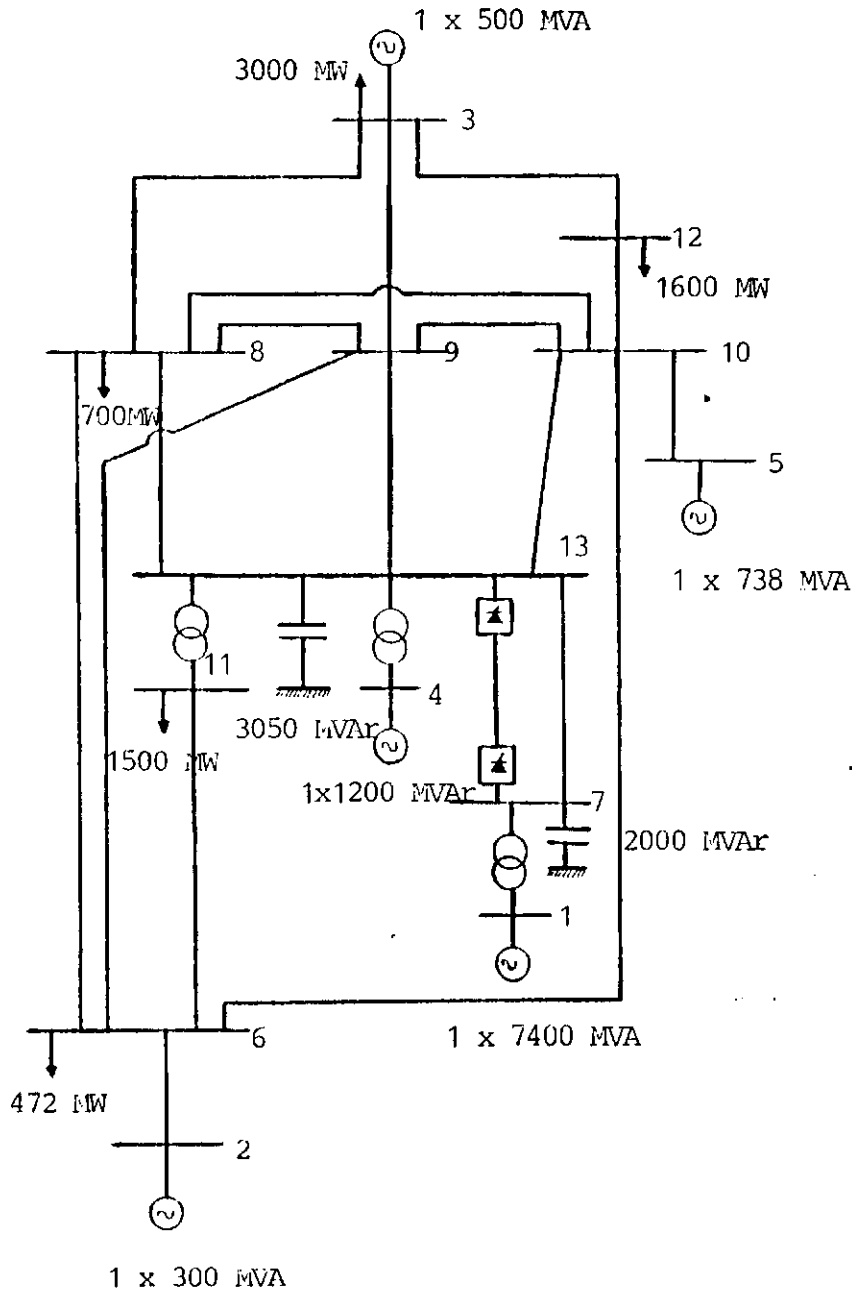


Figura 5.74 - Sistema de 13 barras.

Um curto-circuito trifásico com duração de 50 msec. foi aplicado na barra 13.

Para evitar uma quantidade excessiva de gráficos, iremos analisar a variação do ângulo de torque das máquinas localizadas nas barras 2, 4 e 5. As máquinas localizadas nas barras 1 e 3 são consideradas como barramentos infinito.

O sinal de modulação em corrente foi retirado da máquina na barra 2, por ser a que apresentou maior variação de ângulo de torque durante a simulação sem modulação.

Utilizou-se as funções de transferência (4.3) a (4.6) com modulação combinada em corrente e tensão e modulação em corrente.

Com o sistema de modulação, utilizando a função (4.3) obteve-se a variação do ângulo de torque mostrada nas figuras 5.75, 5.76 e 5.77. Conclui-se que não ocorreu uma influência significativa na estabilização do ângulo de torque, além disso, a modulação contribuiu para uma maior variação no terceiro "swing".

A variação do ângulo de torque com modulação combinada em corrente e tensão utilizando a função (4.4) é mostrada nas figuras 5.78, 5.79 e 5.80. Com a utilização de dois polos, observou-se uma melhor eficiência do sistema de modulação com um efeito estabilizante mais pronunciado para a máquina na barra 2. A estabilização das variações do ângulo de torque para as máquinas 4 e 5 não são muito significante, uma vez que o sinal de modulação em corrente foi retirado da máquina na barra 2; porém houve não tendência a piorar a estabilidade das máquinas nas barras 4 e 5.

Na modulação combinada em corrente e em tensão utilizando a função (4.5), o efeito estabilizante não foi sentido, acarretando um aumento na variação do ângulo de torque das máquinas (figuras 5.81, 5.82 e 5.83).

Com a utilização do segundo zero (função (4.6)), o efeito estabilizante foi bastante sensível. O sistema de modulação em corrente e tensão forneceu o seu melhor desempenho, quando utilizou este tipo de função. A variação do ângulo de torque é mostrada nas figuras 5.84, 5.85 e 5.86.

O sistema de modulação não processou um excelente efeito estabilizador quando foi utilizado a modulação em corrente, com a função (4.6); apresentando um variação de ângulo de torque semelhante a modulação combinada em corrente e tensão utilizando a função (4.3). (Figuras 87, 88 e 89)

Os dados relativos ao sistema de 13 barras simulado encontra-se no apêndice B.

Da figura 5.75 a 5.89 temos:

————— - Curva da simulação do sistema sem modulação.

—□—□— - Curva da simulação do sistema com modulação.

MC - Modulação em corrente.

MT - Modulação em tensão.

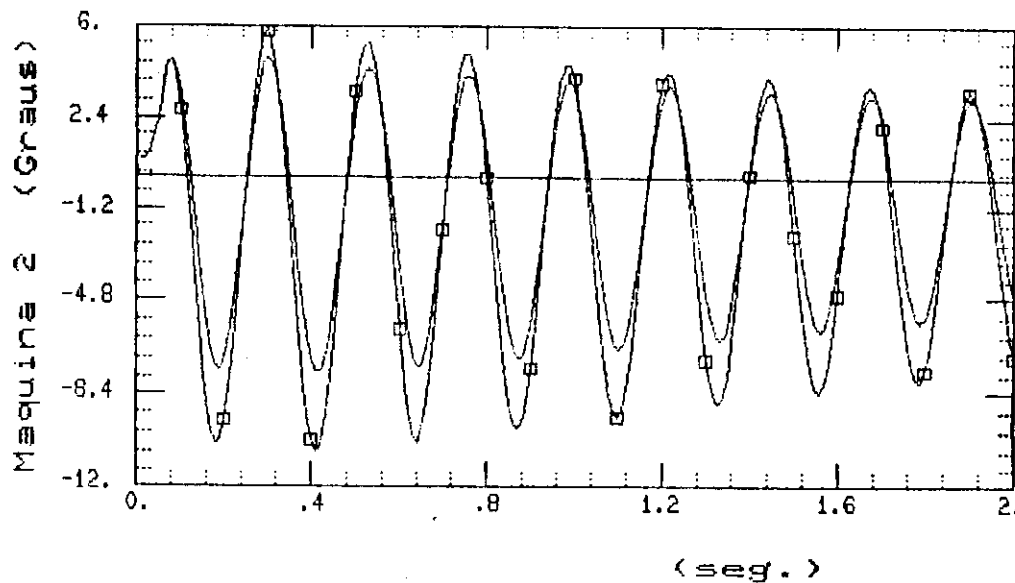


Figura 5.75 - Característica do ângulo de torque (máquina 2) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=800$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

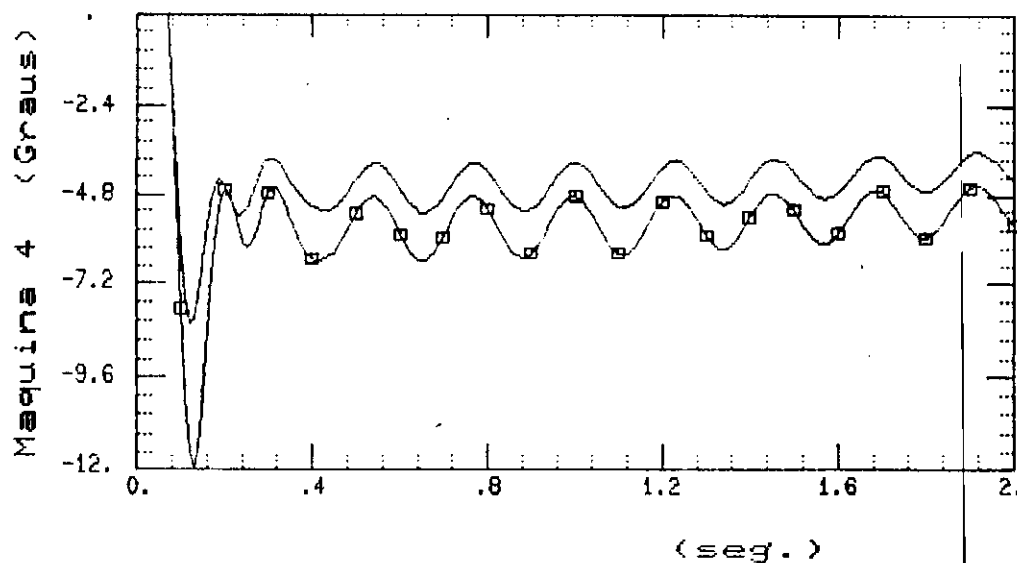


Figura 5.76 - Característica do ângulo de torque (máquina 4) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=800$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

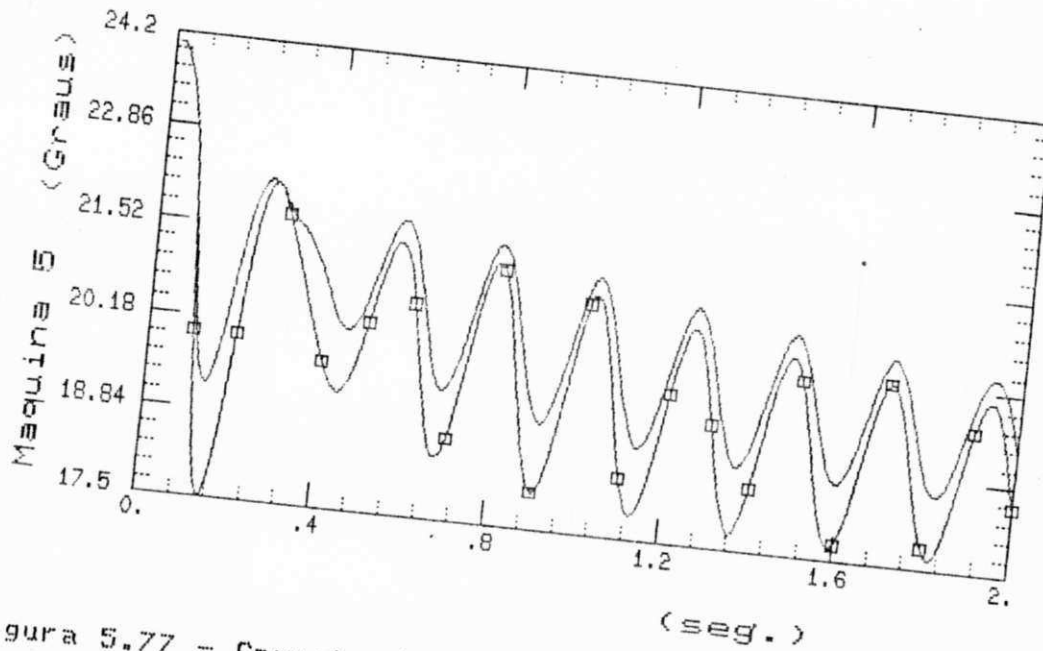


Figura 5.77 - Característica do ângulo de torque (máquina 5)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.3
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=800$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

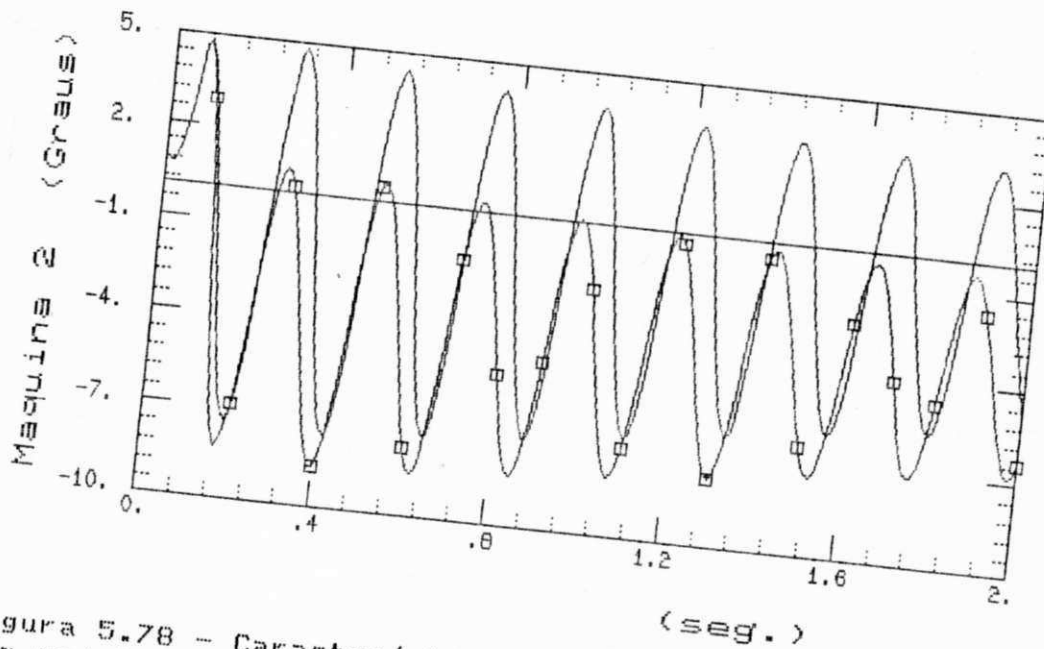


Figura 5.78 - Característica do ângulo de torque (máquina 2)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=800$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

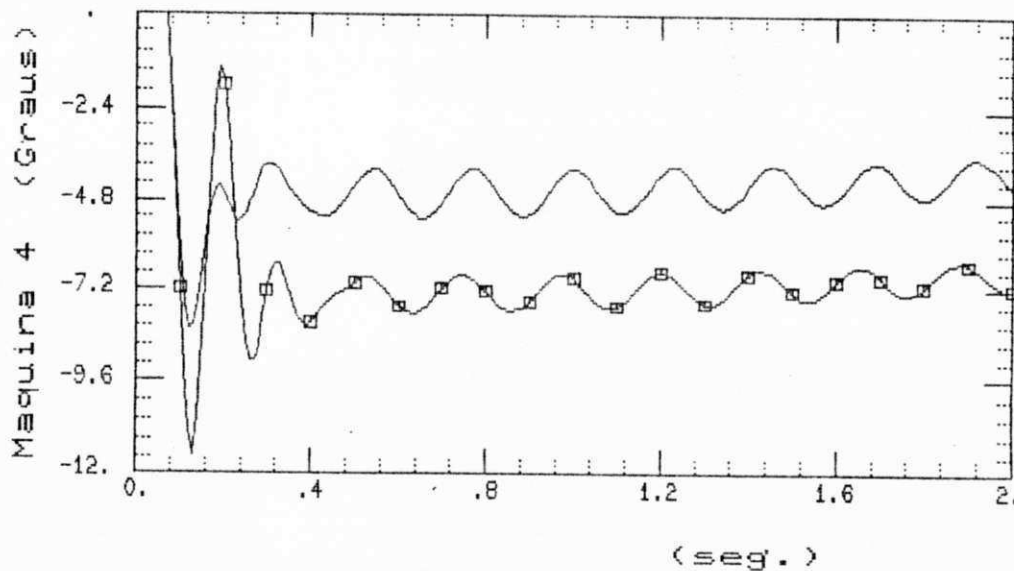


Figura 5.79 - Característica do ângulo de torque (máquina 4)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $KFT=800$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)
 $T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

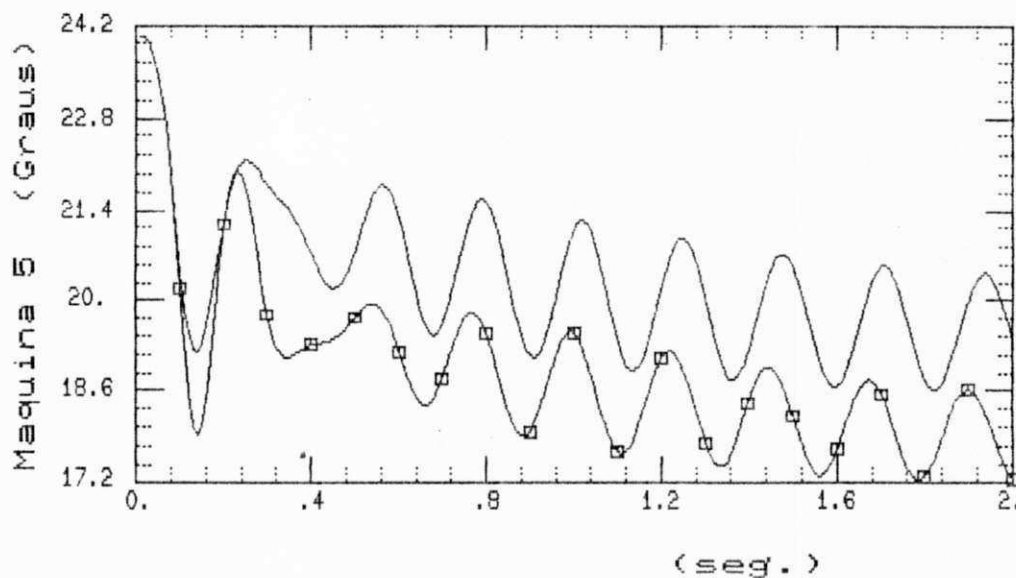


Figura 5.80 - Característica do ângulo de torque (máquina 5)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.4
 Ganho da função de transferência: $KFT=800$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T1=0.113$ (MC) e $T1=0.158$ (MT)
 $T2=0.053$ (MC) e $T2=0.045$ (MT)

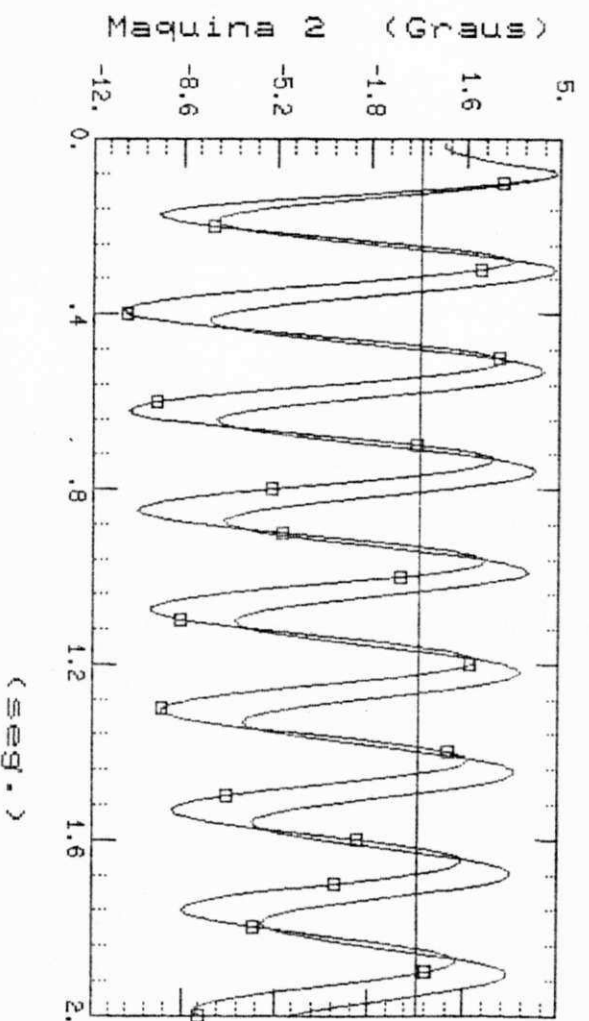


Figura 5.81 - Característica do ângulo de torque (máquina 2) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4,5
 Ganho da função de transferência: KFT=800 (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: T1=0.113 (MC) e T1=0.158 (MT)
 T2=0.053 (MC) e T2=0.045 (MT)
 T3=0.032 (MC) e (MT)

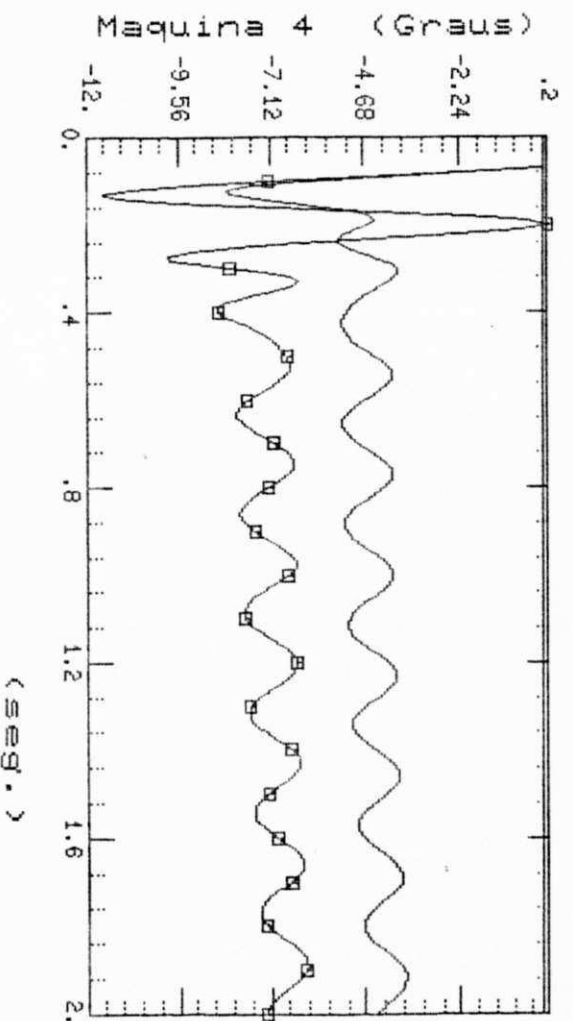


Figura 5.82 - Característica do ângulo de torque (máquina 4) com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4,5
 Ganho da função de transferência: KFT=800 (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: T1=0.113 (MC) e T1=0.158 (MT)
 T2=0.053 (MC) e T2=0.045 (MT)
 T3=0.032 (MC) e (MT)

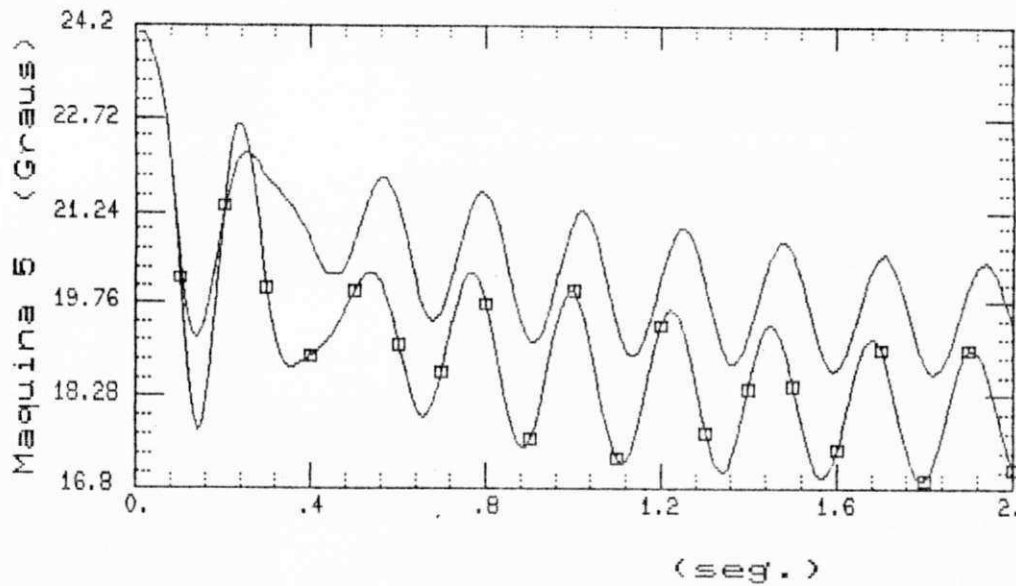


Figura 5.83 - Característica do ângulo de torque (máquina 5)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.5
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=800$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)

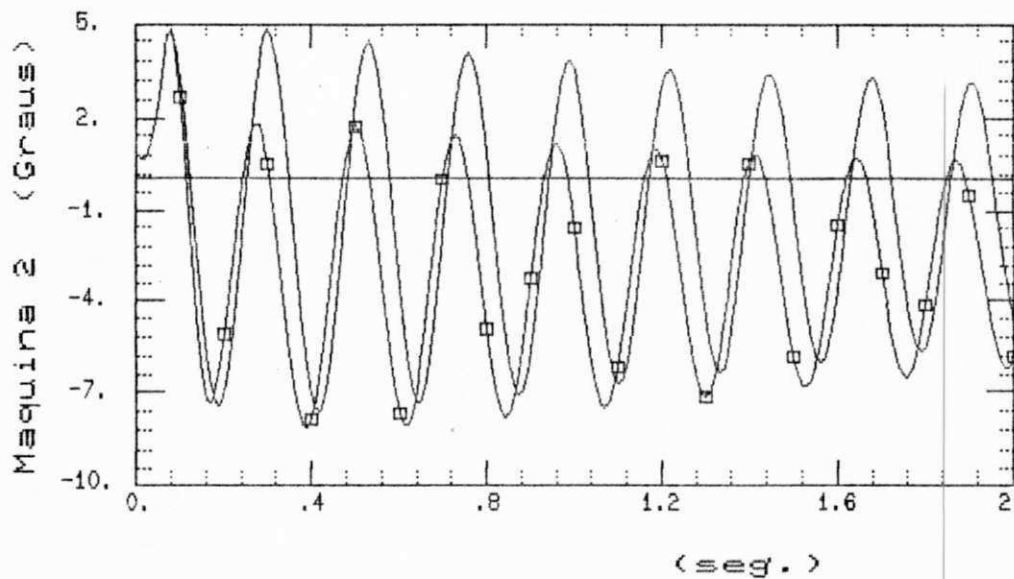


Figura 5.84 - Característica do ângulo de torque (máquina 2)
 com modulação combinada em corrente e tensão.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=800$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

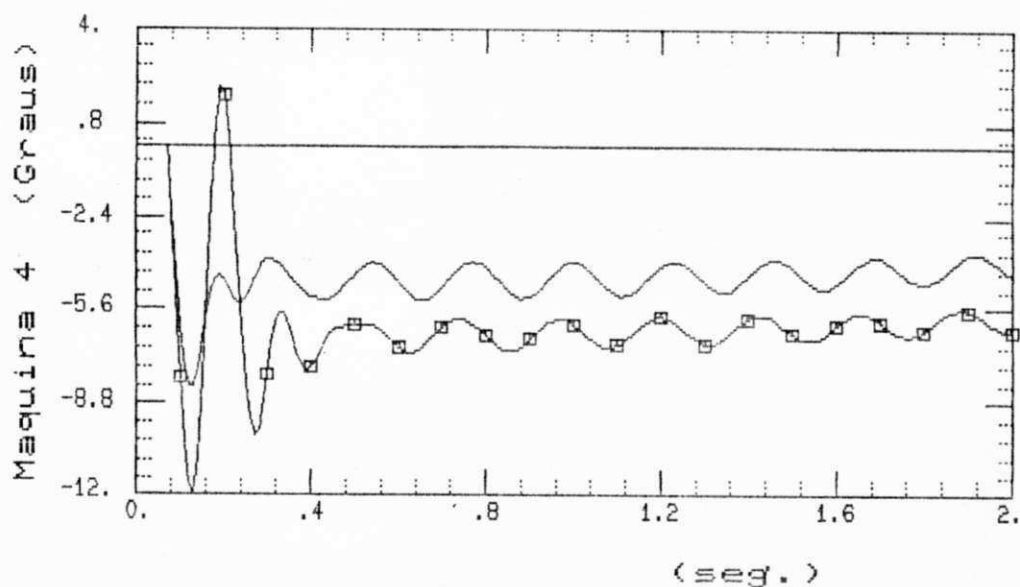


Figura 5.85 - Característica do ângulo de torque (máquina 4) com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=800$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

$T_4=0.020$ (MC) e (MT)

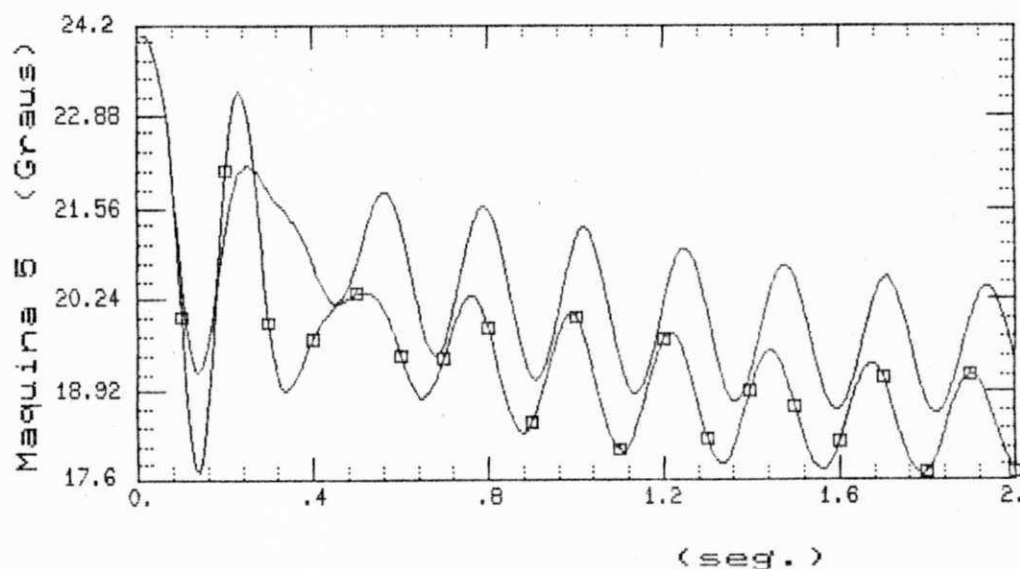


Figura 5.86 - Característica do ângulo de torque (máquina 5) com modulação combinada em corrente e tensão.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=800$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

$T_4=0.020$ (MC) e (MT)

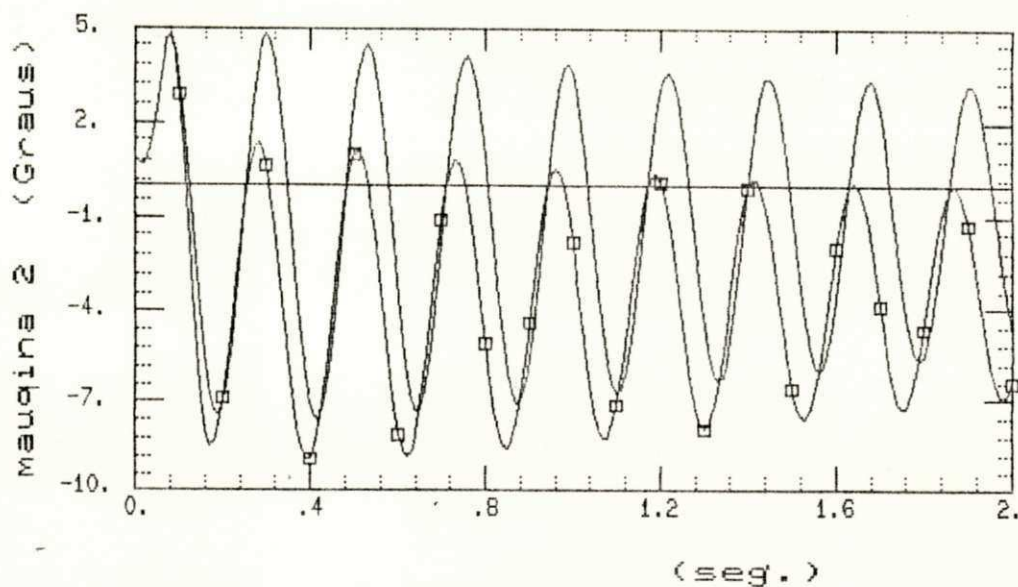


Figura 5.87 - Característica do ângulo de torque (máquina 2)
 com modulação em corrente.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=800$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

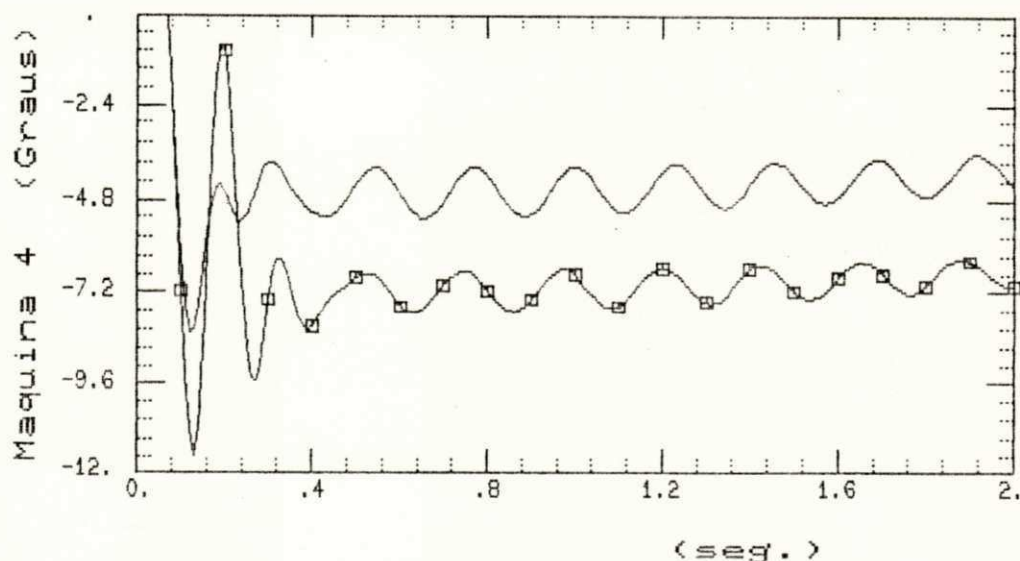


Figura 5.88 - Característica do ângulo de torque (máquina 4)
 com modulação em corrente.
 Função de transferência = 4.6
 Ganho da função de transferência: $K_{FT}=800$ (MC) e (MT)
 Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)
 $T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)
 $T_3=0.032$ (MC) e (MT)
 $T_4=0.020$ (MC) e (MT)

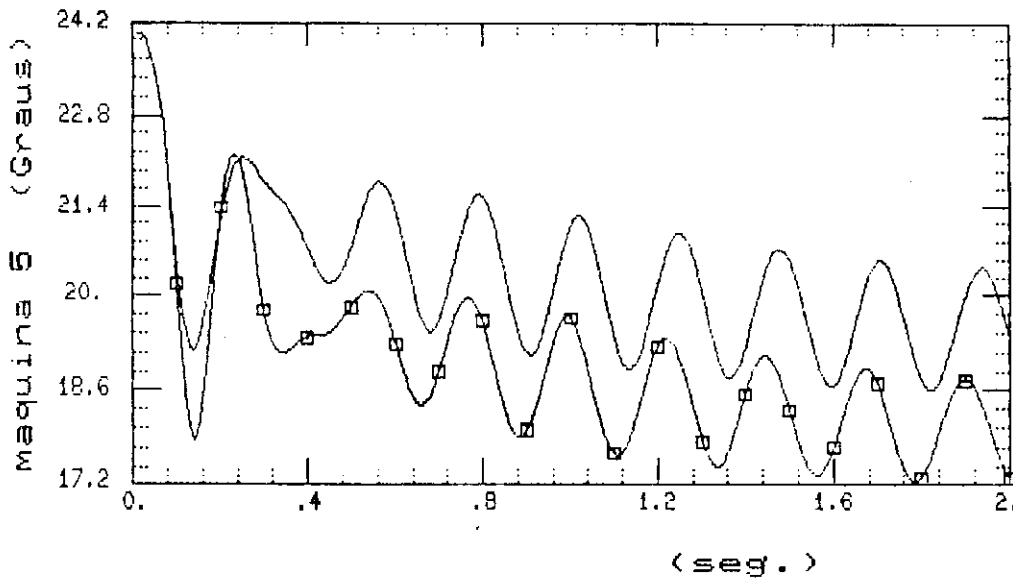


Figura 5.89 - Característica do ângulo de torque (máquina 5) com modulação em corrente.

Função de transferência = 4.6

Ganho da função de transferência: $K_{FT}=800$ (MC) e (MT)

Constantes de tempo: $T_1=0.113$ (MC) e $T_1=0.158$ (MT)

$T_2=0.053$ (MC) e $T_2=0.045$ (MT)

$T_3=0.032$ (MC) e (MT)

$T_4=0.020$ (MC) e (MT)

5.4. CONCLUSÕES.

Após a simulação dos dois sistemas conclui-se que o efeito estabilizante provocado pelo sistema de modulação do elo CC é significativo, quando se utiliza um sistema de modulação eficiente e devidamente ajustado conforme o sistema; entretanto outros parâmetros do sistema de controle podem ser modificados para ajudar a estabilização do sistema.

Baseado nas figuras apresentadas, observou-se que um amortecimento acentuado foi obtido quando se utilizou a modulação combinada em corrente e em tensão, utilizando as funções (4.5) e (4.6).

O elo CC deve ser projetado de tal forma a suportar transitórios de corrente e potência de ordem elevada, processados pelo o sistema de modulação.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi, o desenvolvimento de uma metodologia com a finalidade de incluir na simulação de estabilidade elos em corrente contínua.

Após o estudo da simulação de estabilidade desenvolvido por [Mota, 1986], adaptou-se a modelagem do elo CC, aumentando assim a eficiência do simulador digital de estabilidade transitória eletromecânica.

A adaptação do fluxo de carga CA/CC desenvolvido por [Carvalho, 1983] na simulação de estabilidade transitória com inclusão do elo CC, proporcionou uma maior precisão na determinação dos valores da potência ativa e reativa, fornecidas pelo o modelo CC ao simulador digital de estabilidade, o qual considera a potência ativa e reativa do elo CC, como carga de potência ou corrente constante, dependendo do tipo de controle de operação do elo CC.

O estudo teórico sobre a modelagem do elo CC, determinou o modelo matemático que representa o elo CC, de maneira a ser incluído na simulação de estabilidade transitória. Após a apresentação do método de simulação transitória adotado neste trabalho; desenvolveu-se o método de inclusão do elo CC, tendo como principal ferramenta a modulação do sistema CA/CC. Simulou-se um sistema simples com 3 barras e

um sistema de maior porte com 13 barras, onde notou-se claramente a influência do sistema de modulação na estabilização do sistema (após o distúrbio).

Quanto a modulação do elo CC, conclui-se que um ajuste adequado dos ganhos e constantes de tempo (característicos para cada tipo de sistema) proporciona um efeito estabilizador eficiente no sistema em corrente alternada.

Finalizando, podemos citar algumas sugestões para futuros estudos, que venham a ser realizados a partir deste trabalho.

- a. Modelagem da lógica de disparo e controle do elo CC através de funções de transferência.
- b. Adaptação do fluxo de carga CA/CC utilizado, para processamento de sistema de transmissão em corrente contínua com multiterminais e com dados de carga probabilísticos.
- c. Monitoramento da estabilidade dinâmica do sistema, em tempo real, permitindo a recepção de dados analógico do comportamento do sistema e processamento dos dados de controle e operação do sistema.
- d. Inclusão de distúrbios nas linhas de transmissão em CC.
- e. Permitir a mudança de "tap" nos transformadores conversores, próximo da realidade física.

APÊNDICE A

- SIMULAÇÃO DINÂMICA DE MÁQUINAS SÍNCRONAS INTERLIGADAS COM A REDE DE TRANSMISSÃO CA E MÉTODOS PARA A INCLUSÃO DE ELOS CC.

A.1. SIMULAÇÃO DINÂMICA DE MÁQUINAS SÍNCRONAS INTERLIGADAS COM A REDE DE TRANSMISSÃO CA.

Para a simulação do comportamento transitório de um sistema de potência, a rede de transmissão é simulada de maneira análoga ao fluxo de carga. A máquina é interligada a rede através de seu circuito equivalente, tensão e' atrás da reatância $X'd$, onde o valor de e' varia de acordo com o modelo apresentado [Mota, 1986].

As condições iniciais do sistema são obtidas utilizando os dados de saída do fluxo de carga (fluxo de carga CA/CC, neste trabalho), normalmente tensão e potência para cada barramento na referência do sistema.

O valor da potência mecânica na simulação, varia de acordo com os modelos de turbinas e reguladores de velocidade, enquanto que a tensão de campo varia de acordo com os modelos de reguladores de tensão e sistemas de excitação.

O efeito de saturação é simulado através da modificação do valor de E_i na equação diferencial para $e'q$.

$$E'_i = E_i + \Delta E_i \quad (A.1)$$

Onde:

$$\Delta E_i = A_s * e^{s(\theta - \theta_0)} \quad (A.2)$$

Com,

$$A_g = I V_t + I_t * (r_a + j * X_p) I \quad (A.3)$$

Onde:

A_s e B_s - Constantes de saturação.

V_t - Tensão terminal.

I_t - Corrente terminal.

r_a - Resistência da armadura.

X_p - Reatância de Potier.

A.2. REGULADORES E SISTEMAS DE EXCITAÇÃO.

Os principais reguladores do conjunto turbina-gerador são o de tensão e o de velocidade. Em sistemas fortemente ligados, os reguladores de velocidade têm um efeito maior que os reguladores de tensão, enquanto que para geração remota ocorre o oposto.

A tensão de excitação E_{fd} , principal controle do gerador, é obtida através da colocação de excitatrizes acopladas ao gerador. Basicamente usam-se dois tipos de excitatriz: excitatriz rotativa e excitatriz estática.

Os principais reguladores de velocidade utilizados são os seguintes:

a. Regulador isócrono simples: mantém a velocidade da turbina constante, mas não é utilizado em sistemas de várias máquinas, devido a necessidade de uma divisão apropriada de cargas entre as máquinas.

b. Regulador com queda de velocidade: não ocorre os efeitos observados com o regulador isócrono simples, mas estes reguladores são de ação lenta e constante.

c. Regulador com compensação transitória: apresenta regulação alta para rápidos desvios na frequência e regulação baixa para variações lenta.

Os reguladores de tensão além da alta confiança e eficácia, devem agir continuamente proporcional aos desvios de tensão terminal CA, mantendo-a no valor desejado.

Em condições de carga pesada, o uso de reguladores de tensão rápidos, provocam um bom torque sincronizante, mas destrói o amortecimento inerente das máquinas. Para solucionar este problema é introduzido um sinal adicional de modo a produzir um torque positivo com a velocidade da máquina.

A.3. SIMULADOR DIGITAL DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA.

A necessidade de um simulador digital que forneça resultados do comportamento transitório do sistema, visando a ocorrência de distúrbios, é indispensável no projeto e manutenção de um sistema de potência.

O simulador digital utilizado neste trabalho, desenvolvido por [Mota, 1986], apresenta as seguintes características:

O processo numérico usado envolve modernas técnicas computacionais, onde o princípio básico de resolução é o processo passo a passo, tomando como partida o regime estacionário do sistema. O método de integração utilizado é o de Euler modificado.

Partindo das condições de regime permanente, podemos

simular distúrbios, tais como: curto-circuito trifásico com linha removida ou não, rejeição de carga e abertura de condutor. Além da simulação do regime permanente, pode-se também simular a variação da tensão terminal para fins de identificação do modelo equivalente.

O simulador utiliza passo de integração fixo durante a simulação. O intervalo de integração deve ser menor que a menor constante de tempo envolvida no modelo matemático. Pode-se utilizar valores para o passo de integração na faixa de 0.005 à 0.05 segundos com resultados satisfatórios.

A impedância série complexa e a admitância "shunt" total complexa são os dados necessários para as linhas de interligações. Dados de linhas para o religamento monopolar podem ser adicionados ao simulador.

Dos transformadores, capacitores e indutores são necessários dados de impedância série equivalente, relação de transformação para os transformadores e admitância complexa para os capacitores e indutores.

Os dados de barra do sistema inicialmente eram obtidos a partir de um fluxo de carga e adicionados ao simulador; neste trabalho acoplamos um fluxo de carga CA/CC, desenvolvido por [Carvalho, 1983] ao simulador, podendo-se agora entrar os dados com valores iniciais e especificados de carga ativa, carga reativa, geração ativa, geração reativa módulo e ângulo de tensão. Com a modificação, dados adicionais como: tipo de barra, limite máximo e mínimo de potência reativa, módulo da tensão quando da representação da carga por

impedância constante e números de elos CC, são necessários.

Antes de iniciar o processo de simulação de integração, estes dados são levados ao fluxo de carga CA/CC e processados.

O simulador aceita quatro tipos diferentes de modelos para máquinas síncronas, ou seja máquina representada por uma tensão atrás de uma reatância transitória, modelo de terceira ordem, modelo de terceira ordem sem regulador e a máquina representada por um modelo de sexta ordem.

Dados do governador, controlador ótimo, excitatriz e compensador estático também podem ser adicionados.

Podem ser usados os dois modelos apresentados nas figuras A.1 e A.2 para os reguladores de tensão e sistema de excitação.

Os compensadores estáticos, como alternativa para os compensadores síncronos, permitem o controle da tensão do sistema, através da variação rápida da potência reativa gerada. Os compensadores estáticos comumente utilizados são: capacitores chaveados a tiristores, reatores saturado e transformadores de alta impedância.

A estrutura do simulador de estabilidade é mostrado na figura A.3.

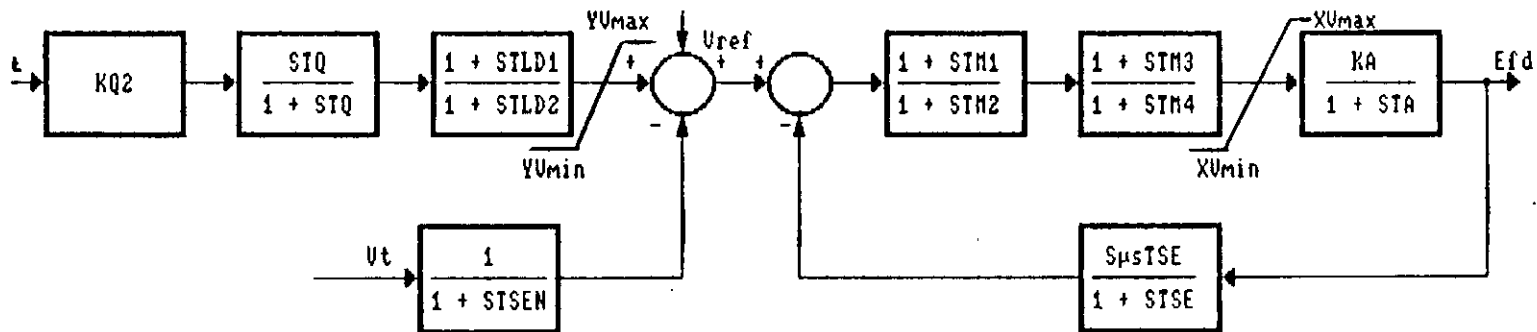


Figura A.1 - Regulador de Tensao e Sistema de Excitacao.

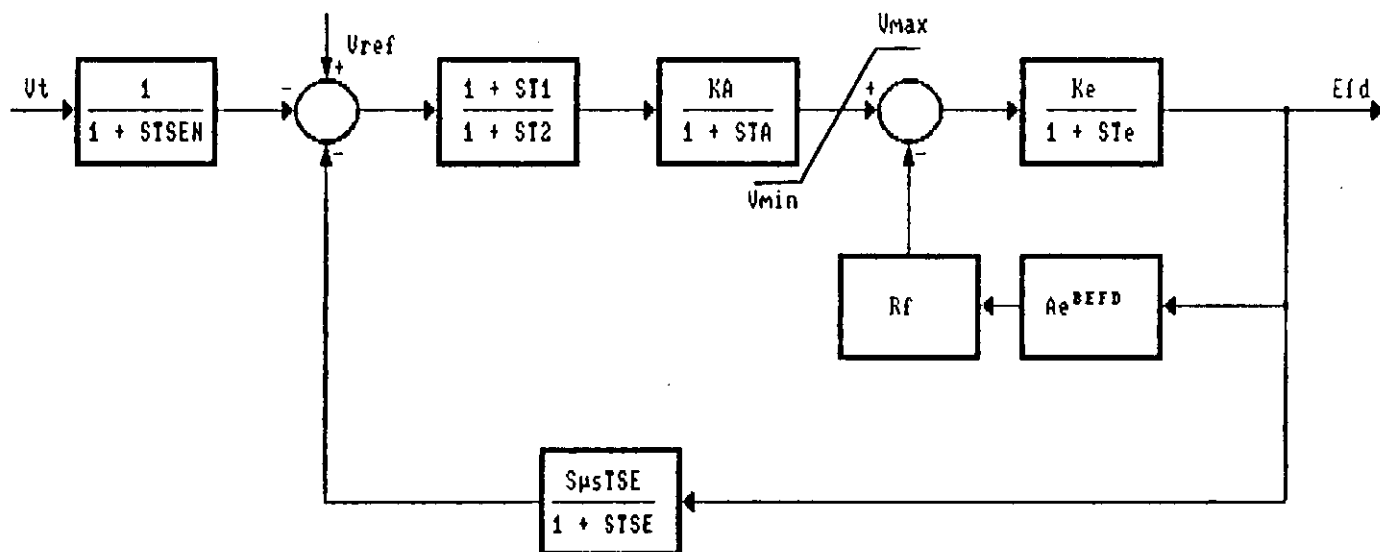


Figura A.2 - Regulador de Tensao e Sistema de Excitacao.

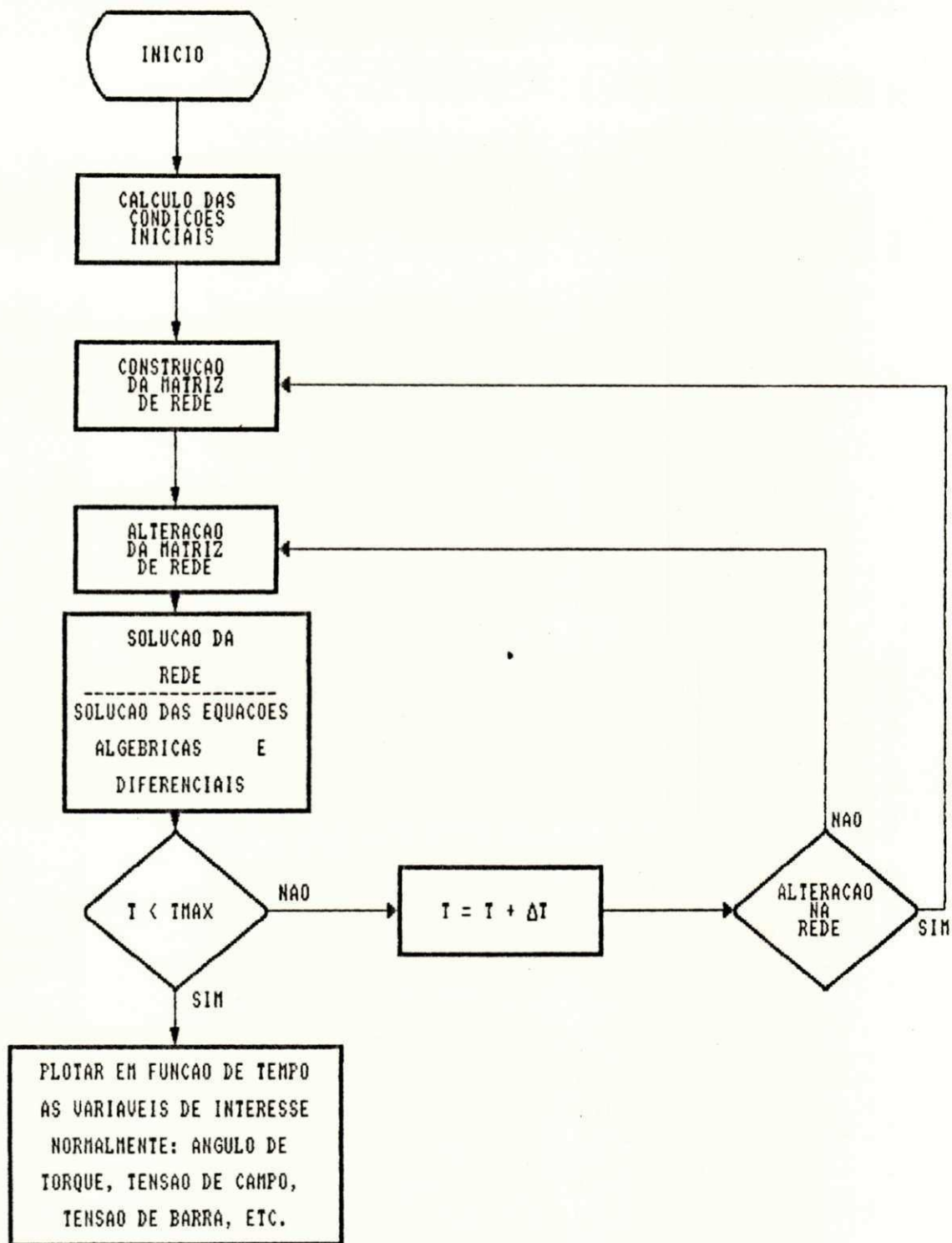


Figura A.3 - Simulador de Estabilidade.

APÊNDICE B

B. DADOS DE ENTRADA E SAÍDA DA SIMULAÇÃO DE ESTABILIDADE COM A INCLUSÃO DE ELO CC.

B.1. DADOS DE ENTRADA.

O formato de entrada de dados utilizado foi o (F10.5) e o (I10). Apresenta-se a seguir os dados de entrada para a simulação .

a. Dimensões do sistema.

NB - Número de barras.

NG - Número de geradores.

NL - Número de linhas.

NX - Número de transformadores.

NC - Número de capacitores.

NQ - Número de equivalentes dinâmicos.

NCE - Número de compensadores estáticos.

NDC - Número de elos CC.

b. dados do distúrbio.

KEY - Tipo do distúrbio: 0 - Regime permanente.

1 - Curto-trifásico com linha
removida.

2 - Rejeição de carga.

3 - Curto-trifásico sem remorção de
linha.

4 - Abertura do condutor.

5 - Variação de tensão terminal para fins de identificação de modelo equivalente.

LF - Linha defeituosa.

JK - Barra defeituosa.

JKK - 0 outro terminal da linha defeituosa.

FD - Distância do defeito à barra defeituosa.

TCL1 - Primeiro tempo para a eliminação do defeito.

TCL2 - Segundo tempo para a eliminação do defeito.

Quando KEY = 5,

LF - 0 (zero)

JK - Barra para a variação na tensão terminal.

JKK - 1 para variação na parte real da tensão.

2 para variação na parte imaginária da tensão.

FD - 0 (zero)

TCL1 - Duração da variação da tensão.

TCL2 - porcentagem da variação de tensão.

c. Dados dos tempos.

TS - início da simulação.

DT1 - Primeiro intervalo de integração.

DP1 - Primeiro intervalo de impressão.

TIF1 - Tempo para a mudança de DT1 para DT2.

DT2 - Segundo intervalo de integração.

DP2 - Segundo intervalo de impressão.

TIF2 - Tempo final da simulação.

d. Dados para religamento monopolar.

I - Barra início da linha.

J - Barra fim da linha.

R - Resistência da linha.

X - Reatância série.

d. Dados de linha.

LL - Número da linha.

II - Barra de início da linha.

JJ - Barra de fim da linha.

IMP - Impedância série complexa.

YP - Admitância "shunt" complexa.

e. Dados dos transformadores.

LL - Número do transformador.

II - Barra de início do transformador.

JJ - Barra de fim do transformador.

IMP - Impedância série equivalente.

YP - Relação de transformação. (complexa)

f. Dados dos capacitores e/ou indutores.

LL - Número do capacitor ou indutor.

II - Número da barra.

YP - Admitância complexa.

g. Dados de barra.

J - Número da barra.

KTP - Tipo da barra: 0 - Barra de carga.

1 - Barra de tensão controlada.

3 - Barra de referência.

P - Carga ativa.

Q - Carga reativa.

VM - Módulo da tensão da barra.

VA - Ângulo da tensão da barra.

G - Indicador de rejeição de carga: 0 - Carga rejeitada.

1 - Carga.

PCZ - Porcentagem de carga representada por impedância constante.

PP - Geração ativa.

QQ - Geração reativa.

QSHT - Capacitor (+) ou indutor (-) reguláveis.

SPEV - Variação na tensão terminal por 0.8 seg. para fins de testes com pequenas perturbações (SPEV = 0.9 significa uma variação de 10 %).

Se a barra tem compensador estático, segue os seguintes dados adicionais:

YZERO - Admitância líquida inicial do compensador estático.

YBASE - Potência base do reator do compensador estático.

PCAP - Admitância do capacitor do compensador estático.

RCOMP - Tensão de referência do compensador estático.

De acordo com o diagrama de blocos do compensador segue-se:

GKRC -
GMRC -
TMRC -
CPRC -
CNRC -
TFRC -
YRCMA -
YRCMI -

h. Dados de máquina, governador, controlador ótimo e excitatriz.

BUS - Número da máquina.

CCT - Número do circuito da máquina.

TYPE - Tipo da máquina: 0 - Tensão constante atrás da reatância transitória.

1 - Modelo de terceira ordem.

2 - Modelo de terceira ordem sem regulador.

3 - Modelo de sexta ordem.

R - Resistência da armadura da máquina.

XPD - Reatância transitória no eixo direto.

XQF - Reatância transitória no eixo em quadratura.

XD - Reatância no eixo direto.

H - Constante de inércia.

FMV - Porcentagem de torque ativo.

FMW - Porcentagem da potência reativa.

TD00 - Constante de tempo transitória do eixo direto.

XP - Reatância de Potier.

AX - Constante de saturação.

BX - Constante de saturação.

GTYPE - Repetir o tipo da máquina.

CTYPE - CROSS-FEEDBACK: 0 - Não existente.

1 - Existente.

Dados do governador.

II - Chave: 0 - Desligado.

1 - Ligado.

K1 -

K2 -

TC2 -

LC1 -

LC2 -

TC3 -

THP -

TRH -

TIP -

TLP -

Dados do controlador ótimo.

JJ - Chave: 0 - Desligado.

1 - Ligado.

K11 -

K12 -

K13 -

Dados da excitação (exceto tipos 0 e 2).

KEYS - Tipo do excitador (1,2,3,4,5,6,8).

KA - Ganho do amplificador.

TA - Constante de tempo do amplificador.

VMAX - Limite superior.

VMIN - Limite inferior.

KE - Ganho de excitação.

TE - Constante de tempo da excitação.

AS - Constante de saturação.

BS - Constante de saturação.

MUS - Ganho de realimentação.

TSE - Constante de tempo da realimentação.

KQ2 - Ganho do "lead-lag".

TQ - Constante de "wash-out".

T1 - Constante de tempo.

T2 - Constante de tempo.

TLD1 - Constante de tempo do "lead-lag".

TLD2 - Constante de tempo do "lead-lag".

TLG1 - Sinal estabilizante derivado de: $\theta = \dot{\delta}$.

$i = Pt.$

TSEN - Constante de tempo de medição da tensão.

STQ - Constante de "wash-out" para o controlador ótimo.

TM1 - Constante de tempo.

TM2 - Constante de tempo.

TM3 - Constante de tempo.

TM4 - Constante de tempo.

XVMAX - Limite superior.

XVMIN - Limite inferior.

YVMAX - Limite superior.

YVMIN - Limite inferior.

i. Dados gerais do modelo equivalente.

QB - Número da barra.

NQS - Número de estados do modelo.

QVO - Tensão inicial (Real e imaginário).

QIO - Corrente inicial (Real e imaginário).

j. Dados do elo em corrente contínua.

IB - Barra de interface ao lado do retificador.

LB - Barra de interface ao lado do inversor.

NO - Número de pontes em série.

IC - Tipo de controle: 1 - Controle de potência no retificador e tensão no inversor.

2 - Controle de corrente no retificador e tensão no inversor.

3 - Modo de operação reduzido.

4 - Controle de tensão no retificador e corrente no inversor com "tap" do transformador conversor (inversor) constante.

5 - Controle de tensão no retificador e corrente no inversor com "tap" do transformador conversor (retificador) constante.

6 - Controle de potência e tensão no retificador.

NT - Número de transformadores em série.

NLINE - Número de linhas em série.

IP - Número de pulsos de cada ponte.

NV - Variável que sendo diferente de zero, implica que há polos conversores em paralelo.

RI - Valor que deve dividir a tensão nominal, para se determinar a tensão CC, base.

RR - Valor que sendo diferente de zero, implica que o tap do transformador conversor, está do lado da barra CA.

RD - Resistência da linha CC, em p.u..

VD - Tensão em KV, da linha CC.

VDB - Tensão em KV, por ponte.

SD1 - Potência nominal para o transformador conversor (retificador).

SD2 - Potência nominal para o transformador conversor (inversor).

DVV - Queda de tensão em KV, para pontes em série.

XD1 - Reatância de dispersão do transformador conversor (retificador) em p.u.

TAP1 - Valor inicial para o "tap" (retificador).

ALFA1 - Ângulo de ignição nominal (retificador) em graus.

XD2 - Reatância de dispersão do transformador conversor (inversor) em graus.

TAP2 - Valor inicial para o "tap" (inversor).

ALFA2 - Ângulo de extinção (inversor) em graus.

PD - Potência que se espera transmitir na linha.

ALFA1M - Ângulo de ignição mínimo (retificador) em graus.

ALFA2M - Ângulo de extinção mínimo (inversor) em graus.

TAP1MA - "Tap" do transformador conversor (retificador) máximo.

TAP2MA - "Tap" do transformador conversor (inversor) máximo.

SBDC - Base de potência em MVA.

PD1S - Potência constante em MW.

IDS - Corrente constante em Amperes.

VD1S - Tensão constante para o retificador em p.u..

VD2S - Tensão constante para o inversor em p.u..

ALFA1S - Ângulo de ignição (retificador) constante em graus.

ALFA2S - Ângulo de extinção (inversor) constante em graus.

VBLOCK - Tensão CA de bloqueio do inversor em p.u. (falha de comutação).

VDCT1 - Tensão mínima do inversor em p.u.: - desenergização do elo (característica simples).

- modo de tensão reduzida no inversor (característica composta).

VD2MIN - Tensão de desligamento do inversor em p.u.: - igual a tensão mínima (característica simples).

- menor que a tensão mínima (característica composta).

VDCT2 - Tensão mínima do retificador em p.u.: - zero para característica simples.

- Para característica composta igual a:

$$VDCT2 = (3 / \pi) * X_t * I_{di} \quad (B.1)$$

Onde:

X_t - Reatância do transformador.

Idi - Corrente no inversor.

ALFMIN - Ângulo de ignição mínimo do inversor.

INTER - Número de intervalos de tempo necessário para atingir a ordem de corrente nominal durante o religamento automático do elo.

IDMIN - Corrente mínima transmitível pelo o elo CC.

IDMAX - Corrente máxima transmitível pelo o elo CC.

IDMAT - Máxima variação de corrente, por intervalo de tempo, imposta pela modulação.

TPC - Constante de tempo de medição da tensão do terminal inversor em segundos.

TXDC - Constante de tempo do sistema de aquisição da frequência das barras escolhidas para a retirada do sinal de modulação em corrente, em segundos.

TCDSET - Constante de tempo para a transmissão da ordem de corrente, em segundos.

KC - Ganho da função de transferência do sistema de modulação, em p.u..

T1 - Constante de tempo da função de transferência do sistema de modulação, em segundos (valor igual ou maior que zero).

T2 - Constante de tempo da função de transferência do sistema de modulação, em segundos (valor igual ou maior que zero).

T3 - Constante de tempo da função de transferência do sistema de modulação, em segundos (valor igual ou maior que zero).

T4 - Constante de tempo da função de transferência do sistema de modulação, em segundos (valor igual ou maior que zero).

MOD1 - Barra de retirada do sinal de entrada da modulação em corrente.

MOD2 - Barra de retirada do sinal de entrada da modulação em corrente.

GMIN - Ângulo de extinção mínimo do inversor (modulação em tensão).

GMAX - Ângulo de extinção máximo do inversor (modulação em tensão).

KG - Ganho da função de transferência para a modulação em tensão.

T1 - Constante de tempo da função de transferência do sistema de modulação, em segundos (valor igual ou maior que zero).

T2 - Constante de tempo da função de transferência do sistema de modulação, em segundos (valor igual ou maior que zero).

T3 - Constante de tempo da função de transferência do sistema de modulação, em segundos (valor igual ou maior que zero).

T4 - Constante de tempo da função de transferência do sistema de modulação, em segundos (valor igual ou maior que zero).

B.2. DADOS PARA O SISTEMA DE 3 BARRAS.

Dispomos dos seguintes dados para o sistema de 3 barras, analisado no capítulo 4, os quais serão mostrados na listagem a seguir: (escolheu-se a saída da simulação em modulação em corrente e tensão, utilizando a função (4.6)).

```

|-----|
| DIMENSAO DO SISTEMA
| 3 BARRAS
| 2 MAQUINAS
| 1 LINHAS
| 1 TRANSFORMADORES
| 2 CAPACITORES
| ONTESTE      0 COMP. ESTATICO
| 1 ELO CC
| POTENCIAS, TENSOES, IMPEDANCIAS E ADMITANCIAS PU
| CONSTANTES DE TEMPO EM SEGUNDOS
| ANGULOS EM GRAUS
| CASO CONTRARIO INDICA-SE A UNIDADE
|-----|

```

```

| DADOS DE CONTINGENCIA
| FALTA NA BARRA 3 REMOVIDA EM 0.100 SEGUNDOS
|-----|

```

```

| DADOS DE TEMPO          DEGRAU  SAIDA
| (SEGUNDOS)             DE      PARA  COMPRIMENTO INTERVALO
|-----|
|                          0.000  2.000  0.010  0.010
|-----|

```

```

|-----|
| DADOS DE LINHA
| DA BARRA      PARA BARRA      SERIE
| LINHA        NUMERO          NUMERO          IMPEDANCIA
|-----|
| 1 | 1 ( 0) | 3 ( 0) | 0.0011 0.0063 | 0.00000 0.00000
|-----|

```

```

|-----|
| DADOS DO TRANSFORMADOR
| DA BARRA      PARA BARRA      SERIES
| TRANSF. NUMERO NUMERO          IMPEDANCIA
|-----|
| 1 | 2 ( 0) | 3 ( 0) | 0.0000 0.0014 | 1.00000 0.00000
|-----|

```

```

|-----|
| DADOS DO CAPACITOR E REATORES
| CAP/REAT      BARRA
|                NUMERO
|-----|
| 1 | 3 | ( 0) | 0.0000 30.5000
| 2 | 1 | ( 0) | 0.0000 20.0000
|-----|

```

```

|-----|
| DADOS BARRA
| BARRA NUM      BARRA          CARGA          PROPORCAO
|                NUMERO          VOLTAGEM      POTENCIA      CONSTANTE
|-----|
| 1 ( 1) | 1.00000 | 0.0000 0.0000 | 1.000 | 45.2941 -10.2875
|-----|

```

2 (2)	1.00000	0.0000	0.0000	1.000	6.0000	7.8826
3 (3)	0.98900	50.0000	20.0000	1.000	0.0000	-1.8983

DADOS DO(S) ELO(S) EM CC

DADOS DO ELO (1)

TERMINAL RETIFICADOR - BARRA	1
TERMINAL INVERSOR - BARRA	3
NUMERO DE LINHA(S) EM CC	1
NUMERO DE PULSOS	6
RESISTENCIA DA LINHA	0.0014 [pu]
TENSAO NOMINAL DO ELO	600.0000 [KV]
NUMERO DE PONTES	4
TENSAO POR POLO	600.0000 [KV]
QUEDA DE TENSAO POR PONTE	0.0000 [KV]
NUMERO DE TRANSFORMADORES	1
REATANCIA :	
TRANSFORMADOR RETIFICADOR	0.0032 [pu]
TRANSFORMADOR INVERSOR	0.0032 [pu]
POTENCIA NOMINAL :	
TRANSFORMADOR RETIFICADOR	2500.0000 [MVA]
TRANSFORMADOR INVERSOR	2500.0000 [MVA]
TAP :	
TRANSFORMADOR RETIFICADOR	1.0670
TRANSFORMADOR INVERSOR	1.0887
TAP MAXIMO :	
TRANSFORMADOR RETIFICADOR	1.1500
TRANSFORMADOR INVERSOR	1.1500
ANGULO DE IGNICAO	5.1000 [GRAUS]
ANGULO DE EXTINGUO	17.0000 [GRAUS]
POTENCIA ESPECIFICADA	2500.0000 [MVA]
POTENCIA BASE	100.0000 [MVA]
VALOR DE RR	0.0000
VALOR DE RI	1.3426
TIPO DE CONTROLE	2
CONTROLE DE POTENCIA	2500.0000 [MVA]
CONTROLE DE CORRENTE	4164.0000 [A]
CONTROLE DE TENSAO :	

	RETIFICADOR	-	0.9940 [pu]
	INVERSOR	-	0.9590 [pu]
	CONTROLE DE ANGULO :		
	ANGULO DE IGNICAO	-	5.1000 [GRAUS]
	ANGULO DE EXTINGUICAO	-	17.0000 [GRAUS]
	ANGULO DE IGNICAO MINIMO	-	5.0000 [GRAUS]
	ANGULO DE EXTINGUICAO MINIMO	-	17.0000 [GRAUS]
	TENSAO CC :		
	RETIFICADOR	-	0.9923 [pu]
	INVERSOR	-	0.9590 [pu]
	ANGULO DE COMUTACAO :		
	RETIFICADOR	-	26.2759 [GRAUS]
	INVERSOR	-	18.3809 [GRAUS]
	FATOR DE POTENCIA :		
	RETIFICADOR	-	0.9249
	INVERSOR	-	0.8858
	FALHA DE COMUTACAO :		
	TENSAO DE BLOQUEIO	-	0.6000 [pu]
	DESENERGIZACAO DO ELO :		
	VDCT1	-	0.5000 [pu]
	VDCT2	-	0.6000 [pu]
	VD1MIN	-	0.3000 [pu]
	VD2MIN	-	0.4000 [pu]
	ALFMIN	-	0.0000 [GRAUS]
	MODULACAO EM CORRENTE :		
	SINAL RETIRADO DA BARRA ..	-	2
	INTERVALO DE INTEGRACAO ..	-	7.0000
	CONSTANTES :		
	TPC	-	0.0000 [seg.]
	TDC	-	0.0000 [seg.]
	TOCSET	-	0.0000 [seg.]
	T1	-	0.1130 [seg.]
	T2	-	0.0530 [seg.]
	T3	-	0.0320 [seg.]
	T4	-	0.0200 [seg.]
	KCC	-	400.0000
	CORRENTE MINIMA	-	3000.0000 [A]
	CORRENTE MAXIMA	-	7100.0000 [A]
	CORRENTE MAXIMA (STEP) ...	-	0.0000 [A]
	MODULACAO EM TENSAO :		
	INTERVALO DE INTEGRACAO ..	-	7.0000
	CONSTANTES :		
	T1	-	0.1580 [seg.]
	T2	-	0.0450 [seg.]
	T3	-	0.0320 [seg.]
	T4	-	0.0200 [seg.]

| KCG - 400.0000
 | GAMA MINIMO - 17.0000 [GRAUS]
 | GAMA MAXIMO - 27.0000 [pu]
 |
 | DESBLOQUEIO DO ELO :
 | INTERVALO DE CORRENTE - 5.0000

DADOS DAS MAQUINAS

DADOS DA MAQUINA 1

|----- CONSTANTE DE INERCIA = 999.99990
 |----- FREQUENCIA = 60.00000
 |
 |----- NUMERO DE CIRCUITOS DA MAQUINA = 1
 |----- PORCENTAGENS : TORQUE ATIVO = 1.00000
 | POTENCIA REATIVA = 1.00000
 |
 |----- CONSTANTES DE SATURACAO : Ax = 0.00000
 | BX = 0.00000
 |
 |----- REATANCIA DE POTIER = 0.00000
 |----- REPRESENTACAO DA MAQUINA : TENSAO CONSTANTE ATRAS
 |
 | RESISTENCIAS, REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO NOS EIXOS d E q
 |
 | RESISTENCIA = 0.00000
 |
 | -- REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO --
 |
 | EIXO DIRETO : REGIME PERMANENTE Xd = 0.00000
 | TRANSITORIO Xid = 0.00001
 | Tido = 0.00000
 |
 | EIXO QUADRATURA REGIME PERMANENTE Xqf = 0.00000

DADOS DA MAQUINA 2

|----- CONSTANTE DE INERCIA = 31.66000
 |----- FREQUENCIA = 60.00000

```

|----- NUMERO DE CIRCUITOS DA MAQUINA = 1
|
|----- PORCENTAGENS : TORQUE ATIVO = 1.00000
|                       POTENCIA REATIVA = 1.00000
|
|----- CONSTANTES DE SATURACAO : Ax = 0.00000
|                                   BX = 0.00000
|
|----- REATANCIA DE POTIER = 0.00000
|
|----- REPRESENTACAO DA MAQUINA : MODELO DE ORDEM TRES
|
| RESISTENCIAS, REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO NOS EIXOS d E q
|
| RESISTENCIA = 0.00000
|
| -- REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO --
|
| EIXO DIRETO : REGIME PERMANENTE Xd = 0.01460
|                TRANSITORIO Xid = 0.04870
|                Tido = 7.40000
|
| EIXO QUADRATURA REGIME PERMANENTE Xqf = 0.10500

```

----- DADOS DO GOVERNADOR DE VELOCIDADE -----

GOVERNADOR DE VELOCIDADE : DESATIVADO

PARAMETROS DO GOVERNADOR :

K1	K2	TC2	LC1	LC2	TC3
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

THP	TRH	TIP	TLP	FHP	FIP	FLP
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

----- DADOS DO SISTEMA DE EXCITACAO -----

EXCITADOR TIPO 1

DADOS DO AMPLIFICADOR -----

Ka	Ta	Vmax	Vmin
400.00000	0.05000	4.14000	-4.14000

DADOS DA EXCITADOR -----

Ke	Te	As	Bs
-0.24300	0.95000	0.00000	0.00000

|
----- DADOS DA REALIMENTACAO -----

Mus	Tse	
0.04000	1.00000	

|
----- DADOS DO LEAD-LAG -----

T1	T2	
0.00000	0.00000	

|
| ----- DADOS DOS SINAIS ESTABILIZADORES -----
|

--- CLASSICO ---

SINAL ESTABILIZADOR DERIVADO : DESATIVADO - ANG
DESATIVADO - TEN

LEAD-LAG :

GANHO KQ2 = 0.00000
CONSTANTES DE TEMPO : TLD1 = 0.00000
TLD2 = 0.00000
CONSTANTE DE TEMPO DA MEDICAO DE TENSAO = 0.00000
CONSTANTE DE TEMPO DO WASH-OUT-CLASSICO = 0.00000

--- OTIMO ---

CONTROLADOR DESATIVADO

| GANHOS DO SINAL |
K1 K2 K3

0.00000	0.00000	0.00000	
---------	---------	---------	--

CONSTANTE DE TEMPO DO WASH-OUT-OTIMO 0.00000

| - DADOS COMPLEMENTARES PARA OS SISTEMAS DO TIPO 3 OU 4
|

|
----- CONSTANTES DE TEMPO

TM1	TM2	TM3	TM4	
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	

|
----- LIMITADORES

XVMAX	XVMIN	YVMAX	YVMIN	
-------	-------	-------	-------	--

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

B.3. DADOS DO SISTEMA DE 13 BARRAS.

Os dados de entrada e saída do sistema de 13 barras são listados a seguir; para a simulação combinada em corrente e tensão, utilizando a função (4.6)

DIMENSAO DO SISTEMA

13 BARRAS

5 MAQUINAS

16 LINHAS

3 TRANSFORMADORES

2 CAPACITORES

ONTESTE 0 COMP. ESTATICO

1 ELO CC

POTENCIAS, TENSOES, IMPEDANCIAS E ADMITANCIAS PU

CONSTANTES DE TEMPO EM SEGUNDOS

ANGULOS EM GRAUS

CASO CONTRARIO INDICA-SE A UNIDADE

DADOS DE CONTINGENCIA

FALTA NA BARRA 13 REMOVIDA EM 0.050 SEGUNDOS

DADOS DE TEMPO

(SEGUNDOS) DE PARA DEGRAU SAIDA
COMPRIMENTO INTERVALO

0.000 2.000 0.010 0.010

DADOS DE LINHA

LINHA	DA BARRA NUMERO	PARA BARRA NUMERO	SERIE IMPEDANCIA	PARALELO ADMITANCIA
1	7(0)	13(0)	0.0011 0.0063	0.00000 0.00000
2	13(0)	8(0)	0.0012 0.0173	0.00000 0.44420
3	13(0)	9(0)	0.0008 0.0129	0.00000 0.38340
4	13(0)	10(0)	0.0019 0.0262	0.00000 0.62060
5	11(0)	6(0)	0.0008 0.0128	0.00000 0.06200
6	6(0)	2(0)	0.0074 0.0444	0.00000 0.00000
7	6(0)	10(0)	0.0003 0.0652	0.00000 0.00000
8	6(0)	8(0)	0.0015 0.0567	0.00000 0.00000
9	8(0)	9(0)	0.0031 0.0668	0.00000 0.00000
10	8(0)	10(0)	0.0015 0.0220	0.00000 0.00000
11	8(0)	3(0)	0.0253 0.0584	0.00000 0.00000
12	9(0)	10(0)	0.0009 0.1510	0.00000 0.00000
13	9(0)	3(0)	0.0172 0.0486	0.00000 0.00000
14	10(0)	12(0)	0.0011 0.0063	0.00000 0.00000

15	10(0)	5(0)	0.0020	0.0050	0.00000	0.00000
16	12(0)	3(0)	0.0023	0.0128	0.00000	0.00000

DADOS DO TRANSFORMADOR

DA BARRA	PARA BARRA	SERIES	CONTROLANDO
TRANSF. NUMERO	NUMERO	IMPEDANCIA	PROPORCAO
1 (0)	7 (0)	0.0000 0.0014	1.00000 0.00000
2 (0)	4 (0)	0.0000 0.0071	1.00000 0.00000
3 (0)	11 (0)	0.0000 0.0046	1.00000 0.00000

DADOS DO CAPACITOR E REATORES

CAP/REAT	BARRA	ADIMITANCIA
NUMERO	NUMERO	
1 (0)	7	0.0000 20.0000
2 (0)	13	0.0000 30.5000

DADOS BARRA

BARRA NUM	BARRA VOLTAGEM	CARGA POTENCIA	PROPORCAO CONSTANTE IMPEDANCIA	GERADA POTENCIA
1 (1)	1.03600	0.0000	0.0000 1.000	68.6773 7.5404
2 (2)	1.00000	0.0000	0.0000 1.000	3.0000 0.2856
3 (3)	1.00000	30.0000	0.0000 1.000	5.0000 17.1325
4 (4)	1.00000	0.0000	0.0000 1.000	0.0000 0.7044
5 (5)	1.02000	0.0000	0.0000 1.000	7.3800 5.2776
6 (6)	0.97399	4.7200	0.0000 1.000	0.0000 0.0000
7 (7)	1.03000	0.0000	0.0000 1.000	0.0000 -6.6743
8 (8)	0.97383	7.0000	0.0000 1.000	0.0000 0.0000
9 (9)	0.97788	3.0000	0.0000 1.000	0.0000 0.0000
10 (10)	0.98000	0.0000	0.0000 1.000	0.0000 0.3257
11 (11)	0.98637	15.0000	0.0000 1.000	0.0000 0.0000
12 (12)	0.95763	16.0000	0.0000 1.000	0.0000 0.0000
13 (13)	0.99500	0.0000	0.0000 1.000	0.0000 -2.2058

DADOS DO(S) ELO(S) EM CC

DADOS DO ELO (1)

TERMINAL RETIFICADOR - BARRA 7

TERMINAL INVERSOR - BARRA 13

NUMERO DE LINHA(S) EM CC - 1

NUMERO DE PULSOS	-	6	
RESISTENCIA DA LINHA	-	0.0014	[pu]
TENSAO NOMINAL DO ELO	-	600.0000	[KV]
NUMERO DE PONTES	-	4	
TENSAO POR POLO	-	600.0000	[KV]
QUEDA DE TENSAO POR PONTE	-	0.0000	[KV]
NUMERO DE TRANSFORMADORES	-	1	
REATANCIA :			
TRANSFORMADOR RETIFICADOR	-	0.0032	[pu]
TRANSFORMADOR INVERSOR	-	0.0032	[pu]
POTENCIA NOMINAL :			
TRANSFORMADOR RETIFICADOR	-	2500.0000	[MVA]
TRANSFORMADOR INVERSOR	-	2500.0000	[MVA]
TAP :			
TRANSFORMADOR RETIFICADOR	-	1.0974	
TRANSFORMADOR INVERSOR	-	1.1208	
TAP MAXIMO :			
TRANSFORMADOR RETIFICADOR	-	1.1500	
TRANSFORMADOR INVERSOR	-	1.1500	
ANGULO DE IGNICAO	-	13.4000	[GRAUS]
ANGULO DE EXTINCAO	-	17.0000	[GRAUS]
POTENCIA ESPECIFICADA	-	2500.0000	[MVA]
POTENCIA BASE	-	100.0000	[MVA]
VALOR DE RR	-	0.0000	
VALOR DE RI	-	1.3426	
TIPO DE CONTROLE	-	2	
CONTROLE DE POTENCIA	-	2500.0000	[MVA]
CONTROLE DE CORRENTE	-	4164.0000	[A]
CONTROLE DE TENSAO :			
RETIFICADOR	-	1.0010	[pu]
INVERSOR	-	0.9960	[pu]
CONTROLE DE ANGULO :			
ANGULO DE IGNICAO	-	13.4000	[GRAUS]
ANGULO DE EXTINCAO	-	17.0000	[GRAUS]
ANGULO DE IGNICAO MINIMO	-	5.0000	[GRAUS]
ANGULO DE EXTINCAO MINIMO	-	17.0000	[GRAUS]
TENSAO CC :			
RETIFICADOR	-	1.0293	[pu]
INVERSOR	-	0.9960	[pu]
ANGULO DE COMUTACAO :			
RETIFICADOR	-	19.6203	[GRAUS]

INVERSOR	-	17.8967 [GRAUS]	
FATOR DE POTENCIA :			
RETIFICADOR	-	0.9056	
INVERSOR	-	0.8882	
FALHA DE COMUTACAO :			
TENSAO DE BLOQUEIO	-	0.6000 [pu]	
DESENERGIZACAO DO ELO :			
VDCT1	-	0.5000 [pu]	
VDCT2	-	0.6000 [pu]	
VD1MIN	-	0.3000 [pu]	
VD2MIN	-	0.4000 [pu]	
ALFMIN	-	0.0000 [GRAUS]	
MODULACAO EM CORRENTE :			
SINAL RETIRADO DA BARRA ..	-	2	
INTERVALO DE INTEGRACAO ..	-	7.0000	
CONSTANTES :			
TPC	-	0.0000 [seg.]	
TDC	-	0.0000 [seg.]	
TDCSET	-	0.0000 [seg.]	
T1	-	0.1130 [seg.]	
T2	-	0.0530 [seg.]	
T3	-	0.0320 [seg.]	
T4	-	0.0200 [seg.]	
KCC	-	800.0000	
CORRENTE MINIMA	-	3000.0000 [A]	
CORRENTE MAXIMA	-	7100.0000 [A]	
CORRENTE MAXIMA (STEP) ...	-	0.0000 [A]	
MODULACAO EM TENSAO :			
INTERVALO DE INTEGRACAO ..	-	7.0000	
CONSTANTES :			
T1	-	0.1580 [seg.]	
T2	-	0.0450 [seg.]	
T3	-	0.0320 [seg.]	
T4	-	0.0200 [seg.]	
KCG	-	800.0000	
GAMA MINIMO	-	17.0000 [GRAUS]	
GAMA MAXIMO	-	27.0000 [pu]	
DESBLOQUEIO DO ELO :			
INTERVALO DE CORRENTE	-	5.0000	

DADOS DAS MAQUINAS

DADOS DA MAQUINA 1

----- CONSTANTE DE INERCIA = 1000.00000
----- FREQUENCIA = 60.00000

----- NUMERO DE CIRCUITOS DA MAQUINA = 1

----- PORCENTAGENS : TORQUE ATIVO = 1.00000
POTENCIA REATIVA = 1.00000

----- CONSTANTES DE SATURACAO : Ax = 0.00000
BX = 0.00000

----- REATANCIA DE POTIER = 0.00000

----- REPRESENTACAO DA MAQUINA : TENSAO CONSTANTE ATRAS

RESISTENCIAS, REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO NOS EIXOS d E q

RESISTENCIA = 0.00000

-- REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO --

EIXO DIRETO : REGIME PERMANENTE Xd = 0.00000
TRANSITORIO Xid = 0.00001
Tido = 0.00000

EIXO QUADRATURA REGIME PERMANENTE Xqf = 0.00000

DADOS DA MAQUINA 2

----- CONSTANTE DE INERCIA = 4.40000
----- FREQUENCIA = 60.00000

----- NUMERO DE CIRCUITOS DA MAQUINA = 1

----- PORCENTAGENS : TORQUE ATIVO = 1.00000
POTENCIA REATIVA = 1.00000

----- CONSTANTES DE SATURACAO : Ax = 0.00000
BX = 0.00000

----- REATANCIA DE POTIER = 0.00000

----- REPRESENTACAO DA MAQUINA : MODELO DE ORDEM SEIS

RESISTENCIAS, REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO NOS EIXOS d E q

RESISTENCIA = 0.00000

-- REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO --

EIXO DIRETO : REGIME PERMANENTE Xd = 0.00430
TRANSITORIO Xld = 0.01220
Tldo = 9.50000

EIXO QUADRATURA REGIME PERMANENTE Xqf = 0.00430

----- DADOS ADICIONAIS P/ O MODELO DE ORDEM SEIS -----

---EIXO DIRETO : REATANCIA X"D = 0.00330
CONSTANTE DE TEMPO T"DO = 0.18000

---EIXO QUADRATURA : REATANCIAS Xlq = 0.00950
CONSTANTES DE TEMPO : Tlqo = 9.50000
T"q = 0.36000

----- REATANCIA DE DISPERSAO = 0.00000

----- DADOS DO GOVERNADOR DE VELOCIDADE -----

GOVERNADOR DE VELOCIDADE : DESATIVADO

----- PARAMETROS DO GOVERNADOR :

K1	K2	TC2	LC1	LC2	TC3
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

THP	TRH	TIP	TLP	FHP	FIP	FLP
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

----- DADOS DO SISTEMA DE EXCITACAO-----

----- EXCITADOR TIPO 1

----- DADOS DO AMPLIFICADOR -----

Ka	Ta	Vmax	Vmin	I
400.00000	0.10000	6.00000	-9.99990	I

----- DADOS DA EXCITADOR-----

Ke	Te	As	Bs	I
1.00000	1.00000	0.00000	0.00000	I

----- DADOS DA REALIMENTACAO -----

Mus	Tse	
1.00000	1.00000	

----- DADOS DO LEAD-LAG -----

T1	T2	
0.00000	0.00000	

----- DADOS DOS SINAIS ESTABILIZADORES -----

--- CLASSICO ---

SINAL ESTABILIZADOR DERIVADO : DESATIVADO - ANG
DESATIVADO - TEN

LEAD-LAG :

GANHO KQ2 = 0.00000
CONSTANTES DE TEMPO : TLD1 = 0.00000
TLD2 = 0.00000
CONSTANTE DE TEMPO DA MEDICAO DE TENSAO = 0.00000
CONSTANTE DE TEMPO DO WASH-OUT-CLASSICO = 0.00000

--- OTIMO ---

CONTROLADOR DESATIVADO

GANHOS DO SINAL			
K1	K2	K3	
0.00000	0.00000	0.00000	

CONSTANTE DE TEMPO DO WASH-OUT-OTIMO 0.00000

----- DADOS COMPLEMENTARES PARA OS SISTEMAS DO TIPO 3 OU 4 -----

----- CONSTANTES DE TEMPO -----

TM1	TM2	TM3	TM4	
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	

----- LIMITADORES -----

XVMAX	XVMIN	YVMAX	YVMIN	
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

DADOS DA MAQUINA 3

----- CONSTANTE DE INERCIA = 1000.00000
 ----- FREQUENCIA = 60.00000
 ----- NUMERO DE CIRCUITOS DA MAQUINA = 1
 ----- PORCENTAGENS : TORQUE ATIVO = 1.00000
 POTENCIA REATIVA = 1.00000
 ----- CONSTANTES DE SATURACAO : Ax = 0.00000
 BX = 0.00000
 ----- REATANCIA DE POTIER = 0.00000
 ----- REPRESENTACAO DA MAQUINA : TENSAO CONSTANTE ATRAS
 RESISTENCIAS, REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO NOS EIXOS d E q
 RESISTENCIA = 0.00000
 -- REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO --
 EIXO DIRETO : REGIME PERMANENTE Xd = 0.00000
 TRANSITORIO Xid = 0.00001
 Tido = 0.00000
 EIXO QUADRATURA REGIME PERMANENTE Xqf = 0.00000

DADOS DA MAQUINA 4

----- CONSTANTE DE INERCIA = 1.60000
 ----- FREQUENCIA = 60.00000
 ----- NUMERO DE CIRCUITOS DA MAQUINA = 1
 ----- PORCENTAGENS : TORQUE ATIVO = 1.00000
 POTENCIA REATIVA = 1.00000
 ----- CONSTANTES DE SATURACAO : Ax = 0.00000
 BX = 0.00000
 ----- REATANCIA DE POTIER = 0.01030
 ----- REPRESENTACAO DA MAQUINA : MODELO DE ORDEM TRES

RESISTENCIAS, REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO NOS EIXOS d E q

RESISTENCIA = 0.00000

-- REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO --

EIXO DIRETO : REGIME PERMANENTE Xd = 0.14170
 TRANSITORIO Xid = 0.03080
 Tido = 9.00000

EIXO QUADRATURA REGIME PERMANENTE Xqf = 0.08330

----- DADOS DO GOVERNADOR DE VELOCIDADE -----

GOVERNADOR DE VELOCIDADE : DESATIVADO

PARAMETROS DO GOVERNADOR :

K1	K2	TC2	LC1	LC2	TC3
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

THP	TRH	TIP	TLP	FHP	FIP	FLP
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

----- DADOS DO SISTEMA DE EXCITACAO -----

----- EXCITADOR TIPO 1

----- DADOS DO AMPLIFICADOR -----

Ka	Ta	Vmax	Vmin
400.00000	0.10000	8.00000	-9.99990

----- DADOS DA EXCITADOR -----

Ke	Te	As	Bs
1.00000	1.00000	0.00000	0.00000

----- DADOS DA REALIMENTACAO -----

Mus	Tse
1.00000	1.00000

----- DADOS DO LEAD-LAG -----

T1	T2

| 0.00000 0.00000 |

----- DADOS DOS SINAIS ESTABILIZADORES -----

--- CLASSICO ---

SINAL ESTABILIZADOR DERIVADO : DESATIVADO - ANG
DESATIVADO - TEN

LEAD-LAG :

GANHO KQ2 = 0.00000
CONSTANTES DE TEMPO : TLD1 = 0.00000
TLD2 = 0.00000
CONSTANTE DE TEMPO DA MEDICAO DE TENSAO = 0.00000
CONSTANTE DE TEMPO DO WASH-OUT-CLASSICO = 0.00000

--- OTIMO ---

CONTROLADOR DESATIVADO

GANHOS DO SINAL |

| K1 K2 K3 |

| 0.00000 0.00000 0.00000 |

CONSTANTE DE TEMPO DO WASH-OUT-OTIMO 0.00000

- DADOS COMPLEMENTARES PARA OS SISTEMAS DO TIPO 3 OU 4

--- CONSTANTES DE TEMPO

| TM1 TM2 TM3 TM4 |
| 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 |

--- LIMITADORES

| XVMAX XVMIN YVMAX YVMIN |
| 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 |

DADOS DA MAQUINA 5

|-----
CONSTANTE DE INERCIA = 5.07000

```

|----- FREQUENCIA = 60.00000
|
|----- NUMERO DE CIRCUITOS DA MAQUINA = 1
|
|----- PORCENTAGENS : TORQUE ATIVO = 1.00000
|                       POTENCIA REATIVA = 1.00000
|
|----- CONSTANTES DE SATURACAO : Ax = 0.00000
|                                   BX = 0.00000
|
|----- REATANCIA DE POTIER = 0.00000
|
|----- REPRESENTACAO DA MAQUINA : MODELO DE ORDEM TRES
|
| RESISTENCIAS, REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO NOS EIXOS d E q
|
| RESISTENCIA = 0.00000
|
| -- REATANCIAS E CONSTANTES DE TEMPO --
|
| EIXO DIRETO : REGIME PERMANENTE Xd = 0.12210
|                TRANSITORIO Xld = 0.01360
|                Tldo = 7.60000
|
| EIXO QUADRATURA REGIME PERMANENTE Xqf = 0.09230

```

----- DADOS DO GOVERNADOR DE VELOCIDADE -----

GOVERNADOR DE VELOCIDADE : DESATIVADO

PARAMETROS DO GOVERNADOR :

K1	K2	TC2	LC1	LC2	TC3
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

THP	TRH	TIP	TLP	FHP	FIP	FLP
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

----- DADOS DO SISTEMA DE EXCITACAO -----

EXCITADOR TIPO 1

DADOS DO AMPLIFICADOR -----

Ka	Ta	Vmax	Vmin
400.00000	0.10000	6.00000	-9.99990

----- DADOS DA EXCITADOR -----

I Ke Te As Bs I
I 1.00000 1.00000 0.00000 0.00000 I

----- DADOS DA REALIMENTACAO -----

Mus Tse I
1.00000 1.00000 I

----- DADOS DO LEAD-LAG -----

T1 T2 I
0.00000 0.00000 I

----- DADOS DOS SINAIS ESTABILIZADORES -----

--- CLASSICO ---

SINAL ESTABILIZADOR DERIVADO : DESATIVADO - ANG
DESATIVADO - TEN

LEAD-LAG :

GANHO KQ2 = 0.00000
CONSTANTES DE TEMPO : TLD1 = 0.00000
TLD2 = 0.00000
CONSTANTE DE TEMPO DA MEDICAO DE TENSAO = 0.00000
CONSTANTE DE TEMPO DO WASH-OUT-CLASSICO = 0.00000

--- OTIMO ---

CONTROLADOR DESATIVADO

GANHOS DO SINAL I
K1 K2 K3 I

0.00000 0.00000 0.00000 I

CONSTANTE DE TEMPO DO WASH-OUT-OTIMO 0.00000

----- DADOS COMPLEMENTARES PARA OS SISTEMAS DO TIPO 3 OU 4 -----

----- CONSTANTES DE TEMPO -----

TM1 TM2 TM3 TM4 I
0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 I

----- LIMITADORES -----

	XVMAX	XVMIN	YVMAX	YVMIN	
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

|
|
|
|

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Anderson, P. M. e A. A. Fouad: "Power System Control and Stability." (1977). The Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA.
- 2 - Arrilaga, J. e J. G. Barros, H. J. Al-Khasnali: "Dynamic Modelling of Single Generators Connected to HVDC Converter." (1978). IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS - 97.
- 3 - Barros, João G. C. e Glória S. G.: " Simulação Dinâmica de Grupos Conversores CA/CC Operando a 12 pulsos." (1979). V SNPTEE.
- 4 - Carroll, D. P. e C. M. Ong.: " Coordinated Power Modulation in Multiterminal HVDC Systems." (1981). IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS 100, Nº 3.
- 5 - Carvalho, E. M. R.: " Fluxo de carga CA/CC." (1986). UFPB - BR.
- 6 - Carvalho, E. M. R.: " Linhas de Transmissão em corrente contínua." (1987). UFPB - BR.
- 7 - Cresap, R. L., D. N. Scott, W. A. Mittelstadi, C. W. Taylor: " Operating Experience With Modulation of the Pacific HVDC Interfície." (1978). IEEE Transactions on Power Apparatus and System. Vol. PAS - 97. Nº 4.
- 8 - De La-rocque, J. E. M.: " Implementação de um Modelo para o Elo de Transmissão CC em um Programa de Estabilidade."

- (1983). Tese de Mestrado - EFEI.
- 9 - Erickson, Kjell, Donald M., Maurício Z. T. F., Roberto M. F., Sérgio O. F., Helio D. P., Maria J. X.: "Desempenho do Sistema de Transmissão CCAT de Itaipu" - Estagio Inicial. VIII SNPTEE.
- 10 - Figueiredo, Adhemar G. e Nigel L. S.: "MASTER CONTROL" CCAT para Estações Conversoras do Sistema Itaipu." (1981). VI SNPTEE.
- 11 ?- Figueiredo, Erli F.: "Sistema de Transmissão de Itaipu - Comportamento Dinâmico dos Sistemas CA/CC." (1981). VI SNPTEE.
- 12 - Gogo, J. R.. "Inclusão de Sistemas de Corrente Contínua em Estudos de Fluxo de Carga e Estabilidade Transitória." (1986). UERJ.
- 13 - Kimbark, Edward W.: "Direct Current Transmission. Vol. I." (1971). John Wiley & Sons.
- 14 - Klein, J. W., C. M. Ong, P. C. Krause, R. A. Fernandes. "Dynamic Stability Assessment of a Parrallel AC-DC Power System." (1977). IEEE Vol. PAS 96.
- 15 - Mota, Wellington S.: "Dinâmica de Sistema de Potência." (1986). UFPB - BR.
- 16 - Reeve, J. e R. Adapa - "A New Approach to Dynamic Analysis of AC Networks Incorporating Detailed of DC Systems. Part I: Principles and Implementation." (1988). IEEE. Vol. PWRD.
- 17 - Reeve, J. e R. Adapa - "A New Approach to Dynamic Analysis of AC Networks Incorporating Detailed of DC Systems. Part II: Aplicacion to Interaction of DC and Weak AC System." (1988). IEEE. Vol. PWRD.

- 18 - Uhlmann, Erich: "Power Transmission by Direct Current."
(1975). Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- 19 - Volvos, N., G. Galanos, G. Giannakopoulos: " A Mathematical
Model for Dynamic Simulation of HVDC System." (1983). IEEE Vol.
PAS 102.