

CONSULTA
FD-1328

São Paulo, 1991

Orientador: Prof. Dr. Darci Odloak

Dissertação apresentada ao Depto. de
Eng. Mecânica da Escola Politécnica
da USP para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

CONTROLE PREDITIVO APLICADO A UMA
INSTALAÇÃO COM COMPRESSOR CENTRÍFUGO

MANOEL L. M. DE CARVALHO JR.
Eng. Mecânico, Universidade de São Paulo, 1981

FD-1328

BC

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Darci Odloak , pelo apoio e orientação.

Aos amigos Demétrios, Sinatora, Reinaldo e Matone, pelo auxílio.

Aos colegas e funcionários dos Departamentos de Engenharia Mecânica e Química da Escola Politécnica, pelo apoio.

Surge and rotational speed limits are problems in controlling centrifugal compressors. Usually these equipments are controlled by override integrated PID loops. DMC is a model predictive control algorithm which has been increasingly used in industry. The model used by DMC is easily obtainable and to execute the algorithm, which has a closed form, is fast. But to implement restrictions in a straightforward way in DMC is impossible. In this work, the model of a plant having a centrifugal compressor is developed, a method for implementing restrictions in DMC is presented, the DMC with restrictions is applied in the plant model, override integrated PID is applied in the plant model too, and DMC performance is compared with PID's.

ABSTRACT

O controle de compressores centrífugos envolve problemas de instabilidade em baixa vazão e limites de rotação. Normalmente estes equipamentos são controlados por malhas de controladores PID conjugados por override. O DMC é um algoritmo de controle com modelo preditivo que tem encontrado emprego crescente na indústria. O modelo usado pelo DMC é fácil de levantar e a execução do algoritmo, que apresenta uma forma fechada, é rápida. Neste trabalho, desenvolvemos o modelo de uma instalação com um compressor centrífugo, apresentamos uma maneira de implementar restrições no DMC, aplicamos o DMC com restrições no modelo da instalação, aplicamos também o PID com override no modelo da instalação e comparamos o desempenho do DMC com o do PID.

RESUMO

SÍMBOLOS

A	-	matriz de coeficientes de degrau do modelo de convolução discreta.
a	-	coeficiente de degrau do modelo de convolução discreta
B	-	Mol/(ZR).
C	-	número de variáveis controladas da URC.
ccv ³	-	señal de controle da válvula CV3.
ctem	-	constante de tempo da turbina e compressor.
ctm ⁸	-	constante de tempo da malha de FC-2.
ctm ¹⁰	-	constante de tempo da malha de CV2.
C _p	-	calor específico à pressão constante.
C _v	-	calor específico à volume constante.
cta	-	intervalo de amostragem.
e	-	vetor de erros das variáveis controladas .
e	-	erro da variável controlada no instante t.
e _a	-	erro da variável controlada no instante t-T.
e _{aa}	-	erro da variável controlada no instante t-2T.
E _n	-	potência politrópica do compressor.
e _n	-	E _n /m.
e _p	-	eficiência politrópica.
f _p	-	coeficiente de vazão.
fc	-	fator de convergência.
Gp(z)	-	função de transferência de processo.
H	-	matriz de coeficientes de impulso do modelo de convolução discreta.
H(z)	-	função de transferência de processo.
H̃(z)	-	função de transferência do modelo do processo.
h	-	entalpia por unidade de massa (cap. 3);
	-	coeficientes de impulso do modelo de convolução discreta (caps. 4 e 5).
ISE	-	erro quadrático integral.
K	-	C _p /C _v .
K _c	-	ganho proporcional do controlador PID.
L	-	ep K / (ep K + 1) (cap 3);

número de ações de controle calculadas pelo DMC (caps. 4 e 6).

M	-	massa (cap. 3);
	-	número de variáveis manipuladas da URC (cap. 4).
m	-	vazão em massa.
Mol	-	peso molecular.
MOV	-	movimento das variáveis manipuladas.
N	-	número de instantes futuros usados na construção do modelo de de convolução discreta da URC.
n	-	rotação.
P	-	pressão.
Q	-	matriz dos pesos das variáveis controladas.
q	-	vazão em volume.
R	-	matriz de pesos dos movimentos das variáveis manipuladas.
R	-	constante universal dos gases (cap. 3);
	-	número de erros futuros usados pelo DMC (caps. 4 e 6).
T	-	temperatura (cap. 3);
	-	intervalo de amostragem (caps. 4, 5, 6 e 7).
t	-	tempo.
u	-	energia interna por unidade de massa (cap. 3);
	-	variável manipulada (caps. 4 e 5).
u ^d	-	valor da variável manipulada após um degrau.
u ^o	-	valor da variável manipulada antes de um degrau.
V	-	volume.
v	-	variável a convergir.
X	-	variável.
x ^d	-	$(K-1)/(K e^p)$.
W	-	potência total de eixo do compressor.
y	-	variável controlada.
\tilde{y}	-	valor predito da variável controlada.
y ^o	-	valor da variável controlada antes de um transiçõrio.
y ^r	-	valor de regime da variável controlada após um transiçõrio.
y ^{sp}	-	set-point.
Z	-	fator de compressibilidade.
z	-	variável no espaço da transformada z (caps. 4 e 5).
α	-	coeficiente de velocidade de aproximação da variável controlada de seu setpoint (usada no DMC).
Δu	-	variação da variável manipulada no instante t.
p	-	densidade.

t_p
 t_i

- tempo derivativo do controlador PID.
- tempo integral do controlador PID.

Notas: 1. Os símbolos em letras minúsculas sublinhadas (ex: \underline{e}) são vetores.

2. Os símbolos em letras maiúsculas sublinhadas (ex: \underline{A}) são matrizes.

3. Os símbolos em letras minúsculas em negrito (ex: \mathbf{e}) são vetores compostos por outros vetores.

4. Os símbolos em letras maiúsculas em negrito (ex: \mathbf{A}) são matrizes compostas por outras matrizes.

ÍNDICE

i	AGRADECIMENTOS
ii	RESUMO
ii	ABSTRACT
iii	SÍMBOLOS
vi	ÍNDICE
viii	LISTA DE FIGURAS
i	1. INTRODUÇÃO
1	1.1 . Objetivo
2	1.2 . Justificativa
3	1.3 . Metodologia
4	1.4 . Sumário Estruturado
8	2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA
12	3. DESENVOLVIMENTO DO MODELO DA INSTALAÇÃO COM COMPRESSOR CENTRÍFUGO
17	3.1 Operação do Sistema
18	3.2 Desenvolvimento do Modelo
36	3.3 Modelo Completo da URC
44	3.4 Desenvolvimento do Algoritmo p/ Simulação da URC
49	3.5 Parâmetros de Simulação da URC
52	3.7 O Programa CURC
54	3.8 Resultados das Simulações
99	4. APLICAÇÃO DO CONTROLE PREDITIVO (DMC) NA INSTALAÇÃO COM COMPRESSOR CENTRÍFUGO

299	REFERÊNCIAS
298	7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros
296	7.1 Conclusões
296	7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS
239	Desempenho do DMC
236	6.2 Análise da Influência dos Parâmetros do
	6.1 Comparação dos Desempenhos do PID e do DMC
	6. COMPARAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS CONTROLES DMC E PID COM OVERRIDE NA INSTALAÇÃO COM COMPRESSOR CENTRÍFUGO
207	5.4 Ajuste dos Parâmetros dos Controladores PID
206	5.3 A Rotina CONTROL
205	5.2 A Rotina PID
202	5.1 Esquema de Controle PID com Override da URC
201	5. APLICAÇÃO DO CONTROLE PID COM OVERRIDE NA INSTALAÇÃO COM COMPRESSOR CENTRÍFUGO
139	4.12 Ajuste do Controlador DMC
138	4.11 As Rotinas RESTRIÇÃO E GERA_K
136	4.10 A Rotina DMC
135	4.9 A Rotina Controle
131	4.8 O Modelo de Convolução Discreta da URC
124	4.7 Objetivos de Controle, Restrições, Setpoints, Graus de Liberdade e Equação do DMC na URC
122	4.6 Os Parâmetros do DMC
117	4.5 Propriedades do DMC
114	4.4 Implementação de Restrições no DMC
104	4.3 O DMC
101	4.2 O MCD
100	4.1 Os Algoritmos de Controle Preditivo (MPC) e o DMC

LISTA DE FIGURAS

13	3.1 Fluxograma da Unidade de Reformação Catalítica da RBPC
23	3.2 Tanque TQ1 e controlador PCI
24	3.3 Tanque TQ2
27	3.4 Compressor
31	3.5 Trocador de calor
35	3.6 CV1 e FC2
58	3.7 m ⁶ -20%
60	3.8 m ⁶ 20%
62	3.9 cm ¹⁰ 20%
64	3.10 cm ¹⁰ -20%
66	3.11 ccv ³ -20%
68	3.12 ccv ³ 20%
70	3.13 f 35%
72	3.14 f -35%
74	3.15 cm ⁸ 1700%
101	4.1 Função de transferência de um processo
117	4.2 Malha de controle clássica
117	4.3 Malha de controle modificada
118	4.4 Malha de controle proposta pelo IMC
119	4.5 Malha de controle do DMC colocada na forma do IMC
130	4.6 Esquema de controle DMC na URC
132	4.7 Efeito do fator de escala em uma variável manipulada
132	4.8 Efeito do fator de escala em uma variável controlada
142	4.9 — R = 5 e L = 1 ————— R = 10 e L = 1 (degrau de 10% no setpoint de P ^{TQ1} ; tempo de simulação 1200s; α = 0,5 I; R = 1; Q = 1)
144	4.10 ————— α = 0,5 I ————— α = 0,0 I (degrau de 10% no setpoint de P ^{TQ1} ; tempo de simulação 1200s; R = 5; L = 3; R = 1; Q = 1)
146	4.11 ————— r ^{cm10} = 1; r ^{ccv3} = 20; r ^{cm8} = 1; tempo de simulação 1200s; α = 0,5 I; Q = 1.
148	4.12 r ^{cm10} = 1; r ^{ccv3} = 20; r ^{cm8} = 1; degrau de -10% em m ⁶ ; tempo de simulação 1200s; α = 0,5 I; Q = 1.
150	4.13 r ^{cm10} = 1; r ^{ccv3} = 20; r ^{cm8} = 1; degrau de 10% no setpoint de q/n; tempo de simulação 1200s; α = 0,5 I; Q = 1.

266	6.9 f -10% DMC sem controlar q/n	———— PID
264	6.8 m6 -10% DMC sem controlar q/n	———— PID
262	6.7 m6 -10% DMC sem limite de rotação	
260	6.6 m6 -10% DMC	
256	conforme seções 4.12 e 5.4	
252	6.5 ————— DMC	PID f -50% controladores ajustados
	conforme seções 4.12 e 5.4	
248	6.4 ————— DMC	PID f -25% controladores ajustados
	conforme seções 4.12 e 5.4	
244	6.3 ————— DMC	PID f -10% controladores ajustados
	conforme seções 4.12 e 5.4	
240	6.2 ————— DMC	PID m ⁶ -10% controladores ajustados
	conforme seções 4.12 e 5.4	
219	6.1 ————— DMC	PID P ^{TQISP} 10% - controladores ajustados
	FC-3: $K^c = 4,7$; $\tau^i = 20$; $\tau^d = 0$	
	FC-3: $K^c = 4,7$; $\tau^i = \infty$; $\tau^d = 0$	
	FC-1: $K^c = -0,2$; $\tau^i = 20$; $\tau^d = 0$	
	ASC: $K^c = -1,02$; $\tau^i = 7$; $\tau^d = 0$	
217	5.6 Degrau de -50% em f. PC-1: $K^c = 1,33$; $\tau^i = 10$; $\tau^d = 0$	
	FC-1: $K^c = -0,45$; $\tau^i = 20$; $\tau^d = 0$	
	FC-1: $K^c = -0,2$; $\tau^i = 20$; $\tau^d = 0$	
	ASC: $K^c = -1,02$; $\tau^i = 7$; $\tau^d = 0$	
215	5.5 Degrau de -50% em f. PC-1: $K^c = 1,33$; $\tau^i = 10$; $\tau^d = 0$	
	ASC: $K^c = -1,02$; $\tau^i = 7$; $\tau^d = 0$	
	ASC: $K^c = -1,02$; $\tau^i = 7$; $\tau^d = 0$	
213	5.4 Degrau de -25% em f. PC-1: $K^c = 1,33$; $\tau^i = 10$; $\tau^d = 0$	
203	5.3 Degrau de 10% em P ^{TQ1} . PC-1: $K^c = 1,33$; $\tau^i = 10$; $\tau^d = 0$	
202	5.2 Esquema de controle PID similar ao DMC para a URC	
158	5.1 Esquema de controle PID original proposto para a URC	
	ocorrência de rotação crítica.	
156	4.17 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de 30% em m6;	tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; I ; $Q = 1$
	e rotação crítica.	
154	4.16 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de -50% em f;	tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; I ; $Q = 1$; surge, vazão crítica
152	4.15 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de -25% em f;	tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; I ; $Q = 1$
	4.14 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de -10% em f;	tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; I ; $Q = 1$

268	6.10 m6 -10% DMC sem controlar q/n com Q = 5 I ----- PID -----
269.1	6.11 f-50% DMC ----- PID -----
270	6.12 f -50% DMC com intervalo dif. aumentado
272	6.13 f -50% DMC com setpoint de m3 diminuido
274	6.14 f -50% DMC R=5 ----- DMC R=10 -----
276	6.15 P ^{101SP} 10% DMC URC condigão nominal ----- DMC URC fora de condigão nominal -----
278	6.16 P ^{101SP} 10% PID URC condigão nominal ----- PID URC fora de condigão nominal -----
280	6.17 m6 -10% DMC URC condigão nominal ----- DMC URC fora de condigão nominal -----
282	6.18 m6 -10% PID URC condigão nominal ----- PID URC fora de condigão nominal -----
284	6.19 f -10% DMC URC condigão nominal ----- DMC URC fora de condigão nominal -----
286	6.20 f -10% PID URC condigão nominal ----- PID URC fora de condigão nominal -----
288	6.21 f -25% DMC URC condigão nominal ----- DMC URC fora de condigão nominal -----
290	6.22 f -25% PID URC condigão nominal ----- PID URC fora de condigão nominal -----
292	6.23 f -50% DMC URC condigão nominal ----- DMC URC fora de condigão nominal -----
294	6.24 f -50% PID URC condigão nominal ----- PID URC fora de condigão nominal -----

Este trabalho tem por objetivos: desenvolver a aplicação do algoritmo de controle preditivo DMC (Controle por Matriz Dinâmica), com restrições nas variáveis controladas e manipuladas, em uma instalação com compressor centrífugo; comparar o desempenho do DMC nesta instalação com o desempenho de algoritmos de controle PID conjugados num esquema do tipo override:

1.1 OBJETIVO

Compressores centrífugos são empregados na indústria para circular grandes vazões de gás com diferenciais médios de pressão. São equipamentos caros e que consomem grande quantidade de energia. O desempenho e a confiabilidade de um compressor centrífugo dependem do seu sistema de controle em grande extensão [18].

O controle de compressores centrífugos envolve: controle de demanda (controle ou de pressão na sucção ou na descarga do compressor ou controle de vazão); controle de proteção contra instabilidade de operação em baixa vazão (controle anti-surge); controle de proteção contra rotação na velocidade crítica do rotor (controle de rotação) [15] [17] [18]. O controle de demanda é imposto no compressor pelo processo onde este está inserido.

A instabilidade de operação em baixa vazão, chamada de "surge", é uma característica de operação dos compressores centrífugos. Quando a razão vazão volumétrica sobre rotação do compressor atinge um valor mínimo, a operação do compressor torna-se instável. A vazão através do compressor cai rapidamente e reverte-se. O diferencial de pressão entre a sucção e a descarga do compressor também cai. Vazão e diferencial de pressão oscilam ciclicamente: o compressor está em surge. Estas oscilações de vazão e pressão diferencial podem desde alterar as folgas internas do compressor, o que compromete a eficiência do equipamento, até destruir seus componentes [15]. Portanto a condição de surge no compressor deve ser evitada. O controle anti-surge tem por função evitar o surge no compressor.

Normalmente, uma das variáveis manipuladas pelos controles do compressor é a sua rotação [17]. Existe o perigo do rotor do compressor ser levado a girar em uma de suas rotações críticas, causando danos ao equipamento. O controle de rotação tem por função impedir que isto ocorra.

No esquema usual de controle de compressores centrífugos: a rede conectada ao compressor dispõe de uma linha de recirculação e a vazão de recirculação é a variável manipulada pelo controle anti-surge; o controle de demanda manipula a rotação do compressor [17]. Os controladores usados são do tipo PID. Existe um forte acoplamento entre as malhas de controle de demanda e controle anti-surge que impede um ajuste ótimo dos controladores. Conseqüentemente o compressor não pode operar próximo à região de surge sem que haja grande recirculação de gás, ou seja, sem que haja grande perda de energia [17]. Geralmente as malhas de controle são conjugadas por "override", para evitar este problema [15] [17] [18].

Nos anos oitenta, o barateamento do "hardware" digital permitiu que controladores programáveis fossem utilizados no controle de processos

industriais. Algoritmos de controle mais complexos que o PID puderam ser implementados nos controladores. O controle com modelo preditivo (MPC) é uma classe de algoritmos que utilizam um modelo do processo, para prever a resposta das variáveis controladas às alterações das variáveis manipuladas. O controle por matriz dinâmica (DMC) é um tipo de MPC que utiliza um modelo de convolução discreta do processo. O modelo de convolução discreta é obtido amostrando-se a resposta das variáveis controladas a degraus aplicados nas variáveis manipuladas com o processo operando em malha aberta. Com base no modelo e no valor presente das variáveis controladas, o DMC calcula as ações de controle futuras que minimizam, segundo um critério de mínimos quadrados, os erros previstos [12].

O DMC foi desenvolvido em 1979 por engenheiros da Shell Oil Co. Desde então, ele e suas variantes têm encontrado aplicação crescente na indústria [11]: no controle multivaríavel de processos (com ou sem restrições) e no controle de processos de resposta dinâmica não usual (não linear, resposta inversa, com atraso, com integração). O modelo de convolução discreto dispensa o conhecimento profundo da dinâmica do processo e é simples de se obter [12]. O DMC é capaz de prever e compensar a dinâmica não usual de um processo porque contém um modelo deste [8]. No panorama econômico atual, a otimização dos processos industriais é um objetivo a ser alcançado. A otimização é uma característica inerente do DMC [11]. Estas são as razões principais do sucesso do DMC.

Ha, porém, uma limitação do DMC na sua forma original. O critério de otimização do tipo mínimos quadrados não permite a implementação de restrições de maneira simples e direta. Para resolver este problema, foram desenvolvidas variantes do DMC: o LDMC (controle por matriz dinâmica linear) que faz otimização por programação linear; o QDMC (controle por matriz dinâmica quadrática) que faz otimização por programação quadrática. No entanto, o LDMC e o QDMC exigem esforço computacional maior que o DMC [19].

O estudo comparativo dos algoritmos de controle é feito aplicando o PID com overrider e o DMC a uma instalação com compressor centrífugo existente. A instalação estudada neste trabalho é a Unidade de Reformação Catalítica (URC) da Refinaria Presidente Bernardino de Campos (RPBC) da Petrobras, localizada no Município de Cubatão, Estado de São Paulo. Para o estudo de controle, a URC é modelada como um sistema constituído de um compressor centrífugo acionado por uma turbina, um vaso na sucção e um na descarga do compressor, linhas e válvulas de controle (figura 3.1). A URC apresenta problemas de controle anti-surge, controle de rotação, controle da pressão de sucção e restrição de vazão mínima na descarga do compressor [1]. Portanto é adequada para o estudo proposto.

A importância dos sistemas de controle na operação de compressores centrífugos, as dificuldades encontradas na implementação destes sistemas de controle, as possibilidades do DMC, quando aplicado em problemas de controle semelhantes, a representatividade das necessidades de controle da instalação estudada justificam o trabalho proposto.

Iniciamos a implementação do DMC na URC, etapa 2 do estudo, obtendo o modelo de convolução discreta [12] [23]. Partimos da resposta para degraus nas variáveis manipuladas resultante da etapa anterior. Escrevemos os programas GERAH e MONTA que transformam a resposta no modelo de convolução discreta. Desenvolvemos as rotinas DMC, que simula o algoritmo DMC, e RESTRICOES, que implementa restrições nas variáveis controladas e manipuladas de maneira utilizável pelo algoritmo DMC. Incluímos DMC e RESTRICOES na rotina CONTROL. A rotina CONTROL simula um controlador digital programável: contém amostrador, retentor de ordem zero, algoritmo de controle, protetor contra saturação das variáveis manipuladas. Implementamos CONTROL no programa CURC. Para ajustar os parâmetros do DMC, orientamo-nos inicialmente pelas indicações das referências 12 e 19. O ajuste final do DMC é por tentativa: aplicamos um degrau em cada uma das perturbações e setpoints das variáveis

degraus aplicados nas variáveis manipuladas e perturbações. Para verificar a validade do modelo, analisamos a resposta a simulações. Para verificar a validade do modelo, analisamos a resposta a gera funções degrau, e REGISTRADOR, que registra os resultados das integrações das equações diferenciais, PERTURBACAO, que faz a integração das equações diferenciais pelo Método de Euler [3]. Implementamos no programa CURC as rotinas URC, que resolve o sistema de equações, INTEGRADOR, que faz a integração das equações diferenciais, PERTURBACAO, que gera funções degrau, e REGISTRADOR, que registra os resultados das simulações. Para verificar a validade do modelo, analisamos a resposta a degraus aplicados nas variáveis manipuladas e perturbações.

Na etapa 1, desenvolvemos o modelo matemático da URC a partir de dados e fluxogramas da referência 1. Usamos equações de estado do gás, relações termodinâmicas, relações de transmissão de calor e massa e equações características do compressor, combinadas com hipóteses simplificadoras [1] [2] [20] [21]. Resulta um sistema de equações algébricas e diferenciais não-lineares. Resolvemos o sistema de equações por cálculo sequencial [22]. As variáveis a convergir são obtidas por substituição parcial [3]. Fazemos a integração das equações diferenciais pelo Método de Euler [3]. Implementamos no programa CURC as rotinas URC, que resolve o sistema de equações, INTEGRADOR, que faz a integração das equações diferenciais, PERTURBACAO, que gera funções degrau, e REGISTRADOR, que registra os resultados das simulações. Para verificar a validade do modelo, analisamos a resposta a degraus aplicados nas variáveis manipuladas e perturbações.

ou a um conjunto de subrotinas. São divididos em subrotinas. Cada etapa do estudo corresponde a uma subrotina A linguagem "Turbo Pascal" é estruturada, por isso os programas escritos nela são divididos em subrotinas. Cada etapa do estudo corresponde a uma subrotina (4) análise e comparação dos desempenhos do DMC e PID no controle da URC. 3) implementação do PID com overrider no modelo da URC; 2) implementação do DMC no modelo da URC; 1) desenvolvimento do modelo matemático da URC; simulação. O estudo é dividido nas seguintes etapas: A aplicação do DMC e o estudo comparativo entre o seu desempenho e o matemático em microcomputador. O programa CURC em linguagem "Turbo Pascal" (compatível com as versões 4.0, 5.0 ou 5.5) [4] [24] é gerado para fazer a simulação. O estudo é dividido nas seguintes etapas:

controladas da URC com o controle em malha fechada; medimos o desempenho do DMC através do critério de erro integral quadrático (ISE) [5]; e alteramos os parâmetros do controlador no sentido de minimizar o ISE.

Na etapa 3, substituímos o DMC pelo PID na URC. Desenvolvemos a rotina PID que simula um algoritmo PID digital de velocidade [5]. Alteramos a rotina CONTROL, implementando as rotinas PID conjugadas por override. Ajustamos os controladores pelo critério ISE [19].

Na etapa 4, comparamos o desempenho do DMC com o do PID no controle da URC. O critério de comparação é o ISE. E, por fim, analisamos a influência dos parâmetros dos controladores no seu desempenho.

1. Introdução: Apresenta o objetivo, a justificativa e a metodologia do estudo, mais o sumário estruturado da dissertação.
2. Revisão Bibliográfica: Apresenta um levantamento das referências relevantes, usadas no desenvolvimento do estudo.
3. Desenvolvimento do Modelo da Instalação com Compressor Centrifugo (URC): Apresenta a instalação modelada (URC); o desenvolvimento do modelo da URC; o programa CURC, que engloba as rotinas de simulação da URC e de seus controladores; a rotina URC, que simula a URC; a rotina INTEGRACAO, que integra as equações diferenciais; a rotina PERTURBACAO, que simula alterações do tipo função degrau nos set points e perturbações; os resultados das simulações realizadas na URC com os controladores em malha aberta e sua análise.
4. Aplicação do Controle Preditivo (DMC) na Instalação com Compressor Centrifugo (URC): Apresenta: teoria do controle DMC; procedimento de implementação de restrições no DMC; aplicação do DMC com restrições na URC; obtenção do modelo de convolução discreta da URC através dos programas GERAH e MONTA; a rotina DMC, que simula o algoritmo DMC; a rotina CONTROLE, que simula um controlador programável; resultados das simulações da URC operando com o DMC; ajuste dos parâmetros do DMC; resultados finais das simulações.
5. Aplicação do Controle PID com Override na Instalação com Compressor Centrifugo (URC): Apresenta: a rotina PID, que simula o algoritmo PID de velocidade; a rotina CONTROLE modificada, que simula o esquema de controle de malhas com PID conjugadas por override; resultados das simulações da URC operando com PIDs conjugados por override; ajuste dos parâmetros dos PIDs; resultados finais das simulações.
6. Comparação e Análise do Desempenho dos Controles Preditivo (DMC) e PID com Override na Instalação com Compressor Centrifugo: Apresenta: a comparação entre os desempenhos dos controladores DMC e PID com override; a análise da influência dos parâmetros do DMC no seu desempenho.
7. Conclusões: Apresenta as conclusões do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

Os assuntos : controle de compressores centrífugos; algoritmos de controle preditivo, em especial o controle por matriz dinâmica (DMC); aplicação de algoritmos de controle preditivo em compressores centrífugos; nortearam o levantamento bibliográfico feito neste trabalho.

A eficiência e a confiabilidade de um compressor centrífugo dependem de seu sistema de controle em grande extensão. Consequentemente foi feito um esforço de pesquisa no sentido de desenvolver e aprimorar sistemas de controle para compressores centrífugos.

O "surge" (instabilidade de baixa vazão) é o principal problema de operação de um compressor centrífugo. A vazão onde ocorre o "surge" (limite de surge) varia de acordo com a rotação do compressor, a temperatura do gás na sucção do compressor e o peso molecular do gás. Portanto o controle de prevenção de "surge" (controle anti-surge) envolve a geração de uma linha de controle de "surge". O controle anti-surge começa a atuar quando a condição de operação do compressor atinge a linha de controle de surge. White (1972) [16] mostra como gerar a linha de controle de surge a partir dos diferenciais de pressão no compressor e numa placa de orifício colocada na sucção do compressor independentemente da rotação deste. Ele também indica correções para a linha de controle de surge em função do peso molecular e da temperatura do gás. O controlador sugerido é do tipo proporcional e integral (PI) com proteção para saturação do termo integral ("anti-windup"). O anti-windup é necessário porque o compressor opera longe da linha de controle de surge normalmente. Assim sendo, o termo integral tenderia a saturar.

Staroselsky e Ladin (1979) [15] mostram que as correções em função da temperatura e peso molecular do gás são desnecessárias para gerar a linha de controle de surge. Consideraram a interação que existe entre o controle anti-surge e controle de carga na planta. Resolvem o problema de interação conjugando os controladores num esquema do tipo "override". E adicionam ao controlador anti-surge um dispositivo que abre e fecha a válvula de recirculação de acordo com uma curva programada, caso o controle PI não

integrador. O desempenho do DMC é comparado ao de um PID e ao de um PI com nível do fundo de um fracionador, que apresenta o comportamento de um desempenho do DMC nestes processos, ele utiliza a simulação do controle de processos que apresentam comportamentos dinâmicos não usuais. Para demonstrar Cutler (1982) [9] verifica que o DMC tem capacidade de controlar

que define em linha valores ótimos para as variáveis controladas. Fracionamento catalítico. A aplicação descrita inclui um controle supervisor restrições no DMC. Eles descrevem a aplicação do DMC numa unidade de Pretti e Gillette (1979) [14] mostram a implementação de

forno.

ambos sem restrições. Apresentam também a aplicação do DMC no controle de um DMC. Eles mostram seu uso nos casos de controle monovariável e multivariável, Cutler e Ramaker (1979) [8] da Shell Oil Co. desenvolveram o

mínimos quadrados.

variáveis manipuladas). Ele minimiza os erros previstos, usando o método dos das curvas de resposta do processo, operando em malha aberta, a pulsos das aceitação na indústria. O DMC utiliza um modelo de convolução discreto (obtido O controle por matriz dinâmica (DMC) é um tipo de MPC de boa

do MPC.

previsão é feita com o uso de um modelo dinâmico do processo, parte integrante variáveis manipuladas nos valores futuros das variáveis controladas. A de controle que são capazes de prever o efeito das alterações de valores dos processos industriais. O controle preditivo (MPC) é uma classe de algoritmos que o PID (controle proporcional, integral e derivativo) no controle de dos computadores possibilitou a implementação de algoritmos mais sofisticados No final dos anos setenta e na década de oitenta, o barateamento

"override".

desacoplador apresenta o melhor desempenho, seguido pelo do controle com modelo de um compressor. Zee chega a conclusão de que o controle com desacoplador. A comparação é feita a partir dos resultados da simulação do malhas de controle PI conjugadas em "override"; malhas de controle PI com esquemas de controle de compressores: malhas de controle PI independentes; Zee (1987) [17] faz uma comparação entre o desempenho de três

a recirculação de gás, consequentemente aumentando a eficiência do compressor. Staroselsky e Ladin objetivam projetar controladores anti-surge que minimizem consiga reverter a tendência inicial de "surge" num transistório. Finalmente

Garcia e Morari (1982) [26] apresentam a teoria do controle com modelo interno (IMC) para sistemas com uma variável controlada e uma variável manipulada (SISO). Enquadram os algoritmos MPC, incluindo o DMC, dentro da teoria do IMC. E analisam as propriedades dos MPCs através da teoria do IMC: estabilidade, offset, robustez e influência de parâmetros. Garcia e Morari (1985) [27] e [28] fazem também a extensão desta análise para o caso multivariável (MIMO).

Marchetti (1983) [12] faz uma análise dos conceitos envolvidos no projeto dos algoritmos de controle preditivo baseados em modelos de conjução discretos, em especial do DMC. O controle preditivo tem sua estrutura comparada com algoritmos do tipo "Deadbeat" e Dahlin. É estudada a influência dos parâmetros de projeto no desempenho do DMC. A análise é feita para o caso de controle monovariável sem restrições.

Garcia (1984) [10] faz a extensão do DMC para controle de processos altamente não lineares com restrições, chamada controle por matriz dinâmica quadrático (QDMC). Anteriormente, o DMC havia sido aplicado, a processos relativamente lineares com sucesso. Garcia mostra a aplicação do QDMC no controle de um reator de polimerização em operação em batelada e semi-batelada.

Morshedi et alii (1985) [13] desenvolvem o controle por matriz dinâmica linear (LDMC). No LDMC, a minimização do erro previsto é feita por programação linear em lugar do método dos mínimos quadrados, usado no DMC. A vantagem do LDMC sobre o DMC é a maior facilidade de implementação das restrições das variáveis de processo. Morshedi et alii mostram como formular vários tipos de restrições. Apresentam, também, uma simulação que mostra como implantar o LDMC e o seu desempenho.

Garcia (1989) [11] traga um panorama histórico do desenvolvimento dos algoritmos de controle preditivo, dentre eles o DMC, e discute as suas características: estabilidade, controlabilidade, observabilidade, robustez, ajuste de parâmetros, controle de processos não lineares e controle de processos com restrições. Garcia conclui: que a facilidade dos MPC de lidar com restrições os tornam os algoritmos mais adequados para problemas complexos de controle multivariável; e que os MPC não são mais robustos que os controles clássicos, porém podem ser ajustados mais facilmente para a robustez.

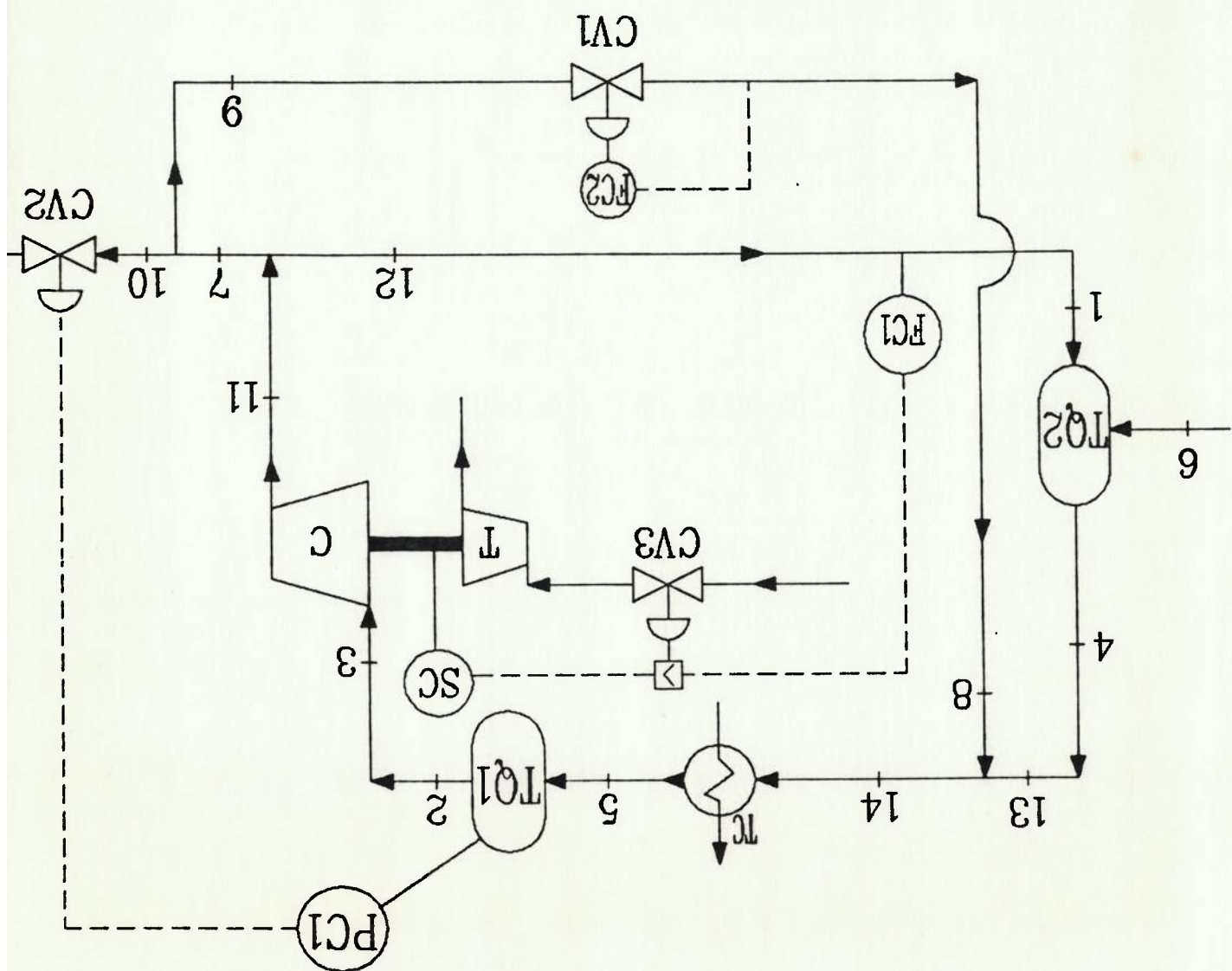
Campos et alii (1990) [6] fazem uma comparação entre os

desempenhos do DMC e de malhas de controle PI independentes, spracas um compressor centrífugo. A comparação é feita com o uso da simulação de uma instalação. Campos et alii verificam a operação do DMC sem implementação de restrições e longe da linha de controle de surge. O DMC apresenta melhor desempenho que o PI.

Campos (1990) [7] faz uma comparação entre o desempenho dos algoritmos PI em malhas independentes, PI com desacoplamento e DMC. O estudo segue a mesma metodologia do trabalho anterior de Campos et alii [6]. O desempenho do DMC também é verificado longe da linha de surge e sem a implementação de restrições. O DMC apresenta um desempenho um pouco superior ao PI com desacoplamento. O PI em malhas independentes apresenta o pior desempenho.

Neste capítulo descrevemos o desenvolvimento de um modelo matemático para a simulação dinâmica da circulação de gases na Unidade de Reformação Catalítica de Nafta da RPBC. Este sistema será referido ao longo deste trabalho como URC. A URC é constituída de dois (02) tanques, um (01) compressor centrífugo acionado por uma (01) turbina a vapor, as linhas que interligam estes equipamentos e os conjuntos de válvulas, sensores e controladores que regulam os fluxos através do sistema (figura 3.1). O texto apresenta também: o programa CURC, que engloba as rotinas de simulação da URC e de seus controladores; a rotina URC, que simula a URC; a rotina INTEGRACAO, que integra as equações diferenciais; a rotina PERTURBACAO, que simula alterações do tipo função degrau nos set points e perturbações; os resultados das simulações realizadas na URC sem os controladores e sua análise.

Figura 3.1 Fluxograma da Unidade de Reformação Catalítica da RBPC



SÍMBOLOS

C	-	Compressor
CV	-	Válvula de Controle
FC	-	Controlador de Vazão
PC	-	Controlador de Pressão
T	-	Turbina
TC	-	Trocador de Calor (Resfriador)
TQ	-	Tanque
x	-	Ponto de Indicação das Propriedades do Escamento

DADOS DOS EQUIPAMENTOS

- TQ1 - Volume (2) : $50m^3$
- Pressão (3) (4) : 1,8 MPa
- TQ2 - Volume (2) : $50m^3$
- Turbina - Constante de Tempo : 5s
- Compressor - Pressão de Descarga (3) (4) : 2,33 MPa
- Vazão de Gás (4) (5) (6) : $1,8 \times 10^6 Nm^3/dia$
- (~ 5,4 kg/s)
- Faixa de Rotação de Operação do Compressor (2):
- 7000 a 10600 rpm
- Curvas Características ($q/n \times ep$ e $q/n \times en/n^2$):
- Ver Tabela 1
- Linha 12-1 - Vazão mínima de Gás (4) (5) (6) : $1,0 \times 10^6 Nm^3/dia$
- (~ 3,0 kg/s)
- Ponto 10 - Vazão de Gás (4) (5) (6) : $2,0 \times 10^5 Nm^3/dia$
- (~ 0,6 kg/s)
- Linha 8-9 - Vazão de Gás (4) : 0 kg/s

Figura 3.1 - Continuação

DADOS DO GÁS

Composição: H_2 (na maior parte) e CH_4

Peso Molecular: 5,8 Kg/KMol

Notas:

(1) O fluxograma e os dados são extraídos da referência 1, a menos de indicação em contrário.

(2) Dados adotados.

(3) Todas as pressões apresentadas neste trabalho são absolutas.

(4) Dados válidos para o sistema em operação normal.

(5) Vazões em volume nas "CNTP" ($0^\circ C$ e 1 atm).

(6) Nm^3 = metros cúbicos normais, ou seja, metros cúbicos nas "CNTP".

Figura 3.1 - Continuação

TABELA 3.1
CURVAS CARACTERÍSTICAS DO COMPRESSOR (1)

q/n (2)	q/n (3)	e_p	e/n^2
acfm/rpm	$(m^3 s^{-1} rpm^{-1}) \times 10^4$	(J Kg ⁻¹ rpm ⁻²) x 10 ³	
0,291	1,373	-	1,995 (Surge)
0,295	1,392	0,628	-
0,350	1,652	0,662	1,912
0,400	1,888	0,682	1,855
0,450	2,123	0,694	1,805
0,500	2,359	0,702	1,760
0,550	2,595	0,705	1,721
0,600	2,831	0,707	1,679
0,650	3,067	0,692	1,630
0,670	3,162	0,682	-
0,685	3,232	-	1,600 (Stone-wall)

Notas:

(1) Dados extraídos da referência 1.

(2) Pés cúbicos por minuto nas condições (pressão e temperatura) presentes na sucção do compressor.

(3) Metros cúbicos por segundo nas condições presentes na sucção do compressor.

3.1 OPERAÇÃO DO SISTEMA

Refira-se à figura 3.1. O gás entra na URC pelo ponto 6, indo para o TQ2. O compressor circula o gás no sistema. Após a descarga do compressor, uma parte do gás recircula: vai para o TQ2; a outra parte sai do sistema pelo ponto 10. A válvula CV2 regula a vazão de saída do gás.

Em operação normal a vazão de gás no compressor é 5,4 Kg/s e a pressão de descarga 2,33 MPa. Dois controladores regulam a operação do compressor: o controlador da vazão recirculada do gás - FCI - que não deve

cair abaixo de 3,0Kg/s para que não haja danos ao sistema; e o controlador de rotação - SC - cuja finalidade é fazer com que a rotação do compressor permaneça dentro da faixa de operação normal - maior que 7000 e menor que

10600 rpm. O SC e o FCI atuam sobre a válvula CV3, que regula a vazão de vapor na turbina, exercendo um controle do tipo "override". A vazão de gás que vai para o TQ2 ao entrar na URC pelo ponto 6 é de 0,6 Kg/s. O resfriador - TC - é necessário devido à alta taxa de recirculação no sistema - $m^1/m^4 =$

0,88. O TQ1 é o vaso de sucção do compressor. A pressão neste tanque é 1,8 MPa. O controlador PCI regula a pressão no TQ1 atuando na vazão de saída da URC através da válvula CV2. A vazão de saída do sistema no ponto 10 é 0,6Kg/s em operação normal. A válvula CV1 controla a vazão de recirculação de emergência do compressor (bypass). Quando o compressor opera fora da condição de surge, CV1 está fechada. Em caso de surge, CV1 abre.

A partida da URC é a condição mais crítica para o compressor. Todo o gás é inicialmente recirculado: não há entrada nem saída de gás da URC. O PCI opera em manual. Quando começa a entrada de gás no sistema pelo ponto 6, aumenta a perda de carga no alinhamento de recirculação. Cai a vazão no compressor e este normalmente entra em "surge".

3.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

No desenvolvimento do modelo as primeiras hipóteses que adotamos,

são:

(H1) na URC o fator de compressibilidade do gás (Z) é constante.

(H2) na URC os calores específicos do gás (C_p e C_v) são constantes.

(H3) na URC as energias cinética e potencial gravitacional do gás são desprezíveis se comparadas à sua energia interna.

(H4) nos transitórios da URC não há nenhum tempo morto envolvido.

As hipóteses H1 e H2 fazem desnecessário usar equações para Z , C_v e C_p do gás no modelo.

As equações válidas para o gás são:

$$(3.1) \quad PV = Z M \frac{R}{T},$$

$$(3.2) \quad C_v = \frac{1}{Z R} \frac{K - 1}{Mol},$$

$$(3.3) \quad C_p = \frac{K}{Z R} \frac{K - 1}{Mol}.$$

Para simplificar a escrita das equações do modelo, definimos

$$(3.4) \quad B = \frac{Mol}{Z R}.$$

Passamos agora a desenvolver os modelos dos componentes da URC.

3.3.1 - Modelo dos Tanques

A equação da continuidade para os tanques é

(3.5)

$$\frac{dM}{dt} = \sum m_i$$

onde M é a massa de gás contida em um tanque e $\sum m_i$ é a soma das vazões de gás que entram e saem deste tanque. M pode ser expresso por

(3.6)

$$M = \rho V$$

onde ρ = densidade do gás contida em um tanque,

V = volume de um tanque

(3.7)

$$\rho = \frac{M}{V}$$

(3.8)

$$M = \frac{Z R T}{P} \frac{V}{Mol}$$

onde P e T são respectivamente a pressão e a temperatura do gás em um tanque. (Veja a equação 3.1.)

Substituindo a equação 3.8 na 3.7, temos

(3.9)

$$p = \frac{Z R T}{Mol P}$$

ou, usando a equação 3.4,

(3.10)

$$p = B \frac{T}{P}$$

Substituímos a equação 3.10 na 3.6.

(3.11)

$$M = B \frac{T}{P} V$$

Substituímos a equação 3.11 na 3.5.

(3.12)

$$d \left[\frac{B V P T}{P} \right] = \sum m_i dt$$

m_i^I = cada vazões em massa de gás que entram ou saem de um tanque,
 h_i^I = entalpia associada a cada das vazões de gás que entram ou saem de um tanque.

onde u = energia interna do gás contido em um tanque,

$$\frac{d[Mu]}{dt} = \sum (m_i^I h_i^I) \quad (3.17)$$

H3,

A primeira lei da termodinâmica para os tanques é, usando a hipótese

Para obter a equação diferencial de T , trabalhamos a seguir com a primeira lei da termodinâmica aplicada aos tanques.

$$\frac{dP}{dT} T \sum m_i + T \frac{dT}{dt} = \frac{dP}{dT} T \sum m_i + T \frac{dT}{dt} \quad (3.16)$$

ou

$$T \frac{dP}{dT} - P \frac{dT}{dT} = \frac{dP}{dT} T \sum m_i \quad (3.15)$$

Desenvolvemos a derivada no primeiro membro da equação, obtendo

$$\frac{d[PT^{-1}]}{dt} = \frac{dP}{dT} T \sum m_i \quad (3.14)$$

Aplicamos as hipóteses H1 e H2 na equação 3.13 e podemos reescrevê-la como

$$\frac{d[BPT^{-1}]}{dt} = \frac{V}{V} \sum m_i \quad (3.13)$$

ou, porque o volume é constante (os tanques são rígidos),

A energia interna e a entalpia podem ser expressas em função da temperatura:

$$u = C_v T; \quad (3.18)$$

$$h = C_p T \quad (3.19)$$

onde T_i é a temperatura associada a cada uma das vazões de gás que entram ou saem de um tanque. Substituindo as equações 3.2 e 3.3 nas equações 3.18 e 3.19 respectivamente, e usando a equação 3.4, temos

$$u = \frac{K-1}{1} \frac{B}{1} T \quad (3.20)$$

$$e \quad h = \frac{K-1}{K} \frac{B}{1} T_i \quad (3.21)$$

Então podemos escrever a equação 3.17 na forma

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} M \\ M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & B \end{bmatrix} T = \sum m_i \begin{bmatrix} K & -1 \\ K & 1 \end{bmatrix} \frac{B}{1} T_i \quad (3.22)$$

ou, usando as hipóteses HI e H2,

$$\frac{d [MT]}{dt} = K \sum (m_i T_i) \quad (3.23)$$

Derivando o primeiro membro da equação 3.23, obtemos

$$T \frac{dM}{dt} + M \frac{dT}{dt} = K \sum (m_i T_i) \quad (3.24)$$

ou

P_{TQ1} = pressão no TQ1 ,

onde T_{TQ1} = temperatura no TQ1 ,

$$\frac{dP_{TQ1}}{dt} = \frac{BV_{TQ1}}{K} (m_s T_s - m_2 T_2) \quad (3.30)$$

e

$$\frac{dT_{TQ1}}{dt} = \frac{BP_{TQ1} V_{TQ1}}{KT_{TQ1}} (m_s T_s - m_2 T_2) - \frac{BP_{TQ1} V_{TQ1}}{T_2} (m_s - m_2) \quad (3.29)$$

As equações 3.26 e 3.28 são a forma final do modelo dos tanques. Vamos agora aplicá-los a TQ1 e TQ2. Para o tanque TQ1 (figura 3.2), temos

$$\frac{dP}{dt} = \frac{BV}{K} \sum (m_i T_i) \quad (3.28)$$

ou simplificando,

$$\frac{dP}{dt} = \frac{BV}{T} \sum m_i + P \left[\frac{KT}{BPV} \sum (m_i T_i) - \frac{T_2}{BPV} \sum m_i \right] \quad (3.27)$$

Então Retornamos à equação 3.16 e faço a substituição de dT/dt para equação 3.26.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{BPV}{KT} \sum (m_i T_i) - \frac{BPV}{T_2} \sum m_i \quad (3.26)$$

Substituímos as equações 3.5 e 3.11 na 3.25 que fica sendo

$$\frac{dT}{dt} = \frac{K}{M} \sum (m_i T_i) - \frac{M}{T} \frac{dT}{dt} \quad (3.25)$$

P_{TQ2} = pressão no TQ2 ,

T_{TQ2} = temperatura no TQ2 ,

onde

e

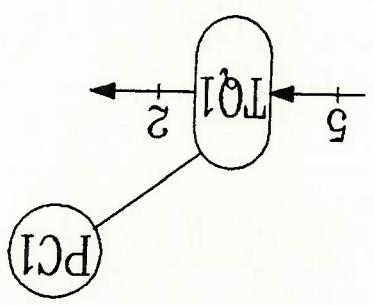
$$\frac{dP_{TQ2}}{dt} = \frac{BP_{TQ2}}{K} (m_1 T_1 + m_6 T_6 - m_4 T_4) \quad (3.32)$$

$$- \frac{BP_{TQ2}}{V_{TQ2}} (m_1 + m_6 - m_4) \quad (3.31)$$

$$\frac{dT_{TQ2}}{dt} = \frac{BP_{TQ2}}{KT_{TQ2}} (m_1 T_1 + m_6 T_6 - m_4 T_4)$$

Para o tanque TQ2 (figura 3.3), temos

Figura 3.2 Tanque TQ1 e controlador PCI



T_2 = temperatura no ponto 2 .

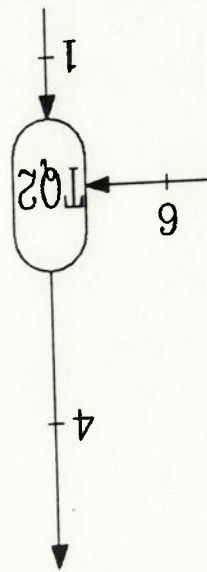
m_2 = vazão em massa no ponto 2 ,

T_5 = temperatura no ponto 5 ,

m_5 = vazão em massa no ponto 5 ,

V_{TQ1} = volume do TQ1 ,

Figura 3.3 Tanque TQ2



- V_{TQ2} = volume do TQ2 ,
- m_1 = vazão em massa no ponto 1 ,
- T_1 = temperatura no ponto 1 ,
- m_6 = vazão em massa no ponto 6 ,
- T_6 = temperatura no ponto 6 ,
- m_4 = vazão em massa no ponto 4 ,
- T_4 = temperatura no ponto 4 .

Por fim adotamos uma hipótese simplificada no modelo dos tanques: (H5) a pressão e a temperatura na saída dos tanques são iguais à pressão e à temperatura no interior dos tanques, respectivamente.

Ou seja,

$$P_2 = P_{TQ1},$$

$$T_2 = T_{TQ1},$$

$$P_4 = P_{TQ2},$$

$$T_4 = T_{TQ2}.$$

Consequentemente,

$$\frac{dT_{TQ1}}{dt} = \frac{BP_{TQ1}}{KT_{TQ1}} \frac{BP_{TQ1}}{V_{TQ1}} (m_5 T_5 - m_2 T_{TQ1}) - \frac{BP_{TQ1}}{V_{TQ1}} \frac{T_2}{T_{TQ1}} (m_5 - m_2),$$

(3.33)

$$\frac{dT_{TQ1}}{dt} = \frac{BV_{TQ1}}{K} (m_5 T_5 - m_2 T_{TQ1}),$$

(3.34)

$$\frac{dT_{TQ2}}{dt} = \frac{BP_{TQ2}}{KT_{TQ2}} (m_1 T_1 + m_6 T_6 - m_4 T_{TQ2})$$

(3.35)

$$- \frac{BP_{TQ2}}{V_{TQ2}} (m_1 + m_6 - m_4),$$

As equações 3.33 a 3.36 são o modelo dos tanques TQ1 e TQ2.

$$dp_{TQ2} \frac{dt}{dt} = \frac{B V_{TQ2}}{K} (m_1 T_1 + m_6 T_6 - m_4 T_{TQ2}) \quad (3.36)$$

3.3.2 - Modelo do Compressor

No desenvolvimento do modelo do compressor fazemos as seguintes

hipóteses:

H6) no menor intervalo de tempo de interesse no estudo da resposta dinâmica do sistema; a massa de gás que passa através do compressor é muito maior do que a massa de gás contida nele [1].

H7) o escoamento do gás no compressor pode ser aproximado por um processo politrópico:

$$P_{p-L} = \text{constante} \quad (3.37)$$

$$T_{p-L} = \text{constante} \quad (3.38)$$

$$\frac{T_p}{1-L} = \text{constante} \quad (3.39)$$

onde

$$L = \frac{e_p^{K-K+1}}{e_p^K} \quad (3.40)$$

e_p = eficiência politrópica do compressor:

$$e_p = \frac{F_n}{W} \quad (3.41)$$

$$W = m_3 \frac{K}{1} \frac{K-1}{B} (T_{11} - T_3) \quad (3.47)$$

A equação 3.21 também é válida para o compressor.

$$W = m_3 (h_{11} - h_3) \quad (3.46)$$

(Figura 3.4). Substituímos a equação 3.45. Então

$$W = m_{11} h_{11} - m_3 h_3 \quad (3.45)$$

e

$$m_{11} = m_3 \quad (3.44)$$

Usando a nomenclatura da figura 3.1, reescrevemos as equações 3.42 e 3.43 como transferida ao fluido como de sinal positivo.)

(O sinal negativo aparece na equação 3.43 porque consideramos a energia do compressor h_1 = entalpia associada a cada das vazões de gás que entram ou saem do compressor, m_1 = cada uma das vazões em massa de gás que entram ou saem do

$$W = -\sum m_1 h_1 \quad (3.43)$$

e a primeira lei da termodinâmica,

$$\sum m_1 = 0 \quad (3.42)$$

A hipótese H6 elimina os termos de acumulação de massa e energia das equações do modelo do compressor. Portanto, a equação da continuidade é

W = potência total transferida do rotor para o gás.

E_n = potência politrópica transferida pelo rotor do compressor ao gás, isto é, potência transferida do rotor ao gás que é transformada em aumento de pressão do gás [2];

Escrevemos W em termos de E_n e ep na equação 3.47, usando a equação

3.41. Portanto

$$E_n = m_3 ep \frac{K-1}{K} \frac{1}{(T_n - T_3)} \quad (3.48)$$

sendo

$$E_n = \frac{m_3}{F_n} \quad (3.49)$$

e definindo

$$X_p = \frac{K}{K-1} \frac{1}{ep} \quad (3.50)$$

temos

$$E_n = \frac{X_p}{1} \frac{1}{(T_n - T_3)} \quad (3.51)$$

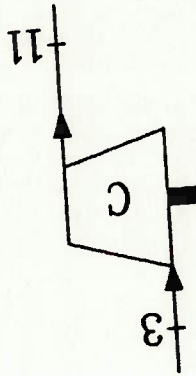


Figura 3.4 Compressor

Há duas variáveis importantes no modelo do compressor: a vazão (m^3) e a rotação do rotor (n), que são respectivamente as variáveis medida e controlada do compressor. Estas variáveis são relacionadas às outras pela tabela 3.1. Para facilitar a simulação digital do modelo, ajustamos à tabela 3.1 as equações

A equação 3.55 é a relação de pressões no compressor usada no modelo.

$$e_n = \frac{1}{T_3} \left[\frac{X_B^p}{P_{11}} \right] \left[\frac{P_3}{X_p} - 1 \right] \quad (3.55)$$

$$\frac{1}{L-1} = \frac{K_{ep}}{K-1} = X_p \quad (3.54)$$

Como

$$e_n = \frac{1}{T_3} \left[\frac{X_B^p}{P_{11}} \right] \left[\frac{1}{L-1} - 1 \right] \quad (3.53)$$

Substituímos a equação 3.39 na equação 3.52.

$$e_n = \frac{1}{T_3} \left[\frac{X_B^p}{T_3 - 1} \right] \left[\frac{1}{L-1} - 1 \right] \quad (3.52)$$

Para obter a relação entre as pressões de entrada saída do compressor, trabalhamos sobre a equação 3.51. Colocamos T_3 em evidência no segundo membro da equação 3.31:

$$x_p = \frac{K e_p}{K-1} ; \quad (3.54)$$

$$e_p = -5,62 \cdot 10^6 \left(\frac{n}{q} \right)_2 + 2,86 \cdot 10^3 \left(\frac{n}{q} \right)_3 + 0,34 ; \quad (3.57)$$

$$\frac{n_2}{n} = 2,287 \cdot 10^{-3} - 2,124 \left(\frac{n}{q} \right) ; \quad (3.56)$$

$$e_n = \frac{1}{T_3} \left[\left(\frac{p_3}{p_{11}} \right)^{x_p} - 1 \right] ; \quad (3.55)$$

$$e_n = \frac{1}{T_3} \left(T_{11} - T_3 \right) ; \quad (3.51)$$

(A tabela 3.2 mostra o erro relativo associado ao uso das equações 56 e 57). Finalmente as equações do modelo do compressor são:

$$q = \frac{T_{m3}^3}{p_3 B} \quad (3.57.1)$$

onde
 n = rotação do rotor (rpm),
 q = vazão em volume de gás nas condições (pressão e temperatura) presentes na sucção do compressor (m^3/s);

$$\frac{n_2}{n} = 2,287 \cdot 10^{-3} - 2,124 \left(\frac{n}{q} \right) \quad (3.57)$$

$$e_p = -5,62 \cdot 10^6 \left(\frac{n}{q} \right)_2 + 2,86 \cdot 10^3 \left(\frac{n}{q} \right)_3 + 0,34 \quad (3.56)$$

$$q = \frac{T_c}{m_c} \frac{p_c}{B}$$

TABELA 3.2

q/n
 ep(1) ep(2) Δe(3) $e^n/n^2(1)$ $e^n/n^2(2)$ $\Delta(e^n/n^2)(3)$
 (m³s⁻¹rpm⁻¹)x10⁴ % (J.Kg⁻¹ · rpm²)x10³ %

1,373	-	0,627	-	1,995	1,995	0,0
1,392	0,628	0,629	0,1	-	1,991	-
1,652	0,662	0,659	0,4	1,912	1,936	1,2
1,888	0,682	0,680	0,3	1,855	1,886	1,7
2,123	0,694	0,694	0,0	1,805	1,836	1,7
2,359	0,702	0,702	0,0	1,760	1,786	1,5
2,595	0,705	0,704	0,1	1,721	1,736	0,9
2,831	0,707	0,699	1,1	1,679	1,686	0,4
3,067	0,692	0,688	0,6	1,630	1,635	0,3
3,162	0,682	0,682	0,0	-	1,615	-
3,232	-	0,677	-	1,600	1,600	0,0

Notas:

- (1) Valor real, obtido da referência 1.
 (2) Valor calculado usando as equações 3.56 e 3.57.
 (3) Erro percentual calculado pela relação

$$\left| 100 \left(\frac{\text{Valor real} - \text{Valor calculado}}{\text{Valor real}} \right) \right|$$

3.3.3 - Modelo do Trocador de Calor

No modelo do trocador de calor (figura 3.5) adotamos as seguintes hipóteses:

H8) no menor intervalo de tempo de interesse no estudo da resposta dinâmica do sistema, a massa de gás que passa através do trocador de calor é muito maior que a massa de gás contida nele.

H9) no menor intervalo de tempo de interesse no estudo da resposta dinâmica do sistema, a quantidade de energia térmica que pode ser acumulada no material de que é feito o trocador de calor é muito menor que a energia cedida pelo gás que circula na URC ao refrigerante.

H10) a perda de carga do gás ao passar pelo trocador de calor é desprezível se comparada às outras perdas de carga na URC.

H11) o trocador de calor mantém a temperatura de saída do gás constante para qualquer vazão e temperatura de entrada.

Consequentemente as equações do trocador são

$$P_4 = P_5$$

$$T_5 = \text{constante}$$

$$m_{14} = m_5$$

(3.60)

(3.59)

(3.58)

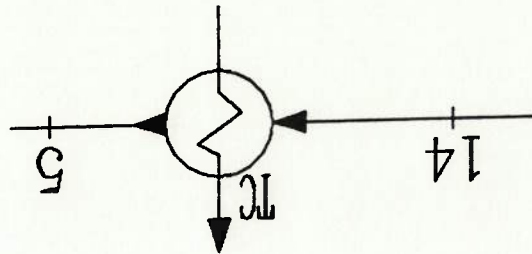


Figura 3.5 Trocador de Calor

No modelo das linhas adotamos as seguintes hipóteses:

H12) o escoamento nas linhas é isotérmico.

H13) a perda de carga é desprezível em todas as linhas, exceto na linha que une os pontos 12 a 1 (linha 12-1).

H14) a perda de carga associada à entrada ou saída do gás dos equipamentos e às ramificações é desprezível.

H15) toda a perda de carga na URC concentra-se na linha 12-1 e é dada por

$$p_2^{12} - p_1^{12} = m_2^{12} \frac{f_2}{T_{12}} \quad (3.61)$$

onde f é o coeficiente de vazão da linha 12-1.

Podemos reescrever a equação 3.61 como

$$m_1 = f \left| \frac{p_2^{12} - p_1^{12}}{T_{12}} \right| \quad (3.62)$$

De acordo com as hipóteses H12, H13, H14, H15 (modelo dos tanques) e a equação 3.44 (modelo do compressor),

$$p^{12} = p^{101} = p_1 = p_6 = p_4 = p_{13} = p_{14} = p_8 = p_5 = p_2 = p_3 ; \quad (3.63)$$

Substituímos as equações 3.34 e 3.36 na equação 3.75. Resulta

$$\frac{dP_{TQ1}}{dt} = \frac{dP_{TQ2}}{dt} \quad (3.75)$$

obtemos

$$P_{TQ1} = P_{TQ2} \quad (3.63)$$

Desenvolvemos agora a equação da vazão entre os tanques TQ2 e TQ1. Derivamos

$$m_4 = m_{13} \quad (3.74)$$

$$m_6 = m_8 \quad (3.73)$$

$$m_7 = m_{10} + m_9 \quad (3.72)$$

$$m_{11} = m_{12} + m_7 \quad (3.71)$$

$$m_2 = m_3 = m_{11} \quad (3.70)$$

$$m_{14} = m_8 + m_{13} \quad (3.69)$$

$$m_{12} = m_1 \quad (3.68)$$

Aplicando a equação da continuidade às linhas e ramificações, temos

$$T_{11} = T_{12} = T_7 = T_{10} = T_9 = T_1 \quad (3.67)$$

$$T_2 = T_3 = T_{TQ1} \quad (3.66)$$

$$T_4 = T_{13} = T_{TQ2} \quad (3.65)$$

$$P_{11} = P_7 = P_{12} = P_{10} = P_9 \quad (3.64)$$

onde n = rotação da turbina e do compressor,
 c_{tem} = constante do tempo da turbina (figura 3.1)
 c_{cv_3} = sinal de controle da válvula CV3 em t.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{c_{tem}}{c_{cv_3} - n} \quad (3.78)$$

é um atraso de primeira ordem [1].

O modelo da válvula reguladora de vazão de vapor, CV3, e da turbina

3.3.5 Modelo da Turbina e sua Válvula de Controle (CV-3)

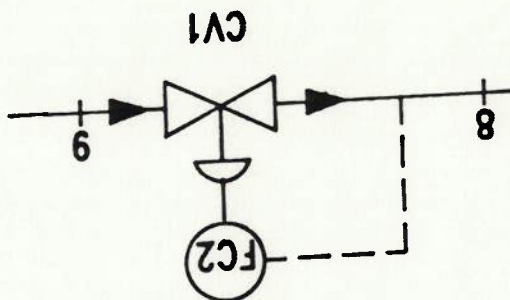
As equações 3.62 a 3.74 e 3.77 são o modelo das linhas da URC.

$$m^4 = \left[m_{T1}^1 + m_{T6}^6 + \frac{V_{TQ2}}{V_{TQ1}} (m_{T1}^2 - m_{T5}^5) \right] \frac{1}{T_{TQ2}} \quad (3.77)$$

ou seja:

$$\frac{BV_{TQ1}}{K} (m_{T5}^5 - m_{T1}^2) = \frac{BV_{TQ2}}{K} (m_{T1}^1 + m_{T6}^6 - m_{T1}^2) \quad (3.76)$$

Figura 3.6 CV1 e FC2



onde m_8 = vazão da linha 8-9;
 ctm_8 = constante de tempo da malha de controle secundária, FC-2, incluindo a válvula CV-1;
 cm_8 = setpoint de vazão na linha 8-9 da malha de controle secundária (FC-2).

$$\frac{dm_8}{dt} = \frac{ctm_8}{1} (cm_8 - m_8) \quad (3.79)$$

Adotamos um esquema de controle do tipo cascata para regular a abertura da válvula anti-"surge", CV-1. Uma malha secundária, FC-2, controla a vazão na linha 8-9, manipulando a abertura da válvula CV-1. O setpoint desta malha secundária é determinado pelo controle anti-"surge", que é o controlador primário. Assumimos como modelo da válvula CV-1 e do sistema de controle de vazão na linha 8-9, FC-2, um atraso de primeira ordem (figura 3.6).

3.3.6 - Modelo da Válvula de Anti-"Surge" (CV-1) e do Sistema de Controle de Vazão na Linha 8-9 Associado (FC-2).

Também adotamos um esquema de tipo cascata para regular a abertura da válvula CV-2. Uma malha secundária controla a vazão na linha 10, manipulando a abertura da válvula CV-2. O setpoint desta malha secundária é determinado por um sistema de controle primário (DMC ou PID). Assumimos como modelo da válvula CV-2 e do sistema de controle de vazão secundário um atraso de primeira ordem.

$$\frac{dm_{10}}{dt} = \frac{1}{\tau_{cm_{10}}} (cm_{10} - m_{10}) \quad (3.80)$$

onde m_{10} = vazão na linha 10,
 cm_{10} = constante de tempo da malha de controle secundária,
 $\tau_{cm_{10}}$ = setpoint de vazão na linha 10.

3.3.8 - Modelo Completo da URC

Concluímos o desenvolvimento do modelo da URC reunindo as equações dos modelos dos componentes e fazendo simplificações no sistema de equações resultante para obter o modelo matemático a ser simulado.

O conjunto das equações dos componentes é

$$\frac{dT_{TQ1}}{dt} = \frac{BP_{TQ1} V_{TQ1}}{K T_{TQ1}} (m_{T_s} - m_{T_{TQ1}}) - \frac{BP_{TQ1} V_{TQ1}}{T_{TQ1}^2} (m_s - m_{T_{TQ1}}); \quad (3.33)$$

$$\frac{dP_{TQ1}}{dt} = \frac{B V_{TQ1}}{K} (m_{T_s} - m_{T_{TQ1}}); \quad (3.34)$$

(3.60) $m_{14} = m_5 :$

(3.59) $T_5 = \text{constante} :$

(3.58) $P_4 = P_5 :$

(3.57.1) $q = \frac{P_3}{P_B} = \frac{T_3 m_3}{T_3 m_3}$

(3.54) $X_p = \frac{K e_p}{K-1} :$

(3.57) $e_p = -5,62 \cdot 10^6 \left(\frac{q}{n} \right)^2 + 2,86 \cdot 10^3 \left(\frac{n}{q} \right) + 0,34 :$

(3.56) $\frac{e_n}{n^2} = 2,287 \cdot 10^{-3} - 2,124 \left(\frac{n}{q} \right) :$

(3.55) $e_n = \frac{1}{X_B} T_3 \left[\frac{P_3}{P_{11}} \right] X_p - 1$;

(3.51) $e_n = \frac{X_B}{1} (T_{11} - T_3) :$

(3.36) $\frac{dP_{TQ2}}{dt} = \frac{BV_{TQ2}}{K} (m_{T1}^1 + m_{T6}^6 - m_{T1Q2}^4) :$

(3.35) $\frac{dT_{TQ2}}{dt} = \frac{BP_{TQ2} V_{TQ2}}{K T_{TQ2}} (m_{T1}^1 + m_{T6}^6 - m_{T1Q2}^4)$

$\frac{dT_{TQ2}}{dt} = \frac{BP_{TQ2} V_{TQ2}}{K T_{TQ2}} (m_{T1}^1 + m_{T6}^6 - m_{T1Q2}^4)$

(3.62)
$$m_1 = f \sqrt{\frac{P_2^2 - P_1^2}{T_{12}}}$$
 ;

(3.63)
$$P_{TQ1} = P_{TQ2} = P_1 = P_6 = P_4 = P_{13} = P_{14} = P_8 = P_5 = P_2 = P_3$$
 ;

(3.64)
$$P_{11} = P_7 = P_{12} = P_{10} = P_9$$
 ;

(3.65)
$$T_4 = T_{13} = T_{TQ2}$$
 ;

(3.66)
$$T_2 = T_3 = T_{TQ1}$$
 ;

(3.67)
$$T_{11} = T_{12} = T_7 = T_{10} = T_9 = T_1$$
 ;

(3.68)
$$m_{12} = m_1$$
 ;

(3.69)
$$m_{14} = m_8 + m_{13}$$
 ;

(3.70)
$$m_2 = m_3 = m_{11}$$
 ;

(3.71)
$$m_{11} = m_{12} + m_7$$
 ;

(3.72)
$$m_7 = m_{10} + m_9$$
 ;

(3.73)
$$m_9 = m_8$$
 ;

(3.74)
$$m_4 = m_{13}$$
 ;

(3.77)
$$m_4 = \left[m_{T_1} + m_{T_6} + \frac{V_{TQ1}}{V_{TQ2}} (m_{T_{1Q1}} - m_{T_5}) \right] \frac{1}{T_{TQ2}}$$
 ;

- 8) substituímos m_{14} por m_5 , já que têm valores iguais de acordo com a equação 3.63.
- 7) eliminamos a equação 3.58, visto que esta é redundante com a equação 3.63.
- 6) substituímos T_{12} , T_7 , T_{10} , T_9 , T_1 por T_{11} , pois têm valores iguais conforme a equação 3.67, e eliminamos esta equação.
- 5) substituímos T_2 e T_{13} por T_{10} porque têm valores iguais conforme a equação 3.66, e eliminamos esta equação.
- 4) substituímos T_4 e T_3 por T_{10} , pois têm valores iguais conforme a equação 3.65, e eliminamos esta equação.
- 3) substituímos P_7 , P_{12} , P_{10} e P_9 por P_{11} , pois também têm valores iguais conforme a equação 3.64 e eliminamos esta equação.
- 2) substituímos P_{10} , P_1 , P_6 , P_4 , P_{13} , P_{14} , P_8 , P_5 , P_2 e P_3 por P_{10} , uma vez que todas têm o mesmo valor segundo as equações 3.58 e 3.63.
- 1) eliminamos a equação 3.36, pois $P_{10} = P_{10}$ conforme a equação 3.63.

Neste conjunto de equações fazemos as seguintes simplificações:

$$\frac{dm_{10}}{dt} = \frac{1}{(cm_{10} - m_{10})} \frac{dm_{10}}{dt} \quad (3.80)$$

$$\frac{dc_m_8}{dt} = \frac{1}{(cm_8 - m_8)} \frac{dc_m_8}{dt} \quad (3.79)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{(ccv_3 - n)} \frac{dn}{dt} \quad (3.78)$$

(resultante da equação 3.34) :

$$\frac{d P_{T01}}{dt} = \frac{B V_{T01}}{K} (m_{T5}^s - m_{T3}^{T01}) \quad (3.81.2)$$

(resultante da equação 3.33) :

$$- \frac{B P_{T01} V_{T01}}{T_{T01}^2} (m_5 - m_3) \quad (3.81.1)$$

$$\frac{d T_{T01}}{dt} = \frac{B P_{T01} V_{T01}}{K T_{T01}} (m_{T5}^s - m_{T3}^{T01})$$

URC:

Das simplificações resulta o sistema de equações que é o modelo matemático da

13) multiplicamos a equação 3.56 por n^2

e eliminamos esta equação.

12) substituímos m_{13} por m_4 , pois têm valores iguais conforme a equação 3.74,

3.73, e eliminamos esta equação.

11) substituímos m_9 por m_8 , porque têm valores iguais conforme a equação

equação 3.70, e eliminamos esta equação.

10) substituímos m_2 e m_{11} por m_3 , porque têm valores iguais conforme a

3.68, e eliminamos esta equação.

9) substituímos m_{12} por m_1 , porque têm valores iguais de acordo com a equação

3.60, e eliminamos esta equação.

(equação 3.54) :

$$\frac{xp}{K - 1} = \frac{K ep}{K - 1} \quad (3.81.8)$$

(equação 3.57) :

$$ep = -5,62 \cdot 10^6 \left(\frac{n}{q} \right)^2 + 2,86 \cdot 10^3 \left(\frac{n}{q} \right) + 0,34 \quad (3.81.7)$$

(resultante da equação 3.56) :

$$e_n = 2,28 \cdot 10^{-3} n^2 - 2,124 q n \quad (3.81.6)$$

(resultante da equação 3.55) :

$$e_n = \frac{1}{T_{101}} \begin{bmatrix} xp \\ P_{11} \\ xp \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{101} \\ P_{101} \\ -1 \end{bmatrix} \quad (3.81.5)$$

(resultante da equação 3.51) :

$$e_n = \frac{1}{(T_{11} - T_{101})} \begin{bmatrix} xp \\ B \\ T_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{101} \\ T_{101} \\ T_{101} \end{bmatrix} \quad (3.81.4)$$

(resultante da equação 3.35) :

$$\frac{d T_{102}}{dt} = \frac{K T_{102}}{B P_{102} V_{102}} (m_1 T_{11} + m_6 T_6 - m_4 T_{102}) - \frac{T_2}{B P_{102} V_{102}} (m_1 + m_6 - m_4) \quad (3.81.3)$$

(resultante da equação 3.77) :

$$m_4 = \left[m_1 T_{11} + m_6 T_6 + \frac{V_{T02}}{V_{T01}} (m_3 T_{T01} - m_5 T_5) \right] \frac{1}{T_{T02}} \quad (3.81.16)$$

(resultante da equação 3.72) :

$$m_7 = m_{10} + m_8 \quad (3.81.15)$$

(resultante da equação 3.71) :

$$m_3 = m_1 + m_7 \quad (3.81.14)$$

(resultante da equação 3.69) :

$$m_5 = m_8 + m_4 \quad (3.81.13)$$

(resultante da equação 3.63) :

$$P_{T01} = P_{T02} \quad (3.81.12)$$

(resultante da equação 3.62) :

$$m_1 = f \sqrt{\frac{P_{11} T_{11}}{P_2^2 - P_{T02}^2}} \quad (3.81.11)$$

(equação 3.59) :

$$T_5 = \text{constante} \quad (3.81.10)$$

(resultante da equação 3.57.1) :

$$q = \frac{P_{T01}}{m_3 T_{T01}} \frac{1}{B} \quad (3.81.9)$$

Como a diferença entre o número de variáveis e o de equações do sistema é 6, é necessário fornecer os valores de 6 variáveis para que o mesmo torne-se determinado. Finalmente, é preciso fornecer os valores iniciais de algumas das variáveis pois o sistema contém equações diferenciais de primeira ordem. Todos estes aspectos são desenvolvidos nas secções seguintes.

Este sistema tem 19 equações; 25 variáveis: T^{TQ1} , P^{TQ1} , m_5 , T_5 , $CCV3$, cm_{10} , m_3 , T^{TQ2} , P^{TQ2} , m_1 , T_{11} , m_6 , T_6 , m_4 , e_n , Xp , P_{11} , q , n , e_d , cm_8 , f , m_7 , m_8 , m_{10} ; e 7 parâmetros: $K, B, V^{TQ1}, V^{TQ2}, ctm, ctm_8, ctm_{10}$.

(equação 3.80).

$$\frac{dm_{10}}{dt} = \frac{1}{(cm_{10} - m_{10})} \quad (3.81.19)$$

(equação 3.79) :

$$\frac{dm_8}{dt} = \frac{1}{(cm_8 - m_8)} \quad (3.81.18)$$

(equação 3.78) :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{(CCV3 - n)} \quad (3.81.17)$$

3.4 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO PARA A SIMULAÇÃO DA URC

O passo inicial do desenvolvimento do algoritmo para a simulação da URC é fazer o algoritmo de resolução do sistema formado pelas equações 3.81. Começamos verificando: quais variáveis devem ser dados de entrada; e quais variáveis devem ter seus valores iniciais fornecidos. O número de variáveis que devem ser dados de entrada é 6 : $f, m_6, T_6, cm_8, cm_{10}$ e ccv_3 . Os valores de m_6 e T_6 são dados na seção de simulação.

É necessário fornecer os valores iniciais das variáveis cujas derivadas aparecem nas equações diferenciais do modelo e das variáveis manipuladas e medidas dos controladores. Essas variáveis são: $T_{TQ1}, P_{TQ1}, T_{TQ2}, n, m_{10}, ccv_3, cm_8, cm_{10}, m_1, m_8$. Seus valores também são dados na seção de simulação.

A escolha dos métodos numéricos utilizados na resolução do sistema de equações 3.81 é o passo seguinte. Para a integração das equações diferenciais 3.81.1, 3.81.2, 3.81.3, 3.81.17, 3.81.18, 81.19 utilizamos o método de Euler [3]:

$$X(t + dt) = X(t) + \frac{dX(t)}{dt} dt, \quad (3.82)$$

onde t = tempo ;

dt = intervalo de tempo do passo de integração ;

$X(t)$ = valor de X no instante t ;

$X(t + dt)$ = valor de X no instante $t+dt$;

$\frac{dX(t)}{dt}$ = valor da primeira derivada de X no instante t .

Para a convergência das variáveis m_1 e m_5 adotamos o método de substituição parcial [3]:

$$v_{i+1} = v_i + (v_c - v_i) f_c, \quad (3.83)$$

Podemos finalmente escrever o algoritmo de resolução das equações 3.81. Apresentamos o algoritmo no diagrama 3.1.

onde v_j^i = valor da variável na interação ,
 v^c = valor calculado da variável ao final da interação ,
 v^{j+1} = valor da variável na interação seguinte ,
 fc = fator de convergência.

Notas: 1) O algoritmo apresenta os cálculos a serem feitos em cada passo da interação.

2) O prefixo 3.81 na numeração das equações é omitido no diagrama 3.1.

3) As equações 3.81.4 e 3.81.5 estão modificadas para colocar T_{II} e P_{II} em evidência.

Diagrama 3.1- Contínua

$$m_1 = f \left[\frac{P_2^{11} - P_2^{102}}{T_{11}} \right] \quad (11)$$

Modelo do Compressor

$$q = T_{101} m_3 / (P_{101} B) \quad (9)$$

$$ep = -5,62 \cdot 10^6 (q/n)^2 + 2,86 \cdot 10^3 (q/n) + 0,34 \quad (7)$$

$$xp = (K - 1) / (K ep) \quad (8)$$

$$e_n = 2,287 \cdot 10^{-3} n^2 - 2,124 q n \quad (6)$$

$$P_{11} = P_{101} \left[\frac{e_n x_p B}{T_{101}} + 1 \right]^{1/xp}$$

$$T_{11} = e_n x_p B + T_{101}$$

(1. Convergência)

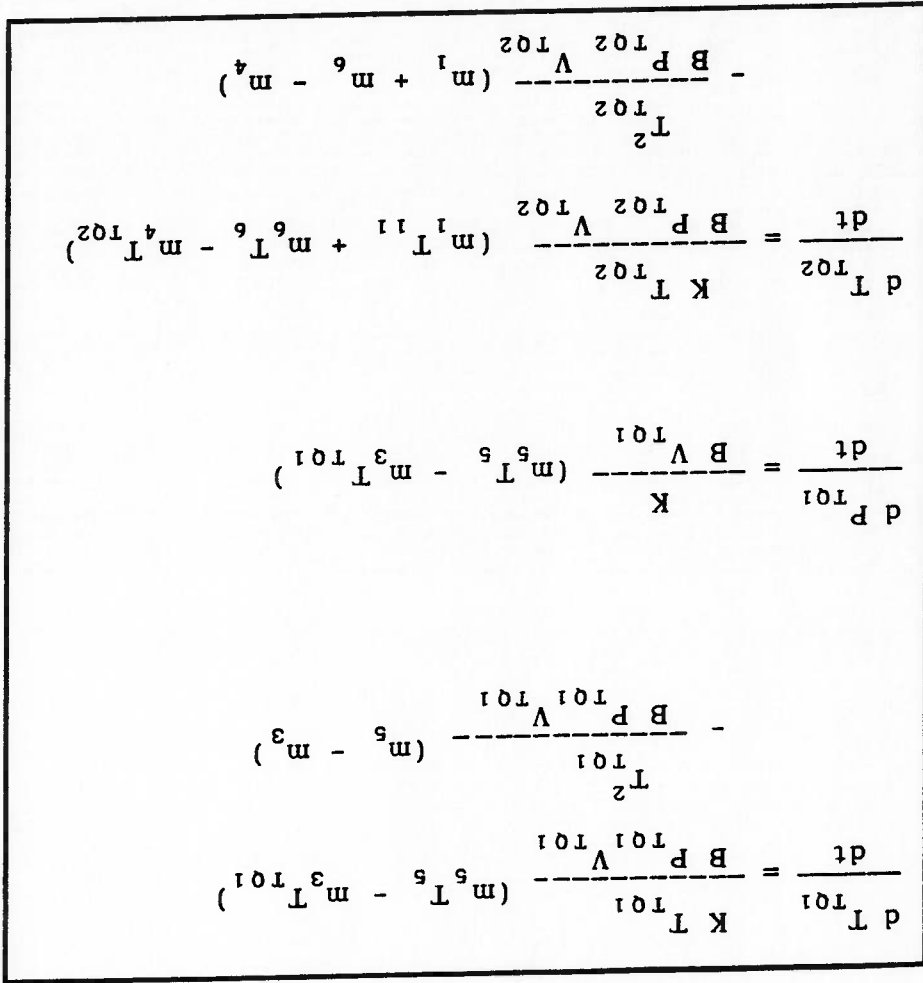
$$m_3 = m_1 + m_7$$

$$m_7 = m_{10} + m_8 \quad (15)$$

$$T_5 = \text{constante} \quad (10)$$

$$P_{101} = P_{102} \quad (12)$$

Diagrama 3.1 - Continuação



Integração

(2: Convergência)

$$m_4 = \left[m_1 T_{11} + m_6 T_6 + \frac{V_{T01}}{V_{T02}} (m_3 T_{T01} - m_s T_s) \right] \frac{1}{T_{T02}} \quad (16)$$

(13) $m_s = m_8 + m_4$

Diagrama 3.1 Final

$$(18) \quad \frac{dm_8}{dt} = \frac{ctm_8}{1} - (cm_8 - m_8)$$

$$(19) \quad \frac{dm_{10}}{dt} = \frac{ctm_{10}}{1} - (cm_{10} - m_{10})$$

$$(17) \quad \frac{dn}{dt} = \frac{ctem}{1} - (CCV3 - n)$$

Integração

3.5 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DA URC

Os parâmetros do modelo da URC são: K, B, V^{Tq1} , V^{Tq2} , ctm^8 , ctm^{10} . Dividimos estes parâmetros em 3 categorias:

a) parâmetros relacionados às propriedades físicas do gás: K e B ;

b) parâmetros relacionados à geometria da URC: V^{Tq1} e V^{Tq2} ;

c) parâmetros relacionados à dinâmica dos equipamentos: ctm^8 , ctm^{10} .

Determinamos os parâmetros do gás considerando o seguinte:

a) o gás que circula na URC é na sua maior parte hidrogênio;

b) as pressões de operação da URC estão em torno de 2MPa, e as temperaturas,

entre 300 e 400 K;

c) o peso molecular do gás é de 5,8 Kg/K Mol;

d) o hidrogênio, para as condições de pressão e temperatura apresentadas no

item b, tem $K=1,4$ e $Z=1,0$.

(Veja os dados referentes aos itens a, b e c na figura 3.1.)

Adotamos, com base nas considerações a, b e d,

$$K = 1,4$$

e

$$Z=1,0$$

para o gás que circula na URC. Calculamos o valor de B em função de Z e de Mol (Mol=5,8 Kg/K Mol conforme a consideração c) usando a equação 3.4.

$$B = 7,07 \cdot 10^{-7} \text{ Kg K Pa}^{-1} \text{ m}^{-3}$$

O volume total dos tanques da URC é de 100 m^3 [1]. Como esta é a única informação disponível da geometria do sistema, adotamos

$$V^{Tq1} = V^{Tq2} = 50 \text{ m}^3$$

(tabela de dados da figura 3.1).

A constante de tempo da turbina, c_{tem} , é de 5s (figura 3.1).

A constante de tempo da malha de controle de vazão na linha 8-9, FC-2, e da válvula CV-1 é adotada, arbitrariamente, como sendo 5s.

A constante de tempo da válvula CV-2 é adotada, arbitrariamente, como sendo 5s.

Os valores iniciais das variáveis P_{TQ1} , P_{II} , m_{10} e m_8 são de operação normal da URC:

$$P_{II} = 2,33 \cdot 10^6 \text{ Pa},$$

$$P_{TQ1} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ Pa},$$

$$m_{10} = 0,6 \text{ Kg/s},$$

$$m_8 = 0,1 \text{ kg/s}$$

(figura 3.1).

Quando a URC está em operação normal, a vazão na linha 8-9, m_8 , é 0,1 kg/s. Portanto o valor inicial do "Set-point" do FC-2 é 0,1, ou seja,

$$cm_8 = 0,1.$$

Adotamos, arbitrariamente, o valor inicial de T_{TQ1} :

$$T_{TQ1} = 320 \text{ K}$$

A partir dos valores de K , B , m_s , m_l , P_{II} , P_{TQ1} , T_{TQ1} , calculamos os valores iniciais de ccv_3 , n , T_{TQ2} , T_{II} e f , usando as equações 3.79.1, 3.81.4 à 3.81.9

A perturbação da simulação n.^o 9 é um pulso de -35% no coeficiente de vazão na linha 12-1, f , com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. Neste transiório o compressor entra em surge enquanto dura o pulso de f e volta à

Simulação n.^o 9 (figura 3.14)

A perturbação da simulação n.^o 8 é um pulso de +35% no coeficiente de vazão na linha 12-1, f , com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. A resposta da URC é um aumento: da vazão de recirculação no sistema, m_1 ; das vazões volumétrica e em massa no compressor, q e m_3 ; e da variável q/n_1 ; e uma diminuição: das pressões no sistema, P^{T01} e P^{11} ; e diferença de pressões entre a descarga e a sucção do compressor, $P^{11} - P^{T01}$. As variáveis retornam aos valores de operação normal após o término do pulso. O resultado é coerente pois a massa de gás contida na URC não varia no transiório.

Simulação n.^o 8 (figura 3.13)

A perturbação da simulação n.^o 7 é um pulso de +20% no sinal de controle da válvula CV3, CCV3, com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. A resposta da URC é um aumento: da vazão no compressor em massa e volumétrica, m_3 e q ; da vazão de recirculação no sistema, m_1 ; do trabalho politrópico no compressor, e_n ; das pressões no sistema, P^{T01} e P^{11} ; da diferença de pressões entre a descarga e a sucção do compressor, $P^{11} - P^{T01}$. Estas alterações aparecem apenas enquanto dura o pulso. As variáveis retornam exponencialmente aos valores de operação normal após o término do pulso. O resultado é coerente pois a massa de gás contida na URC não varia no transiório.

Simulação n.^o 7 (figura 3.12)

trabalho politrópico no compressor, e_n ; das pressões no sistema, P^{T01} e P^{11} ; da diferença de pressões entre a descarga e a sucção do compressor, $P^{11} - P^{T01}$. Estas alterações aparecem somente enquanto dura o pulso de ccv3. As variáveis retornam exponencialmente aos valores de operação normal após o término do pulso. O resultado é coerente pois a massa de gás contida na URC não varia no transiório.

A rotina PERTURBACAO está na unidade PERTURB (listagem 3.4). A rotina U_URC (listagem 3.2). O vetor v é definido na unidade VAR_URC (listagem 3.3). O programa CURC ocupa um arquivo (listagem 3.1). A rotina URC está na unidade separados em arquivos de programa diferentes, chamados de unidades [24]. O IBM-PC e compatíveis [4] [24]. Por ser extenso, o programa e as rotinas estão Turbo-Pascal, versão 5.5, da Borland International, para uso em computadores Para escrever o programa e as rotinas usamos a linguagem A rotina CONTROLE é discutida nos capítulos seguintes.

modelo do processo pelo método de Euler (equação 3.82).
A rotina INTEGRADOR faz a integração das equações diferenciais do de tempo também selecionados no início do programa.

selecionados no início do programa. Estes resultados são gravados a intervalos A rotina REGISTRADOR grava os resultados da simulação em arquivos devolve vetor v atualizado para o programa.

CURC e calcula o valor das variáveis do processo no instante t. Em seguida excessão da integração, que simula o processo da URC. URC recebe o vetor v de A rotina URC implementa o algoritmo mostrado no diagrama 3.1, com caso, a rotina PERTURBACAO simula um degrau.

É possível fazer a duração do pulso maior que o tempo de simulação. Neste

onde x = valor da variável pulsada no instante anterior ao pulso,
bias = valor em relação o pulso será proporcional caso x seja zero,
imp = variação relativa do valor da variável pulsada.

$$(x + bias) \text{ imp}$$

intensidade do pulso aplicado é
programa. O pulso tem início no instante tpi e final no instante tpf. A
integração) e aplica um pulso sobre uma variável selecionada no início do
A rotina PERTURBACAO recebe do programa CURC v, t e dt (intervalo de
URC, e sobre a variável independente t, tempo.
rotinas operam sobre o vetor v, que contem todas as 25 variáveis do modelo da
completa da URC: PERTURBACAO, URC, INTEGRADOR, REGISTRADOR e CONTROLE. Estas
O programa CURC (listagem 3.1) reúne 5 rotinas que fazem a simulação

INTEGRAÇÃO está na unidade INTEGR (listagem 3.5). A rotina REGRISIKADOK está na unidade REG (listagem 3.6). A unidade de inicialização do programa CURC é OPERADOR (listagem 3.7). Esta unidade define: o tempo total de simulação, tf; a variável pulsada; a intensidade do pulso, imp e bias; o instante inicial e final do pulso, tpi e tpf; os nomes dos arquivos onde serão gravados os resultados da simulação; o intervalo de tempo de gravação dos resultados.

3.8 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Realizamos dez simulações da URC, utilizando o programa CURC. A seguir descrevemos os transitórios simulados, apresentamos e discutimos cada uma das respostas.

Nota - As unidades utilizadas em todos os gráficos deste trabalho são:

tempo: s;
vazão em massa: kg/s;
vazão em volume: m^3/s ;
pressão: $N/m^2 = Pa$ (sempre em valor absoluto);
rotação: rpm;
vazão em volume/rotação: $m^3 \cdot rpm^{-1}$;
coeficiente de vazão: $kg \cdot K^{1/2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$.

Simulação n.º 1 (listagem 3.8)

Simulação n.º 1 é uma verificação do modelo da URC, do programa CURC e das condições iniciais. Não é imposta nenhuma perturbação à URC. O programa simula a operação durante 3600s (1 hora) da URC para as condições iniciais, condições de operação normal do sistema, dadas no instante $t=0$. Os resultados são estáveis. Indicam que não foram cometidos erros grosseiros nas equações de conservação de massa e energia e na determinação dos valores iniciais das variáveis.

Simulação n.º 2 (figura 3.7)

A perturbação na simulação n.º 2 é um pulso de -20% na vazão de gás que entra no sistema, m_6 , com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. A resposta da URC é uma diminuição das pressões no sistema, P_{TQ1} e P_{II} , da vazão de circulação do gás, m_1 , e um aumento da vazão volumétrica no compressor, q (aumento de q/n com n constante). Portanto, ocorre uma diminuição da massa de gás contida na URC.

Simulação n.º 3 (figura 3.8)

A perturbação na simulação n.º 3 é um pulso de + 20% na vazão de gás que entra no sistema, m_6 , com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. A resposta da URC é um aumento das pressões no sistema, P^{TQ1} e P^{II} , da vazão de recirculação, m_1 , e uma diminuição da vazão, volumétrica no compressor, q (diminuição de q/n com n constante). Portanto há um aumento da massa de gás contida na URC.

Simulação n.º 4 (figura 3.9)

A perturbação na simulação n.º 4 é um pulso de +20% no setpoint da vazão de saída do sistema, cm^{10} , com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. A resposta da URC é uma diminuição das pressões no sistema, P^{TQ1} e P^{II} , da vazão de recirculação, m_1 , e um aumento da vazão volumétrica no compressor q (aumento de q/n com n constante). Portanto, há uma diminuição da massa de gás contida na URC.

Simulação n.º 5 (figura 3.10)

A perturbação da simulação n.º 5 é um pulso de -20% no setpoint da vazão de saída do sistema, cm^{10} , com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. A resposta da URC é um aumento das pressões no sistema, P^{TQ1} e P^{II} , da vazão de recirculação, m_1 , e uma diminuição da vazão volumétrica no compressor, q (diminuição de q/n com n constante). Portanto, há um aumento da massa de gás contida na URC.

Simulação n.º 6 (figura 3.11)

A perturbação da simulação n.º 6 é um pulso de -20% no sinal de controle da válvula CV3, ccv_3 , com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. A válvula CV3 regula a rotação do compressor, n . A resposta de n à variação de ccv_3 é um atraso de 1ª ordem. A resposta da URC é uma diminuição: da vazão no compressor em massa e volumétrica, m_3 e q ; da vazão de recirculação no sistema, m_1 ; do

Estas alterações aparecem somente enquanto dura o pulso de ccv_3 . As variáveis retornam exponencialmente aos valores de operação normal após o término do pulso. O resultado é coerente pois a massa de gás contida na URC não varia no transitório.

Simulação n.º 7 (figura 3.12)

A perturbação da simulação n.º 7 é um pulso de +20% no sinal de controle da válvula CV3, CCV3, com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. A resposta da URC é um aumento: da vazão no compressor em massa e volumétrica, m_3 e q ; da vazão de recirculação no sistema, m_1 ; do trabalho politrópico no compressor, e_n ; das pressões no sistema, P^{TQ1} e P^{II} ; da diferença de pressões entre a descarga e a sucção do compressor, $P^{II} - P^{TQ1}$. Estas alterações aparecem apenas enquanto dura o pulso. As variáveis retornam exponencialmente aos valores de operação normal após o término do pulso. O resultado é coerente pois a massa de gás contida na URC não varia no transitório.

Simulação n.º 8 (figura 3.13)

A perturbação da simulação n.º 8 é um pulso de +35% no coeficiente de vazão na linha 12-1, f , com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. A resposta da URC é um aumento: da vazão de recirculação no sistema, m_1 ; das vazões volumétrica e em massa no compressor, q e m_3 ; e da variável q/n ; e uma diminuição: das pressões no sistema, P^{TQ1} e P^{II} ; e diferença de pressões entre a descarga e a sucção do compressor, $P^{II} - P^{TQ1}$. As variáveis retornam aos valores de operação normal após o término do pulso. O resultado é coerente pois a massa de gás contida na URC não varia no transitório.

Simulação n.º 9 (figura 3.14)

A perturbação da simulação n.º 9 é um pulso de -35% no coeficiente de vazão na linha 12-1, f , com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. Neste transitório o compressor entra em surge enquanto dura o pulso de f e volta à condição de operação normal do término do pulso. A resposta da URC é uma

condição de operação normal do término do pulso. A resposta da URC é uma diminuição: da vazão de recirculação no sistema, m_1 ; das vazões volumétrica e em massa no compressor, q e m_3 ; e da variável q/n ; e um aumento: das pressões no sistema, P_{TQ1} e P_{II} ; e diferença de pressões entre a descarga e a sucção do compressor, $P_{II} - P_{TQ1}$. As variáveis retornam aos valores de operação normal após o término do pulso. O resultado é coerente pois a massa de gás contida na URC não varia no transitório.

Simulação n.º 10 (figura 3.15)

A perturbação da simulação n.º 10 é um pulso de +1700% aplicado no "set-point" de vazão da linha 8-9, cm^8 (controlador FC-2), com início em $t=5s$ e final em $t=170s$. Isto é, o "set-point" de vazão, cm^8 , passa de 0,1 para 1,7 no início do pulso. A resposta da URC é uma diminuição: das pressões no sistema, P_{TQ1} e P_{II} ; da diferença de pressões entre a descarga e a sucção do compressor, $P_{II} - P_{TQ1}$; da vazão de recirculação na linha 12-1, m_1 ; e um aumento: das vazões volumétrica e em massa no compressor, m_3 e q ; da variável q/n ; e da recirculação total no sistema, $m_1 + m_8$. As variáveis retornam aos valores de operação normal após o término do pulso. O resultado é coerente por três motivos:

1) a massa de gás não varia no transitório.

2) a resposta da URC em termos de pressões e da variável q/n é similar à obtida em pulso de +35% em f (simulação n.º 8).

3) a abertura da válvula CV-1 ($cm^8 > 0$) resulta no afastamento do compressor da condição de "surge" (aumento de q/n).

Figura 3.7 m₆-20%

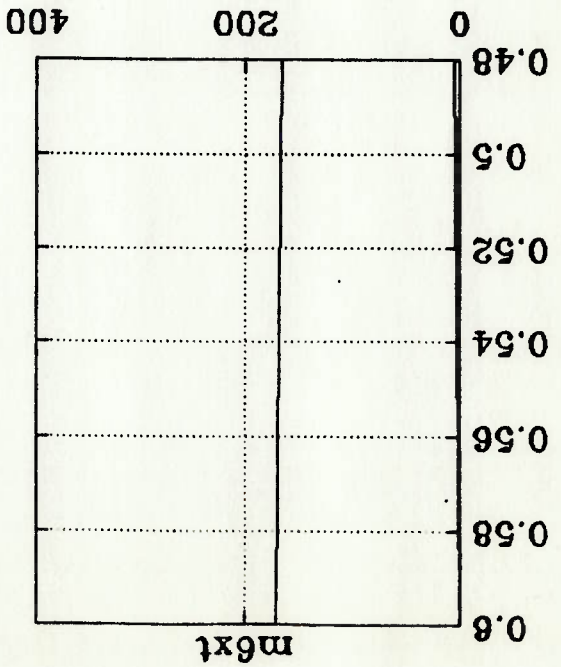
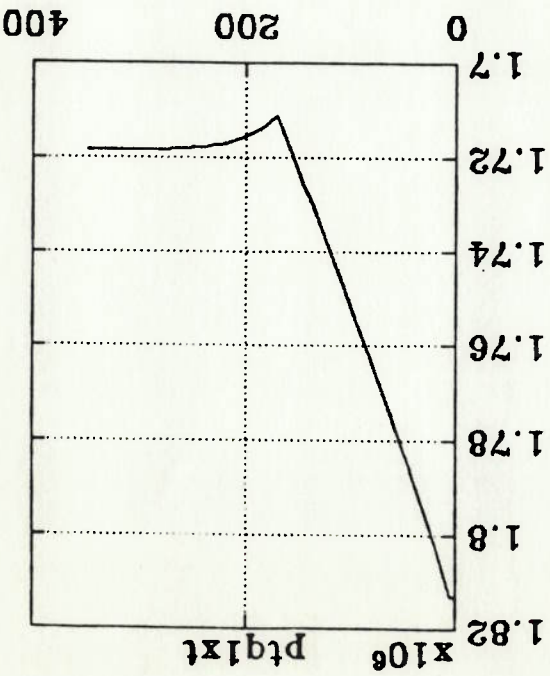
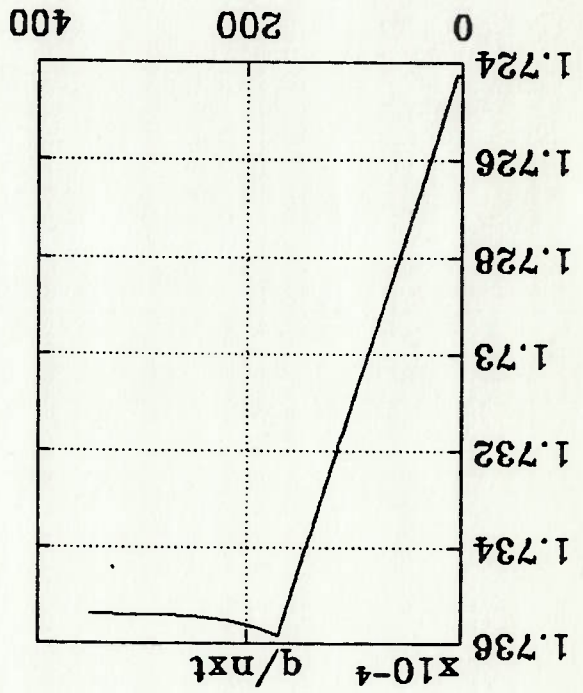
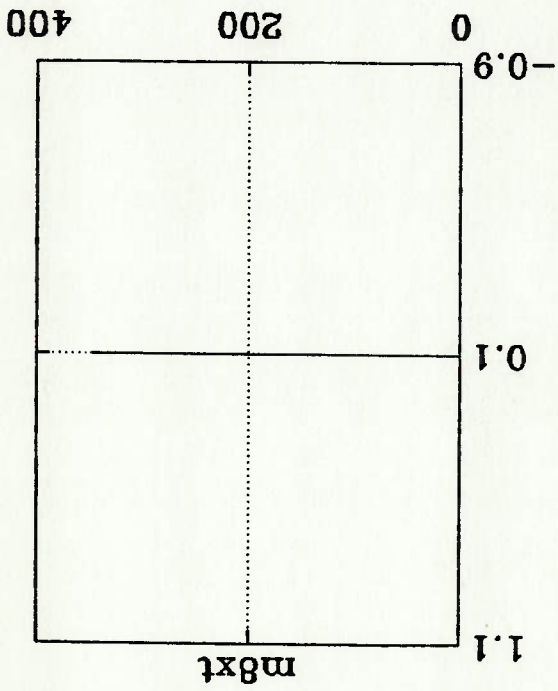


Figura 3.7 m₆-20% continuação

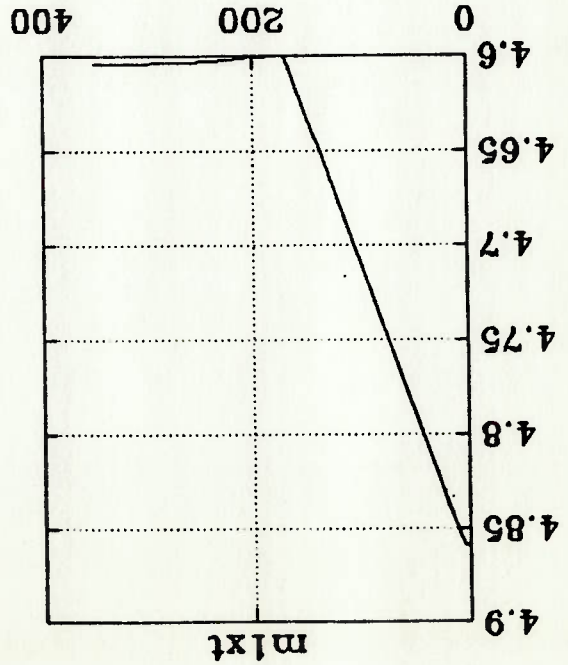
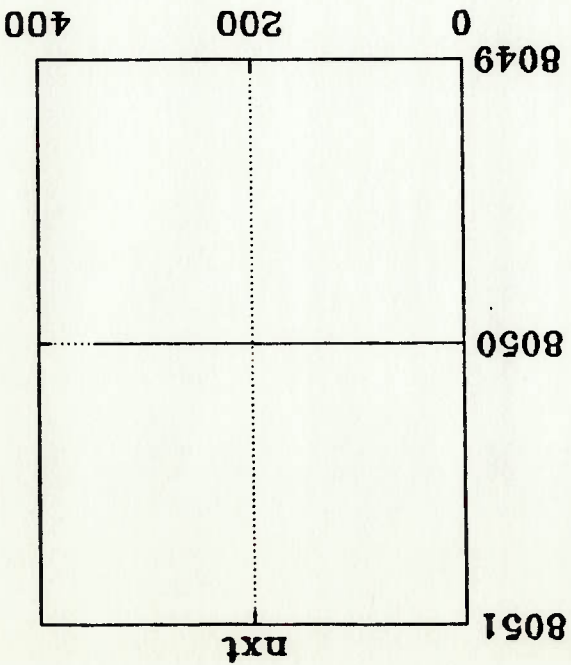
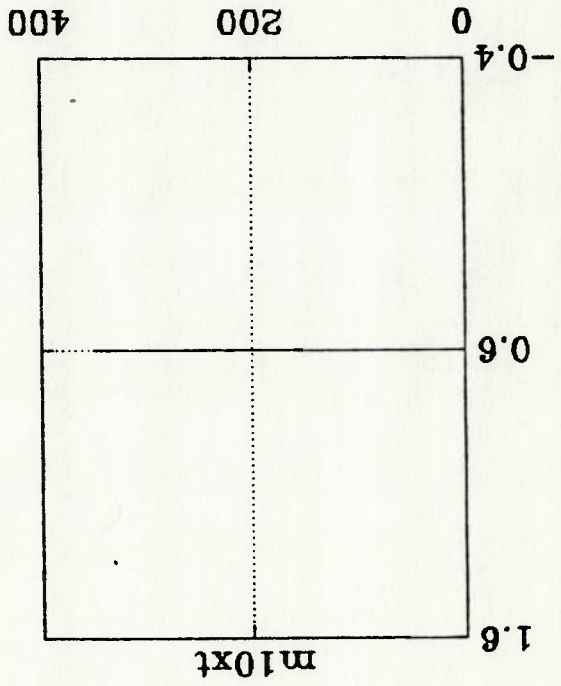
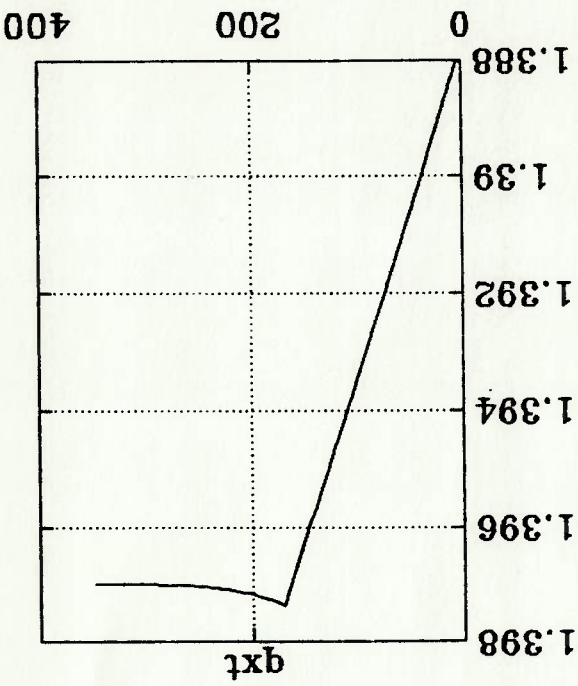


Figura 3.8 m⁶ 20%

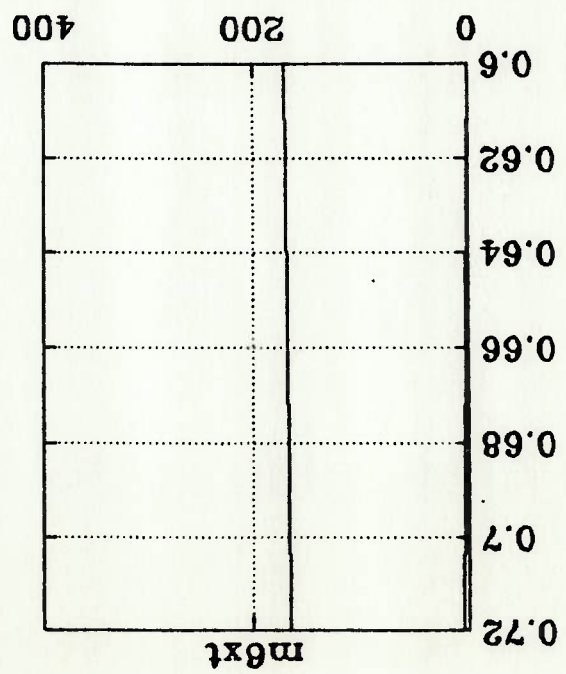
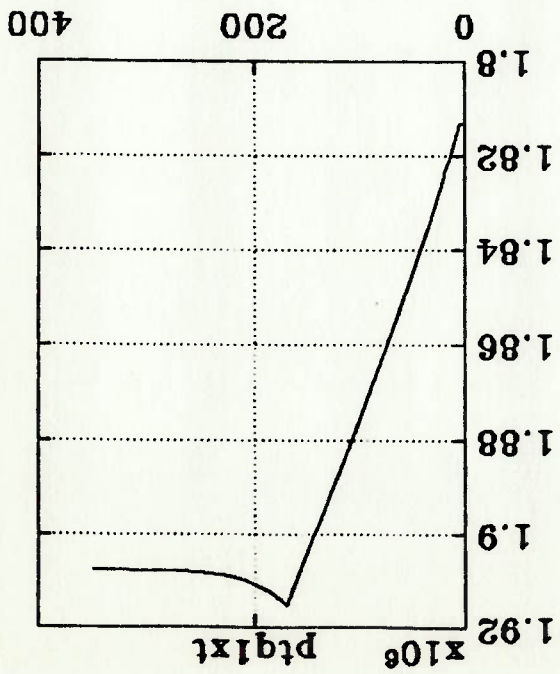
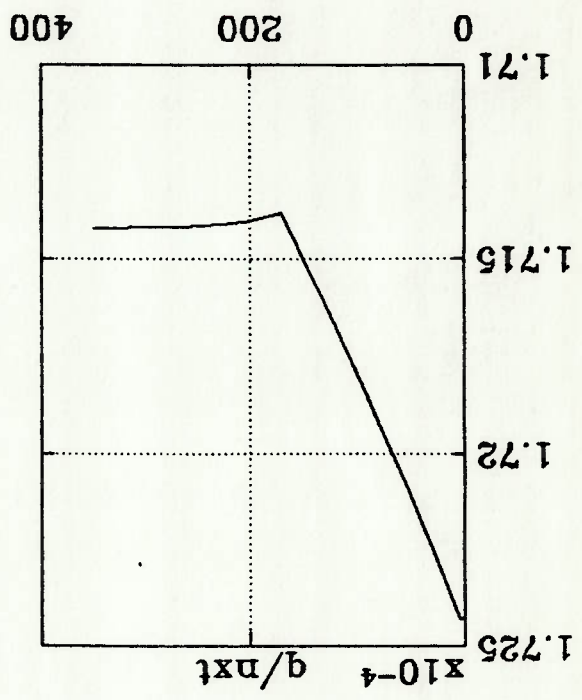
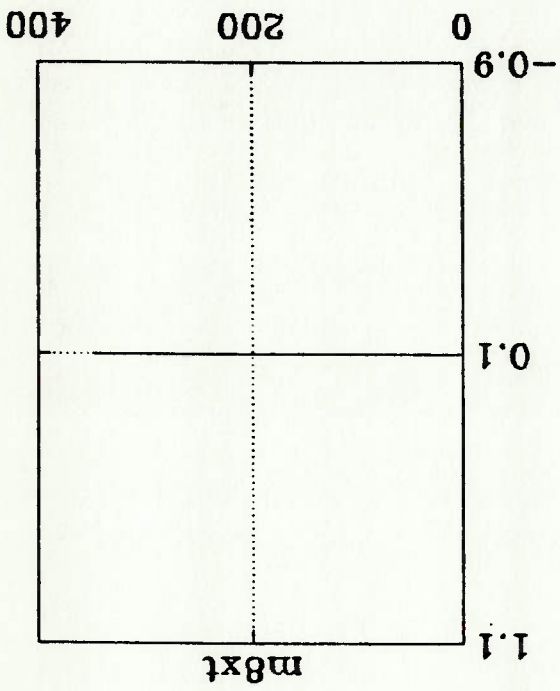


Figura 3.8 m⁶ 20% continuação

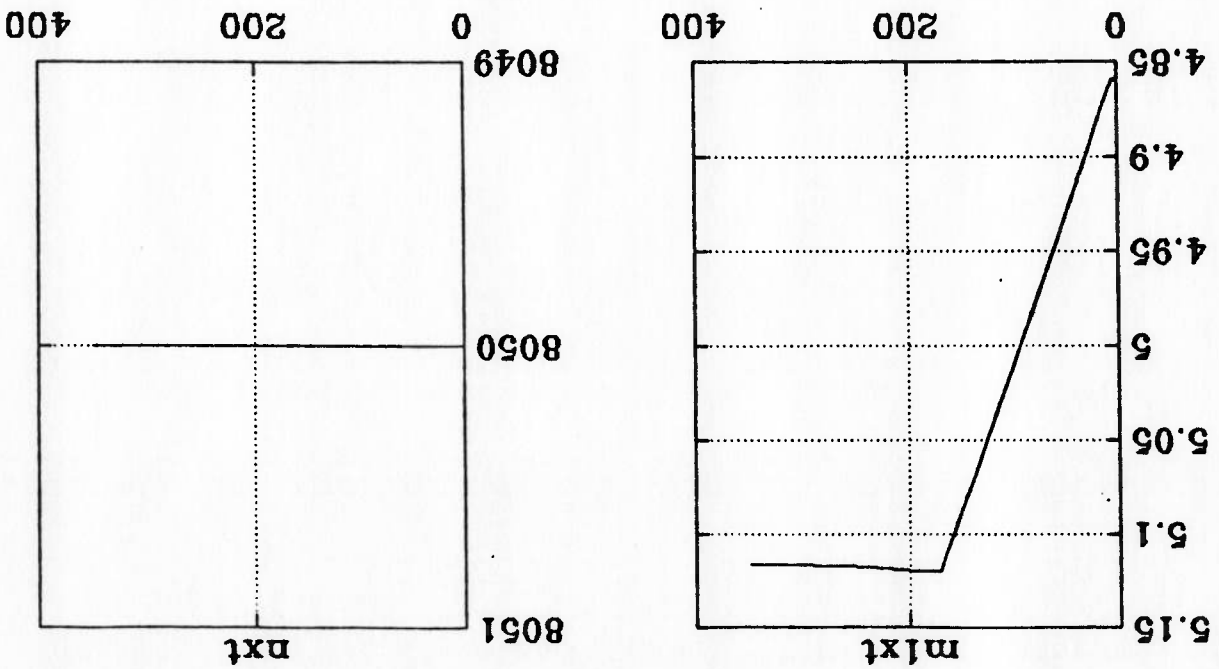
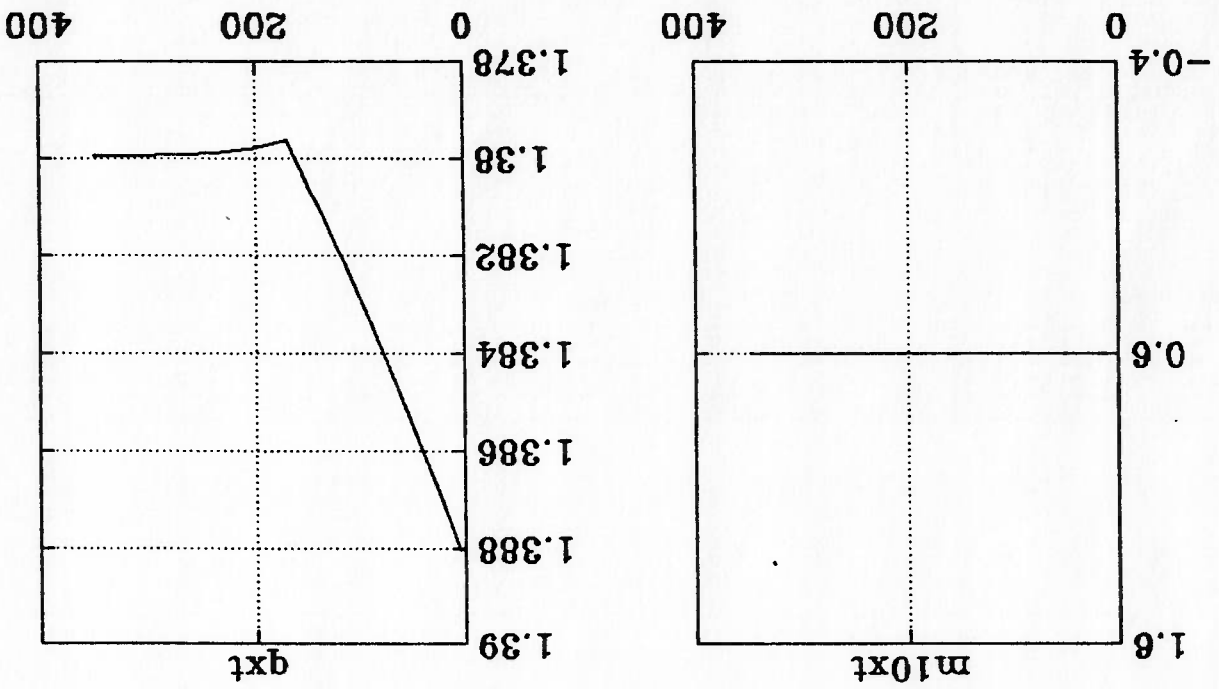


Figura 3.9 cm^{10} 20%

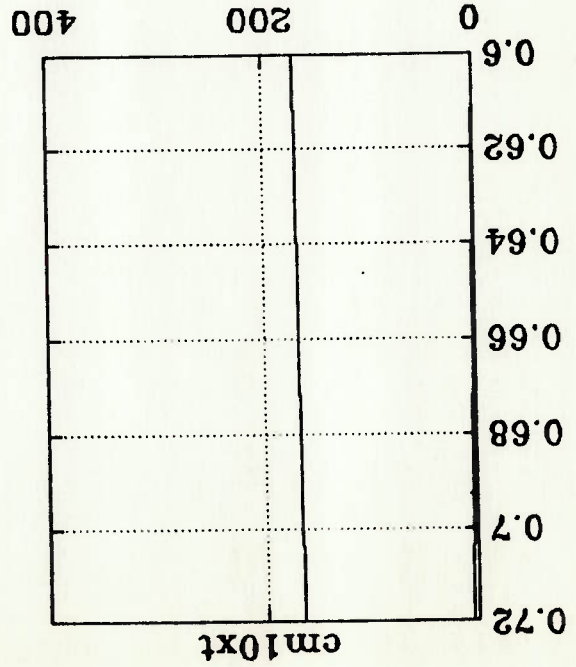
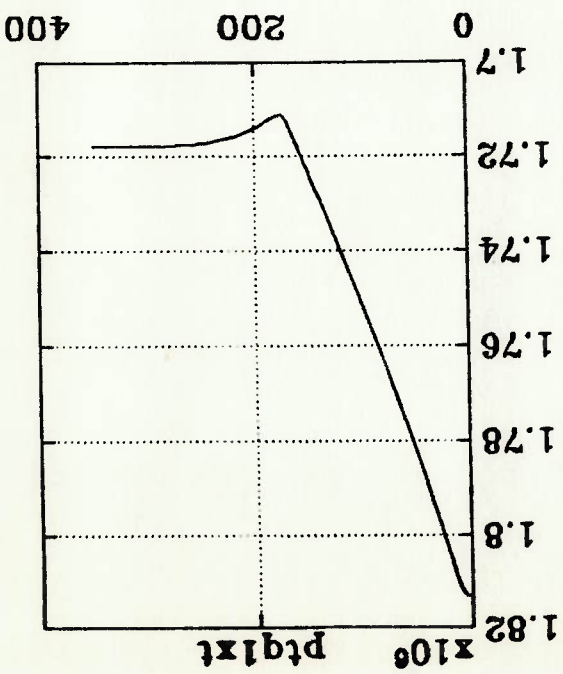
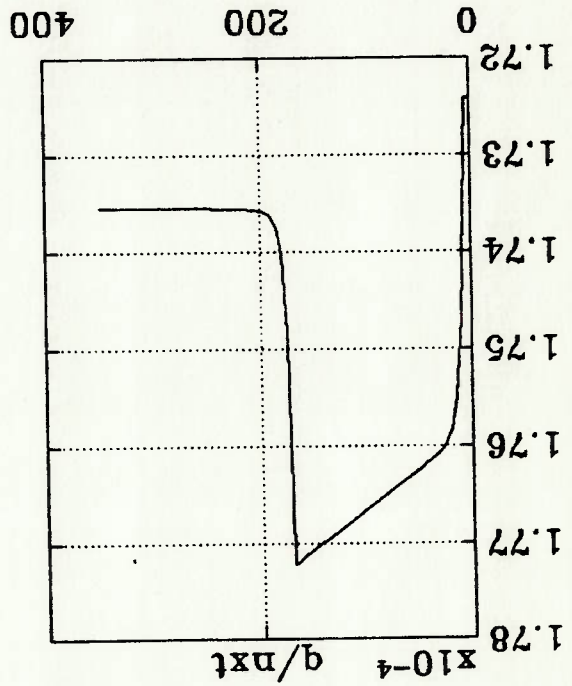
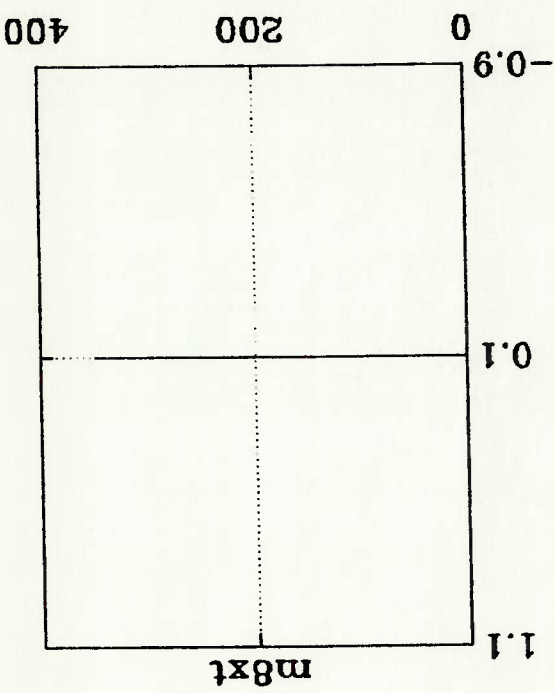


Figura 3.9 cm¹⁰ 20% continuação

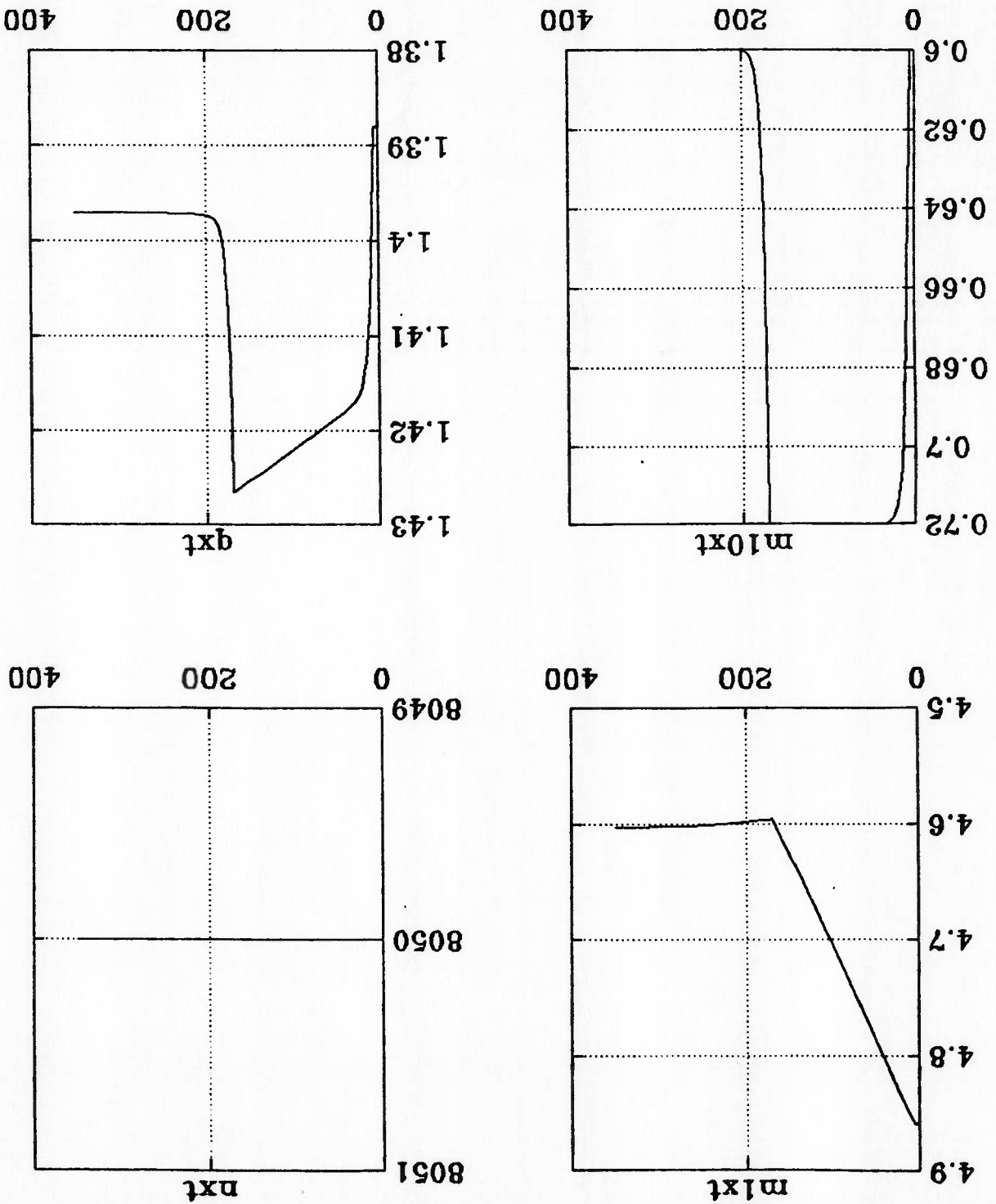


Figura 3.10 cm^{10} -20%

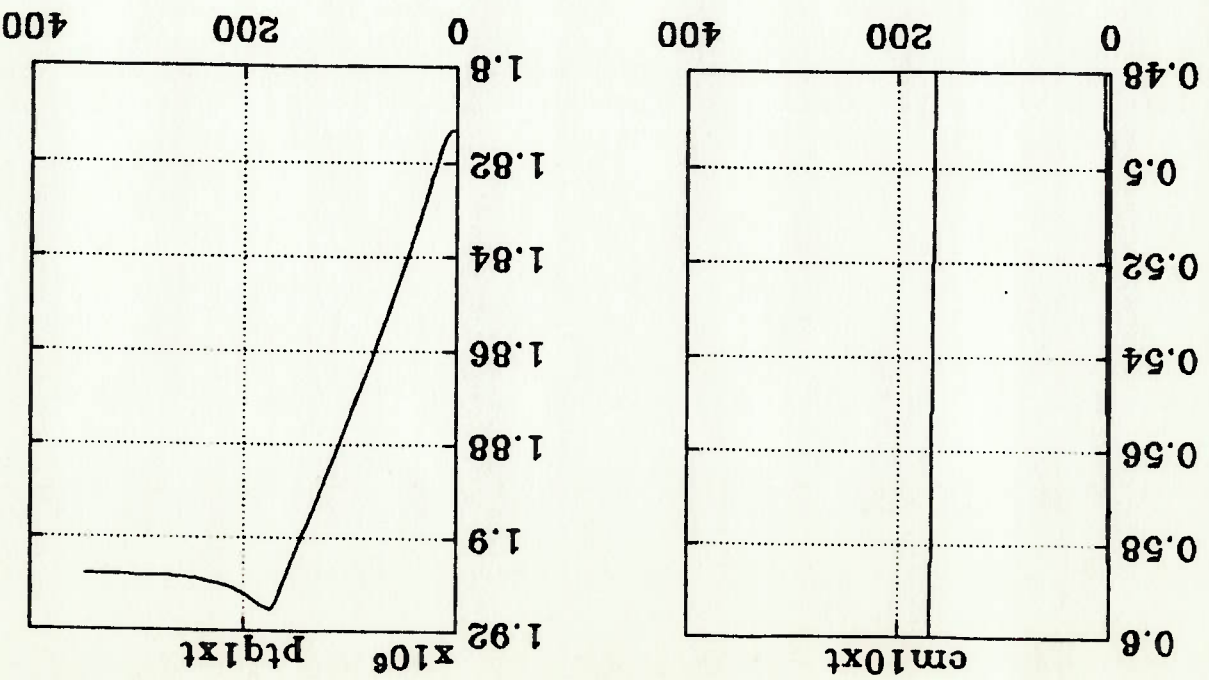
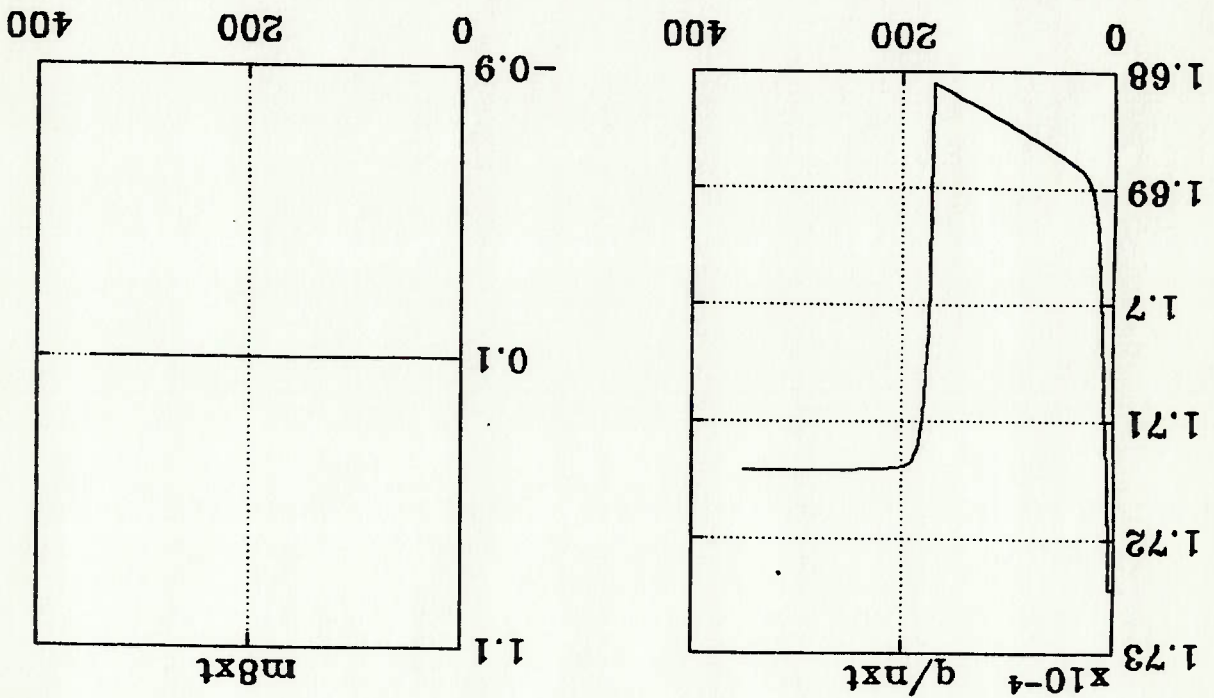


Figura 3.10 cm^{-1} - 20% continuação

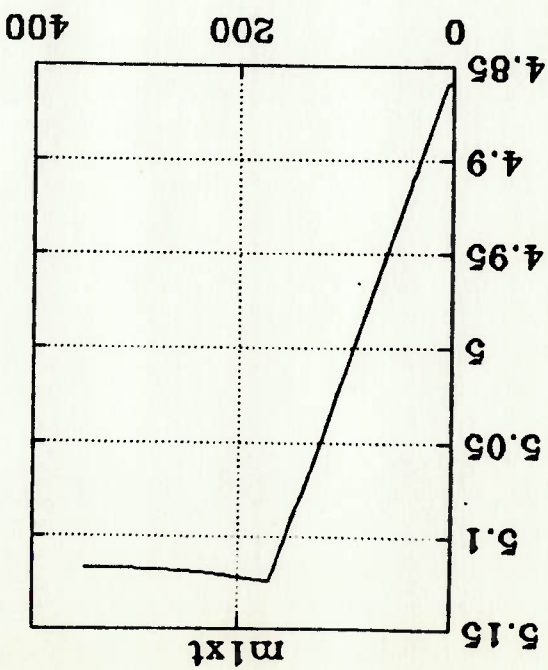
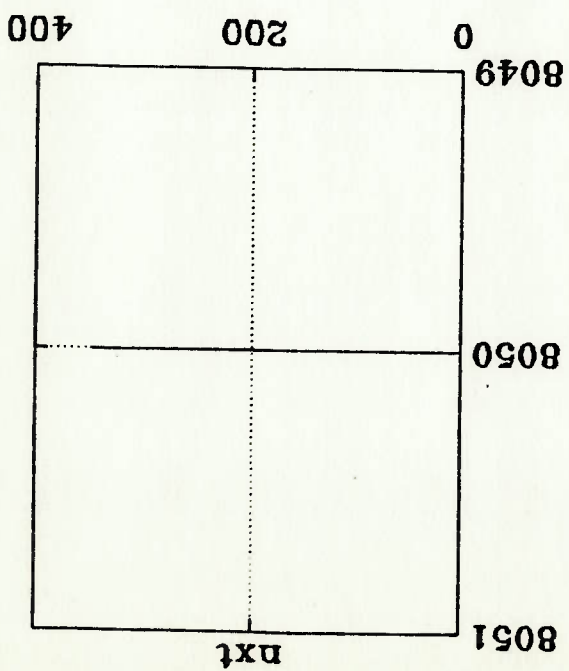
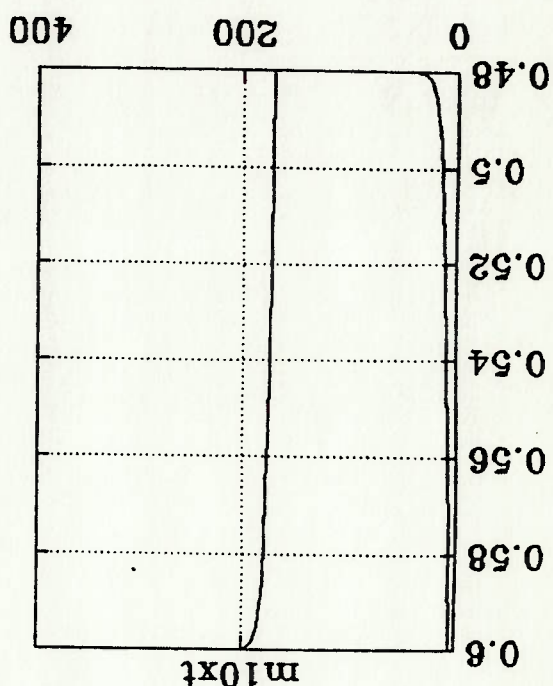
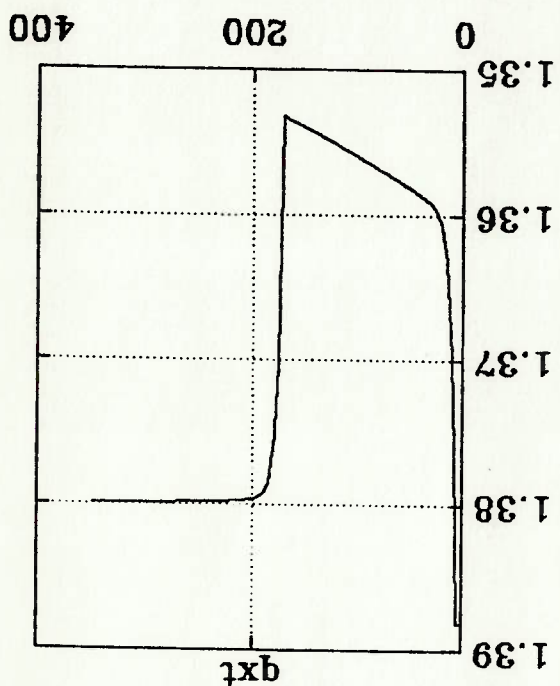


Figura 3.11 ccv₃-20%

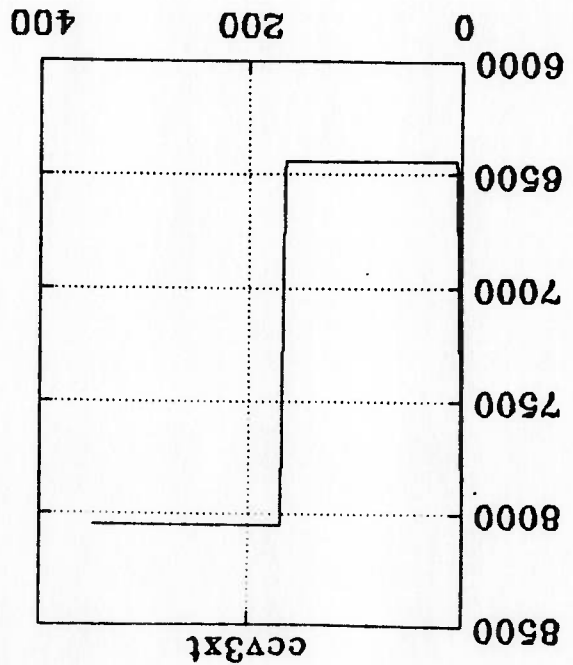
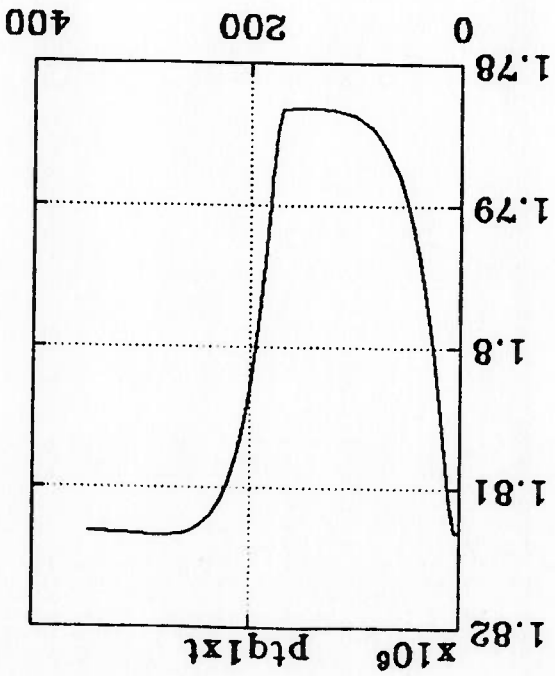
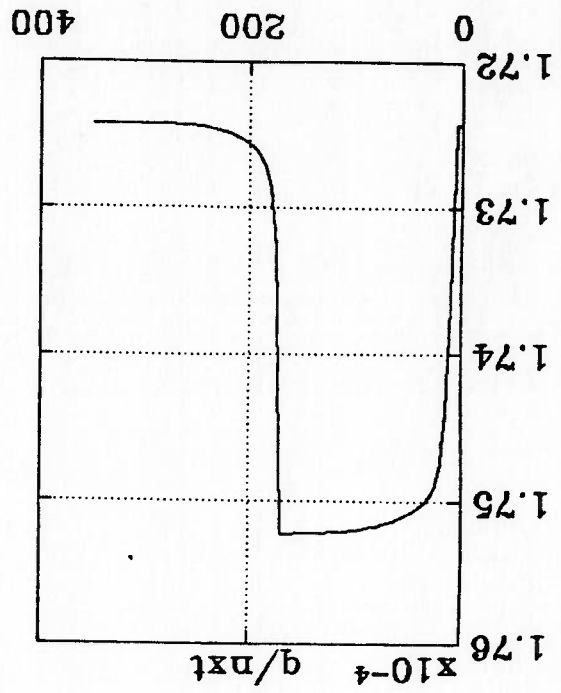
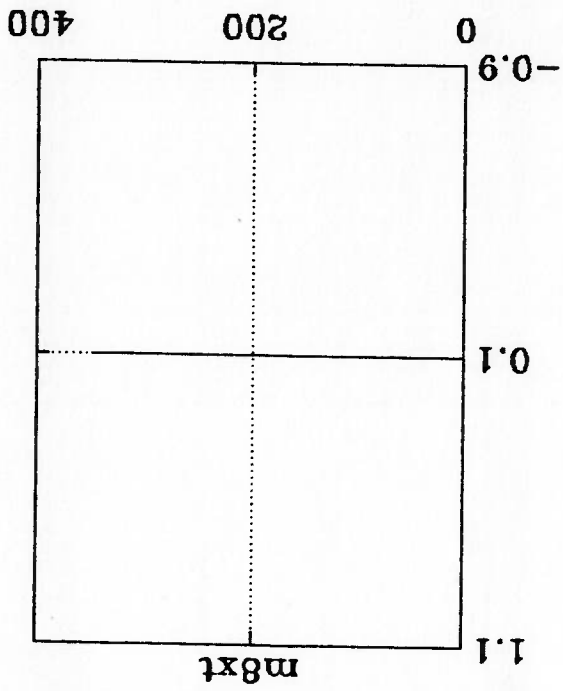


Figura 3.11 ccv₃ - 20% continuação

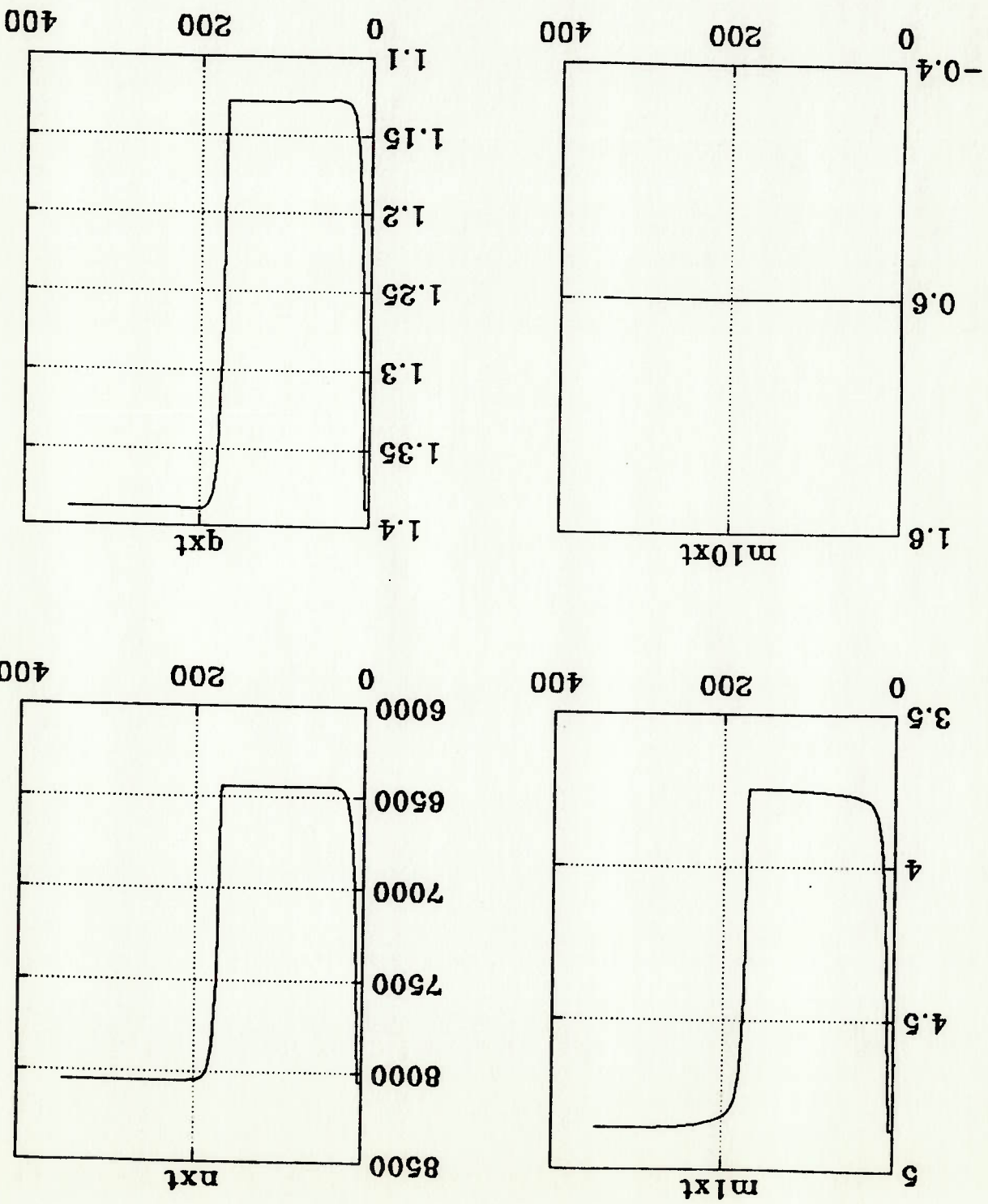


Figura 3.12 ccv₃ 20%

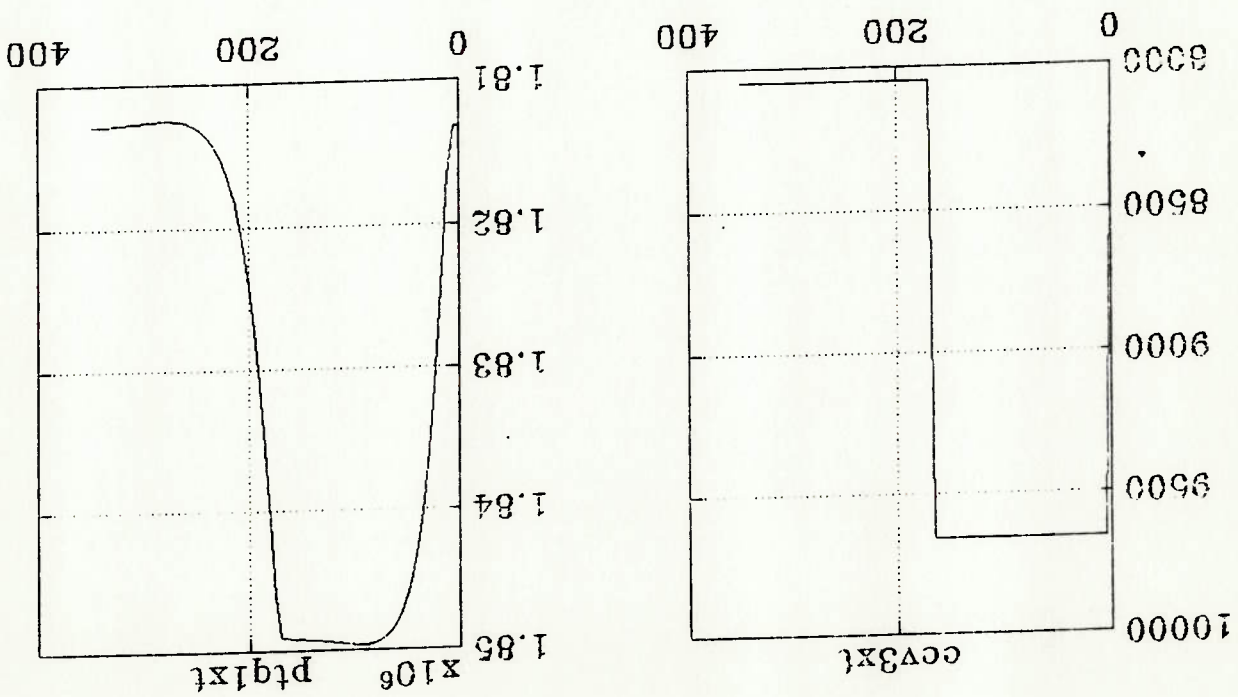
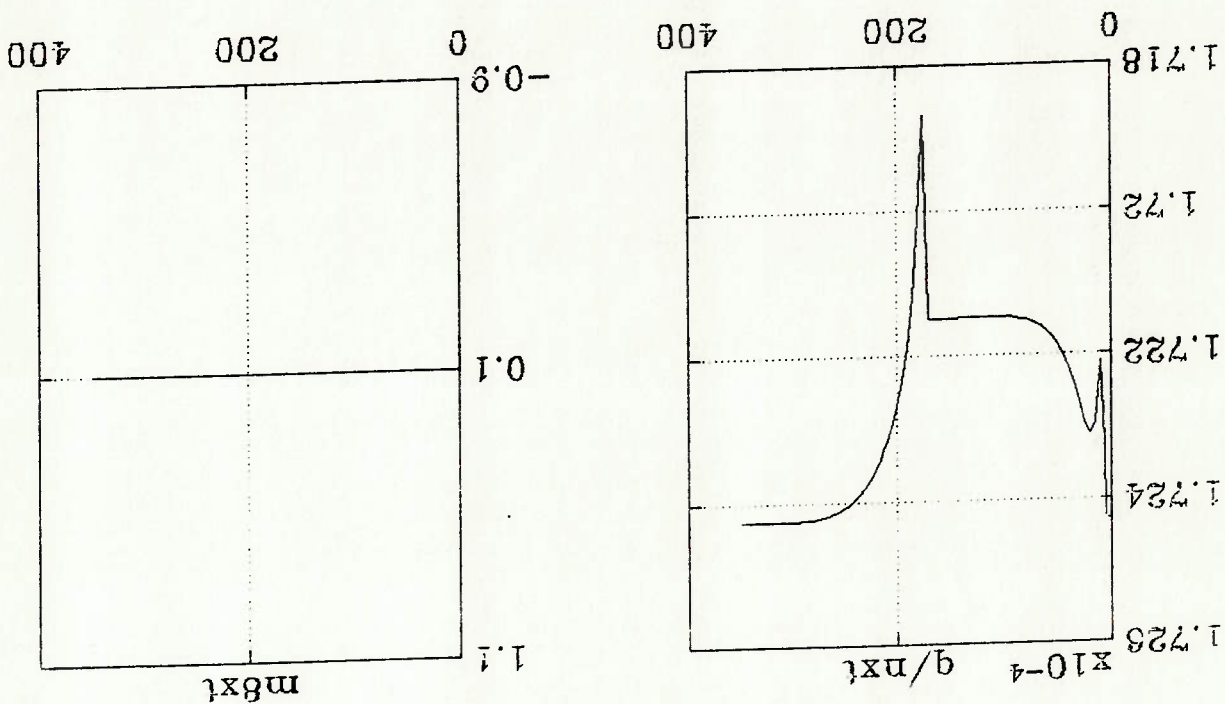


Figura 3.12 cv₃ 20% continuação

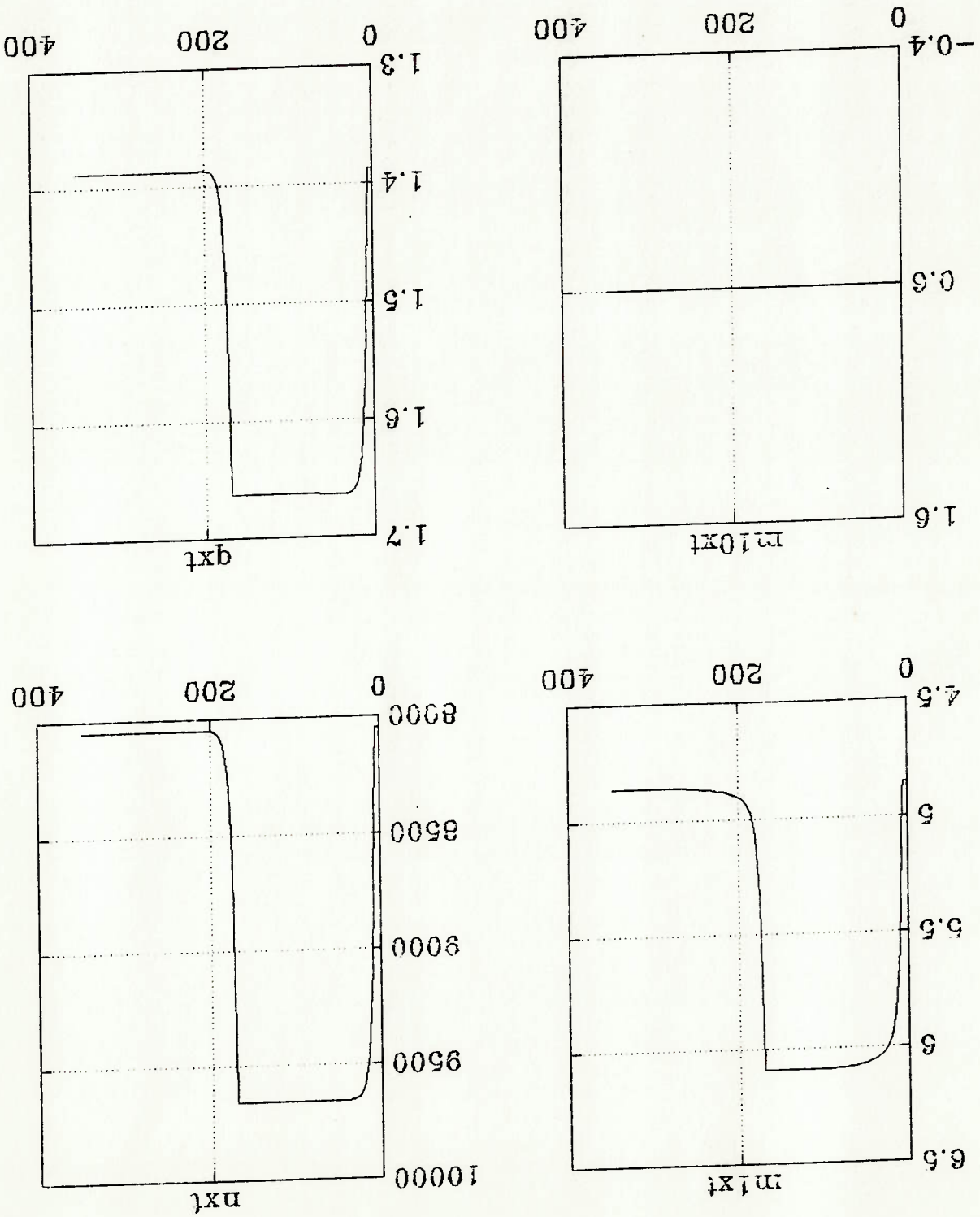


Figura 3.13 f 35%

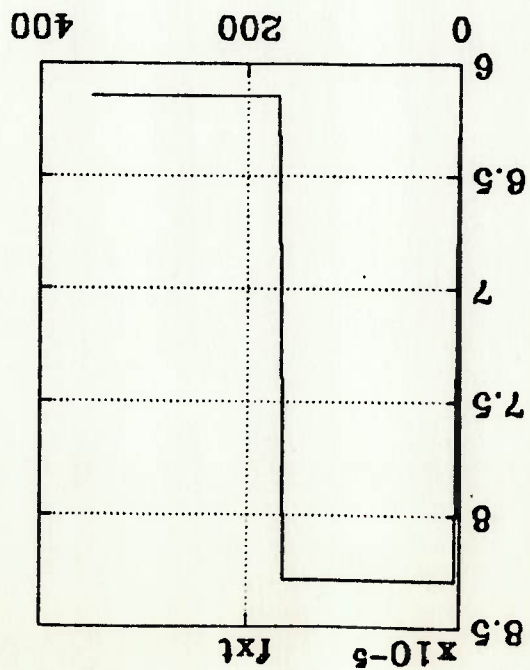
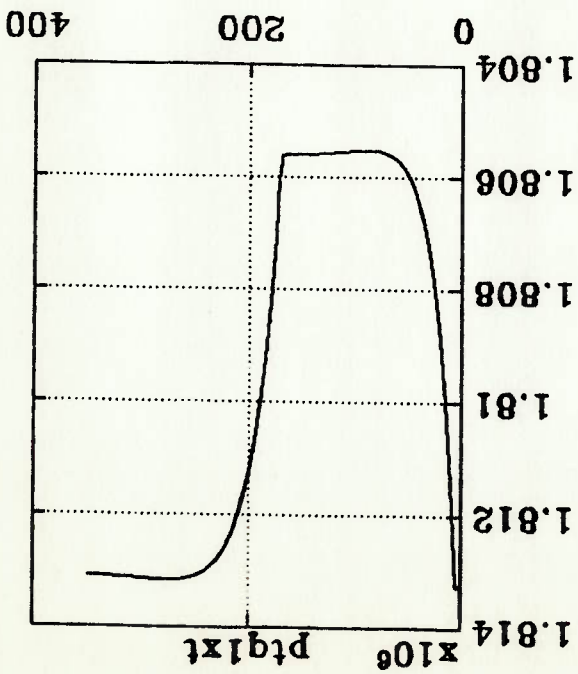
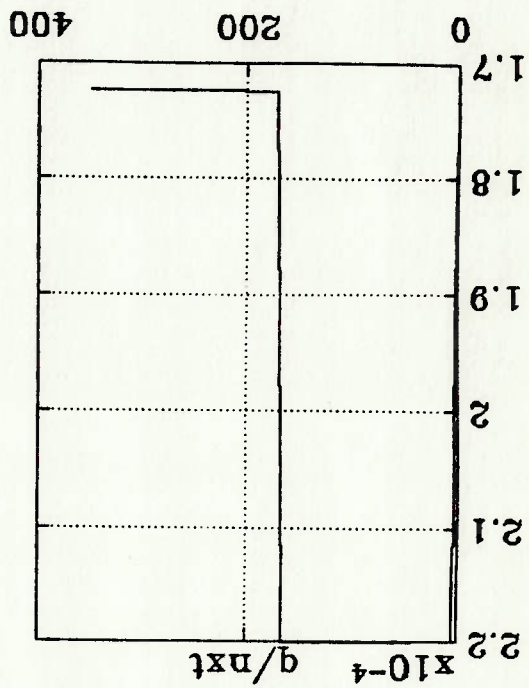
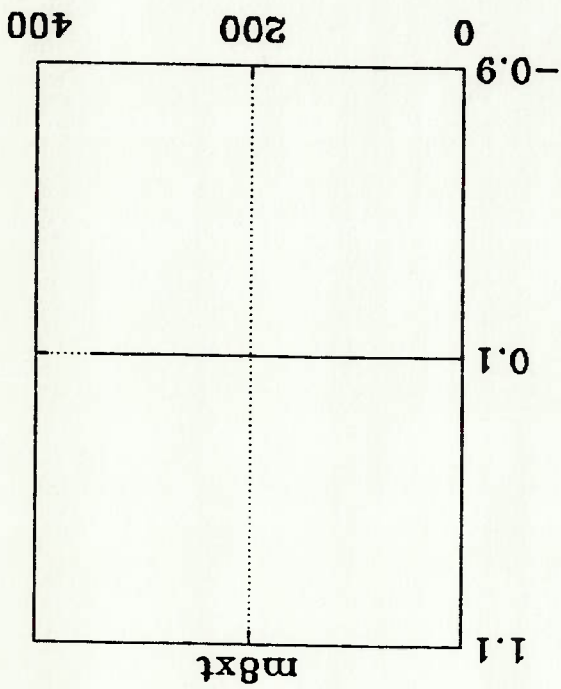


Figura 3.13 f 35% continuação

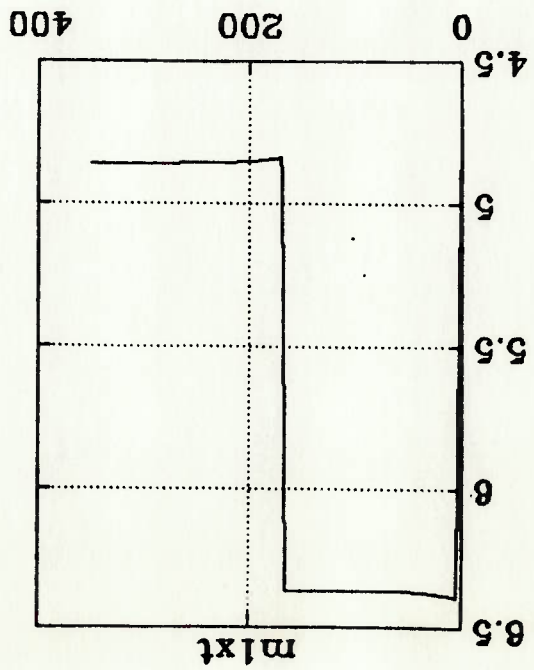
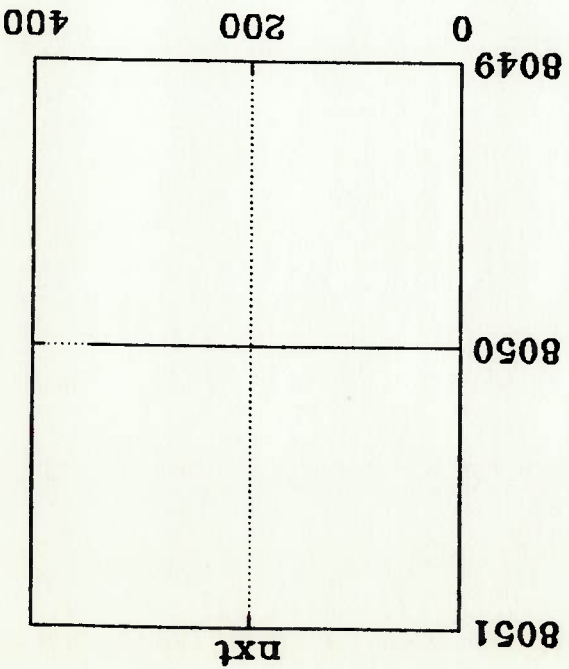
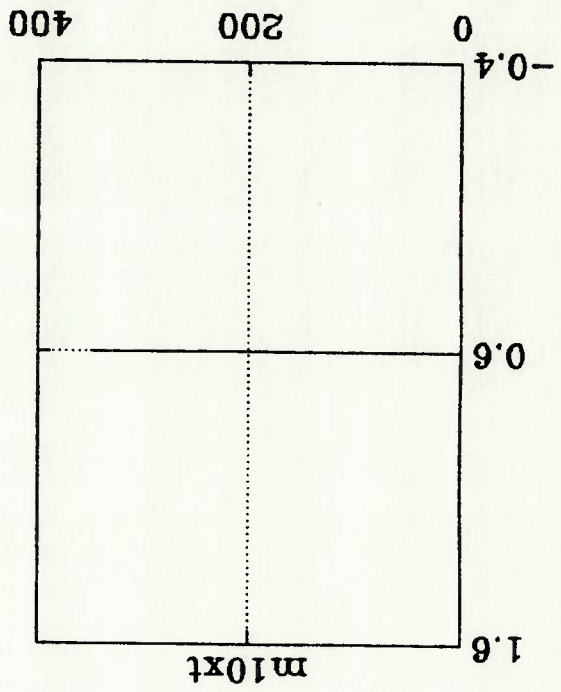
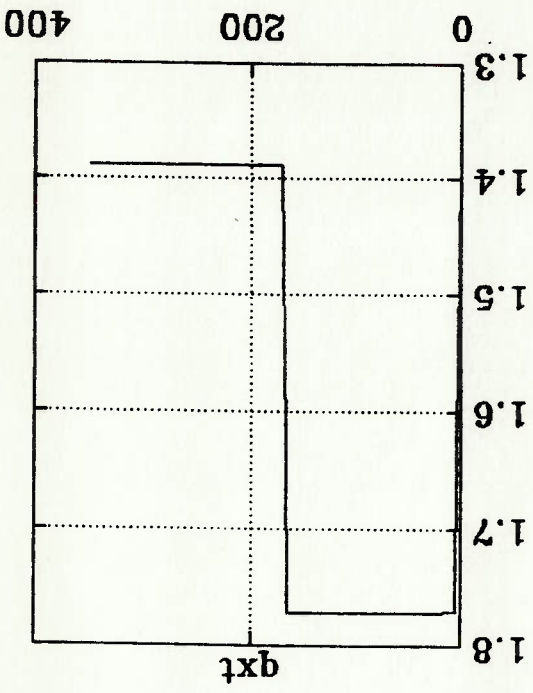


Figura 3.14 f -35%

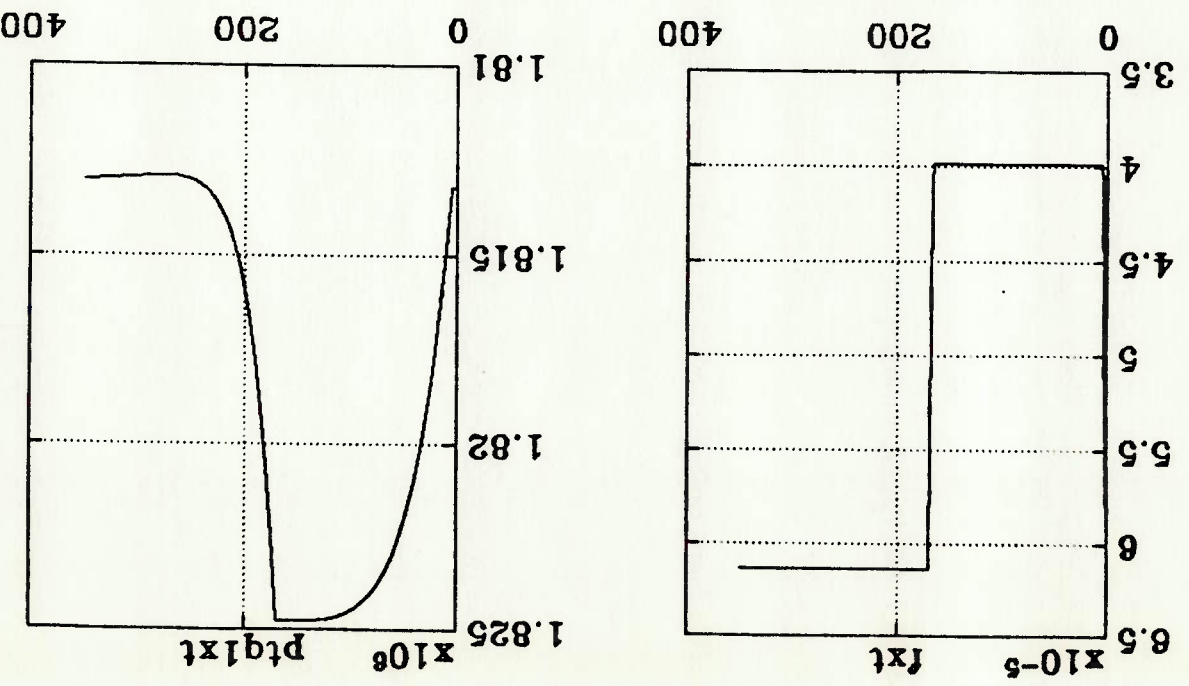
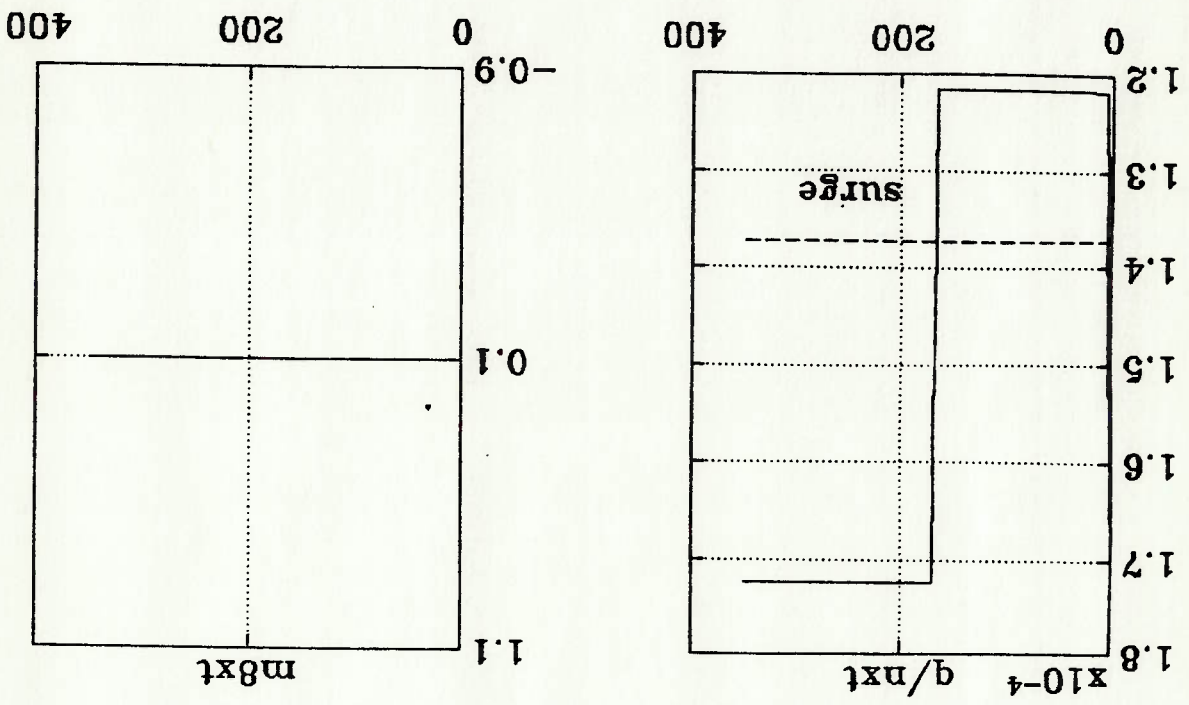


Figura 3.14 f -35% continuação

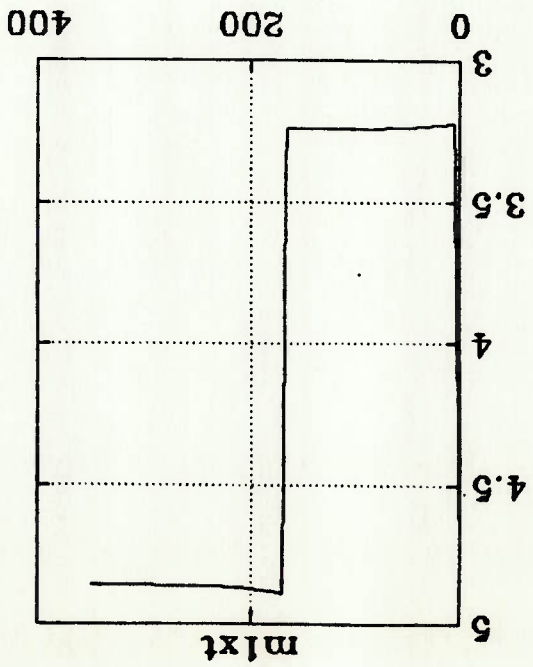
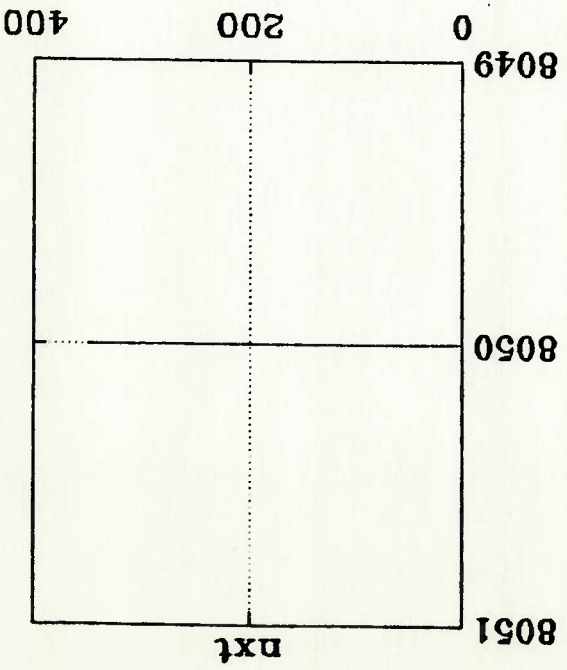
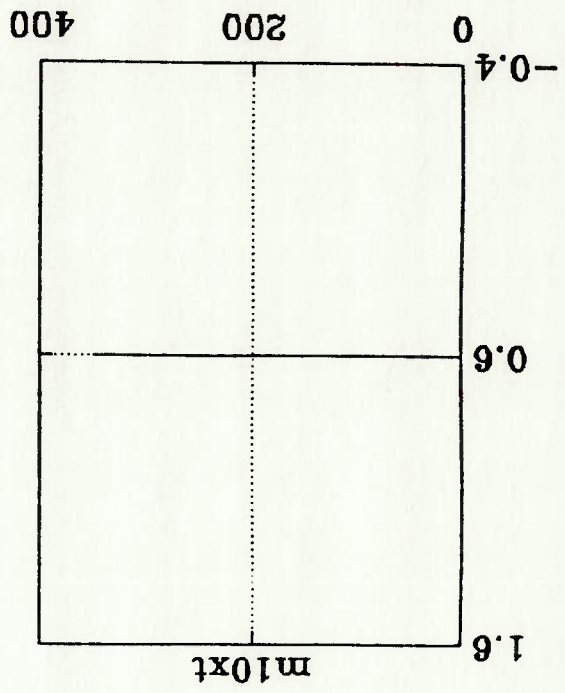
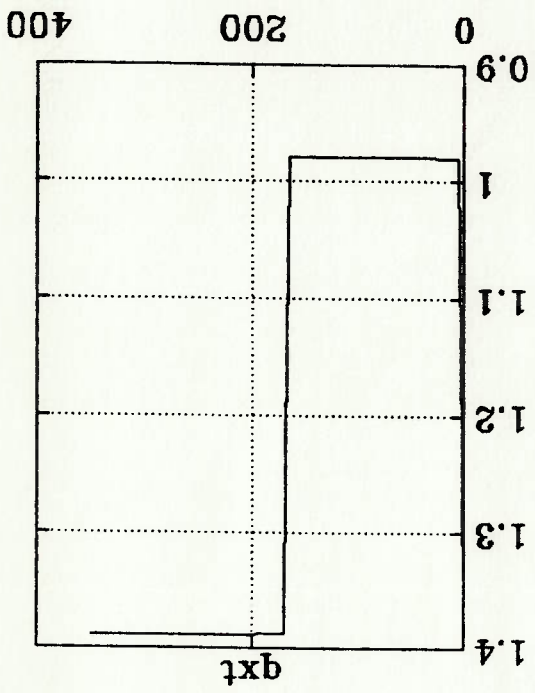


Figura 3.15 cm^8 1700%

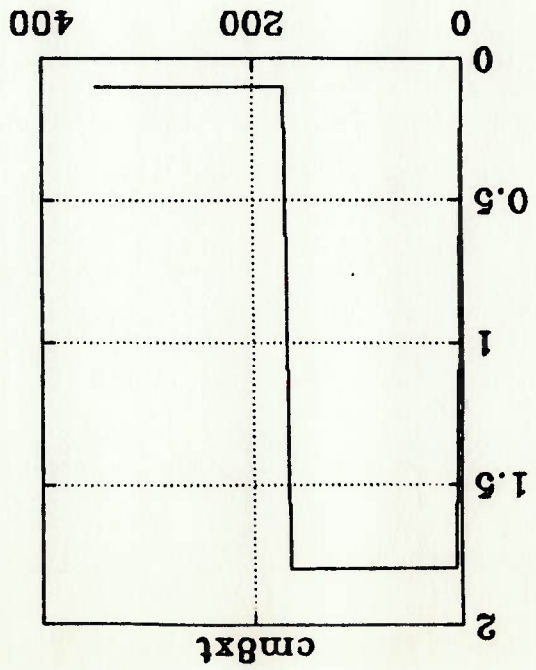
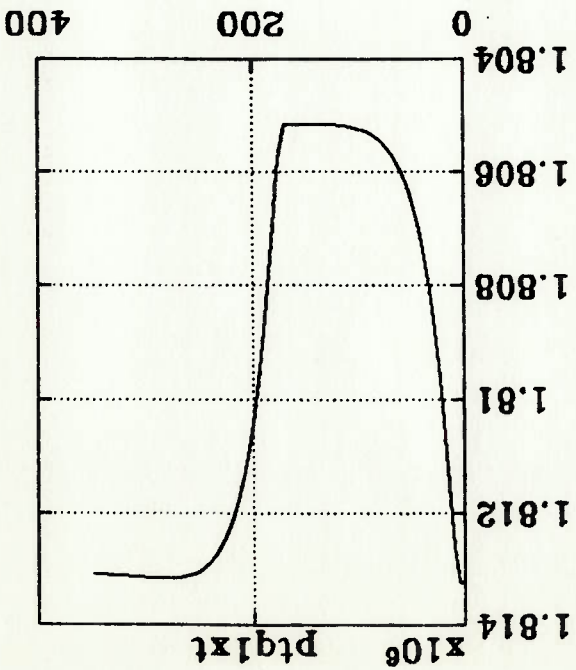
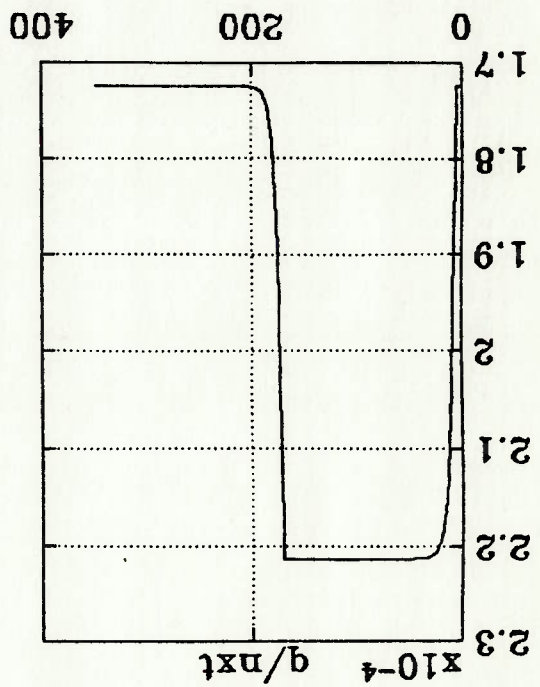
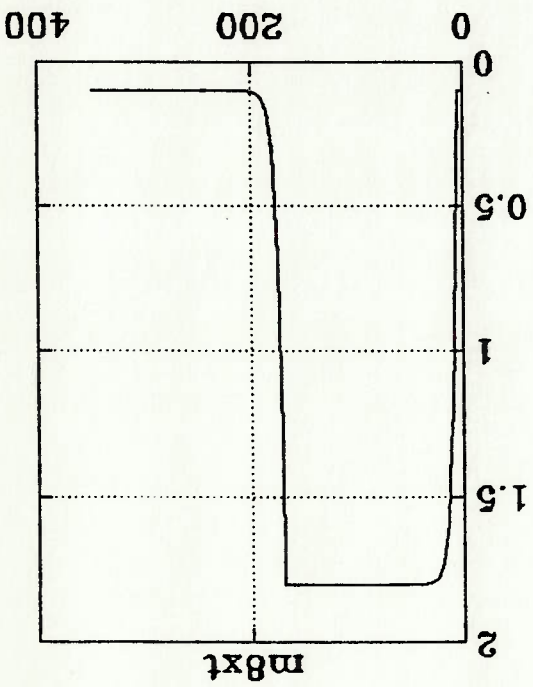
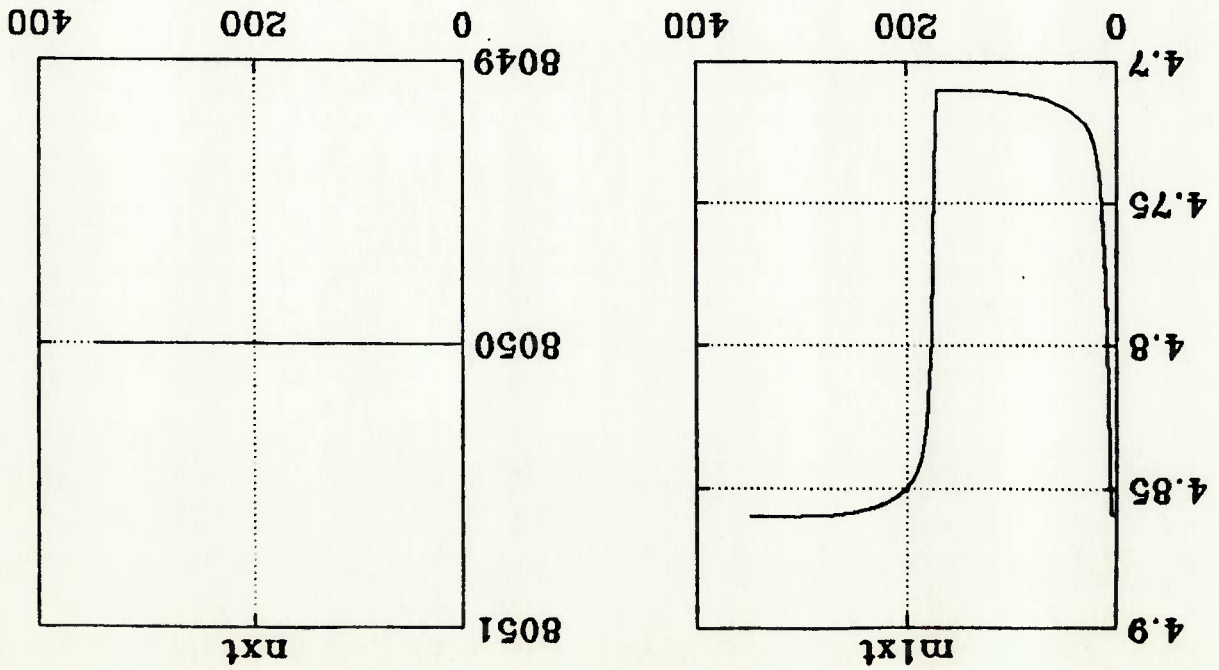
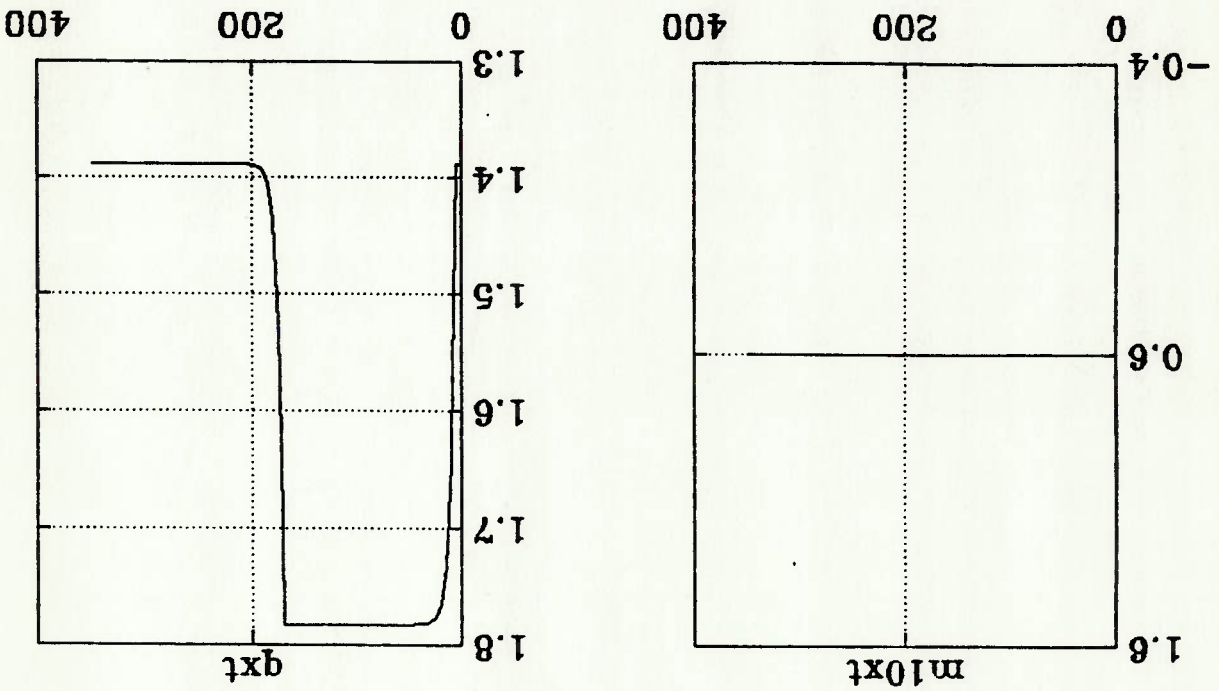


Figura 3.15 cm^{-1} 1700% continuação



END. {FINAL DO PROGRAMA CURCIO}

end;

integrador(v);

controle(v,t);

registrador(v,t);

urc(v);

perturbacao(v,dt,t);

t := t*dt;

begin

for i:=inicio to fim do

 inicio:=round(-100/dt);

 fim:= round(t/dt);

{ INTEGRACAO DO SISTEMA DE EQUACOES}

BEGIN {inicio de curcio}

USES OPERADOR,U_URC,INTEGR,PERTURB,REG,U_CONTRQ;

{ \$M 65520,0,655360}

PROGRAM CURC;


```

UNIT U_URC;
INTERFACE
USES VAR_URC, OPERADOR;
CONST
{ - PARAMETROS DO GAS }
k = 1.4; {cp/cv}
b = 7.07e-4; {kg K/(Pa m3)} {Mol/(zR)}
{ - PARAMETROS GEOMETRICOS DA URC (veja figura 1 do
trabalho)}
vtq1 = 50; {m3}
vtq2 = 50; {m3}
{ - PARAMETROS DE SAIDA DO TC }
ct5 = 320; {K}
{ - PARAMETROS DINAMICOS DO SISTEMA }
ctm = 5; {s} {constante de tempo da turbina}
ctm8 = 5; {s} {constante de tempo do FC-2 e da CV-1}
ctm10 = 5; {s} {constante de tempo da CV-2}
PROCEDURE URC (VAR V: VARIÁVEIS);
{A PROCEDURE URC SIMULA A UNIDADE DE REFORMAÇÃO CATALÍTICA
(V = VETOR DE VARIÁVEIS DO PROCESSO )
IMPLEMENTATION
}

```

```

PROCEDURE UR(C VAR V:VARIAVEIS);
{ 1 } function expo(x,y:real):real;
{ A FUNCAO expo CALCULA x ELEVADO A y. }
begin
  if x=0 then expo:=0
  else
    expo:= exp(y*ln(x));
  end;
}
{ VARIAVEIS AUXILIARES DE CONVERGENCIA }
VAR
  vl,erro: real;
  ind:integer;
}
{ PARAMETROS - NESTA SECAO PODEM SER ALTERADOS OS
PARAMETROS DE SIMULACAO DA URC. }
CONST
  {6.6 - PARAMETROS DE CONVERGENCIA}
  prec= 0.0001; {precisao da convergencia}
  tc= 1; {fator de convergencia}
}
BEGIN (INICIO DA PROCEDURE URC)
(81.12) v[ptq2]:=v[ptq1];
(81.10) v[ts]:= cts;
(81.15) v[m7]:=v[m10]+v[m8];
}-----}
{ 12.2 - 1a CONVERGENCIA - m1 }
for ind:=1 to 2 do
  begin
    repeat
      vl:= v[m1];
      v[m3]:= v[m1]+v[m7];
    }-----}
(81.14)

```

```

{12.2.1 - MODELO DO COMPRESSOR}
(81.9) v[q]:=v[ttq1]*v[m3]/(v[ptq1]*b);
v[qn]:=v[q]/v[n];
(81.7) v[ep]:=-5.62e6*sqr(v[qn])+2.86e3*v[qn]+0.34;
(81.8) v[xp]:=(k-1)/(k*v[ep]);
(81.6) v[en]:=2.287e-3*v[n]*v[n]-2.124*v[q]*v[n];
(81.5) v[p11]:=v[ptq1]*expo((v[en]*v[xp]*b/v[ttq1]+1),1/v[xp]);
(81.4) v[t11]:=v[en]*v[xp]*b+v[ttq1];
{.....}
{ 12.2.2 - FINAL DA LA CONVERGENCIA }
(81.11) v[m1]:=v[f]*sqr((v[p11]*v[p11]-v[ptq2]*v[ptq2])/v[t11]);
erro:=abs((v[m1]-v[i])/v[m1]);
v[m1]:=v[i+f*c*(v[m1]-v[i]);
until (prec>erro);
end;
v[m1]:=v[i];
}
{ 12.3 - 2a CONVERGENCIA - m5 }
for ind:=1 to 2 do
begin
repeat
v[i]:=v[m5];
(81.16)v[m4]:=
(v[m1]*v[t11]+v[m6]*v[t6]+v[m3]*v[ttq1]-v[m5]*v[t5])/v[ttq2];
(81.13) v[m5]:=v[m8]+v[m4];
erro:=abs((v[m5]-v[i])/v[m5]);
v[m5]:=v[i+f*c*(v[m5]-v[i]);
until (prec>erro);
end;
v[m5]:=v[i];
}

```

END. (FINAL DA UNIDADE)

----->

na linha 12-1}

v{f}:=6.14e-5;(kg*sqrt(K)/(s*Pa)) (perda de carga
v{cm8}:=v{m8};
v{m8}:=0;(kg/s)
v{cm10}:=v{m10};
v{m10}:=0.6;(kg/s)
v{ccv3}:=v{n};
v{n}:=8008;(rpm)
v{ttq2}:=351.5;(K)
v{ptq1}:=1.8e6;(Pa)
v{ttq1}:=320;(K)

{ ESTES VALORES DEVEM SER COERENTES COM OS DAS SECOES 8 E 9.)

{ 10 - VALORES INICIAIS DAS VARIÁVEIS }

----->

v{m1}:=4.8;(kg/s)
v{m5}:=5.4;(kg/s)

{ ESTES VALORES DEVEM SER COERENTES COM OS DADOS DE
ENTRADA DA SECÃO 8. }

{ 9 - PRIMEIRA ESTIMATIVA DAS VARIÁVEIS A CONVERGIR }

v{m6}:=0.6;(kg/s)
v{t6}:=350;(K)

{ NESTA SECÃO PODEM SER ALTERADOS OS DADOS DE ENTRADA DO MODELO. }

{ 8 - DADOS DE ENTRADA }

----->

----->

BEGIN

(INICIALIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS)

END: (FINAL DA PROCEDURE URC)

UNIT VAR_URC:

{ESTA UNIDADE DEFINE A ORDEM DAS VARIÁVEIS EM TODOS OS VETORES E MATRIZES DOS PROGRAMAS E UNIDADES QUE FAZEM A SIMULAÇÃO E O CONTROLE DA URC}

INTERFACE

----->

TYPE

```

VARTIPO = (m6,f,
           cm10,ccv3,cm8,
           ptq1,qn,m8,ml,n,
           ptq1sp,qnsp,m8sp,mlsp,nsf,
           m5,t5,m3,ttq1,ttq2,ptq2,
           t11,t6,m4,m10,en,xp,p11,q,ep,m7);
{perturbacoes}
{variaveis manipuladas}
{variaveis controladas}
{set points}

```

```

mantipo = cm10.cm8;
contipo = ptq1..n;
sptipo = ptq1sp..nsf;
{variaveis manipuladas}
{variaveis controladas}
{set points}

```

```

{*****}
IMPLEMENTATION
END. { FINAL DA UNIDADE VAR_URC}
{*****}

```

```

UNIT PERTURB;
{ESTA UNIDADE IMPLEMENTA PERTURBACOES DAS VARIAVEIS DE PROCESSO}
INTERFACE
USES VAR_URC,OPERADOR,INTEGR;
PROCEDURE PERTURBACAO (VAR V: VARIAVEIS;{variaveis do processo}
DT:REAL; { passo de integracao}
T: REAL; {tempo}
)
(A PROCEDURE PERTURBACAO IMPLEMENTA UMA PERTURBACAO NA VARIAVEL
PVAR SELECIONADA PELO OPERADOR - A PERTURBACAO E DO TIPO PULSO
DE INTENSIDADE IMP (EM % DO VALOR DE OPERACAO DA VARIAVEL
SELECIONADA OU DO SEU BIAS(CASO O VALOR DE OPERACAO SEJA 0)),
COM INICIO EM TPI E FINAL EM TPF.
- O BIAS,IMP,TPI E TPF SAO SELECIONADOS PELA UNIDADE OPERADOR)
)*****
IMPLEMENTATION
PROCEDURE PERTURBACAO (VAR V:VARIAVEIS;DT:REAL;T:REAL);
-----
procedure pulso(dt,t,tpf,imp,bias:real; var x: real);
{ A PROCEDURE pulso SIMULA UM PULSO DE DURACAO tpf-tpi
E INTENSIDADE imp NA VARIAVEL x. }
begin
if round(t/dt)=round(tpi/dt) then x:=x*(1+imp)+bias*imp;
if round(t/dt)=round(tpf/dt) then x:=(x-bias*imp)/(1+imp);
end; {FINAL DA PROCEDURE PULSO}
-----
}
BEGIN { INICIO DA PROCEDURE PERTURBACAO }
{ - NESTA SECAO SAO INTRODUZIDAS PERTURBACOES TIPO PULSO
NAS VARIAVEIS DO PROCESSO.
- AS PERTURBACOES PODEM SER DESATIVADAS COLOCANDO-SE A FUNCAO PULSO
ENTRE CHAVES COMO AS QUE ENVOLEVEM ESTE COMENTARIO.
- NAO UTILIZAR AS VARIAVEIS CONTROLADAS COMO PERTURBACOES SEM
DESATIVAR AS PROCEDURES DOS CONTROLADORES. }

```

```

case par of
  cm8 : pulso(dt,t,tpi,tpf,imp,bias,v[cm8]);
  m6  : pulso(dt,t,tpi,tpf,imp,bias,v[m6]);
  f    : pulso(dt,t,tpi,tpf,imp,bias,v[f]);
  cm10 : pulso(dt,t,tpi,tpf,imp,bias,v[cm10]);
  ccv3 : pulso(dt,t,tpi,tpf,imp,bias,v[ccv3]);
  p[qi] : pulso(dt,t,tpi,tpf,imp,bias,v[p[qi]]);
  q[ns] : pulso(dt,t,tpi,tpf,imp,bias,v[q[ns]]);
  m[gs] : pulso(dt,t,tpi,tpf,imp,bias,v[m[gs]]);
  m[sp] : pulso(dt,t,tpi,tpf,imp,bias,v[m[sp]]);
  n[sp] : pulso(dt,t,tpi,tpf,imp,bias,v[n[sp]]);
else
  b_pvar:=false;
end;
END; {FINAL DA PROCEDURE PERTURBACAO}
{*****}
{INICIALIZACAO}
BEGIN
  b_pvar:=true; {inicializa o indicador de que uma variavel foi pulsada}
END. {FINAL DA UNIDADE PERTURB}
{*****}

```

```

UNIT INTEGR;

INTERFACE
  USES VAR_URC,OPERADOR,U_URC;
CONST
  DT=0.5;(s) (PASSO DE INTEGRACAO)
}-----}

PROCEDURE INTEGRADOR( VAR V:VARIAVEIS);
{*****}
IMPLEMENTATION
  PROCEDURE INTEGRADOR(VAR V:VARIAVEIS);
    VAR
      dtq1,dptq1,dtq2,dn,dm8,dm10:real;{derivadas das variaveis integradas}
}-----}
procedure Euler(dt,dx: real; var x: real);
{ A PROCEDURE Euler INTEGRA EQUACOES DIFERENCIAIS ORDINARIAS
  DE PRIMEIRA ORDEM PELO METODO DE EULER. }
  begin
    x:= x+dx*dt;
  end;
}-----}

BEGIN (PROCEDURE INTEGRADOR)
}-----}
{ 12.5 - EQUACOES DIFERENCIAIS DOS TANQUES}
(81.1) dtq1:= (k*v[ttq1]*(v[ms5]-v[ts]-v[m3]*v[ttq1])
-v[ttq1]*v[ttq1]*(v[ms5]-v[m3]))/(b*v[ptq1]*v[ttq1]);
(81.2) dptq1:= k/(b*v[ttq1]*(v[ms5]*v[ts]-v[m3]*v[ttq1]));
(81.3) dtq2:= (k*v[ttq2]*(v[m1]*v[ttq2]+v[m6]*v[ttq2]-v[m4]*v[ttq2])
-v[ttq2]*v[ttq2]*(v[m1]+v[m6]-v[m4]))/(b*v[ptq2]*v[ttq2]);

```


{-----}
 { 12.6 - EQUACAO DIFERENCIAL DA TURBINA - FC-1}
 {81.19} dn:= (|ccv3|-v|n|)/ctem;

{-----}
 { 12.7 - EQUACAO DIFERENCIAL DO FC-2 E CV-1}
 {81.20} dm8:= (v|cm8|-v|m8|)/ctm8;

{-----}
 { EQUACAO DIFERENCIAL DA CV-2}
 dm10:=(v|cm10|-v|m10|)/ctm10;

{-----}
 { 12.8 - INTEGRACAO NUMERICA}

euler(dt,dtrq1,v|trq1|);

euler(dt,dprtq1,v|prtq1|);

euler(dt,dtrq2,v|trq2|);

euler(dt,dn,v|n|);

euler(dt,dm8,v|m8|);

euler(dt,dm10,v|m10|);

{-----}

END; {FINAL DA PROCEDURE INTEGRADOR}

{-----}

END. {FINAL DA UNIDADE INTEGRADOR}

{-----}

```

UNIT REC;

INTERFACE
USES VAR_URC, OPERADOR, FORMATO;

PROCEDURE REGISTRADOR (V:VARIAVEIS; (VETOR DE VARIAVEIS DO PROCESSO)
T:REAL; (TEMPO)
) A PROCEDURE REGISTRADOR SIMULA UM REGISTRADOR
*****
IMPLEMENTATION
-----
CONST
campo=15; {campo para gravacao das colunas de resultados}
dig=10; { No de digitos usados na gravacao dos resultados}
numdec=1; {No de casa decimais apos a virgula dos resultados
gravados em notacao de ponto decimal}

VAR
timpa:real; {instante anterior de impressao}
surc,surcmat: text; {arquivos para saida de resultados}
varnome: array[variavel] of tnome; {vetor dos nomes das variaveis}
uvarnome: array[variavel] of tnome; {vetor das unidades das variaveis}
jvar: variavel; {contador de variaveis }
varmax: array[variavel] of real; { valores maximos das variaveis}
varmin: array[variavel] of real; { valores minimos das variaveis}
linha: linha; {linha gravada}
initstr: tnome; {string de inicializacao dos cabecalhos}

```

```

{.....}
PROCEDURE REGISTRADOR (V:VARIAVEIS; T:REAL);
VAR
  l:byte;
  compest:tnome;
  vsda:tnome;
{.....}
BEGIN (INICIO DA PROCEDURE REGISTRADOR)
{.....}
{GRAVACAO DOS VALORES DAS VARIAVEIS AMOSTRADAS NO INSTANTE T}
  If t-timpa>= dtimp then
    begin
      linha:='';
      compest:='nur';
      If v[qn]<1.373e-4 then compest:='sur';
      If v[qn]>3.233e-4 then compest:='stw';
      centra(compest,campo);
      salvar(t,dig,numdec,campo,vsda,'d');
      write(compest,vsda);
      write(surc,compest,vsda);
    For i:=1 to num_v_imp do
      begin
        salvar(v[selvar[i]],dig,numdec,campo,vsda,'c');
        linha:=linha+vsda;
      end;
      write(linha);
      write(ln(surc,linha));
    }

```

```

linha='';
for i=1 to num_v_imp do
begin
  salvar(v[selvar[i]],dig+4,numdec,campo,v[selvar[i]]);
  linha=linha+v[selvar[i]];
end;

( GRAVACAO DOS RESULTADOS NO ARQUIVO MATLAB)

write(surcmat,' ',t);
for i=1 to num_v_imp do write(surcmat,' ',v[selvar[i]]);
writeIn(surcmat);
}XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
for jvar:=m6 to m7 do
begin
  if varmax[jvar]<v[jvar] then varmax[jvar]:=v[jvar];
  if varmin[jvar]>v[jvar] then varmin[jvar]:=v[jvar];
end;
timpa:=t;
end;

}.....
{ SAIDA DOS RESULTADOS - VALORES AUXILIARES - FECHAMENTO DOS ARQUIVOS)
{ NESTA SECAO SAO LISTADOS OS VALORES MAXIMOS E MINIMOS ATINGIDOS
PELAS VARIAVEIS DO SISTEMA DURANTE A INTEGRACAO.)
if t>=tf then
begin
writeIn(surc);
writeIn;
initstr:='variavel';

```

```

centra(instr,campo);
write(src,instr);
instr='maximo';
centra(instr,campo);
write(src,instr);
instr='minimo';
centra(instr,campo);
write(src,instr);
write(src);
write(src);
for jvar:=m6 to m7 do
begin
linha:=varnome[jvar];
salvar(varmax[jvar],dig,numdec,campo,vda,'c');
linha:=linha+vda;
salvar(varmin[jvar],dig,numdec,campo,vda,'c');
linha:=linha+vda+uvarnome[jvar];
write(src,linha);
end;
if b_pvar then
begin
write(src,'Variavel pulsada : ',varnome[pvar]);
write(src,'Intensidade do pulso : ',(imp*100):4:0,' %');
write(src,'Bias adotado no pulso : ',bias:4:0);
write(src,'Instante inicial do pulso : ',tpi:4:0,' s');
write(src,'Instante final do pulso : ',tpf:4:0,' s');
end;
write(src,'Resultados p/ saída em grafico no arquivo matlab',arqmat,'.');
write(src);
write(src,'A variavel comp indica o estado de operacao do compressor:');
write(src,nrm = operacao normal;);
write(src,stw = compressor em stonewall;);
write(src,sur = compressor em surge.);
close(src);
close(surcmat);

```

writeIn('Os resultados estao gravados no arquivo ',arg,');
writeIn('Os resultados estao gravados no arquivo matlab',argmat,');

end;

END: (FIM DA PROCEDURE REGISTRADOR)

(*****)

(INICIALIZACAO)

BEGIN

{ ATRIBUICAO DOS NOMES E UNIDADES AS VARIAVEIS DO SISTEMA }

```

varnome[trq1]='trq1';
varnome[trq2]='trq2';
varnome[trq2]='trq2';
varnome[ptq2]='ptq2';
varnome[m1]='m1';
varnome[t11]='t11';
varnome[m6]='m6';
varnome[t6]='t6';
varnome[m4]='m4';
varnome[en]='en';
varnome[xp]='xp';
varnome[p11]='p11';
varnome[q]='q';
varnome[n]='n';
varnome[ep]='ep';
varnome[m8]='m8';
varnome[m7]='m7';
varnome[m10]='m10';
varnome[ccv3]='ccv3';
varnome[t]='t';
varnome[qn]='q/n';
varnome[cm8]='cm8';
varnome[cm10]='cm10';
varnome[ptq1sp]='ptq1 sp';
varnome[ptq1sp]='q/n sp';
varnome[m8sp]='m8 sp';
varnome[m1sp]='m1 sp';
varnome[nsps]='n sp';
varnome[trq1]='K';
varnome[trq1]='Pa';
varnome[ms]='kg/s';
varnome[ts]='K';

```

{INICIALIZACAO DOS VALORES MAXIMOS E MINIMOS DAS VARIAVEIS}

timpa:=-dtimp;

{INICIALIZACAO DO TEMPO DE IMPRESSAO}

end;

centra(uarnome[ivar],campo);

centra(uarnome[ivar],campo);

begin

for ivar:=m6 to m7 do

{CENTRAGEM DOS NOMES E DAS UNIDADES DAS VARIAVEIS}

```

uarnome[m3] := 'kg/s';
uarnome[ttq2] := 'K';
uarnome[ptq2] := 'K';
uarnome[m1] := 'kg/s';
uarnome[t11] := 'K';
uarnome[m6] := 'kg/s';
uarnome[t6] := 'K';
uarnome[m4] := 'kg/s';
uarnome[en] := 'J/kg';
uarnome[xp] := 'Pa';
uarnome[p11] := 'Pa';
uarnome[q] := 'm3/s';
uarnome[n] := 'rpm';
uarnome[ep] := 'kg/s';
uarnome[m8] := 'kg/s';
uarnome[m7] := 'kg/s';
uarnome[m10] := 'kg/s';
uarnome[ccv3] := 'kgK1/2/sPa';
uarnome[t] := 'kgK1/2/sPa';
uarnome[gn] := 'm3/srpm';
uarnome[cm8] := 'kg/s';
uarnome[cm10] := 'kg/s';
uarnome[ptq1sp] := 'Pa';
uarnome[qnsp] := 'm3/srpm';
uarnome[mgsp] := 'kg/s';
uarnome[m1sp] := 'kg/s';
uarnome[nsp] := 'rpm';

```

```

for jvar:=m6 to m7 do varmin[jvar]:=1e20;
fillchar(varmax,sizeof(varmax),0);

{ ABERTURA DOS AQUIVOS PARA REGISTRO DAS VARIAVEIS }
assign(surc,diretorio+arq);
rewrite(surc);
assign(surcmat,diretorio+arqmat);
rewrite(surcmat);

{ MONTAGEN DOS CABECALHOS DAS TABELAS }
initstr:='comp';
centra(initstr,campo);
write(surc,initstr);
write(initstr);
initstr:='t';
centra(initstr,campo);
write(surc,initstr);
write(initstr);
linha:='';
for i:=1 to num_v_imp do
begin
linha:=linha+varnome[selvar[i]];
end;
writeIn(surc,linha);
writeIn(linha);
initstr:=brancos(campo);
write(surc,initstr);

```



```

initstr:='s';
centra(initstr,campo);
write(surc,initstr);
linha:='';
for i:=1 to num_v_imp do
begin
  linha:=linha+uvarnome[selvar[i]];
end;
write(surc,linha);
write(surc);
}-----}
END. (FIM DA UNIDADE U_REGISTRADOR)
*****

```

UNIT OPERADOR;

(ESTA UNIDADE DEFINE AS CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO E SAÍDA DE RESULTADOS DA URC E É UTILIZADA EM TODAS AS UNIDADES DO PROGRAMA CURC10)

INTERFACE

USES VAR_URC;

CONST

diretorio = 'c:\mane\'; (DIRETÓRIO DE GRAVAÇÃO E LEITURA DE DADOS)

arg = 'res04.dat'; (ARQUIVO DE SAÍDA DE RESULTADOS EM TABELAS)

argmat = 'res04.mat'; (ARQUIVO MATLAB PARA SAÍDA DOS RESULTADOS)

sda_dmc = 'PAR_DM04.DAD'; (ARQUIVO PARA SAÍDA DOS PARÂMETROS DO DMC)

num_v_imp = 8; (NO DE VARIÁVEIS LISTADAS DETALHADAMENTE PELO REGISTRADOR)

dtimp = 10;(s) (INTERVALO ENTRE LISTAGENS DAS VARIÁVEIS DETALHADAS)

tf = 600;(s) (INSTANTE FINAL DE INTEGRAÇÃO DAS EQUAÇÕES)

TYPE

VARIÁVEIS = array[variável] of real;

VAR

v : VARIÁVEIS; (vetor de variáveis do processo)

t : real; (s) (tempo)

i, inicio, fim : longint; (variáveis auxiliares de integração)

selvar : array [1..num_v_imp] of variável; (VETOR DE VARIÁVEIS A SEREM LISTADAS EM DETALHE)

pvar : variável; (VARIÁVEL A SER PULSADA)

```

selvar[1] := pvar;
selvar[2] := ptq;
selvar[3] := m1;
selvar[4] := n;
selvar[5] := m10;
selvar[6] := m8;
selvar[7] := qn;
selvar[8] := q;

```

{SELECAO DAS VARIÁVEIS A SEREM LISTADAS DETALHADAMENTE}

-----}

```

imp := -20;{%}
imp := imp/100;
bias := 0;
tpi := 50;{s}
tpf := 700; {s}

```

{PARAMETROS DO PULSO}

-----}

pvar := m6;

{SELECAO DA VARIÁVEL A SER PULSADA}

-----}

BEGIN

{INICIALIZACAO}

IMPLEMENTATION

*****}

imp, {INTENSIDADE DO PULSO DE PVAR EM % DO VALOR DE PVAR COM A
 A URC EM OPERACAO NORMAL}
 bias, {VALOR EM RELACAO AO QUAL O PULSO SERA PROPORCIONAL
 SE PVAR=0 COM A URC EM OPERACAO NORMAL}
 tpi, {INSTANTE INICIAL DO PULSO}
 tpf : real; {INSTANTE FINAL DO PULSO}
 b_pvar : boolean; {VARIÁVEL QUE INDICA SE UMA VARIÁVEL FOI PULSADA
 - ESTA VARIÁVEL E INICIALIZADA E MODIFICADA NA
 UNIDADE PERTURB}

{SET POINTS DAS VARIÁVEIS CONTROLADAS}

v[piq] := 1.813e+6; (Pa)
v[qns] := 1.724e-4; (m³/srpm)
v[m8s] := 0.1; (kg/s)
v[m1s] := 4.837; (kg/s)
v[ns] := 8050; (rpm)

-----}

END. {FIM DA UNIDADE OPERADOR}

ptq1 sp	1.813E+06	1.913E+06	Pa
q/n sp	1.724E-04	1.724E-04	m3/srpm
m8 sp	1.000E-01	1.000E-01	kg/s
m1 sp	4.860E+00	4.860E+00	rpm
n sp	8.050E+03	8.050E+03	kg/s
m5	5.561E+00	5.560E+00	K
t5	3.200E+02	3.200E+02	kg/s
m3	5.560E+00	5.559E+00	K
ttq1	3.201E+02	3.200E+02	K
ttq2	3.569E+02	3.569E+02	K
ptq2	1.913E+06	1.913E+06	K
l11	3.578E+02	3.577E+02	K
t6	3.500E+02	3.500E+02	K
m4	5.461E+00	5.460E+00	kg/s
m10	6.000E-01	6.000E-01	kg/s
en	1.245E+05	1.245E+05	kg/s
xp	4.290E-01	4.290E-01	J/kg
p11	2.351E+06	2.351E+06	Pa
q	1.388E+00	1.388E+00	m1/s
ep	6.661E-01	6.661E-01	kg/s
m7	7.000E-01	7.000E-01	kg/s

variavel pulsada : m6

Intensidade do pulso : -20 %

Rias adotado no pulso : 0

Instante inicial do pulso : 5000 s

Instante final do pulso : 8770 s

Resultados p/ saída em grafico no arquivo matlab J32.mat.

A variavel comp indica o estado de operacao do compressor:

nrm = operacao normal;

stm = compressor em stonewall;

sur = compressor em surge.

VALORES DE ISE DA SIMULACAO

ISEF	ptq1]	=	0.00000000E+00
ISFI	q/n]	=	0.00000000E+00
ISFI	m8]	=	0.00000000E+00
ISFI	m1]	=	0.00000000E+00
ISFI	n]	=	0.00000000E+00

ISF TOTAL = 0.00000000E+00

VALORES DE MOVIMENTO DAS VARIÁVEIS MANIPULADAS NA SIMULACAO

MOV DA VAR MANIPULADA	cm10	=	0.00000000E+00
MOV DA VAR MANIPULADA	rcv3	=	0.00000000E+00
MOV DA VAR MANIPULADA	cm8	=	0.00000000E+00
MOVIMENTO TOTAL		=	0.00000000E+00

APLICAÇÃO DO CONTROLE PREDITIVO (DMC) NA INSTALAÇÃO
COM COMPRESSOR CENTRÍFUGO

Neste capítulo apresentamos a aplicação do controle por matriz dinâmica (DMC) na unidade de reformação catalítica (URC). Inicialmente situamos o DMC dentro do panorama geral dos algoritmos de controle com modelo preditivo (MPC). Em seguida, apresentamos a teoria do modelo de convolução discreta (MCD) para um processo de uma variável manipulada e uma controlada (SISO). Desenvolvemos o DMC para processos de múltiplas variáveis manipuladas e controladas (MIMO). Indicamos como implementar as restrições das variáveis controladas no DMC para o caso MIMO. Relacionamos as propriedades do DMC e discutimos o papel de cada um dos parâmetros do DMC. Desenvolvemos a estratégia de controle da URC e aplicamos o DMC na URC. Levantamos o modelo de convolução discreta (MCD) da URC através dos programas GERAH e MONTA. Desenvolvemos: a rotina CONTROL, que simula um controlador programável; a rotina DMC, que simula o algoritmo DMC; a rotina restrições, que implementa restrições das variáveis controladas no DMC. Descrevemos o critério de desempenho do tipo erro quadrático integral (ISE) usado no ajuste e comparação dos algoritmos de controle da URC. Finalmente fazemos o ajuste dos parâmetros do DMC e apresentamos o resultado das simulações da URC, operando controlada pelo DMC.

4.1 OS ALGORITMOS DE CONTROLE POR MODELO PREDITIVO (MPC) E O DMC

Os MPCs são algoritmos de controle que possuem um modelo do processo controlado. Este modelo é usado para prever a resposta do processo a alterações das variáveis manipuladas e perturbações. Através de um critério de otimização, os MPCs calculam os valores futuros das variáveis manipuladas que minimizam as diferenças entre os valores preditos das variáveis controladas e os setpoints desejados, isto é, os erros preditos [12].

Os MPCs diferem entre si pelo tipo de modelo e critério de otimização utilizados. Podemos dividir os MPCs em duas categorias pelo tipo de modelo. Numa categoria estão os MPCs que usam modelos paramétricos. Os modelos paramétricos representam os processos por equações de diferenças finitas. O controle auto-adaptativo de predição estendida (EPSAC) e o controle adaptativo de horizonte estendido (EHAC) são MPCs com modelos paramétricos [25].

Outra categoria é formada pelos MPCs que usam modelo não paramétrico. Este modelo não paramétrico é conhecido como modelo de convolução discreta (MCD) ou modelo de resposta ao impulso. O MCD é obtido amostrando-se a resposta do sistema aos impulsos ou degraus unitários aplicados nas variáveis controladas. Nesta categoria está incluso o DMC. Os MPCs com MCD apresentam, sobre os MPCs que usam modelos paramétricos, a vantagem de poderem ser obtidos sem ser necessário assumir uma estrutura do modelo (por exemplo: a ordem de uma equação de diferenças finitas) [12]. Por outro lado, a quantidade de informação do MCD a ser armazenada é maior que a dos modelos paramétricos, exigindo maior capacidade do hardware onde o algoritmo será implementado. Uma segunda desvantagem do MCD é a dificuldade de obtê-lo em situações onde a relação sinal/ruído seja muito baixa [28].

O DMC minimiza os erros preditos através de um critério de mínimos quadrados. A função objetivo minimizada inclui os movimentos das variáveis manipuladas [12] [26]. As variantes do DMC diferem deste pelo critério de otimização que usam: o controle por matriz dinâmica linear (LDMC) utiliza programação linear [13]; o controle por matriz dinâmica quadrática (QDMC) utiliza a programação quadrática [10]. Finalmente, o DMC e suas variantes tem como característica a possibilidade de projetar trajetórias para os setpoints futuros [10] [12] [13] [26].

O primeiro passo para descrever a teoria do DMC é apresentar o modelo de convolução discreta (MCD). Na apresentação do MCD assumimos as seguintes condições:

(C1) o processo e seu controle são representados por funções de transferência (figura 4.1).

(C2) as variáveis de entrada e saída estão na forma de variáveis de perturbação.

(C3) como estamos trabalhando com sistemas que incluem componentes discretos, usamos transformadas Z e equações de diferenças finitas.

(C4) a função de transferência do processo, $G_p(z)$, inclui o processo mais um retentor de ordem zero.

(C5) os sistemas tratados são supostos lineares, portanto valem as propriedades de preservação de escala e superposição de efeitos.

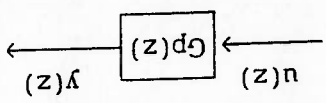


Figura 4.1 Função de transferência de um processo

(4.1)

Considerando o sistema mostrado na figura 4.1,

$$y(z) = G_p(z) u(z)$$

onde $y(z)$ = saída do processo

e $u(z)$ = entrada do processo.

Se $u(t)$ é um impulso unitário ($u(t) = \delta(t)$),

$$u(z) = 1.$$

Aplicando o impulso unitário na entrada do processo,

$$y_i(z) = G_p(z) \cdot 1 = G_p(z)$$

onde $y_i(z)$ = resposta ao impulso unitário do processo e igual à função de

transferência do processo.

y_i corresponde à seqüência de valores amostrados

$$y_i(0), y_i(T), y_i(2T), y_i(3T), \dots, y_i(kT), \dots$$

onde T = intervalo de amostragem.

Fazemos

$$y_1(kT) = h^k$$

onde $k = 1, 2, 3, \dots, \infty$.

(Conforme a condição C2, $y_1(0) = h_0 = 0$.)

Então

$$G_p(z) = h^1 z^{-1} + h^2 z^{-2} + h^3 z^{-3} + \dots = \sum_{k=1}^{\infty} h^k z^{-k} \quad (4.3)$$

é a função de transferência do processo, obtida pela aplicação de um impulso unitário na sua entrada. Quando o processo considerado é estável,

$A > 0$, $\exists N$ tal que $h^k < \epsilon$ para $k > N$ [26].

Portanto $G_p(z)$ pode ser aproximada por

$$G_p(z) = \sum_{k=1}^N h^k z^{-k} \quad (4.4)$$

em qualquer grau de precisão desejado. A série finita da resposta do processo amostrada

$$(h^1, h^2, \dots, h^N)$$

é o MCD do processo.

É muito difícil aplicar um impulso num processo industrial. Por isso, aplica-se um degrau na entrada do processo na prática. Se $u(z)$ é um degrau unitário

$$\left[u(z) = \frac{1 - z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right]$$

onde $y^p(z)$ = resposta a degrau unitário do processo.

$y^p(z)$ corresponde à sequência de valores amostrados

$$y^p(0), y^p(T), y^p(2T), \dots, y^p(kT), \dots$$

Fazemos

$$y^p(kT) = a^k$$

onde $k = 1, 2, 3, \dots, \infty$.

(Conforme a condição C2, $y^p(0) = a_0 = 0$.)

Então

(4.6)

(4.5)

As equações 4.10 e 4.11, e a condição CS são utilizados neste capítulo para a obtenção do MCD da URC e no desenvolvimento do DMC multivariável. Finalmente, é preciso ressaltar que o MCD é do processo somente, não incluindo o controlador. Portanto a obtenção do MCD se faz aplicando um degraú unitário nas variáveis manipuladas do processo e levantando a resposta das variáveis controladas com o processo operando em malha aberta.

a) se a resposta do processo a uma entrada $u(z)$ é $y(z)$, a resposta do processo a uma entrada $\mu u(z)$ é $\mu y(z)$, onde μ é uma constante.
 b) se a resposta do processo a uma entrada $u_1(z)$ é $y_1(z)$ e a resposta a uma entrada $u_2(z)$ é $y_2(z)$, então a resposta a uma entrada $u_1(z)+u_2(z)$ é $y_1(z)+y_2(z)$.

A condição CS implica que:

As equações 4.10 e 4.11 relacionam a resposta amostrada do processo a um degraú unitário e ao MCD do processo. Portanto possibilitam a obtenção do MCD a partir da resposta a degraú do processo.

$$a^k = \sum_{j=1}^r h_j \quad (4.11)$$

e, consequentemente,

$$h^k = a^k - a^{k-1} \quad (4.10)$$

Comparando as equações 4.3 e 4.9, concluímos que

$$[a^1 z^{-1} + (a_2 - a_1) z^{-2} + (a_3 - a_2) z^{-3} + \dots] \quad (4.9)$$

$$Gp(z) = (1-z^{-1}) (a^1 z^{-1} + a^2 z^{-2} + a^3 z^{-3} + \dots) = (a^1 z^{-1} + a^2 z^{-2} + \dots) - (a^1 z^{-2} + a^2 z^{-3} + \dots)$$

$$Gp(z) = (1-z^{-1}) y^p(z) \quad (4.8)$$

De acordo com a equação 4.5,

$$y^p(z) = a^1 z^{-1} + a^2 z^{-2} + \dots = \sum_{k=1}^r a^k z^{-k} \quad (4.7)$$

Nesta seção desenvolvemos o algoritmo DMC para processos de múltiplas variáveis controladas e manipuladas (MIMO). O modelo de conglução de um processo MIMO é

$$\hat{y}_{1,k} = \sum_{M} \left[\sum_{N} \left[\sum_{I=1}^{t-1} (h_{1,t,I} \cdot u_{t,k-I}) \right] \right] \quad (I = 1, 2, \dots, C) \quad (4.12)$$

onde $\hat{y}_{1,k}$ = valor predito da variável controlada I no instante de amostragem k;

$u_{t,k-I}$ = valor da variável manipulada t no instante de amostragem k-I ou seja, I instantes antes do instante k;

$h_{1,t,I}$ = coeficiente de resposta da variável controlada I ao impulso da variável manipulada t, I instantes após o impulso;

N = número de coeficientes utilizados no modelo de conglução discreto;

C = número de variáveis controladas;

M = número de variáveis manipuladas.

Em notação matricial,

$$\hat{y}_k = \sum_{I=1}^N (H_{1, \cdot, I} \cdot u_{k-I})$$

onde \hat{y}_k = matriz de valores preditos das variáveis controladas no instante k, que tem dimensão C X I;
 u_{k-1} = matriz de valores das variáveis manipuladas no instante k-1, que tem dimensão M X I;
 H_1 = matriz de coeficientes de resposta das variáveis controladas aos impulsos, que tem dimensão C X M.

Consideramos dois instantes consecutivos: k+j-1 e k+j. Para estes dois instantes podemos escrever

$$\hat{y}_{k+j}^c = \hat{y}_{k+j} + (\hat{y}_{k+j-1}^c - \hat{y}_{k+j-1}) \quad (4.17)$$

Os valores preditos, \hat{y} , devem ser corrigidos, usando realimentação. Os valores medidos das variáveis controladas no instante atual, \bar{y}_k , permitem corrigir recursivamente as predições feitas para os R instantes futuros.

Consideramos k como sendo o instante atual

$$j = 1, 2, \dots, R$$

Podemos utilizar a equação 4.16 para predir os valores das variáveis controladas, \hat{y} , em instantes seguintes ao instante k. Fazemos predições para R instantes após k, ou seja,

onde $\Delta u_{k+j-1} = \frac{u_{k+j-1}}{n} - \frac{u_{k+j-1-1}}{n}$

$$\hat{y}_{k+j} = \hat{y}_{k+j-1} + \sum_{i=1}^j (H_i \cdot \Delta u_{k+j-i}) \quad (4.16)$$

ou

$$\hat{y}_{k+j} - \hat{y}_{k+j-1} = \sum_{i=1}^j (H_i \cdot \Delta u_{k+j-i})$$

Subtraímos a equação 4.14 da equação 4.15, obtendo

$$\hat{y}_{k+j} = \sum_{i=1}^j (H_i \cdot \frac{u_{k+j-i}}{n}) \quad (4.15)$$

e

$$\hat{y}_{k+j-1} = \sum_{i=1}^{j-1} (H_i \cdot \frac{u_{k+j-1-i}}{n}) \quad (4.14)$$

para

$$j = 1, 2, \dots, R$$

$$\bar{y}_c^k = \bar{y}_k$$

onde \bar{y}_c^{k+j} e \bar{y}_c^{k+j-1} são os valores corrigidos preditos das variáveis controladas nos instantes $k+j$ e $k+j-1$ respectivamente. Substituindo a equação 4.17, temos

$$\bar{y}_c^{k+j} = \bar{y}_c^{k+j-1} + \sum_{i=1}^N (H^i \Delta u_{-k+j-1}^i) \quad (4.18)$$

$$(j = 1, 2, \dots, R)$$

Rearranjamos a equação 4.18, colocando os termos que representam ações de controle futuras e passadas em relação ao instante atual k em evidência [12].

Resulta

$$\bar{y}_c^{k+j} = \sum_{j-1}^{j-1} (\bar{A}_{j-1}^v \Delta u_{-k+1}^v) + \bar{y}_k + \bar{P}_j \quad (4.19)$$

$$(j = 1, 2, \dots, R)$$

onde $\bar{A}_{j-1}^v = \sum_{v=1}^V H^v$, tem dimensão $C \times M$;

$$\bar{P}_j = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{m+1} (H^i \Delta u_{-k+m-1}^i), \text{ tem dimensão } C \times 1. \quad (4.19.1)$$

Rescrevemos a equação 4.19 de maneira a colocar as R predições em notação

matricial:

$$\begin{bmatrix} Y_c^{k+1} \\ Y_c^k \\ \vdots \\ Y_c^{k+R-1} \\ Y_c^{k+R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{A}_2 & \vdots & \bar{A}_{R-1} & \bar{A}_R \\ 0 & \bar{A}_1 & \vdots & \bar{A}_{R-2} & \bar{A}_{R-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \bar{A}_{R-3} \dots \bar{A}_2 \\ 0 & 0 & \dots & \bar{A}_1 & \bar{A}_2 \dots \bar{A}_{R-2} \\ 0 & 0 & \dots & \bar{A}_1 & \bar{A}_2 \dots \bar{A}_{R-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+R-2} \\ \Delta u_{k+R-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_k + P_1 \\ Y_k + P_2 \\ \vdots \\ Y_k + P_{R-1} \\ Y_k + P_R \end{bmatrix}$$

(4.20)

Definimos

$$Y_c^k = \begin{bmatrix} Y_c^{k+1} \\ Y_c^k \\ \vdots \\ Y_c^{k+R-1} \\ Y_c^{k+R} \end{bmatrix}, \text{ que tem dimensão } R.C \times 1;$$

$$A^k = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{A}_2 & \vdots & \bar{A}_{R-1} & \bar{A}_R \\ 0 & \bar{A}_1 & \vdots & \bar{A}_{R-2} & \bar{A}_{R-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \bar{A}_{R-3} \dots \bar{A}_2 \\ 0 & 0 & \dots & \bar{A}_1 & \bar{A}_2 \dots \bar{A}_{R-2} \\ 0 & 0 & \dots & \bar{A}_1 & \bar{A}_2 \dots \bar{A}_{R-1} \end{bmatrix}$$

chamada de Matriz Dinâmica e que tem dimensão R.CXR.M :

onde $y^d = \begin{bmatrix} y^d_{k+1} \\ y^d_{k+2} \\ \vdots \\ y^d_{k+R-1} \\ y^d_{k+R} \end{bmatrix}$, tendo dimensão R.Cx1 :

$$y^d = \bar{\alpha} y^k + (I - \bar{\alpha}) y^{sp_k} \quad (4.21)$$

Para calcular as ações futuras de controle, Δu , é preciso adotar uma trajetória de valores desejados das variáveis controladas nos R instantes futuros, y^d . Adotamos

$$y^c = A^R \Delta u + y^k + P \quad (4.20.1)$$

Utilizando estas definições, a equação 4.20 é equivalente a

$$y^k + P = \begin{bmatrix} y^k + P_1 \\ y^k + P_2 \\ \vdots \\ y^k + P_{R-1} \\ y^k + P_R \end{bmatrix}, \text{ que tem dimensão R.Cx1.}$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u^k \\ \Delta u^{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u^{k+R-2} \\ \Delta u^{k+R-1} \end{bmatrix}, \text{ que tem dimensão R.Mx1 ;}$$

sendo \bar{I} e $\bar{0}$ matrizes identidade e zero respectivamente, ambas de dimensão $C \times C$.

$$I = \begin{bmatrix} \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \end{bmatrix}, \text{ tendo dimensão } R.C \times R.C,$$

de dimensão $C \times C$, e α_i ($i = 1, 2, 3, \dots, C$) o coeficiente que define a velocidade de aproximação da variável controlada l de seu setpoint, $y_{sp_{l,k}}$, no instante k ;

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \alpha_{C-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_C \end{bmatrix},$$

sendo

$$\bar{\alpha} = \begin{bmatrix} \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \end{bmatrix}, \text{ tendo dimensão } R.C \times R.C,$$

A partir da equação 4.23 é possível calcular os valores das próximas

$$e = A' \Delta u + e' \tag{4.23}$$

então

$$= e' \text{ (dimensão R.CxI),}$$

$$e = \begin{bmatrix} (1 - \alpha_1) \cdot (y_{sp}^k - y^k) - P_1 \\ (1 - \alpha_2) \cdot (y_{sp}^k - y^k) - P_2 \\ \vdots \\ (1 - \alpha_{R-1}) \cdot (y_{sp}^k - y^k) - P_{R-1} \\ (1 - \alpha_R) \cdot (y_{sp}^k - y^k) - P_R \end{bmatrix} =$$

$$y^d - y^c = e \text{ (dimensão R.CxI)}$$

Fazemos

$$y^d - y^c = -A' \Delta u + (I - \bar{\alpha}) \cdot (y_{sp}^k - P) \tag{4.22}$$

sendo y_{sp}^k , de dimensão Cx1, o setpoint das variáveis controladas no instante k [12] [23]. Subtraímos a equação 4.20.1 da equação 4.21. Resulta

$$y_{sp}^k = \begin{bmatrix} y_{sp}^k \\ y_{sp}^k \\ \vdots \\ y_{sp}^k \\ y_{sp}^k \end{bmatrix}, \text{ tendo dimensão R.Cx1,}$$

R ações de controle, Δu , que fazem os valores preditos das variáveis controladas, y^p , coincidirem com os valores desejados das variáveis controladas, y^d . Impondo

$$e = 0$$

obtemos

$$\Delta \bar{u} = (A.)^{-1} e.$$

Esta solução apresenta o inconveniente de não permitir a inclusão de restrições nas variáveis controladas. O DMC contorna esta dificuldade impondo que sejam calculadas apenas as próximas L ações de controle, $L < R$. Consequentemente, Δu na equação 4.23 devem ser substituídos por

$$A = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \dots & \bar{A}_1 & \dots & \bar{A}_1 \\ \bar{A}_2 & \dots & \bar{A}_1 & \dots & \bar{A}_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \bar{A}_{R-1} & \dots & \bar{A}_{R-2} & \dots & \bar{A}_{R-1} \\ \bar{A}_R & \dots & \bar{A}_{R-1} & \dots & \bar{A}_{R-L+1} \\ \bar{0} & \dots & \bar{0} & \dots & \bar{0} \\ \bar{0} & \dots & \bar{0} & \dots & \bar{0} \end{bmatrix}, \text{ que tem dimensão } R.C \times L.M,$$

$$\Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+L-2} \\ \Delta u_{k+L-1} \end{bmatrix}, \text{ que tem dimensão } L.M \times 1,$$

respectivamente. A matriz A é chamada de Matriz Dinâmica. A equação 4.23 torna-se

$$e = -A \Delta \bar{u} + e' \quad (4.24)$$

A equação 4.24 não apresenta solução única para $e = 0$. Entretanto é possível obter uma solução de 4.24 que minimiza o índice de desempenho quadrático

$$J[\Delta u] = e^T \cdot Q \cdot e + \Delta u^T \cdot R \cdot \Delta u \quad (4.25)$$

onde $Q = \begin{bmatrix} \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \end{bmatrix}$, que tem dimensão $R.CXR.C$,

sendo $\bar{Q} = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & q_{c-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & q_c \end{bmatrix}$, que tem dimensão CXC ,

e q_i ($i = 1, 2, \dots, C$) o peso de erro da variável controlada i ;

$$R = \begin{bmatrix} \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} & \bar{0} \end{bmatrix}$$
, que tem dimensão $L.MXL.M$,

e r_t ($t = 1, 2, \dots, M$) o fator de supressão de movimento da variável manipulada t .

A solução da equação 4.24 que minimiza a equação 4.25 é

$$\Delta u = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q e' \quad [29]. \quad (4.26)$$

Através da equação 4.26 calculamos as ações de controle no intervalo $[k, k+L-1]$, porém implementamos somente Δu^k . No instante $k+1$ aplicamos a equação 4.26 novamente para calcular Δu^{k+1} , e assim por diante. Portanto podemos usar apenas as M primeiras linhas de $(A^T Q A + R)^{-1} A^T Q$. Definindo

$$K = M \text{ primeiras linhas de } (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q$$

temos

$$\Delta u^k = K e' \quad (4.27)$$

A equação 4.27 é o algoritmo do DMC.

Um esquema adaptativo é usado neste trabalho para implementar restrições nas variáveis controladas. Este esquema é similar ao proposto por Pretti e Gillett [14]. Como na referência citada, é necessário verificar quais restrições estão a ponto de ser violadas. Uma restrição só deve ser incluída na matriz e se estiver a ponto de ser violada, ou seja, ativa. Um algoritmo externo ao DMC verifica a condição do processo em cada instante de amostragem do controlador. Se uma restrição não estiver ativa, o peso da variável correspondente na matriz Q é zerado. Quando a restrição torna-se ativa, o peso da variável deixa de ser zero, assumindo um valor conveniente. Também o setpoint da variável pode ser modificado e a matriz de restrição de movimento das variáveis manipuladas (R), alterada. Em certos casos, outras variáveis, que não a restringida, podem ter seus pesos e setpoints modificados em função da ativação de uma restrição. De uma maneira geral, estas alterações afetam a função objetivo minimizada pelo DMC:

$$J[\Delta u] = e^T Q e + \Delta u^T R \Delta u .$$

Chamamos este esquema de adaptativo porque possui um algoritmo externo que modifica as prioridades do controlador conforme o estado do processo. A principal consequência das alterações nas matrizes Q e R é que a

matriz

$$(A^T Q A + R)^{-1} A^T Q$$

precisa ser recalculada com o sistema em operação (on line). Mudanças de setpoints não alteram o funcionamento do DMC pois o setpoint é normalmente fornecido em cada instante de amostragem do controlador.

Verifiquemos agora como os pesos da matriz Q afetam o cálculo das

ações de controle. Consideremos um processo controlado por DMC com

as características seguintes:

$$C = 2;$$

$$M = 2;$$

$$N = 2;$$

$$R = 1;$$

$$L = 1;$$

$$\alpha = 0.$$

Então

$$A^T Q A + R =$$

(4.29)

$$A^T Q A + R = \begin{bmatrix} a_{111} & a_{121} \\ a_{211} & a_{221} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 & 0 \\ 0 & r_2 \end{bmatrix}$$

(4.28)

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Y^{1sp} - Y^{1k}) \Delta u_{1k-1}^{112} + h_{122} \Delta u_{2k-1}^{2k-1} \\ (Y^{2sp} - Y^{2k}) \Delta u_{1k-1}^{212} + h_{222} \Delta u_{2k-1}^{2k-1} \end{bmatrix}$$

$$e = (I - \alpha) (Y^{sp} - Y^k) - P = - (Y^{sp} - Y^k) - P$$

$$P = P^L = H \Delta u^{k-1}$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H^L = \begin{bmatrix} h_{111} & h_{121} \\ h_{211} & h_{221} \end{bmatrix}, \quad H^Z = \begin{bmatrix} h_{112} & h_{122} \\ h_{212} & h_{222} \end{bmatrix}$$

$$A^L = \begin{bmatrix} a_{111} & a_{121} \\ a_{211} & a_{221} \end{bmatrix}$$

$$Y^k = \begin{bmatrix} Y^{1k} \\ Y^{2k} \end{bmatrix}, \quad \Delta u^k = \begin{bmatrix} \Delta u_{1k} \\ \Delta u_{2k} \end{bmatrix}, \quad Y^{sp} = \begin{bmatrix} Y^{sp1} \\ Y^{sp2} \end{bmatrix}$$

O primeiro termo do lado direito da equação 4.32 é a inversa da matriz dada por 4.30. Todos os elementos de 4.30 relativos à variável controlada y_2 (a_{211}^{211} , a_{221}^{221}) são multiplicados por q_2 . O segundo termo é a matriz dada por 4.31. Também todos os termos relativos a y_2 de 4.31 são multiplicados por q_2 . Se $q_2 = 0$, $\Delta \bar{u}^k$ independe dos termos de y_2 . Portanto, se y_2 for uma restrição não permanente, é possível desativa-la ou ativa-la, zerando ou não o peso q_2 .

A variação dos valores das variáveis manipuladas no instante k é dada por

$$\Delta \bar{u}^k = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q e^k \quad (4.32)$$

(4.31)

$$A^T Q e^k = \begin{bmatrix} a_{111}^1 q_{e^k}^1 + a_{211}^2 q_{e^k}^2 & a_{121}^1 q_{e^k}^1 + a_{221}^2 q_{e^k}^2 \\ a_{111}^1 q_{e^k}^1 + a_{211}^2 q_{e^k}^2 & a_{121}^1 q_{e^k}^1 + a_{221}^2 q_{e^k}^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} a_{111}^1 q_a^1 + a_{211}^2 q_a^2 + r_1 & a_{111}^1 q_a^1 + a_{211}^2 q_a^2 \\ a_{121}^1 q_a^1 + a_{221}^2 q_a^2 + r_2 & a_{121}^1 q_a^1 + a_{221}^2 q_a^2 + r_2 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

4.5 PROPRIEDADES DO DMC

As propriedades do DMC podem ser analisadas e explicadas dentro da teoria desenvolvida por Garcia [26] [27] [28]. Esta teoria é chamada controle por modelo interno (IMC). O IMC não é um algoritmo de controle, mas sim uma estrutura na qual algoritmos de controle podem ser projetados e analisados. De acordo com a teoria IMC, numa malha de controle clássica (figura 4.2), é adicionado e subtraído um modelo do processo (figura 4.3). A malha local contendo o controlador $C(z)$ e o modelo do processo $G(z)$ é substituída pelo controlador $G_c(z)$ (figura 4.4).

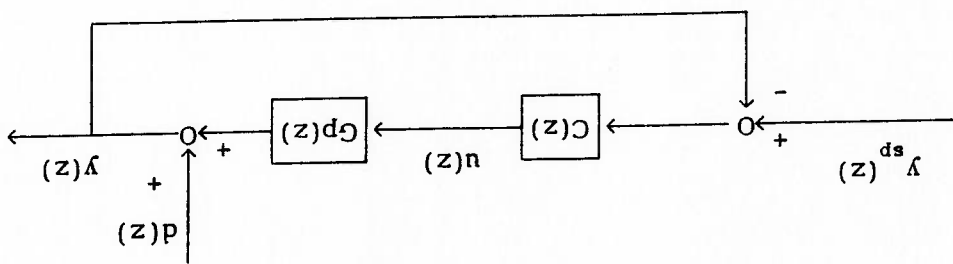


Figura 4.2 Malha de controle clássica

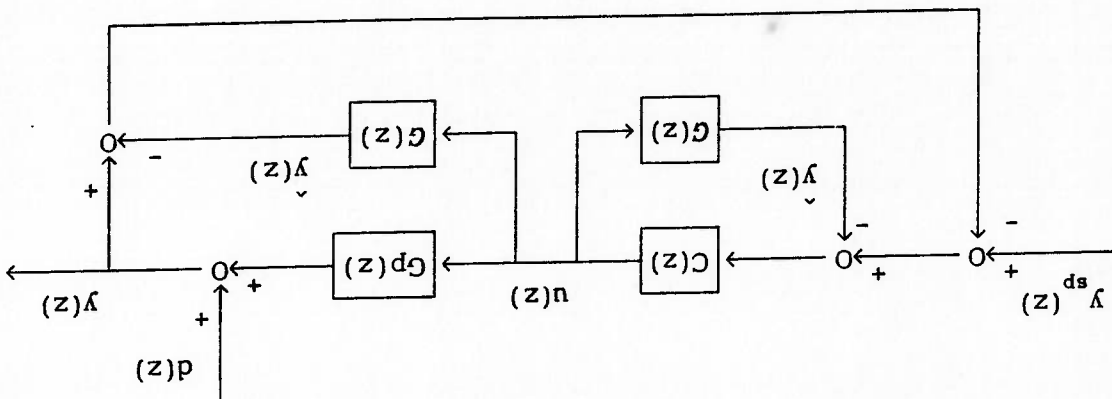


Figura 4.3 Malha de controle modificada

ou,
$$u(z) = D(z)^{-1} [N(z) y^d(z) - N(1) (y(z) - \hat{y}(z))] \quad (4.36)$$

$$D(z) u(z) = N(z) y^d(z) - N(1) (y(z) - \hat{y}(z)),$$

A transformada Z da equação 4.35 é

$$u_k = \sum_{i=1}^{N-1} \delta^i u_{k-i} + \sum_{i=1}^R v^i [y_{k+1}^d - (y_k - \hat{y}_k)] \quad (4.35)$$

Podemos reescrever a equação 4.34 na forma

$$\Delta u_k = K \bar{e}^k \quad (4.34)$$

Definindo $K =$ primeira linha de $(A^T Q A + R)^{-1} A^T Q$,

$$(A^T Q A + R)^{-1} A^T Q$$

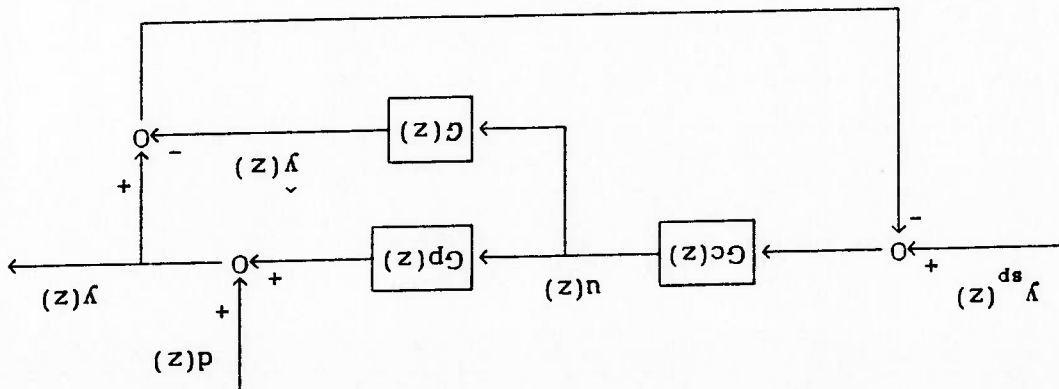
primeira linha de

é a lei de controle do DMC para sistemas SISO. Normalmente implementa-se a variação da variável controlada no instante k somente. Portanto usa-se só a

$$\Delta \bar{u} = (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q \bar{e}^k \quad (4.33)$$

A equação

Figura 4.4 Malha de controle proposta pelo IMC



P2) Se $H(z)^{-1}$ é instável, $G_c(z) = H(z)^{-1}$ minimiza a soma de erros quadráticos (ISE) na operação como regulador e servo do controlador. $H(z)$ é a parte inversível de $H(z)$, isto é, a parte que resta de $H(z)$ após fatorados os zeros

$$y^{sp}(z).$$

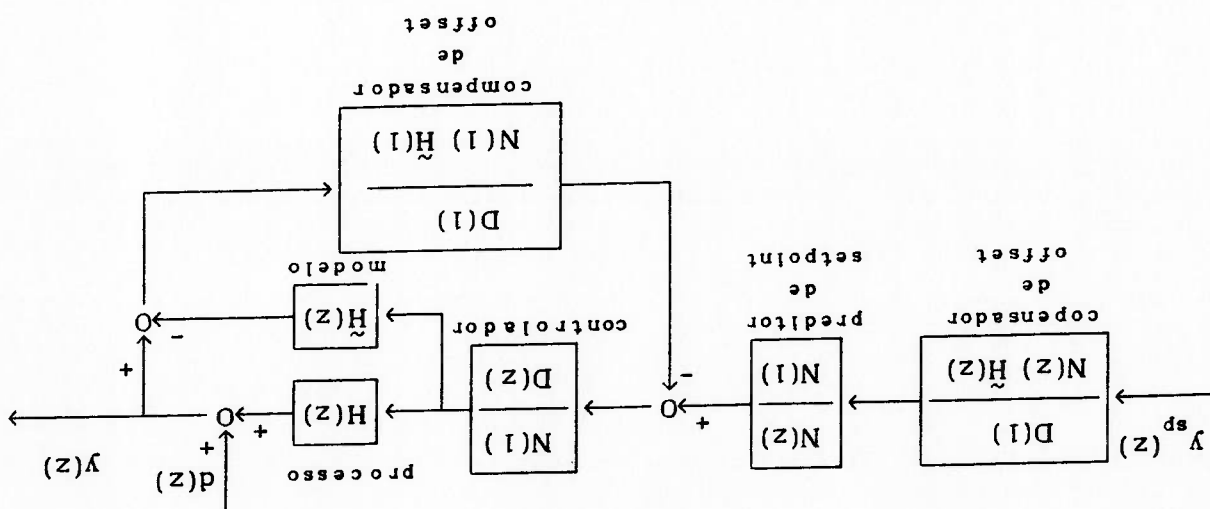
a malha é estável se os zeros de $H(z)$ estão dentro do círculo unitário. Adicionalmente, se processo e controlador são estáveis, a resposta a transitórios em malha fechada apresenta offset nulo e o controlador é perfeito, isto é, qualquer que seja a perturbação aplicada no processo $y(z) =$

$$G_c(z) = \frac{D^c(z)}{N^c(z)} = H(z)^{-1}, \quad (4.37)$$

da estabilidade do controlador. Como em malha aberta. Quando o processo é estável, a estabilidade da malha depende em malha fechada, é estável se o controlador e o processo são estáveis operando função de transferência do processo. E o processo, operando com o controle em P1) Se $\bar{R} = \bar{Q}$, $\bar{Q} \neq \bar{0}$ e $L = R \leq N$, então $G_c(z) = H(z)^{-1}$, onde $H(z)$ é a

As propriedades e teoremas que aplicam-se ao DMC, através da análise do IMC correspondente, são relacionadas a seguir.

Figura 4.5 Malha de controle do DMC colocada na forma do IMC



do IMC.

De maneira geral, a lei de controle acima pode ser colocada na forma de IMC, conforme a figura 4.5. Portanto o DMC pode ser analisado dentro da estrutura

(4.39)

$$F(z) = \text{diag} \left[\frac{1 - \alpha_1}{1 - \alpha_1 z^{-1}}, \frac{1 - \alpha_1}{1 - \alpha_1 z^{-1}} \right]$$

P9) Um filtro do tipo

P8) Quando o critério dos mínimos quadrados é usado no controlador (caso do DMC), nem sempre há desacoplamento das variáveis controladas. O desacoplamento não minimiza necessariamente uma função objetivo do tipo mínimos quadrados.

As propriedades P1 a P6, apresentadas para caso SISO, estendem-se para o caso MIMO com considerações adicionais. A existência de tempos mortos diferentes das variáveis controladas é um fator que complica o controle de sistemas MIMO. Finalizando esta seção, relacionamos a seguir as propriedades referentes especificamente aos sistemas MIMO [27] [28].

$0 < \alpha < 1$, aplicado nos sinais $y^{sp}(z)$ e $(y(z) - \hat{y}(z))$, estabiliza a operação em malha fechada.

(4.38)

$$F(z) = \frac{1 - \alpha z^{-1}}{1 - \alpha}$$

- operação em malha fechada não é garantida. Neste caso, um filtro do tipo
- P6) Se o modelo e o processo não coincidem ($H(z) \neq \hat{H}(z)$), a estabilidade da
- P5) Se $\bar{Q} = \bar{I}$ e $\bar{R} = \bar{Q}$, o controlador é estável para L suficientemente pequeno e R suficientemente grande tal que $R > N + L - 1$.
- P4) Existe $r > 0$ finito, tal que, para $r_{II} > r$ (elemento de \bar{R}), o controlador é estável para todo $L \geq 1$, $R \geq 1$ e $\bar{Q} \neq \bar{Q}$.
- P3) Se o sistema tem resposta monotônica a degrau, $\bar{R} = \bar{Q}$, $\bar{Q} \neq \bar{Q}$ e $R = N$, para L suficientemente pequeno, o controlador é estável. Em sistemas com resposta não monotônica, o controlador pode ser estabilizado fazendo $\bar{R} \neq \bar{Q}$.

fora do círculo unitário e os tempos mortos.

aplicado nos sinais $y_{sp}(z)$ e $(y(z) - \bar{y}(z))$, pode assegurar a estabilidade do sistema, caso $(H(z) \neq H(z))$. Se:

$F(z)$ é dado pela equação 4.39;

$$Gc = \tilde{H}(z);$$

e se e somente se

$$\operatorname{Re}[\lambda_j(H(1)) \tilde{H}(1)^{-1}] > 0 \quad (j = 1, \dots, C)$$

onde $\lambda_j(T)$ é o j -ésimo autovvalor da matriz T ;

existe $\alpha^* > 0$, $\alpha^* < 1$, tal que o sistema em malha fechada é estável para todo α_i tal que $\alpha^* \leq \alpha_i < 1$ ($i = 1, \dots, C$).

Nota : A condição relativa aos autovvalores em P7 indica que os autovvalores do ganho em regime permanente do processo devem ter o mesmo sinal dos do modelo.

P10) O controlador é estável na presença de restrições nas variáveis controladas, se $H(z) = \tilde{H}(z)$ e as restrições são impostas nas variáveis manipuladas que entram no modelo e no processo. Na presença de restrições, o offset deixa de ser nulo.

Nesta seção discutimos o efeito de cada um dos parâmetros do DMC no seu desempenho. Esta discussão é usada para selecionar os valores destes parâmetros no final deste capítulo.

Garcia [28] recomenda que seja adotada inicialmente a relação de parâmetros de PI, porque isto implica em um controlador perfeito. Caso o controlador não seja estável ou os movimentos das variáveis controladas sejam excessivos com este ajuste, os parâmetros devem ser modificados até que o controlador tenha as características desejadas.

Caso o controlador seja instável, a estabilidade pode ser obtida

aumentando o período de amostragem T . Se o controlador é estável, pequenos valores de T causam grandes variações nas variáveis manipuladas. Por outro lado, é desejável reduzir T para lidar com perturbações frequentes [28]. Porém o fator determinante na seleção de T é a identificação do modelo de convolução discreta. Com base neste aspecto, T deve ser escolhido de forma que h_1 ($i=1, \dots, N$) seja maior ou igual à ordem de erro na medição das variáveis controladas [12]. T está relacionado também com N , o número de elementos do MCD. Usar T pequeno significa reduzir h_1 e aumentar N . N grande exige maior capacidade de memória do hardware onde é implantado o DMC. N deve ser tal que h_1^N é da ordem do erro de medição das variáveis controladas, caso contrário a resposta do processo operando em malha fechada apresenta oscilações N instantes após os transitórios [19].

R e L estão relacionados entre si. Diminuir L em relação a R estabiliza o controlador ou diminui a variação das variáveis manipuladas entre as amostragens, que são duas características desejáveis [28]. Não é recomendável aumentar R mantendo L constante, porque aumenta a quantidade de memória usada pelo DMC. R e L devem ser os menores possíveis para que o algoritmo possa ser executado com maior velocidade e não ocupe grande espaço de memória, barateando o hardware exigido para sua implementação.

Aumentar o valor dos elementos da diagonal da matriz R permite estabilizar o controlador ou diminuir a variação das variáveis manipuladas entre as amostragens. Para $R=0$, o ganho do controlador é muito sensível ao valor de L [19].

Os pesos dos erros nas variáveis controladas são os elementos da diagonal principal da matriz Q . O uso de pesos diferentes para variáveis diferentes é uma maneira de priorizar o controle de certas variáveis, desacopla-las [28] ou desativar restrições. Usar pesos que variam conforme o instante de amostragem do MCD para uma mesma variável pode melhorar o desempenho do DMC, porém a literatura não apresenta indicação de como

seleccionar estes pesos em sistemas MIMO [28]. Neste trabalho, usamos Q para ativar e desativar restrições nas variáveis controladas.

Aumentar as constantes do filtro α estabiliza o controlador e diminui a variação das variáveis manipuladas entre amostragens [27]. Em compensação, a resposta do sistema em malha fechada torna-se mais lenta.

Seborg et al [19] sugerem valores iniciais para os parâmetros do

DMC:

a) L tal que $L \times T$ é o tempo necessário para a resposta do processo operando em malha aberta atingir 60% do seu valor final (para $L > 5$, o valor de R não tem efeito importante no desempenho do controlador);

b) R tal que $R \times T$ é o tempo necessário para a resposta do processo operando em malha aberta atingir 50% do seu valor final, se $L = 1$ é fixado;

c) $Q = I$;

d) R deve ter seus elementos constantes para uma mesma variável e ajustados para obter o desempenho desejado do controle;

e) N deve ser tal que h_N é da ordem do erro de medição das variáveis controladas.

4.7 OBJETIVOS DE CONTROLE, RESTRIÇÕES SET-POINTS, GRAUS DE LIBERDADE

E EQUAÇÃO DO DMC DA URC

No capítulo 3 concluímos que seis variáveis da URC tem de ser

especificadas. Das seis variáveis que devem ser especificadas, três são

perturbações: f , m_6 e T_6 . Outras variáveis devem ser especificadas pelo

controle da URC: são variáveis manipuladas [19]. As variáveis manipuladas são:

a vazão de saída da URC, manipulada através do sinal de controle da válvula

CV-2, cm^{10} ; a rotação do compressor, manipulada através do sinal de controle

da válvula CV-3, ccv_3 ; a vazão de recirculação, manipulada através do sinal de

controle da válvula CV-1, cm^8 .

O número de variáveis controladas deve ser menor ou igual ao número

de variáveis manipuladas para que não haja offsets [19]. Selecionamos as

variáveis controladas com base nos objetivos e restrições de operação da URC.

Os objetivos de operação da URC são os seguintes:

01) $P_{TQ1} = 1,8$ Mpa para que o processo realizado na URC tenha o rendimento

conveniente;

02) a circulação do gás na URC deve consumir o mínimo possível de energia.

As restrições de operação da URC são as seguintes:

R1) $m_1 > 3$ kg/s para que não haja danos ao sistema;

R2) $7000 < n < 10600$, para que não haja danos ao compressor e sua turbina;

R3) $q/n > 1,373 \times 10^{-4} m^3 s^{-1} rpm^{-1}$, para evitar o surge;

(Veja a figura 3.1 e a seção 3.2 do capítulo 3).

A partir das restrições podemos definir estados de operação da URC: operação normal, surge, rotação crítica, vazão crítica, surge + vazão crítica, surge + rotação crítica e surge + vazão crítica + rotação crítica.

Em operação normal, a URC deve manter a pressão do tanque TQ1 em torno de seu setpoint que é 1,8 Mpa. O objetivo de consumir o mínimo possível

Para evitar a mudança freqüente de estado do controlador, uso um intervalo diferencial de $1,4 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1} \text{ rpm}^{-1}$. A restrição R3 é desativada se

$$1,373 \times 10^{-4} + 0,14 \times 10^{-4} \approx 1,5 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1} \text{ rpm}^{-1}$$

leva o compressor ao surge mais a margem de segurança de 10%, ou seja, $1,373 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1} \text{ rpm}^{-1}$. O setpoint de q/n neste estado é o valor de q/n que consideramos o compressor no estado de surge quando q/n é até 10% maior do que como sendo o afastamento do surge que ativa a restrição R3. Isto é,

$$d^s = 0,14 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1} \text{ rpm}^{-1}$$

Adotamos arbitrariamente

onde d^s = medida do afastamento do surge ($\text{m s}^{-1} \text{ rpm}^{-1}$).

$$d^s = q/n - 1,373 \times 10^{-4}$$

surge é

compressor entra em surge se $q/n > 1,373 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1} \text{ rpm}^{-1}$. O afastamento do de q/n , que é a variável que indica a distância do surge no compressor. O Em surge, o controlador abandona o controle de m_8 e altera o setpoint

quando o compressor opera na sua condição normal.)

$$m_3 = 5,4 \text{ Kg/s}$$

a simulação n.º 1 da seção 3.5.2 do capítulo 3, compressor em operação normal. Portanto o setpoint de m_8 é $0,1 \text{ Kg/s}$. (Conforme o valor mínimo de m_8 como sendo aproximadamente 2% do valor de m_3 no m_8 deve ser a mínima necessária para que não haja emperramento da válvula. Adoto de energia do compressor é menor quanto menor a recirculação de gás. Portanto obtido através da simulação da operação em regime permanente da URC, é $1,724 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1} \text{ rpm}^{-1}$. Portanto o setpoint de q/n é $1,724 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1} \text{ rpm}^{-1}$. O gasto mais próxima possível do valor que resulta em eficiência máxima. Este valor, de energia está relacionado a outras duas variáveis controladas: q/n e m_8 . A eficiência politrópica do compressor é função de q/n , que deve ser mantida

Caso ocorra surge, rotação crítica e vazão crítica, o controlador abandona o controle de P_{TQ1} e de m_8 ; altera o setpoint de q/n para o valor de surge; e passa a controlar n , com setpoint de rotação crítica, e m_1 com setpoint de vazão crítica. Os intervalos diferenciais são os mesmos dos

Caso ocorra surge e rotação crítica, o controlador abandona o controle de m_8 ; altera o setpoint de q/n para o valor de surge; mantém o controle de P_{TQ1} com o setpoint de operação normal; e passa a controlar n com setpoint de rotação crítica. Os intervalos diferenciais são os mesmos dos estados de rotação crítica e de surge.

Caso ocorra surge e vazão crítica, o controlador abandona o controle de m_8 ; altera o setpoint de q/n para o valor de surge; mantém o setpoint de P_{TQ1} com o setpoint de operação normal; e passa a controlar m_1 com o setpoint de vazão crítica. Os intervalos diferenciais são os mesmos dos estados de vazão crítica e de surge.

Consideramos a URC com vazão crítica quando m_1 é 10% maior que a vazão estabelecida em R1, ou seja $m_1 > 3,3 \text{ kg/s}$. A margem de segurança de 10% é arbitrária. No estado de vazão crítica, o controlador abandona o controle de m_8 e passa a controlar m_1 , mantendo o controle de P_{TQ1} e q/n com os setpoints de operação normal. O setpoint de m_1 é $3,3 \text{ kg/s}$. Adotamos um intervalo diferencial de $0,03 \text{ kg/s}$. A URC deixa o estado de vazão crítica se $m_1 > 3,33 \text{ kg/s}$.

Consideramos o compressor em rotação crítica quando a rotação deste aproxima-se a menos de 500 rpm da rotação máxima ou mínima estabelecida em R2. A margem de segurança de 500 rpm é arbitrária. No estado de rotação crítica, o controlador abandona o controle de m_8 e passa a controlar n , mantendo o controle de P_{TQ1} e q/n com os setpoints de operação normal. Os setpoints de n são 7500 rpm, se $n < 7500 \text{ rpm}$, e 10100 rpm, se $n > 10100 \text{ rpm}$. Para evitar mudança frequente de estado, uso um intervalo diferencial de 100 rpm. O compressor deixa o estado de rotação crítica se $7600 < n < 10000 \text{ rpm}$.

Nesta condição, P_{TQ1} mantém o setpoint de operação normal. A restrição de m_8 é abandonada para que a vazão de recirculação seja manipulada através de cm_8 . Pois m_8 é a variável que tem maior influência sobre q/n .

$$q/n > 1,514 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ rpm}^{-1}$$

estados de rotação crítica, vazão crítica e surge.

A partir das considerações feitas nesta seção e nas seções 4.3 e 4.4, escrevemos as submatrizes que formam os termos da equação 4.26 para o DMC aplicado na URC. A submatriz de movimento das variáveis manipuladas, que tem dimensão 3×1 , é

$$\Delta \bar{u}^{k+j} = \begin{bmatrix} \Delta m_{10}^{k+j} \\ \Delta c v_3^{k+j} \\ \Delta c m_8^{k+j} \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, \dots, L), \quad (4.40)$$

onde $\Delta m_{10}^{k+j} = m_{10}^{k+j} - m_{10}^{k+j-1}$,

$$\Delta c v_3^{k+j} = c v_3^{k+j} - c v_3^{k+j-1},$$

$$\Delta c m_8^{k+j} = c m_8^{k+j} - c m_8^{k+j-1}.$$

A submatriz de supressão de movimentos das variáveis manipuladas é

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} r_{cm_{10}} & 0 & 0 \\ 0 & r_{ccv_3} & 0 \\ 0 & 0 & r_{cm_8} \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

que tem dimensão 3×3 .

A submatriz de variáveis controladas é

$$Y_k = \begin{bmatrix} P_{TQ1,k} \\ q/n_k \\ m_{8,k} \\ m_{1,k} \\ n_k \end{bmatrix}$$

(4.42)

As submatrizes do MCD são

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} h_{PTQ1,m10,1} & h_{PTQ1,CCV3,1} & h_{q/n,cm8,1} & h_{m8,cm8,1} & h_{m1,m10,1} & h_{n,cm8,1} \\ h_{PTQ1,m10,1} & h_{PTQ1,CCV3,1} & h_{q/n,cm8,1} & h_{m8,cm8,1} & h_{m1,m10,1} & h_{n,cm8,1} \\ h_{PTQ1,m10,1} & h_{PTQ1,CCV3,1} & h_{q/n,cm8,1} & h_{m8,cm8,1} & h_{m1,m10,1} & h_{n,cm8,1} \\ h_{PTQ1,m10,1} & h_{PTQ1,CCV3,1} & h_{q/n,cm8,1} & h_{m8,cm8,1} & h_{m1,m10,1} & h_{n,cm8,1} \\ h_{PTQ1,m10,1} & h_{PTQ1,CCV3,1} & h_{q/n,cm8,1} & h_{m8,cm8,1} & h_{m1,m10,1} & h_{n,cm8,1} \\ h_{PTQ1,m10,1} & h_{PTQ1,CCV3,1} & h_{q/n,cm8,1} & h_{m8,cm8,1} & h_{m1,m10,1} & h_{n,cm8,1} \end{bmatrix}$$

(4.43)

(i = 1, 2, ..., N (N = número de instantes amostrados do MCD))

e

$$\underline{A}_j = \begin{bmatrix} a_{PTQ1,m10,j} & a_{PTQ1,CCV3,j} & a_{q/n,cm8,j} & a_{m8,cm8,j} & a_{m1,m10,j} & a_{n,cm8,j} \\ a_{PTQ1,m10,j} & a_{PTQ1,CCV3,j} & a_{q/n,cm8,j} & a_{m8,cm8,j} & a_{m1,m10,j} & a_{n,cm8,j} \\ a_{PTQ1,m10,j} & a_{PTQ1,CCV3,j} & a_{q/n,cm8,j} & a_{m8,cm8,j} & a_{m1,m10,j} & a_{n,cm8,j} \\ a_{PTQ1,m10,j} & a_{PTQ1,CCV3,j} & a_{q/n,cm8,j} & a_{m8,cm8,j} & a_{m1,m10,j} & a_{n,cm8,j} \\ a_{PTQ1,m10,j} & a_{PTQ1,CCV3,j} & a_{q/n,cm8,j} & a_{m8,cm8,j} & a_{m1,m10,j} & a_{n,cm8,j} \end{bmatrix}$$

(j = 1, 2, ..., R).

(4.43.1)

A submatriz de filtro, ou de velocidade de aproximação do setpoint, é

$$\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_{q/n} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{m_8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{m_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

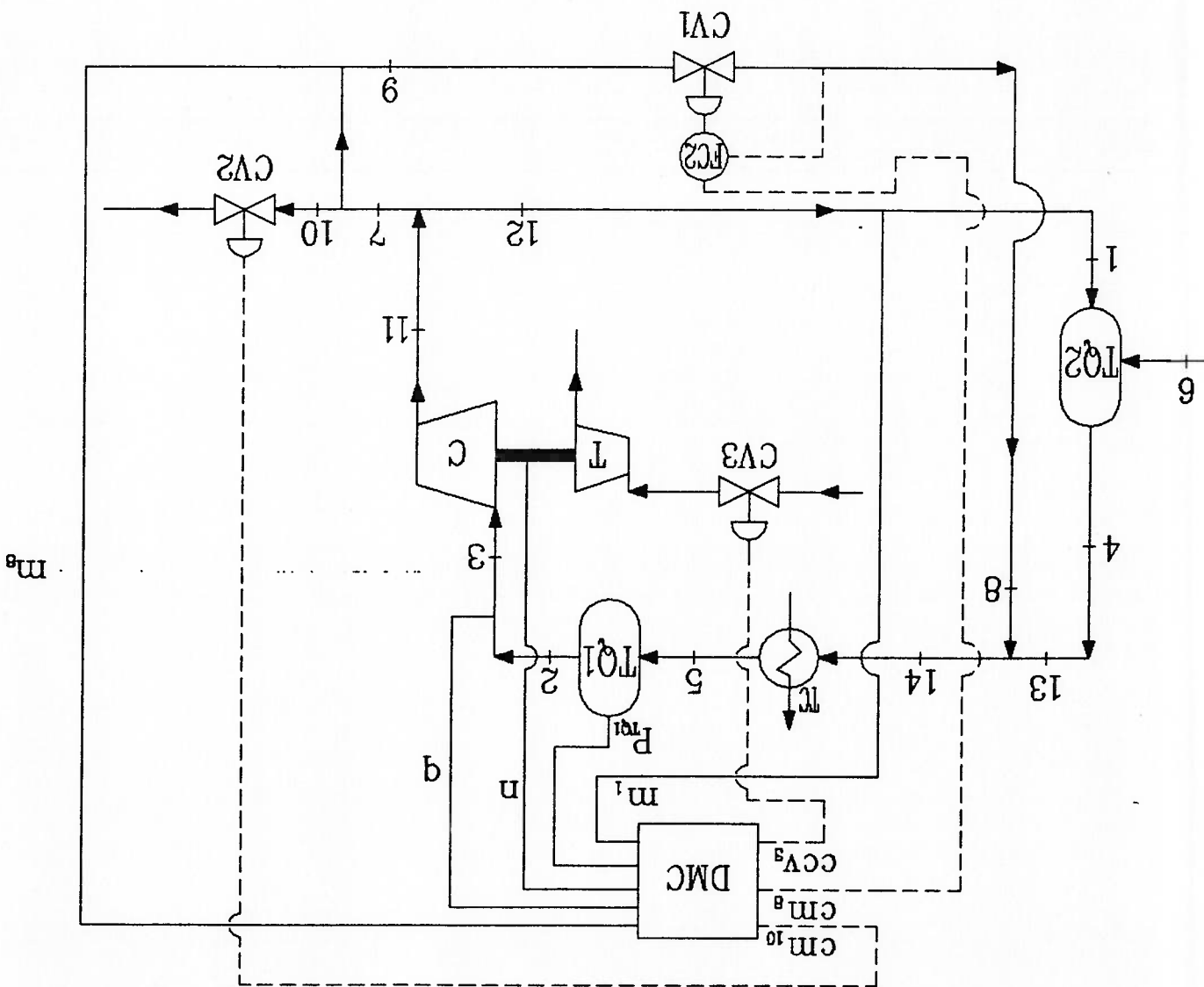
A submatriz de pesos dos erros das variáveis manipuladas é

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{w_8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{q/n} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{m_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_n \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

(Os elementos de \bar{Q} são zerados ou não conforme as restrições são ativas ou desativas.)

O esquema de controle do DMC na URC é mostrado na figura 4.6.

Figura 4.6 Esquema de controle DMC na URC



4.8 O MODELO DE CONVOLUÇÃO DISCRETA DA URC

O primeiro passo no levantamento do MCD da URC é a aplicação de degraus nas variáveis manipuladas. Adotando a consideração C5 da seção 4.2, a resposta da URC a variações combinadas das variáveis manipuladas é a soma das respostas a variações individuais das variáveis manipuladas. Além disso, a resposta a um degrau de amplitude arbitrária é proporcional a resposta a um degrau unitário. A relação de proporcionalidade é a amplitude do degrau aplicado.

Aplicamos um pulso na URC longo o suficiente para que a resposta atinja o regime permanente antes de seu final. Usando o programa CURC com as rotinas URC e PERTURBACAO simulamos a aplicação de pulsos de cada uma das variáveis manipuladas (cm^8 , ccv_3 , cm^{10}) na URC separadamente (listagens 4.1, 4.2, 4.3). Há variáveis controladas da URC que não atingem um regime permanente após a aplicação de um pulso. São variáveis que representam balanços de massa e energia na URC (por exemplo P^{101}). Então consideramos o intervalo de tempo da resposta válido para o levantamento do MCD como tendo a extensão necessária para todas as variáveis que atingem regime permanente fazerem-no.

Os pulsos aplicados são de amplitudes arbitrárias. A URC se encontra inicialmente na condição de operação normal. As variáveis controladas e manipuladas nas respostas obtidas estão na forma de variáveis físicas. É preciso colocá-las na forma de variáveis de perturbação para que a equação 4.11 possa ser aplicada no levantamento do MCD (condição C2 da seção 4.2). A condição C5 da seção 4.2 permite que sejam usados os valores das respostas obtidas, menos os valores das de operação normal para convertê-los na forma de variáveis de perturbação. No entanto, valores de a_1 e h_1 muito grandes ou muito pequenos e de ordens muito diferentes resultam neste caso. A consequência é uma matriz A mal condicionada ou o uso de dupla precisão. A última hipótese requer maior capacidade de memória do hardware onde o DMC é implantado. Para evitar estes problemas, aplicamos fatores de escala tanto nas variáveis controladas como nas manipuladas. O fator de escala das variáveis manipuladas é o inverso da amplitude do pulso aplicado em cada uma delas (figura 4.7). O fator de escala das variáveis controladas é o inverso da diferença entre o valor inicial em regime permanente e o final em regime permanente da variável (figura 4.8). Caso a variável não tenha regime permanente final, usamos a diferença entre o valor inicial e o valor medido no último instante considerado no levantamento do MCD.

onde y_1 = valor da variável controlada na forma de variável física, i instantes após o início do pulso;
 y_0 = valor da variável controlada na forma de variável física, quando a URC opera na condição normal em regime permanente (condição no início do pulso);

$$a_1 = \frac{y_1 - y_0}{y_1 - y_0} \quad (4.46)$$

Fazendo as transformações descritas, a_1 é o valor da variável controlada transformada, i instantes após o início do pulso:

Figura 4.8 Efeito do fator de escala em uma variável controlada

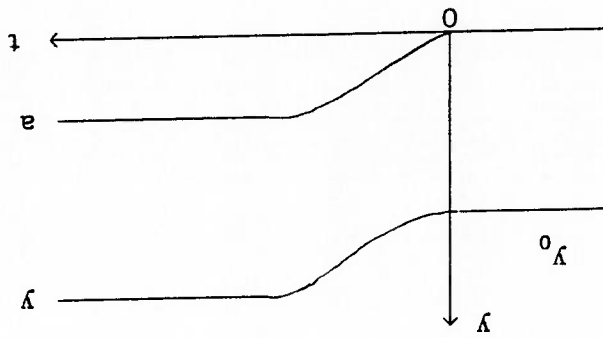
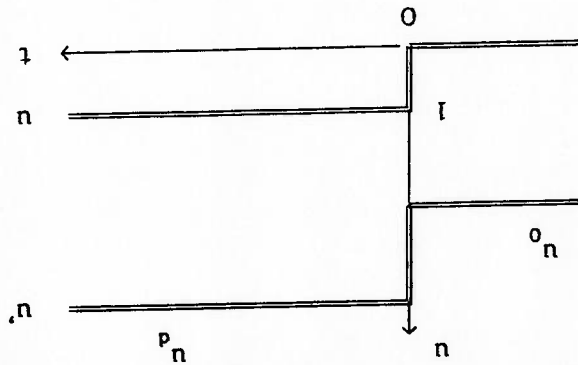


Figura 4.7 Efeito do fator de escala em uma variável manipulada



O programa GERAH constrói o MCD da URC (listagem 4.4). Ele lê os resultados das simulações de pulsos aplicados nas variáveis manipuladas ccv_j , cm_8 e cm_{10} (listagens 4.1 a 4.3). Para cada um dos pulsos aplicados, ele calcula os valores de $a_{c,m,i}$ e $h_{c,m,i}$, usando as equações 4.46 e 4.10. $a_{c,m,i}$ e $h_{c,m,i}$ são os coeficientes do MCD relativos à variável controlada c .

$$\Delta u^i = u^i - u^{i-1} = (u^i - u^{i-1}) (u^p - u^0) = \Delta u^i (u^p - u^0) \quad (4.48)$$

O DMC fornece na sua saída a variação dos valores das variáveis manipuladas.

u^p = valor da variável manipulada na forma de variável física, durante a aplicação do pulso para o levantamento do MCD.

u^0 = valor da variável manipulada na forma de variável física, quando a URC opera na condição normal, antes do início do pulso aplicado para o levantamento do MCD;

u^i = valor da variável manipulada na forma de variável física no instante i ;

onde u^i = valor da variável manipulada na forma transformada no instante i ;

$$u^i = u^i (u^p - u^0) + u^0 \quad (4.47)$$

O uso do MCD dado pela equação 4.46 é possível aplicando-se 4.46 nas variáveis controladas fornecidas ao DMC. Quando isto é feito, os valores das variáveis manipuladas gerados na saída do DMC estão na forma transformada. A transformação faz com que o pulso de amplitude arbitrária usado no levantamento do MCD seja convertido em pulso unitário (figura 4.7). Fazemos as variáveis manipuladas retornarem à forma de variável física usando

$$e \quad \begin{aligned} h^i &= a^i \\ h^i &= a^i - a^{i-1} \end{aligned}$$

Calculamos h^i pela equação 4.10:

y^r = valor da variável controlada na forma de variável física, quando a URC atinge a nova condição de regime permanente após o pulso.

variável manipulada m e instante i do horizonte do modelo.) A seguir ele monta as matrizes \bar{A} e \bar{H} (listagem 4.6). O período de amostragem T do MCD obtido é o mesmo usado na simulação dos pulsos.) A escolha de T é justificada na seção 4.12.)

O programa MONTA_A (listagem 4.5) monta a partir das submatrizes \bar{A} a matriz A , usada no DMC.

Nesta seção descrevemos o que faz e como funciona a rotina CONTROL (listagem 4.7). CONTROL simula um controlador digital programável. Cada vez que é chamada no programa CURC, CONTROL verifica se o instante de simulação é um instante de amostragem. Caso não seja um instante de amostragem, a rotina é encerrada e as variáveis manipuladas retornam ao programa sem modificação. Num instante de amostragem, a rotina inicia o cálculo dos novos valores das variáveis manipuladas. Portanto faz o papel de amostrador.

O primeiro procedimento no cálculo dos novos valores de u é verificar se a condição da URC relativa às restrições foi alterada desde a última amostragem. A rotina RESTRICA (seção 4.11) faz a verificação. Se há alteração, modifica convenientemente setpoints, gera um vetor para alterar os pesos em Q (YRESTR) e faz o sinal ESTADO = verdade para que seja recalculada a matriz pseudo-inversa (MATRIZ_K = primelras M linhas de $[(A^TQA+R)^{-1}A^TQ]$). A rotina GERA_K recalcula a MATRIZ_K. Após o que, CONTROL passa ao estágio seguinte. Se não há alteração, CONTROL passa diretamente ao estágio seguinte. Então CONTROL faz a conversão das variáveis controladas e setpoints da forma de variáveis físicas para a forma definida pela equação 4.46 (Y é YSP). A rotina CONV_Y converte as variáveis e faz a integração dos erros quadráticos integrals (ISE) (seção 4.12).

Y e YSP são entradas da rotina DMC que simula o algoritmo DMC. DMC calcula as variações das variáveis manipuladas ($DUT = \Delta u$). DUT precisa ser convertido à forma de variáveis físicas e adicionado ao valores anteriores das variáveis manipuladas, resultando nos seus novos valores. A rotina CONV_U faz a conversão, usando a equação 4.48; verifica a saturação das variáveis manipuladas, fornecendo o valor limite caso haja saturação e zerando os Δu^m relativos às variáveis saturadas, realimentados ao DMC (seção 4.5, propriedade P10); integra o movimento quadrático das variáveis manipuladas MOV_MAN (seção 4.12). DUT fica armazenado na memória para ser fornecido à rotina DMC na amostragem seguinte.

CONTROL repete o procedimento descrito para todos os instantes de amostragem. Quando o programa CURC termina a simulação, a rotina CONTROL grava um arquivo contendo o valor dos parâmetros do DMC usados na simulação e os valores finais de ISE e MOV_MAN. A rotina GRAVA_DMC faz a gravação num arquivo cujo nome é escolhido em OPERADOR.

CONTROL está contida na unidade U_CONTROL, que, além de implementar CONTROL, inicializa os parâmetros, variáveis e fatores: Y , Δu (DUT), α (ALFA), Q , R , YRESTR, ESCLY e $Y0$ (fatores de conversão de Y), ESCLU (fatores de conversão de DUT).

A rotina DMC (listagem 4.8) simula o algoritmo DMC. DMC recebe da rotina CONTROLE: os valores convertidos das variáveis controladas, vetor Y; os valores convertidos dos setpoints, vetor YSP; o número de variáveis controladas, C; o número de variáveis manipuladas, M; a matriz pseudo-inversa, controladas, C; a variação dos valores das variáveis manipuladas na amostragem, MATRIX_K; a variação dos valores das variáveis manipuladas na amostragem anterior, DUT, devidamente modificados pela rotina CONV_U para levar em conta a saturação das variáveis manipuladas. DMC devolve à rotina controle o valor de DUT recalculado pelo algoritmo DMC. Além dos dados que recebe da rotina CONTROLE, DMC recebe da unidade VAR_DMC os valores: do número de instantes de amostragem usados pelo MCD, N_INST. A rotina DMC está contida na unidade U_DMC.

Inicialmente DMC atualiza e: DUT, Y, YSP são usados na atualização. Os valores contidos em DUT, que representam a ação de controle anterior, são passados à DUA. A rotina ATUAL_E encarrega-se da atualização de e: ATUAL_E recebe Y, YSP, DUA, C e M. Devolve a matriz de erros previstos E (=e') atualizada à rotina DMC. Finalmente DMC multiplica E por MATRIX_K, obtendo o vetor de variações das variáveis manipuladas DUT a ser aplicado no instante de amostragem.

A atualização de e em ATUAL_E começa pelo cálculo de $E_k (=e^k)$.
 $E_k = YSP - Y = y^{spk} - y^k$

Em seguida ATUAL_E atualiza $du[-i] = \Delta u^{k-1}$ [i = 1, ..., N-1], fazendo

$$du[-i] = du[-i+1]$$

$$e \quad du[-1] = DUA.$$

Calcula $(1-\alpha)^k e^k = I_{-alfa}[j]$ EK [j = 1, ..., R]. Calcula $\bar{P}_j = P[j]$ [j=1, ..., R].

$$\bar{P}_j = \bar{P}_{j-1} + \sum_{i=j+1}^N \bar{H}_{i-1}^{-1} \Delta u^{k-1} \quad [j = 1, \dots, R],$$

sendo $P_0 = 0$.

$$P[j] = P[j-1] + S(H[i]) du[j-i] \quad [i=j+1, \dots, N].$$

(4.49)

(A equação 4.49 é uma forma da equação 4.19.1 que permite o cálculo iterativo de P_j . Esta forma é mais adequada para programar em computador.)
Calcula $(I - \alpha^j) e_k - P_j = I_{\text{alfaxe}} k - P_j$. Finalmente $ATVAL_E$ monta a matriz $e^j = E$ e passa E à rotina DMC.

A rotina RESTRICAÇÃO implementa restrições de valores máximos e mínimos nas variáveis controladas e manipuladas (listagem 4.7). RESTRICAÇÃO recebe da rotina CONTROLE: o vetor dos valores das variáveis controladas, manipuladas e setpoints (vetor V); e o vetor que indica a condição de restrições ativas na amostragem anterior (vetor RESTR). E devolve: o vetor V com os setpoints atualizados de acordo com as restrições ativas; o vetor RESTR atualizado; o vetor YRESTR, de modificação da matriz de pesos das variáveis controladas Q, atualizado; a variável ESTADO, que indica se a MATRIZ_K deve ser ou não recalculada, atualizada.

RESTRICAÇÃO inicia armazenando os valores de RESTR no vetor RESTR_ANT. Em seguida, verifica se cada uma das restrições foi ou deixou de ser violada no instante de amostragem. Altera os setpoints das variáveis controladas conforme descrito na seção 4.7. Altera os termos correspondentes às variáveis com restrições ativas ou desativadas do vetor RESTR. Compara RESTR atualizada com RESTR_ANT, elemento por elemento. Se um ou mais elementos diferem, faz ESTADO = verdade. (ESTADO = verdade ativa a rotina GERA_K.) Finalmente, RESTRICAÇÃO calcula YRESTR a partir de RESTR. YRESTR é um vetor de zeros e uns. Os elementos correspondentes às restrições ativas têm valor 1. Os elementos correspondentes às restrições não ativas têm valor zero.

Se ESTADO = verdade, GERA_K é executada, GERA_K monta as matrizes R e Q (MATRIZ_R e MATRIZ_Q) e calcula MATRIZ_K. Os elementos de Q são multiplicados pelos elementos de YRESTR, zerando os pesos das variáveis cujas restrições não estão ativas.

Inicialmente fazemos o ajuste dos parâmetros do DMC pelo critério do erro quadrático integral ISE e pelo movimento das variáveis manipuladas MOV.

$$ISE = \int (y^{sp} - y)^2 dt$$

$$ISE = \sum (y^{spk} - y_k)^2 \Delta t$$

ou na forma discreta.

$$MOV = \int du^2 dt$$

$$MOV = \sum \Delta u^2 \Delta t$$

(4.51)

O ISE indica o afastamento das variáveis controladas dos setpoints durante os

transitórios. MOV indica o esforço de controle necessário para obter este afastamento. Fazemos o ajuste final do DMC considerando as limitações físicas da URC.

Os primeiros parâmetros escolhidos do DMC são o número de instantes

amostrados do MCD e o intervalo de amostragem. Supondo que a instrumentação usada no levantamento do MCD tenha precisão adequada, adotamos

$$T = 5 \text{ s (intervalo de amostragem).}$$

A escolha de N é feita com base nas listagens 4.1 a 4.3 e no critério descrito na seção 4.8. A última variável a estabilizar-se é m_1 , 130 segundos após um degraú de ccv3.

$$N = 130/5 = 26.$$

De acordo com as sugestões do final da seção 4.6, adotamos

$$Q = 1,$$

$$R \approx N/2 \approx 10 \text{ (inicialmente)}$$

L = 1 (inicialmente).

Inicialmente escolhemos

R = 1

e $\alpha = 0,5 \times I$.

Fazendo algumas simulações com o DMC com os parâmetros acima, verificamos que um degrau de setpoint de P_{Tqi} provoca o maior transiente na URC. Aplicamos um degrau de setpoint de P_{Tqi} na URC controlada pelo DMC com diferentes valores de R e L. Levantamos ISE e MOV para cada par de R e L (tabela 4.1).

R	L	ISE	MOV
10	1	172	20
10	3	164	8,1
10	5	165	7,9
10	7	165	7,9
10	3	190	5
5	1	187	6,3

Tabela 4.1 Valores de ISE e MOV para degraus de 10% no setpoint de P_{Tqi} (tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5 I$; R = 1; Q = 1)

A variação de ISE com R e L é pequena (figura 4.9). MOV é menor para R = 5 e L = 3. Selecionamos esta combinação de R e L, porque apresenta menor MOV e exige menor capacidade do hardware onde é instalado o algoritmo, tornando sua execução mais rápida.

Fazemos simulações com R = 5 e L = 3, variando α (tabela 4.2). A variação de MOV e ISE com α é pequena, exceto para $\alpha = 0,8 I$. Escolho $\alpha = 0,5 I$.

Tabela 4.2 Valores de ISE e MOV (degrau de 10% no setpoint de P_{T01} : tempo de simulação 1200s; R = 5; L = 3; R = 3; I; Q = I)

α	ISE	MOV
0,5 I	190	5
0,2 I	177	6,2
0,0 I	175	6,6
0,8 I	254	2,1

A variação da rotação do compressor, n , é muito rápida (figura 4.10). Aumentamos o fator de supressão de movimento de n , r^{cv3} , para 20, mantendo os outros elementos de R com valor 1. Obtemos uma resposta satisfatória (figura 4.11). (Outras combinações de elementos da matriz R não apresentaram resultados melhores.)

Testamos o DMC com os parâmetros selecionados aplicando transitórios de f , m_6 e de setpoint de q/n (figuras 4.12, 4.13 e 4.14). A resposta é satisfatória em todos os transitórios. Finalmente verificamos a capacidade do controlador com DMC de lidar com restrições. Aplicamos degraus que levam a URC a estados com restrições ativas (figuras 4.15, 4.16 e 4.17). O DMC consegue evitar que a URC viole todas as restrições.

setpoint de P_{T01} : tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $I = R = 1$; $Q = 1$)

Figura 4.9 — $R = 5$ e $L = 1$ ————— $R = 10$ e $L = 1$ (degrau de 10% no

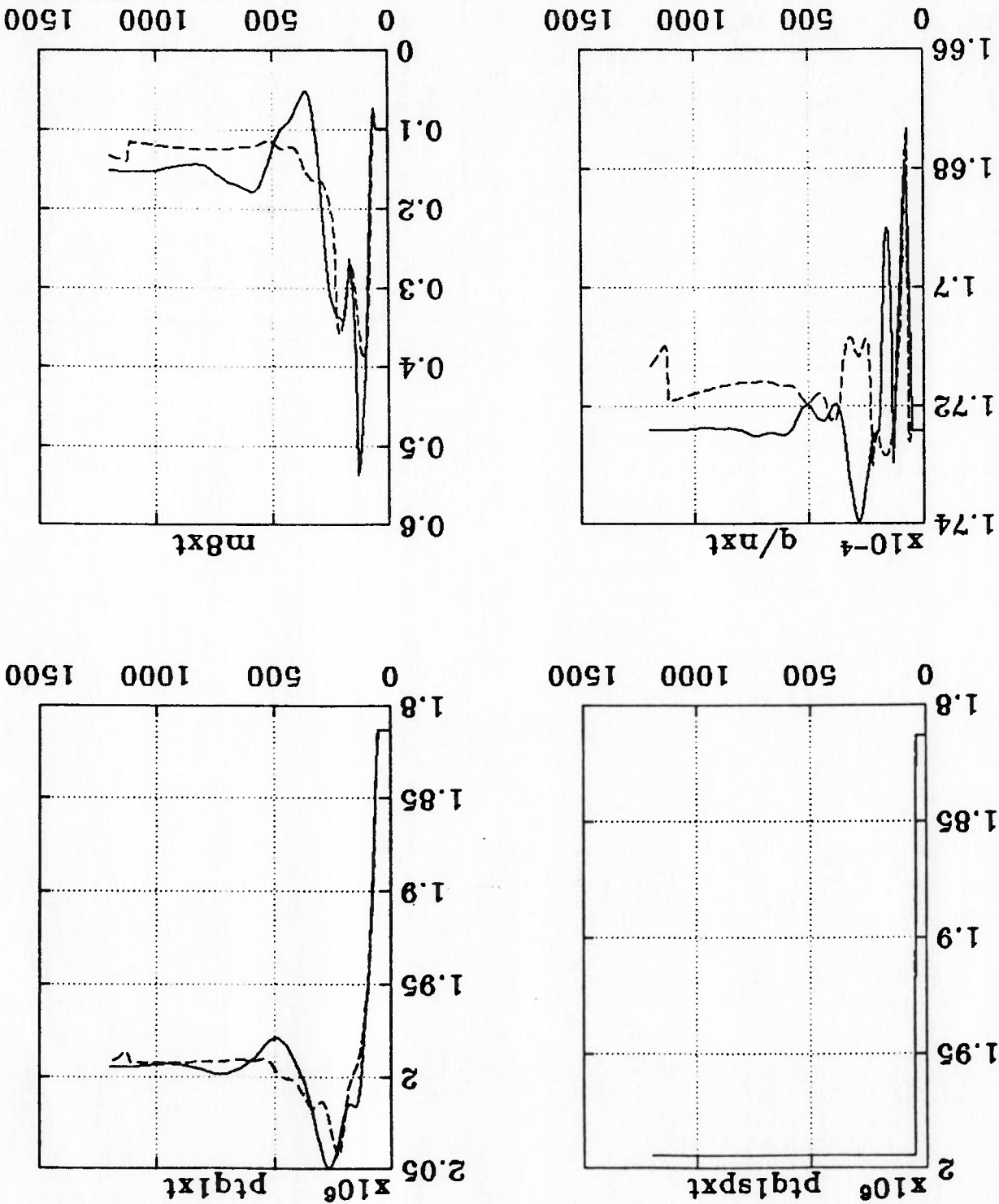


Figura 4.9 — R = 5 e L = 1 — R = 10 e L = 1 (degrau de 10% no setpoint de P_{TQ1} ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0.5$; R = I; Q = I) — continuação

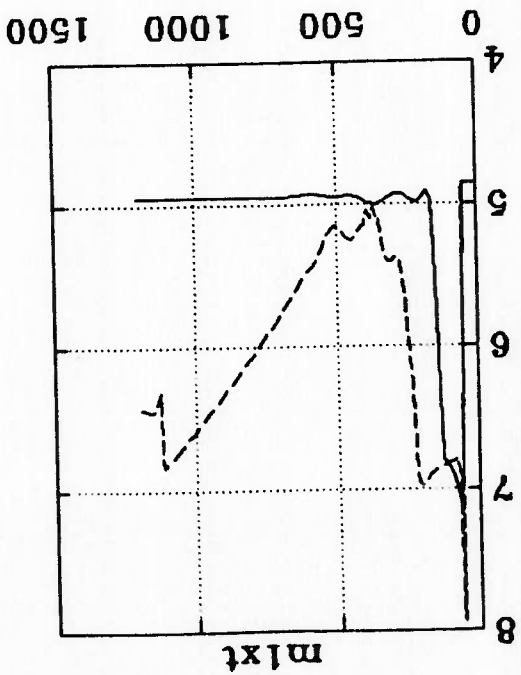
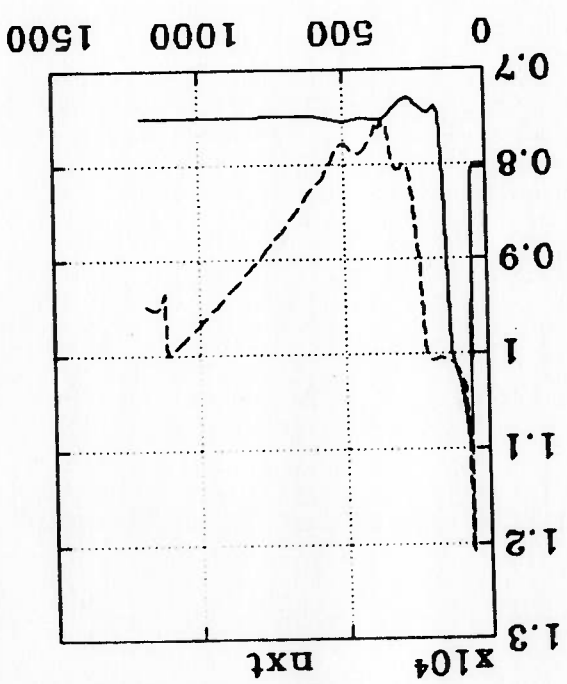
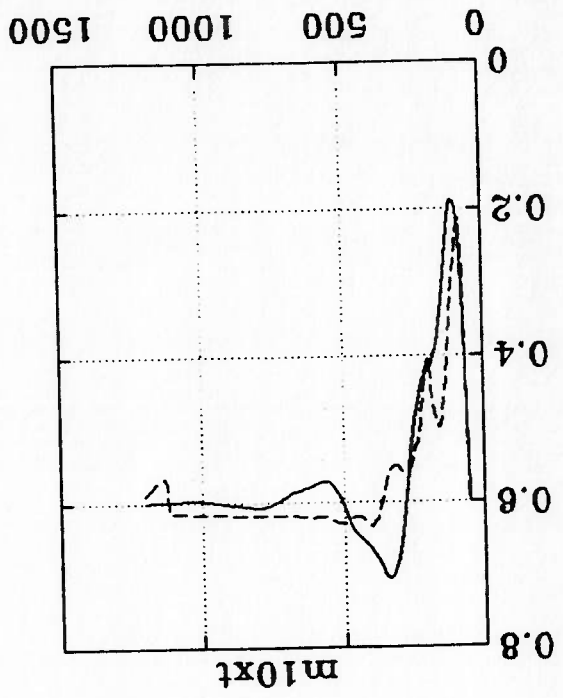
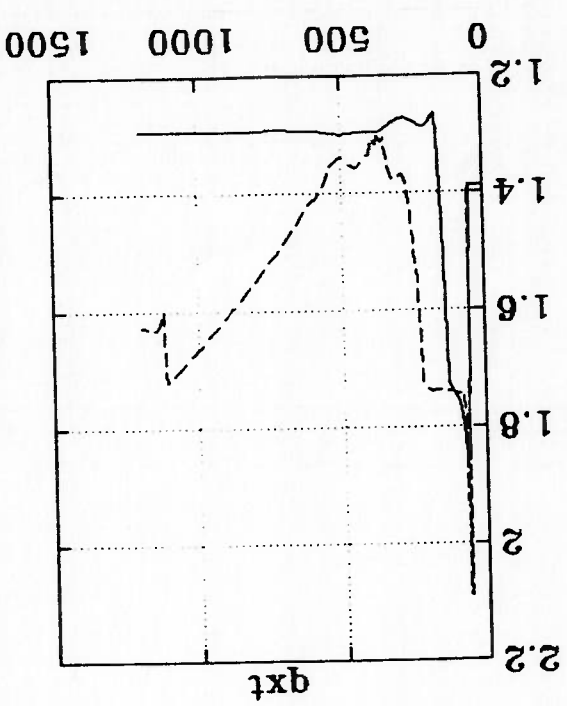


Figura 4.10 — $\alpha = 0,5$ I — $\alpha = 0,0$ I (degrau de 10% no setpoint de P_{T01} ; tempo de simulação 1200s; R = 5; L = 3; R = 1; Q = 1)

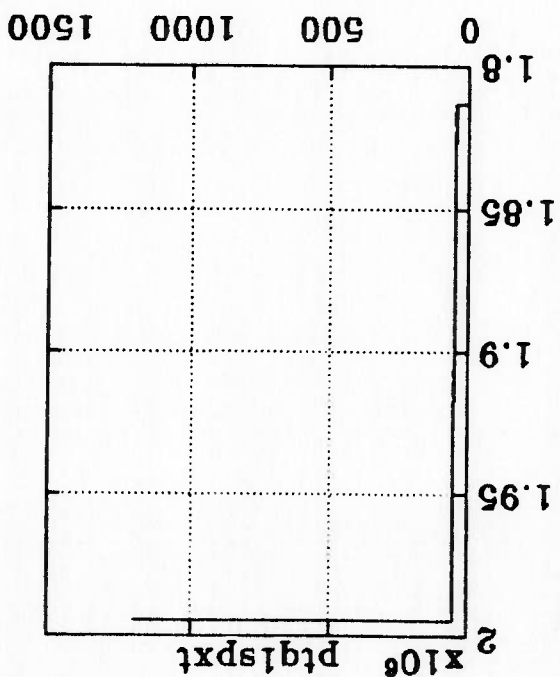
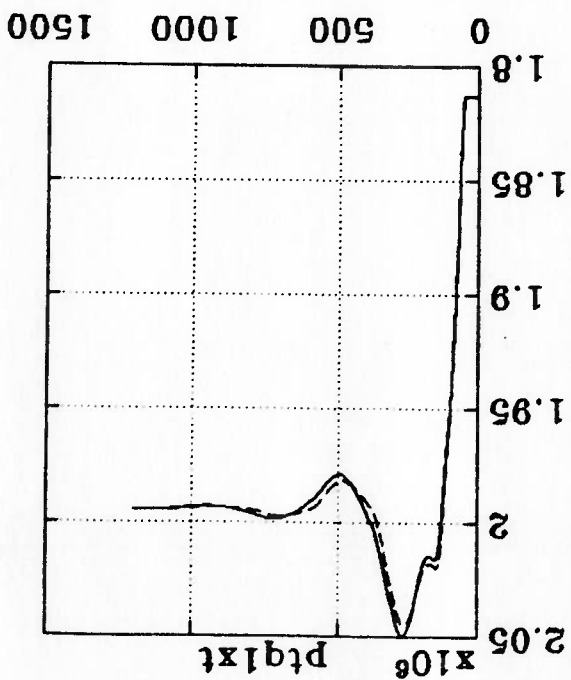
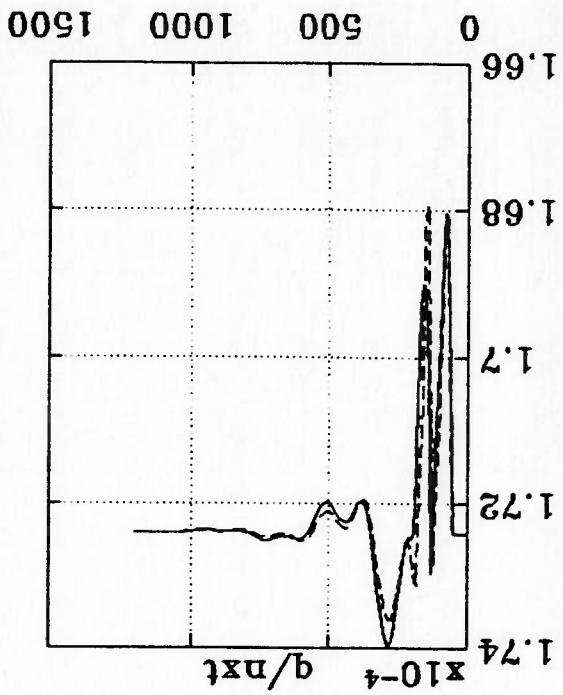
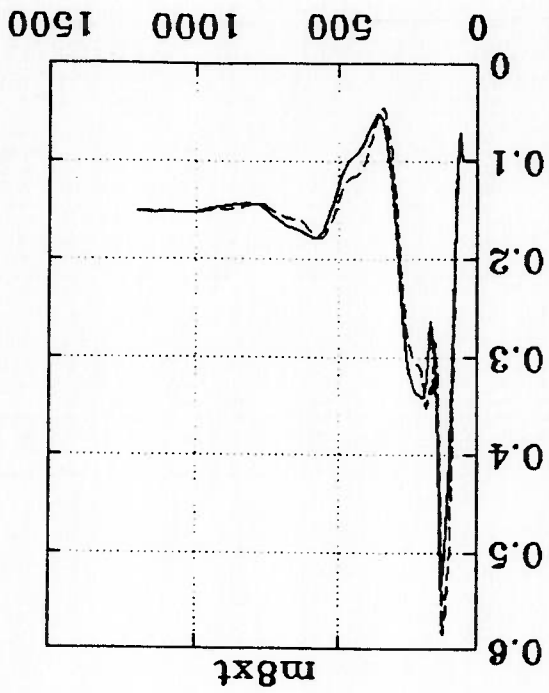


Figura 4.10 — $\alpha = 0,5$ I — $\alpha = 0,0$ I (degrau de 10% no setpoint de P_{T01} ; tempo de simulação 1200s; R = 5; L = 3; R = 3; Q = 1) continuação

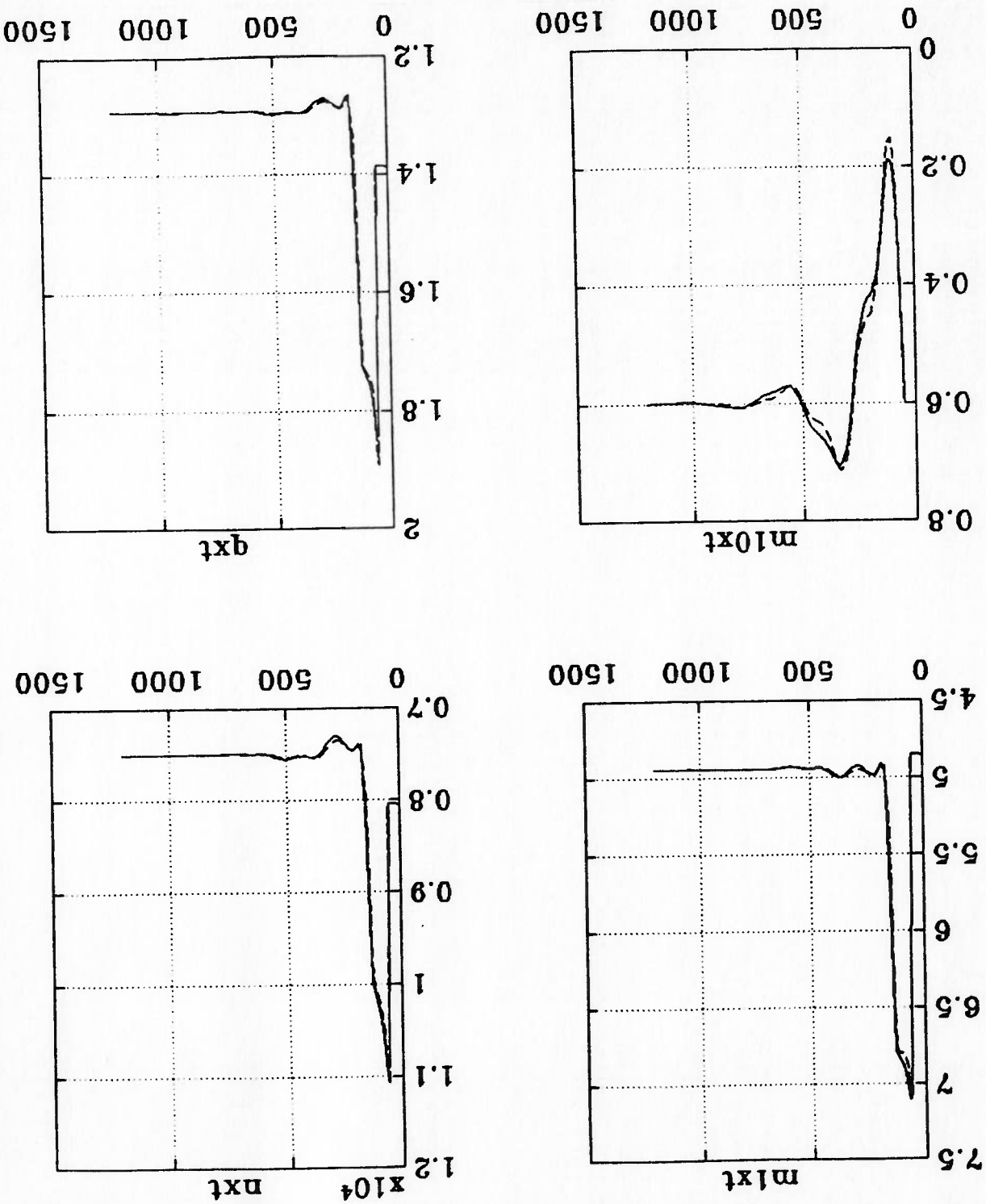


Figura 4.11 — $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; $R=1$; degrau de 10% no setpoint de P_{TQ1} ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$ I; $Q = 1$.

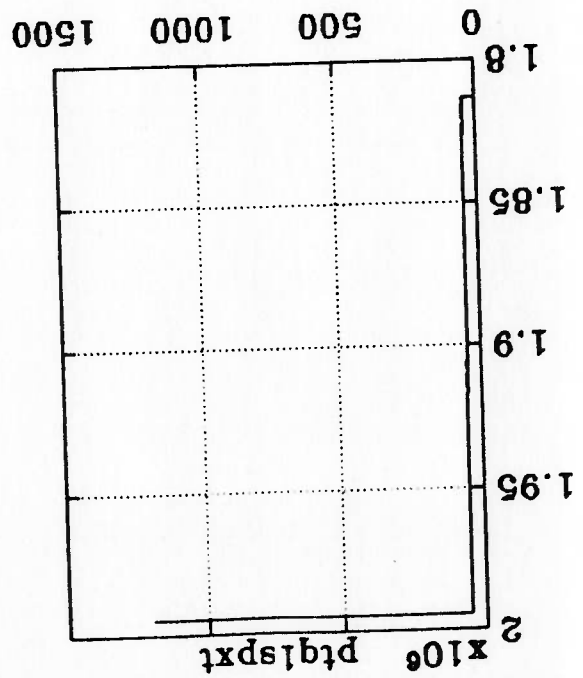
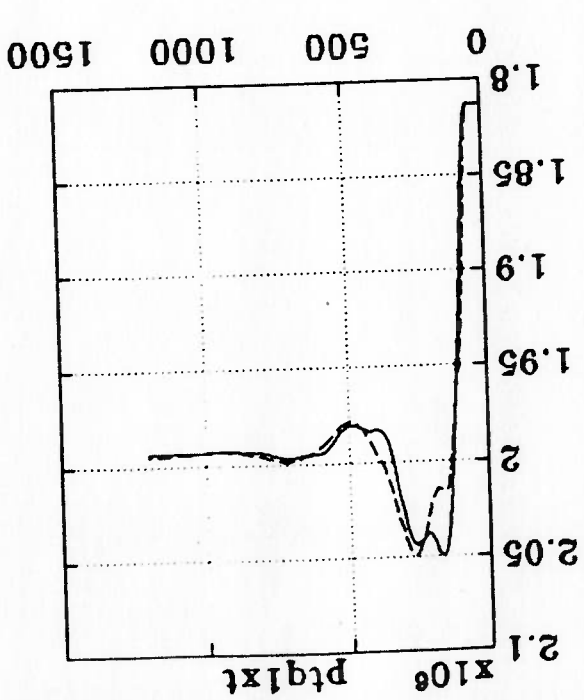
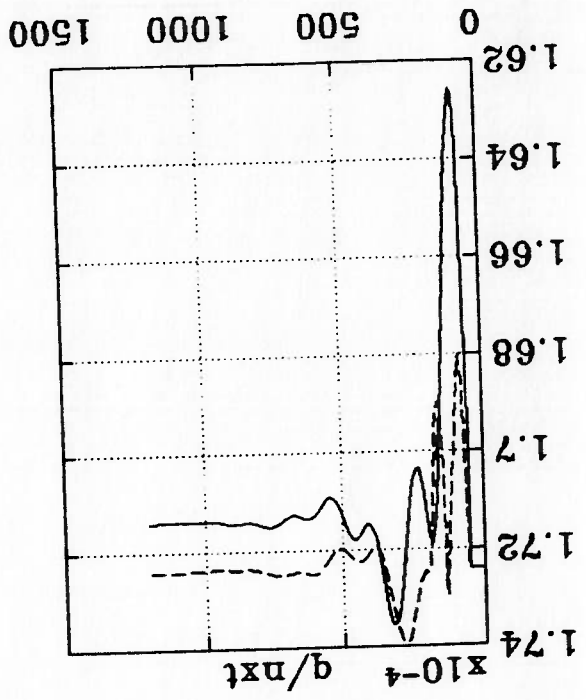
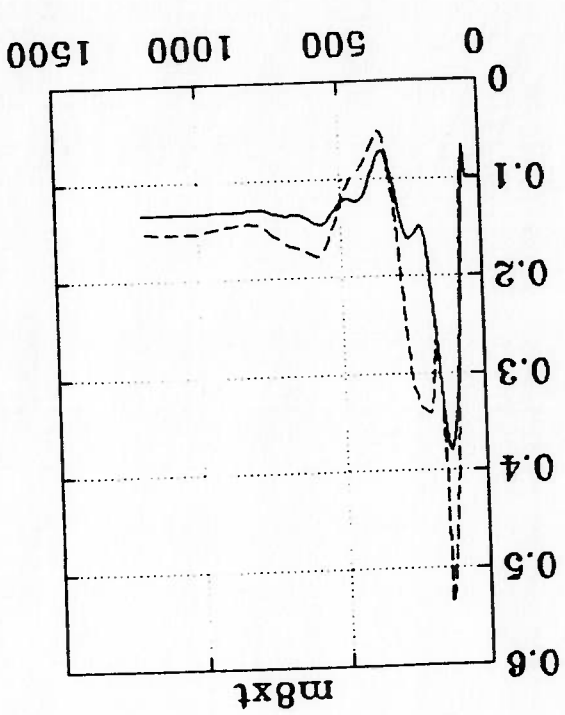


Figura 4.11 — $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; — — — — — $R=I$; degrau de 10% no setpoint de P_{T01} ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$ I; $Q = I$. continuação

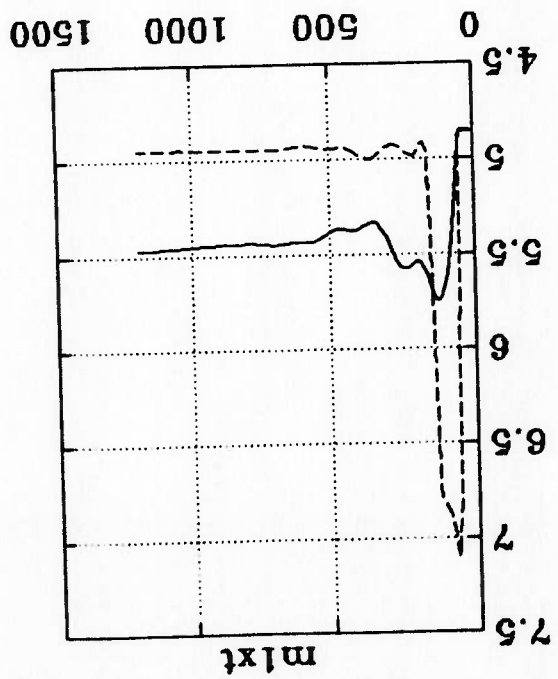
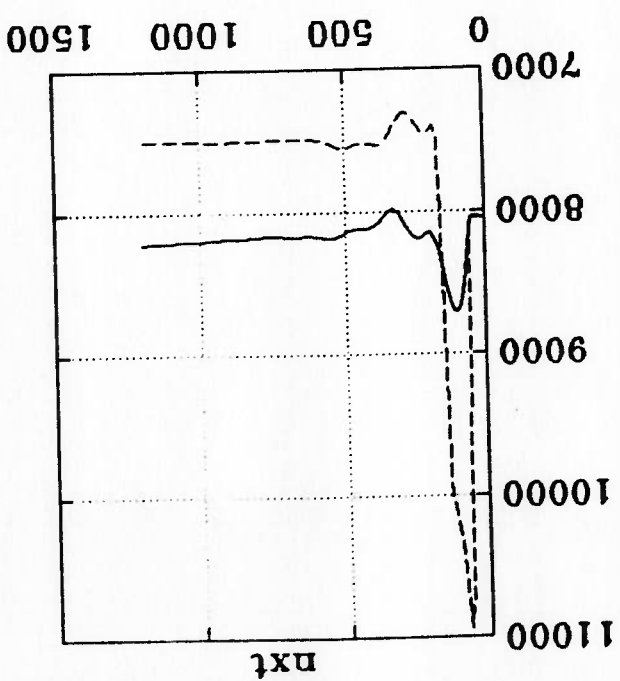
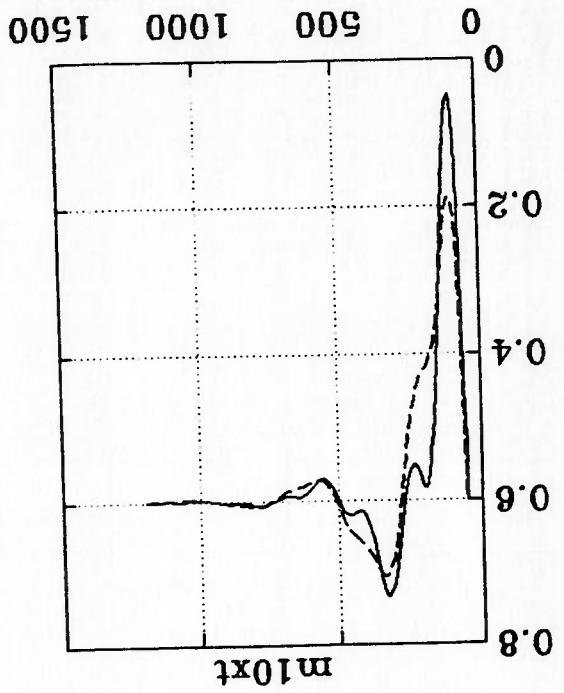
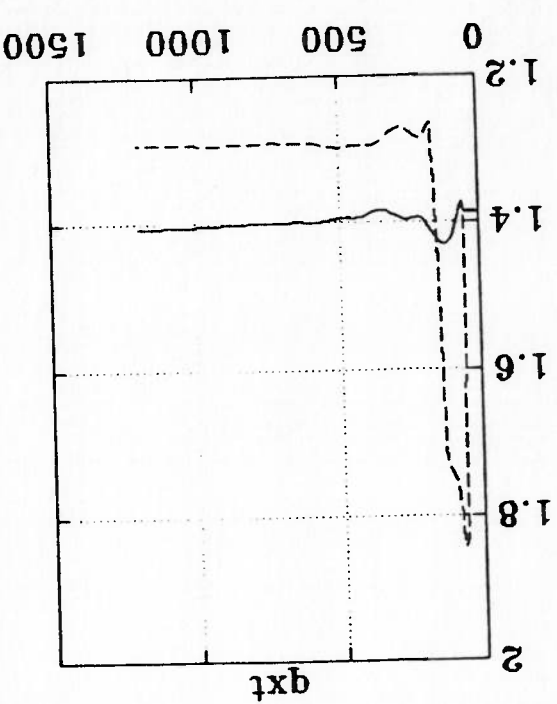


Figura 4.12 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de -10% em m_6 ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $\theta = 1$.

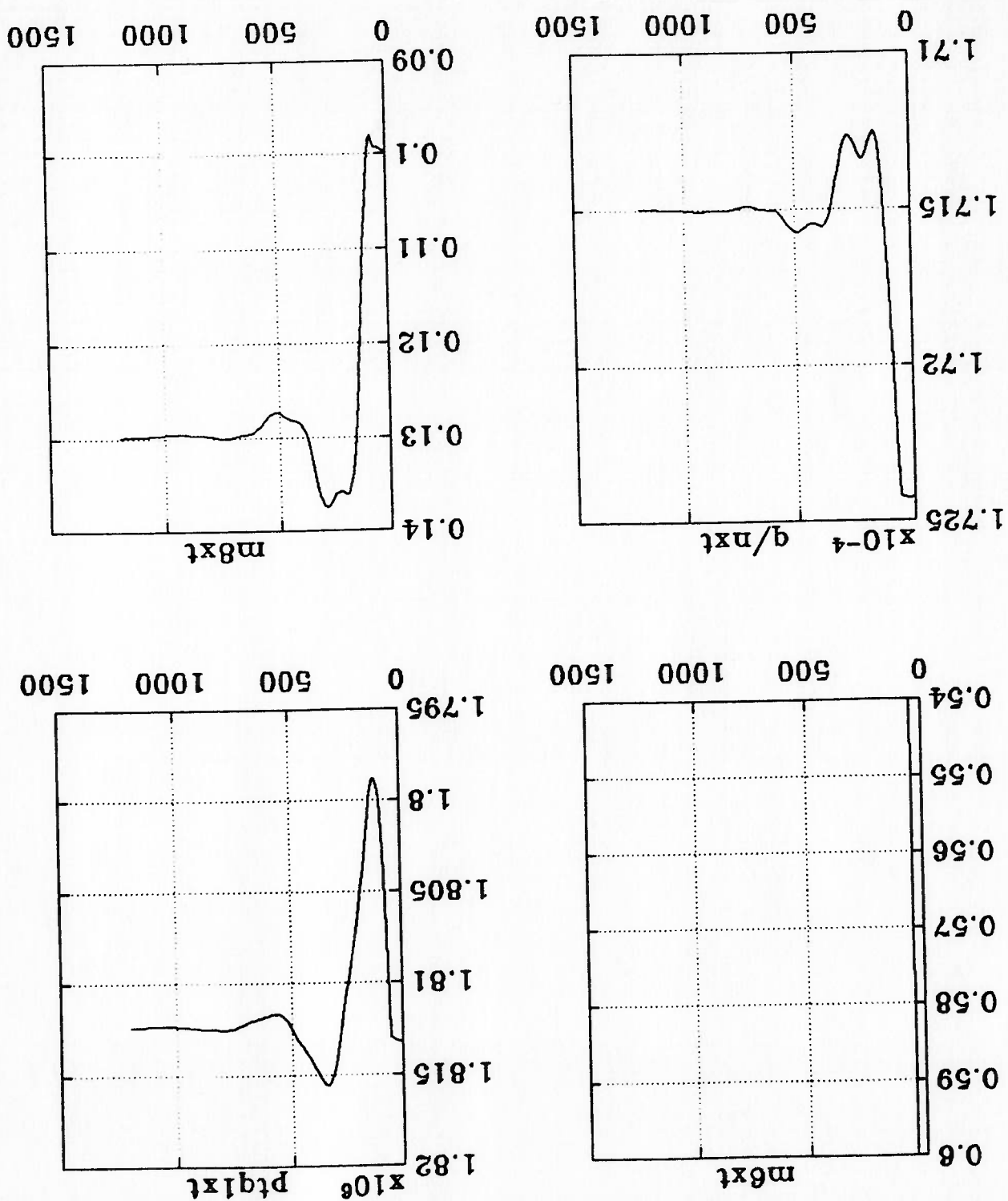


Figura 4.12 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de -10% em m_6 ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $\beta = 1$; $\theta = 1$; continuação

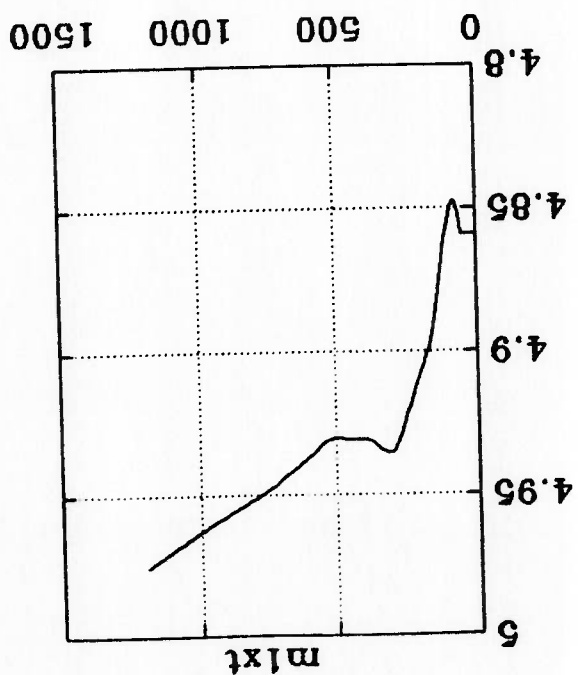
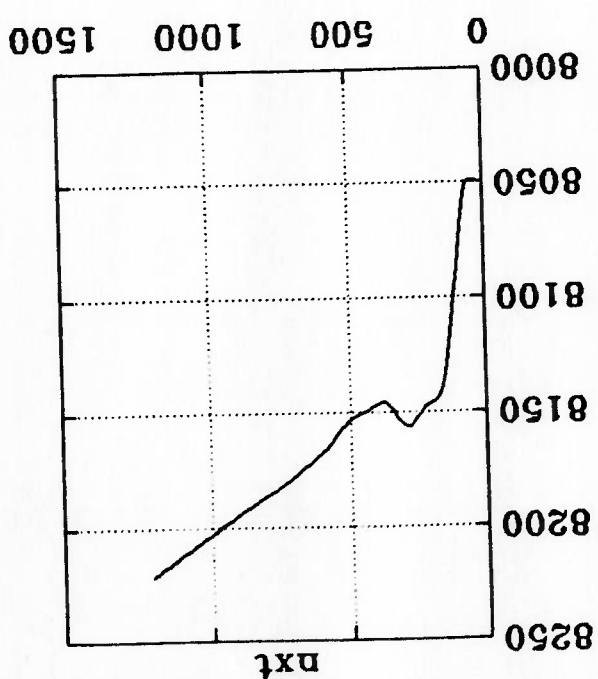
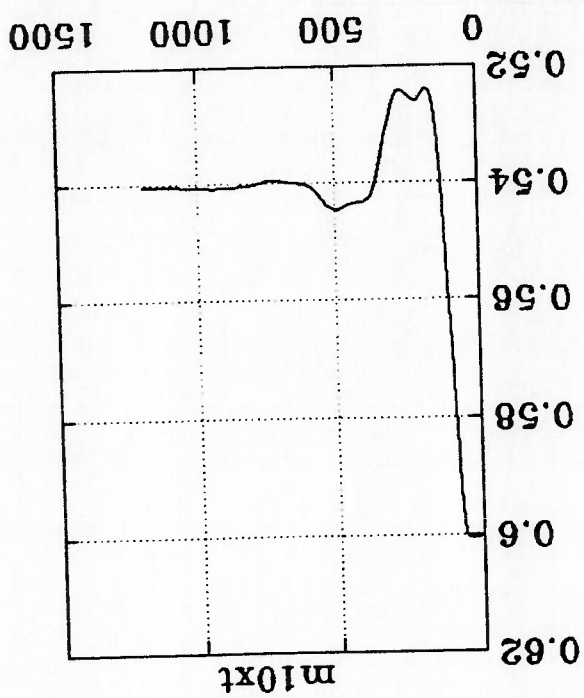
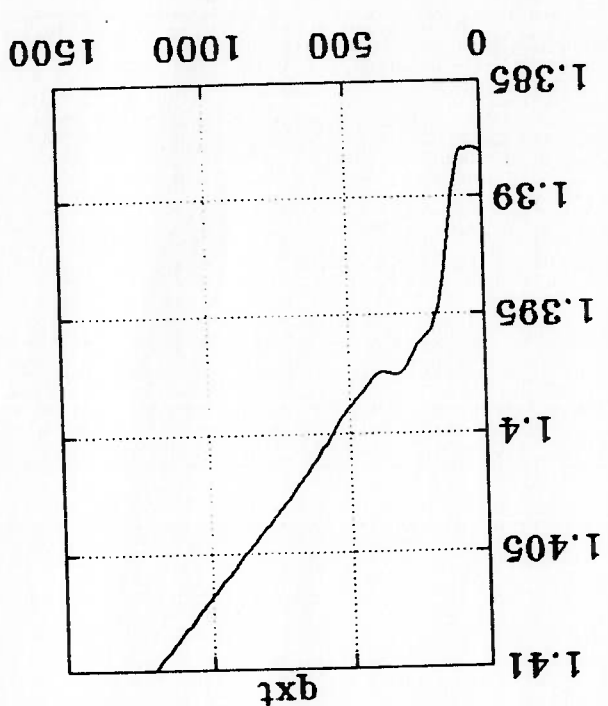


Figura 4.13 $r_{cm10} = 1$; $r_{cv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de 10% no setpoint de q/n ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $I_Q = 1$.

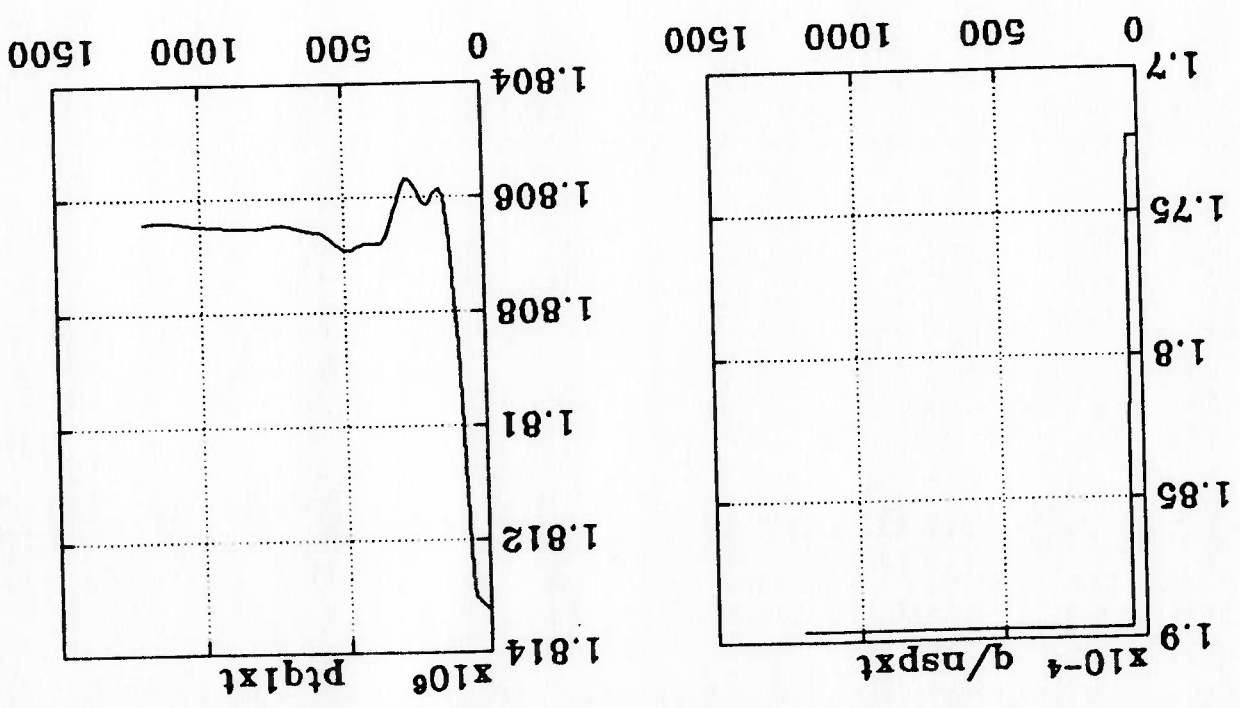
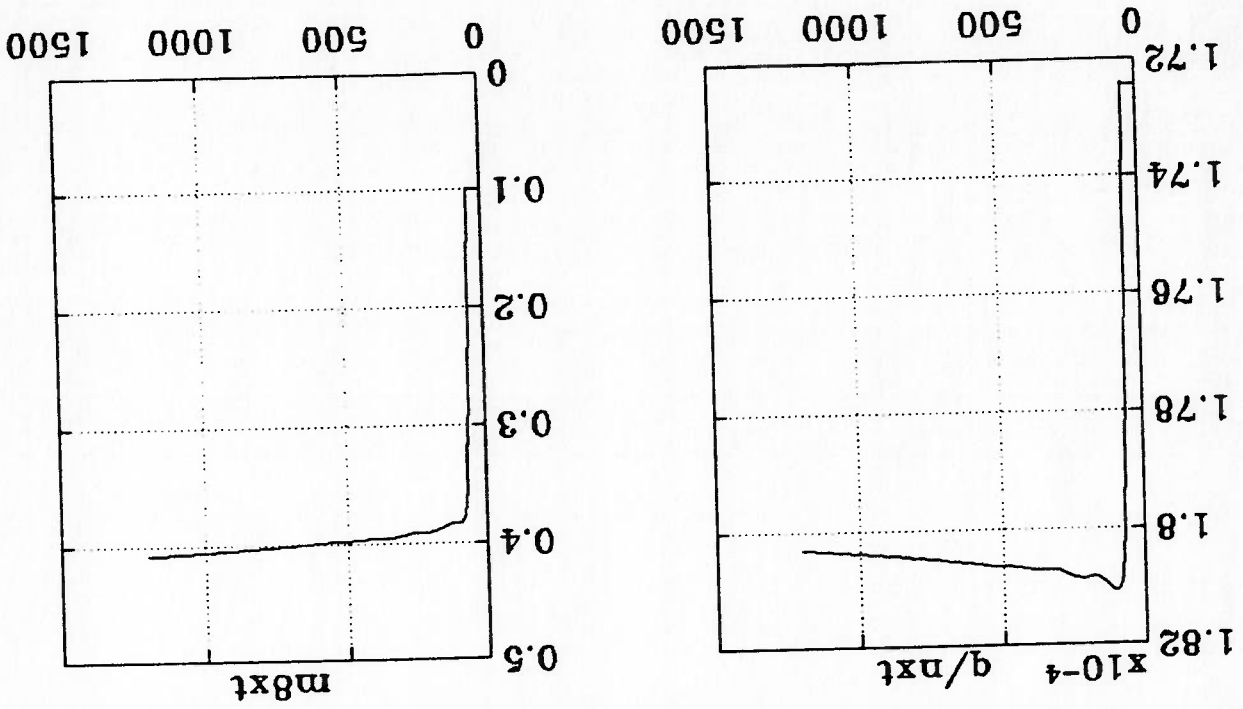


Figura 4.13 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de 10% no setpoint de q/n ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $I; Q = 1$, continuação

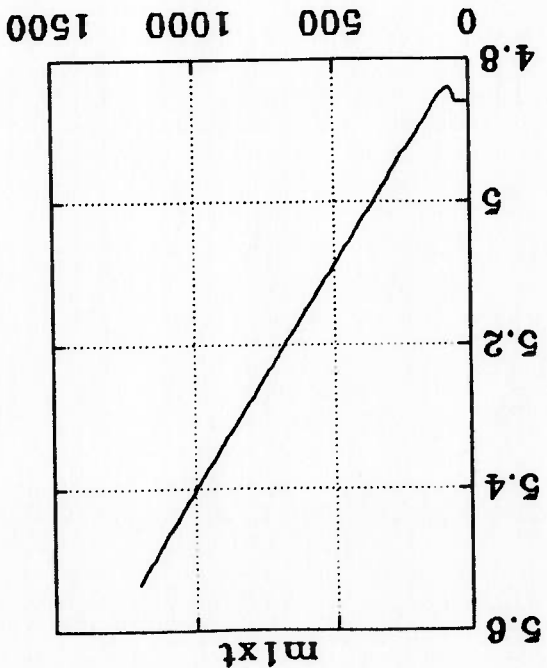
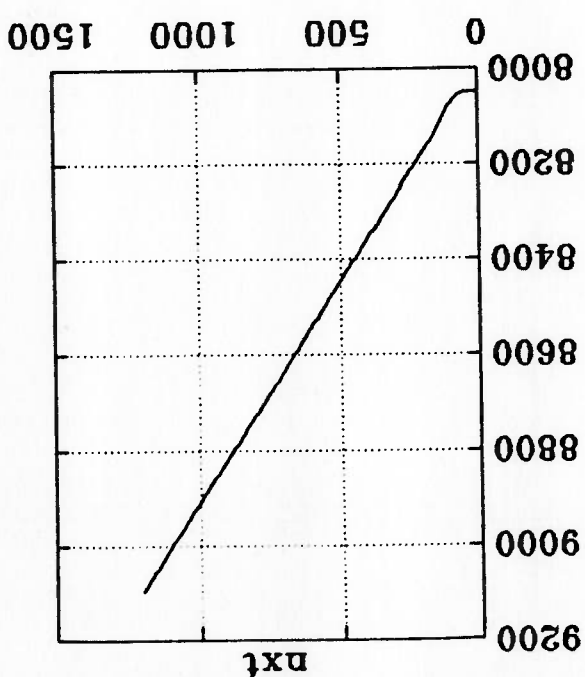
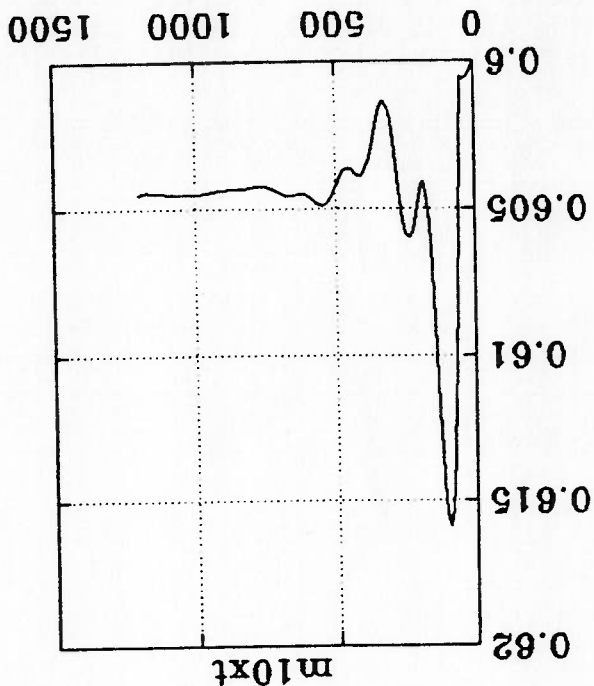
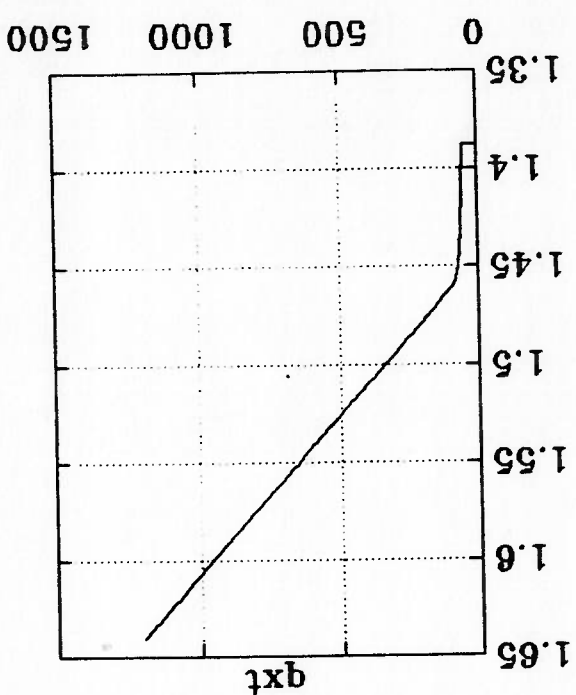


Figura 4.14 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de -10% em t ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $Q = 1$.

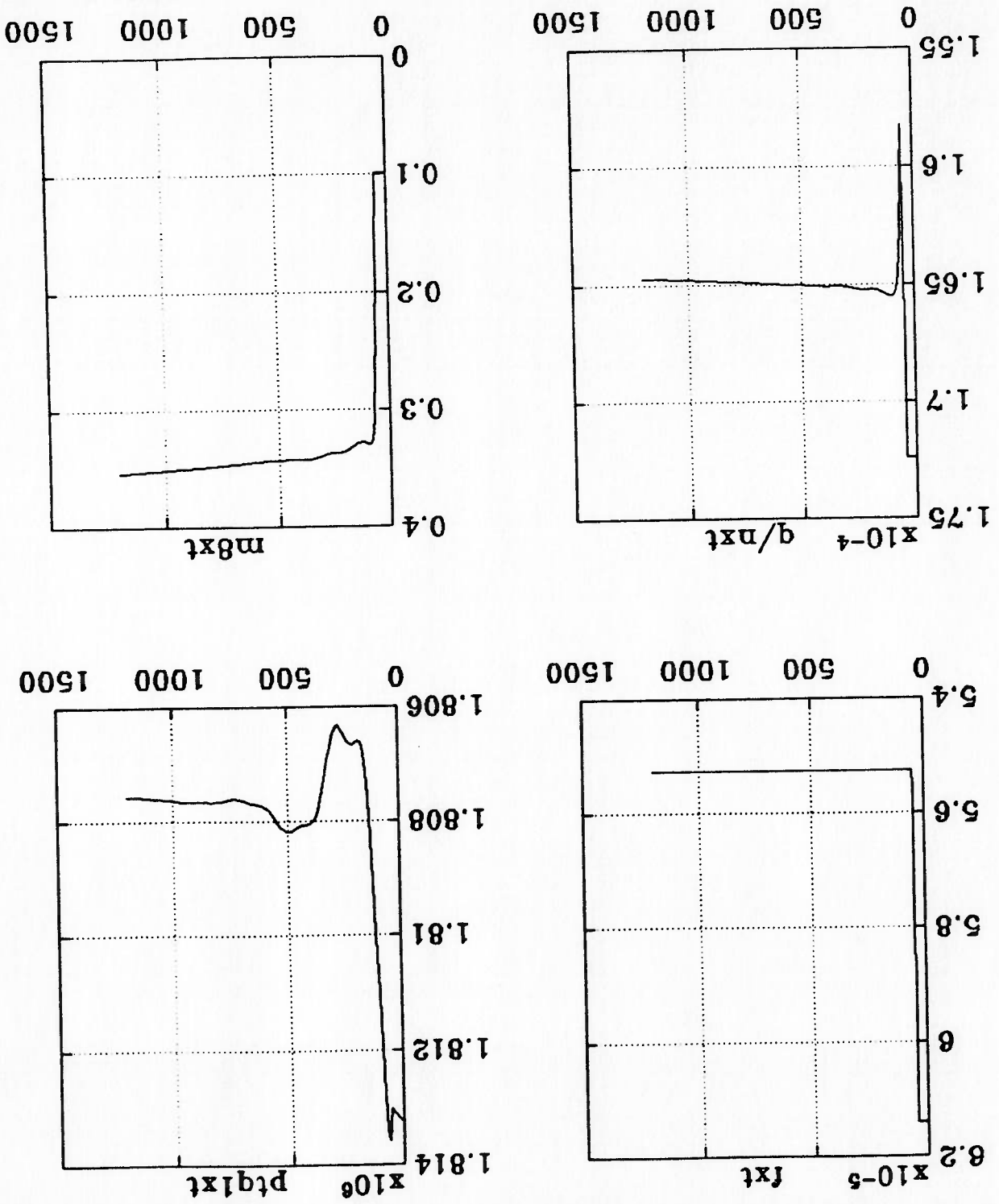


Figura 4.14 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degraú de -10% em t ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $I_0 = 1$; $Q = 1$; continuação

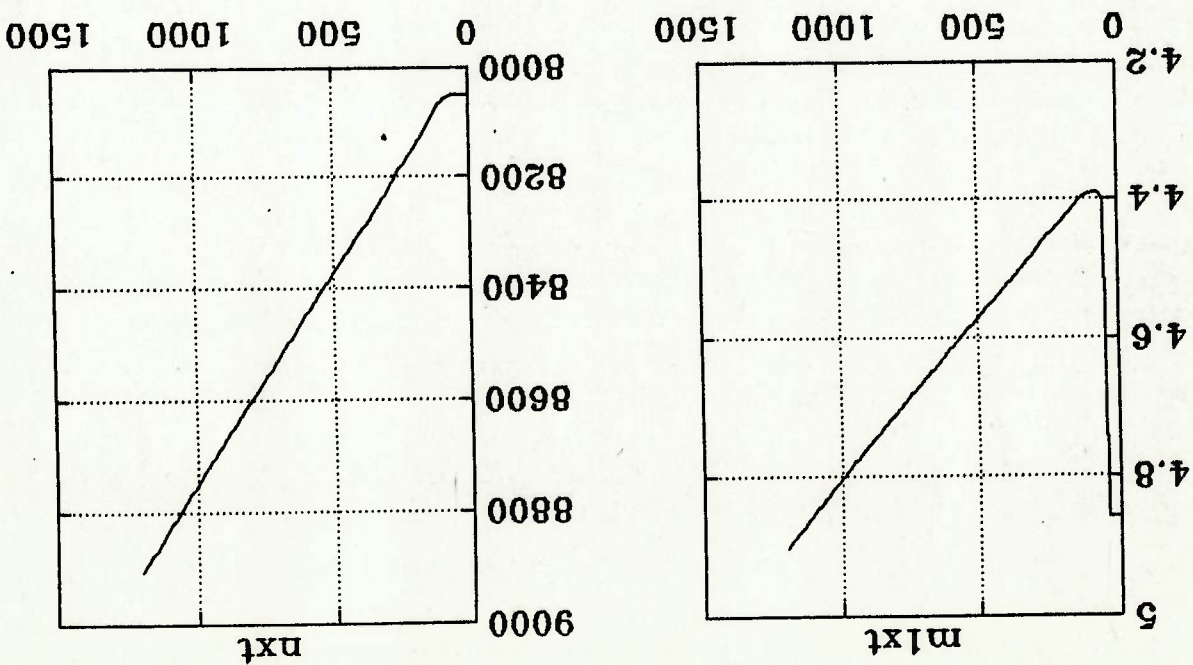
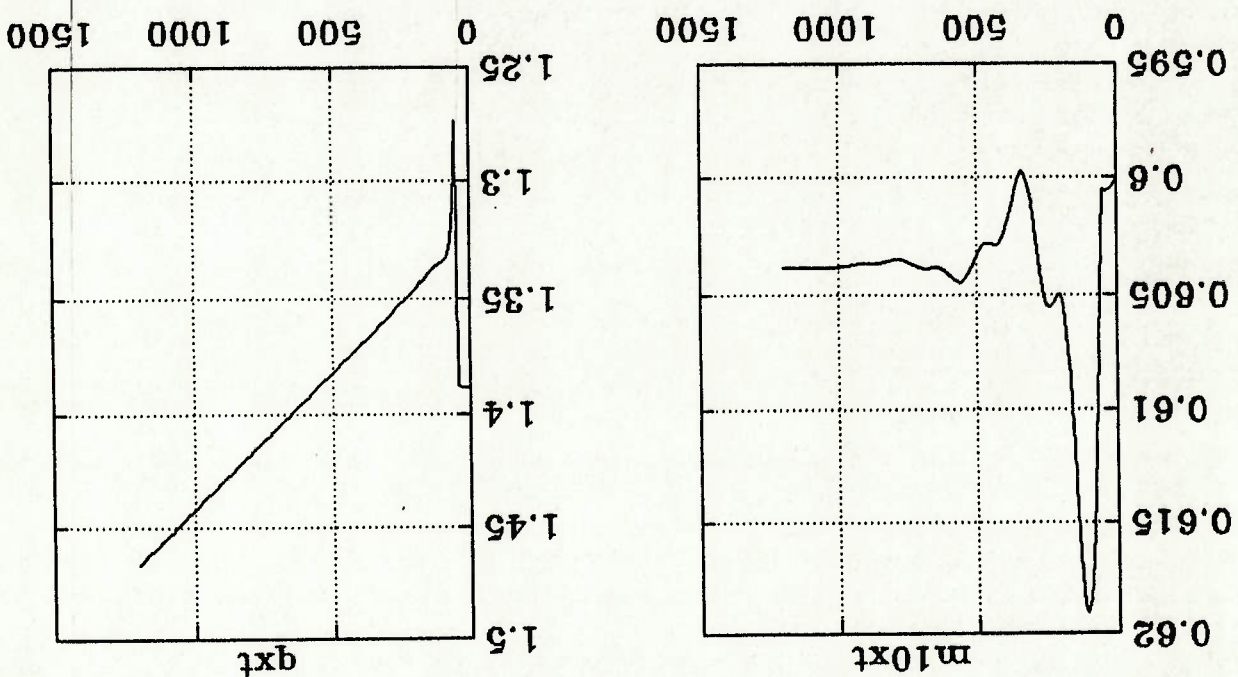


Figura 4.15 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degraú de -25% em t ; tempo de simulaçãú 1200s; $\alpha = 0,5$; $\theta = 1$; ocorrência de surge.

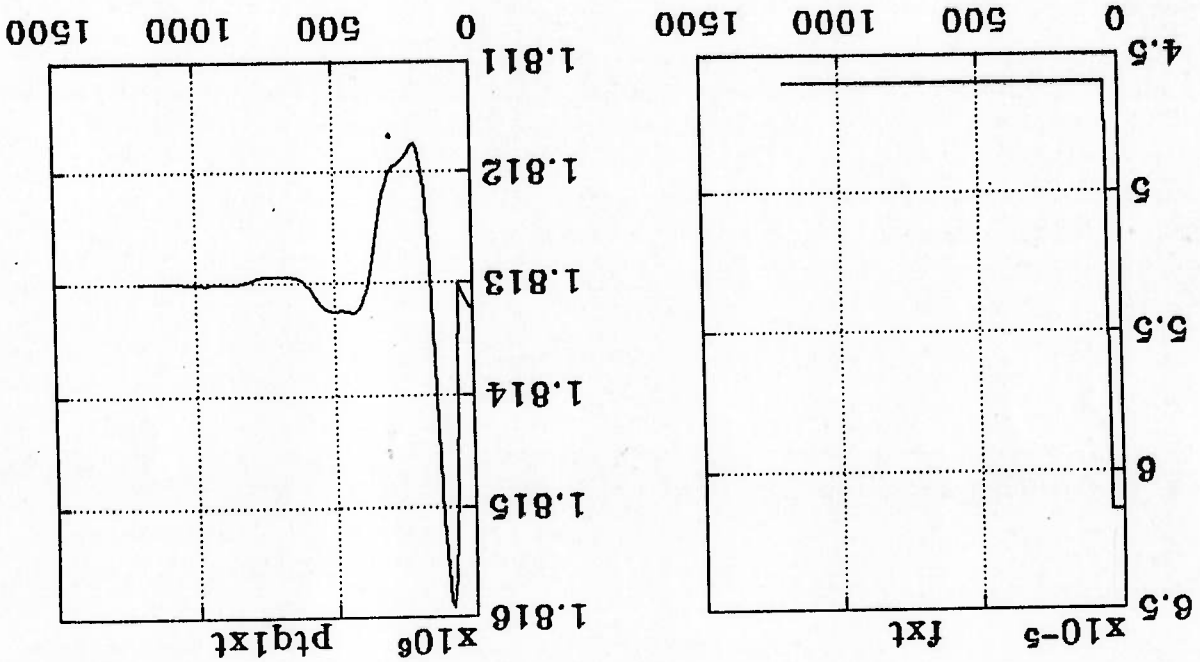
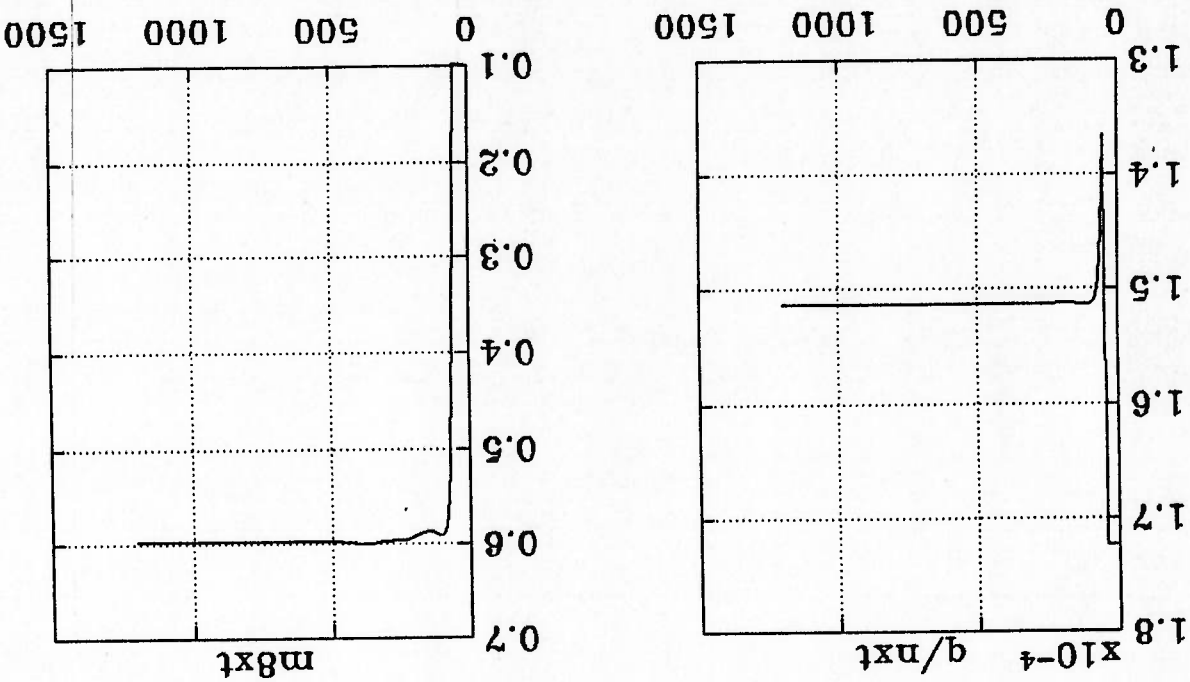


Figura 4.15 $r_{cm10} = 1$; $r_{cv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degraú de -25% em t ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $\beta = 1$; ocorrência de surge, continuação

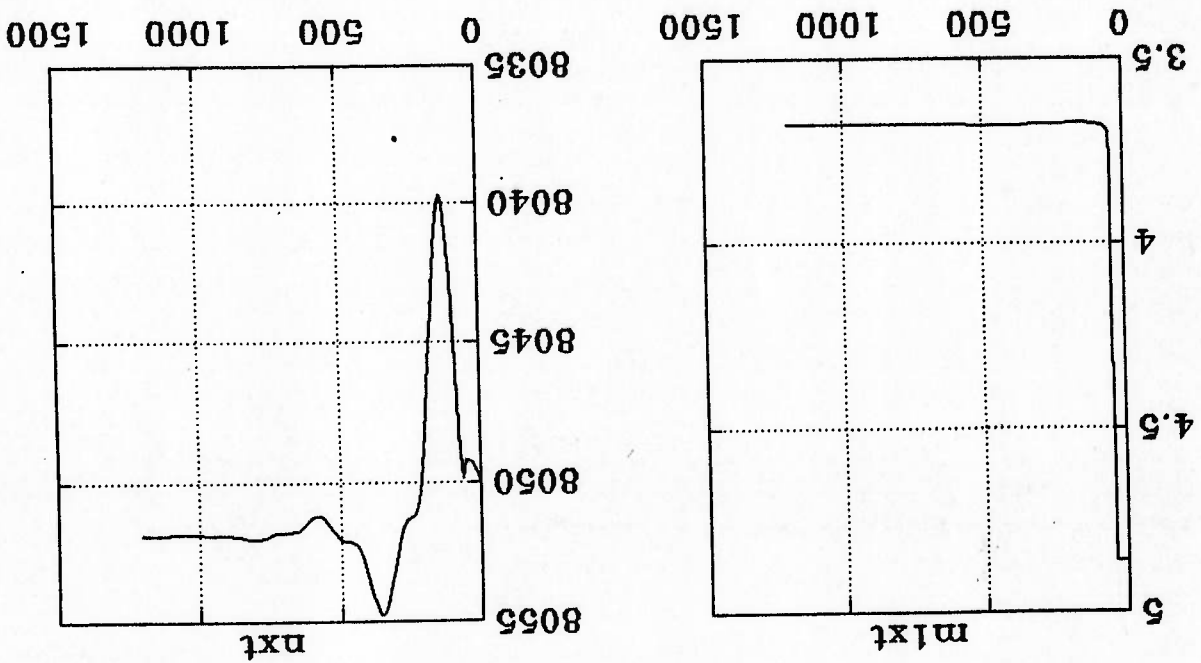
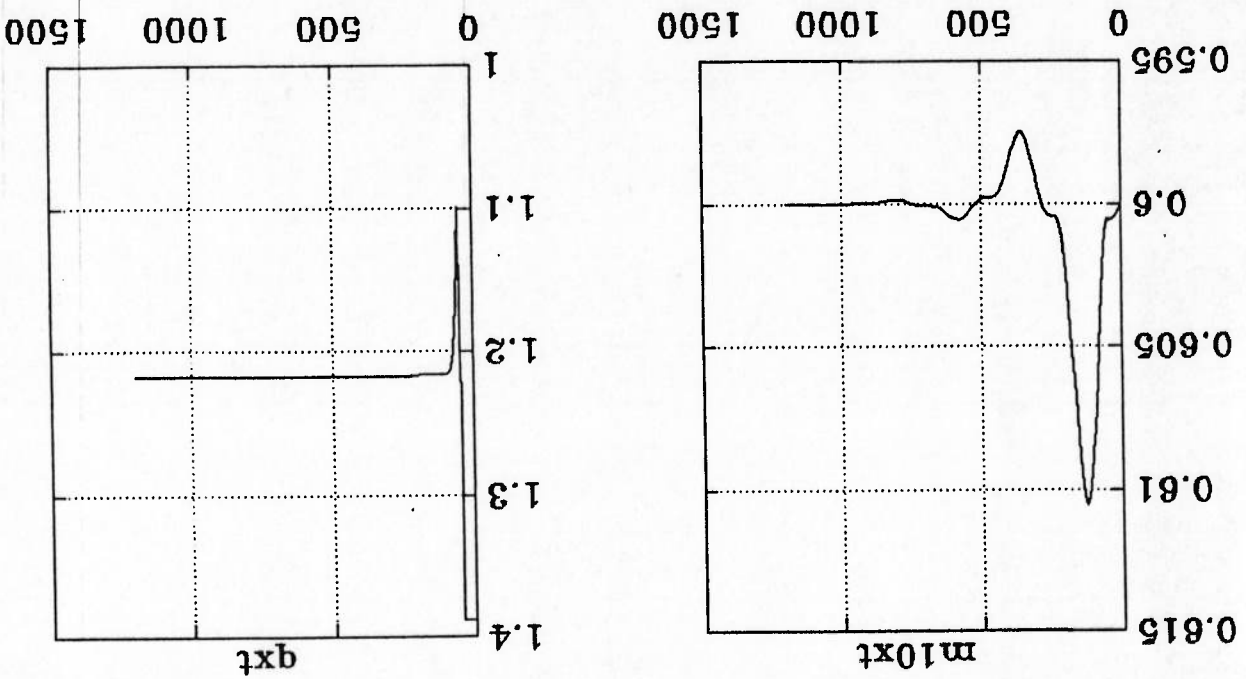


Figura 4.16 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de -50% em t ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $Q = 1$; surge, vazão crítica e rotação crítica.

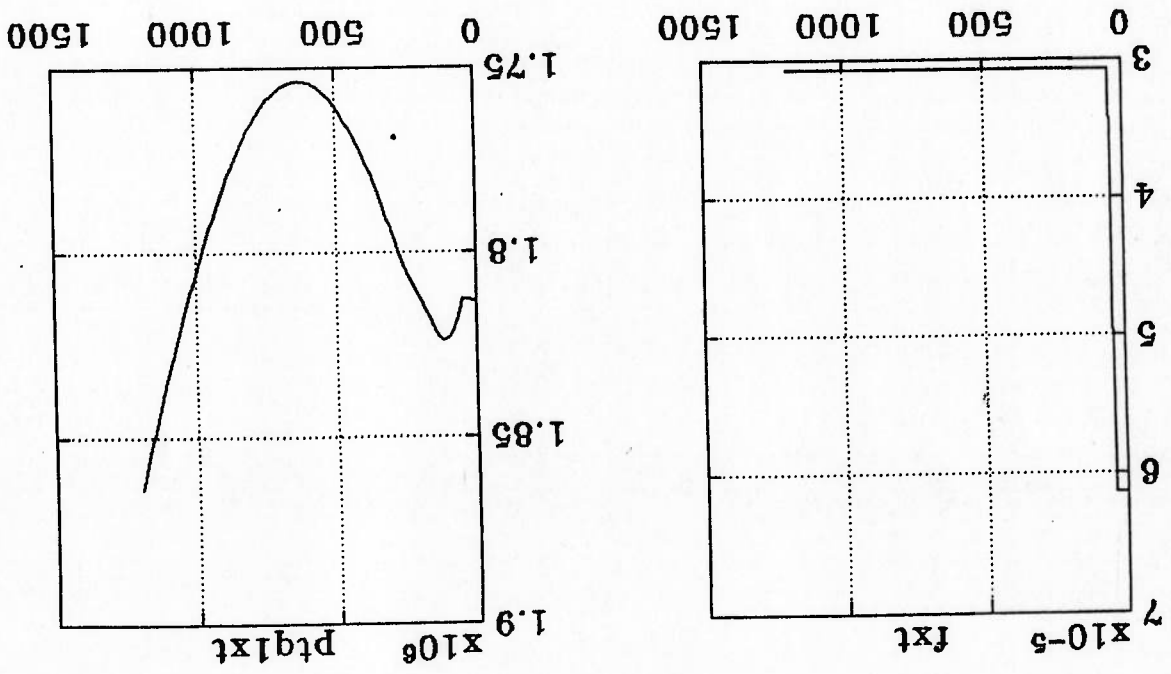
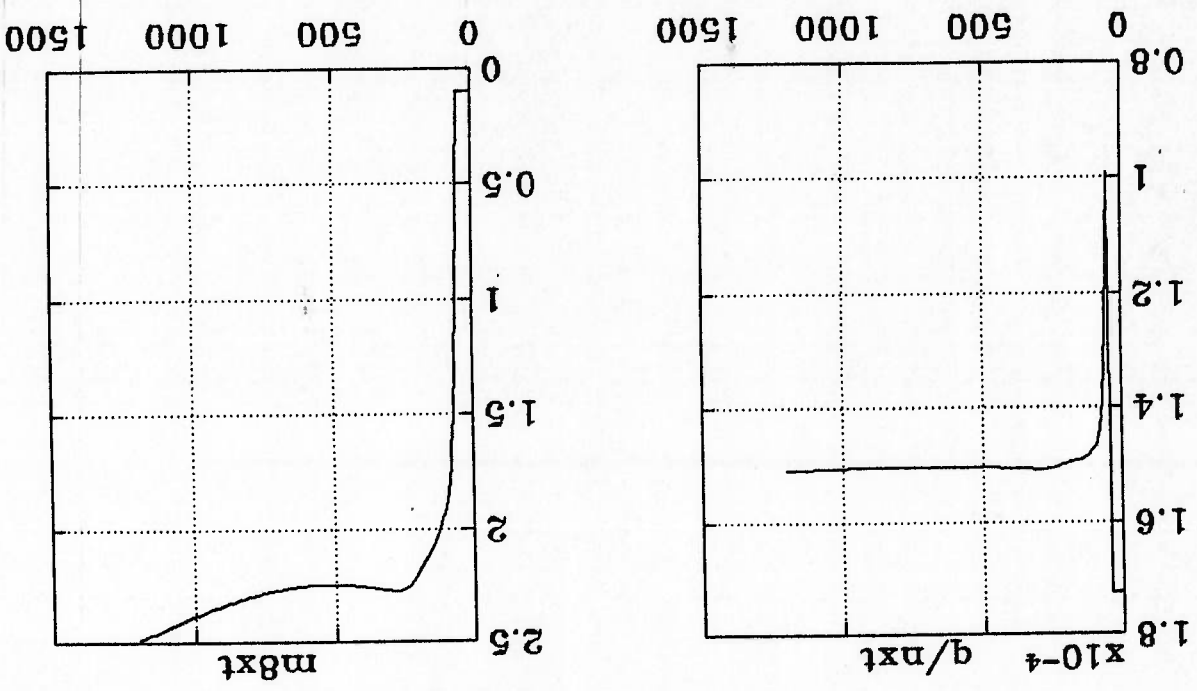


Figura 4.16 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degraú de -50% em f ; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $I = 1$; surge, vazão crítica e rotação crítica. continuação

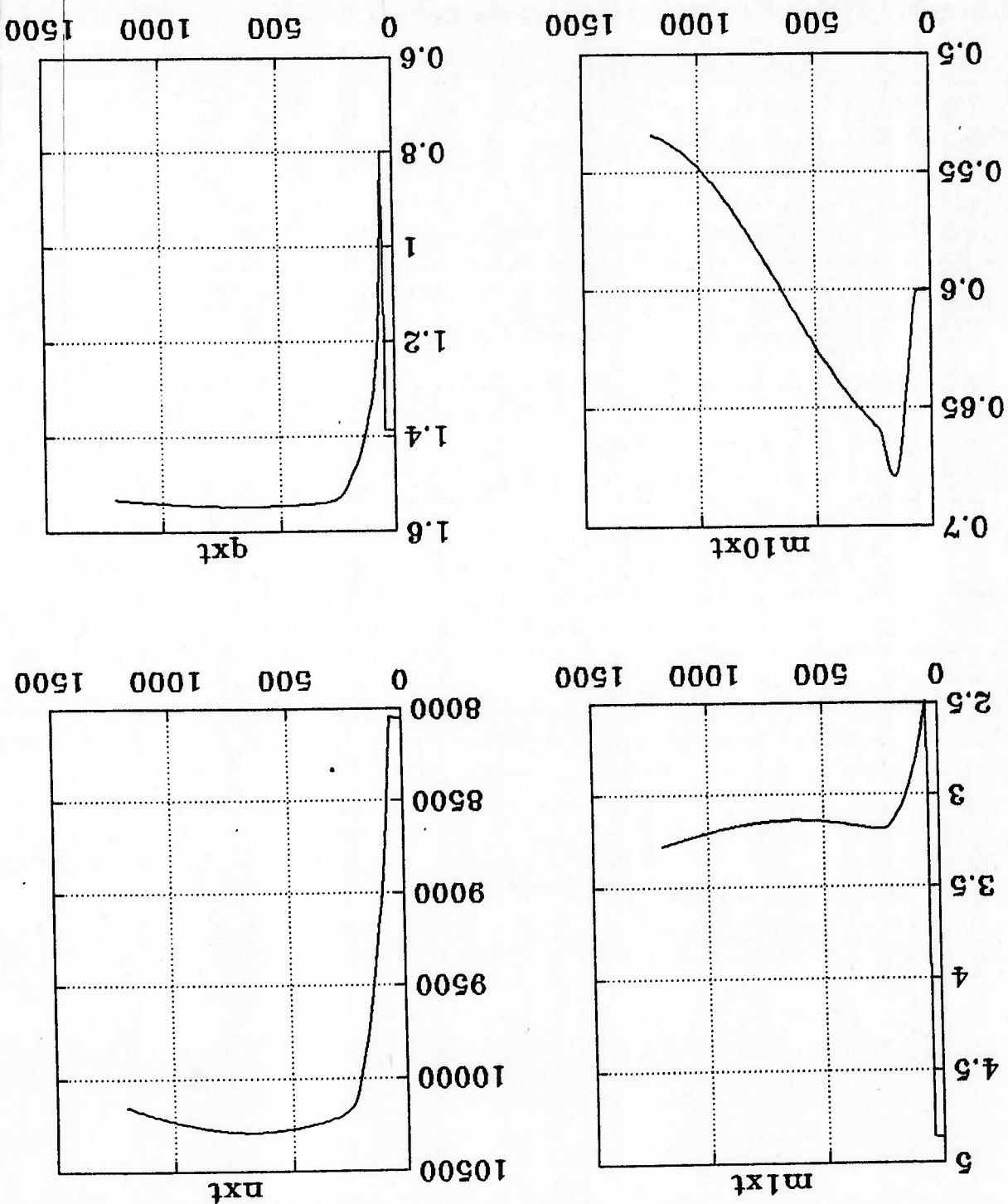


Figura 4.17 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de 30% em m6; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $I_Q = 1$; ocorrência de rotação crítica.

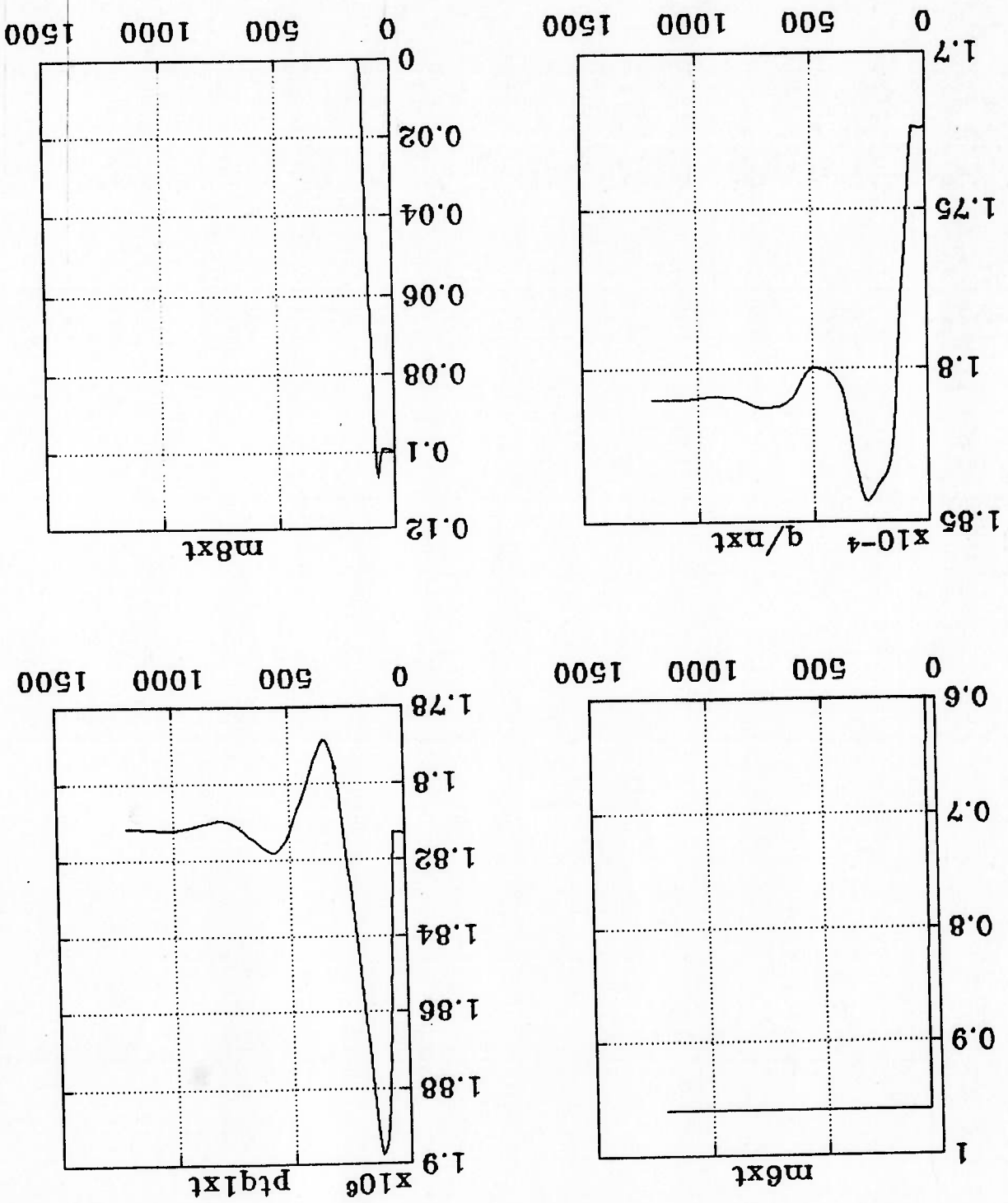
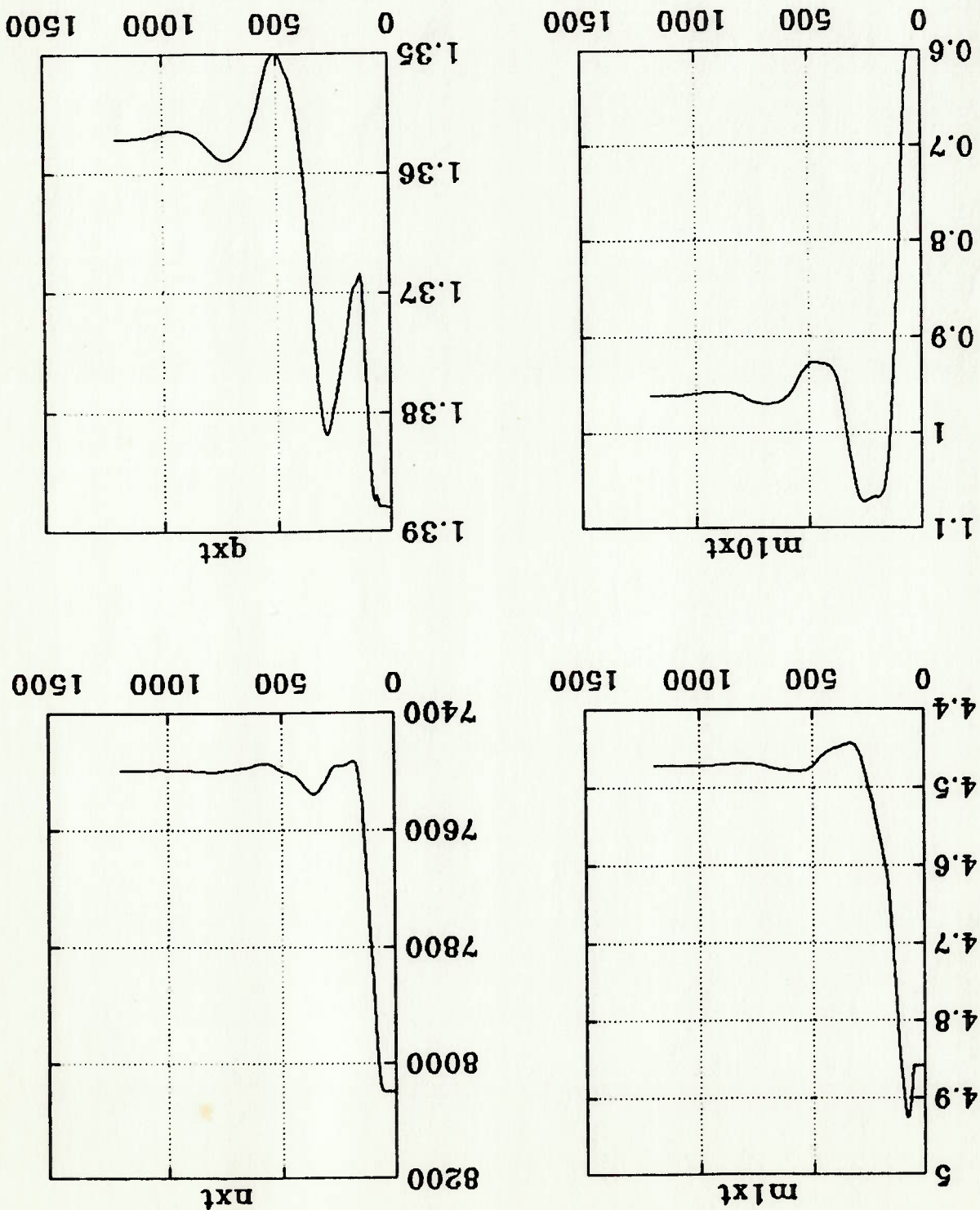


Figura 4.17 $r_{cm10} = 1$; $r_{ccv3} = 20$; $r_{cm8} = 1$; degrau de 30% em ms; tempo de simulação 1200s; $\alpha = 0,5$; $\beta = 1$; ocorrência de rotação crítica. continuação



LISTAGEM 4.1

cnab	t	rcv3	plaj	q/n	m3	m1	ppm
	\$		pa	m3/strpm	kg/a	kg/s	
nrr	0.0	8.008E+03	1.813E+06	1.694E-04	0.000E+00	4.837E+00	8.008E+03
nrr	5.0	9.610E+03	1.813E+06	1.696E-04	0.000E+00	4.837E+00	8.008E+03
nrr	10.0	9.610E+03	1.816E+06	1.696E-04	0.000E+00	5.555E+00	9.051E+03
nrr	15.0	9.610E+03	1.821E+06	1.698E-04	0.000E+00	5.824E+00	9.415E+03
nrr	20.0	9.610E+03	1.827E+06	1.699E-04	0.000E+00	5.930E+00	9.542E+03
nrr	25.0	9.610E+03	1.832E+06	1.699E-04	0.000E+00	5.975E+00	9.586E+03
nrr	30.0	9.610E+03	1.836E+06	1.699E-04	0.000E+00	5.999E+00	9.601E+03
nrr	35.0	9.610E+03	1.840E+06	1.698E-04	0.000E+00	6.013E+00	9.607E+03
nrr	40.0	9.610E+03	1.842E+06	1.698E-04	0.000E+00	6.023E+00	9.609E+03
nrr	45.0	9.610E+03	1.844E+06	1.698E-04	0.000E+00	6.031E+00	9.609E+03
nrr	50.0	9.610E+03	1.846E+06	1.698E-04	0.000E+00	6.037E+00	9.609E+03
nrr	55.0	9.610E+03	1.847E+06	1.698E-04	0.000E+00	6.042E+00	9.610E+03
nrr	60.0	9.610E+03	1.848E+06	1.698E-04	0.000E+00	6.046E+00	9.610E+03
nrr	65.0	9.610E+03	1.848E+06	1.698E-04	0.000E+00	6.049E+00	9.610E+03
nrr	70.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.052E+00	9.610E+03
nrr	75.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.054E+00	9.610E+03
nrr	80.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.054E+00	9.610E+03
nrr	85.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.057E+00	9.610E+03
nrr	90.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.058E+00	9.610E+03
nrr	95.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.059E+00	9.610E+03
nrr	100.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.060E+00	9.610E+03
nrr	105.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.060E+00	9.610E+03
nrr	110.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.061E+00	9.610E+03
nrr	115.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.061E+00	9.610E+03
nrr	120.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.061E+00	9.610E+03
nrr	125.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.061E+00	9.610E+03
nrr	130.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.061E+00	9.610E+03
nrr	135.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.062E+00	9.610E+03
nrr	140.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.062E+00	9.610E+03
nrr	145.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.062E+00	9.610E+03
nrr	150.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.062E+00	9.610E+03
nrr	155.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.062E+00	9.610E+03
nrr	160.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.062E+00	9.610E+03
nrr	165.0	9.610E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.062E+00	9.610E+03
nrr	170.0	8.008E+03	1.849E+06	1.697E-04	0.000E+00	6.062E+00	9.610E+03
nrr	175.0	8.008E+03	1.846E+06	1.692E-04	0.000E+00	5.313E+00	8.546E+03
nrr	180.0	8.008E+03	1.840E+06	1.692E-04	0.000E+00	5.051E+00	8.203E+03
nrr	185.0	8.008E+03	1.835E+06	1.693E-04	0.000E+00	4.953E+00	8.076E+03
nrr	190.0	8.008E+03	1.831E+06	1.694E-04	0.000E+00	4.913E+00	8.032E+03
nrr	195.0	8.008E+03	1.827E+06	1.694E-04	0.000E+00	4.894E+00	8.016E+03
nrr	200.0	8.008E+03	1.824E+06	1.694E-04	0.000E+00	4.883E+00	8.011E+03
nrr	205.0	8.008E+03	1.821E+06	1.694E-04	0.000E+00	4.875E+00	8.009E+03
nrr	210.0	8.008E+03	1.819E+06	1.695E-04	0.000E+00	4.869E+00	8.008E+03
nrr	215.0	8.008E+03	1.818E+06	1.695E-04	0.000E+00	4.864E+00	8.008E+03
nrr	220.0	8.008E+03	1.816E+06	1.695E-04	0.000E+00	4.860E+00	8.008E+03
nrr	225.0	8.008E+03	1.815E+06	1.695E-04	0.000E+00	4.856E+00	8.008E+03
nrr	230.0	8.008E+03	1.814E+06	1.695E-04	0.000E+00	4.853E+00	8.008E+03
nrr	235.0	8.008E+03	1.814E+06	1.695E-04	0.000E+00	4.851E+00	8.008E+03
nrr	240.0	8.008E+03	1.813E+06	1.695E-04	0.000E+00	4.849E+00	8.008E+03

variavel	maximo	minimo					
nar	245.0	8.008E+03	1.813E+06	1.695E-04	0.000E+00	4.847E+00	8.008E+03
nbr	250.0	8.008E+03	1.813E+06	1.697E-04	0.000E+00	4.847E+00	8.008E+03
m6	6.000E-01	6.000E-01	kg/s				
f	6.140E-05	6.140E-05	kg/s				
cm10	6.000E-01	6.000E-01	kg/s				
ccv3	9.610E+03	8.008E+03	kg/s				
cm8	0.000E+00	0.000E+00	kg/s				
ptq1 sp	0.000E+00	0.000E+00	kg/s				
q/n sp	0.000E+00	0.000E+00	kg/s				
cm8 sp	0.000E+00	0.000E+00	kg/s				
m1 sp	0.000E+00	0.000E+00	kg/s				
n sp	1.349E+06	1.813E+06	kg/s				
ptq1	1.699E-04	1.692E-04	kg/s				
q/n	0.000E+00	0.000E+00	kg/s				
m8	6.062E+00	4.837E+00	kg/s				
m1	9.610E+03	8.008E+03	kg/s				
n	6.676E+00	5.425E+00	kg/s				
m5	3.200E+02	3.200E+02	kg/s				
ts	6.662E+00	3.564E+02	kg/s				
m3	3.720E+02	1.813E+06	kg/s				
ttq2	1.849E+06	3.197E+02	kg/s				
ptq2	3.209E+02	3.564E+02	kg/s				
ttq1	3.750E+02	3.564E+02	kg/s				
l11	3.500E+02	3.500E+02	kg/s				
t6	6.676E+00	5.425E+00	kg/s				
m4	6.000E-01	6.000E-01	kg/s				
m10	1.779E+05	1.236E+05	kg/s				
en	4.309E-01	4.305E-01	J/kg				
xp	2.658E+06	2.347E+06	Pa				
p11	1.632E+00	1.357E+00	m3/s				
q	6.636E-01	6.630E-01	m3/s				
ep	6.000E-01	6.000E-01	kg/s				
m7	6.000E-01	6.000E-01	kg/s				

Variavel pulsada : ccv3
 Intensidade do pulso : 20 %
 Bias adotado no pulso : 0
 Instante inicial do pulso : 5 s
 Instante final do pulso : 170 s

Resultados p/ saída em grafico no arquivo matlab ccv3.mat.
 A variavel comp indica o estado de operacao do compressor:
 nra = operacao normal;
 scm = compressor em stonewall;
 sur = compressor em surge.

LISTAGEM 4.2

comp	t	cm3	plq1	q/n	m3	m3	m3	n
	s		Pa	m3/emp	kg/s	kg/s	kg/s	rpm
nar	0.0	0.000E+00	1.813E+06	1.694E-04	0.000E+00	4.837E+00	8.008E+03	
nar	5.0	1.920E+00	1.813E+06	1.694E-04	0.000E+00	4.837E+00	8.008E+03	
nar	10.0	1.920E+00	1.812E+06	2.057E-04	1.251E+00	4.744E+00	8.008E+03	
nar	15.0	1.920E+00	1.811E+06	2.183E-04	1.687E+00	4.707E+00	8.008E+03	
nar	20.0	1.920E+00	1.810E+06	2.227E-04	1.839E+00	4.691E+00	8.008E+03	
nar	25.0	1.920E+00	1.809E+06	2.242E-04	1.892E+00	4.686E+00	8.008E+03	
nar	30.0	1.920E+00	1.808E+06	2.249E-04	1.910E+00	4.682E+00	8.008E+03	
nar	35.0	1.920E+00	1.807E+06	2.250E-04	1.917E+00	4.680E+00	8.008E+03	
nar	40.0	1.920E+00	1.806E+06	2.251E-04	1.919E+00	4.678E+00	8.008E+03	
nar	45.0	1.920E+00	1.806E+06	2.251E-04	1.920E+00	4.674E+00	8.008E+03	
nar	50.0	1.920E+00	1.805E+06	2.251E-04	1.920E+00	4.674E+00	8.008E+03	
nar	55.0	1.920E+00	1.805E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.673E+00	8.008E+03	
nar	60.0	1.920E+00	1.805E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.673E+00	8.008E+03	
nar	65.0	1.920E+00	1.805E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.673E+00	8.008E+03	
nar	70.0	1.920E+00	1.805E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.672E+00	8.008E+03	
nar	75.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.671E+00	8.008E+03	
nar	80.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.671E+00	8.008E+03	
nar	85.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.670E+00	8.008E+03	
nar	90.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.670E+00	8.008E+03	
nar	95.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.670E+00	8.008E+03	
nar	100.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.670E+00	8.008E+03	
nar	105.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	110.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	115.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	120.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	125.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	130.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	135.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	140.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	145.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	150.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	155.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	160.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	165.0	1.920E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	170.0	0.000E+00	1.804E+06	2.252E-04	1.920E+00	4.669E+00	8.008E+03	
nar	175.0	0.000E+00	1.804E+06	1.841E-04	6.649E-01	4.768E+00	8.008E+03	
nar	180.0	0.000E+00	1.806E+06	1.764E-04	2.334E-01	4.801E+00	8.008E+03	
nar	185.0	0.000E+00	1.807E+06	1.720E-04	8.139E-02	4.815E+00	8.008E+03	
nar	190.0	0.000E+00	1.808E+06	1.704E-04	2.834E-02	4.821E+00	8.008E+03	
nar	195.0	0.000E+00	1.809E+06	1.699E-04	9.895E-03	4.824E+00	8.008E+03	
nar	200.0	0.000E+00	1.810E+06	1.697E-04	3.450E-03	4.827E+00	8.008E+03	
nar	205.0	0.000E+00	1.810E+06	1.696E-04	1.203E-03	4.828E+00	8.008E+03	
nar	210.0	0.000E+00	1.811E+06	1.694E-04	4.195E-04	4.830E+00	8.008E+03	
nar	215.0	0.000E+00	1.811E+06	1.696E-04	1.463E-04	4.831E+00	8.008E+03	
nar	220.0	0.000E+00	1.812E+06	1.696E-04	5.100E-05	4.832E+00	8.008E+03	
nar	225.0	0.000E+00	1.812E+06	1.696E-04	1.778E-05	4.833E+00	8.008E+03	
nar	230.0	0.000E+00	1.812E+06	1.694E-04	6.200E-06	4.834E+00	8.008E+03	
nar	235.0	0.000E+00	1.812E+06	1.696E-04	2.162E-06	4.835E+00	8.008E+03	
nar	240.0	0.000E+00	1.813E+06	1.696E-04	7.538E-07	4.835E+00	8.008E+03	

Variable	maximo	minimo					
nmr	245.0	0.000E+00	1.813E+06	1.696E-04	2.628E-07	4.836E+00	8.008E+03
nmr	250.0	0.000E+00	1.911E+06	1.696E-04	9.164E-06	4.836E+00	8.008E+03
m6	6.000E-01	6.000E-01	kg/s				
f	6.140E-05	6.140E-05	kg/s				
cm10	6.000E-01	6.000E-01	kg/1/2/spa				
ccv3	8.008E+03	8.008E+03					
cm3	1.920E+00	0.000E+00	Pa				
ptq1 sp	0.000E+00	0.000E+00	m3/stpm				
q/n sp	0.000E+00	0.000E+00	kg/s				
cm6 sp	0.000E+00	0.000E+00	rpm				
m1 sp	0.000E+00	0.000E+00	Pa				
n sp	0.000E+00	0.000E+00	kg/s				
ptq1	1.813E+06	1.696E-04	kg/s				
q/n	2.252E-04	0.000E+00	kg/s				
m8	1.920E+00	0.000E+00	rpm				
m1	4.837E+00	8.008E+03	kg/s				
n	8.008E+03	5.439E+00	kg/s				
m5	7.189E+00	3.200E+02	kg/s				
t5	3.200E+02	5.430E+00	kg/s				
m3	7.197E+00	3.531E+02	K				
ttq2	3.564E+02	1.804E+06	K				
ptq2	1.813E+06	3.198E+02	K				
ttq1	3.207E+02	3.534E+02	K				
tt1	3.578E+02	3.500E+02	K				
t6	3.500E+02	5.265E+00	kg/s				
m4	5.442E+00	6.000E-01	kg/s				
m10	6.000E-01	1.160E+05	J/kg				
en	1.236E+05	4.087E-01	Pa				
xp	4.307E-01	2.302E+06	m3/s				
pt11	2.347E+06	1.358E+00	kg/s				
q	1.804E+00	6.634E-01	kg/s				
ep	6.991E-01	6.000E-01	kg/s				
m7	2.520E+00	6.000E-01	kg/s				

Variavel pulsada : cm6
 Intensidade do pulso : 40 %
 Bias adotado no pulso : 5
 Instante inicial do pulso : 5 s
 Instante final do pulso : 1/0 s

Resultados p/ saída em grafico no arquivo matlab cmb.mat.

A variavel comp indica o estado de operacao do compressor:
 nrm = operacao normal;
 stw = compressor em stonewall;
 sur = compressor em surge.

LISTAGEM 4.3

comp	l	cm10	plv1	n3/srpm	n3	m1	rpm
nar	0.0	6.000E-01	1.813E+06	1.696E-04	0.000E+00	4.837E+00	8.008E+03
nar	5.0	7.200E-01	1.813E+06	1.696E-04	0.000E+00	4.837E+00	8.008E+03
nar	10.0	7.200E-01	1.812E+06	1.718E-04	0.000E+00	4.829E+00	8.008E+03
nar	15.0	7.200E-01	1.808E+06	1.727E-04	0.000E+00	4.822E+00	8.008E+03
nar	20.0	7.200E-01	1.805E+06	1.730E-04	0.000E+00	4.814E+00	8.008E+03
nar	25.0	7.200E-01	1.801E+06	1.731E-04	0.000E+00	4.806E+00	8.008E+03
nar	30.0	7.200E-01	1.797E+06	1.732E-04	0.000E+00	4.797E+00	8.008E+03
nar	35.0	7.200E-01	1.794E+06	1.732E-04	0.000E+00	4.789E+00	8.008E+03
nar	40.0	7.200E-01	1.790E+06	1.733E-04	0.000E+00	4.781E+00	8.008E+03
nar	45.0	7.200E-01	1.787E+06	1.733E-04	0.000E+00	4.773E+00	8.008E+03
nar	50.0	7.200E-01	1.784E+06	1.734E-04	0.000E+00	4.765E+00	8.008E+03
nar	55.0	7.200E-01	1.780E+06	1.734E-04	0.000E+00	4.757E+00	8.008E+03
nar	60.0	7.200E-01	1.777E+06	1.734E-04	0.000E+00	4.749E+00	8.008E+03
nar	65.0	7.200E-01	1.774E+06	1.734E-04	0.000E+00	4.741E+00	8.008E+03
nar	70.0	7.200E-01	1.771E+06	1.735E-04	0.000E+00	4.733E+00	8.008E+03
nar	75.0	7.200E-01	1.768E+06	1.735E-04	0.000E+00	4.725E+00	8.008E+03
nar	80.0	7.200E-01	1.765E+06	1.736E-04	0.000E+00	4.717E+00	8.008E+03
nar	85.0	7.200E-01	1.762E+06	1.736E-04	0.000E+00	4.709E+00	8.008E+03
nar	90.0	7.200E-01	1.759E+06	1.736E-04	0.000E+00	4.701E+00	8.008E+03
nar	95.0	7.200E-01	1.756E+06	1.737E-04	0.000E+00	4.694E+00	8.008E+03
nar	100.0	7.200E-01	1.753E+06	1.737E-04	0.000E+00	4.686E+00	8.008E+03
nar	105.0	7.200E-01	1.750E+06	1.737E-04	0.000E+00	4.678E+00	8.008E+03
nar	110.0	7.200E-01	1.747E+06	1.738E-04	0.000E+00	4.670E+00	8.008E+03
nar	115.0	7.200E-01	1.744E+06	1.738E-04	0.000E+00	4.662E+00	8.008E+03
nar	120.0	7.200E-01	1.741E+06	1.738E-04	0.000E+00	4.654E+00	8.008E+03
nar	125.0	7.200E-01	1.739E+06	1.739E-04	0.000E+00	4.647E+00	8.008E+03
nar	130.0	7.200E-01	1.736E+06	1.739E-04	0.000E+00	4.639E+00	8.008E+03
nar	135.0	7.200E-01	1.733E+06	1.740E-04	0.000E+00	4.631E+00	8.008E+03
nar	140.0	7.200E-01	1.730E+06	1.740E-04	0.000E+00	4.623E+00	8.008E+03
nar	145.0	7.200E-01	1.727E+06	1.740E-04	0.000E+00	4.616E+00	8.008E+03
nar	150.0	7.200E-01	1.724E+06	1.741E-04	0.000E+00	4.608E+00	8.008E+03
nar	155.0	7.200E-01	1.721E+06	1.741E-04	0.000E+00	4.600E+00	8.008E+03
nar	160.0	7.200E-01	1.718E+06	1.741E-04	0.000E+00	4.593E+00	8.008E+03
nar	165.0	7.200E-01	1.716E+06	1.742E-04	0.000E+00	4.585E+00	8.008E+03
nar	170.0	6.000E-01	1.713E+06	1.742E-04	0.000E+00	4.577E+00	8.008E+03
nar	175.0	6.000E-01	1.711E+06	1.718E-04	0.000E+00	4.570E+00	8.008E+03
nar	180.0	6.000E-01	1.711E+06	1.710E-04	0.000E+00	4.5/AR+00	8.008E+03
nar	185.0	6.000E-01	1.713E+06	1.707E-04	0.000E+00	4.5/AR+00	8.008E+03
nar	190.0	6.000E-01	1.713E+06	1.706E-04	0.000E+00	4.579E+00	8.008E+03
nar	195.0	6.000E-01	1.714E+06	1.706E-04	0.000E+00	4.579E+00	8.008E+03
nar	200.0	6.000E-01	1.714E+06	1.705E-04	0.000E+00	4.579E+00	8.008E+03
nar	205.0	6.000E-01	1.715E+06	1.705E-04	0.000E+00	4.580E+00	8.008E+03
nar	210.0	6.000E-01	1.716E+06	1.705E-04	0.000E+00	4.580E+00	8.008E+03
nar	215.0	6.000E-01	1.716E+06	1.705E-04	0.000E+00	4.581E+00	8.008E+03
nar	220.0	6.000E-01	1.716E+06	1.705E-04	0.000E+00	4.581E+00	8.008E+03
nar	225.0	6.000E-01	1.717E+06	1.705E-04	0.000E+00	4.581E+00	8.008E+03
nar	230.0	6.000E-01	1.717E+06	1.705E-04	0.000E+00	4.582E+00	8.008E+03
nar	235.0	6.000E-01	1.717E+06	1.705E-04	0.000E+00	4.582E+00	8.008E+03
nar	240.0	6.000E-01	1.717E+06	1.705E-04	0.000E+00	4.582E+00	8.008E+03

variavel	maximo	minimo						
nmr	245.0	6.000E-01						
nmr	250.0	6.000E-01						
m6	6.000E-01	6.000E-01	kg/s					
f	6.140E-05	6.140E-05	kg/s					
cm10	7.200E-01	6.000E-01	kg/s					
ccv3	8.008E+03	8.008E+03	kg/s					
cm8	0.000E+00	0.000E+00	Pa					
ptq1 sp	0.000E+00	0.000E+00	m3/srpm					
q/n sp	0.000E+00	0.000E+00	rpm					
cm2 sp	0.000E+00	0.000E+00	Pa					
m1 sp	0.000E+00	0.000E+00	Pa					
n sp	1.813E+06	1.711E+06	m3/srpm					
ptq1	1.742E-04	1.696E-04	kg/s					
q/n	0.000E+00	0.000E+00	kg/s					
m8	4.837E+00	4.577E+00	rpm					
m1	8.008E+03	8.008E+03	kg/s					
n	5.469E+00	5.183E+00	kg/s					
m5	3.200E+02	3.200E+02	kg/s					
t5	5.528E+00	5.179E+00	K					
m3	3.569E+02	3.541E+02	K					
tlq2	1.813E+06	1.711E+06	K					
ptq2	3.201E+02	3.561E+02	K					
tlq1	3.577E+02	3.500E+02	K					
tl1	3.500E+02	5.183E+00	kg/s					
t6	5.469E+00	6.000E-01	kg/s					
m4	7.200E-01	1.229E+05	J/kg					
m10	1.236E+05	4.279E-01	Pa					
en	4.307E-01	2.216E+06	m3/s					
xp	2.347E+06	1.358E+00	m3/s					
p11	1.395E+00	6.634E-01	kg/s					
q	6.677E-01	6.000E-01	kg/s					
ep	7.200E-01	6.000E-01	kg/s					
m7	7.200E-01	6.000E-01	kg/s					

Variavel pulsada : cm10
 Intensidade do pulso : 20 %
 Bixa adotado no pulso : 0
 Instante inicial do pulso : 5 s
 Instante final do pulso : 170 s

Resultados p/ saída em grafico no arquivo matlab cm10.mat.
 A variavel comp indica o estado de operacao do compressor:
 nrm = operacao normal;
 cm = compressor em stonewall;
 sur = compressor em surge.

```

PROGRAM GERAH;
USES CRT,VAR_URC,FORMATO;
*****
CONST
  diretorio = 'c:\mane\';
  tf = 170;(s)
  dig = 8;
  numdec = 3;
  campo = 13;
  selnotc = 'c';
  esp_A_H = 15;
*****
TYPE
  matriz = array[contipo,mantipo] of real;
*****
VAR
  linha : tlinha;
  nome : tnome;
  sah : tnome;
  con : contipo;
  man : mantipo;
  a : matriz;
  aa : matriz;
  h : matriz;
  y : array[contipo] of real;
  y0 : array[contipo] of real;
  escl : array[contipo] of real;
*****

```

{ABERTURA DOS ARQUIVOS DE LEITURA E SAIDA}

```

varnome[trq1]=trq1;
varnome[trq1]=ptq1;
varnome[ms]=m5;
varnome[ts]=t5;
varnome[m3]=m3;
varnome[trq2]=trq2;
varnome[trq2]=ptq2;
varnome[m1]=m1;
varnome[tr11]=tr11;
varnome[m6]=m6;
varnome[t6]=t6;
varnome[m4]=m4;
varnome[en]=en;
varnome[xp]=xp;
varnome[p11]=p11;
varnome[q]=q;
varnome[n]=n;
varnome[ep]=ep;
varnome[m8]=m8;
varnome[m7]=m7;
varnome[m10]=m10;
varnome[ccv3]=ccv3;
varnome[t]=t;
varnome[qn]=q/n;
varnome[cm8]=cm8;
varnome[cm10]=cm10;
varnome[ptq1sp]=ptq1 sp;
varnome[ptq1sp]=q/n sp;
varnome[m8sp]=m8 sp;
varnome[m1sp]=m1 sp;
varnome[nsps]=n sp;

```

{Inicializacao dos nomes das variaveis e dos arquivos}

```

*****
BEGIN
CLRSCR;

arqe : array[mantipo] of text;
arqs_a : file of matriz;
arqs_h : file of matriz;
texAH : text;
t,t0,dt : real;
varnome : array[vartipo] of tnome;
varaux : real;
k : byte;

```

```

for man:=cm10 to cm8 do
begin
assign(arge[man],diretorio+varnome[man]+'.mat');
reset(arge[man]);
end:

assign(arge_a,diretorio+'A.dad');
assign(arge_h,diretorio+'H.dad');
rewrite(arge_a);
rewrite(arge_h);
assign(texAH,diretorio+'AH.dad');
rewrite(texAH);

}-----{
{DEFINICAO DOS FATORES DE ESCALA DE A E H}
esci[ptq1] := 1.25e-5;
esci[qn] := 1.73e4;
esci[m8] := 0.5;
esci[m1] := 0.833;
esci[n] := 6.21e-4;
}-----{
(Inicializacao de y0 e aa)
for man:=cm10 to cm8 do
begin
readln(arge[man],t0);
read(arge[man],t,varaux);
for con:=ptq1 to n do
begin
read(arge[man],y0[con]);
aa[con,man]:=0;
}-----{

```

```

end;
readln(arq[man]);
end;
dt:=t-t0;
end;
}-----}

```

(Montagem dos títulos do arquivo ASC de saída de A, H, dos fatores de escala e do intervalo de amostragem)

```

writeln(texAH,'ARQUIVOS A.DAT E H.DAT PARA USO NOS CONTROLADORES DMC E ');
writeln(texAH,'LDMC. ');
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH,'Exemplo de calculo de a e h:');
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH);

```

Fatores de escala de Y (ESC):

```

writeln(texAH);
writeln(texAH);

```

nome='varivel';

```

centra(nome,campo);

```

linha:= linha+nome+brancos(esp_A_H);

nome='ESC';

```

centra(nome,campo);

```

linha:=linha+nome;

```

writeln(texAH,linha);

```

```

writeln(texAH);

```

```

for con:=ptq1 to n do

```

```

begin

```

linha:='';

```

nome:=varnome[con];

```

```

centra(nome,campo);

```

```

salvar(escl[con],dig,numdec,campo,sah,'c');
linha:=nome+brancos(esp_A_H)+sah;
writeln(texAH,linha);
end;
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH,'Matrizes a e h geradas');
writeln(texAH);
writeln(texAH);
writeln(texAH);
nome:='k';
centra(nome,campo);
linha:=linha+nome;
writeln(texAH,linha);
for con:= 1 to n do
begin
writeln(texAH,linha);
linha:='';
nome:='k';
centra(nome,campo);
linha:=linha+nome;
writeln(texAH,linha);
for man:=cm10 to cm8 do
begin
nome:='A'+varnome[con]+' '+varnome[man];
centra(nome,campo);
linha:=linha+nome;
end;
linha:=linha+brancos(esp_A_H);
for man:=cm10 to cm8 do
begin
nome:='H'+varnome[con]+varnome[man];
writeln(texAH,linha);
end;
end;

```

```
centra(nome,campo);
```

```
linha:=linha+nome;
```

```
end;
```

```
writeln(texaH,linha);
```

```
end;
```

```
writeln(texaH);
```

----->

```
{Leitura e calculo de a e h}
```

```
k:=1;
```

```
repeat
```

```
for man:=cm10 to cm8 do
```

```
begin
```

```
read(arge[man],t,varaux);
```

```
for con:=ptq1 to n do
```

```
begin
```

```
read(arge[man],y[con]);
```

```
a[con,man]=(y[con]-y0[con])* esll[con];
```

```
h[con,man]=a[con,man]-aa[con,man];
```

```
end;
```

```
readln(arge[man]);
```

```
end;
```

```
write(arge_a,a);
```

```
write(arge_h,h);
```

```
{Gravacao do arquivo ASC}
```

```
writeln(texaH);
```

```
saivar(k,dig,numdec,campo,sah,'d');
```

```

writeln(texAH,sah);
for con:=ptq1 to n do
begin
writeln(=');
for man:=cm10 to cm8 do
begin
salvar(alcon,man],dig,numdec,campo,sah,selnotc);
linha:=linha+sah;
end;
linha:=linha+brancos(esp_A~H);
for man:=cm10 to cm8 do
begin
salvar(hlcon,man],dig,numdec,campo,sah,selnotc);
linha:=linha+sah;
end;
writeln(texAH,linha);
end;
{Atualizacao de aa e k}
k:=k+l;
aa:=a;
until t>=tf;
}-----}
{Fechamento do arquivos}
for man:= cm10 to cm8 do
close(arqelman]);

```


end. {Final de gerah}

----->

close(args_a);
close(args_h);
close(texAH);

Program MONTA_AI;

USES FORMATO,VAR_DMC,OPERADOR;

(\$r+)

VAR

A : atipo;

PROCEDURE MONTA_A(diretorio : tnome; (Diretorio onde sera gravada a matriz a)

trajetoria)

L : byte; (No de acoes futuras de controle)

C : byte; (No de variaveis controladas)

M : byte; (No de variaveis manipuladas)

var A : Atipo;(Matriz A)

CONST

argent = 'a.dad'; (Nome do arquivo que contem as submatrizes a!!!)

argpsda = 'matriz_A.mat';(Nome do arquivo matlab onde sera gravada a

matriz A montada)

TYPE

satipo = array[1..5,1..3] of real;

VAR

sa : satipo;

enta : file of satipo;

j,i,k,w:byte;

sda : text;

BEGIN (Inicio de monta_A)

(Abertura do arquivo de leitura de a!!!)

```

assign(enta,diretorio+argent);
reset(enta);
fillichar(A,sizeof(A),0); {Zera todos os elementos de A}
}-----
{Montagem de A}
for j:=1 to R do
begin
read(enta,sa);
i:=1;
while (j+i-1 <= R) and (i <= L ) do
begin
for k:=1 to C do
for w:=1 to M do
Al (((j+i-1))-1)*C+k) , ((i-1)*M+w) ] := sa[k,w];
i:=i+1;
end;
end;
close(enta);
}-----
{Gravacao de A no arquivo ASC de saida arqsda}
assign(sda,diretorio+arqsda);
rewrite(sda);
for i:=1 to R*C do
begin
for j:=1 to L*M do
write (sda,' ',Al[i,j]:8);
writeln(sda);
end;
close(sda);
end; {Final de Monta_A}
}-----

```

BEGIN

MONTA_A(DIRETORIO,R,L,C,M,A):

END.

ESTE ARQUIVO APRESENTA AS MATRIZES "a" E "h" GRAVADAS NOS ARQUIVOS A.DAT E H.DAT PARA USO NOS CONTROLADORES DMC E DMC.

Exemplo de calculo de a e h:

$$Aptqj.cmB.k = (Yptqj.k - Yptqj.0) \times FSCptqj$$

$$Hptqj.cmB.k = Aptqj.cmB.k - Aptqj.cmB.k-1$$

Fatores de escala de Y (ESC)

Variaavei

ptqj	q/n	ns	m1	n
1.0E-05	1.8E+04	5.2E-01	8.2E-01	6.2E-04
ESC				

Intervalo de amostragem (entre k e k-1) : 5.0 s

Matrizes a e h geradas

k			k		
Aptqj.cmB	Aq/n.ccb	AmB.ccb	Aptqj.cmB	Aq/n.ccb	AmB.ccb
1.000	2.6E-02	7.1E-03	1.000	2.6E-02	7.1E-03
-1.4E-02	6.5E-01	4.1E-02	-1.4E-02	6.5E-01	4.1E-02
4.1E-02	1.5E-03	6.5E-01	4.1E-02	1.5E-03	6.5E-01
0.0E+00	0.0E+00	6.5E-01	0.0E+00	0.0E+00	6.5E-01
-6.5E-03	6.5E-02	-7.6E-02	-6.5E-03	6.5E-02	-7.6E-02
0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.0E+00	6.5E-01	8.7E-01	0.0E+00	6.5E-01	8.7E-01
-2.000	8.2E-02	-2.0E-02	-2.000	8.2E-02	-2.0E-02
-4.5E-02	4.6E-03	8.8E-01	-4.5E-02	4.6E-03	8.8E-01
5.6E-02	0.0E+00	8.8E-01	5.6E-02	0.0E+00	8.8E-01
0.0E+00	0.0E+00	-1.1E-01	0.0E+00	0.0E+00	-1.1E-01
-1.3E-02	8.1E-01	8.1E-01	-1.3E-02	8.1E-01	8.1E-01
0.0E+00	8.7E-01	0.0E+00	0.0E+00	8.7E-01	0.0E+00
3.000	0.0E+00	0.0E+00	3.000	0.0E+00	0.0E+00
-3.2E-02	1.4E-01	-3.2E-02	-3.2E-02	1.4E-01	-3.2E-02
6.1E-02	5.5E-03	9.6E-01	6.1E-02	5.5E-03	9.6E-01
0.0E+00	0.0E+00	9.6E-01	0.0E+00	0.0E+00	9.6E-01
-2.0E-02	9.0E-01	-1.2E-01	-2.0E-02	9.0E-01	-1.2E-01
0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
-2.0E-02	9.0E-01	-1.2E-01	-2.0E-02	9.0E-01	-1.2E-01
0.0E+00	9.5E-01	0.0E+00	0.0E+00	9.5E-01	0.0E+00
4.000	1.9E-01	-4.3E-02	4.000	1.9E-01	-4.3E-02
-1.2E-01	5.5E-03	9.8E-01	-1.2E-01	5.5E-03	9.8E-01
6.4E-02	0.0E+00	9.8E-01	6.4E-02	0.0E+00	9.8E-01
0.0E+00	0.0E+00	-1.2E-01	0.0E+00	0.0E+00	-1.2E-01
-2.6E-02	9.3E-01	9.3E-01	-2.6E-02	9.3E-01	9.3E-01
0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.0E+00	9.8E-01	0.0E+00	0.0E+00	9.8E-01	0.0E+00
-2.6E-02	9.3E-01	-1.2E-01	-2.6E-02	9.3E-01	-1.2E-01
0.0E+00	9.5E-01	0.0E+00	0.0E+00	9.5E-01	0.0E+00
5.000	2.3E-01	-5.2E-02	5.000	2.3E-01	-5.2E-02
-1.6E-01	5.7E-03	9.9E-01	-1.6E-01	5.7E-03	9.9E-01
6.5E-02	0.0E+00	9.9E-01	6.5E-02	0.0E+00	9.9E-01
0.0E+00	0.0E+00	-1.3E-01	0.0E+00	0.0E+00	-1.3E-01
-3.3E-02	9.5E-01	9.5E-01	-3.3E-02	9.5E-01	9.5E-01
0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.0E+00	9.9E-01	0.0E+00	0.0E+00	9.9E-01	0.0E+00
6.000	2.7E-01	-5.9E-02	6.000	2.7E-01	-5.9E-02
-1.9E-01	6.0E+00	-1.9E-01	-1.9E-01	6.0E+00	-1.9E-01
6.4E-02	0.0E+00	6.4E-02	6.4E-02	0.0E+00	6.4E-02
0.0E+00	0.0E+00	-1.3E-01	0.0E+00	0.0E+00	-1.3E-01
-3.4E-02	9.5E-01	9.5E-01	-3.4E-02	9.5E-01	9.5E-01
0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.0E+00	9.9E-01	0.0E+00	0.0E+00	9.9E-01	0.0E+00
0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
0.0E+00	9.9E-01	0.0E+00	0.0E+00	9.9E-01	0.0E+00

19.000
-6.0E-01
7.5E-02
0.0E+00
-1.2E-01
0.0E+00
-1.3E-01
0.0E+00
20.000
-6.3E-01
7.5E-02
0.0E+00
-1.3E-01
0.0E+00

3.6E-01
3.4E-03
1.0E+00
9.9E-01
3.6E-01
3.4E-03
1.0E+00
9.9E-01
3.6E-01
3.4E-03
1.0E+00
9.9E-01
3.6E-01
3.4E-03
1.0E+00
9.9E-01

-8.9E-02
1.0E+00
1.0E+00
-1.4E-01
0.0E+00
-9.0E-02
1.0E+00
1.0E+00
-1.4E-01
0.0E+00
-9.0E-02
1.0E+00
1.0E+00
-1.4E-01
0.0E+00

-2.9E-02
6.4E-04
0.0E+00
-6.4E-03
0.0E+00
-2.9E-02
6.4E-04
0.0E+00
-6.4E-03
0.0E+00
-2.9E-02
6.4E-04
0.0E+00
-6.4E-03
0.0E+00

-1.7E-04
-4.0E-06
0.0E+00
5.5E-04
0.0E+00
-4.2E-04
1.3E-06
0.0E+00
3.3E-04
0.0E+00
-4.2E-04
1.3E-06
0.0E+00
3.3E-04
0.0E+00

-4.0E-04
5.7E-05
0.0E+00
-1.9E-04
0.0E+00
-3.1E-04
4.7E-05
0.0E+00
-1.6E-04
0.0E+00
-3.1E-04
4.7E-05
0.0E+00
-1.6E-04
0.0E+00

vetor_alfa : vetor_contipo;

r_fat : real;

vetor_r : vetor_mantipo;

q_fat : real;

vetor_q : vetor_contipo;

matriz_K : ktipo;

A : atipo;

dut : utipo;

tca : real; (instante de controle anterior)

restr : vetor_contipo; (vetor de restricoes)

yo : vetor_contipo; (vetor dos valores iniciais de y)

eslu : vetor_mantipo; (vetor dos fatores de escala de u)

esly : vetor_contipo; (vetor dos fatores de escala de y)

VAR

-----}

IMPLEMENTATION

PROCEDURE CONTROLE (VAR V: VARIAVEIS ; (VETOR DE VARIAVEIS DO PROCESS) T: REAL; (TEMPO)

USES VAR_URC,VAR_DMC,VAR_MAT,OP_MAT,FORMATO,OPERADOR,U_DMC;

INTERFACE

{SIMULA O CONTROLADOR DA URC}

{\$\$+}

UNIT U_CONTRO;

LISTAGEM 4.7

LISTAGEM 4.7

BEGIN

----->

varnome : array [vartipo] of tnome;

con,con_fim : contipo;

man,man_fim : mantipo;

total: real;

sda : text;

VAR

----->

campo=6;

CONST

----->

MOV_MAN : vetor_mantipo; {Movimento var manipulada}

ISE : vetor_contipo; {Erro quadratico}

SDA_DMC : tnome; {Arquivo para gravacao dos parametros}

DIRETORIO, {Diretorio para gravacao manipuladas}

vetor_R : vetor_mantipo; {vetor de taxa de aproximacao dos set points}

vetor_ALFA : vetor_contipo; {vetor dos pesos dos erros}

M, {No de variaveis manipuladas}

L, {No de valores futuros das variaveis manipuladas}

C, {No de variaveis controladas}

NINST : byte; {No de instantes do modelo de convolucao}

PROCEDURE GRAVA_DMC(R, {No de predicoes}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de valores futuros das variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

varia, {No de variaveis manipuladas}

} ATRIBUICAO DOS NOMES AS VARIAVEIS DO SISTEMA }

```
varnome[ttq1]=ttq1;  
varnome[ptq1]=ptq1;  
varnome[m5]=m5;  
varnome[15]=15;  
varnome[m3]=m3;  
varnome[ttq2]=ttq2;  
varnome[ptq2]=ptq2;  
varnome[m1]=m1;  
varnome[11]=11;  
varnome[m6]=m6;  
varnome[16]=16;  
varnome[m4]=m4;  
varnome[en]=en;  
varnome[xp]=xp;  
varnome[p11]=p11;  
varnome[q]=q;  
varnome[n]=n;  
varnome[ep]=ep;  
varnome[m8]=m8;  
varnome[m7]=m7;  
varnome[m10]=m10;  
varnome[ccv3]=ccv3;  
varnome[f]=f;  
varnome[qn]=q/n;  
varnome[cm8]=cm8;  
varnome[cm10]=cm10;  
varnome[ptq1sp]=ptq1 sp;  
varnome[qnsp]=q/n sp;  
varnome[m8sp]=m8 sp;  
varnome[m1sp]=m1 sp;  
varnome[nsp]=n sp;
```

```
assign(sda,diretorio+sda_dmc);
```

```
rewrite(sda);
```

```
writeln (sda,'ESTE ARQUIVO CONTEM OS PARAMETROS RELATIVOS AO CONTROLADOR DMC');
```

```
writeln(sda);
```

```
writeln(sda);
```

```
writeln(sda);
```

```
writeln(sda,'No de instantes do modelo de conlucao N = ',Ninst:3);
```

```
writeln(sda);
```

```
writeln(sda,'No de predicoes das variaveis controladas R = ',R:3);
```

```
writeln(sda);
```

```
writeln(sda,'No de variaveis controladas C = ',C:3);
```

```
writeln(sda);
```

```
writeln (sda,'No de valores futuros das variaveis manipuladas calculado L = ',L:3);  
writeln(sda);
```

```
writeln(sda,'No de variaveis manipuladas M = ',M:3);
```

```
writeln(sda);
```

```
writeln(sda);
```

```
writeln(sda);
```

```

writeIn(sda,'VALORES DOS PESOS DOS ERROS DAS VARIÁVEIS CONTROLADAS');
writeIn(sda,'(DIAGONAL PRINCIPAL DA MATRIZ Q)');
con := pql;
repeat
  con := succ(con);
until ord(con)-4>=C;
con_fim := con;
for con:=pql to con_fim do
  begin
    centra(varnome[con],campo);
    writeIn(sda,' Q' + varnome[con] + ' ] = ',vetor_q[con]:4:2);
  end;
writeIn(sda,'VALORES DAS TAXAS DE APROXIMAÇÃO DOS SET POINTS DAS');
writeIn(sda,'VARIÁVEIS CONTROLADAS (DIAGONAL PRINCIPAL DA MATRIZ ALFA)');
writeIn(sda);
writeIn(sda);
writeIn(sda);
for con:=pql to con_fim do
  ALFA'+varnome[con]+' ] = ',vetor_alfa[con]:4:2);
writeIn(sda);
writeIn(sda);
writeIn(sda);
man := cml0;
repeat
  man := succ(man);
until ord(man)-1 >= M;
man_fim := man;
for man:= cml0 to man_fim do
  begin

```

```

VAR
VAR MATRIZ_K : KTIPO);
YRESTR : YTIPO;
VETOR_R : VETOR_MANTIPO;
PROCEDURE GERA_K ( VETOR_Q : VETOR_CONTIPO;
*****
)
END; {FINAL DE GRAVA_DMC}

close(sda);
writeIn(sda,'MOVIMENTO TOTAL = ',total:15);
for man := cm10 to cm8 do total := total+MOV_MAN[man];
total := 0;
writeIn(sda,'MOV DA VAR MANIPULADA '+varnome[man]+' = ',MOV_MAN[man]:15);
for man := cm10 to cm8 do
writeIn(sda);
writeIn(sda,' VALORES DE MOVIMENTO DAS VARIÁVEIS MANIPULADAS NA SIMULACAO');
writeIn(sda);
writeIn(sda);
writeIn(sda,'ISE TOTAL = ',total:15);
for con := p1q1 to n do total := total+ISE[con];
total := 0;
writeIn(sda);
writeIn(sda,'ISE['+varnome[con]+' ] = ',ISE[con]:15);
for con:=p1q1 to n do
writeIn(sda);
writeIn(sda,' VALORES DE ISE DA SIMULACAO');
writeIn(sda);
writeIn(sda);
end;
writeIn(sda,' R['+varnome[man]+' ] = ',vetor_r[man]:4:2);
centra(varnome[man],campo);

```

{Calculo de At*Q*A = ATQA}

prod_matxdiaq(AT,lat,cat,L*Mmax,R*Cmax,matriz_q,AT):

{Calculo de At*Q = AT}

uni_op_mat(A,R*C,L*M,R*Cmax,L*Mmax,'t',AT,lat,cat,L*Mmax,R*Cmax):

{Calculo de At = AT}

{GERACAO DE MATRIZ_K}

{ grava_mat(matriz_r,l,L*M,l,L*Mmax,diretorio,'R.mat'); }

g_mat_diag_lin(vetor_r,M,r_fat,matriz_r,L);

{Geracao de matriz_r}

----->

{ grava_mat(matriz_q,l,C*R,l,Cmax*R,diretorio,'Q.mat'); }

g_mat_diag_lin(rest_r_q,C,q_fat,matriz_q,R);

for con := pql to n do rest_r_q[con] := vetor_q[con]* yrest_r[ord(con)-4];

{Geracao de matriz_q}

----->

BEGIN

----->

con : contipo;

i,j : byte;

lpsi,cpsi : byte;

lat,cat,latqa,catqa : byte;

matriz_r : rtipo;

rest_r_q : vetor_contipo;

matriz_q : qtipo;

ATQA : atqa_tipo;

AT : at_tipo;

```

bi_op_mat(AT,lat,cat,L*Mmax,R*Cmax,'*',
A,R*C,L*M,R*Cmax,ATQA,latqa,catqa,L*Mmax,L*Mmax);
} grava_mat(ATQA,latqa,catqa,L*Mmax,L*Mmax,diretorio,'atqa.mat');
} soma_mat_diag(ATQA,latqa,catqa,L*Mmax,L*Mmax,matriz_R,ATQA);
} grava_mat(ATQA,latqa,catqa,L*Mmax,L*Mmax,diretorio,'atqar.mat');
}
(Calculo de  $1/(A^TQ^T A+R) = ATQA$ )
uni_op_mat(ATQA,latqa,catqa,L*Mmax,L*Mmax,'I',
ATQA,latqa,catqa,L*Mmax,L*Mmax);
} grava_mat(ATQA,latqa,catqa,L*Mmax,L*Mmax,diretorio,'atqari.mat');
}
(Calculo de  $1/(A^TQ^T A+R) = ATQA$ )
bi_op_mat(ATQA,latqa,catqa,L*Mmax,L*Mmax,'*',
AT,lat,cat,L*Mmax,R*Cmax,AT,lat,cat,L*Mmax,R*Cmax);
} grava_mat(AT,lat,cat,L*Mmax,R*Cmax,diretorio,'psi.mat');
}
(Montagem de K utilizando as primeiras M linhas de  $1/(A^TQ^T A+R) = AT^Q$ )
for i := 1 to M do
for j := 1 to cpsi do matriz_K [i,j] := AT [i,j];
grava_mat(matriz_K,M,cpsi,Mmax,R*Cmax,diretorio,'K.mat');
END;
}*****}
PROCEDURE RESTRICAQ ( VAR V: VARIAVEIS; {VARIAVEIS DE PROCESSO}
VAR RESTR : VETOR_CONTIPO; { VETOR DE RESTRICOES DAS
VARIAVEIS CONTROLADAS}
VAR YRESTR : YTIPO; {VETOR DE RESTRICOES NA FORMA
VARIAVEIS DE PERTURBACAO}
VAR ESTADO : BOOLEAN; {INDICADOR DA MUDANCA DE
DE RESTRICOES VIOLADAS}
VAR
con,jcon : contipo;
restr_ant : vetor_contipo;

```

qnsparnt : real; { variavel para armazenamento do setpoint anterior de qn }

produit : byte;

CONST

nli = 7000; {rpm} {limite inferior de n}

nls = 10600; {rpm} {limite superior de n}

nms = 500; {rpm} {margem de segurança de nls e nli}

nmorto = 500; {rpm} {insensibilidade de mudança de violacao de nls e nli}

mli = 3; {kg/s} {limite inferior de mli}

mllms = 0.3; {kg/s} {margem de segurança de mli}

milmorto = 0.3; {kg/s} {insensibilidade a de mudança de violacao de mli}

qnl = 1.373e-4; {m3/(s*rpm)} {limite inferior de q/n (surge)}

qms = 1.4e-5; {m3/(s*rpm)} {margem de segurança de qnl}

qmorto = 1.4e-6; {m3/(s*rpm)} {insensibilidade a mudança de violacao de qnl}

BEGIN

{ATUALIZACAO DE RESTR_ANT}

restr_ant := restr;

{VERIFICACAO DE n}

if (vln) < nli+ nms+ nmorto) and (vln) > nls - nms - nmorto) then

begin

inter_Tln,n] := 0;

inter_Tm8,n] := 1;

vlnsp] := y0[n];

end;

if (vln) > nli+ nms) or (vln) < nls - nms) then

begin

inter_Tln,n] := 1;

inter_Tm8,n] := 0;

if vln] <= nli+ nms then vlnsp] := nli + nms;

if vln] >= nls- nms then vlnsp] := nls - nms;

```

end;
    if v[m1] >= m1 + m1ms + m1mto then
    begin
        v[m1sp] := y0[m1];
        inter_T[m1,m1] := 0;
        inter_T[m8,m1] := 1;
    end;
    if v[m1] <= m1 + m1ms then
    begin
        v[m1sp] := m1 + m1ms;
        inter_T[m1,m1] := 1;
        inter_T[m8,m1] := 0;
    end;
    {VERIFICACAO DE Q/N}
    if v[qn] >= qn + qnms + qnmorto then
    begin
        if v[qnsp] = qn + qnms then v[qnsp] := qnspant;
        if v[qn] <= qn + qnms then
        end;
        inter_T[qn,qn] := 1;
        inter_T[m8,qn] := 0;
    end;
    if v[qn] <= qn + qnms then
    begin
        if v[qnsp] = qn + qnms then v[qnsp] := qnspant;
        if v[qn] >= qn + qnms then
        end;
        inter_T[qn,qn] := 1;
        inter_T[m8,qn] := 0;
    end;
end;

```


VARIÁVEIS DE PERTURBAÇÃO }
 PROCEDURE CONV_Y (V:VARIÁVEIS; {VARIÁVEIS A SEREM CONVERTIDAS EM
 }*****

```

(VERIFICACAO DE MI E n CONJUNTOS)
  if inter_T[m1,m1]*inter_T[n,n] = 1 then inter_T[ptq1,ptq1]:=0
  else inter_T[ptq1,ptq1] := 1;
  {CALCULO DE RESTR}
  for con:=ptq1 to n do
  begin
    product:=1;
    for jcon:=ptq1 to n do
    begin
      product:= inter_T [con,jcon] * product;
    end;
    restr[con] := product;
  end;
  {VERIFICACAO DA MUDANCA DE ESTADO}
  estado := false;
  for con := ptq1 to n do
  if restr_ant[con]<restr[con] then estado := true;
  {GERACAO DE YRESTR}
  for con := ptq1 to n do
  if restr[con]>0 then yrestr[ord(con)-4] := restr[con]/restr[con]
  else yrestr[ord(con)-4] := restr[con];
  END; { FINAL DE RESTRICAO}

```

```

YRESTR: YTIPO;(VETOR DE RESTRICOES NA FORMA DE
VARIAVEIS DE PERTURBACAO)
VAR Y, (VARIAVEIS DE PERTURBACAO CONTROLADAS)
YSP: YTIPO; (SET POINTS DE PERTURBACAO)
VAR ISE: VETOR_CONTIPO ); (ERRO QUADRATICO)
{ CONV_Y converte as variaveis controladas e set points na forma de variaveis
de processo e atualiza o valor de ISE}
VAR
con : contipo;
sp : sptipo;
bovar : boolean;
BEGIN
for con:=ptq1 to n do
y[ord(con)-4]:=(v[con]-y0[con])* escly[con];
con := ptq1;
sp := ptq1sp;
bovar := true;
while (sp >= nsp) and bovar do
begin
ysp[ord(sp)-9]:=(v[sp]-y0[con])*escly[con];
ISE[con]:=sqr((v[con]-v[sp])*escly[con])*dtca*yrestr[ord(con)-4]+ISE[con];
if con < n then con := succ(con) ;
if sp > nsp then sp := succ(sp) else bovar := false;
end;
END; (FINAL DE CONV_Y)
}*****
PROCEDURE CONV_U ( DUT : UTIPO ; (VARIAVEIS MANIPULADAS DE PERTURBACAO)
VAR V: VARIAVEIS; (VARIAVEIS CONVERTIDAS NA FORMA
ORIGINAL SEM SATURACAO)
VAR MOV_MAN : VETOR_MANTIPO); (VETOR INTEGRAL
DE MOVIMENTO DAS

```

VARIÁVEIS MANIPULADAS)
 {CONV_U converte as variáveis manipuladas de perturbação
 na forma original e evita a sua saturação e atualiza o movimento das
 variáveis manipuladas}

VAR
 valman : real;
 man : mantpo;

BEGIN

for man:=cm10 to cm8 do

begin

valman:=valman+dut[ord(man)-1]/esc[man];

if valman<=0 then

begin

dut[ord(man)-1]:=-valman*esc[man];

valman:=0;

end

else valman:= valman;

MOV_MAN[man]:=sqr(dut[ord(man)-1])+MOV_MAN[man];

end;

END; {FINAL DE CONV_U}

{*****}

PROCEDURE CONTROLE (VAR V: VARIÁVEIS ; {VECTOR DE VARIÁVEIS DO PROCESSO}
 T: REAL); {TEMPO}

VAR

y : ytipo;

ysp : ytipo;

estado : boolean;

yrestr : ytipo;

```

BEGIN
  if t-tca>dtca then
    begin
      RESTRICA0 ( V , RESTR, YRESTR, ESTADO);
    if ESTADO then
      GERA_K ( VETOR_Q , VETOR_R , YRESTR, MATRIZ_K );
      CONV_Y ( V , YRESTR, Y , YSP,ISE);
      DMC(Y,YSP,YRESTR,C,DUT,M,MATRIZ_K);
      CONV_U (DUT, V, MOV_MAN);
      tca:=t;
    end;
  if t>=tf then
    GRAVA_DMC ( R,
      C, {No de variaveis controladas}
      L, {No de valores futuros das variaveis
      manipuladas}
      M, {No de variaveis manipuladas}
      NINST , {No de instantes do modelo de convolucao}
      VETOR_Q, {Vetor dos pesos dos erros}
      VETOR_ALFA, {Vetor de taxa de aproximacao dos
      set points}
      VETOR_R, {Vetor de atenuacao de mudanca nas
      variaveis manipuladas}
      DIRETORIO, {Diretorio para gravacao dos parametros}
      SDA_DMC , {Arquivo para gravacao dos parametros}
      ISE , {Erro quadratico}
      MOV_MAN ); {Movimento das variaveis manipuladas}
    END; {FINAL DE CONTROLE}
  }*****
  PROCEDURE GERA_ALFA ( VETOR_ALFA : VETOR_CONTIPO ;
    VAR I_ALFA : ALFATIPO);
  VAR
    lalfa,calfa : byte;
    alfa,id,malfa : subalfa;
    i,j : byte;
    istr : string[2];
  BEGIN

```

```

}-----}
BEGIN
{Geracao de alfa}
g_mat_diag(vetor_alfa,c,alfa,1,cmax,cmax);
grava_mat(alfa,c,c,cmax,cmax,diretorio,'alfa.mat');
}-----}
{Geracao da matriz identidade id}
fillchar(id,sizeof(id),0);
for i:=1 to C do id[i,i] := 1;
}-----}
{Calculo dos I_alfa}
alfa := alfa;
for i:= 1 to R do
begin
bi_op_mat(id,c,c,cmax,cmax,'-',
alfa,c,c,cmax,cmax,l_alfa[i],alfa,calfa,cmax);
bi_op_mat(alfa,alfa,calfa,cmax,cmax,'*',
alfa,alfa,calfa,cmax,malfa,alfa,calfa,cmax);
str(i,i,istr);
grava_mat(l_alfa[i],alfa,calfa,cmax,cmax,diretorio,
'l_alfa'+istr+'.mat');
end;
END; {FINAL DE GERA_ALFA}
{*****}
{INICIALIZACAO}
BEGIN
}-----}
{Inicializacao de y0}
y0[ptq1] := 1.813e6;
y0[qn] := 1.724e-4;
y0[m8] := 0.1;

```

```

y0[m1] := 4.860;
y0[n] := 8050;
-----
{Inicializacao de escly}
escly[ptq1] := 1.25e-5;
escly[qn] := 1.73e4;
escly[m8] := 0.5;
escly[m1] := 0.81;
escly[n] := 6.21e-4;
-----
{Inicializacao de escu}
escu[m10] := 8.33;
escu[ccv3] := 6.21e-4;
escu[m8] := 0.5;
-----
{Inicializacao de tca}
tca := -5;(s)
-----
{Inicializacao de DUT}
flllchar(dut,sizeof(dut),0);
-----
{Definicao dos valores de alfa}
vetor_alfa[ptq1] := 0.5;
vetor_alfa[qn] := 0.5;
vetor_alfa[m8] := 0.5;
vetor_alfa[m1] := 0.5;
vetor_alfa[n] := 0.5;
-----
}
{Definicao dos valores de q}
q_fat := 1;
vetor_q[ptq1] := 1;

```

```

}
v vetor_q[qn] := 1;
v vetor_q[m] := 1;
v vetor_q[m8] := 1;
v vetor_q[n] := 1;
}
{Definicao dos valores de r}
r_fat := 1;
v vetor_r[cm10] := 1;
v vetor_r[ccv3] := 20;
v vetor_r[cm8] := 1;
}
{Inicializacao de RESTR}
for con:=ptq1 to n do restr[con]:=9;
}
{INICIALIZACAO DE INTER_T}
for con:= ptq1 to n do
for jcon:= ptq1 to n do inter_T[con,jcon] := 1;
}
{Leitura de A}
le_mat(A,R*C,L*M,R*Cmax,L*Mmax,diretorio,'matriz_A.mat');
}
GERA_ALFA ( VETOR_ALFA,I_ALFA);
}
}
}
END. {FINAL DA UNIDADE CONTROLE}
}
*****}

```

J : byte; {Contador}

VAR

{ M : byte; {Variaveis manipuladas}

PROCEDURE INIC_DMC (C : byte; {No de variaveis controladas}

H : array[1..Ninst] of htipo; {Matrizes H[!]}

enth : file of htipo; {Arquivo de leitura das matrizes H[!]}

DU : array[1..Ninst..-1] of utipo; {matriz das acoes de controle anteriores}

DUA : utipo; {Acao de controle anterior }

VAR

{

IMPLEMENTATION

{A procedure DMC simula um controlador DMC}

MATRIZ_K : KTIPO; {Matriz pseudoInversa}

M : byte; {No de variaveis manipuladas}

VAR DUT : UTIPO; {Variaveis manipuladas}

C : byte; {No de variaveis controladas}

YRESTR : YTIPO; {restricoes}

YSP : YTIPO; {Set points}

PROCEDURE DMC (Y : YTIPO; {Variaveis controladas}

USES VAR_DMC,OP_MAT,OPERADOR;

INTERFACE

{ A unidade DMC simula um controlador DMC}

(\$r+)

UNIT U_DMC;

BEGIN

{Inicializacao de DVA (DVA=0)}
filichar(DVA,sizeof(DVA),0);

{Inicializacao de DU (DU=0)}
filichar(DU,sizeof(DU),0);

{Leitura das matrizes H[i]}

assign(enth,diretorio+'h.dad');

reset(enth);

for j:=1 to Ninst do read(enth,H[j]);

close(enth);

END; {FINAL DA PROCEDURE INIC_DMC}

{*****}

PROCEDURE DMC (Y : YTIPO; {Variaveis controladas}

YSP : YTIPO; {Set points}

YRESTR : YTIPO; {Restricoes}

C : byte; {No de variaveis controladas}

VAR DUT : UTIPO; {Variaveis manipuladas}

M : byte; {No de variaveis manipuladas}

MATRIZ_K : KTIPO; {Matriz pseudoinversa}

VAR

E : etipo; {Matriz de erros previstos}

ldut,cdut : byte; {Dimensoes de DUT}

```

procedure Atual_E ( y : ytipo; {Variaveis controladas}
  ysp : ytipo; {Set points}
  yrestr : ytipo; {Restricoes}
  dua : utipo; {Ultimo valor das variaveis manipuladas}
  C : byte; {No de variaveis controladas}
  M : byte; {No de variaveis manipuladas}
  VAR E : etipo; {vetor de erros previstos}
  {Atual_E atualiza o vetor E de erros previstos }
var
  Ek : ytipo; {Ek = ysp - y}
  lek,cek : byte; {Dimensoes de Ek}
  l_alfaxEk : ytipo; {l_alfaxEk = (1-Alfa**j)xEk}
  laek,caek : byte; {Dimensoes de l_alfaxEk}
  HxDU : { HxDU = H[i]xDU[j-i]}
  Ihxdu, chxdu : byte; {Dimensoes de HxDU}
  Pj : ytipo; { Pj = P[j] = P [j-1] + S ( H[i] x DU [j-i]) [i=j-1..Ninst]}
  lpj,cpj : byte; {Dimensoes de Pj}
  l_alfaxEk_P : ytipo; {l_alfaxEk_P=(1-Alfa**j)xEk-P[j]}
  laekp,caekp : byte; {Dimensoes de l_alfaxEk_P}
  i : shortint; {Contador}
  j,w : byte; {Contadores}
begin
  {Calculo de Ek = ysp - y }
  bi_op_mat(ysp,C,l,Cmax,l,-',y,C,l,Cmax,l,Ek,lek,cek,Cmax,l);
  {Atualizacao de du (vetor das acoes anteriores de controle)}
  for i:=1-Ninst to -2 do du[i] := du[i+1];
  du[-1] := dua;
  {Inicializacao de P[j] = P [j-1] + S ( H[i] x DU [j-i]) [i=j-1..Ninst]}
  { P[j] = 0 }

```

```

fillchar(Pj,sizeof(Pj),0);
for j:=1 to R do
begin
  {Calculo de (1 - Alfa**j) x Ek }
  bi_op_mat(I_alfa[j],C,C,Cmax,Cmax,**,Ek,lek,cek,Cmax,1,I_alfaxEk,laek,caek,Cmax
  ,1);
  {Calculo de P[j] = P [j-1] + S (H[i] x du [j-1]) [i=j-1..Ninst]}
  for i:=j+1 to Ninst do
begin
  bi_op_mat(H[i],C,M,Cmax,Mmax,**,DU[j-i],M,1,Mmax,1,HxDU,ihxdu,chxdu,Cmax,1);
  bi_op_mat(Pj,C,1,Cmax,1,'+',HxDU,ihxdu,chxdu,Cmax,1,Pj,lpj,cpj,Cmax,1);
  end;
  {Calculo de (I-alfa**j)xEk-P[j]}
  bi_op_mat(I_alfaxEk,laek,caek,Cmax,1,'-',Pj,lpj,cpj,Cmax,1,
  I_alfaxEk_P,laekp,caekp,Cmax,1);
  {Aplicacao das restricoes yrestr}
  for w:=1 to C do
    I_alfaxEk_P [w] := yrestr [w]* I_alfaxEk_P [w];
  {Montagem de E}
  for w:=1+(j-1)*C to j*C do
    E[w]:=I_alfaxEk_P [w-(j-1)*C];
  end;
end; {Final de atual_E}
}-----}
BEGIN {Inicio da procedure DMC}

```

```

{Atualizacao da acao de controle anterior DUT}
DUA := DUT;
{Atualizacao de E}
Atual_E (Y, YSP, YRESTR, DUA, C, M, E);
grava_mat(E, R*C, I, R*Cmax, I, DIRETORIO, 'E.MAT');
{Calculo da acao de controle a ser implementada no instante t DUT}
bi_op_mat(Matriz_K, M, R*C, Mmax, R*Cmax, **
, E, R*C, I, R*Cmax, I, DUT, Idut, cdut, Mmax, I);
END: {Final da procedure DMC}
}*****
{INICIALIZACAO}
BEGIN
  INIC_DMC(C, M);
END.
}*****

```

APLICAÇÃO DO CONTROLE PID COM OVERRIDE NA INSTALAÇÃO
COM COMPRESSOR CENTRÍFUGO

Neste capítulo apresentamos a aplicação do controle por malhas de controladores PID conjugadas por override em uma unidade de reformação catalítica (URC). Inicialmente descrevemos o esquema de controle da URC, identificando os pares de variáveis manipuladas e controladas e explicando a hierarquia do override. Apresentamos a rotina PID, que simula um algoritmo PID de velocidade, e a rotina CONTROL modificada, que simula o esquema de controle de malhas PID conjugadas por override. Finalmente fazemos o ajuste das parâmetros dos PIDs e mostramos os resultados de simulações de transitórios na URC, operando com os controladores PID ajustados.

5.1 O ESQUEMA DE CONTROLE PID COM OVRIDE DA URC

Baseamos o esquema de controle PID com override da URC no esquema de controle original proposto para a instalação na referência 1 (figura 5.1). Modificamos este esquema no sentido de aproximá-lo dos objetivos de controle propostos para o DMC nas diversas condições de trabalho (figura 5.2).

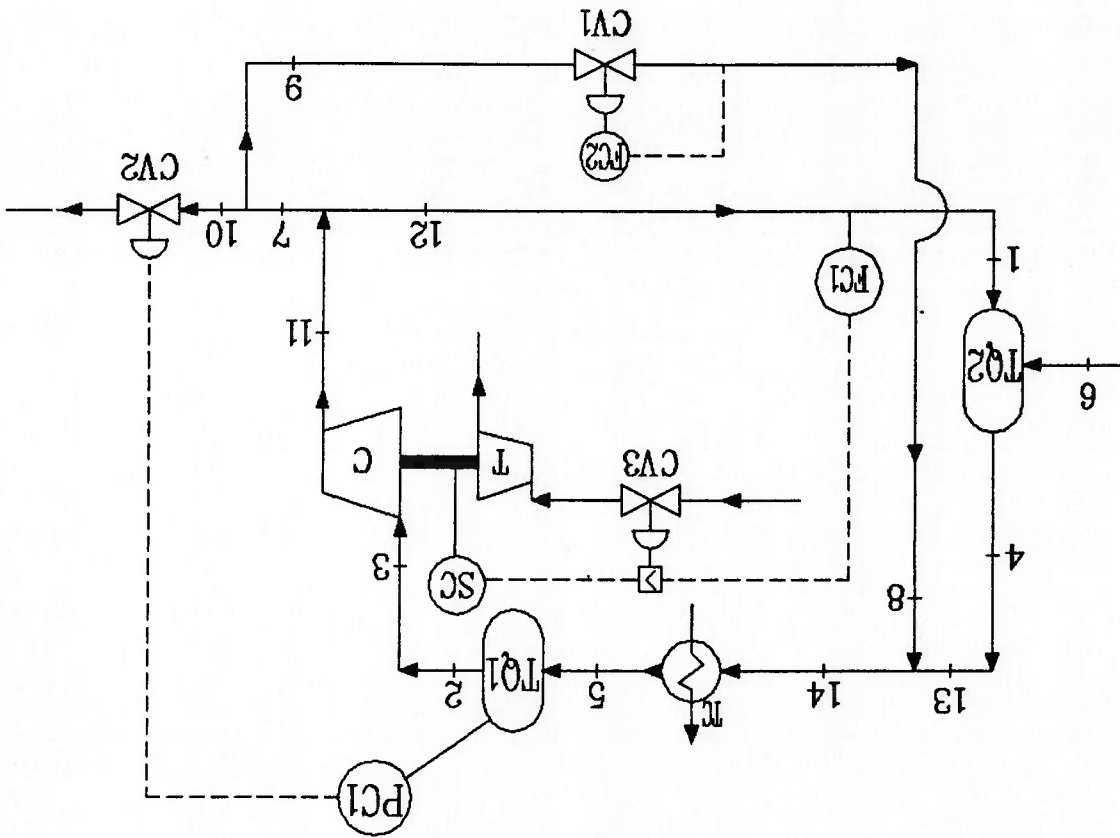
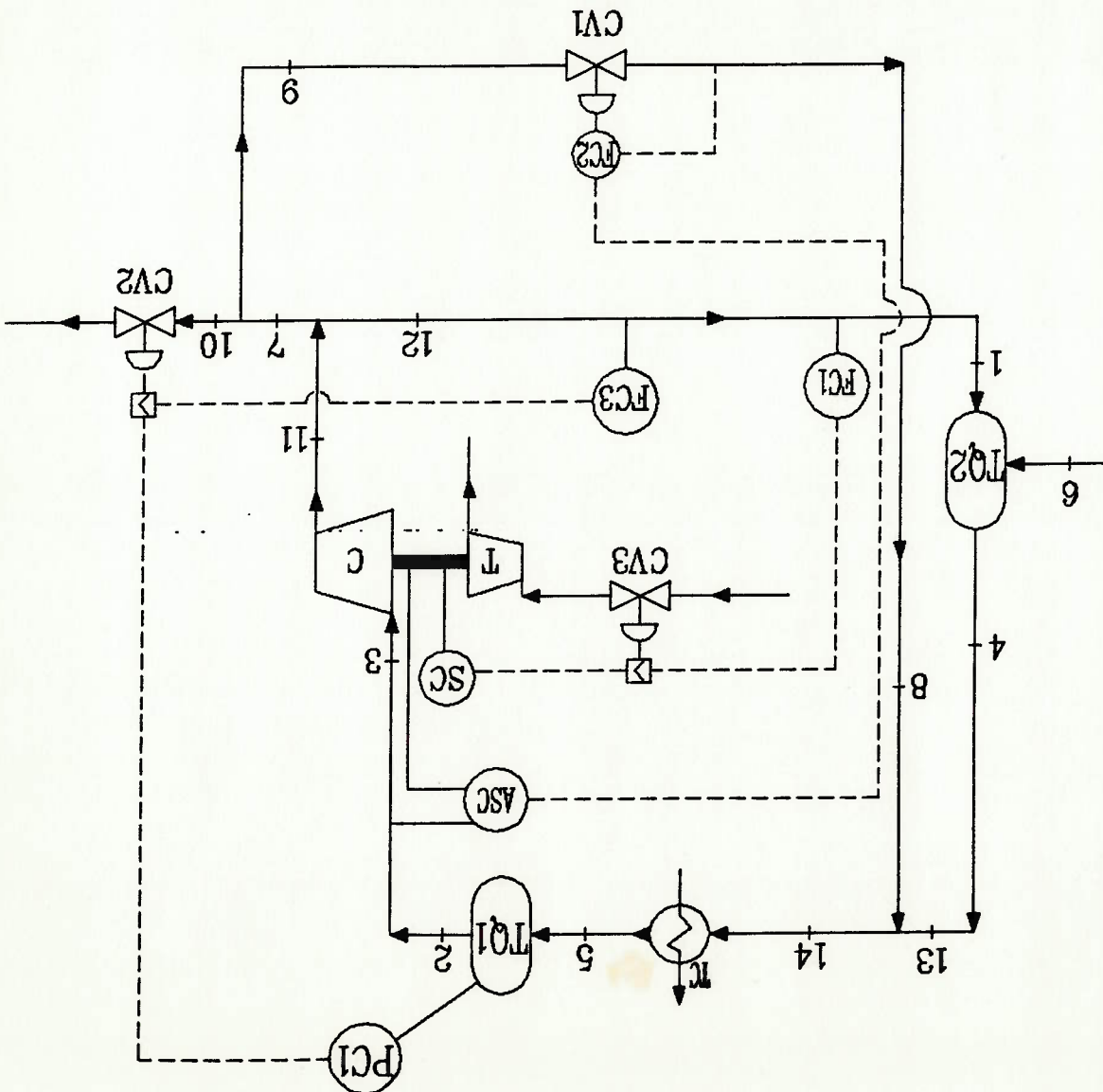


Figura 5.1 Esquema de controle PID original proposto para a URC

Os objetivos de controle, restrições, set points, estados de operação, margens de segurança e intervalos diferenciais são os mesmos apresentados na seção 4.7. O PID é um algoritmo de controle mono-variável, portanto é necessário definir em cada estado de operação os pares de variáveis controladas e manipuladas.

Em operação normal, a pressão no TQ-1, P^{TQ1} , é controlada manipulando-se a vazão de saída da URC, m^{10} , através de cm^{10} . O PC-1 controla P^{TQ1} , a pressão no TQ-1, P^{TQ1} , é controlada por um dispositivo de override que envia um setpoint fixo, igual a m^8 para o FC-2, se o compressor estiver afastado da condição de surge (conforme definido em 4.7). Usando o DMC, a eficiência politrópica do compressor é mantida o mais próxima possível do seu valor máximo, controlando-se q/n . Com o PID é impossível controlar q/n , pois a única variável manipulada disponível para fazê-lo é a rotação do compressor, n

Figura 5.2 Esquema de controle PID similar ao DMC para a URC



através de ccv_3 . Observando a listagem 4.2, verificamos que ccv_3 não tem influência sobre q/n . Em operação normal, a rotação do compressor é selecionada manualmente pelo operador. Admitimos que ela tenha o valor nominal de 8050 rpm, obtido em simulação de operação em regime permanente da URC.) Portanto a URC tem controle mono-variável, apenas de P_{TQ1} , quando opera em estado normal.

Em surge, o mecanismo de override faz com que o controlador anti-surge ASC passe a controlar q/n , manipulando a vazão de recirculação do compressor, m_8 , através do setpoint cm_8 enviado ao FC-2. PC-1 controla P_{TQ1} , manipulando cm_{10} .

Em vazão crítica, a vazão m_1 é controlada pelo FC-1, que manipula a rotação do compressor, n , através de ccv_3 . PC-1 controla P_{TQ1} , manipulando cm_{10} .

Em rotação crítica, a rotação do compressor, n , é controlada pelo SC, que manipula ccv_3 . PC-1 controla P_{TQ1} , manipulando cm_{10} .

Caso ocorra surge e rotação crítica, SC controla n , manipulando ccv_3 ; PC-1 controla P_{TQ1} , manipulando cm_{10} ; e ASC controla q/n , manipulando cm_8 .

Caso ocorra surge e vazão crítica, FC-1 controla m_1 , manipulando ccv_3 ; PC-1 controla P_{TQ1} , manipulando cm_{10} ; e ASC controla q/n , manipulando cm_8 .

Finalmente, caso ocorra surge, vazão crítica e rotação crítica, FC-3 controla m_1 , manipulando cm_{10} ; SC controla n , manipulando ccv_3 ; e ASC controla q/n , manipulando cm_8 . O controle de P_{TQ1} é abandonado neste caso.

A rotina PID (listagem 5.1) simula um algoritmo de controle PID digital de velocidade. Este algoritmo de controle é dado pela equação

$$\Delta u = K_c \left[\left(1 + \frac{t_i}{T} + \frac{T}{t_d} \right) e - \left(1 + \frac{T}{2t_d} \right) e^a + \frac{T}{t_d} e^{aa} \right] \quad (5.1)$$

onde

$T = dtca =$ intervalo de amostragem,
 $\Delta u =$ variação da variável manipulada no instante t ,
 $e = y - y^{sp} =$ erro da variável controlada no instante t ,
 $e^a =$ erro da variável controlada no instante $t-T$,
 $e^{aa} =$ erro da variável controlada no instante $t-2T$,
 $K_c =$ ganho proporcional do controlador,
 $t_i = t_{intg} =$ tempo integral do controlador,
 $t_d = t_{der} =$ tempo derivativo do controlador.

A rotina PID recebe da rotina CONTROL: o intervalo de amostragem do controlador, dtca; o erro da variável controlada no instante t, e; o erro da variável controlada no instante t-dtca, e^a; o erro da variável controlada no instante t-2dtca, e^{aa}; o ganho proporcional do controlador, K_c; o tempo integral do controlador, TINTG; o tempo derivativo do controlador, TDER. Calcula o valor da variação da variável manipulada, dut, no instante t, usando a equação 5.1. E atualiza os valores de e^a e e^{aa}. Finalmente, a rotina PID devolve dut, e^a e e^{aa} atualizados à rotina CONTROL.

A rotina CONTROLE (lístagem 5.1) simula o algoritmo de controle por malhas PID conjugadas por override descrito na seção 5.1. CONTROLE recebe do programa CURC o vetor de variáveis do processo, v, que inclui as variáveis manipuladas, controladas e set points, e o instante de simulação, t. Verifica se o instante de simulação é um instante de amostragem. Caso não seja um instante de amostragem, a rotina é encerrada e as variáveis manipuladas retornam ao programa sem modificação. Num instante de amostragem, a rotina calcula os valores das variáveis manipuladas e os devolve ao programa CURC. Faz a conversão das variáveis controladas e set points de acordo com a equação 4.46 e integra os erros quadráticos (ISE) (seção 4.12), usando a rotina CONV_Y (lístagem 5.1). Conforme o estado de operação da URC, CONTROLE implementa os overrides e calcula, através da rotina PID, a variação das variáveis manipuladas, dut. Em seguida, usando a rotina CONV_U, converte dut na forma de variáveis físicas de acordo com a equação 4.48. Caso haja saturação de alguma das variáveis manipuladas, CONV_U retorna o valor limite da variável saturada à rotina CONTROLE.

CONTROLE está contida na unidade U_CONTRI (lístagem 5.1), que também inicializa os parâmetros dos controladores PID.

5.4 AJUSTE DOS PARÂMETROS DOS CONTROLADORES PID

Ajustamos os controladores PID fazendo considerações sobre os limites de variação das variáveis controladas e manipuladas inicialmente. O ajuste final dos controladores é baseado no critério de erro quadrático integral (ISE) (equação 4.50) e no movimento das variáveis manipuladas (MOV) (equação 4.51). (Não é possível ajustar os controladores pelo método de Ziegler-Nichols porque as variáveis da URC não são instabilizadas por ganhos proporcionais finitos nos controladores.) Adotamos um intervalo de amostragem de T_s (dica = $T = 1s$).

Para o controlador PC-1, consideramos:

a) que a válvula CV-2 esteja completamente fechada quando a pressão no TQ-1 cai para 1,5 MPa;
 b) que a válvula CV-2 permita a passagem de uma vazão igual à vazão na condição nominal de operação da URC (simulação 1 da seção 3.5.2) quando a pressão no TQ-1 é igual à pressão nominal, 1,8 MPa.

Ou seja,

$$cm_{10} = 0 \text{ kg/s} ,$$

$$\text{para } P_{TQ1} = 1,5 \text{ MPa} ,$$

$$e \quad cm_{10} = 0,6 ,$$

$$\text{para } P_{TQ1} = 1,8 \text{ MPa} .$$

Definindo

Δy = variação da variável controlada em relação ao seu valor nominal,

e Δu = variação da variável manipulada em relação ao seu valor nominal,

temos

$$K'_c = \frac{\Delta y}{\Delta u}$$

onde K'_c = ganho do controlador.

(5.2)

$$r_1^p = 0.$$

Usando $K^c = 1,33$ e aplicando um degrau de setpoint em P^{TQT} , fazemos simulações para diferentes valores de τ_1 no PC-1 (tabela 5.1). Escolho $\tau_1 = 10$ s, porque apresenta valores pequenos de ISE e MOV (figura 5.3). Não é necessário o termo derivativo no controle de pressão de um vaso [19], portanto

Este valor de K^c é o adotado para que o controlador opere conforme as condições impostas acima.

$$K^c = 1,33.$$

Transformando o ganho K^c do PC-1, temos

$$(y_r - y_0)^{-1} = \text{ESCLY, dado na listagem 4.7.}$$

$$(u_d - u_0)^{-1} = \text{ESCLU, dado na listagem 4.7.}$$

onde K^c = ganho do controlador na forma transformada,

$$K^c = \frac{(y_r - y_0)^{-1} K^c}{(u_d - u_0)^{-1} K^c} \quad (5.3)$$

Nos controladores PID, as variáveis são usadas na forma transformada pelas equações 4.46 e 4.48. Então precisamos transformar o ganho calculado pela equação 5.2. A relação de transformação é

$$K^c = \frac{0 - 0,6}{(1,5 - 1,8) \times 10^6} = 2 \times 10^{-6}.$$

Aplicando a equação 5.2 ao PC-1,

$$K^c = -1,02.$$

Aplicando a equação 5.3, temos

$$K^c = \frac{0 - 1,5 \times 10^{-4}}{5,4 - 0,1} = -3,54 \times 10^{-4}$$

Portanto, aplicando a equação 5.2,

$$q/n = 1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ rpm}^{-1}$$

b) que a válvula CV-1 feche até permitir a vazão de recirculação mínima, 0,1kg/s, quando q/n é igual ao setpoint do controlador anti-surge, ou seja, quando q/n = 0;

a) que a válvula CV-1 permita uma vazão igual à nominal do compressor, 5,4 kg/s, quando a vazão na linha 12-1 é totalmente bloqueada, ou seja, quando

Então consideramos:

Ajustado PC-1, passamos ao ajuste do controle anti-surge, ASC. Staroselsky [15] recomenda que a válvula de recirculação do controle anti-surge tenha capacidade igual à vazão nominal do compressor.

de simulação 1200s)

Tabela 5.1 Valores de ISE e MOV para degraus de 10% no setpoint de P_{TQ1} (tempo

K^c	t_i	ISE	MOV
1,33	∞	257	9,1
1,33	1	420	328,0
1,33	5	155	16,7
1,33	10	165	12,3
1,33	20	206	10,0

(E desnecessário o termo derivativo no controle de vazão [19].)

$$K^o = -0,2 \quad , \quad t_i = 20 \text{ s} \quad \text{e} \quad t_d = 0$$

do FC-1 é compressor, reduzimos K^o para -0,2 (tabela 5.3 e figura 5.5). O ajuste final menores valores de ISE levam a variações muito rápidas de rotação do crítica, e levantamos a resposta da URC para valores diferentes de t_i . Como os Aplicamos um degrau de -50% em f , levando a URC ao estado de surge e vazão

$$K^o = -0,45$$

Resultado

Para o controlador FC-1, assumimos:
 a) que a rotação do compressor atinja o limite que aciona o overrider de rotação, 10100 rpm, quando a vazão na linha 12-1 é zero;
 b) que a rotação do compressor seja a nominal, 8050 rpm, quando a vazão na linha 12-1 atinge o setpoint do controlador, 3,3kg/s.

1200s)

Tabela 5.2 Valores de ISE e MOV para degraus de -25% em f (tempo de simulação

K^o	t_i	t_d	ISE	MOV
-1,02	∞	0	18,00	0,07
-1,02	1	0	0,35	0,31
-1,02	5	0	0,21	0,10
-1,02	7	0	0,24	0,09
-1,02	10	0	0,29	0,08
-1,02	7	1	0,16	0,60

Adotamos $K^o = -1,02$ e fazemos simulações para diferentes valores de t_i no ASC, aplicando um degrau de -25% em f para levar o compressor à condição de surge (tabela 5.2 e figura 5.4). Selecionamos $t_i = 7$ s porque apresenta valores de ISE e MOV baixos. O termo derivativo não é usado porque provoca oscilações na resposta do processo. Portanto $t_d = 0$.

$$K^o = 4,7$$

Impondo estas condições, resulta

b) que a válvula CV-2 permita a passagem de uma vazão igual à vazão na condição nominal de operação da URC, $cm_{10} = 0,6 \text{ kg/s}$ (simulação 1 da seção 3.5.2), quando a vazão na linha 12-1 atinge o setpoint do FC-3, 3,3 kg/s.

a) que a válvula CV-2 esteja fechada, $cm_{10} = 0$, quando a vazão na linha 12-1 é 2 kg/s;

Finalmente, com o SC ajustado, é possível ajustar o FC-3. Admitimos:

$$r_p = 0$$

$$r_1 = 5 \text{ s}$$

$$K^o = -1;$$

No caso do SC, a função de transferência entre cv_3 e n é um atraso de primeira ordem com ganho 1 e constante de tempo 5 s (seção 3.3.5). Para um processo deste tipo recomenda-se o seguinte ajuste [19]:

Tabela 5.3 Valores de ISE e MOV para degraus de -50% em f (tempo de simulação 1200s)

K^o	r_1	ISE	MOV
-0,45	∞	378	1,20
-0,45	1	18	1,93
-0,45	5	13	1,36
-0,45	10	15	1,30
-0,45	20	23	1,24
-0,20	20	50	1,15

Aplicamos um degrau de -50% em f , levando a URC ao estado de surge, vazão crítica e rotação crítica e levantamos a resposta da URC para valores diferentes de t_1 . Escolhemos $t_1 = \infty$ porque a resposta da URC é instável para t_1 finito (tabela 5.4 e figura 5.6). Portanto

$$K_c = 4,7 \quad , \quad t_1 = \infty \quad e \quad t_d = 0$$

(É desnecessário o termo derivativo no controle de vazão [19].)

K_c	t_1	ISE	MOV
4,7	∞	59	1,1
4,7	1	730	47,0
4,7	5	487	23,0
4,7	10	345	14,0
4,7	20	237	9,0
4,7	50	143	6,0

Tabela 5.4 Valores de ISE e MOV para degraus de -50% em f (tempo de simulação 1200s)

Figura 5.3 Degrau de 10% em P^{101} . PC-1: $K_e=1,33$; $\tau_1=10$; $\tau_D=0$.

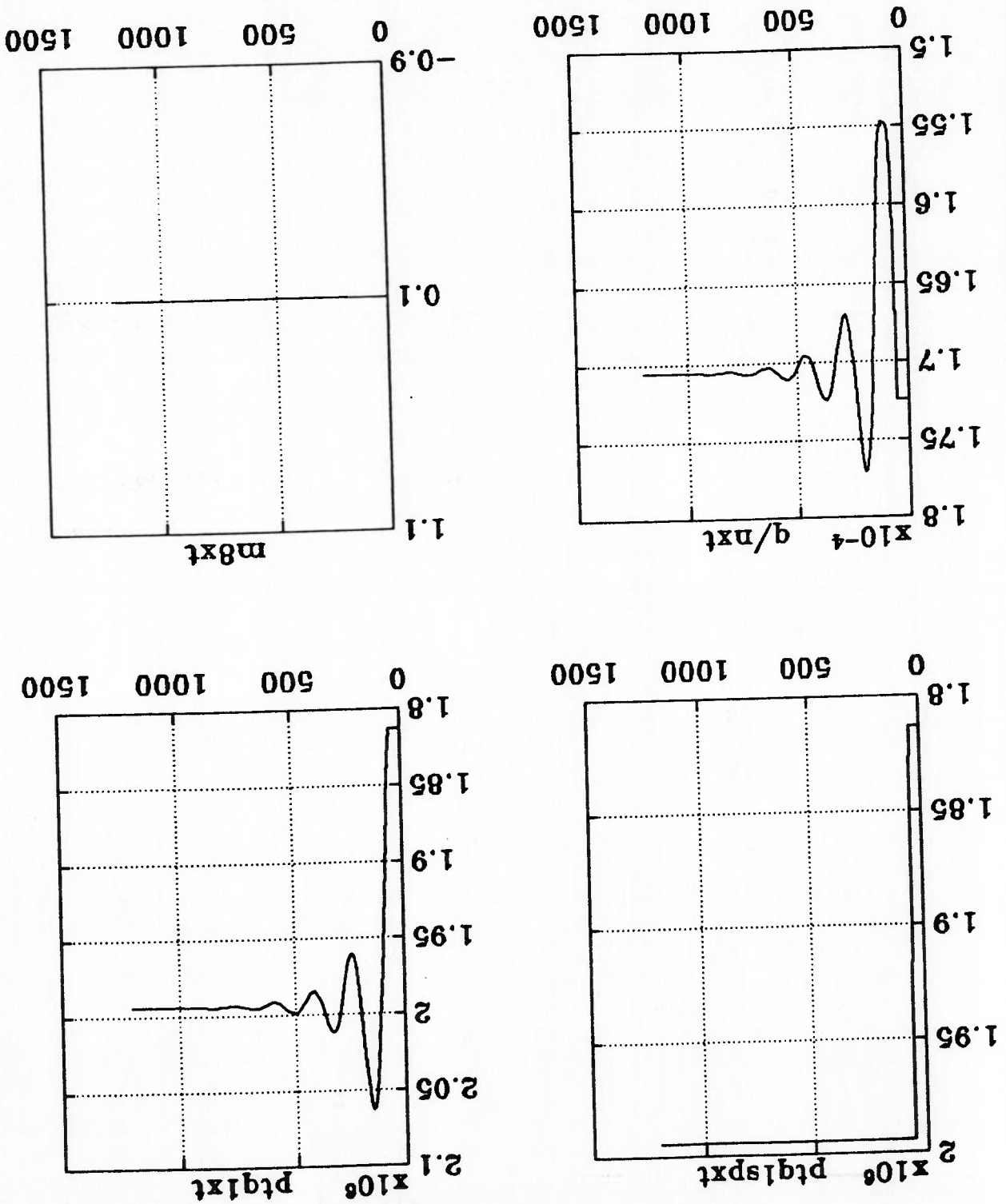


Figura 5.3 Degradação de 10% em P_{101} . PC-1: $K_c=1,33$; $\tau^1=10$; $\tau^d=0$. continuação

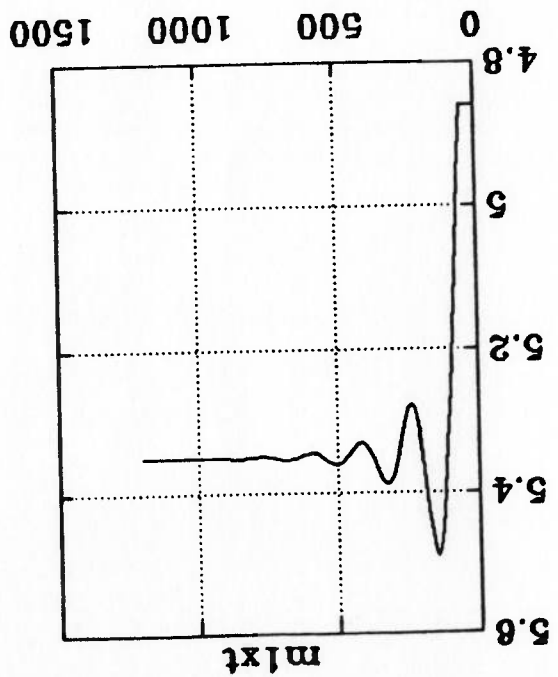
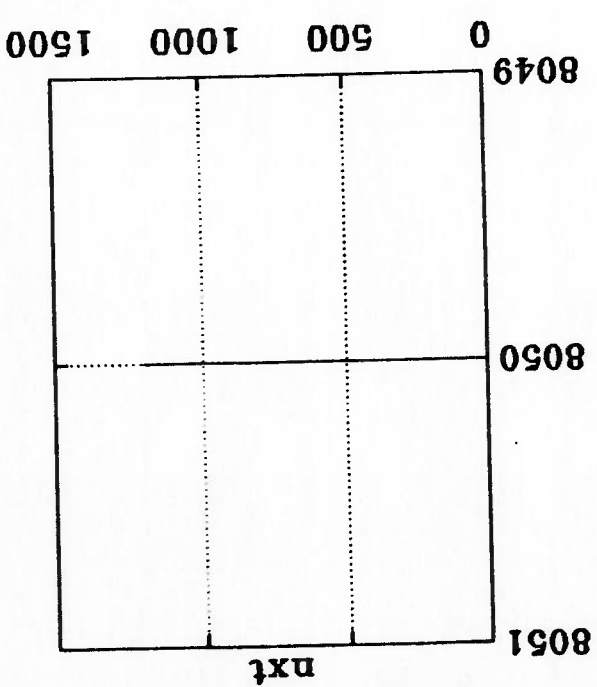
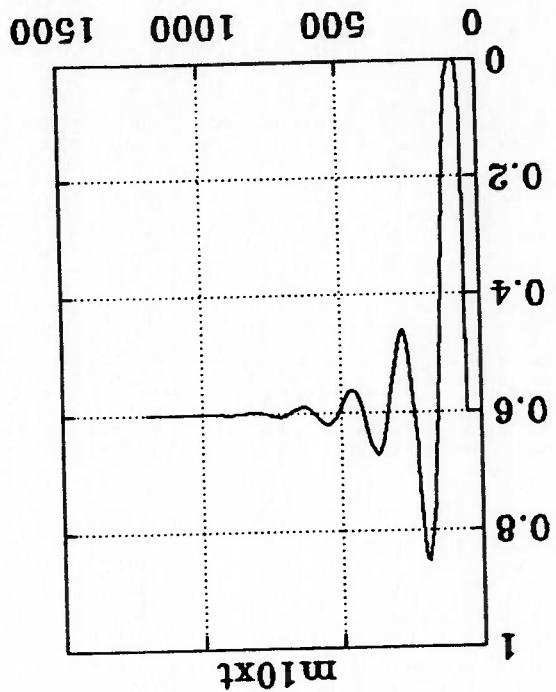
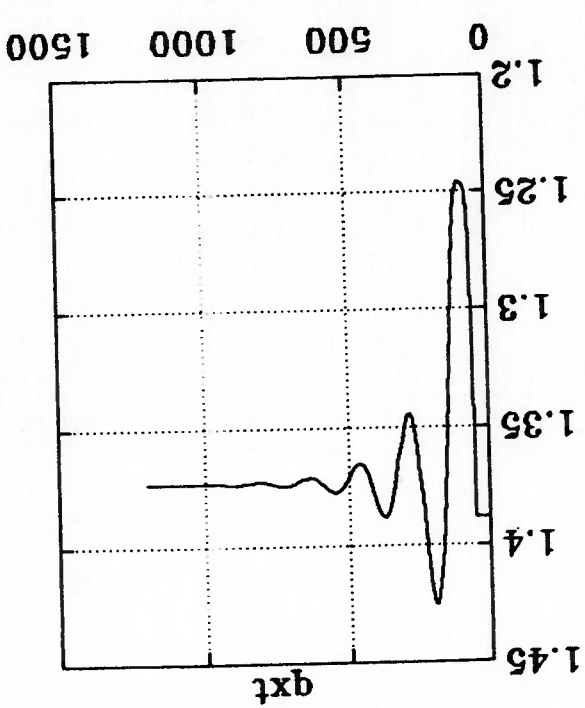


Figura 5.4 Degrau de -25% em f. PC-1: $K_c=1,33$; $\tau_i=10$; $\tau_d=0$. ASC: $K_c=-1,02$; $\tau_i=7$; $\tau_d=1$.
 ASC: $K_c=-1,02$; $\tau_i=7$; $\tau_d=1$.

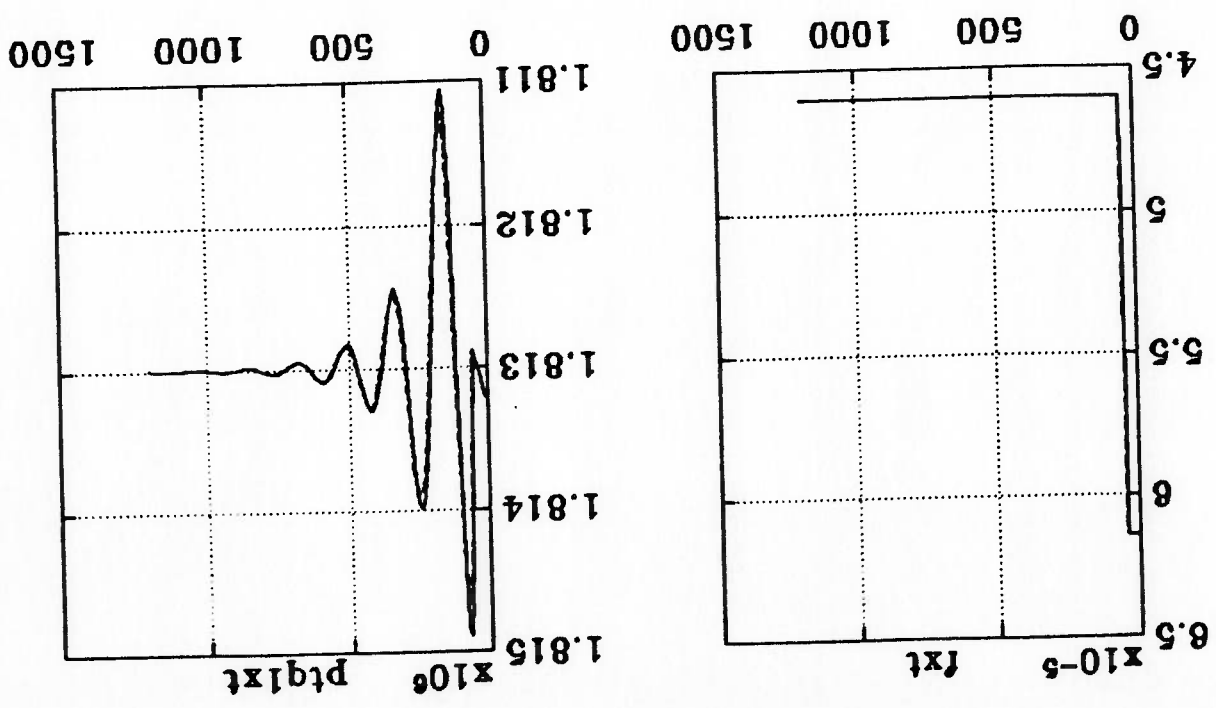
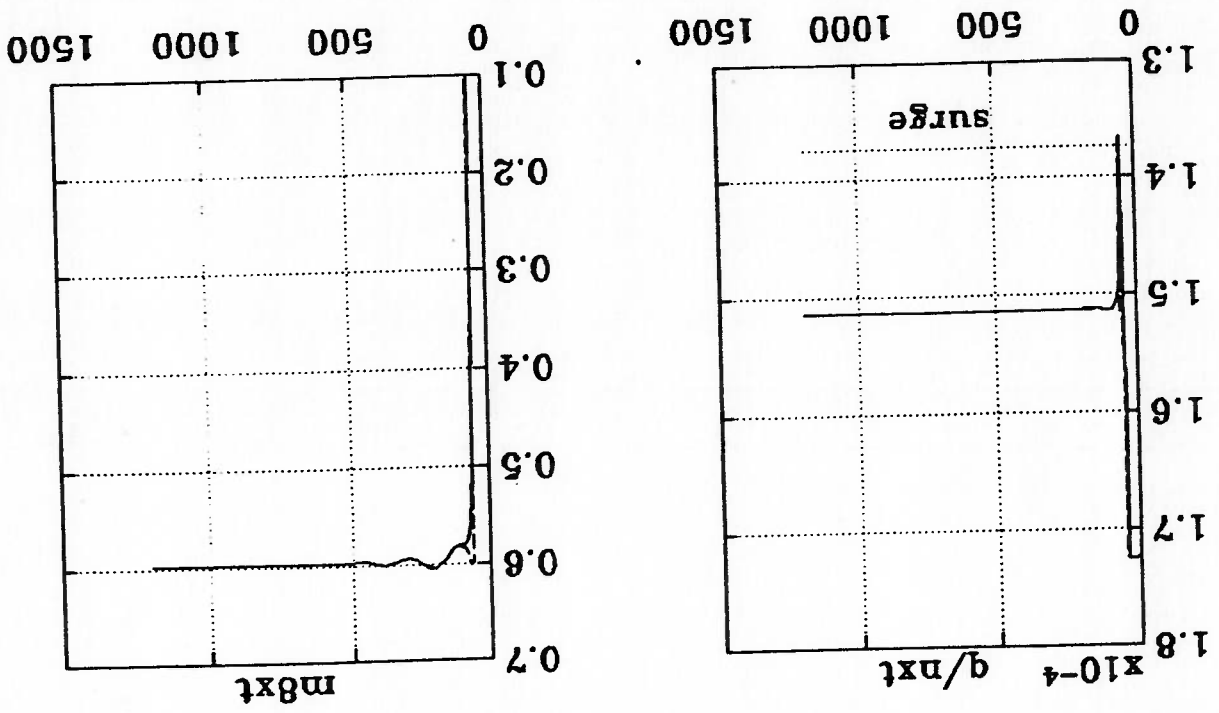


Figura 5.4 Degradação de -25% em f. PC-1: $K^c=1,33$; $\tau^d=10$; $\tau^i=0$. ASC: $K^c=-1,02$; $\tau^d=7$; $\tau^i=1$. continuação

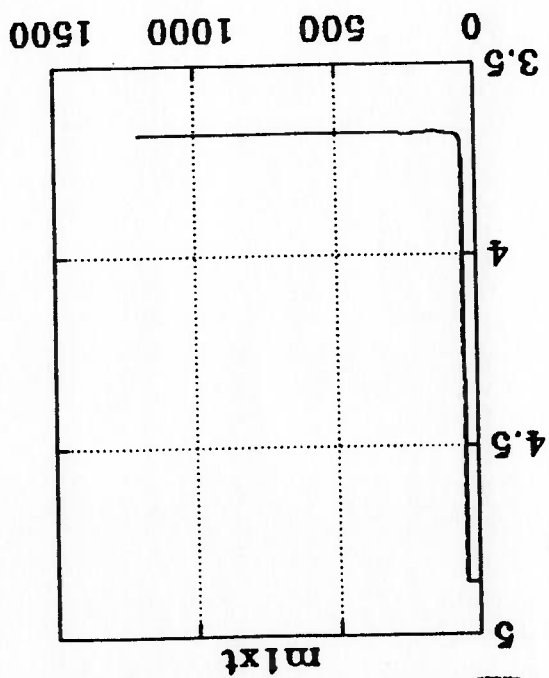
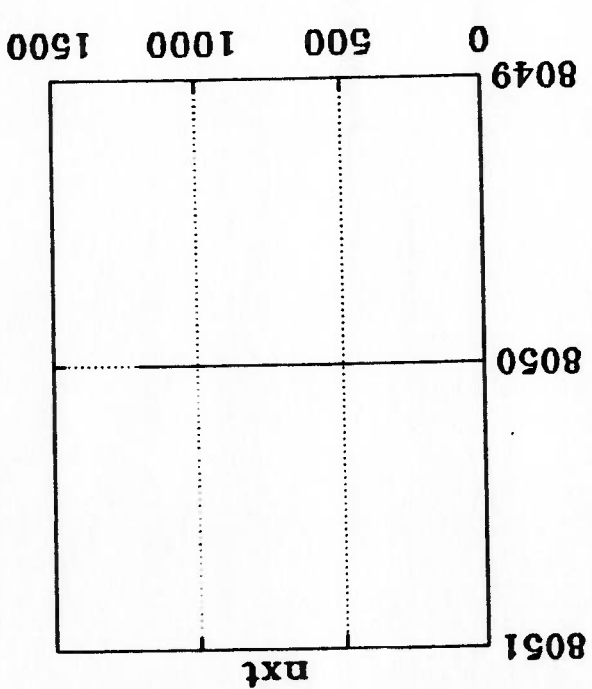
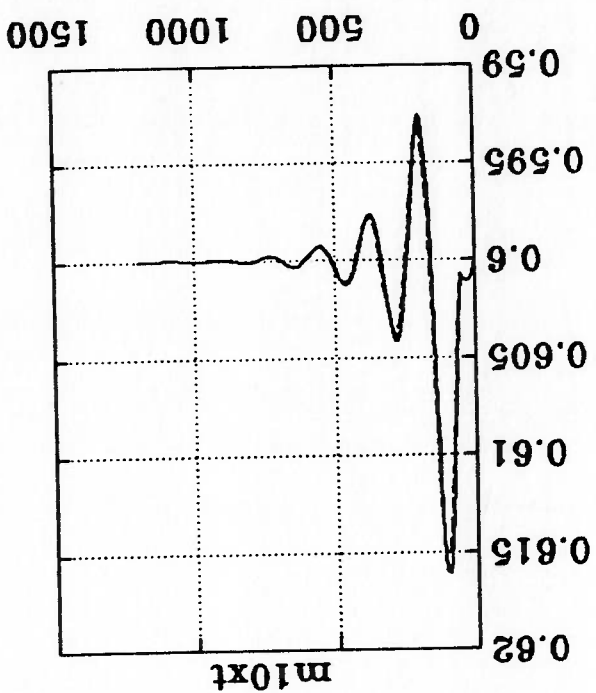
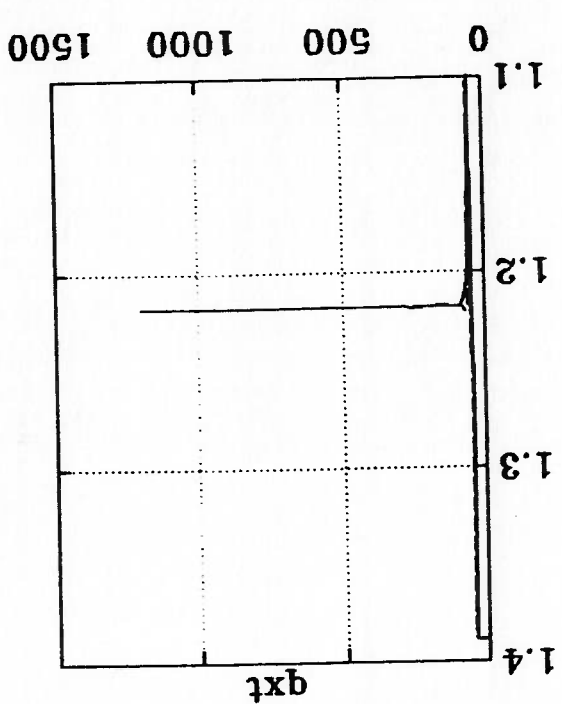


Figura 5.5 Degrau de -50% em f . PC-I: $K^c=1,33$; $\tau^i=10$; $\tau^d=0$. ASC: $K^c=-1,02$; $\tau^i=7$; $\tau^d=0$. FC-I: $K^c=-0,2$; $\tau^i=20$; $\tau^d=0$. FC-II: $K^c=-0,45$; $\tau^i=20$; $\tau^d=0$.

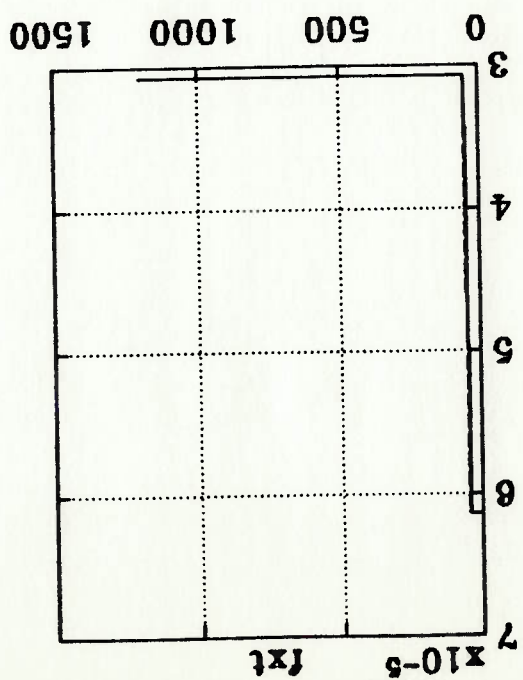
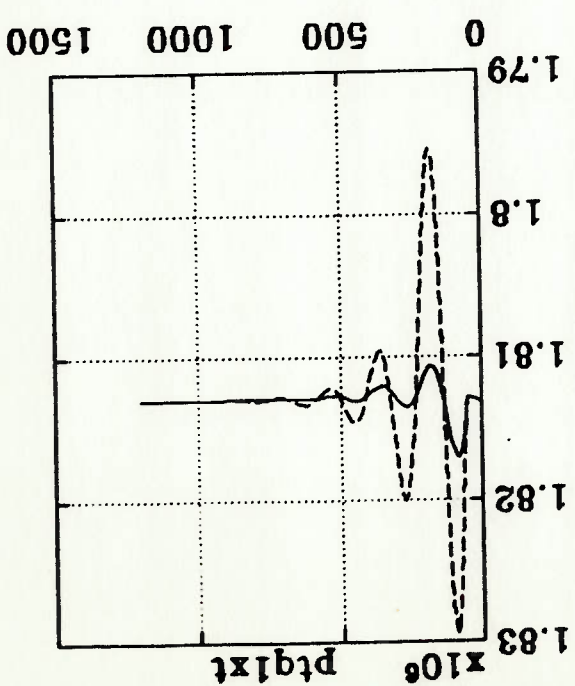
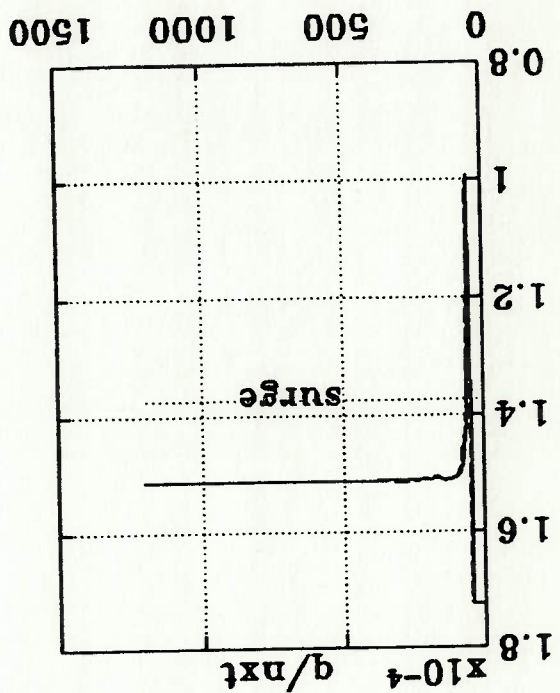
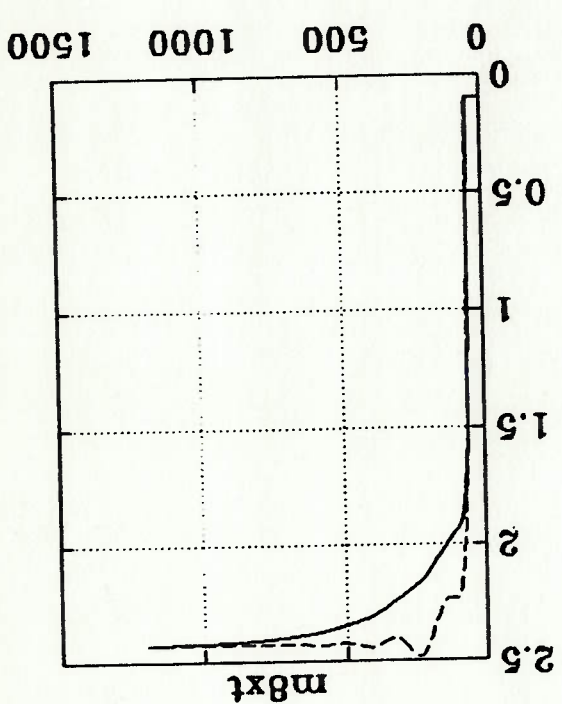


Figura 5.5 Degrau de -50% em t . PC-1: $K^c=1,33$; $\tau^i=10$; $\tau^d=0$. ASC: $K^c=-1,02$; $\tau^i=7$; $\tau^d=0$. FC-1: $K^c=-0,2$; $\tau^i=20$; $\tau^d=0$. FC-1: $K^c=-0,45$; $\tau^i=20$; $\tau^d=0$. continuação

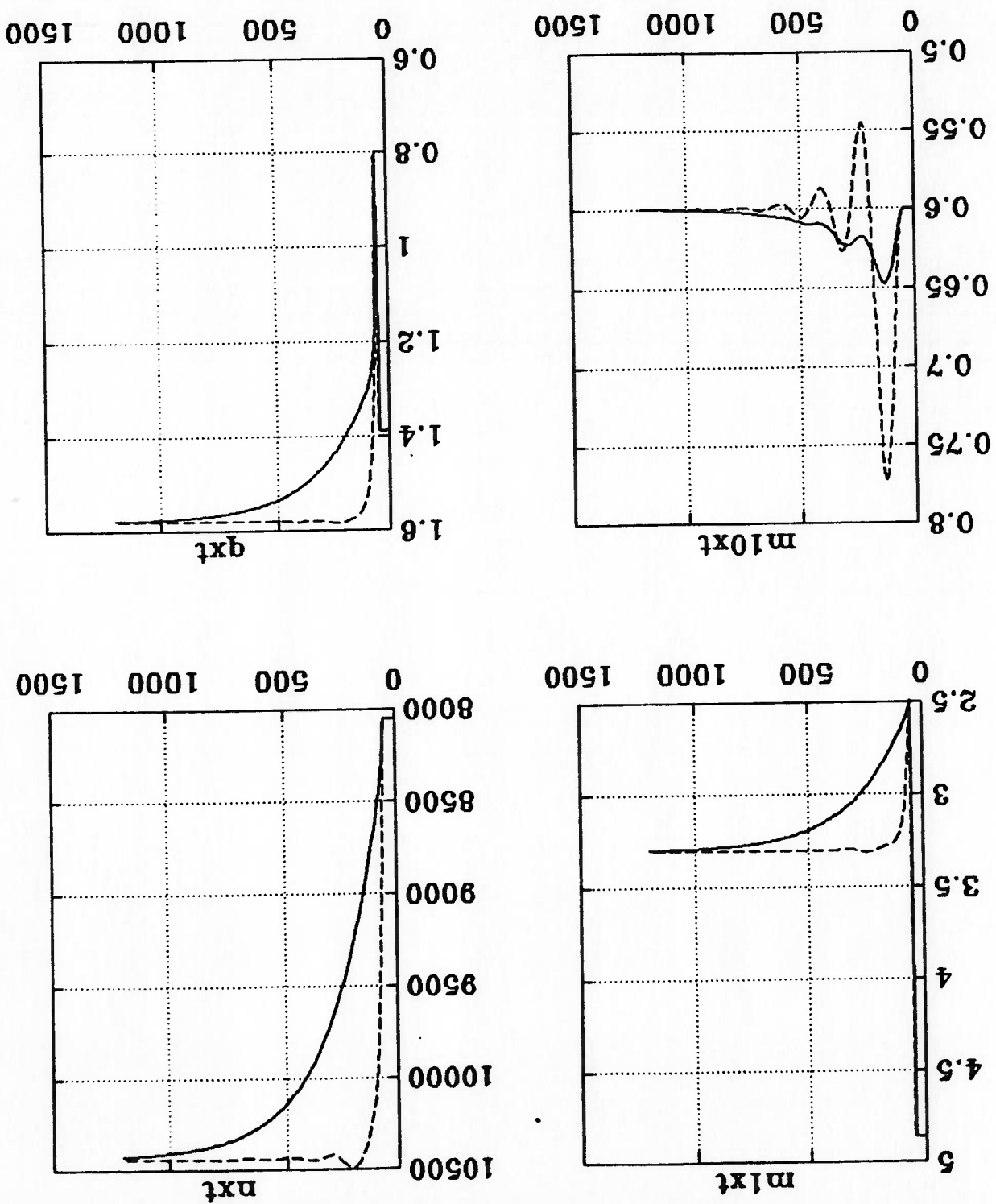


Figura 5.6 Degradação de -50% em f. PC-1: $K^c=1,33$; $\tau^i=10$; $\tau^d=0$. ASC: $K^c=-1,02$; $\tau^i=7$; $\tau^d=0$. FC-1: $K^c=-0,2$; $\tau^i=20$; $\tau^d=0$. FC-3: $K^c=4,7$; $\tau^i=\infty$; $\tau^d=0$. FC-3: $K^c=4,7$; $\tau^i=20$; $\tau^d=0$.

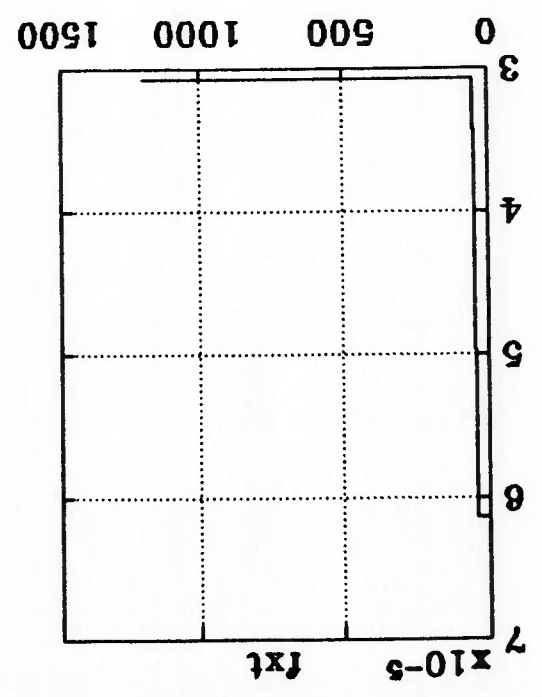
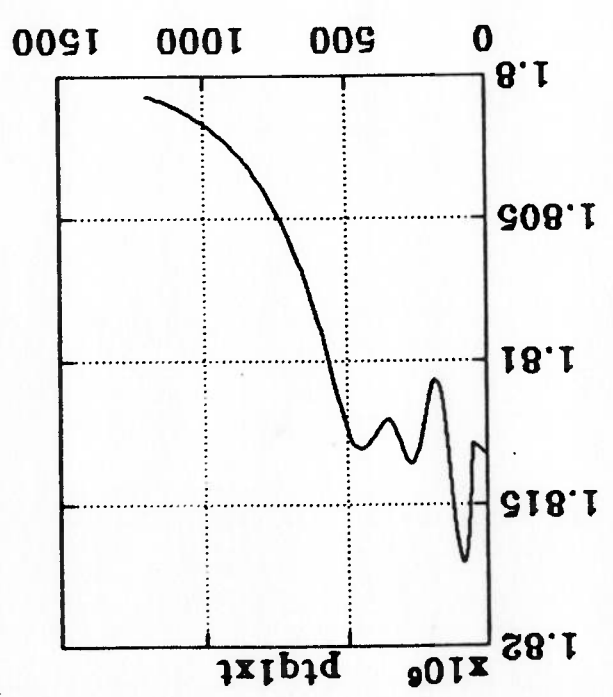
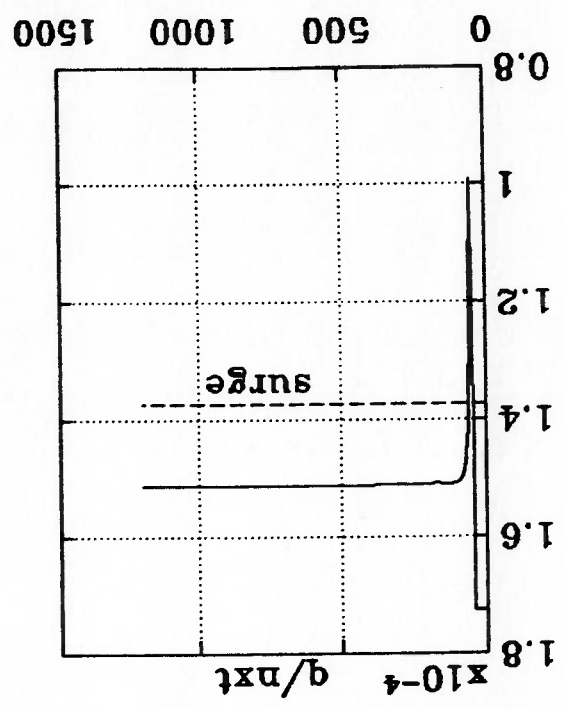
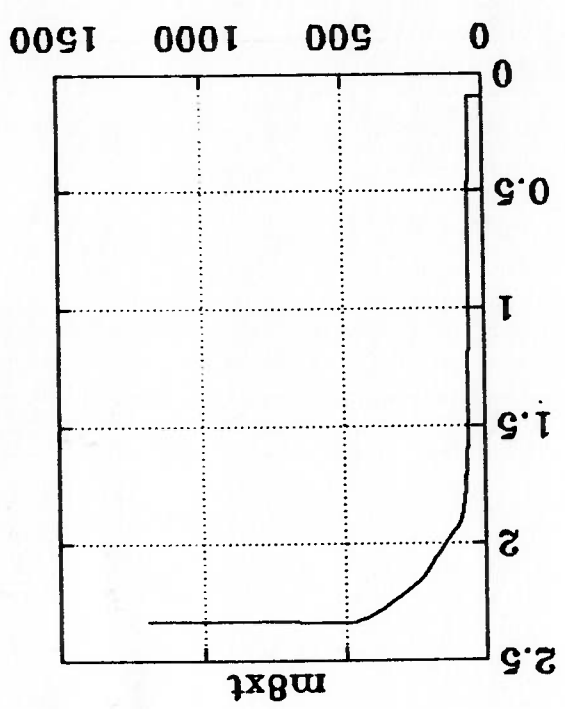
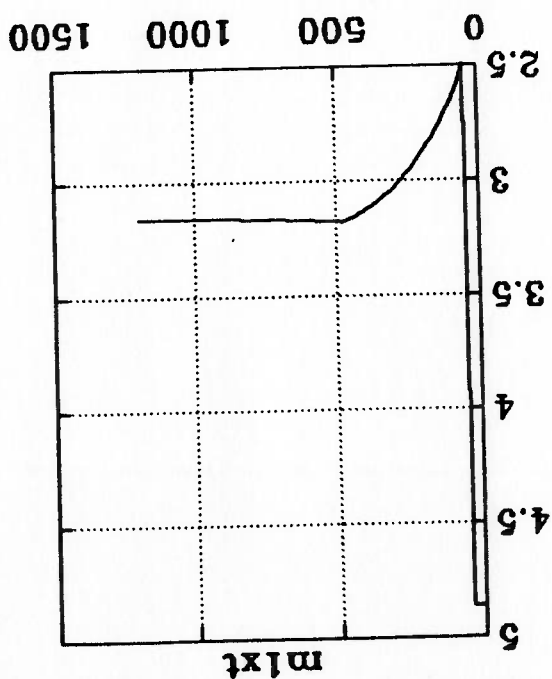
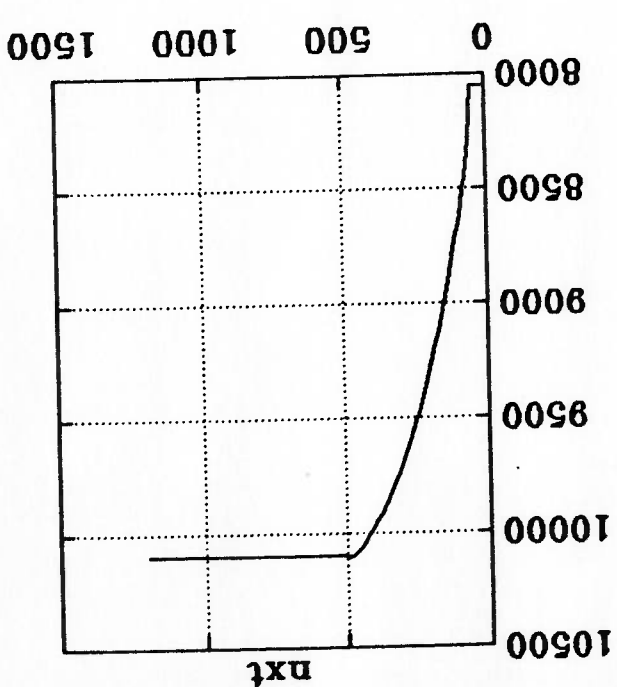
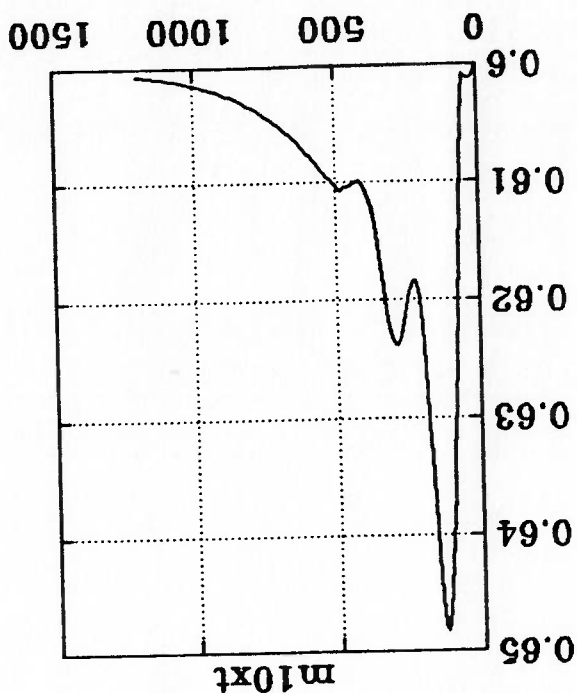
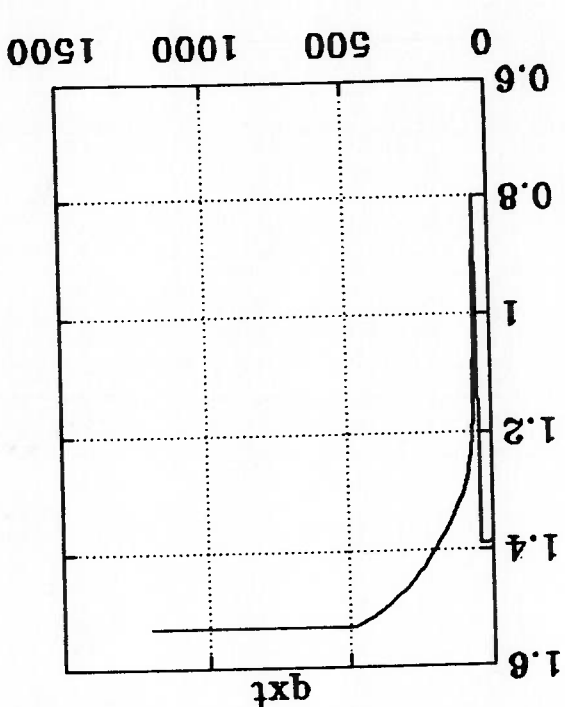


Figura 5.6 Degradação de -50% em f. PC-1: $K^c=1,33$; $\tau^d=10$; $\tau^i=0$. ASC: $K^c=-1,02$; $\tau^d=7$; $\tau^i=0$. FC-1: $K^c=-0,2$; $\tau^d=20$; $\tau^i=0$. FC-3: $K^c=4,7$; $\tau^d=\infty$; $\tau^i=0$. FC-3: $K^c=4,7$; $\tau^d=20$; $\tau^i=0$. ——— . continuação




```

UNIT U_CONTRI;
    ($r+)
    (SIMULA O CONTROLADOR DA URC)
    .....
INTERFACE
    USES VAR_URC,FORMATO,OPERADOR;
PROCEDURE CONTROLE (VAR V: VARIAVEIS : {VECTORES DE VARIAVEIS DO PROCESSO}
    T: REAL);
    {TEMPO}
    .....
IMPLEMENTATION
    TYPE
        trest = (norm, sur, rot, surot, suva, suvarot);
        tmatrest = array[contipo, trest] of real;
VAR
    esly : vetor_contipo; {vetor dos fatores de escala de y}
    eslu : vetor_mantipo; {vetor dos fatores de escala de u}
    y0 : vetor_contipo; {vetor dos valores iniciais de y}
    restr : vetor_contipo; {vetor de restricoes}
    tca : real; {instante de controle anterior}
    dur : vetor_mantipo;
    con : contipo;
    ea : vetor_contipo;
    eaa : vetor_contipo;
    kc : tmatrest;
    tintg : tmatrest;
    lrest : trest;
    tder : tmatrest;
    brest : array[trest] of boolean;
    selrest : trest;

```

```

----->
CONST
    dnt : real;
    dnta = 1; (s) (intervalo de amostragem do controlador)
    *****
PROCEDURE CONV_Y ( V:VARIAVEIS; (VARIAVEIS A SEREM CONVERTIDAS EM
    VARIAVEIS DE PERTURBACAO )
    VAR Y,
        (VARIAVEIS DE PERTURBACAO CONTROLADAS)
        YSP: VETOR_CONTTPO; (SET POINTS DE PERTURBACAO)
        RESTR: VETOR_CONTTPO; (VETOR DE RESTRICOES)
        VAR ISE: VETOR_CONTTPO; (ERRO QUADRATICO)
    { CONV_Y converte as variaveis controladas e set points na forma de variaveis
    de processo)
    VAR
        con : conttpo;
        sp : spttpo;
        bovar : boolean;
BEGIN
    for con:=ptq1 to n do
        y[con]:=(v[con]-y0[con])* escly[con];
        con := ptq1;
        sp := ptq1sp;
        bovar := true;
    while (sp <= nsp) and bovar do
        begin
            ysp[con]:=(v[sp]-y0[con])* escly[con];
            ISE[con]:=sqrt((v[con]-v[sp])*escly[con])*dnta*RESTR[con]+ISE[con];
            if con < n then con := succ(con) ;
        end
    end

```

```

if sp < nsp then sp := succ(sp) else bovar := false;
END: (FINAL DE CONV_Y)
.....
PROCEDURE CONV_U ( DUT : VETOR_MANTIPO ; (VARIAVEIS MANIPULADAS
DE PERTURBACAO)
VAR V : VARIAVEIS; (VARIAVEIS CONVERTIDAS NA FORMA
ORIGINAL SEM SATURACAO)
VAR MOV_MAN : VETOR_MANTIPO; (VETOR INTEGRAL
DE MOVIMENTO DAS
VARIAVEIS MANIPULADAS)
(CONV_U converte as variaveis manipuladas de perturbacao
na forma original e evita a sua saturacao)
VAR
valman : real;
man : mantipo;
BEGIN
for man:=cm10 to cm8 do
begin
valman:=|man|+dut[man]/esclu[man];
if valman<=0 then
begin
dut[man]:=-|man|*esclu[man];
valman:=0;
end
else valman:= valman;
MOV_MAN[man]:=sqr(dut[man])+MOV_MAN[man];
end;

```

```

END: (FINAL DE CONV_U)
*****
PROCEDURE PID( DTCA : REAL; (INTERVALO DE AMOSTRAGEM)
  KC : REAL; (GANHO PROPORCIONAL DO CONTROLADOR)
  TINTG:REAL; (TEMPO INTEGRAL DO CONTROLADOR)
  TDER :REAL; (TEMPO DERIVATIVO DO CONTROLADOR)
  VAR EAM :REAL; (ERRO DA VARIÁVEL CONTROLADA EM T-2DTCA)
  VAR EA :REAL; (ERRO DA VARIÁVEL CONTROLADA EM T-DTCA)
  E :REAL; (ERRO DA VARIÁVEL CONTROLADA EM T)
  VAR DU :REAL;(VARIÁVEL DA VARIÁVEL MANIPULADA EM T)
BEGIN
  du:= kc*((1+dtca/tintg+tder/dtca)*e - (1+2*tder/dtca)*ea
    + tder/dtca*ea);
  eaa:=ea;
  ea:=e;
END;
*****
PROCEDURE CONTROLE (VAR V: VARIÁVEIS ; (VECTOR DE VARIÁVEIS DO PROCESSO)
  T: REAL; (TEMPO)
CONST
  ni = 7000;(rpm) (limite inferior de n)
  nis = 10600;(rpm) (limite superior de n)
  nms = 500; (rpm) (margem de segurança de nis e nil)
  nmorto = 100;(rpm) (insensibilidade de mudança de nis e nil)
  nil = 3; (kg/s) (limite inferior de ml)
  mlms = 0.3; (kg/s) (margem de segurança de ml)
  mlimorto = 0.03; (kg/s) (insensibilidade a de mudança de violacao de ml)
  qnl = 1.373e-4; (m3/(s*rpm)) (limite inferior de q/n (surge))
  qnms = 1.4e-5; (m3/(s*rpm)) (margem de segurança de qnl)

```

de qnl)

VAR

y : vetor_contipo;

ysp : vetor_contipo;

estado : boolean;

yrest : vetor_contipo;

e : vetor_contipo;

BEGIN

if t-tca>dica then

begin

{VERIFICACAO DAS RESTRICOES}

{VERIFICACAO DE ROTACAO CRITICA}

if (v[n] > nls-nms) or (v[n] < nli+nms) then

begin

brest[rot] := true;

selrest:=rot;

if v[n] > nls-nms then v[nspl] := nls-nms;

if v[n] < nli+nms then v[nspl] := nli+nms;

rest[ptq]=1;

rest[qn] :=0;

rest[m8] :=1;

rest[m1] :=0;

rest[n] :=1;

```

end;
if (v|n] < n|s-nms- nmorto) and (v|n] > n|l+nms+nmorto) then
begin
  restr|rot] := false;
end;
end;

{VERIFICACAO DE SURGE}
if v|qn] < qn|+qms then
begin
  restr|sur] := true;
  selrestr:=sur;
  if v|qnspl<qn|+qms then qnspar:=v|qnspl;
  v|qnspl := qn|+qms;
  restr|pdq|]:=1;
  restr|qn] :=1;
  restr|m8] :=0;
  restr|m1] :=0;
  restr|n] :=0;
end;
end;
if v|qn] < qn|+qms+ qnmorto then
begin
  restr|sur] := false;
  if v|qnspl=qn|+qms then v|qnspl:=qnspar;
end;
end;
{VERIFICACAO DE VAZAO CRITICA}
if v|m1] < m|l+m|ms then
begin
  restr|vaz] := true;
end;

```

```

selrestr:=vaz;
v[misp] := ml+mims;
restr[pq1]:=1;
restr[qn] :=0;
restr[m8] :=1;
restr[m1] :=1;
restr[n] :=0;
end;

if v[m1] > ml+mims+mimorto then
begin
restr[vaz] := false;
end;

{VERIFICACAO DE CONDICAO NORMAL}
if not (restr[rot] or restr[vaz] or restr[sur]) then
begin
selrestr:=norm;
restr[norm]:= true;
restr[pq1]:=1;
restr[qn] :=1;
restr[m8] :=1;
restr[m1] :=0;
restr[n] :=0;
end
end
else
begin
restr[norm]:= false;
end;
end;
}VERIFICACAO DE SURGE+ROTACAO CRITICA+VAZAO CRITICA}
if restr[rot] and restr[sur] and restr[vaz] then

```

```

begin
  restr[suvarot]=true;
  selfrestr:=suvarot;
  restr[ptq1]=0;
  restr[qn] :=1;
  restr[m8] :=0;
  restr[m1] :=1;
  restr[n] :=1;
  restr[suvarot]=false;
  begin
    restr[suvarot]=true;
    selfrestr:=suvarot;
    restr[ptq1]=1;
    restr[qn] :=1;
    restr[m8] :=0;
    restr[m1] :=0;
    restr[n] :=1;
  end
end
else
begin
  restr[suvarot]=false;
end;
end;
}VERIFICACAO SURGE + ROTACAO CRITICA}
if restr[sur] and restr[rot] and not restr[vaz] then
  begin
    restr[suvarot]=true;
    selfrestr:=suvarot;
    restr[ptq1]=1;
    restr[qn] :=1;
    restr[m8] :=0;
    restr[m1] :=0;
    restr[n] :=1;
  end
end;

```


if brest[sur] and brest[vaz] and not brest[rot] then

begin

brest[suva]=true;

selrest:=suva;

rest[ptq1]=1;

rest[qn]=1;

rest[m8]=0;

rest[m1]=1;

rest[n]=0;

end

else

begin

brest[suva]=false;

end;

CONV_Y(V,Y,YSP,RESTR,ISE);

for con:=ptq1 to n do elcon:=y[con]-y[con];

case selrest of

norm :

begin

FID(DTCA,KC[PTQ1,NORM],TNTG[PTQ1,NORM],TDER[PTQ1,NORM],EVA[PTQ1],EVA[PTQ1],

E[PTQ1],DUT[CM10]);

FID(DTCA,KC[QN,NORM],TNTG[QN,NORM],TDER[QN,NORM],EVA[QN],EVA[QN],

E[QN],DUT[CCV3]);

v[cm8] := 0.1;

end;

```

sur :
begin
PID(DTCA,KC|PTQ1,NORM),TINTG|PTQ1,NORM),TDER|PTQ1,NORM),EAA|PTQ1),EA|PTQ1),
E|PTQ1),DUT|CM10));
) PID(DTCA,KC|QN,NORM),TINTG|QN,NORM),TDER|QN,NORM),EAA|QN),EA|QN),
E|QN),DUT|CCV3)); )
PID(DTCA,KC|QN,SUR),TINTG|QN,SUR),TDER|QN,SUR),EAA|QN),EA|QN),
E|QN),DUT|CM8));
end:
rot :
begin
PID(DTCA,KC|PTQ1,NORM),TINTG|PTQ1,NORM),TDER|PTQ1,NORM),EAA|PTQ1),EA|PTQ1),
E|PTQ1),DUT|CM10));
PID(DTCA,KC|N,ROT),TINTG|N,ROT),TDER|N,ROT),EAA|N),EA|N),DUT|CCV3));
v|cm8):=0.1;
end:
surot:
begin
PID(DTCA,KC|PTQ1,NORM),TINTG|PTQ1,NORM),TDER|PTQ1,NORM),EAA|PTQ1),EA|PTQ1),
E|PTQ1),DUT|CM10));
PID(DTCA,KC|N,ROT),TINTG|N,ROT),TDER|N,ROT),EAA|N),EA|N),DUT|CCV3));
PID(DTCA,KC|QN,SUR),TINTG|QN,SUR),TDER|QN,SUR),EAA|QN),EA|QN),
E|QN),DUT|CM8));
end:
suvarot :
begin
PID(DTCA,KC|M1,SUVAROT),TINTG|M1,SUVAROT),TDER|M1,SUVAROT),
EAA|M1),EA|M1),E|M1),DUT|CM10));
PID(DTCA,KC|N,ROT),TINTG|N,ROT),TDER|N,ROT),EAA|N),EA|N),DUT|CCV3));
PID(DTCA,KC|QN,SUR),TINTG|QN,SUR),TDER|QN,SUR),EAA|QN),
EA|QN),DUT|CM8));

```

.....)

.....)

END; (FINAL DE CONTROLE)

end;

CONV_U (DUT, V, MOV_MAN);

tca:=t;

end;

end :

PID(DTCA,KC(QN,SUR),TNTG(QN,SUR),TDER(QN,SUR),EAA(QN),EA(QN),E(QN),DUT(CM8));

PID(DTCA,KC(PTQ1,NORM),TNTG(PTQ1,NORM),TDER(PTQ1,NORM),EAA(PTQ1),EA(PTQ1),
E(PTQ1),DUT(CM10));

PID(DTCA,KC(M1,VAZ),TNTG(M1,VAZ),TDER(M1,VAZ),EAA(M1),EA(M1),
E(M1),DUT(CCV3));

begin

suva :

end :

v[cm8]=0.1;

PID(DTCA,KC(PTQ1,NORM),TNTG(PTQ1,NORM),TDER(PTQ1,NORM),EAA(PTQ1),EA(PTQ1),
E(PTQ1),DUT(CM10));

PID(DTCA,KC(M1,VAZ),TNTG(M1,VAZ),TDER(M1,VAZ),EAA(M1),
EA(M1),E(M1),DUT(CCV3));

begin

vaz :

end;

(INICIALIZACAO)

BEGIN

----->

(Inicializacao de y0)

y0[ptq1] := 1.813e6;

y0[qn] := 1.724e-4;

y0[m8] := 0.1;

y0[m1] := 4.859;

y0[n] := 8050;

----->

(Inicializacao de esly)

esly[ptq1] := 1.25e-5;

esly[qn] := 1.73e4;

esly[m8] := 0.5;

esly[m1] := 0.81;

esly[n] := 6.21e-4;

----->

(Inicializacao de eslu)

eslu[cm10] := 8.33;

eslu[ccv3] := 6.21e-4;

eslu[cm8] := 0.5;

----->

(Inicializacao de tca)

tca := -1!(s)

----->

(Inicializacao de DUT)

fillchar(dut,sizeof(dut),0);

----->

(Inicializacao da matriz de restricoes)

for iestr:=norm to suvarot do brestri[iestr] := false;

selrestr:=norm;

----->

{Inicilizacao de EA,EAA}

fillchar(eaa,sizeof(eaa),0);

fillchar(ea,sizeof(ea),0);

----->

{Inicilizacao das constantes dos controladores}

{Operacao normal}

kc[ptq,norm]=1.33;

kc[qn,norm] =0;

ting[ptq,norm]=10;

ting[qn,norm] =1e35;

tder[ptq,norm]=0;

tder[qn,norm] =0;

{Surge}

kc[qn,sur]= -1.02;

ting[qn,sur]= 7;

tder[qn,sur]= 0;

{Rotacao critica}

kc[n,rot]= -1;

ting[n,rot]= 5;

tder[n,rot]=0;

{Vazao critica}

kc[m1,vaz]= -0.2;

ting[m1,vaz]=20;

tder[m1,vaz]=0;

{Surge+rotacao critica+vazao critica}

kc[m1,suvarot]=4.7;

tintg|ml,suvarot|=1e35;

rder|ml,suvarot|=0;

----->

END. (FINAL DA UNIDADE CONTROLE)

.....<

**COMPARAÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS CONTROLES DMC E PID COM OVERRIDE NA
INSTALAÇÃO COM COMPRESSOR CENTRÍFUGO**

Na primeira parte deste capítulo comparamos o desempenho do DMC com o regulador dos controladores, incluindo estados com restrições ativas. Na segunda parte analisamos a influência dos parâmetros do DMC no desempenho do controlador.

Comparamos a resposta da URC controlada pelo DMC e pelo PID para degraus nas perturbações e setpoints (tabela 6.1 e figuras 6.1 a 6.5). Nos transistórios que envolvem operação normal, o ISE da pressão no tanque TQ-1 é maior para o DMC do que para o PID. O contrário ocorre com a variável q/n , que indica a posição com relação ao ponto de eficiência máxima do compressor. Isto deve-se ao caráter multivariável do DMC, que controla P_{TQ1} , q/n e m_g em operação normal; e portanto reduz o erro de q/n . Enquanto que com o PID é possível controlar apenas P_{TQ1} . Há um inconveniente no controle de q/n pelo DMC: nos transistórios de f e m_g (coeficiente de vazão na linha 12-1 e vazão de entrada), n (rotação do compressor) sobe continuamente até o seu limite superior (10100 rpm) (figura 6.6); após atingir este limite a URC entra em estado de rotação crítica, o DMC abandona o controle de m_g (vazão de recirculação), passa a controlar n e, devido ao abandono de m_g , faz com que q/n atinja imediatamente seu setpoint. Fazendo um ensaio em que a rotação limite superior é retirada (figura 6.7), verificamos que o DMC leva a URC até seus setpoints de P_{TQ1} , m_g e m_g e apresenta um comportamento estável. No entanto, para fazê-lo, precisa violar a restrição de rotação máxima do compressor. Esta é uma característica da URC. A única maneira de contornar o problema é não controlar q/n em operação normal (figuras 6.8 e 6.9). Sem controlar q/n , o DMC pode ter seu desempenho melhorado em relação ao PID, aumentando os valores dos elementos da matriz Q (figura 6.10). Concluímos que, no caso de operação normal: os desempenhos do PID e do DMC são similares; se não desejamos que o compressor atinja o seu limite de rotação, q/n não deve ser controlada; porém se q/n é controlada, o que só possível usando o DMC, as variações de q/n nos transistórios são reduzidas.

No transistório com surge, o desempenho dos algoritmos é semelhante. Ambos conseguem retirar o compressor do surge. Tanto o DMC, como o PID trabalham num esquema multivariável neste caso. A diferença reside na manipulação de n pelo DMC. Esta manipulação é feita para controlar P_{TQ1} . Desta maneira, o DMC diminui a movimentação das variáveis manipuladas.

No transistório com surge, rotação crítica e vazão crítica, o DMC e o PID apresentam comportamentos diferentes (figuras 6.11 e 6.12). Enquanto o PID apresenta um comportamento não oscilatório, o DMC apresenta fortes oscilações. Na figura 6.11 as oscilações do DMC são ampliadas, porque usamos intervalos diferenciais pequenos para n e m_g : as restrições são ativadas e desativadas pelas oscilações das variáveis controladas, sem que a perturbação que causou

sua ativação desapareça. Aumentando os intervalos diferenciais, a ativação e destivação das restrições desaparece, mas permanecem oscilações moderadas (figura 6.12). Este fenômeno deve-se à tendência do DMC de eliminar o offset de m_1 manipulando cm_{10} . Isto não ocorre com o PID porque m_1 manipula cm_{10} através de um controlador proporcional, FC3. Conforme explicado no capítulo 5, o uso do termo integral no FC3 também implica em oscilações. Então a inconveniente do DMC pode ser evitado se abaixarmos o setpoint de m_1 . Então a rotação crítica não é atingida para este transitório (figura 6.13). Ou as oscilações podem ser amortecidas se aumentarmos o número de instantes preditos pelo DMC, R (figura 6.14).

Testamos a robustez do DMC e do PID. Aumentamos a temperatura de saída do trocador de calor TC. Desta maneira a rotação do compressor também deve aumentar para manter a mesma pressão P^{TQ1} . Na nova condição, a temperatura de saída do TC é 18° maior e a rotação do compressor passa de 8050 para 9521 rpm. Aplicamos transitórios de setpoint e perturbações na URC e comparamos o resultado com o da condição original de operação (figuras 6.15 a 6.25). Obtivemos um aumento das oscilações das variáveis tanto do PID como do DMC. O DMC apresenta maior robustez apenas em caso de ocorrência de surge, vazão crítica e rotação crítica. Neste caso o PID oscila fortemente, ativando e desativando restrições.

Com relação ao aspecto tempo de execução dos algoritmos, ambos tem tempo real de execução muito abaixo do período de amostragem em microcomputador AT-286 operando com 16 MHz. O PID, que tem período de amostragem 1s, é executado em menos de 0,04s. O DMC, que tem período de amostragem 5s, é executado em menos de 1,5 s. Isto permite que sejam implantados em um hardware de baixo custo.

Finalmente, discutimos o aspecto de facilidade de implementação de restrições. O DMC apresenta maior facilidade de implementação de restrições, porque é necessário apenas zerar ou não o peso da variável controlada restringida na matriz Q. No caso do PID é preciso, além de ativar o controlador, selecionar o par variável controlada e variável manipulada.

Tabela 6.1 Desempenho dos controladores DMC e PID.(a) surge (b) surge+vazão+rotação crítica.

ISE	$P^{Tq1SP} + 10\%$		$m_6 - 10\%$		$f - 10\%$		$f - 25\%$		$f - 50\%$		
	PID	DMC	PID	DMC	PID	DMC	PID	DMC	PID	DMC	
TRANSITÓRIO	P^{Tq1}	157	240	0,75	3	0,02	0,05	0,17	0,05	1,4	
	q/n	8	2	1	68	19	0,19	2,4	0,57	8,6	
	m_8	1,6	0,25	17	0,19	0,19	0,19	0,19	0,57	8,6	
	m_1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	n	165	244	1,78	3,6	68	0,24	50	0,67	59	
	TOTAL	165	244	1,78	3,6	68	0,24	50	0,67	59	
	MOV	12	12	0,015	0,023	0,015	0,023	0,015	0,023	0,015	0,023
	cm^{10}	4,5	4,5	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
	ccv_3	—	—	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
	cm_8	—	—	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	TOTAL	12	12	0,015	0,023	0,015	0,023	0,015	0,023	0,015	0,023

6.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS NO DESEMPENHO DO DMC.

A partir dos dados levantados nas seções 4.12 e 6.1 discutimos a influência dos parâmetros do DMC no desempenho do controle da URC. A influência de R e L pode ser verificada pelo fato de termos, além dos dados da tabela 4.7, levantado os valores de ISE para:

$$a) R = 1 \text{ e } L = 1 : ISE = 1516;$$

$$b) R = 3 \text{ e } L = 1 : ISE = 375.$$

Isto indica, que para $R < 5$, o desempenho do DMC deteriora-se bastante. Para $R \geq 5$ o desempenho, em termos de ISE, permanece constante. Observamos que, para R constante, conforme diminui a diferença entre R e L, diminui também o movimento das variáveis manipuladas (tabela 4.1). Já as oscilações das variáveis são reduzidas pelo aumento de R (figura 6.14).

A matriz de pesos das variáveis controladas, Q, influencia o afastamento máximo das variáveis controladas de seus setpoints. Aumentando o valor dos elementos de Q, diminui o afastamento, porém a resposta à transitórios da URC tende a apresentar oscilações durante períodos prolongados (figura 6.10). (Estas oscilações podem ser amortecidas se aumentarmos R.) Neste trabalho, usamos Q principalmente para ativar ou desativar as variáveis controladas (seção 4.4).

O parâmetro α , que normalmente é sugerido como parâmetro de ajuste final do DMC [26] [27] [28] [7] [23], não tem influência no desempenho do DMC controlando a URC para valores menores que 0,5 (tabela 4.2). A matriz de supressão de movimentos das variáveis controladas, R, é o parâmetro que tem influência direta na redução da velocidade das ações de controle (figura 4.10).

Figura 6.1 — DMC — PID P^{101SP} 10% - controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4

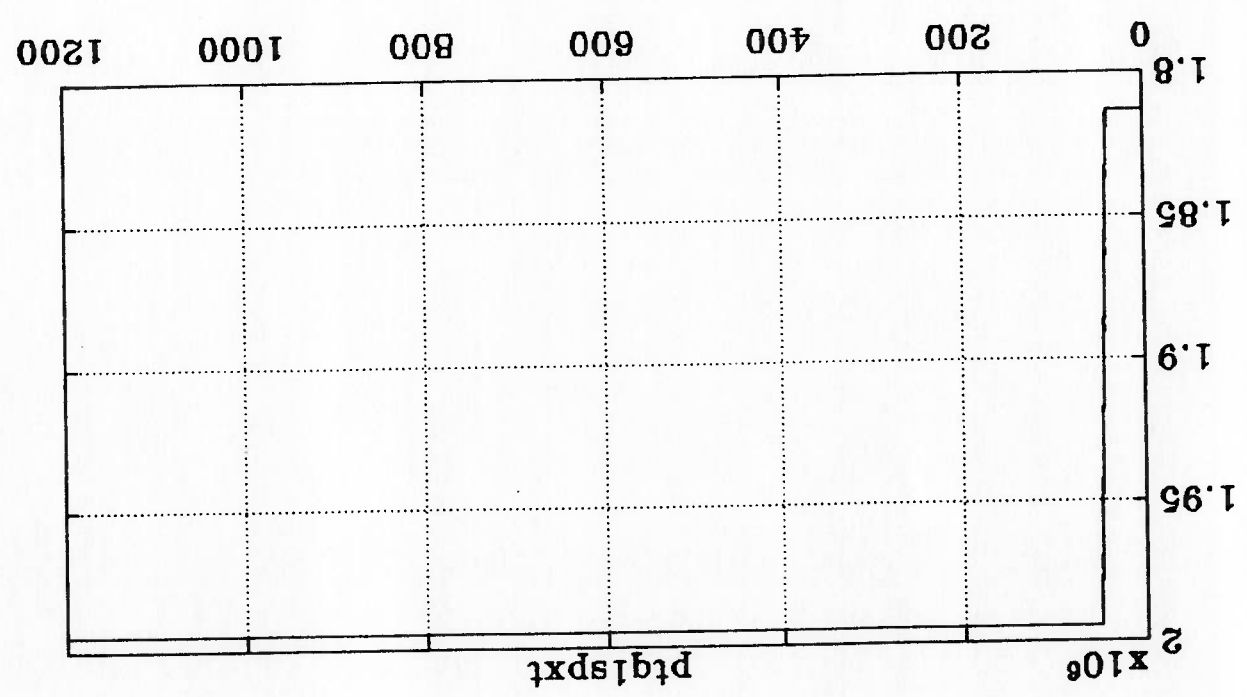
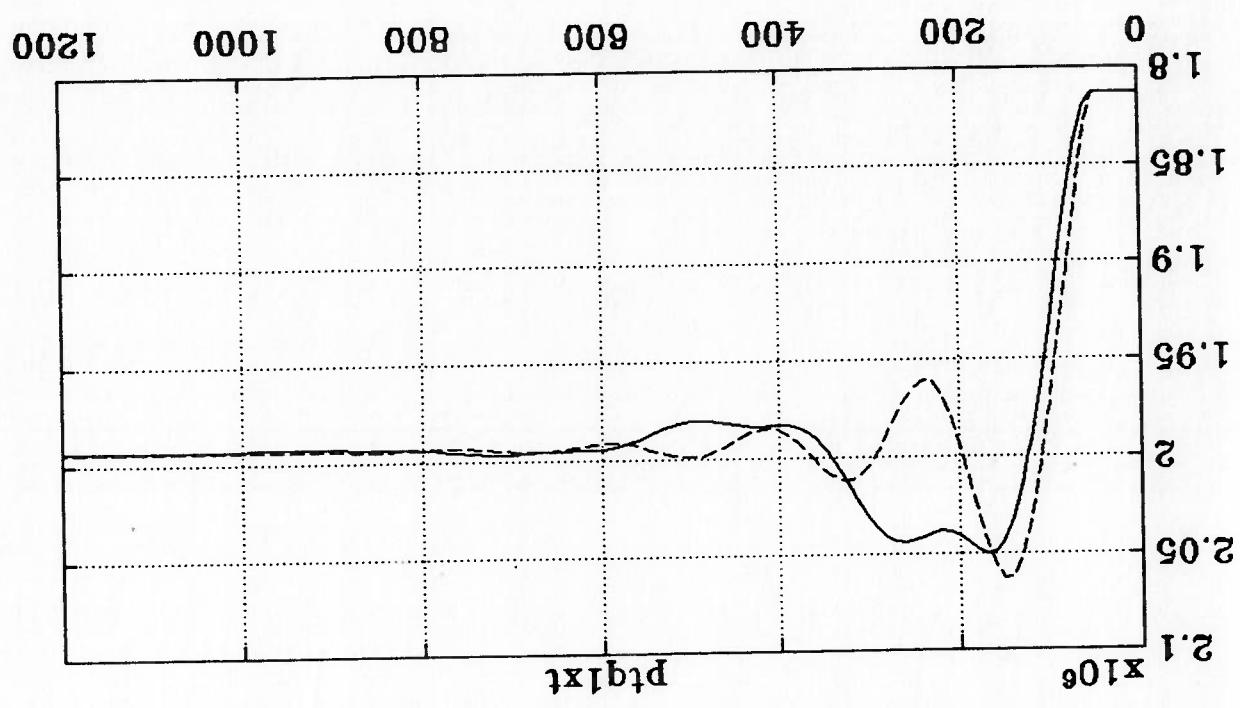


Figura 6.1 ——— DMC ——— PID P^{TQISP} 10% - controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

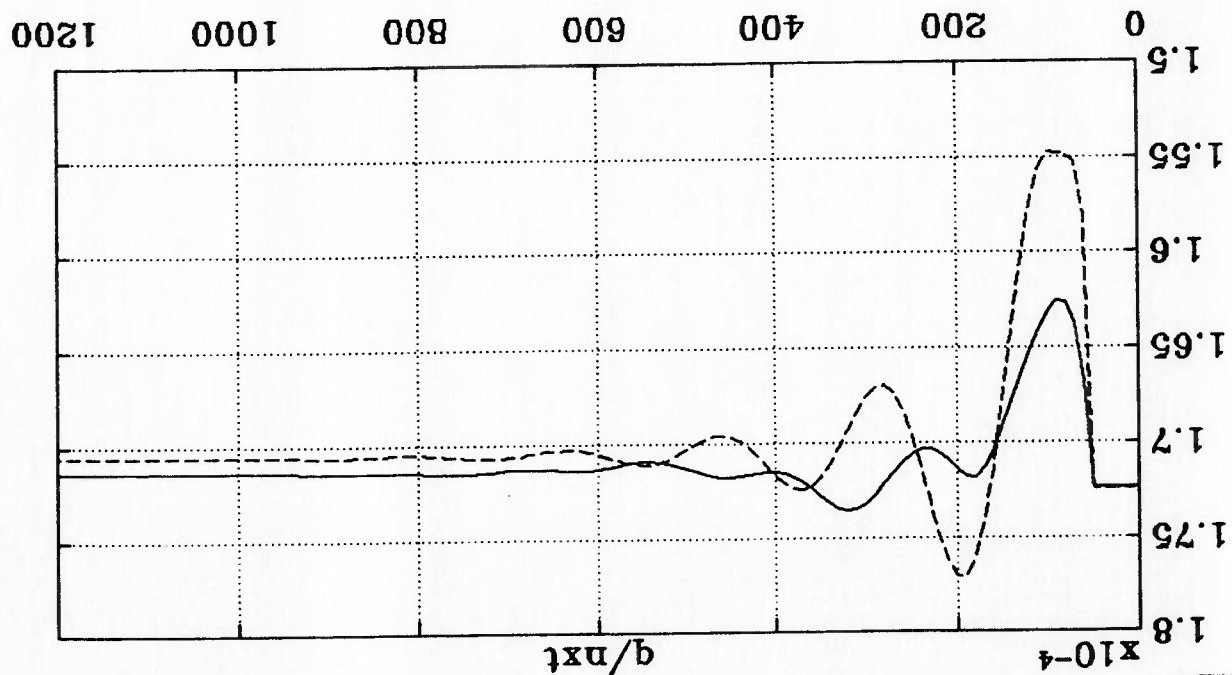
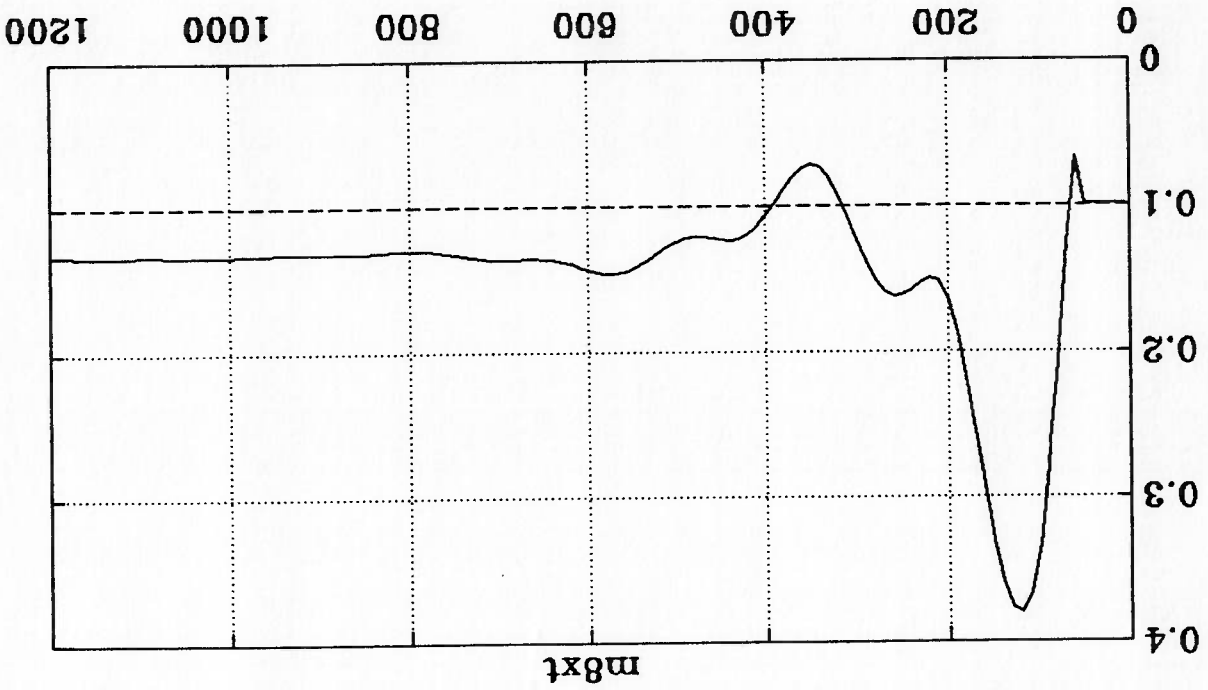


Figura 6.1 — DMC — PID P^{101SP} 10% - controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

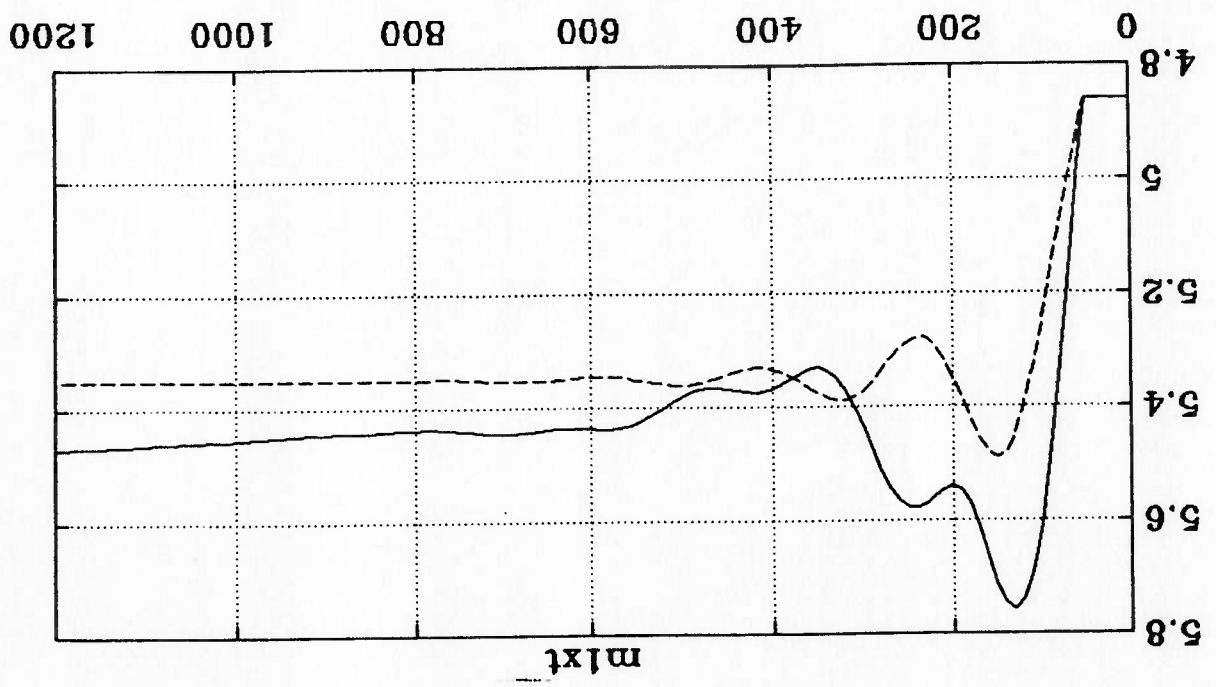
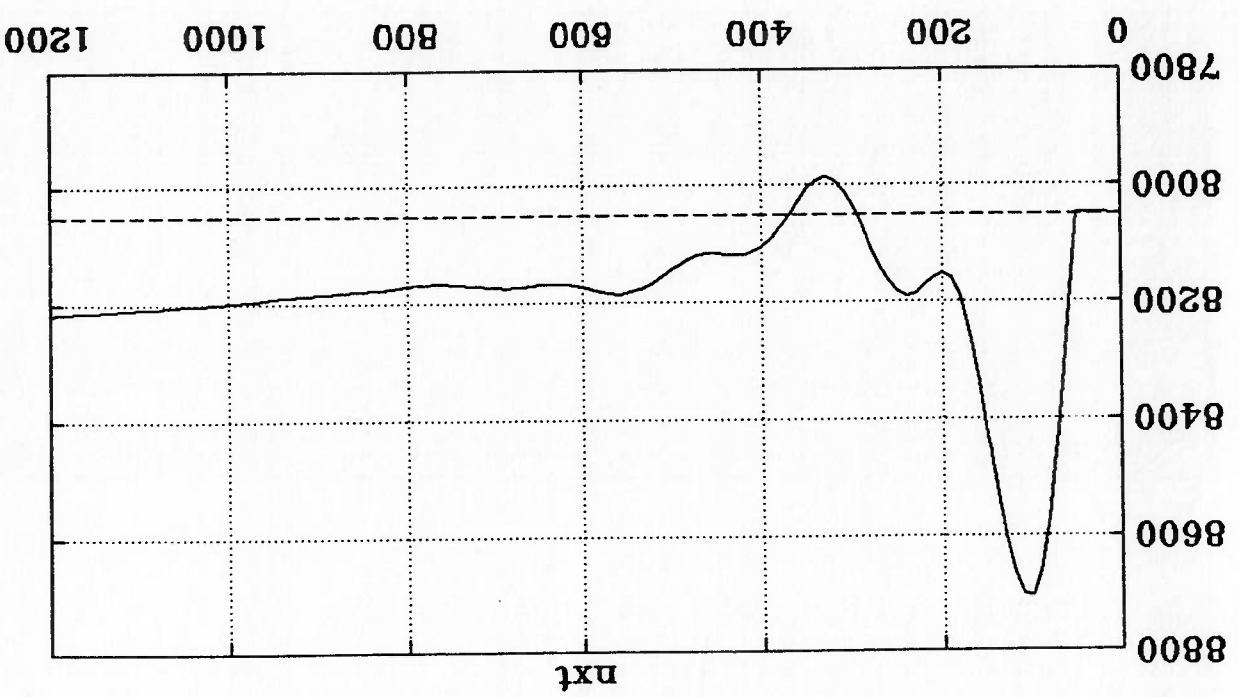


Figura 6.1 — DMC — PID P_{TQ1SP} 10% - controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

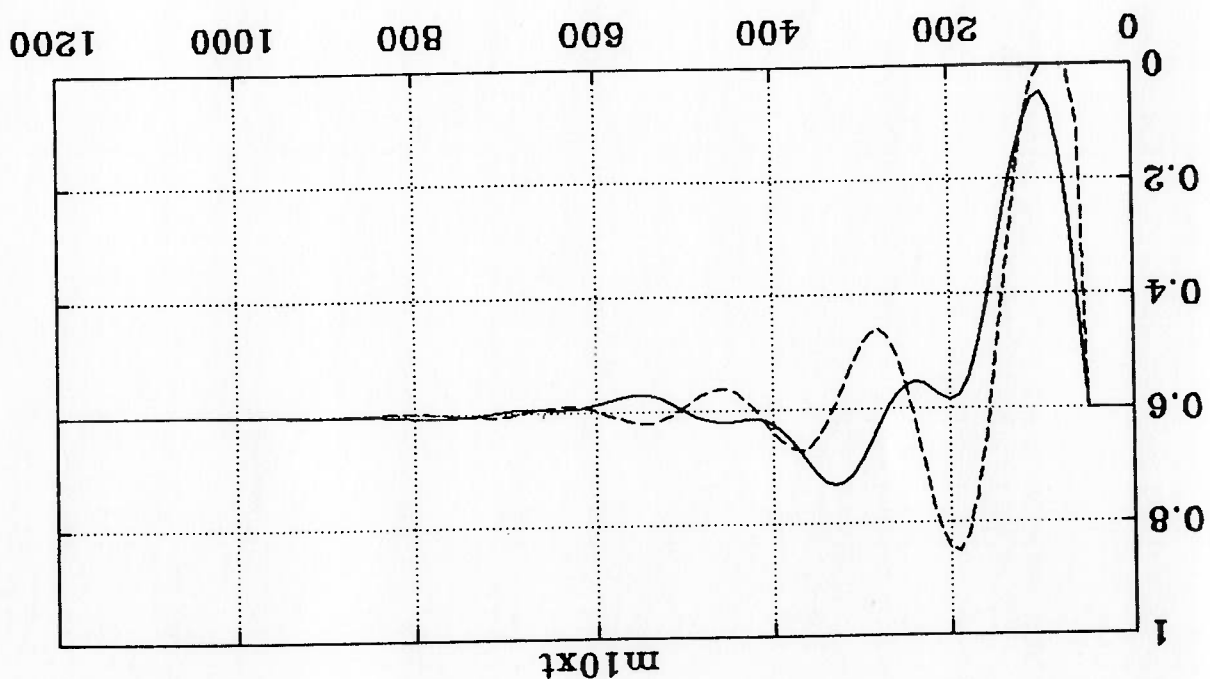
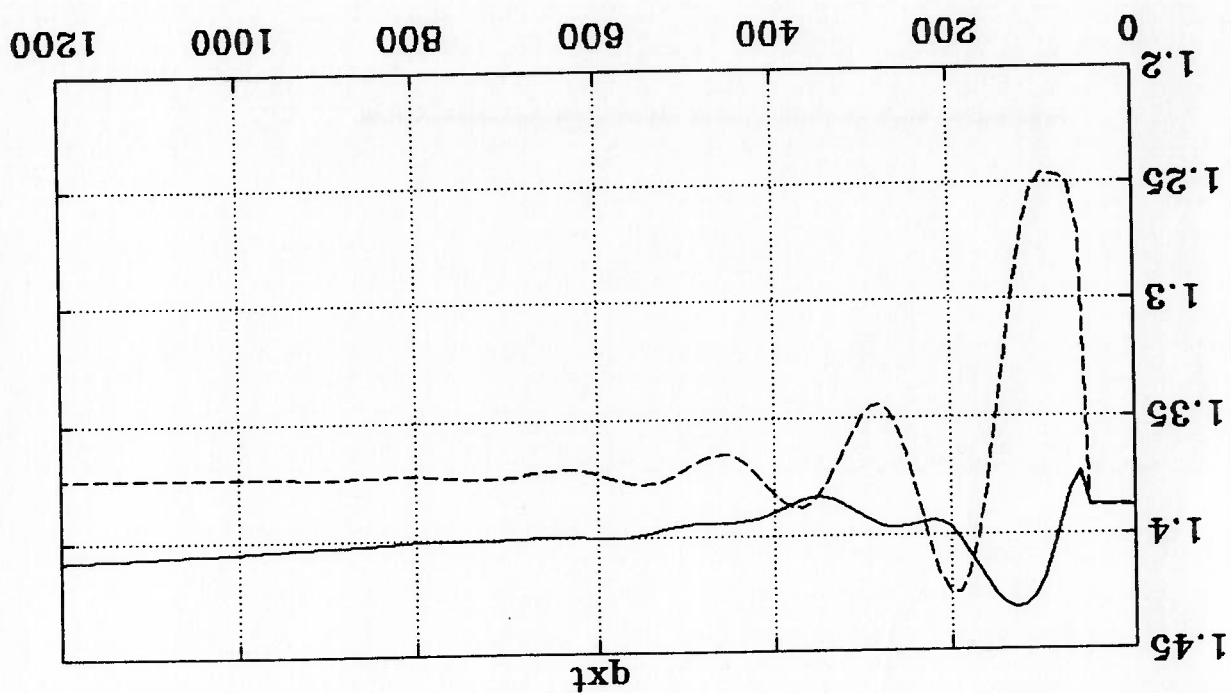


Figura 6.2 — DMC — PID m⁶-10% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4

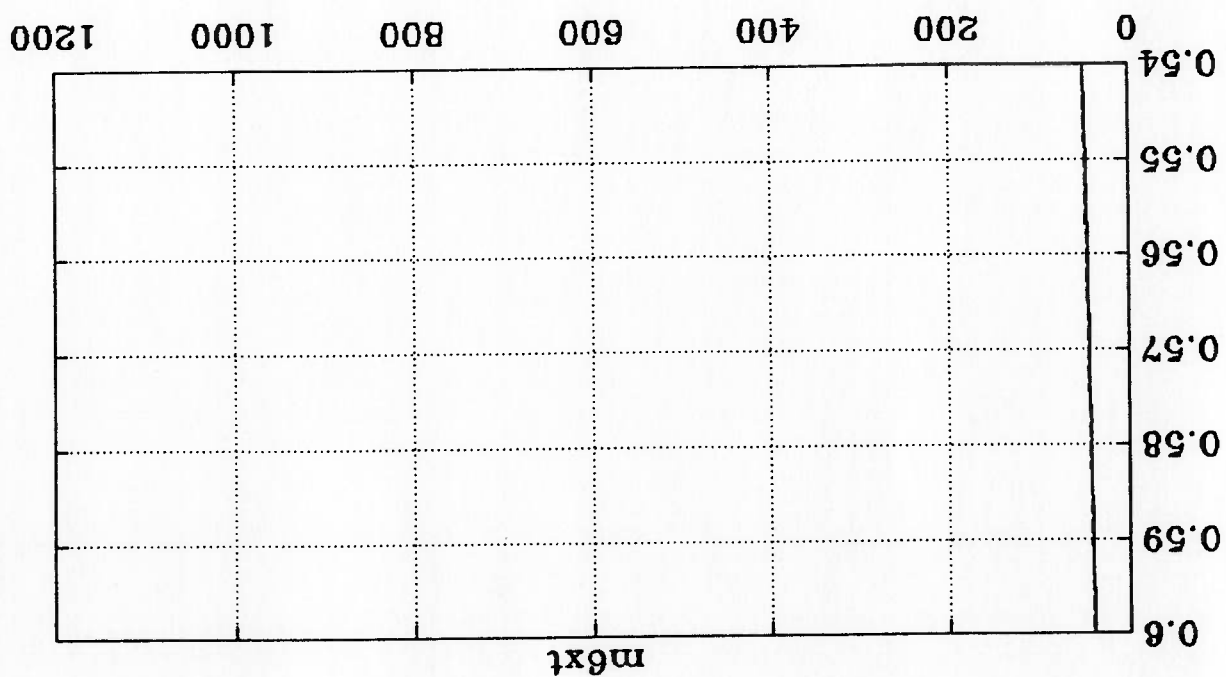
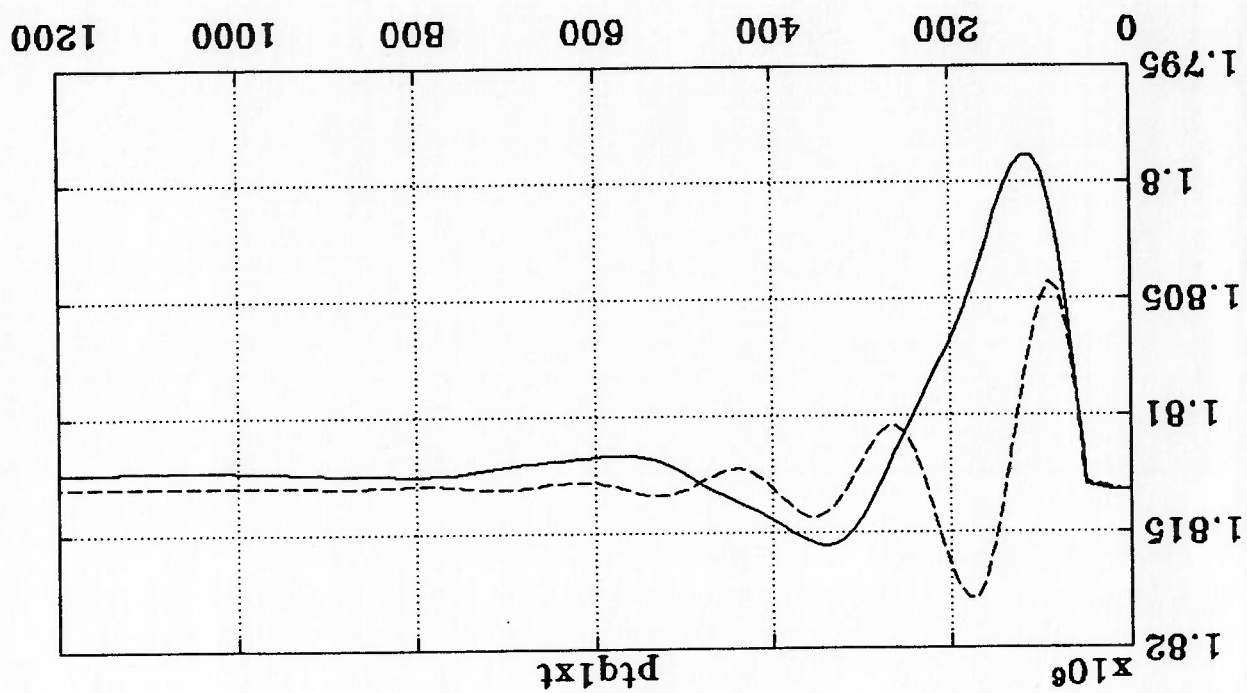


Figura 6.2 ——— DMC ——— PID m₆-10% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

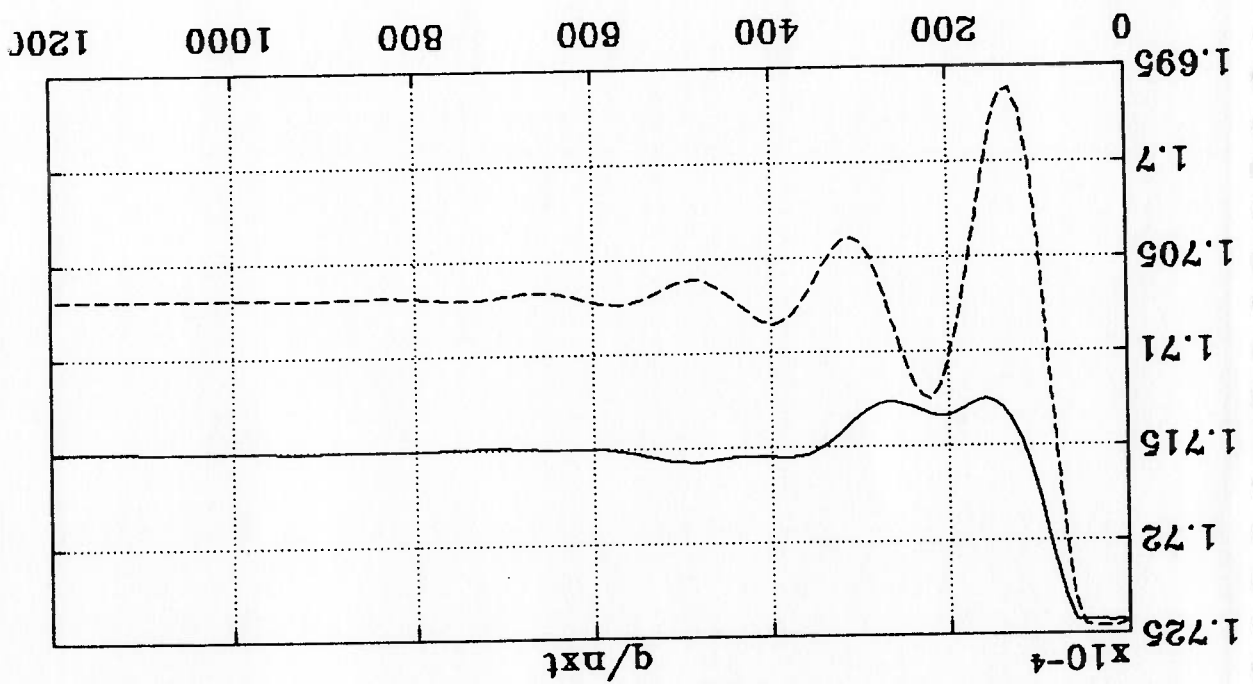
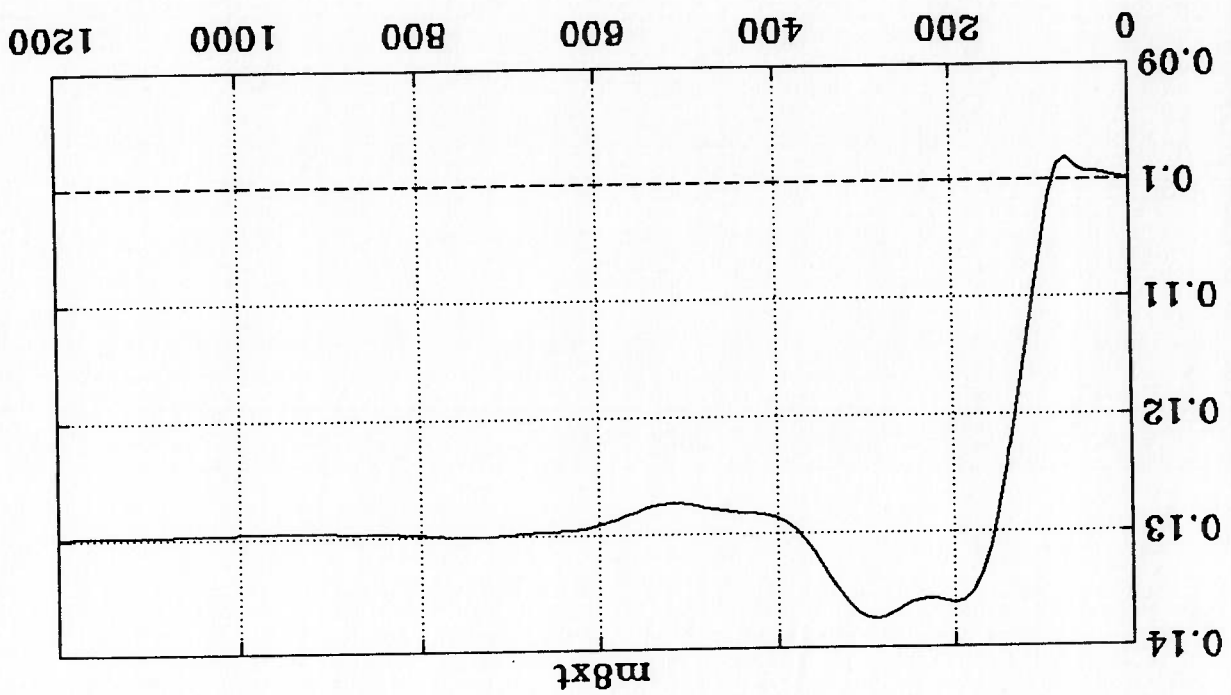


Figura 6.2 — DMC — PID m_6 -10% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

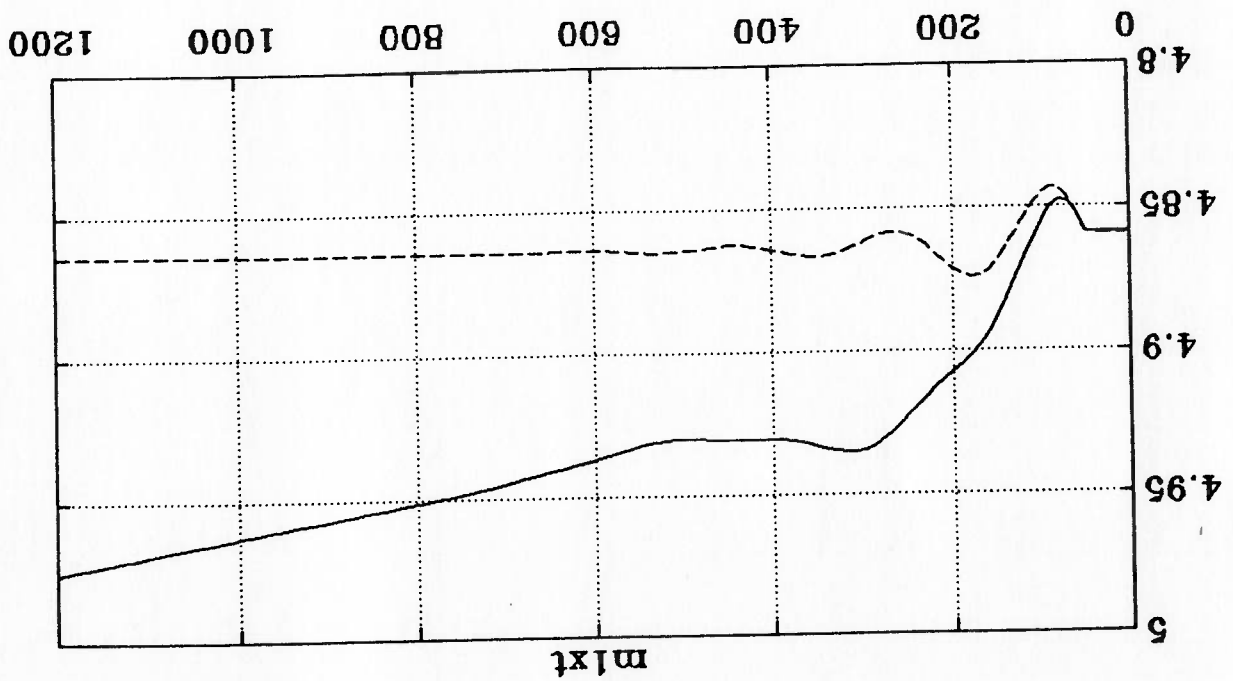
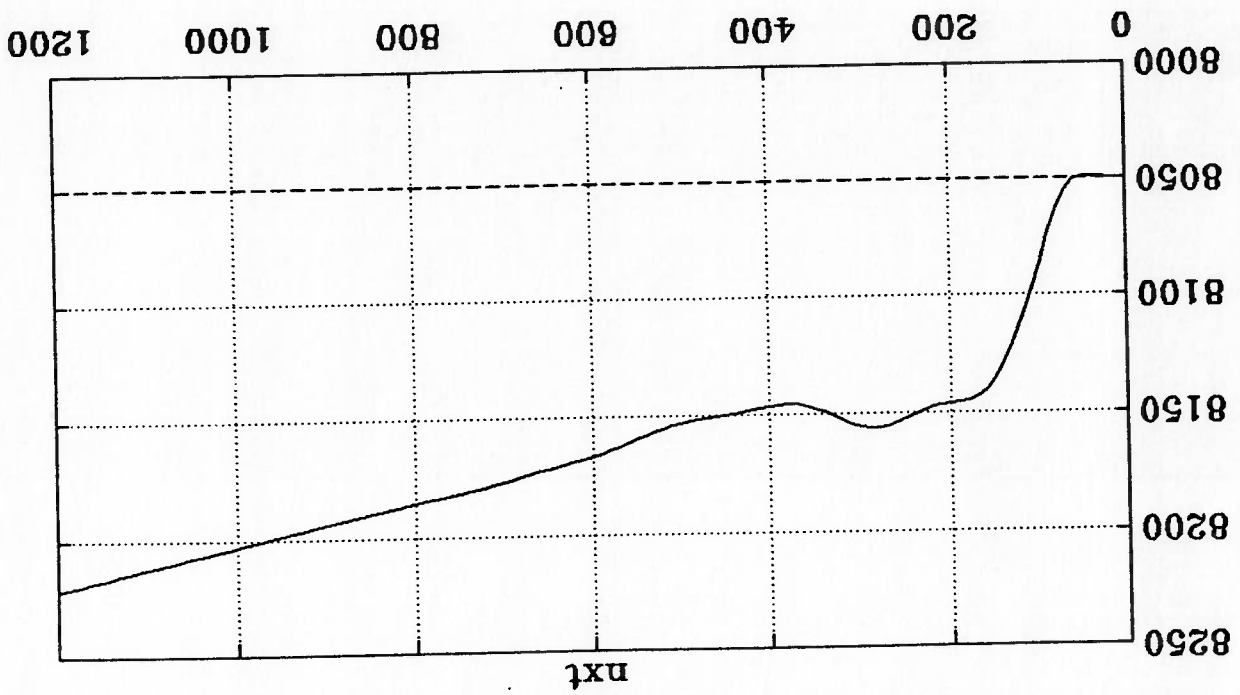


Figura 6.2 ——— DMC ——— PID m⁶-10% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

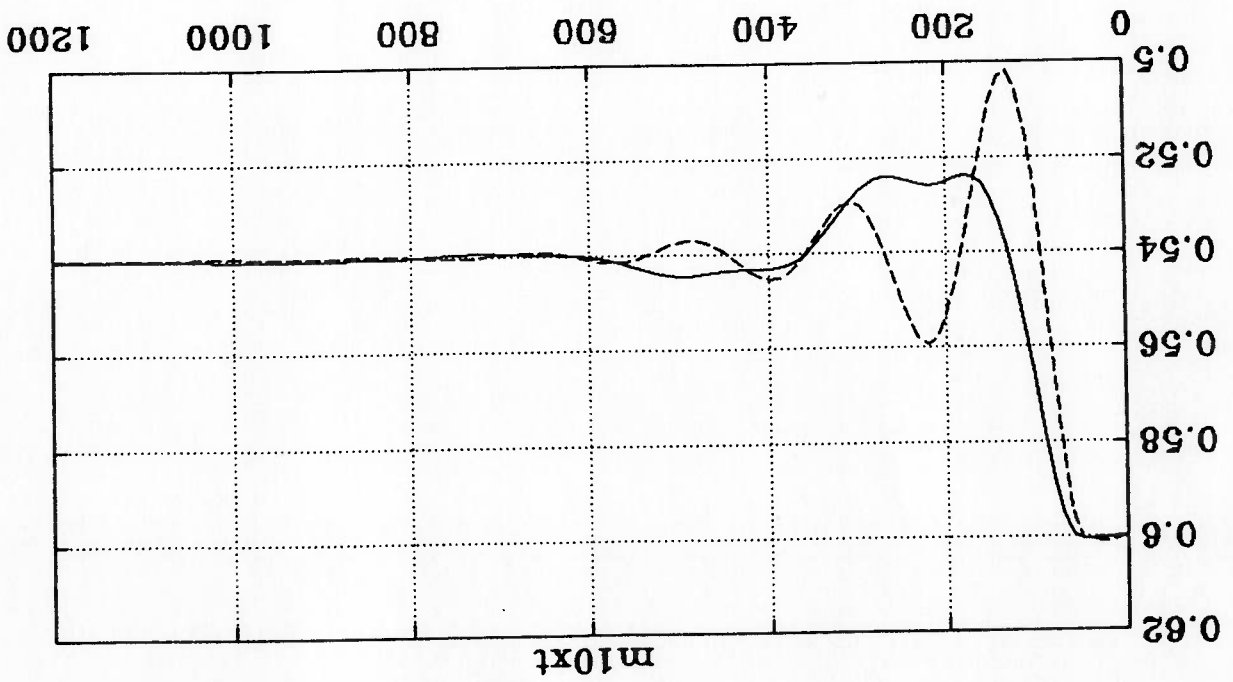
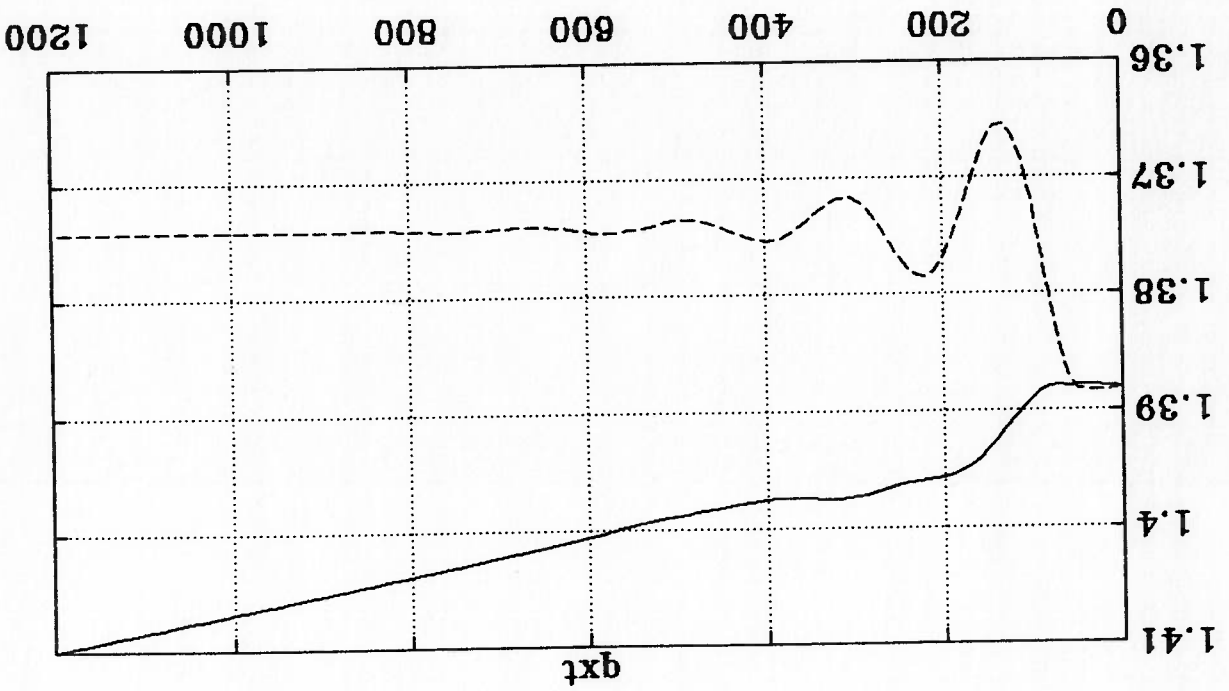


Figura 6.3 — DMC — PID f-10% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4

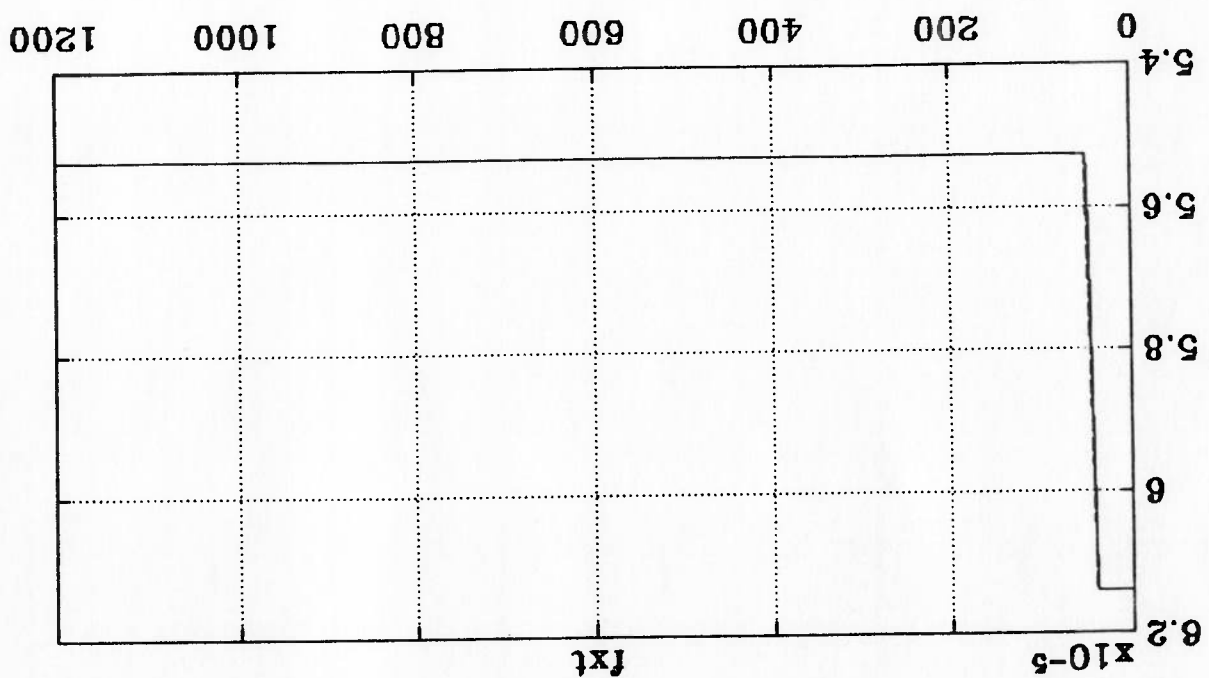
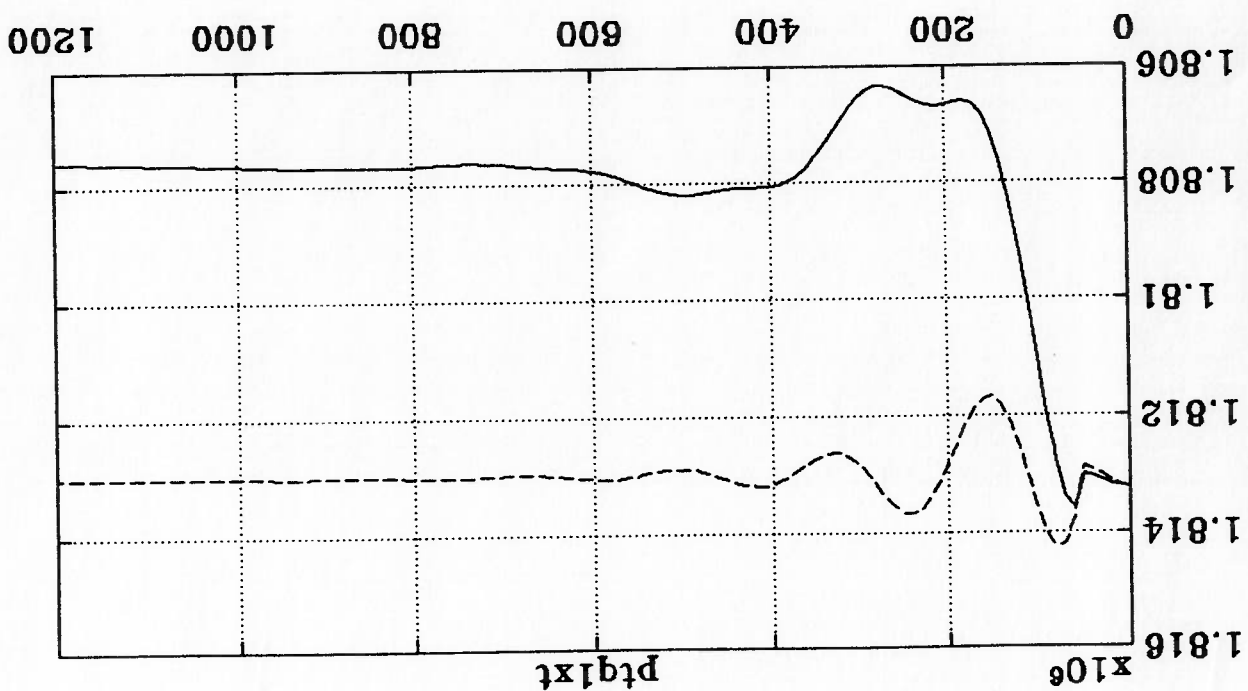


Figura 6.3 ——— DMC ——— PID f-10% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

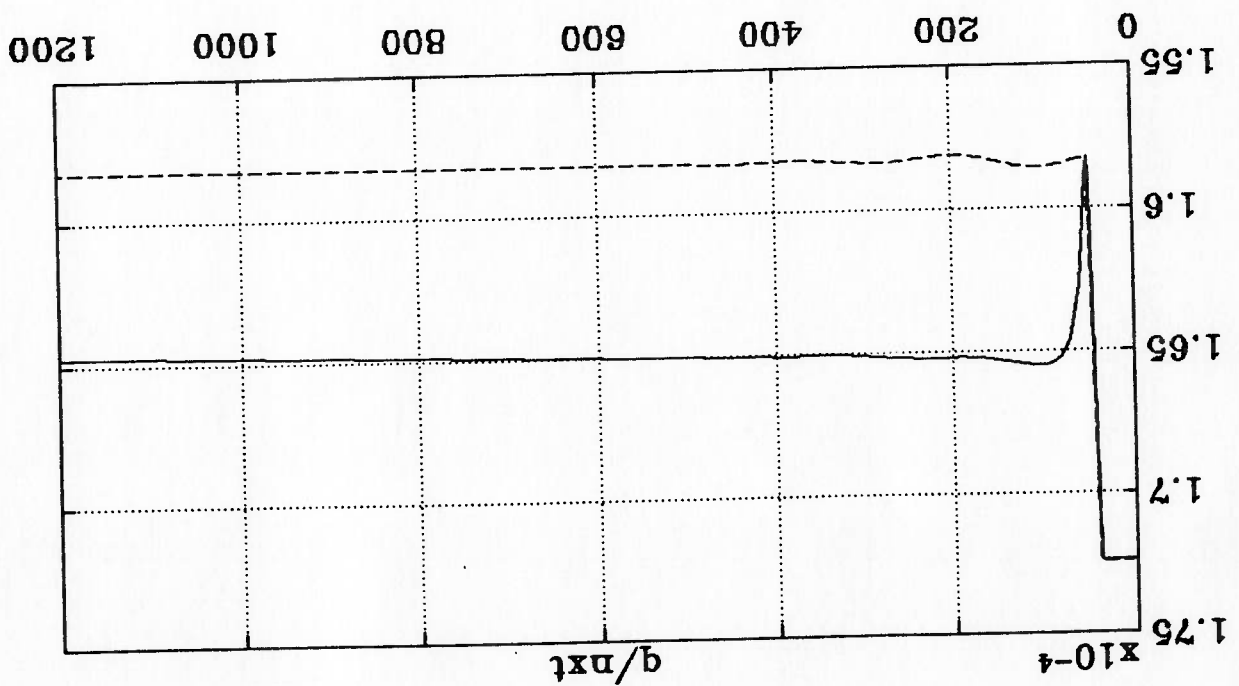
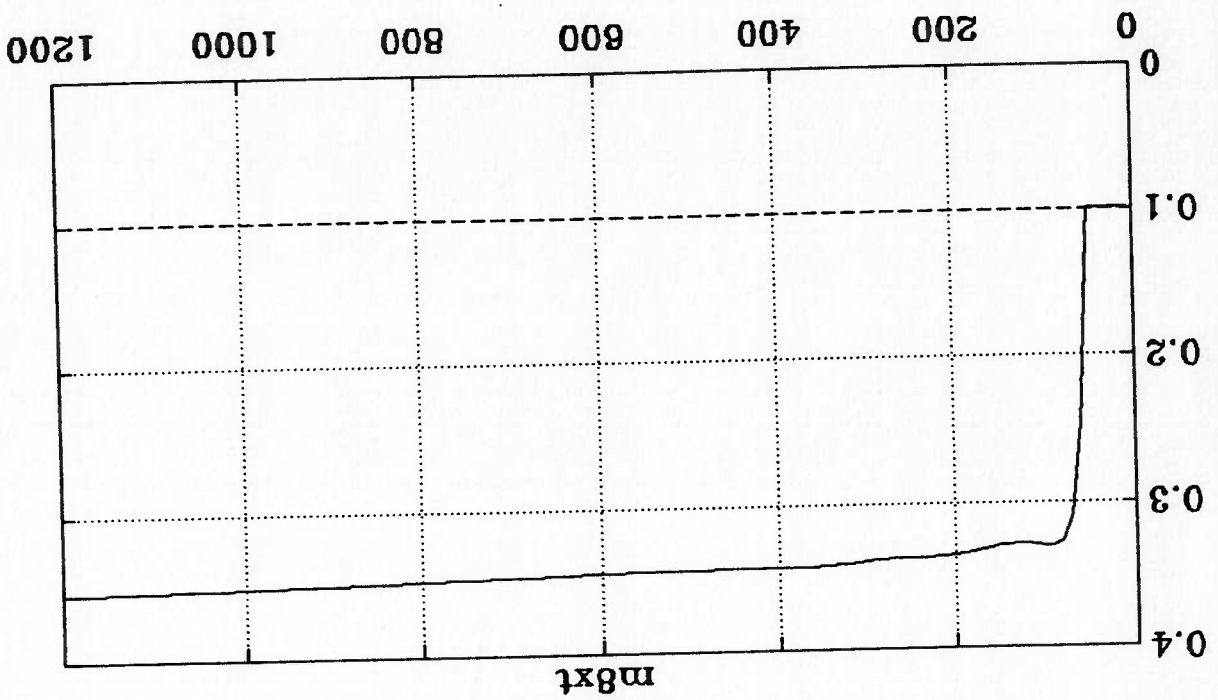
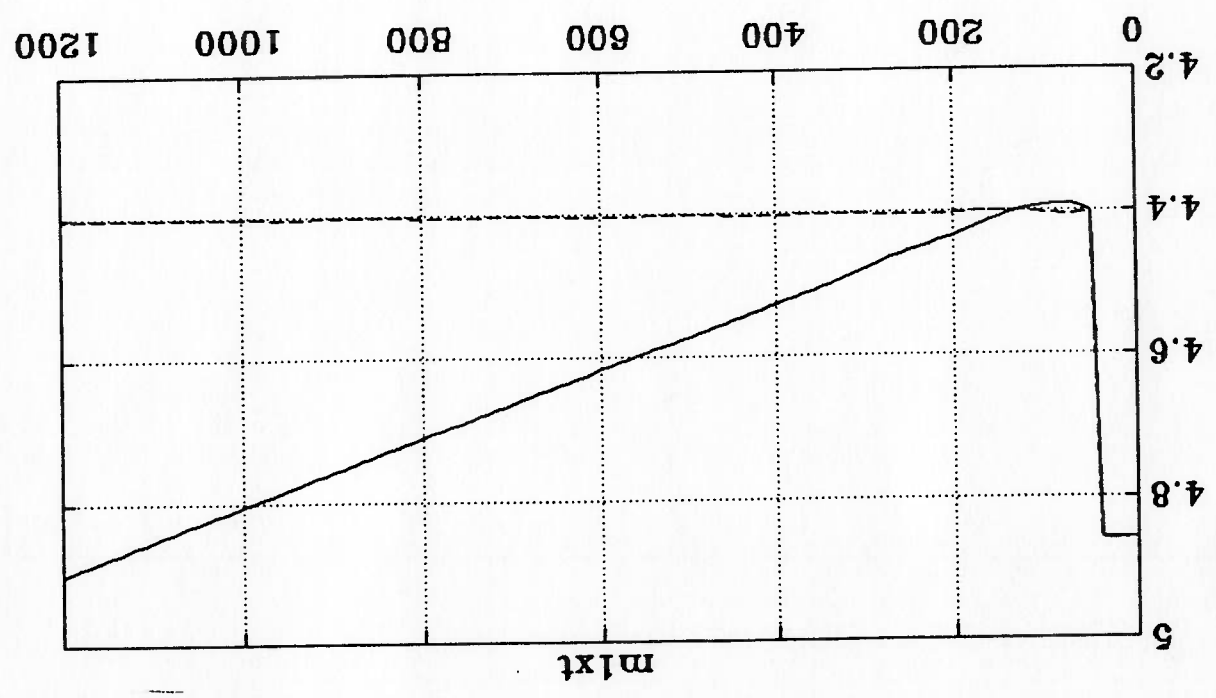
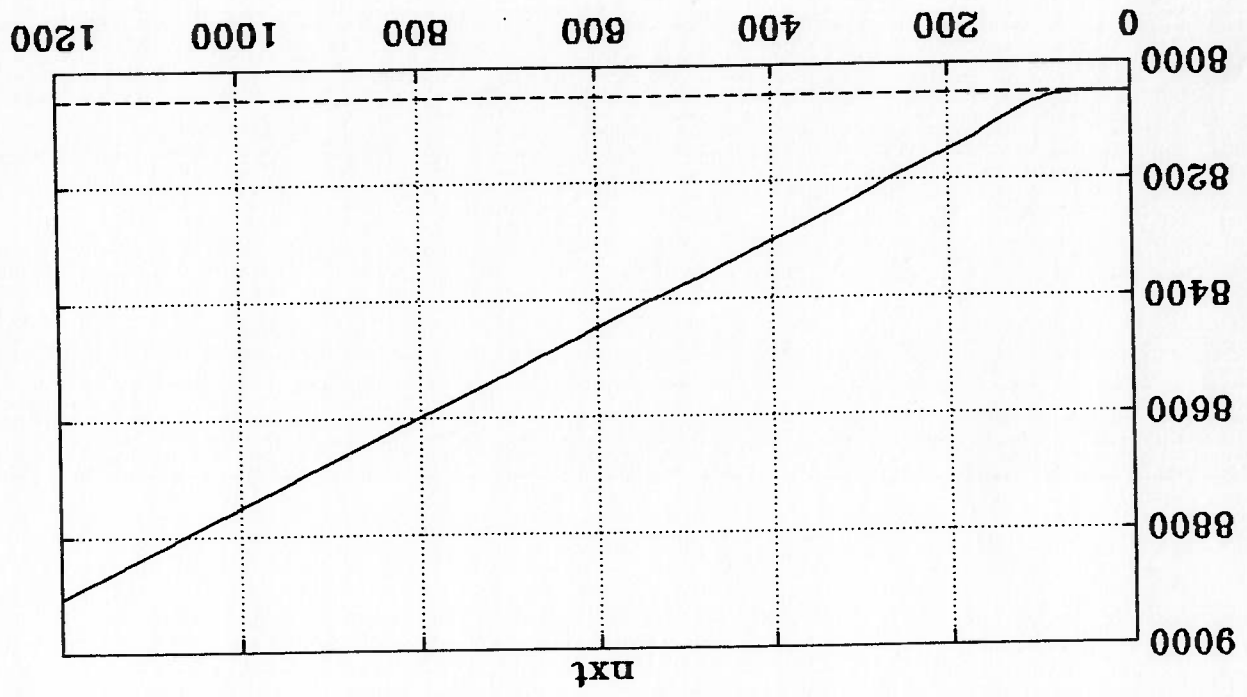


Figura 6.3 — DMC — PID f-10% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação



seções 4.12 e 5.4 continuação

Figura 6.3 ——— DMC ——— PID f-10% controladores ajustados conforme

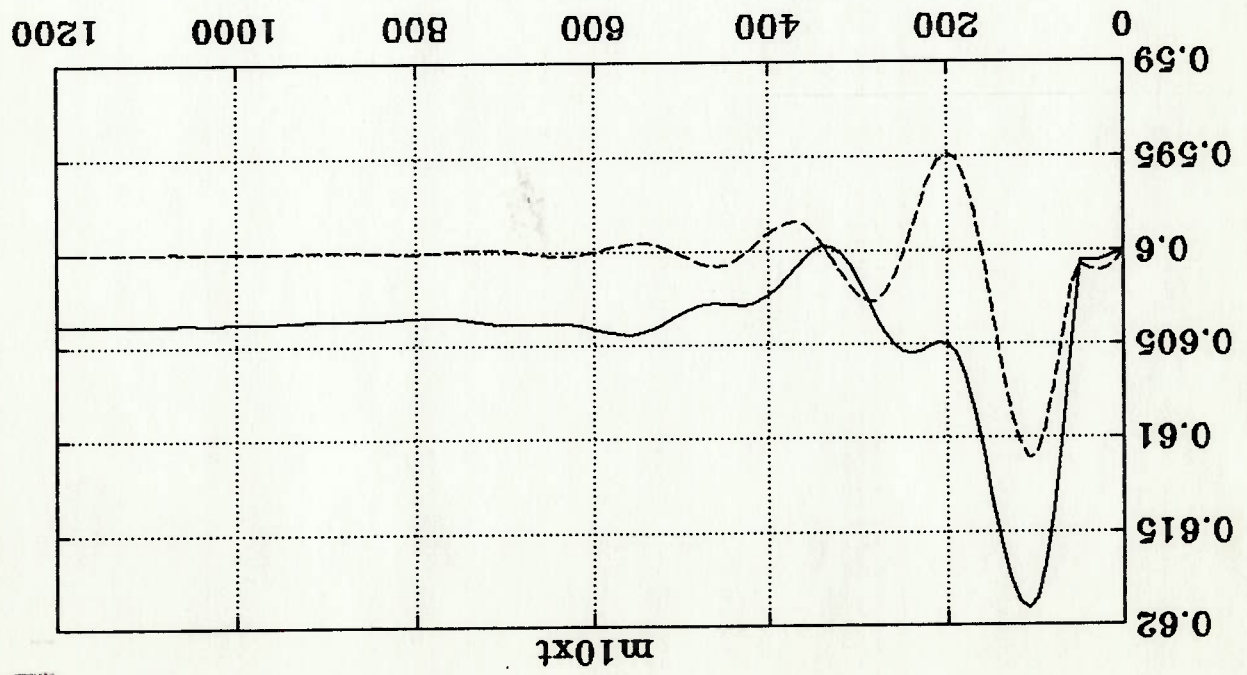
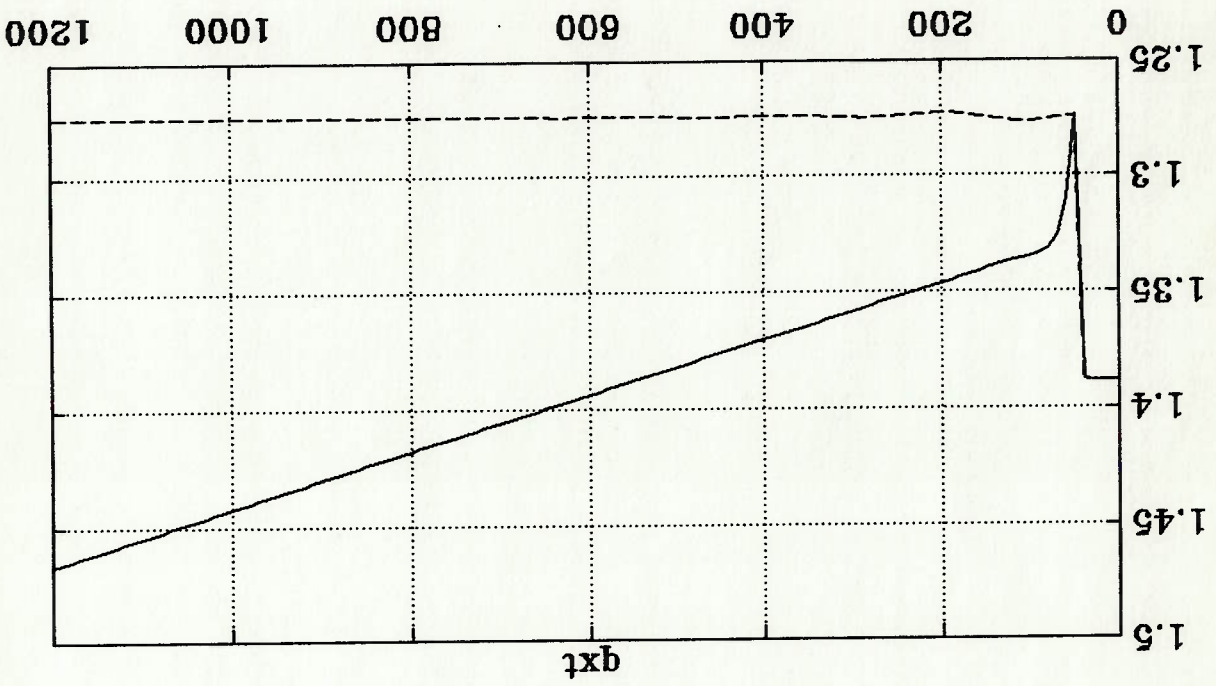


Figura 6.4 — DMC — PID f -25% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4

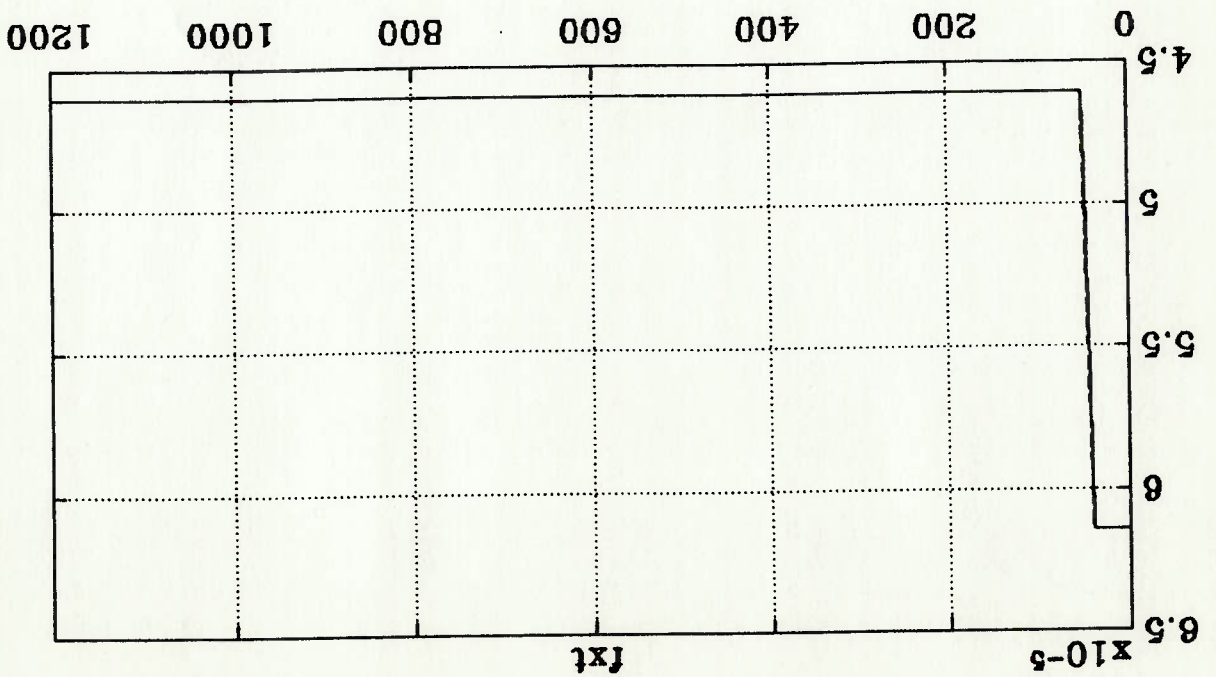
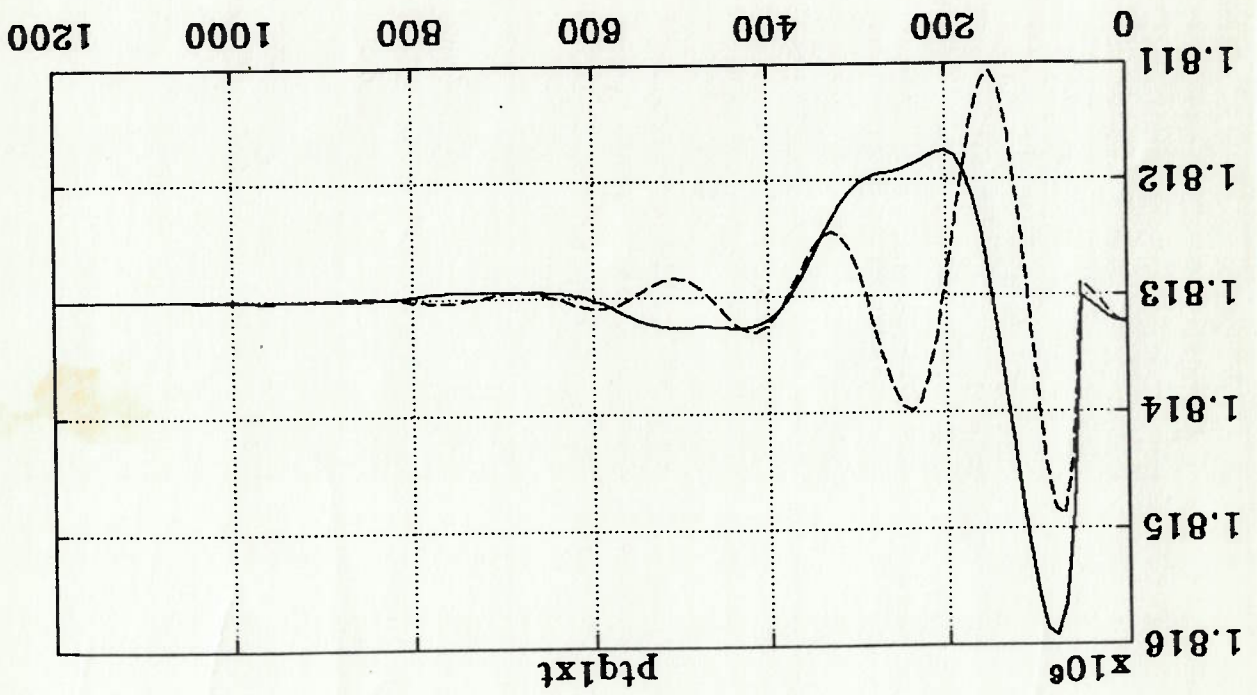


Figura 6.4 — DMC — PID f -25% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

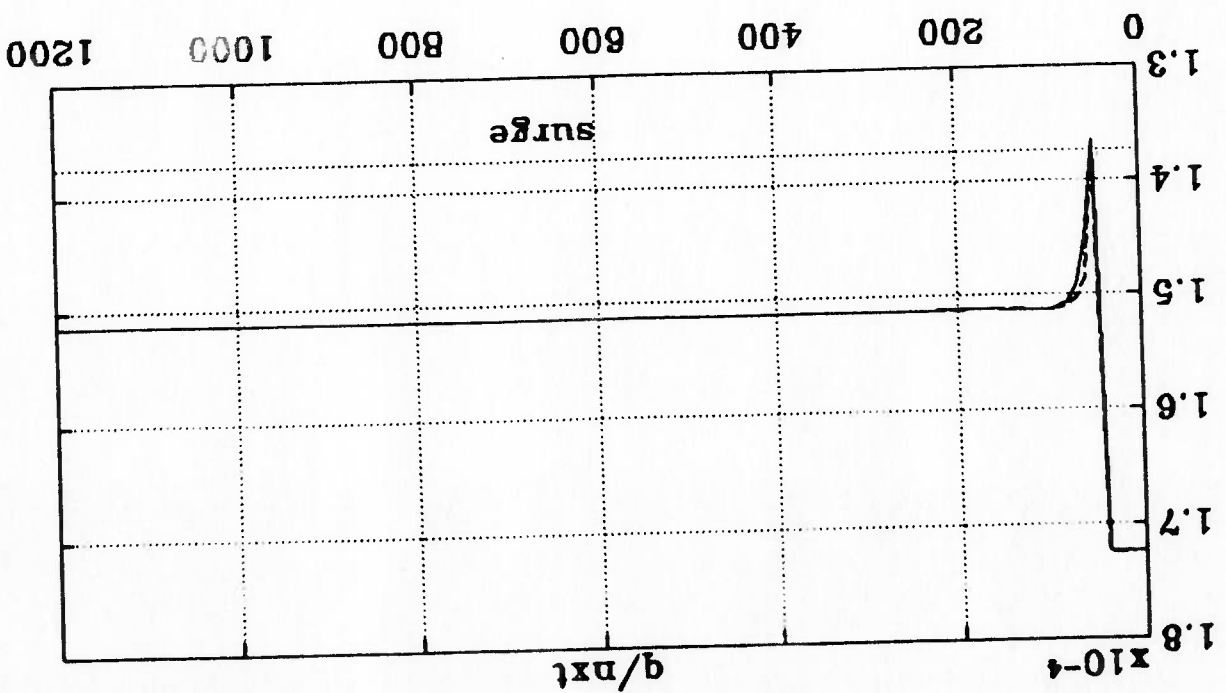
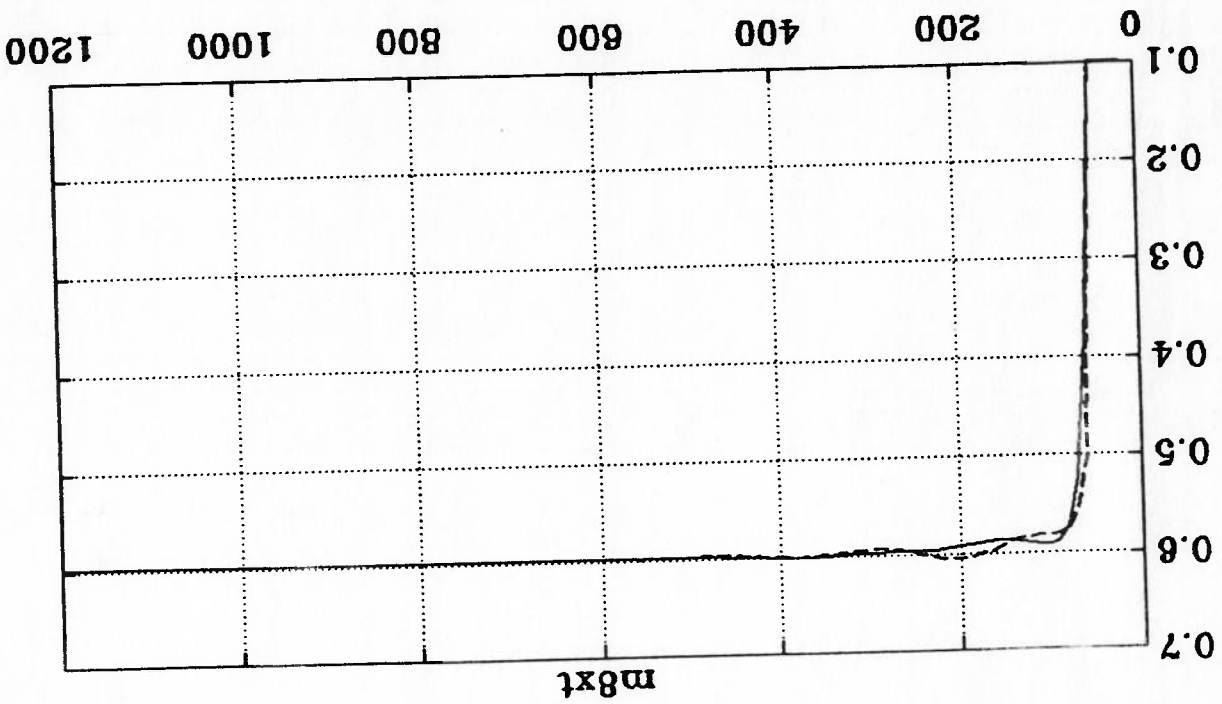


Figura 6.4 — DMC — PID f -25% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

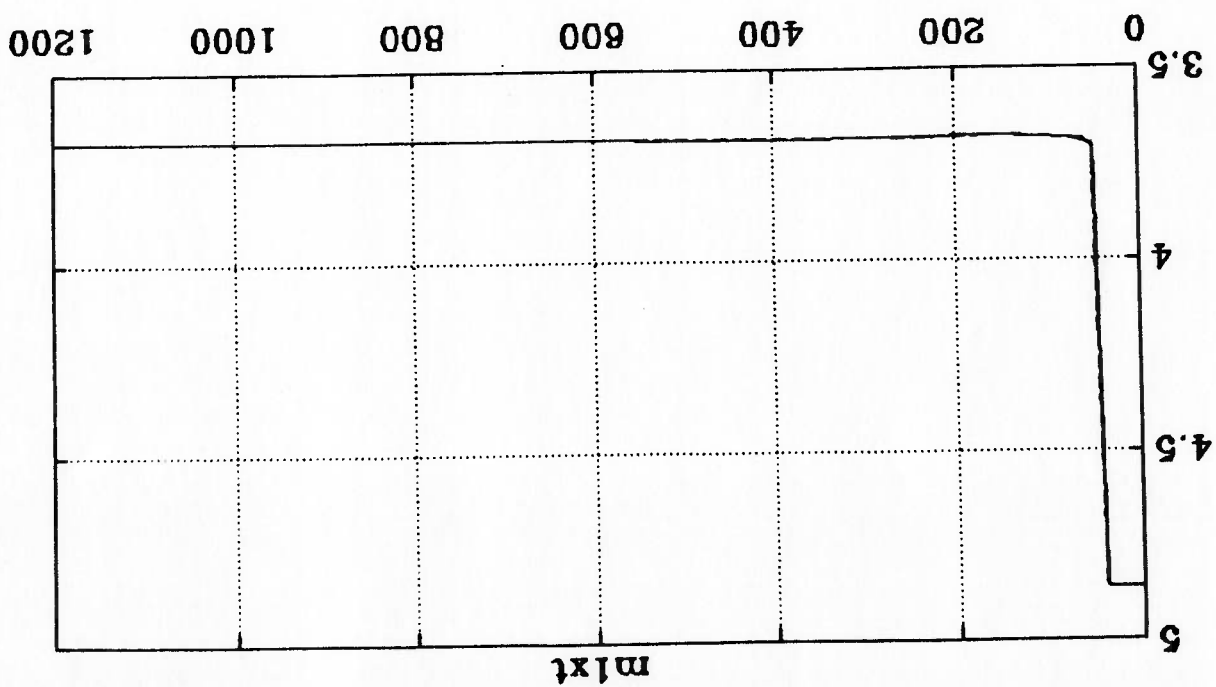
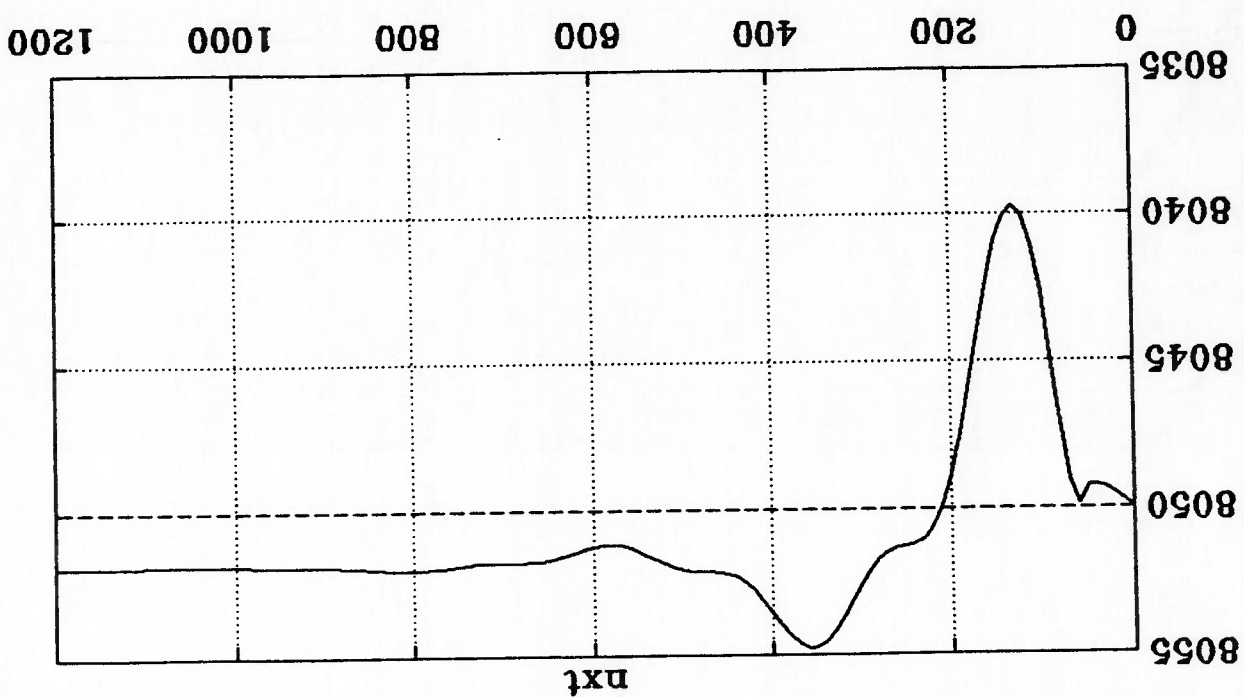


Figura 6.4 — DMC — PID 1-25% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

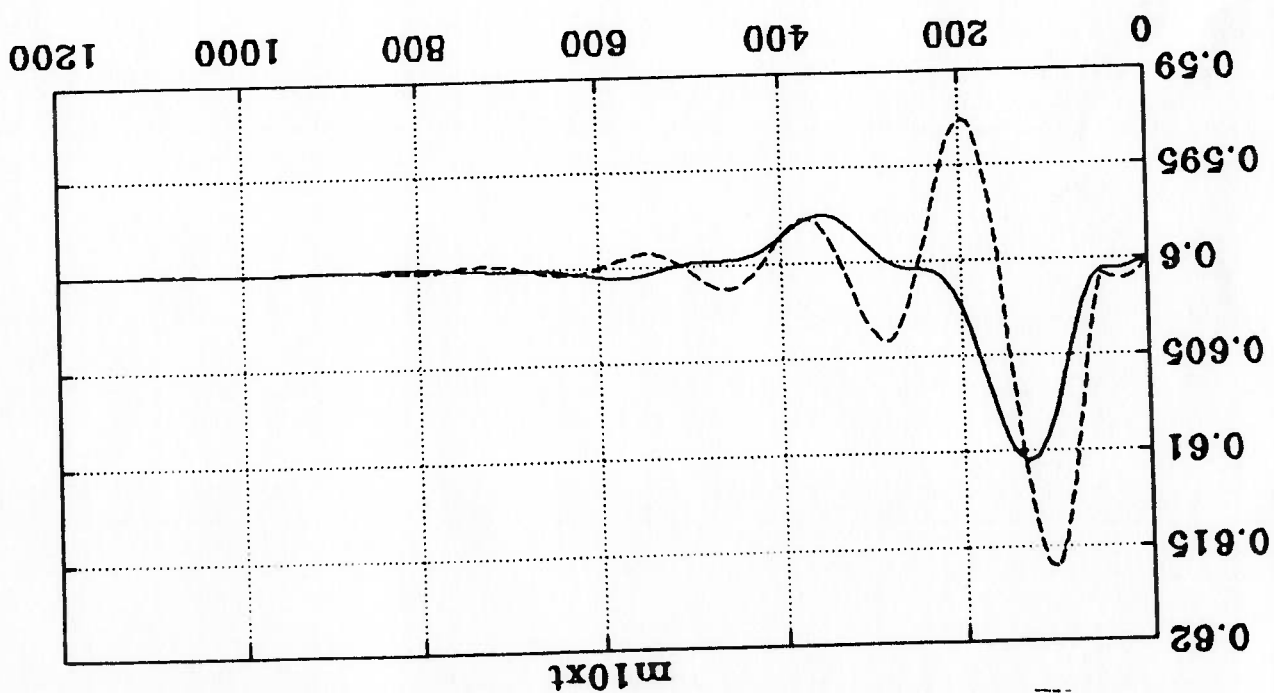
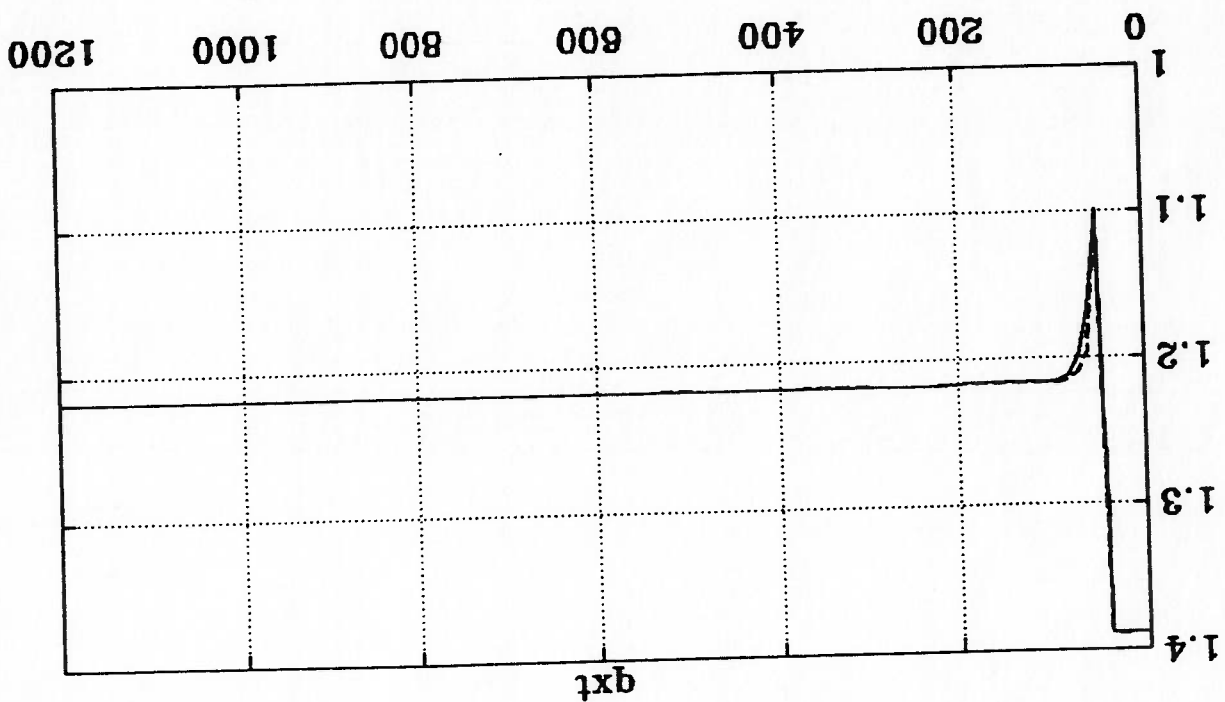


Figura 6.5 — DMC — PID f -50% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4

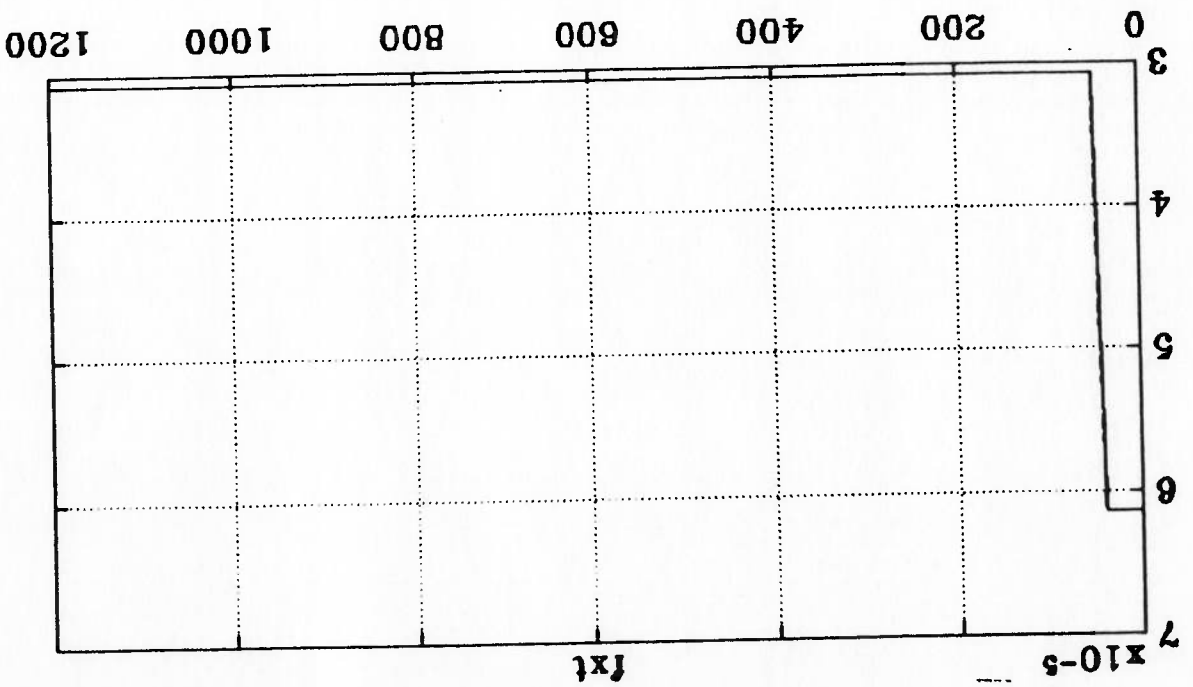
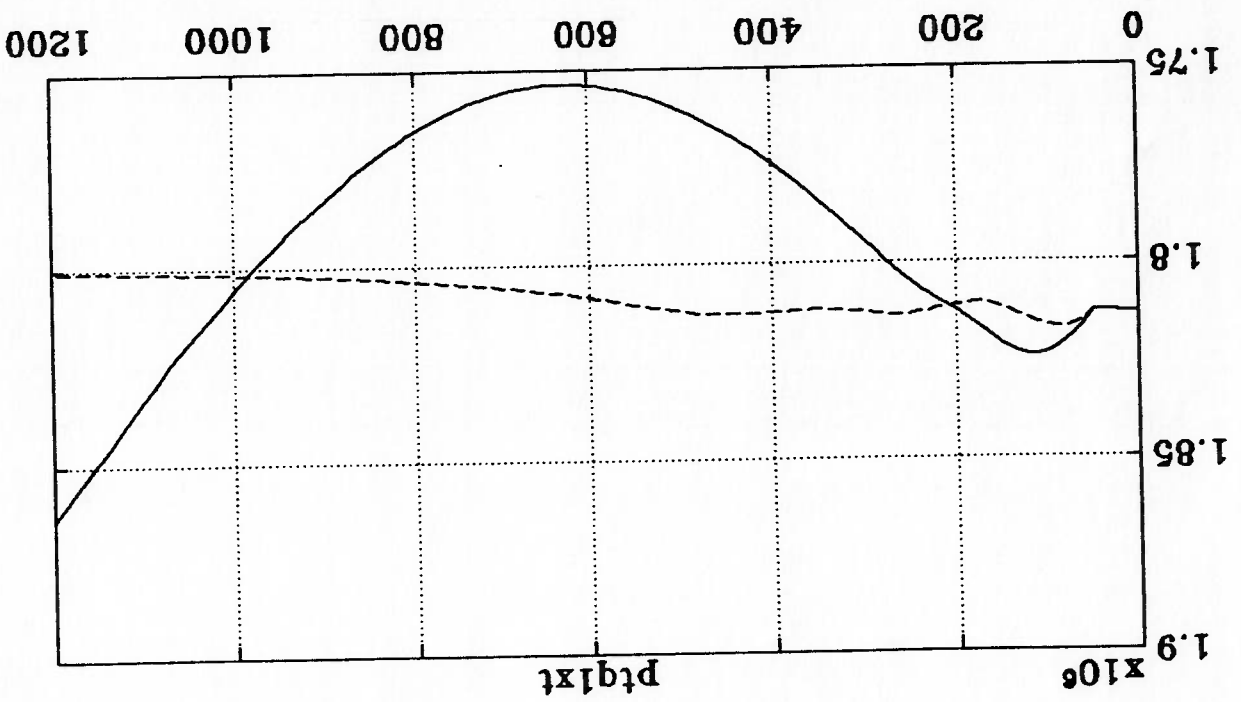


Figura 6.5 — DMC — PID f -50% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

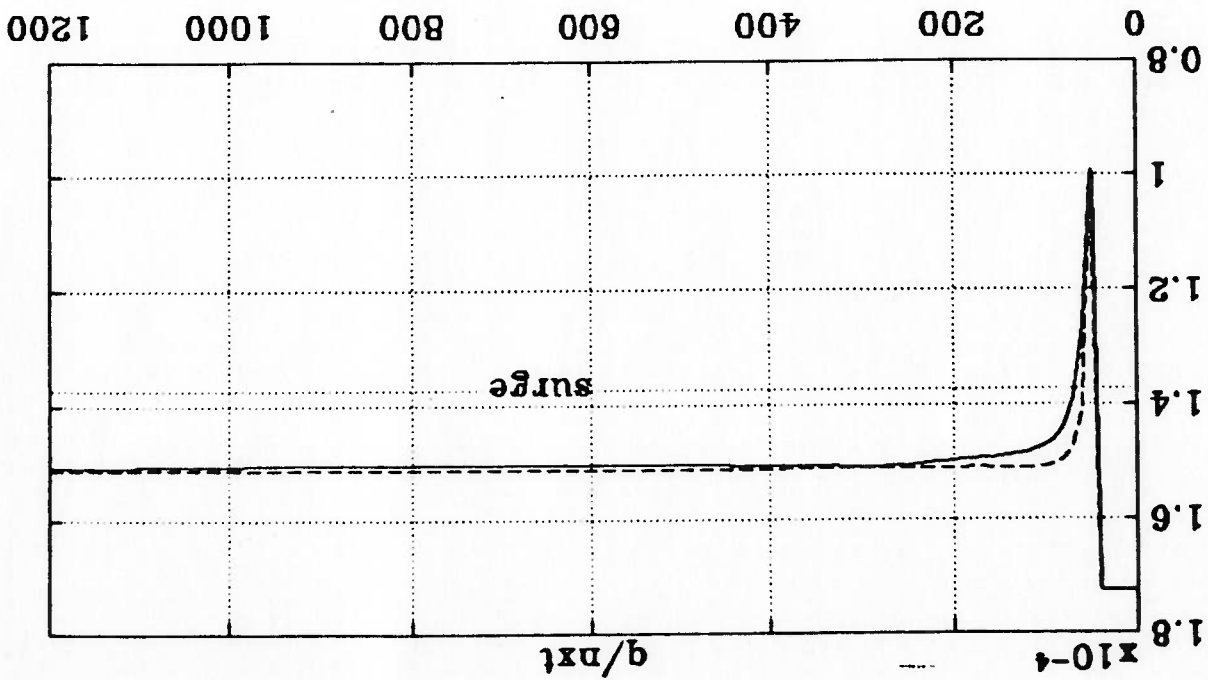
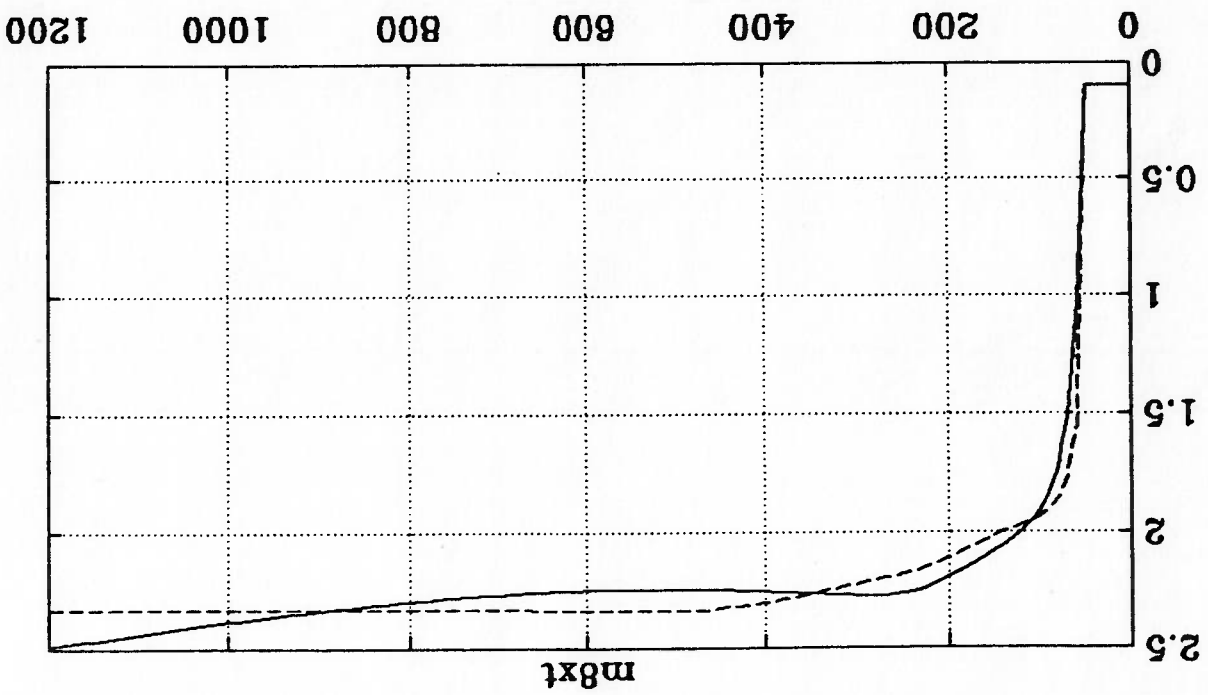


Figura 6.5 — DMC — PID f -50% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

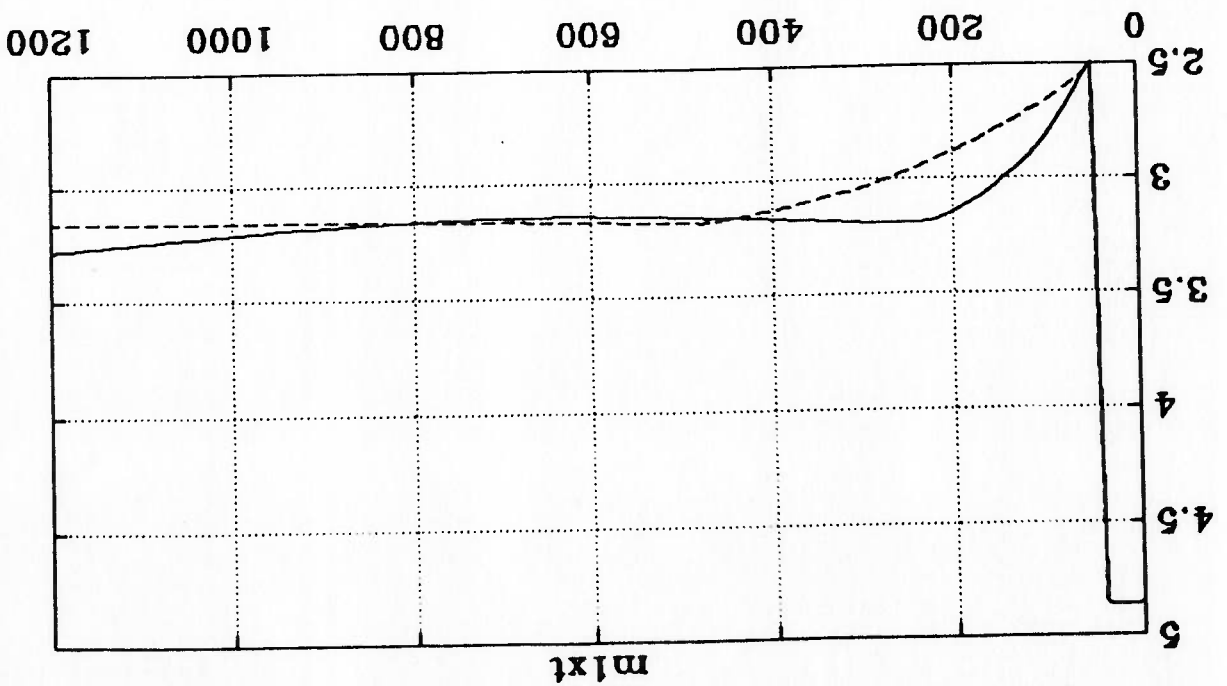
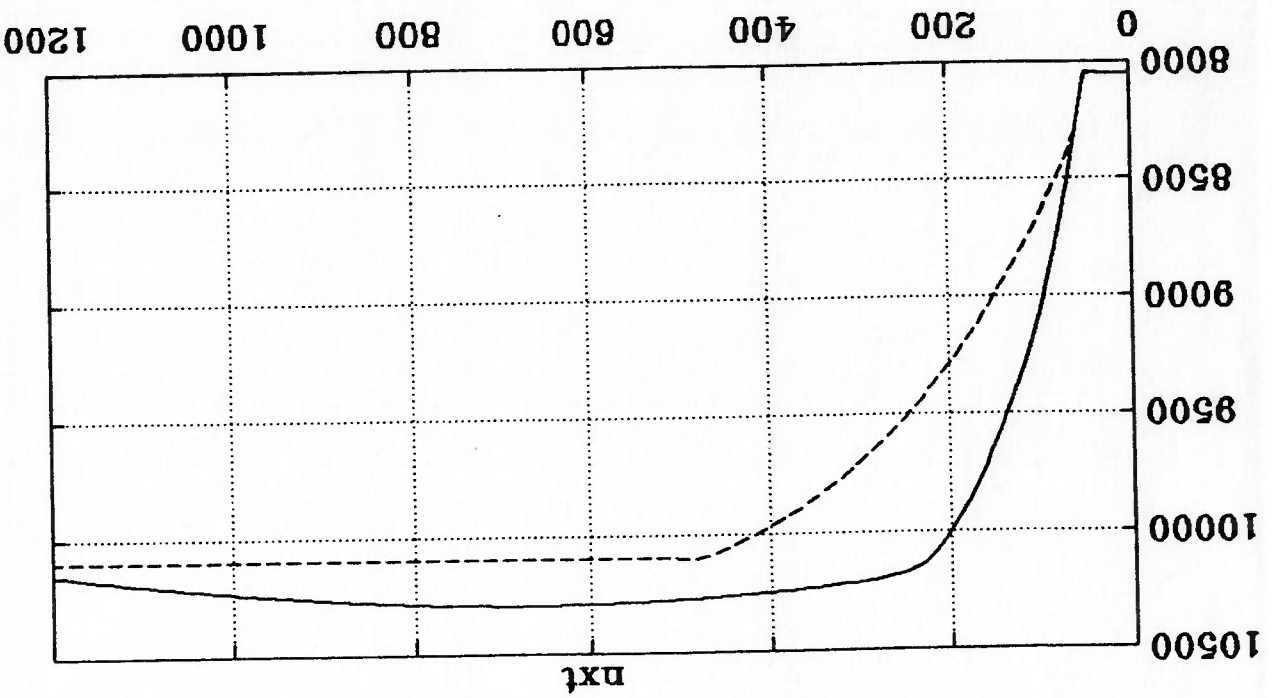


Figura 6.5 — DMC — PID f -50% controladores ajustados conforme seções 4.12 e 5.4 continuação

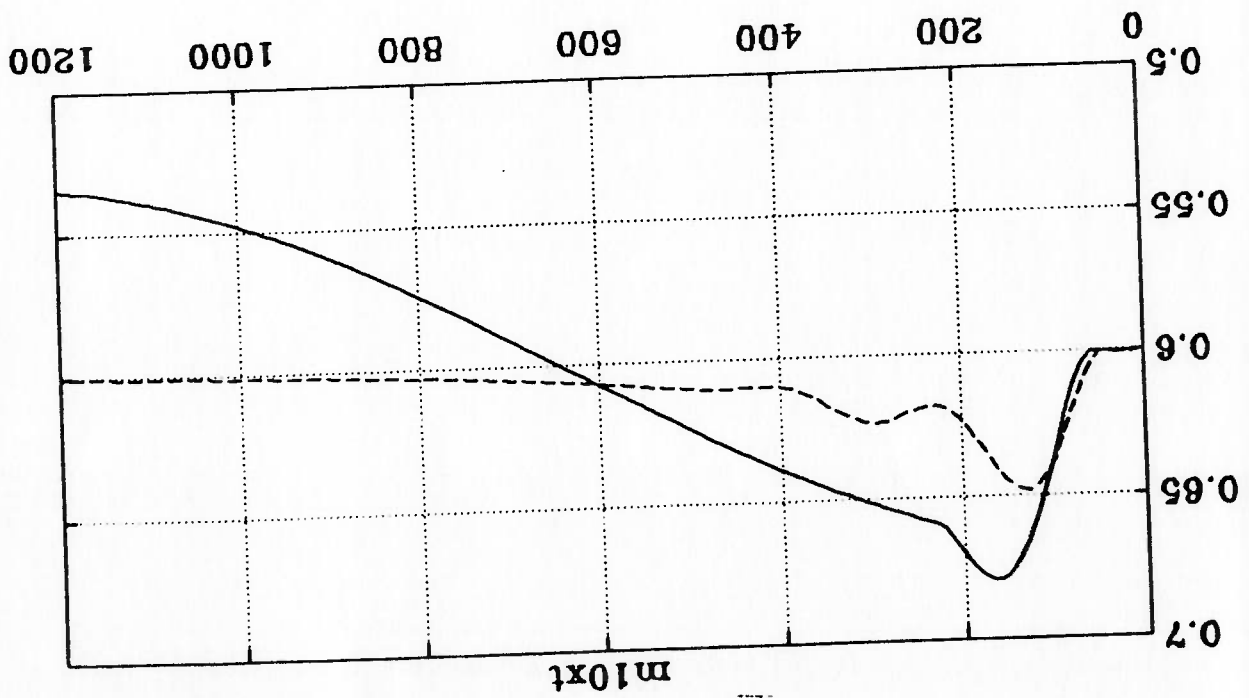
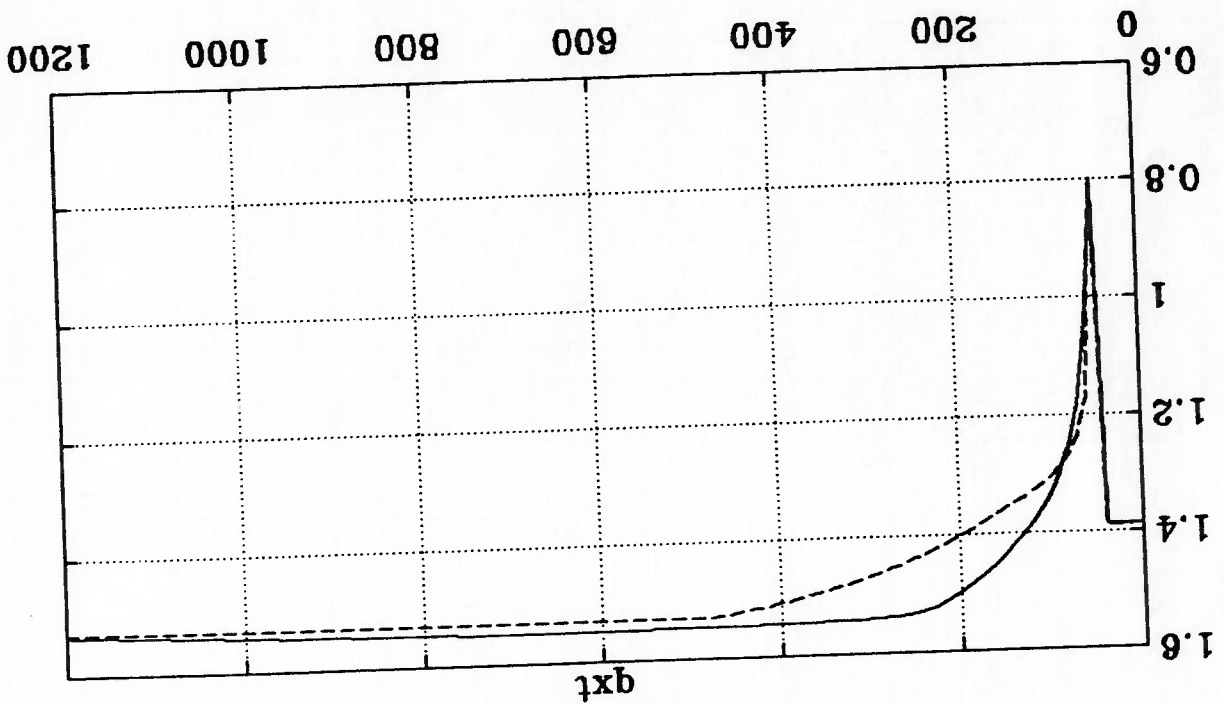


Figura 6.6 f -10% DMC

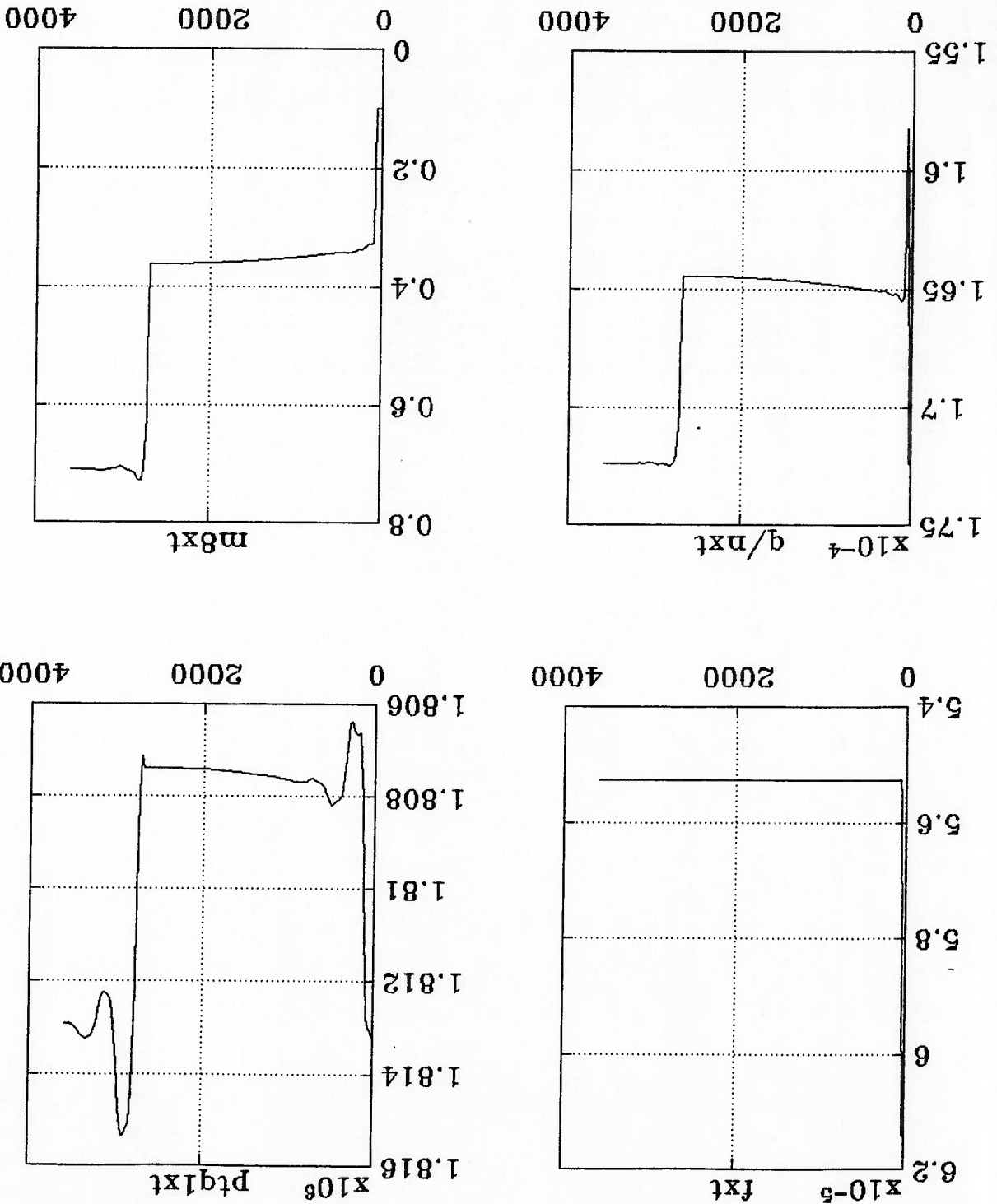


Figura 6.6 m6 -10% DMC continuação

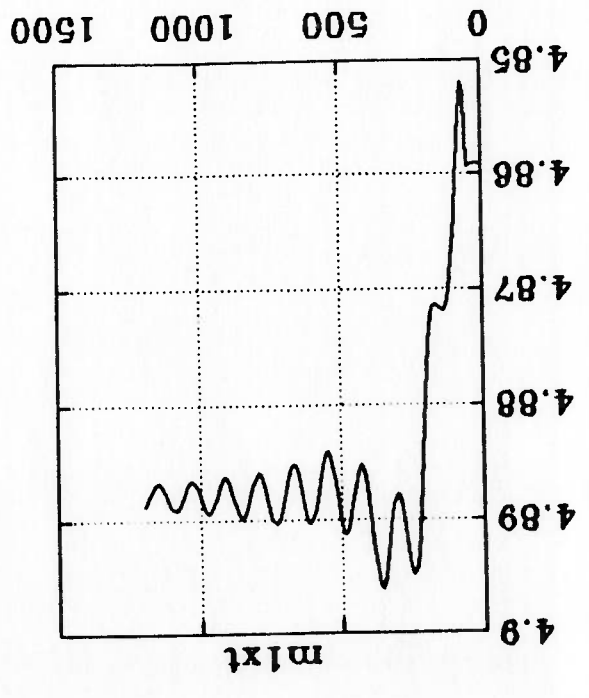
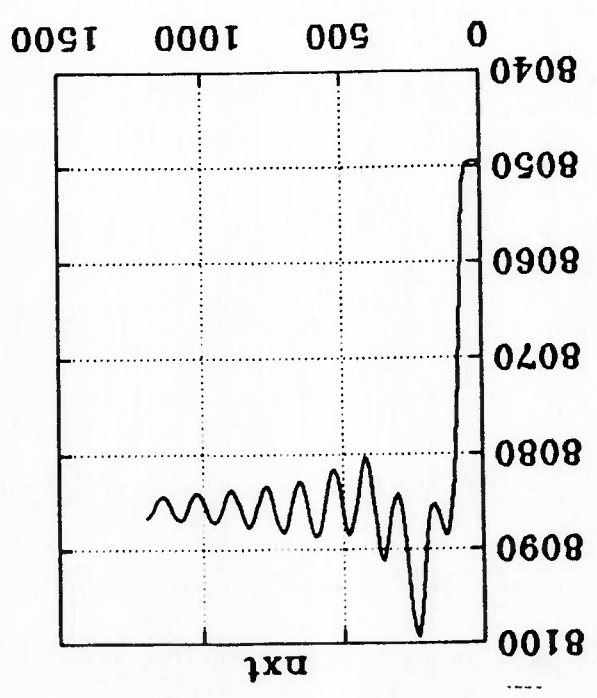
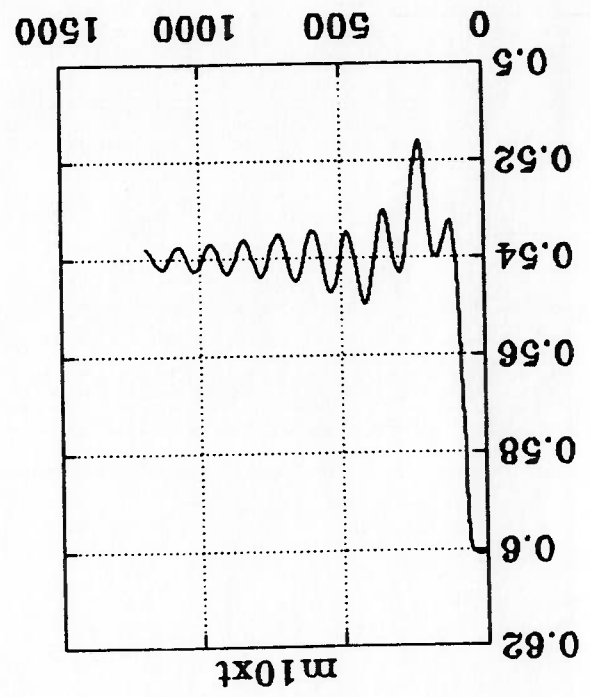
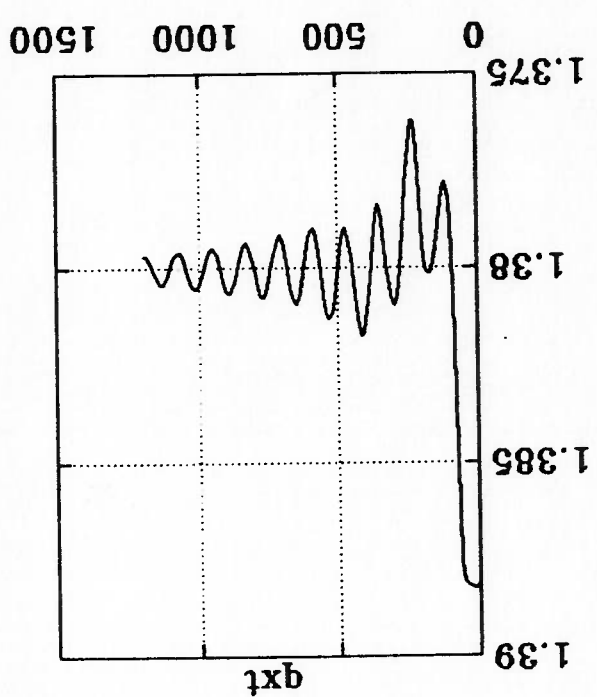


Figura 6.7 f -10% DMC sem limite de rotação

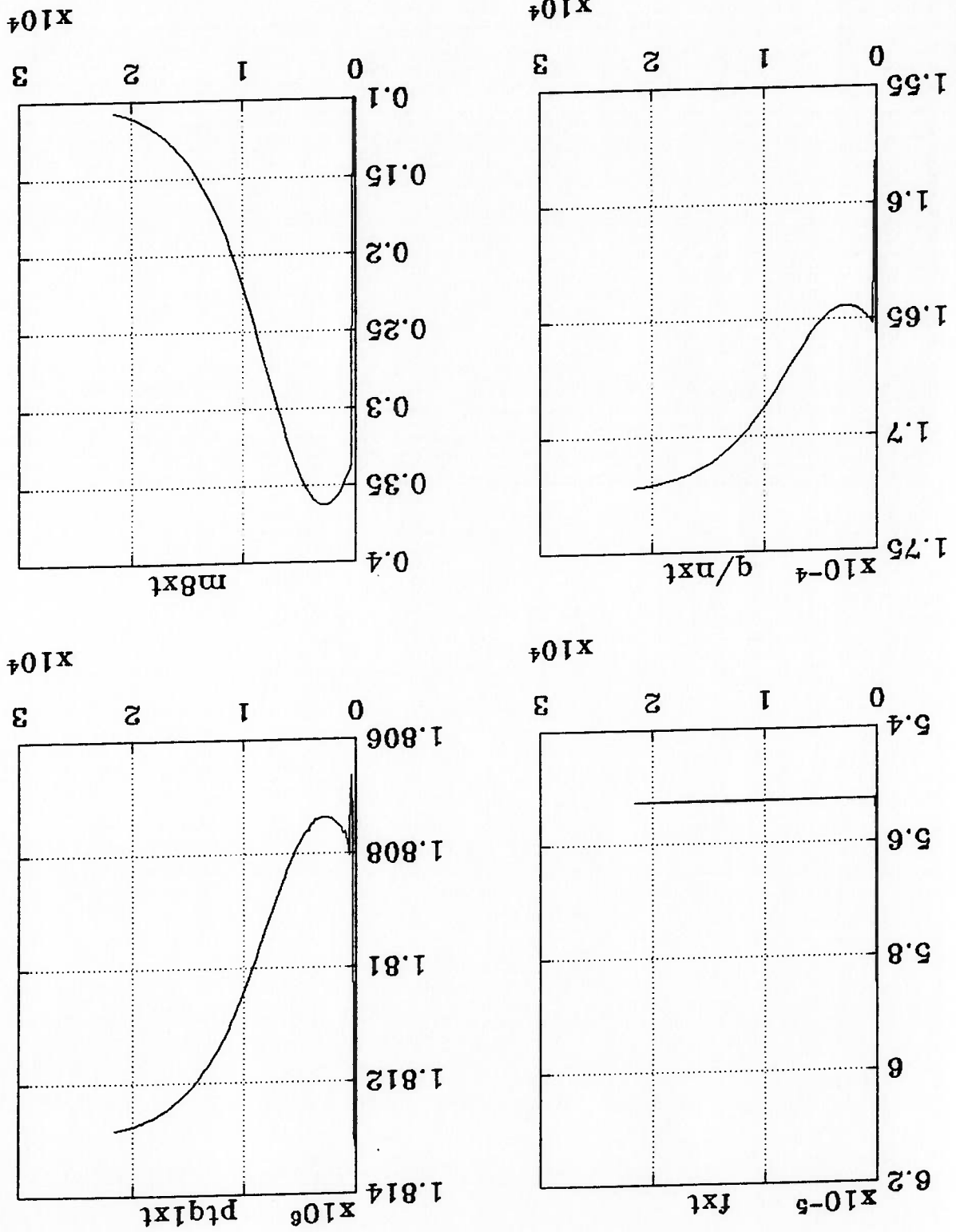


Figura 6.7 f -10% DMC sem limite de rotação contínua

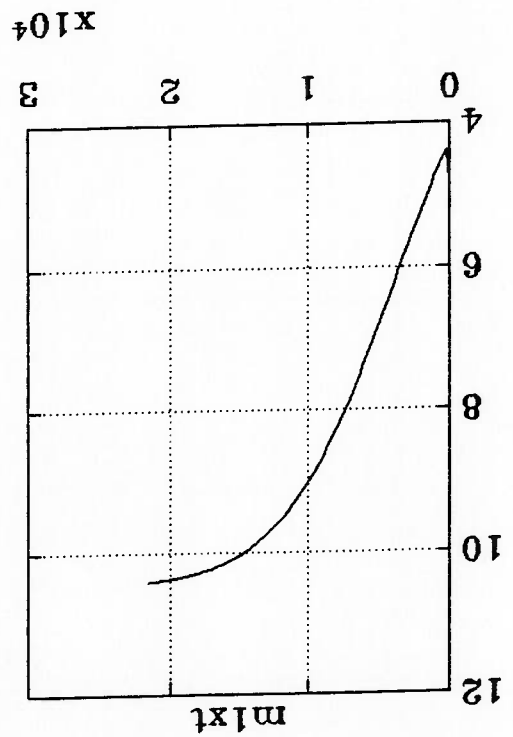
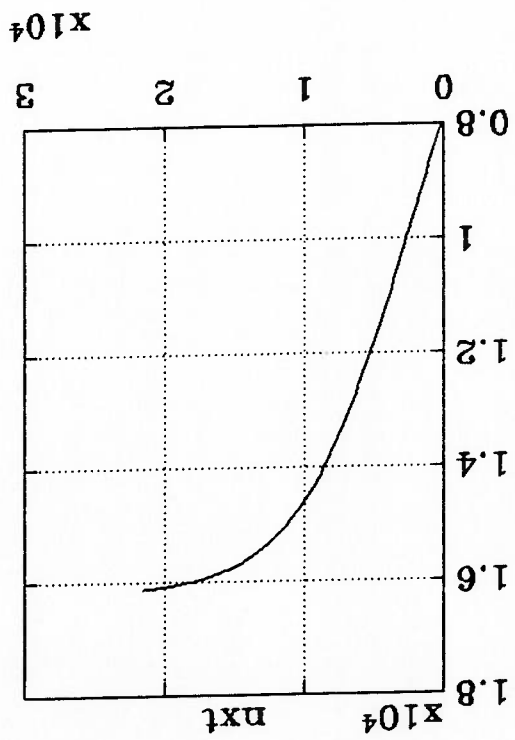
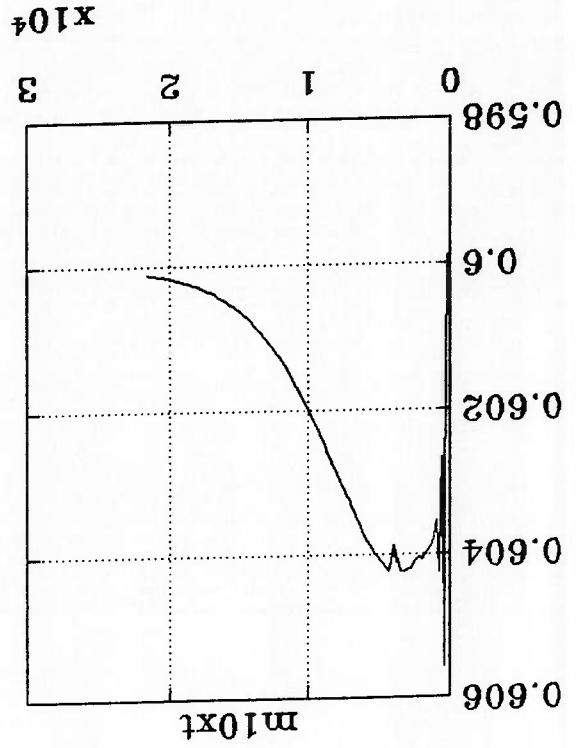
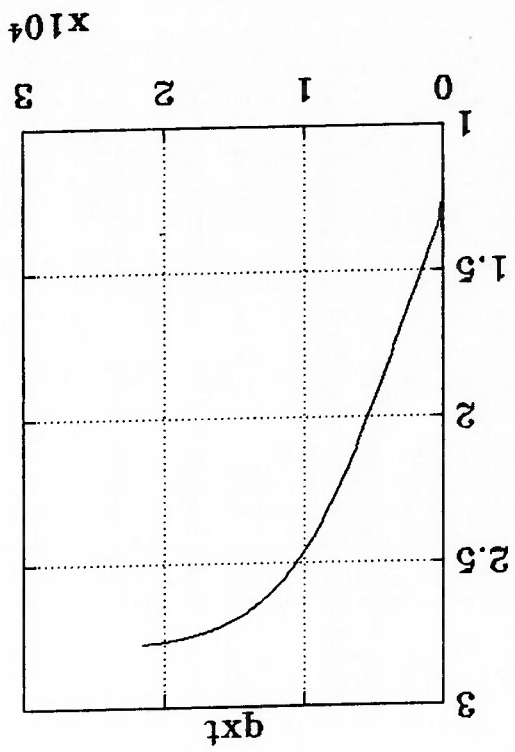


Figura 6.8 m6 -10% DMC sem controlar q/n — PID —

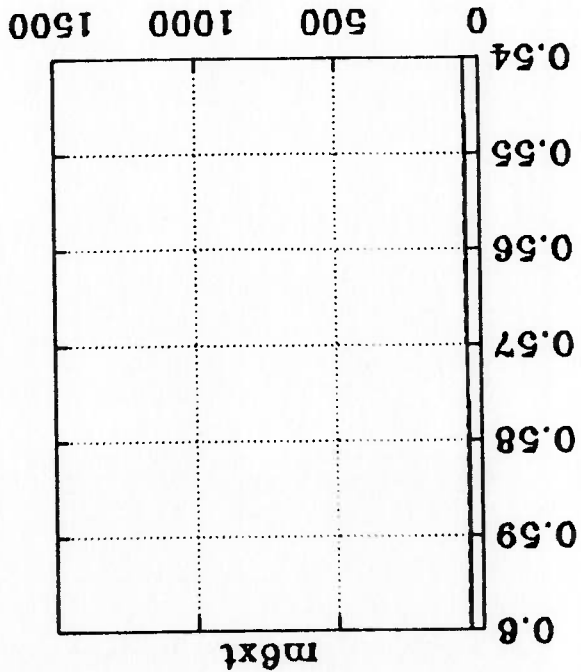
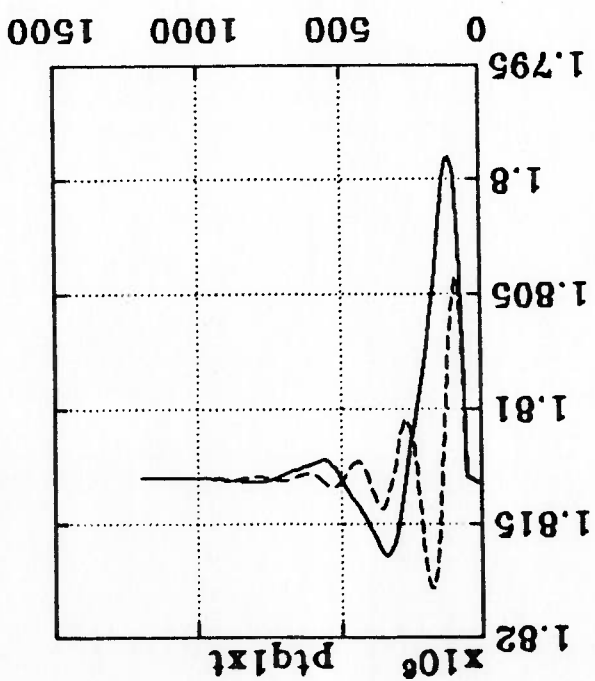
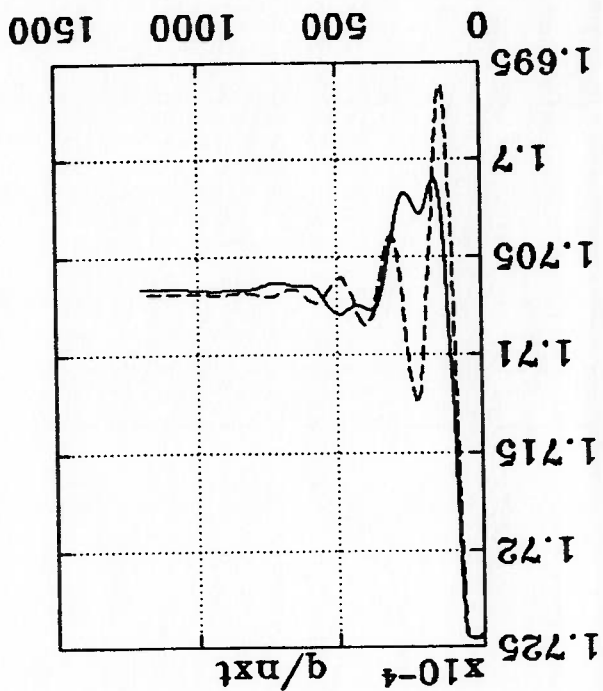
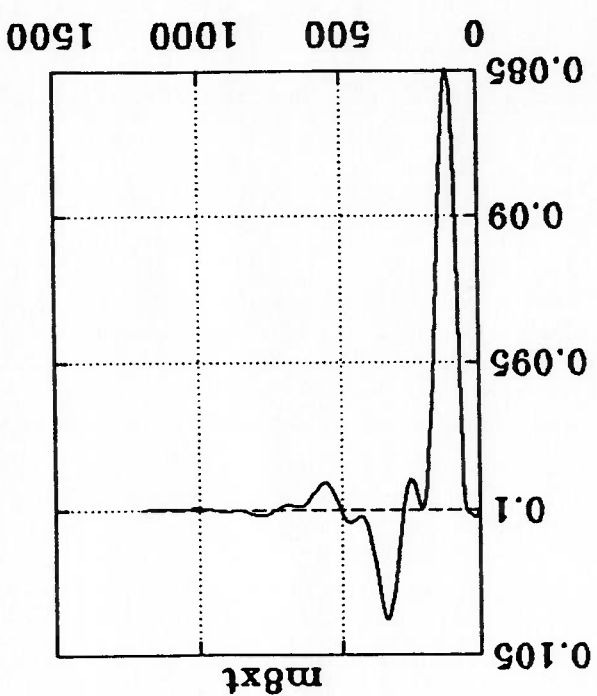


Figura 6.8 m6 -10% DMC sem controlar q/n — PID ————— continuação

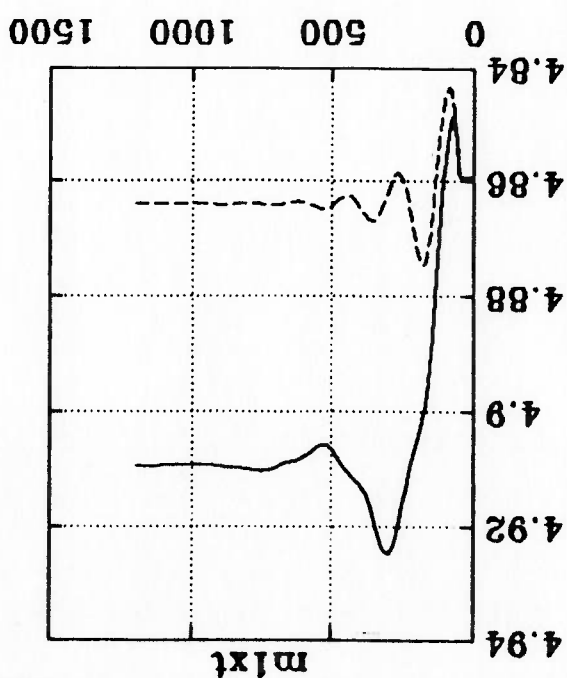
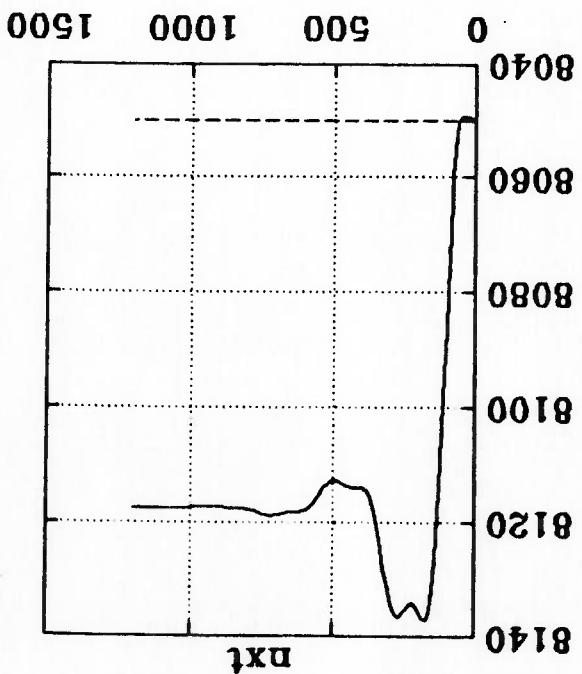
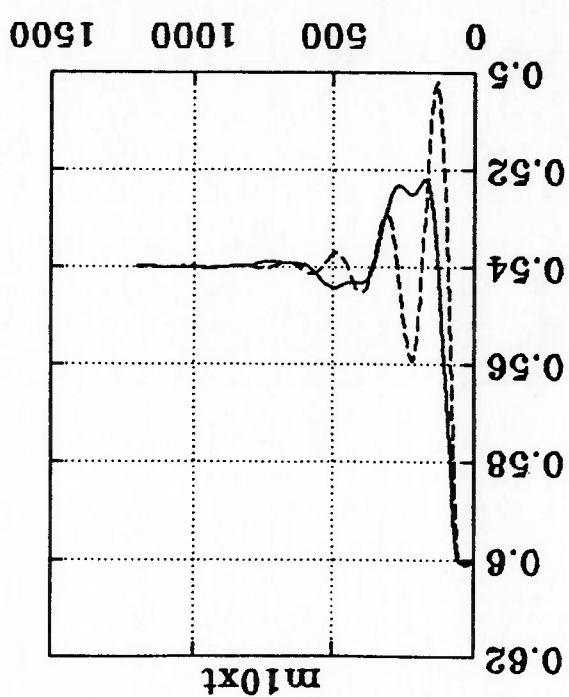
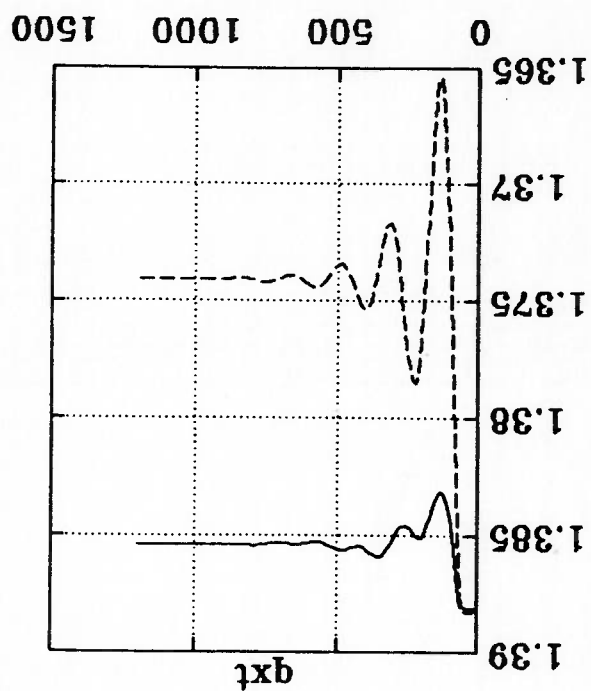


Figura 6.9 f -10% DMC sem controler q/n PID

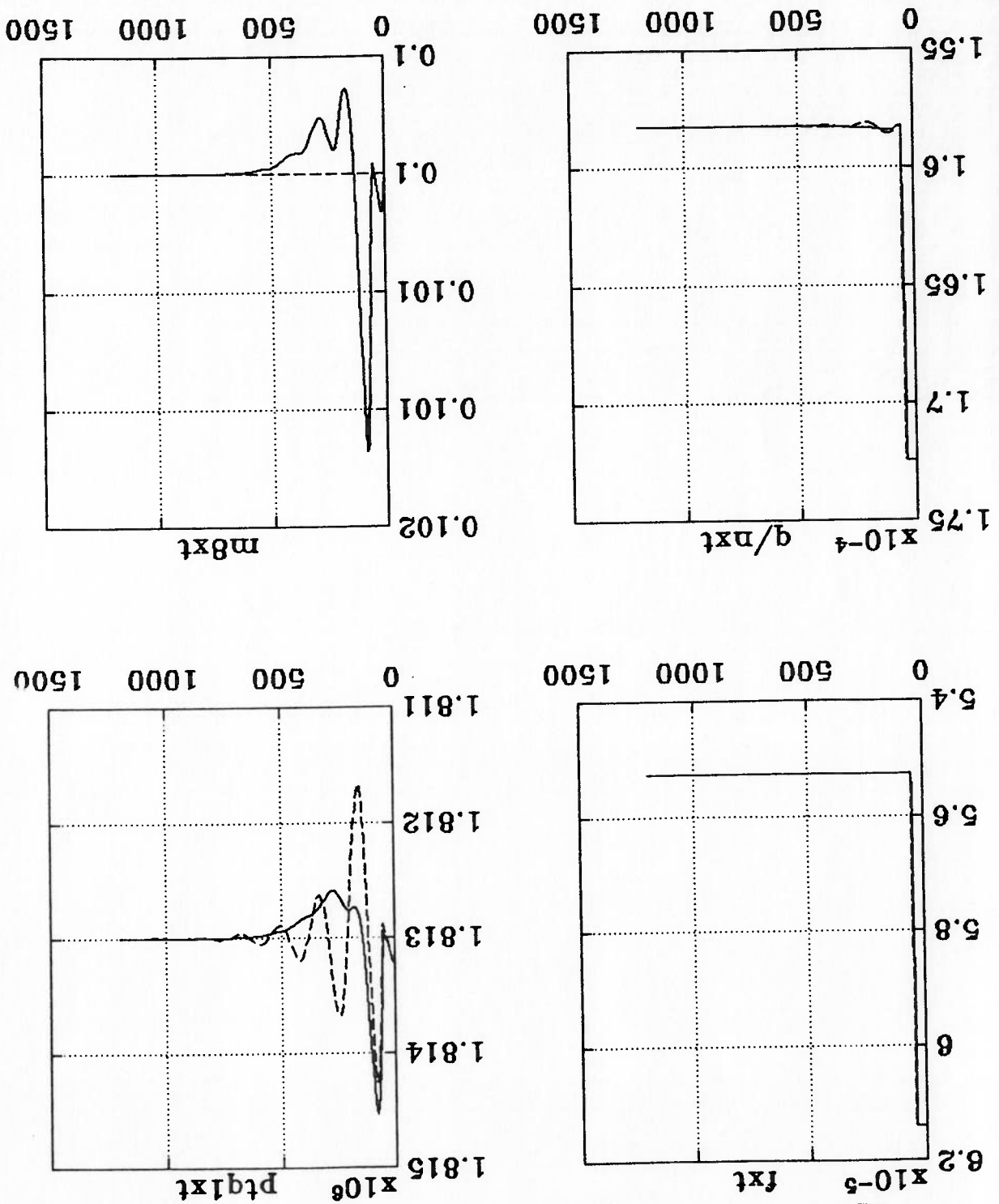


Figura 6.9 f -10% DMC sem controlar q/n PID ——— continuação

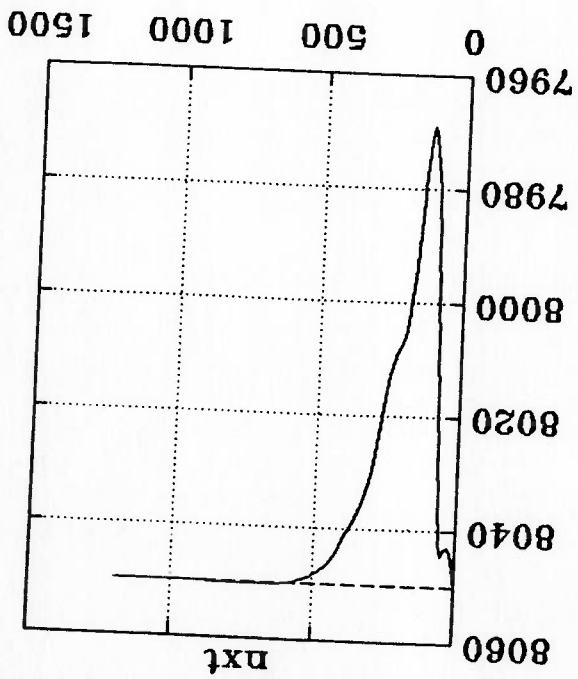
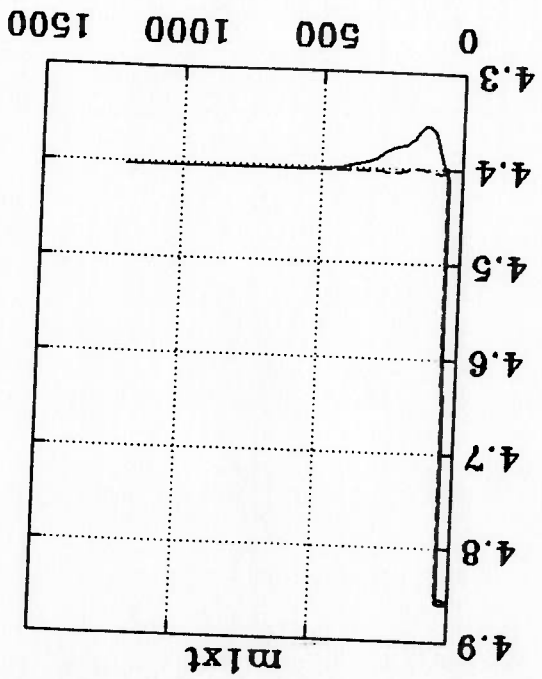
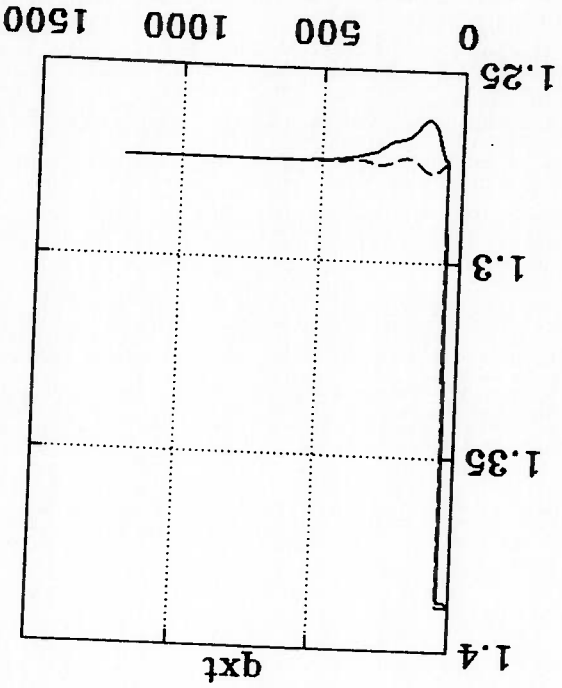
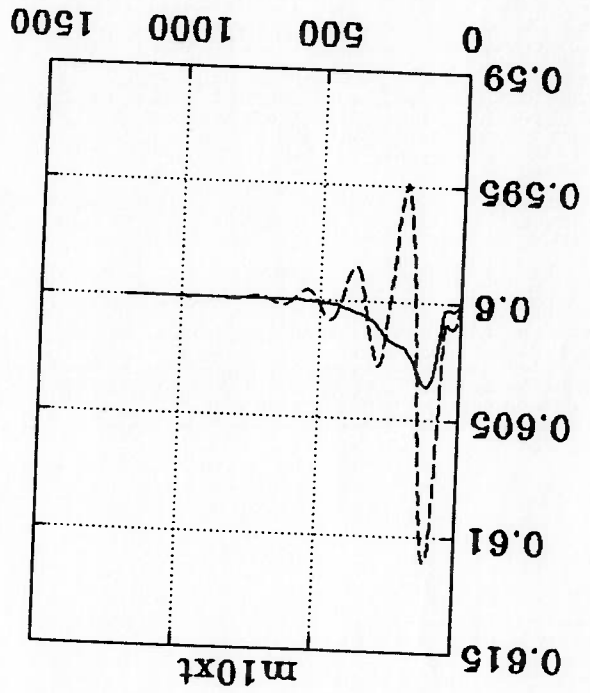
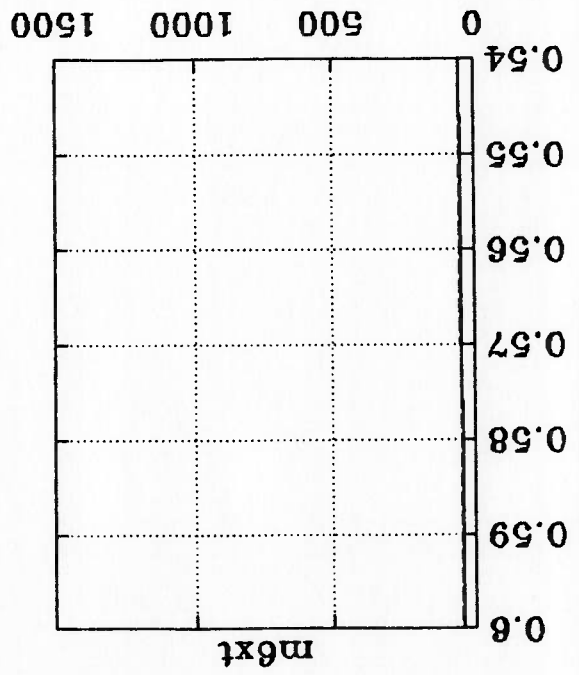
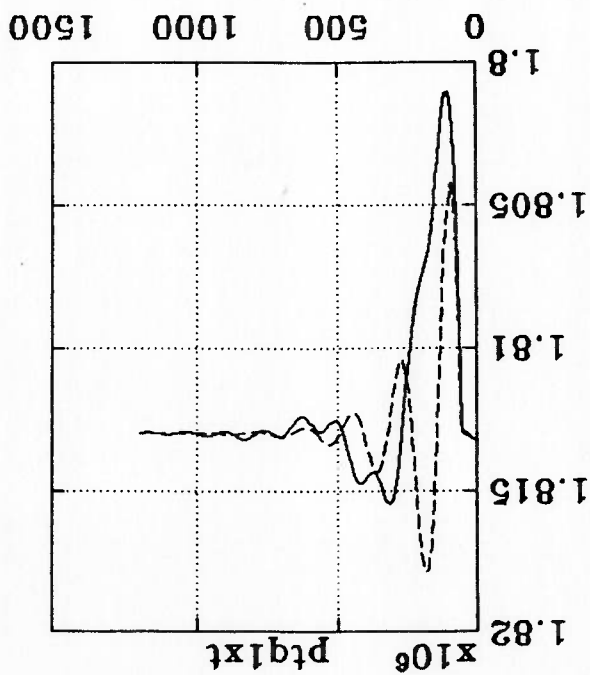
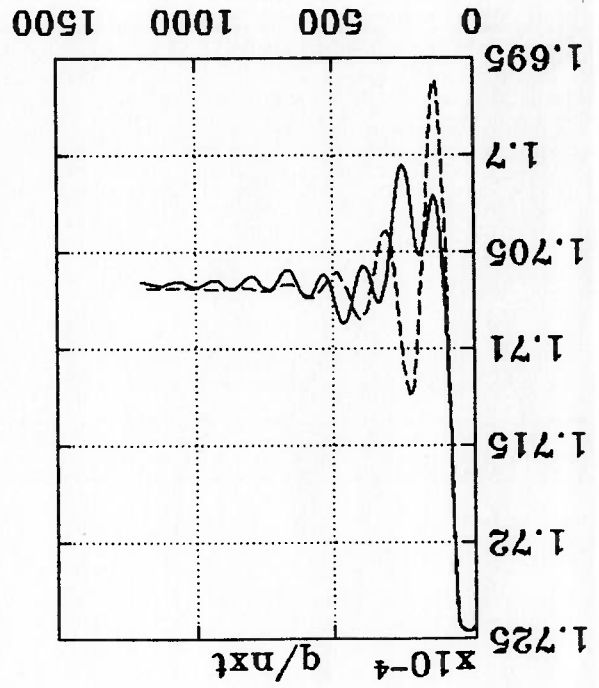
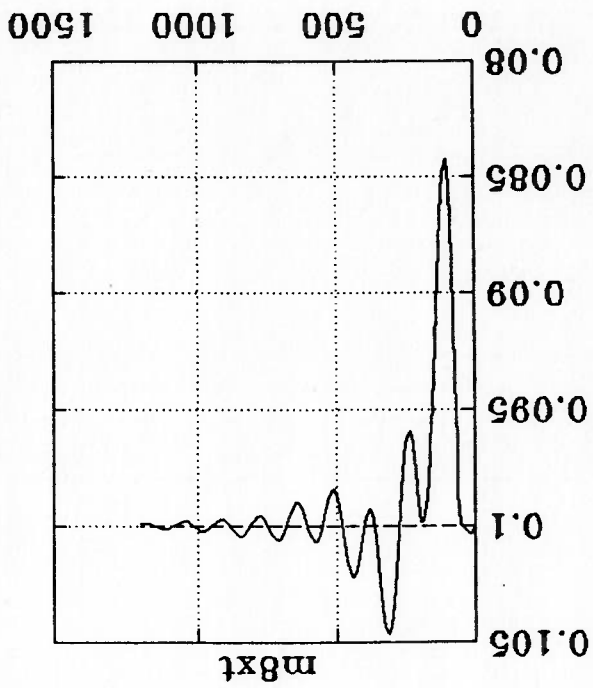


Figura 6.10 m6 -10% DMC sem controlar q/n com $\Phi = 5$ I PID



continuação

Figura 6.10 m6 -10% DMC sem controlar q/n com $\Phi = 5$ I — PID —

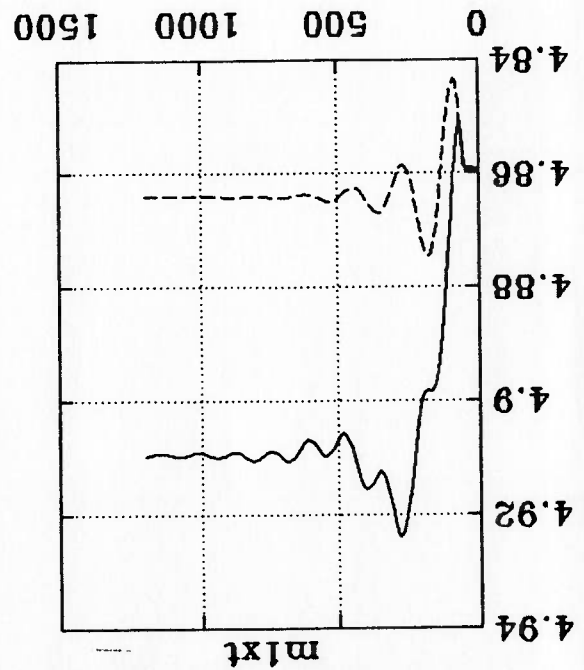
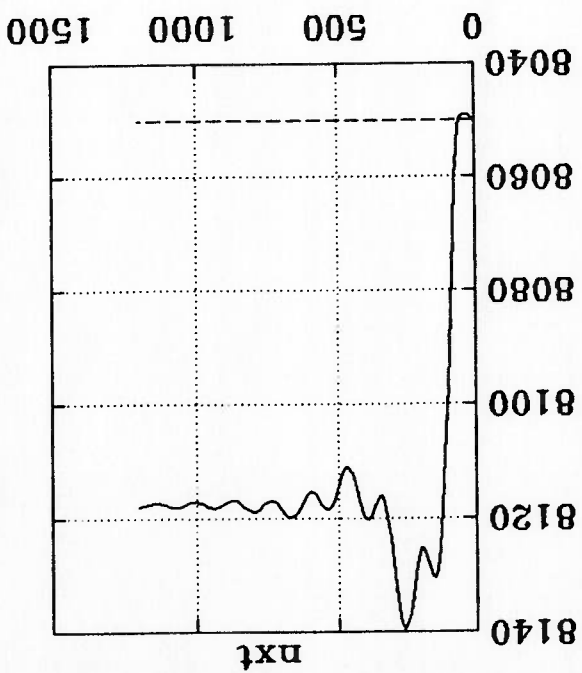
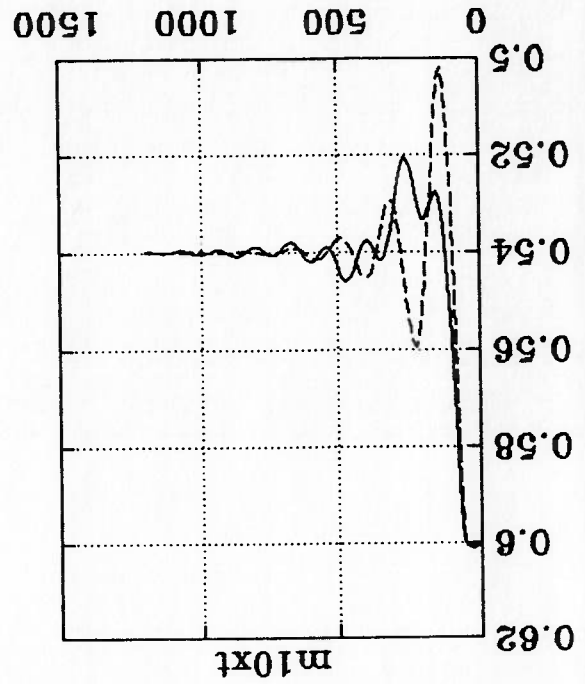
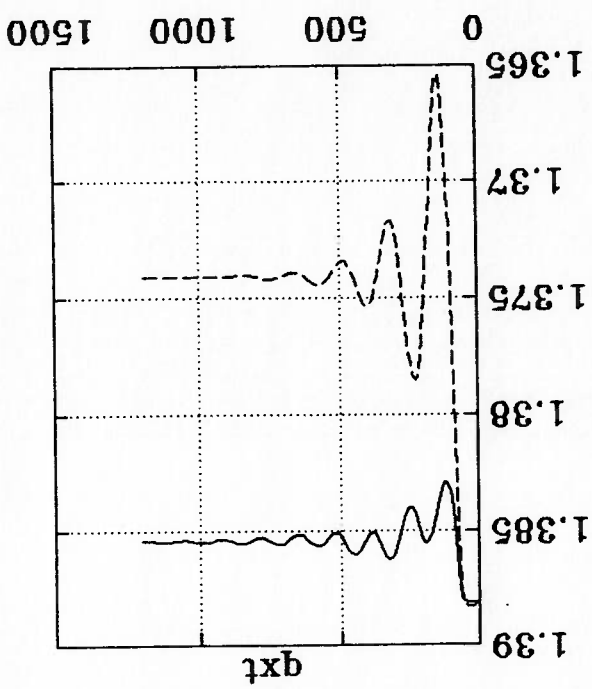


Figura 6.11 f -50% DMC com intervalo diferencial normal

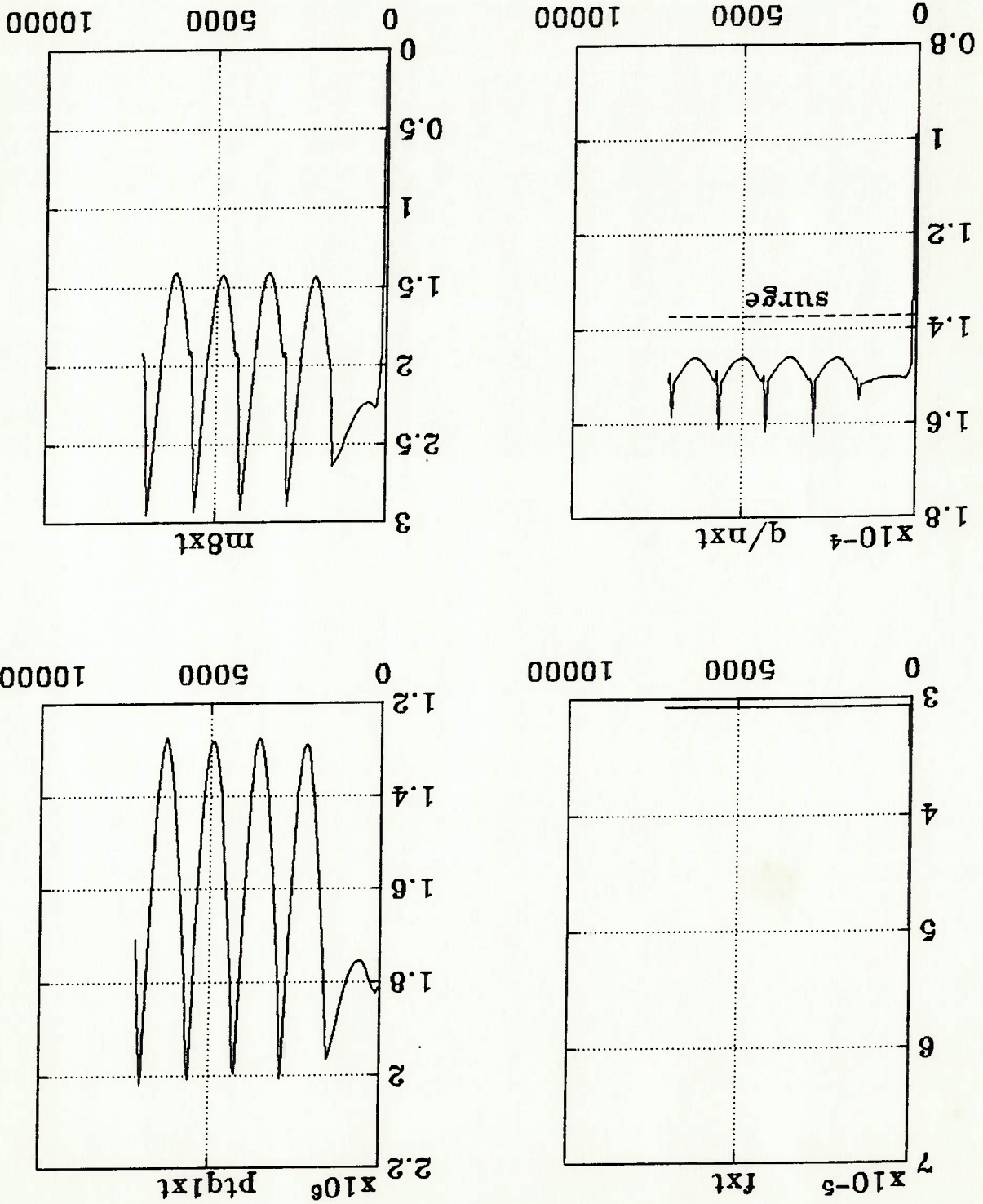


Figura 6.11 f -50% DMC com intervalo diferencial normal contínuo

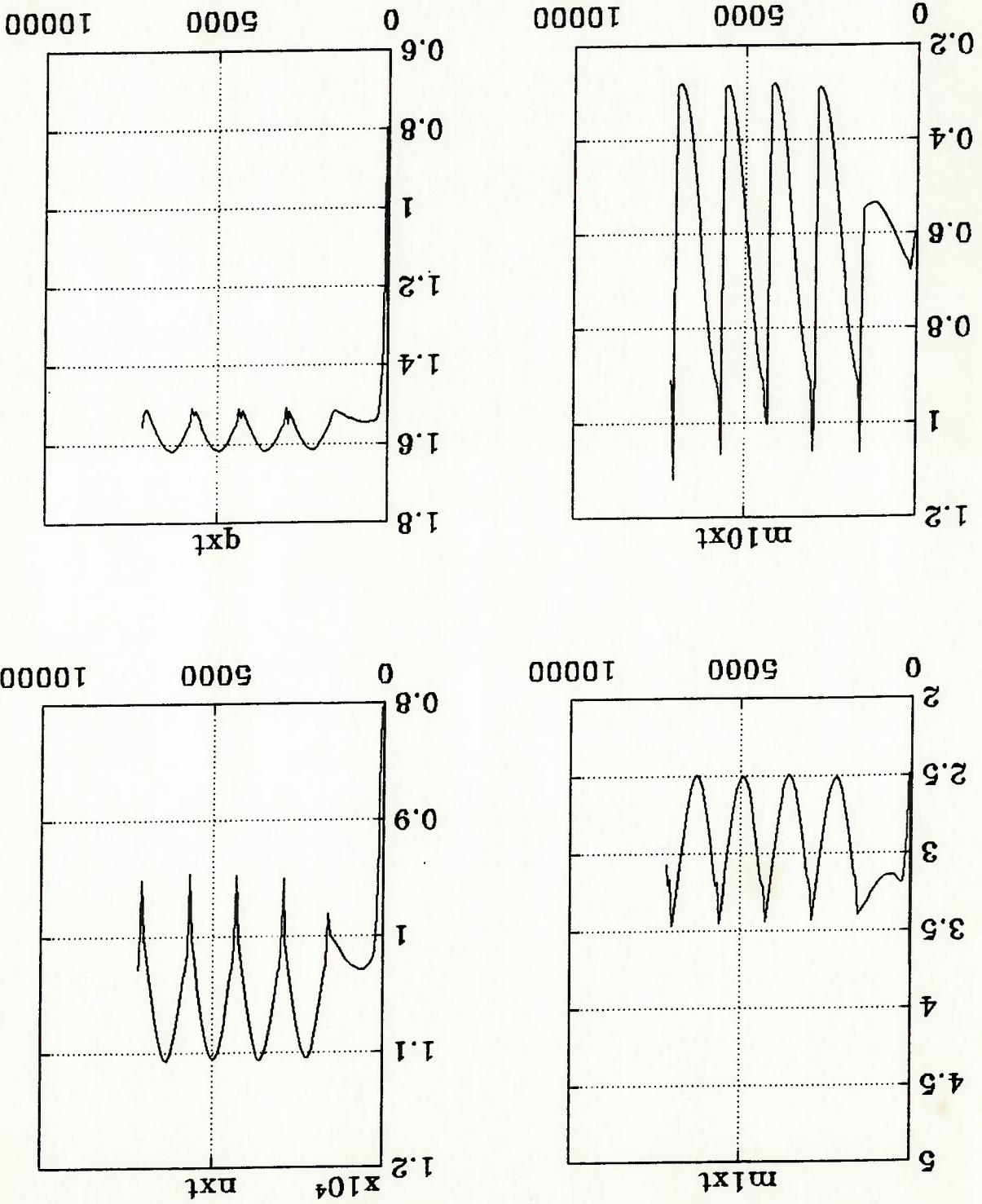


Figura 6.12 f -50% DMC com intervalo dif. aumentado

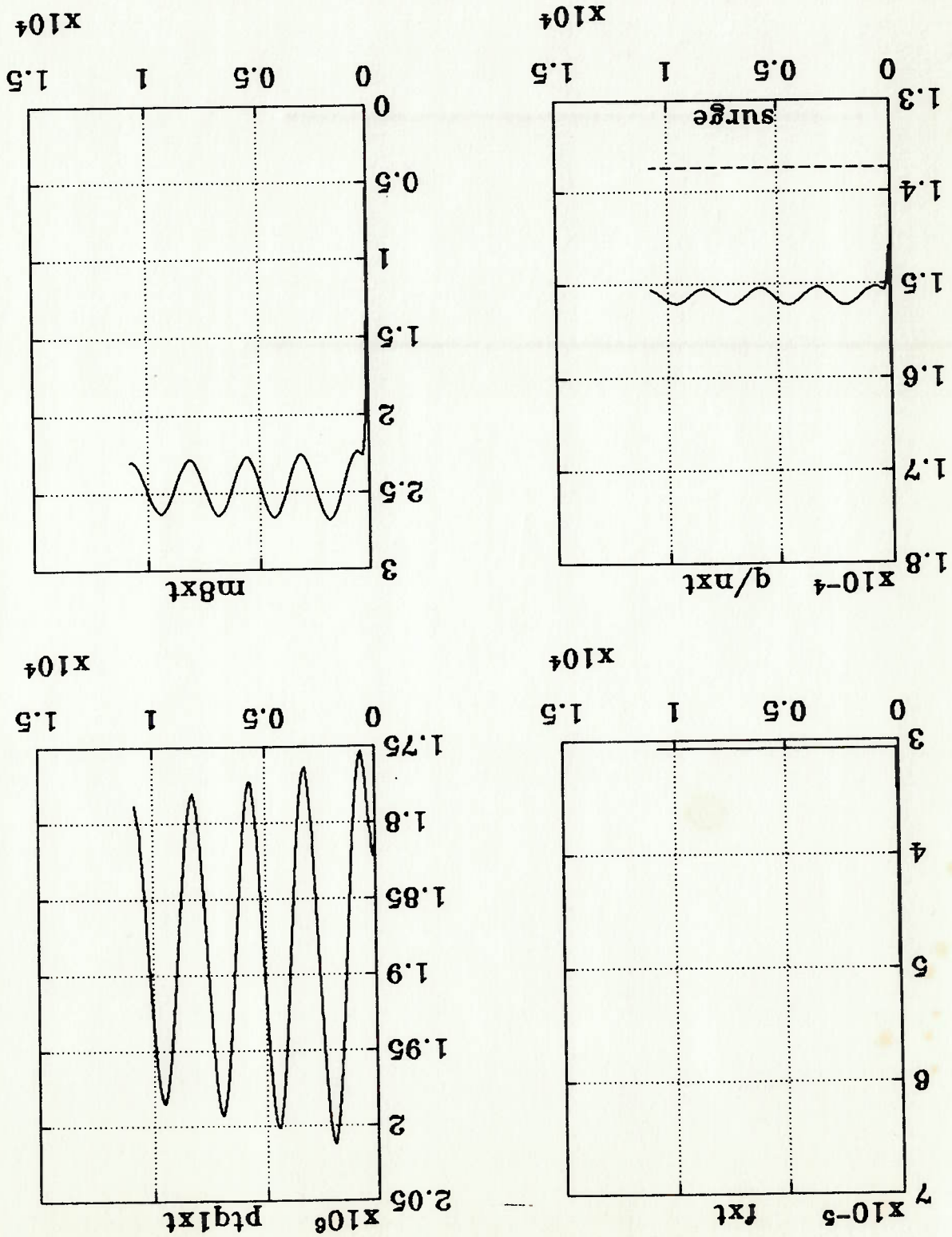


Figura 6.12 f -50% DMC com intervalo dif. aumentado continuamente

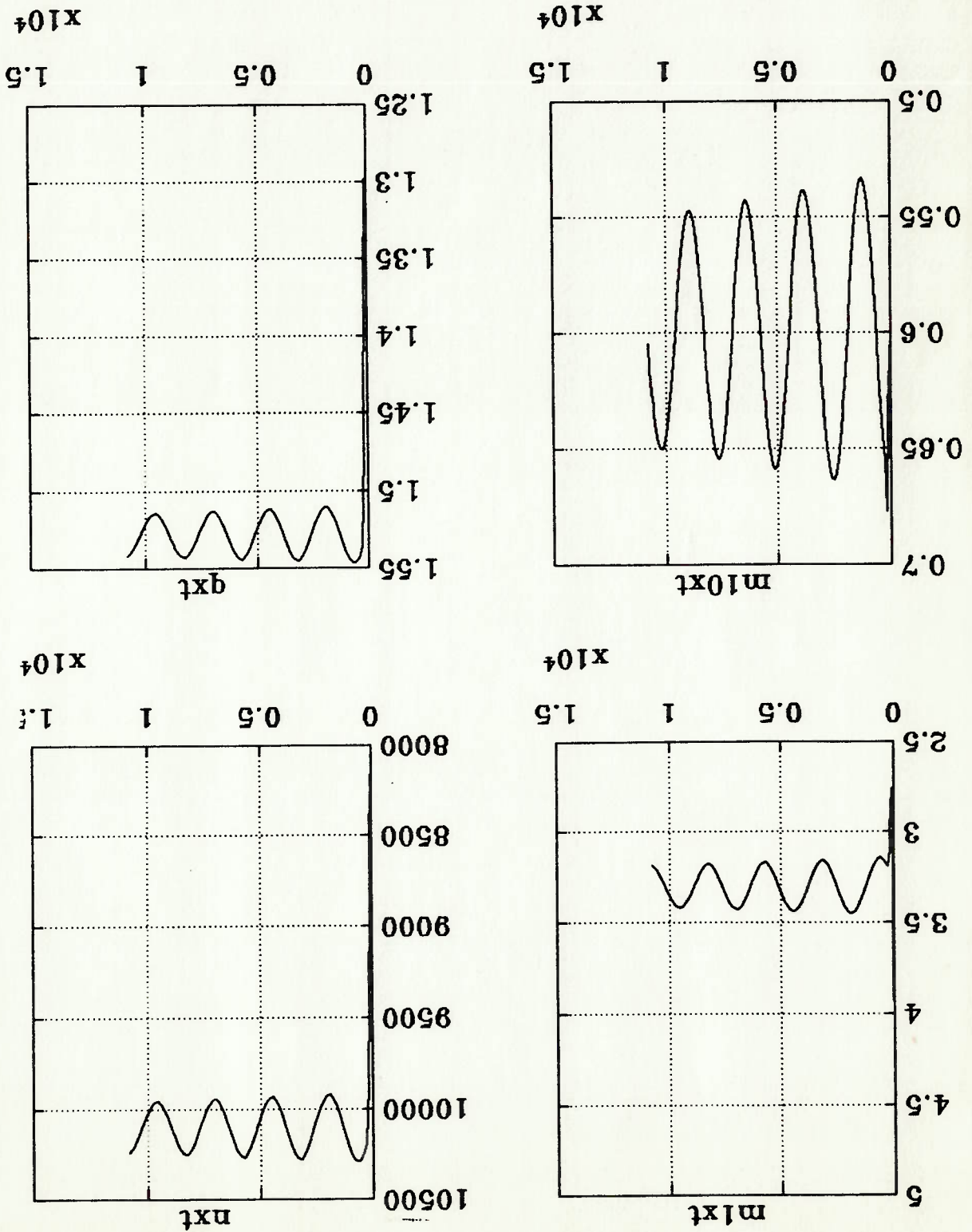


Figura 6.13 f-50% DMC com setpoint de m3 diminuido

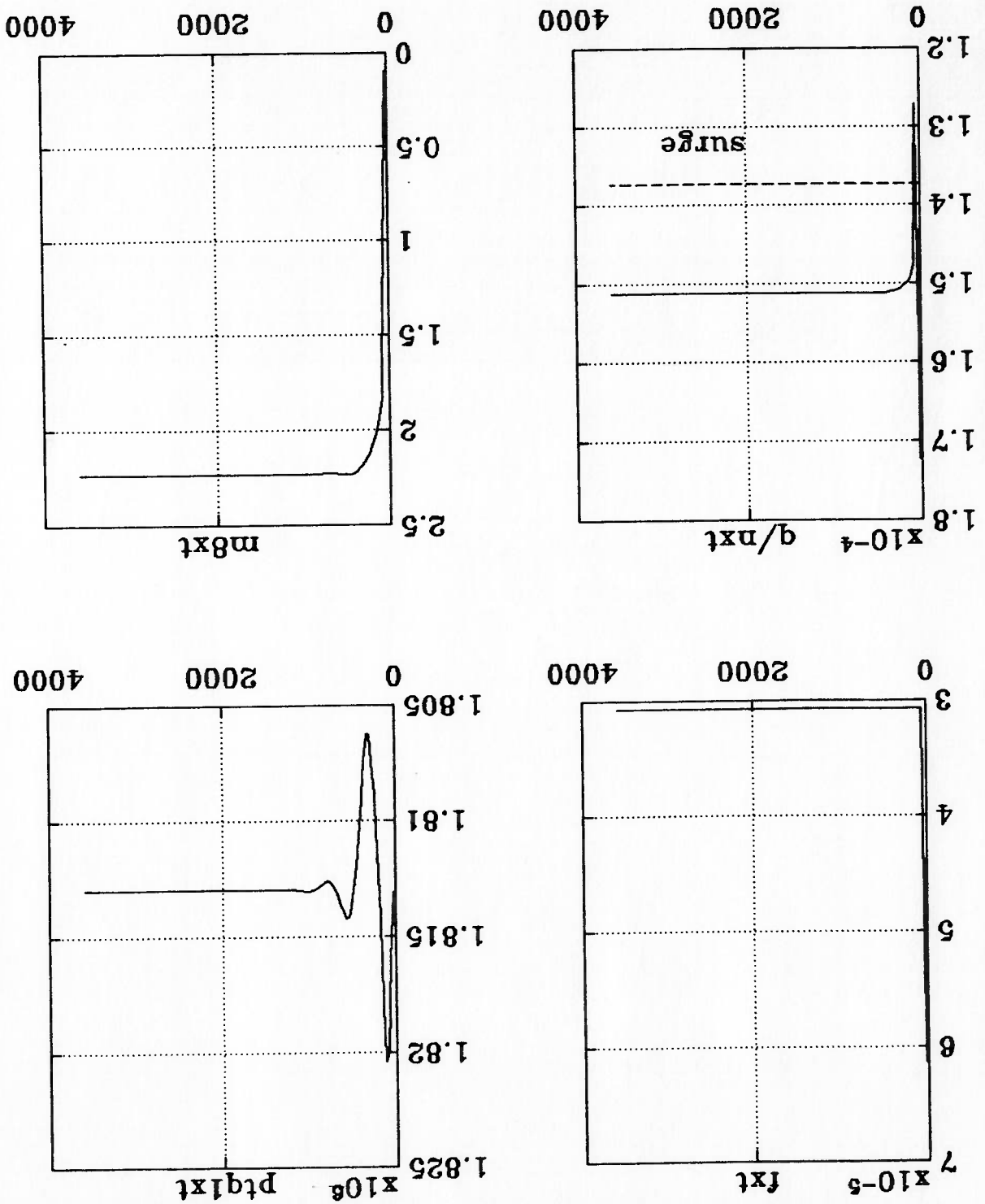


Figura 6.13 f -50% DMC com setpoint de m3 diminuido continuamente

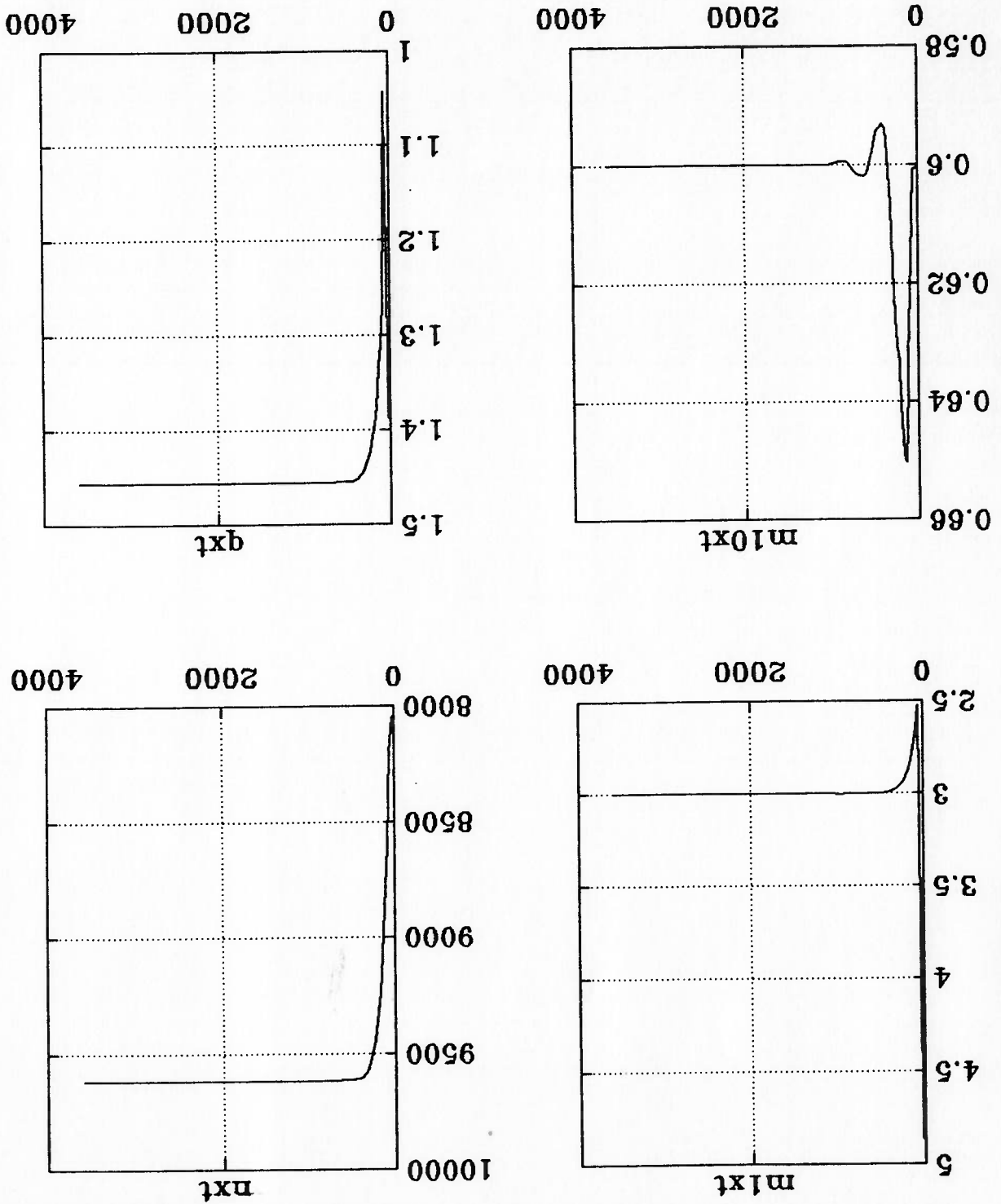


Figura 6.14 f-50% DMC R=5 ——— DMC R=10

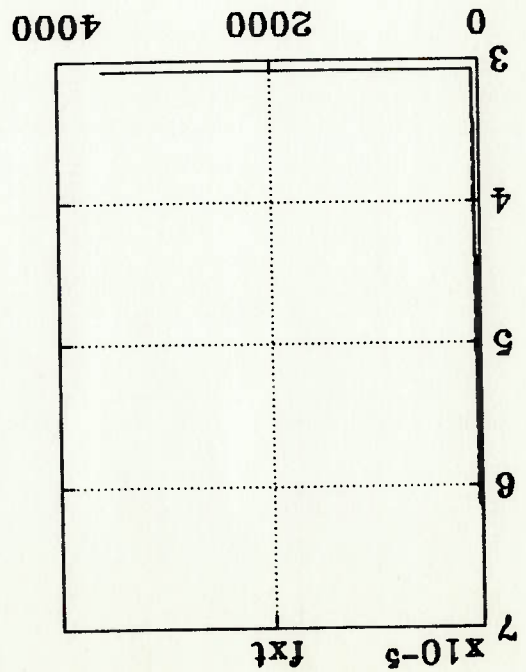
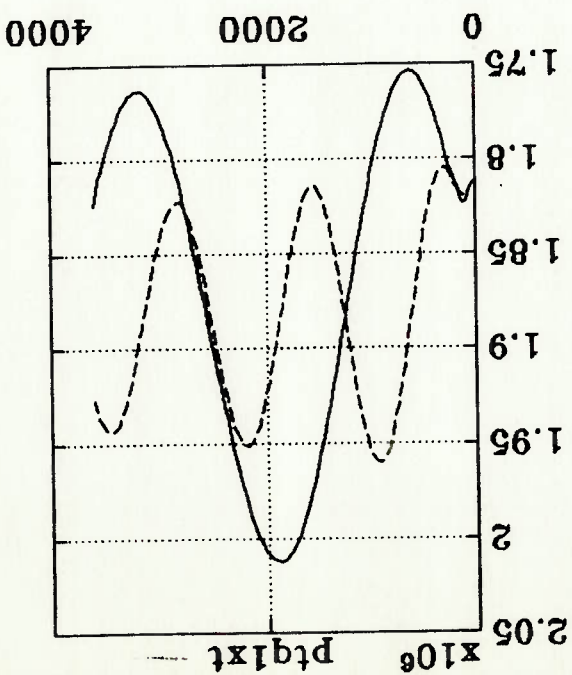
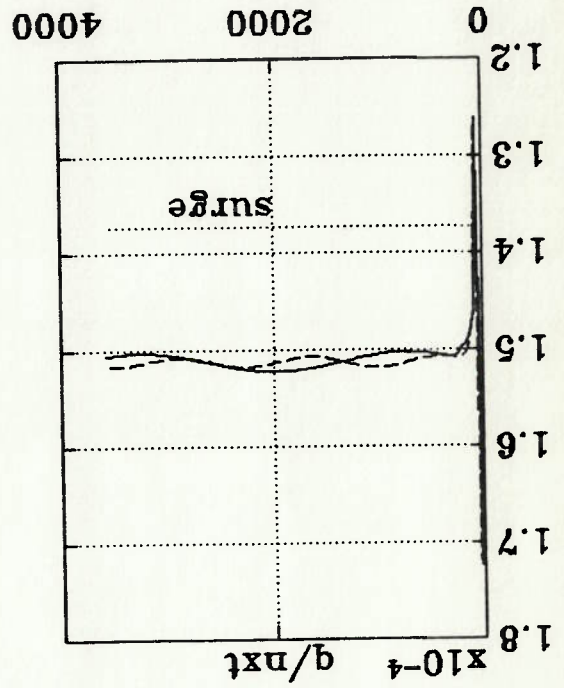
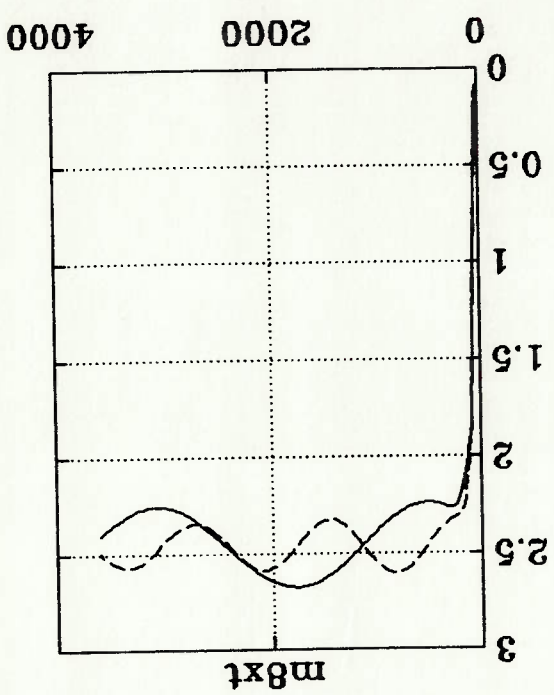


Figura 6.14 f -50% DMC R=5 ——— DMC R=10 ——— continuação

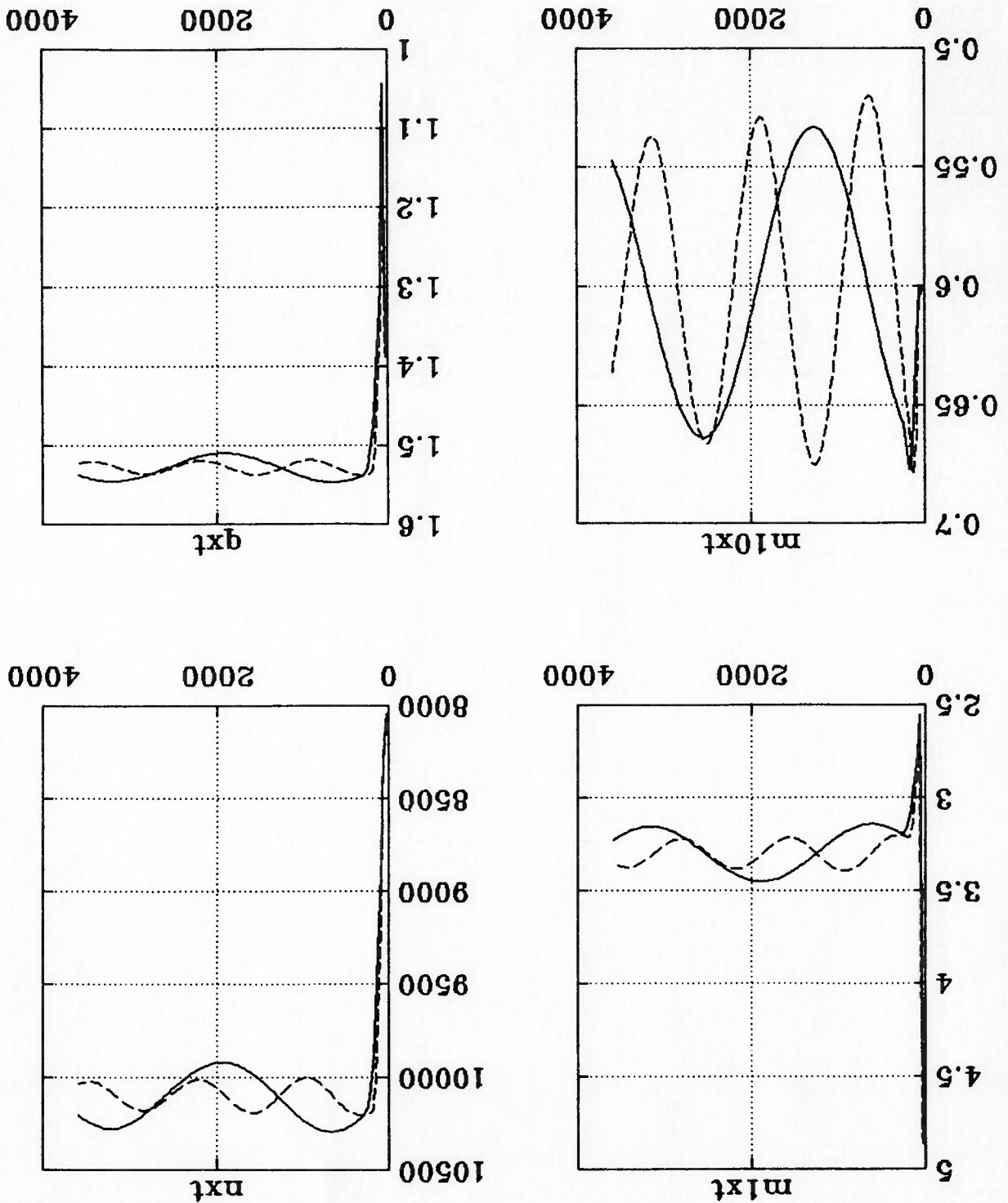


Figura 6.15 P_{TQ1SP} 10% DMC URC condição nominal ——— DMC URC fora de condição nominal

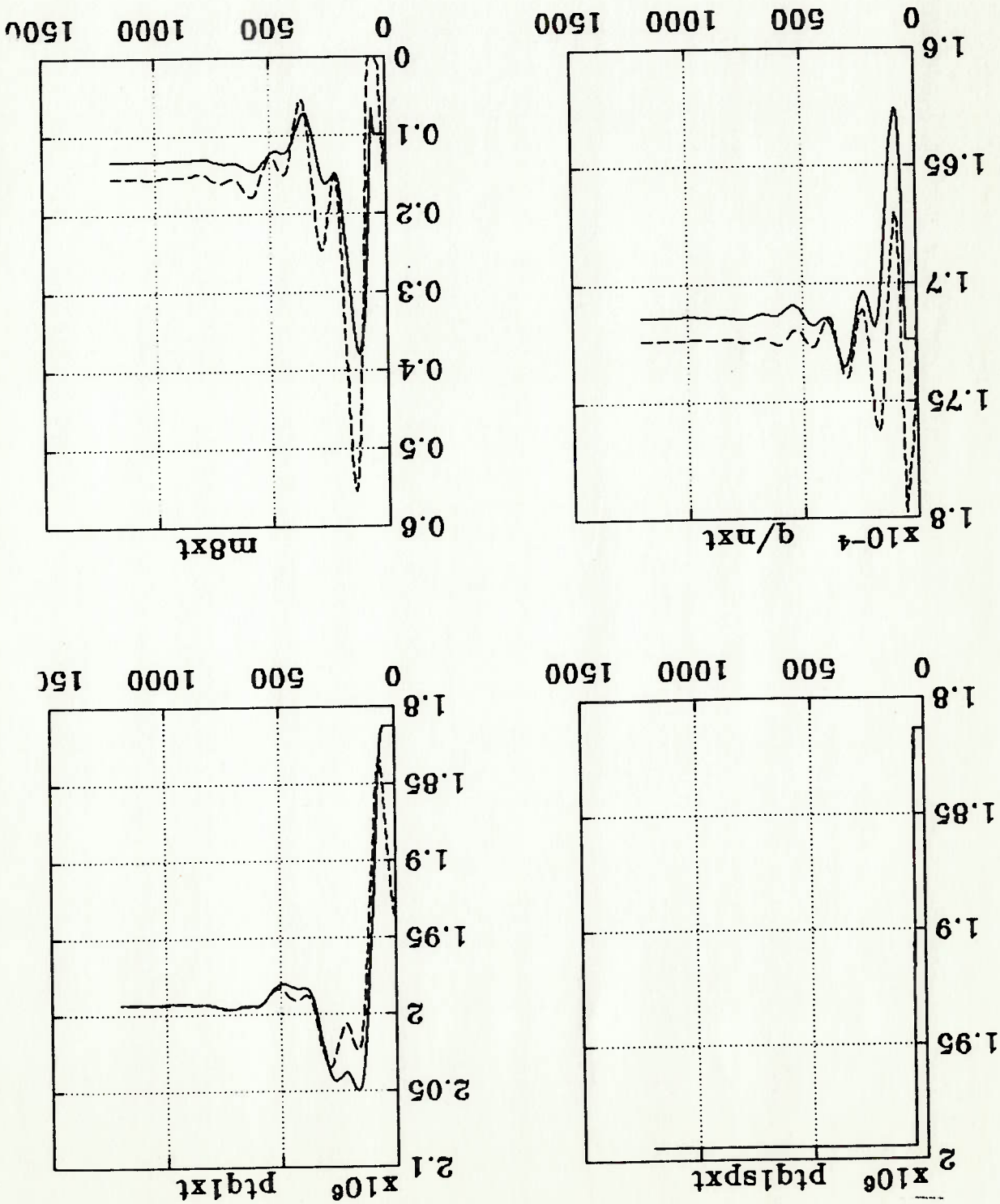


Figura 6.15 P_{TQ1SP} 10% DMC URC condição nominal — DMC URC fora de condição nominal —————

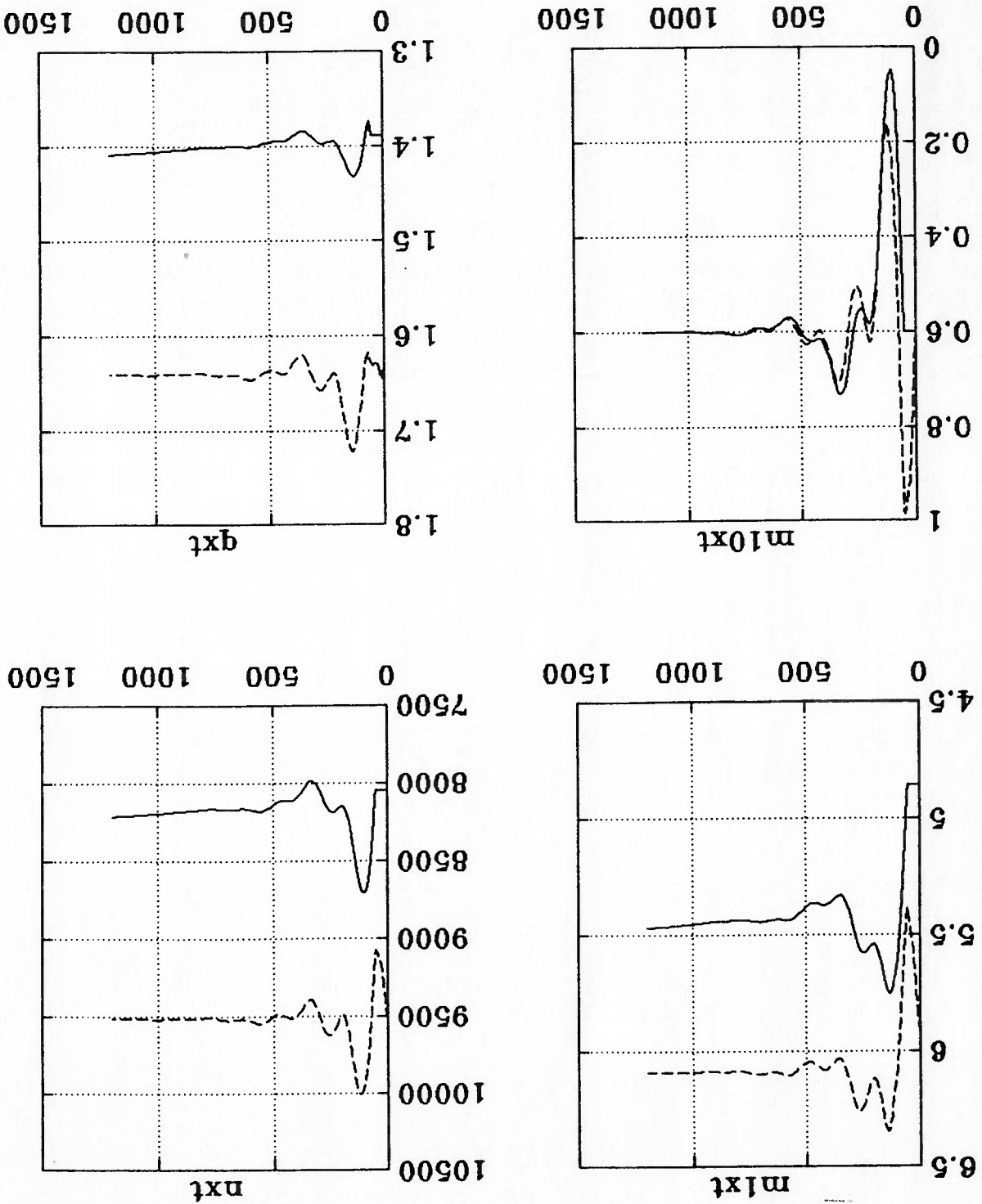


Figura 6.16 P_{TQ1SP} 10% PID URC condição nominal — PID URC fora de condição nominal —

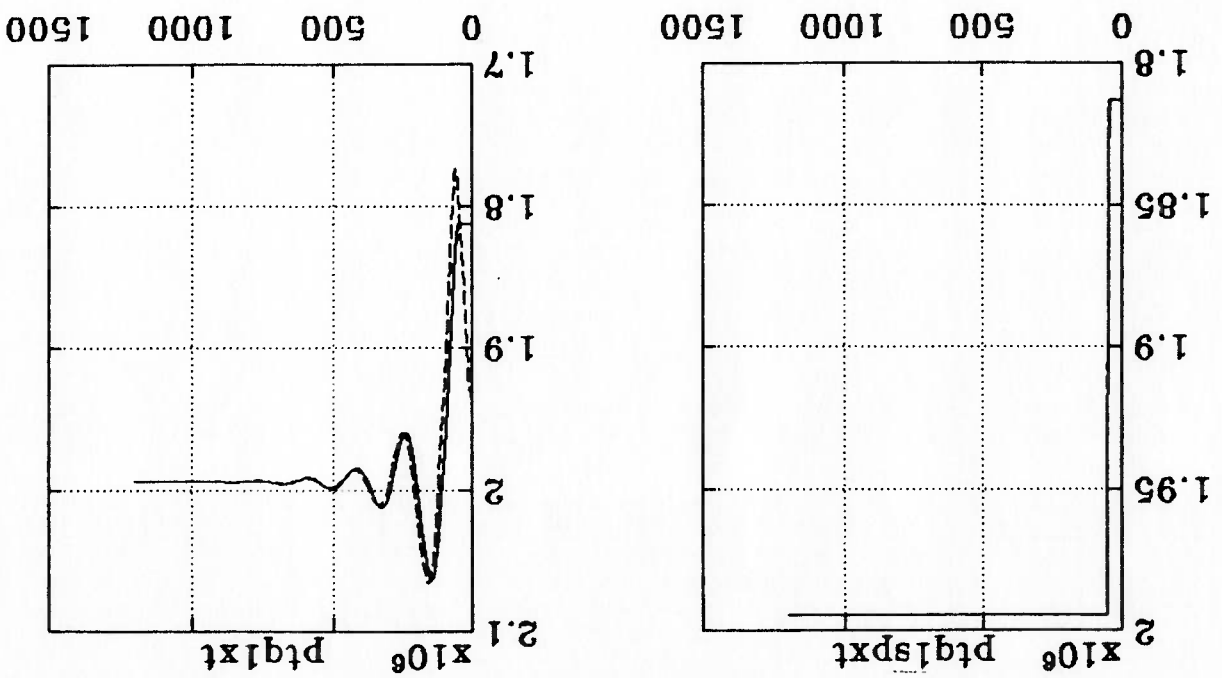
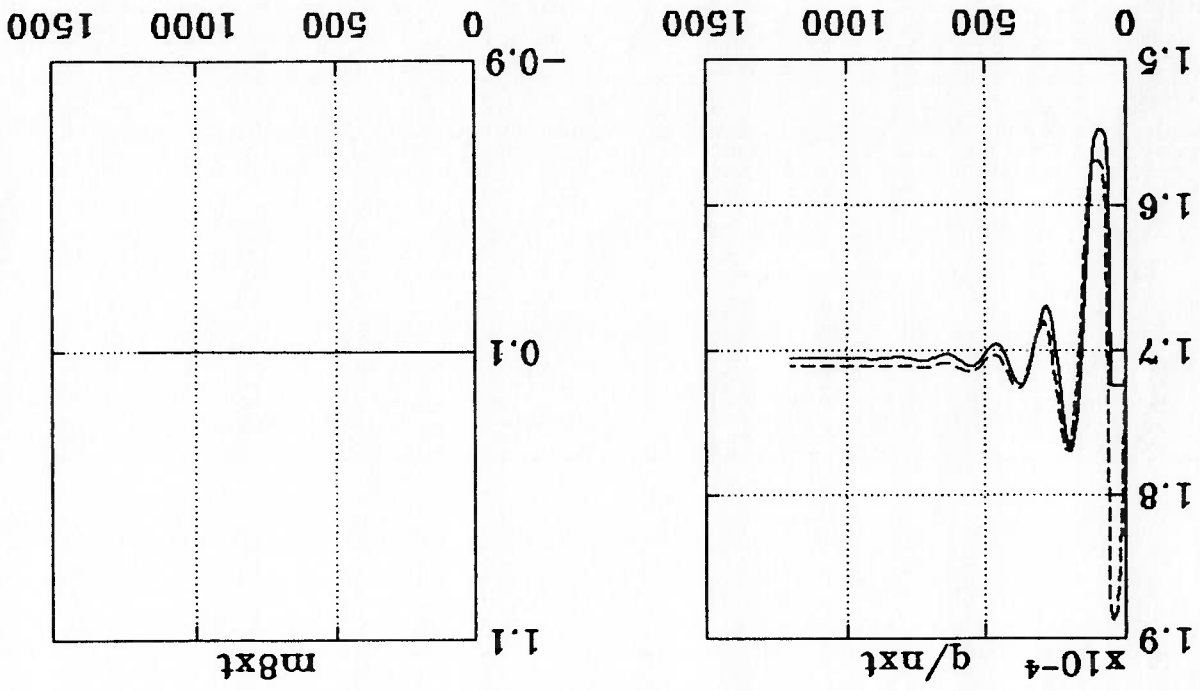


Figura 6.16 P_{TQ1SP} 10% PID URC condição nominal PID URC fora de condição nominal ——— continuação

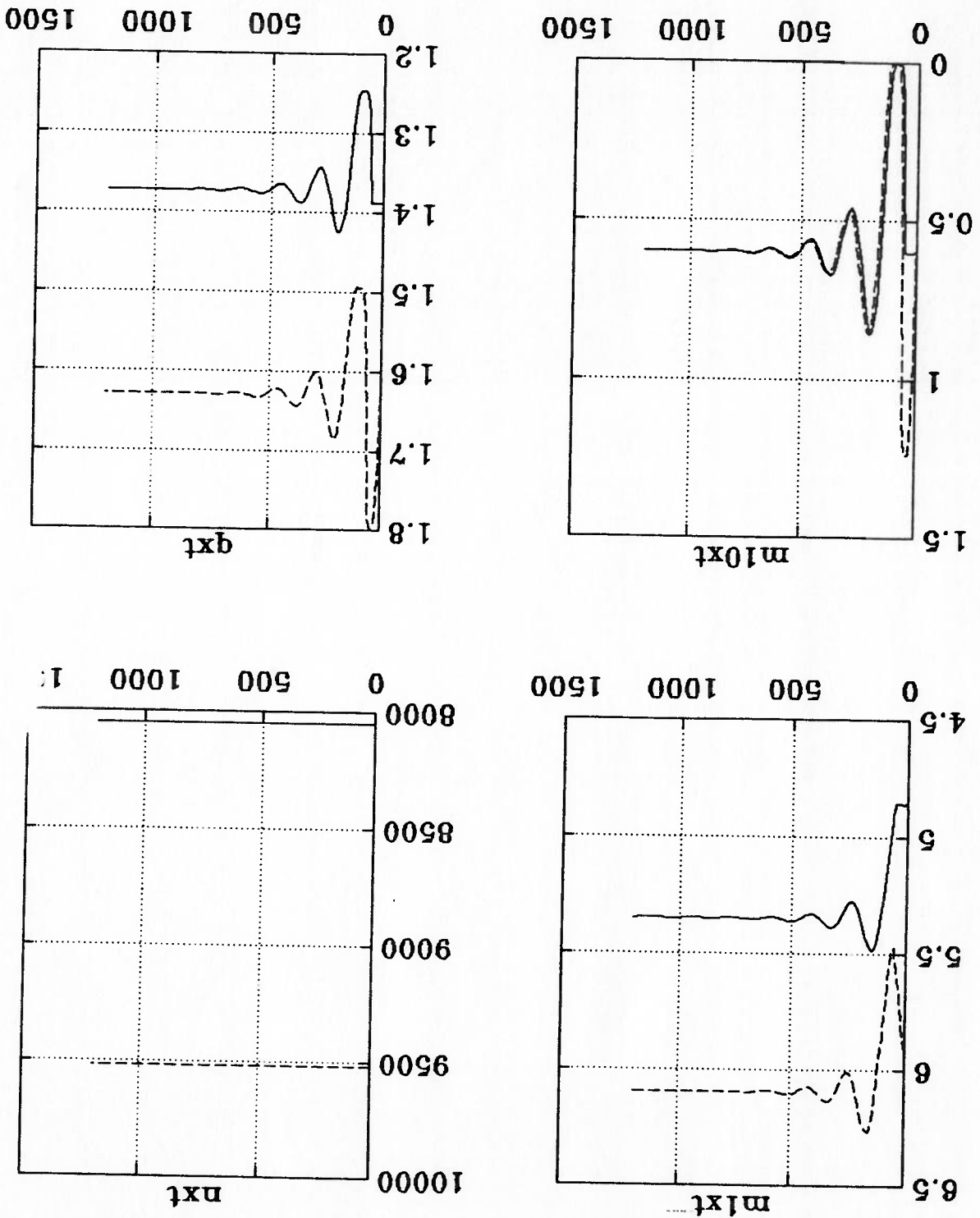


Figura 6.17 m6 -10% DMC URC condição nominal ——— DMC URC fora de condição nominal

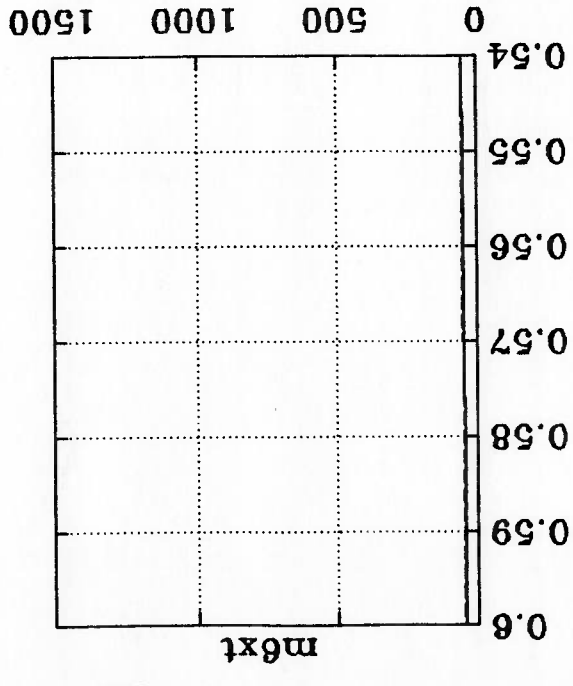
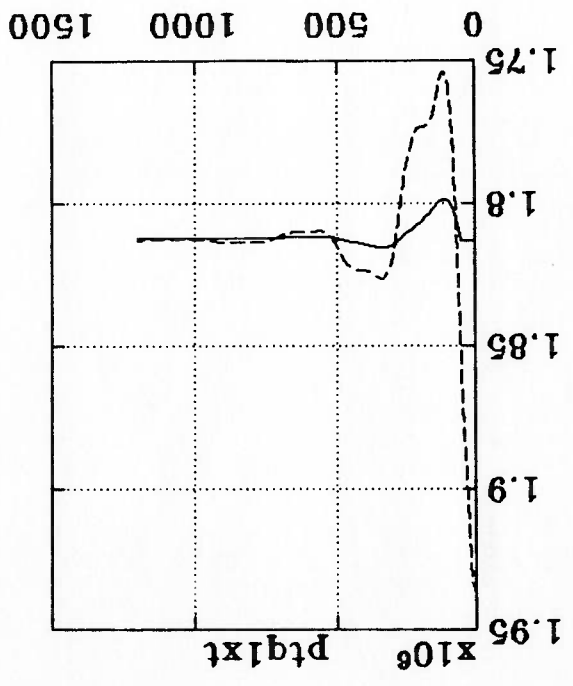
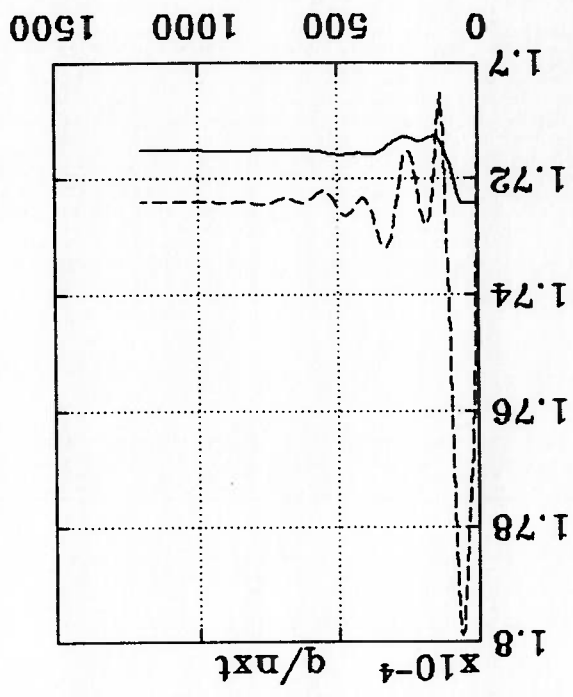
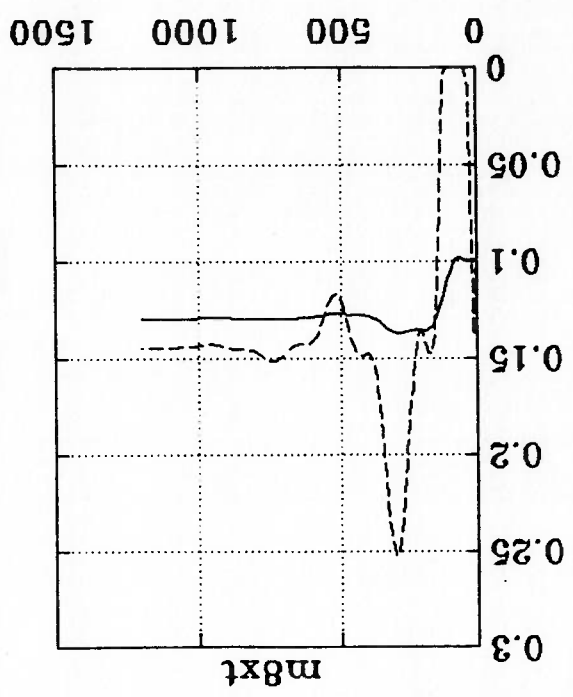


Figura 6.17 m6 -10% DMC URC condição nominal — DMC URC fora de condição nominal — continuação

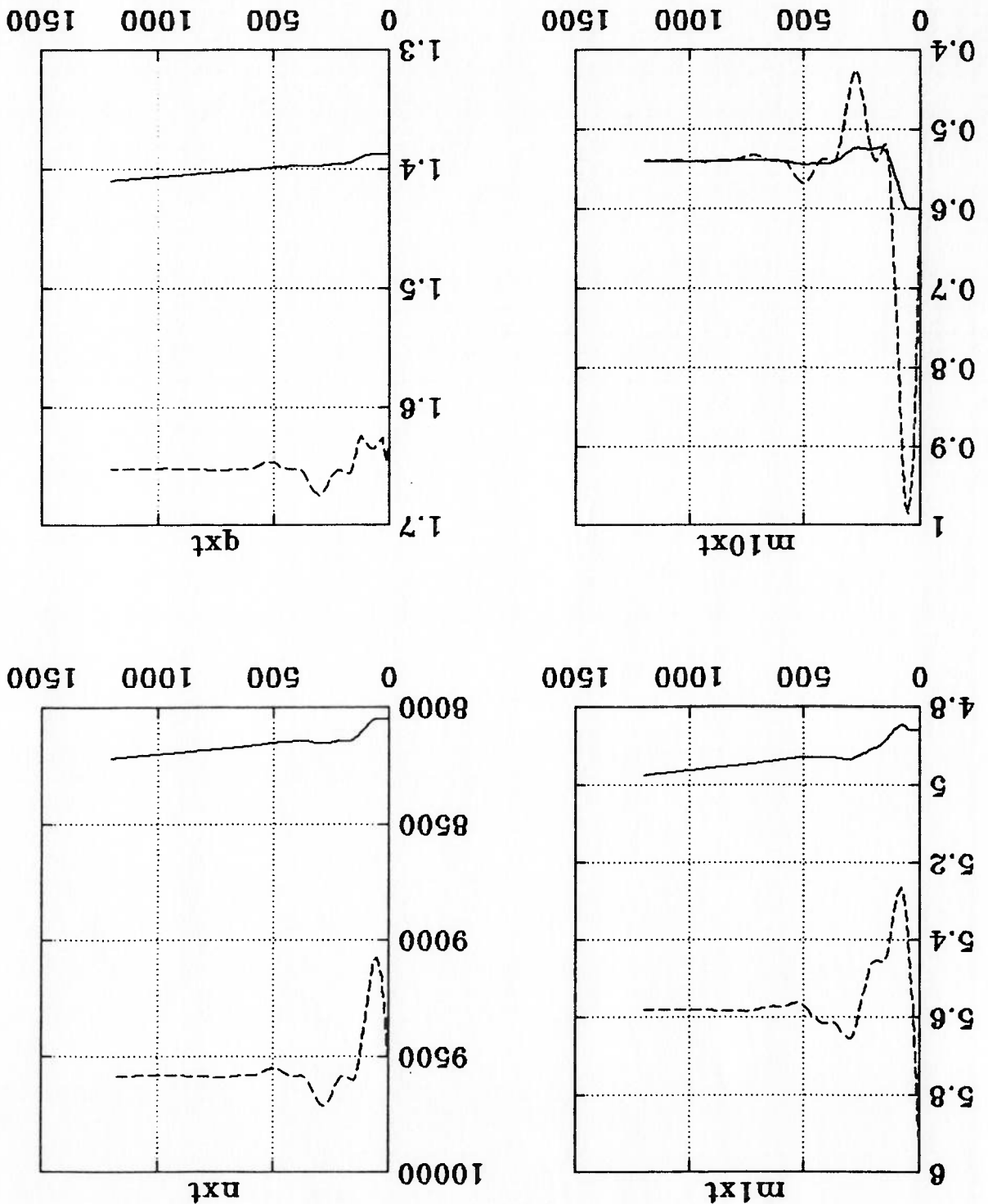


Figura 6.18 m6 -10% PID URC condição nominal — PID URC fora de condição nominal —

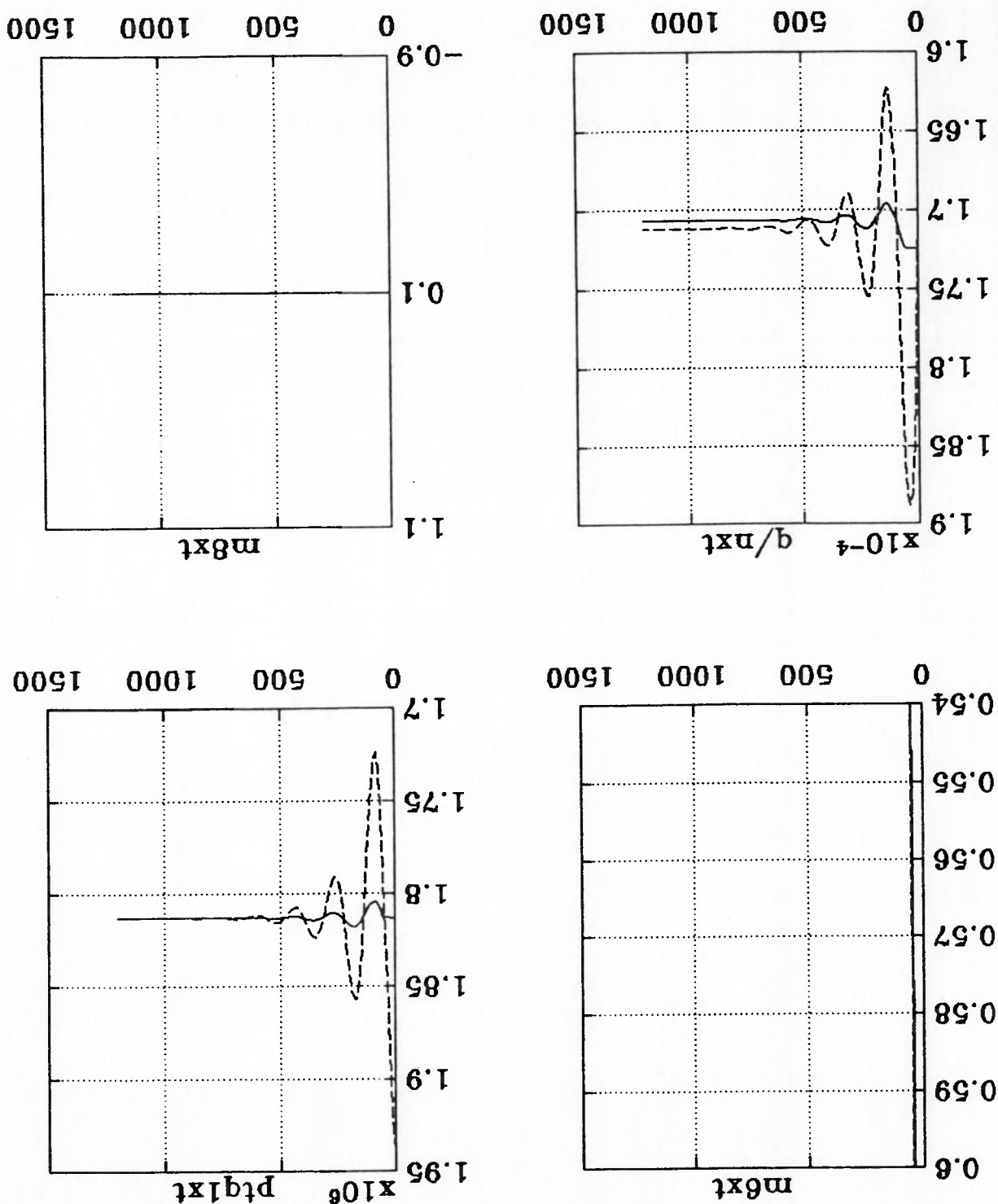


Figura 6.18 m6-10% PID URC condição nominal — PID URC fora de condição nominal —————

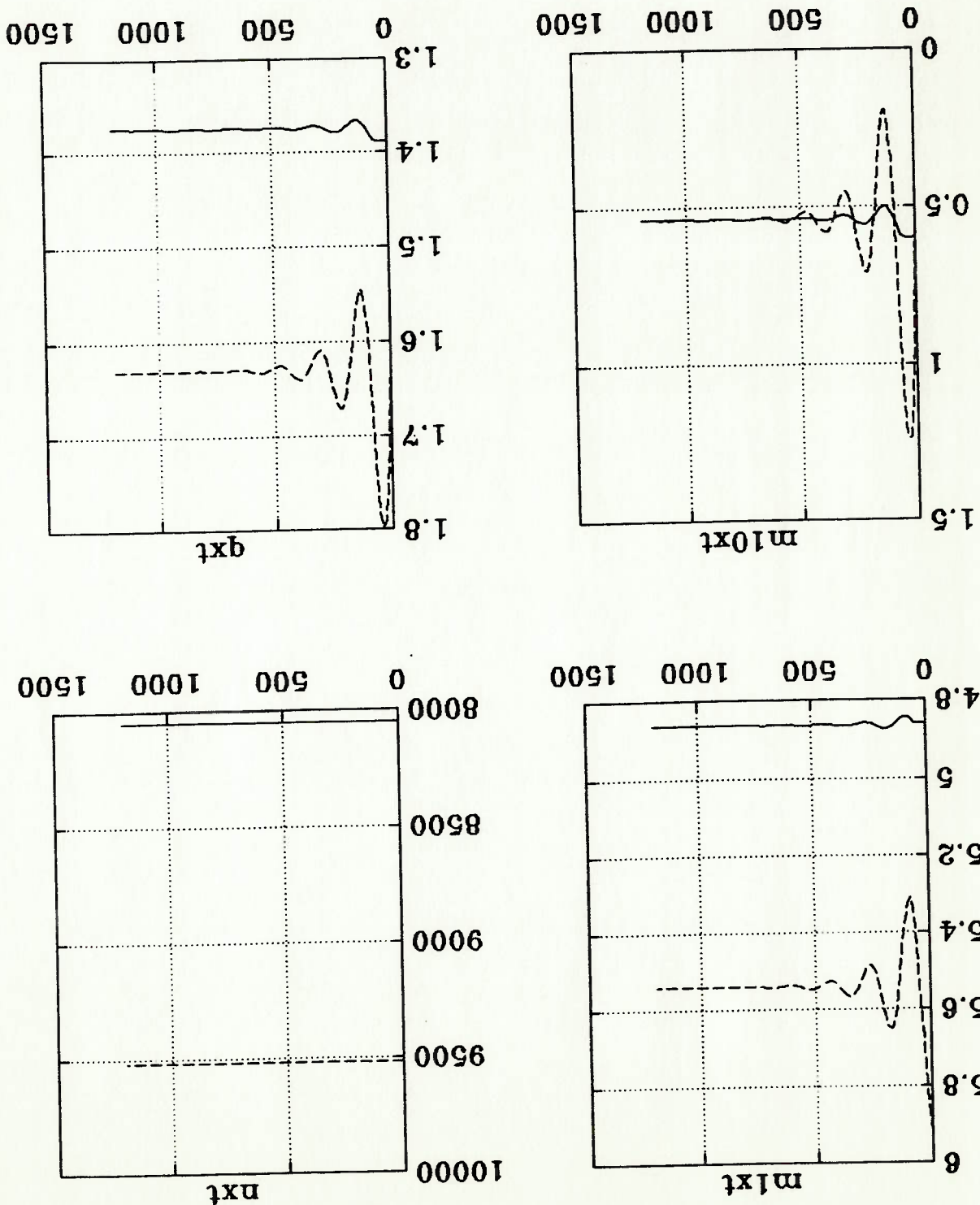


Figura 6.19 f -10% DMC URC condição nominal DMC URC fora de condição nominal

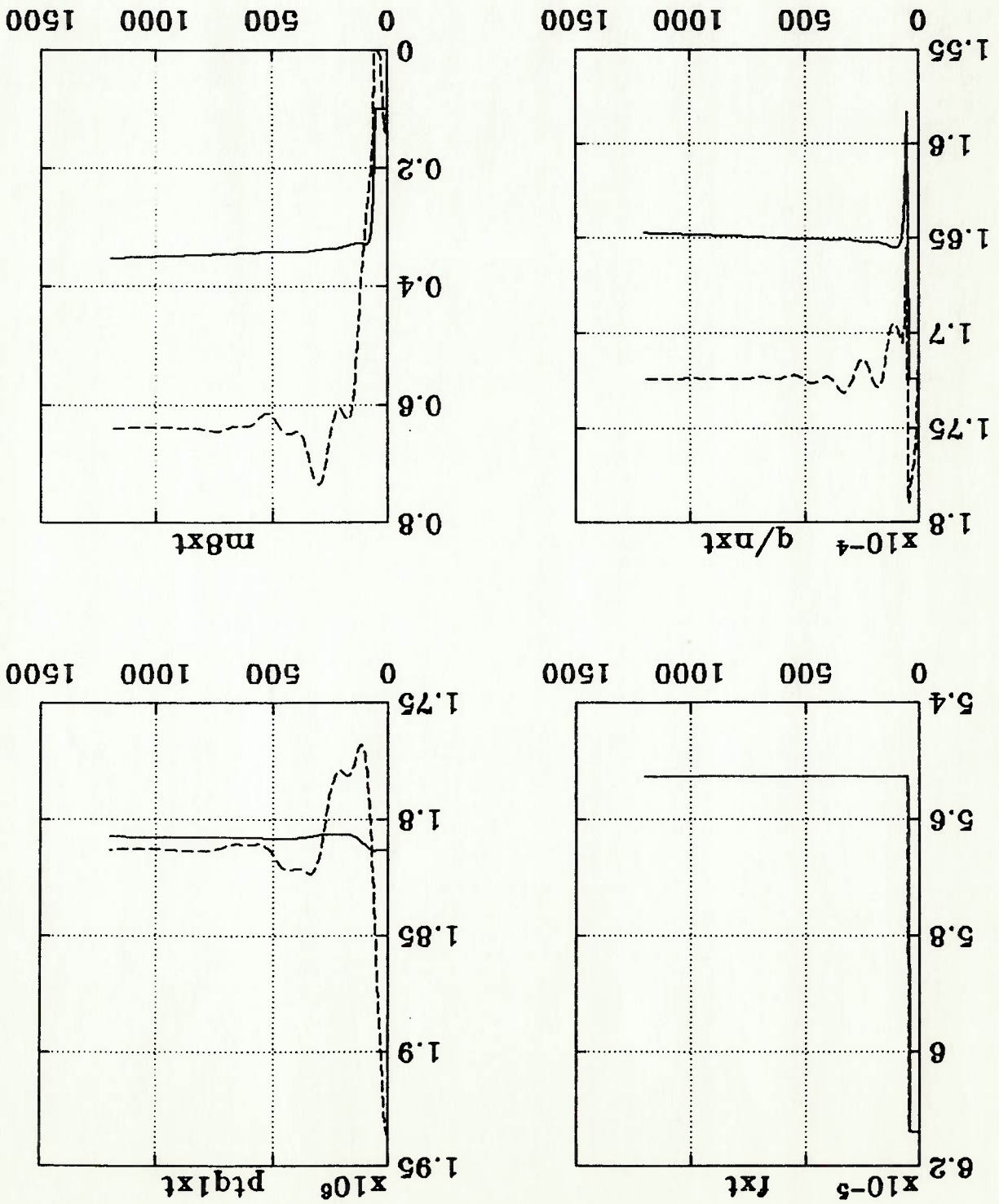


Figura 6.19 f -10% DMC URC condição nominal ——— condição nominal ——— DMC URC fora de continuação

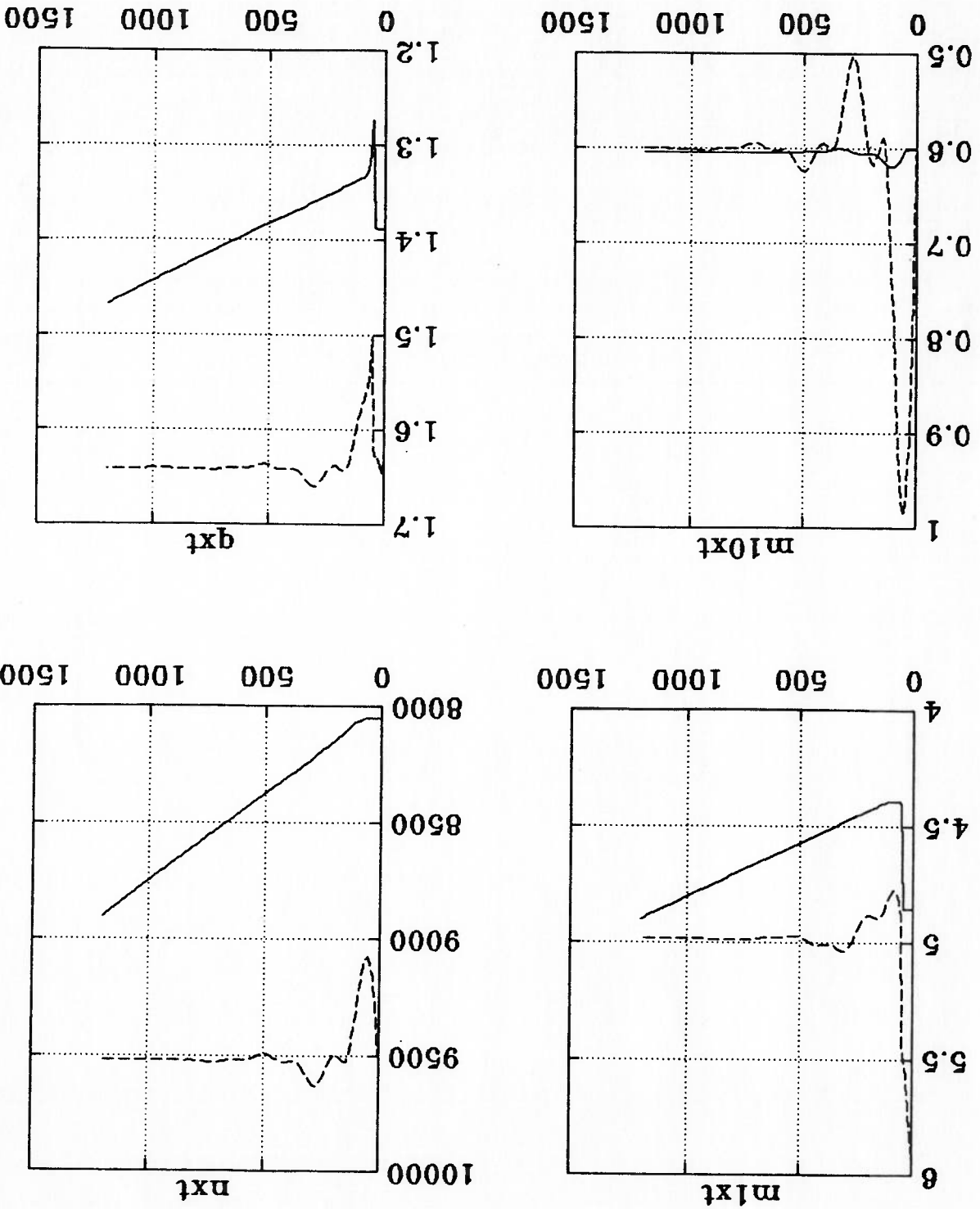


Figura 6.20 f -10% PID URC condição nominal PID URC fora de condição nominal

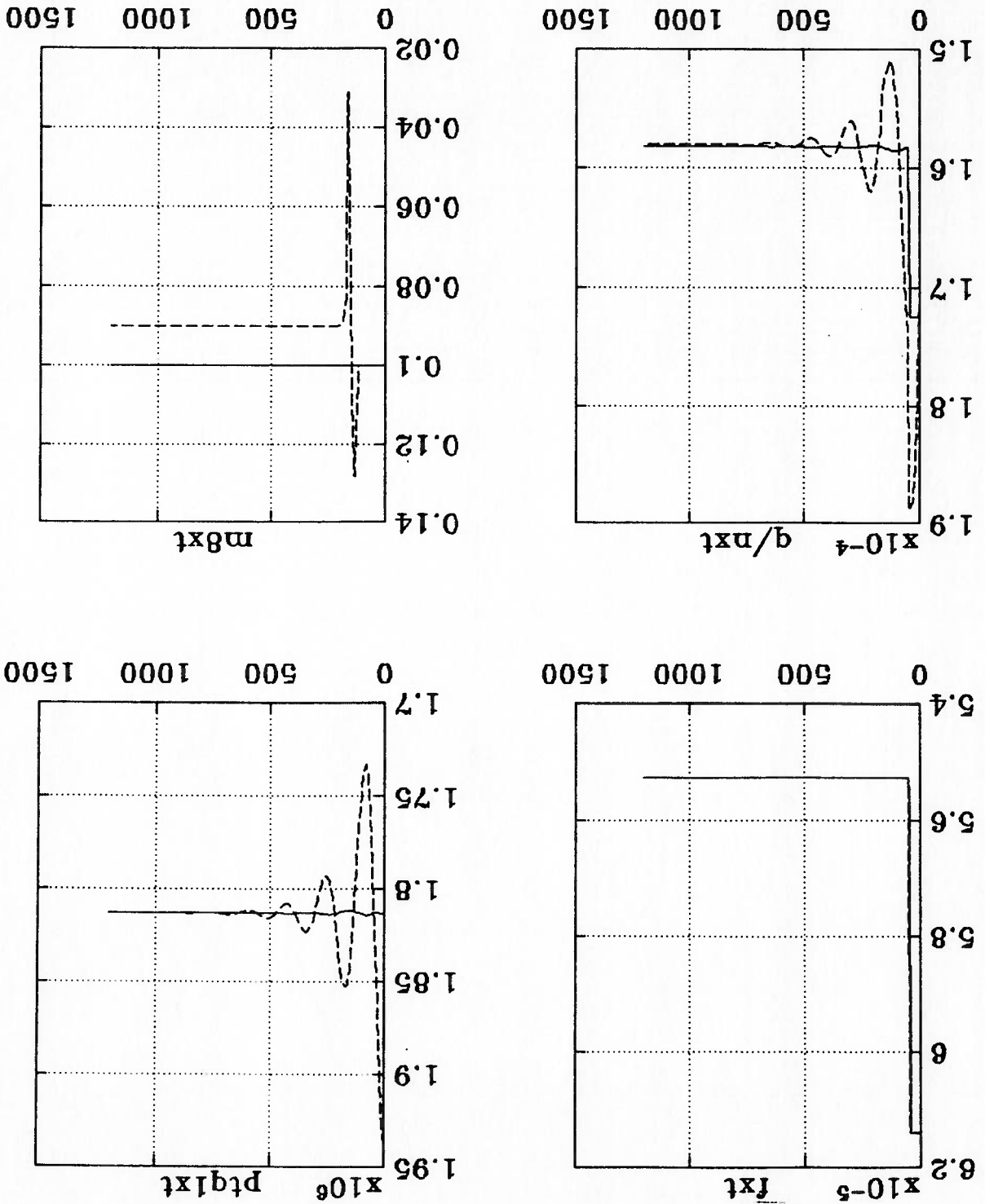


Figura 6.20 f -10% PID URC condição nominal PID URC fora de condição nominal ———— continuação

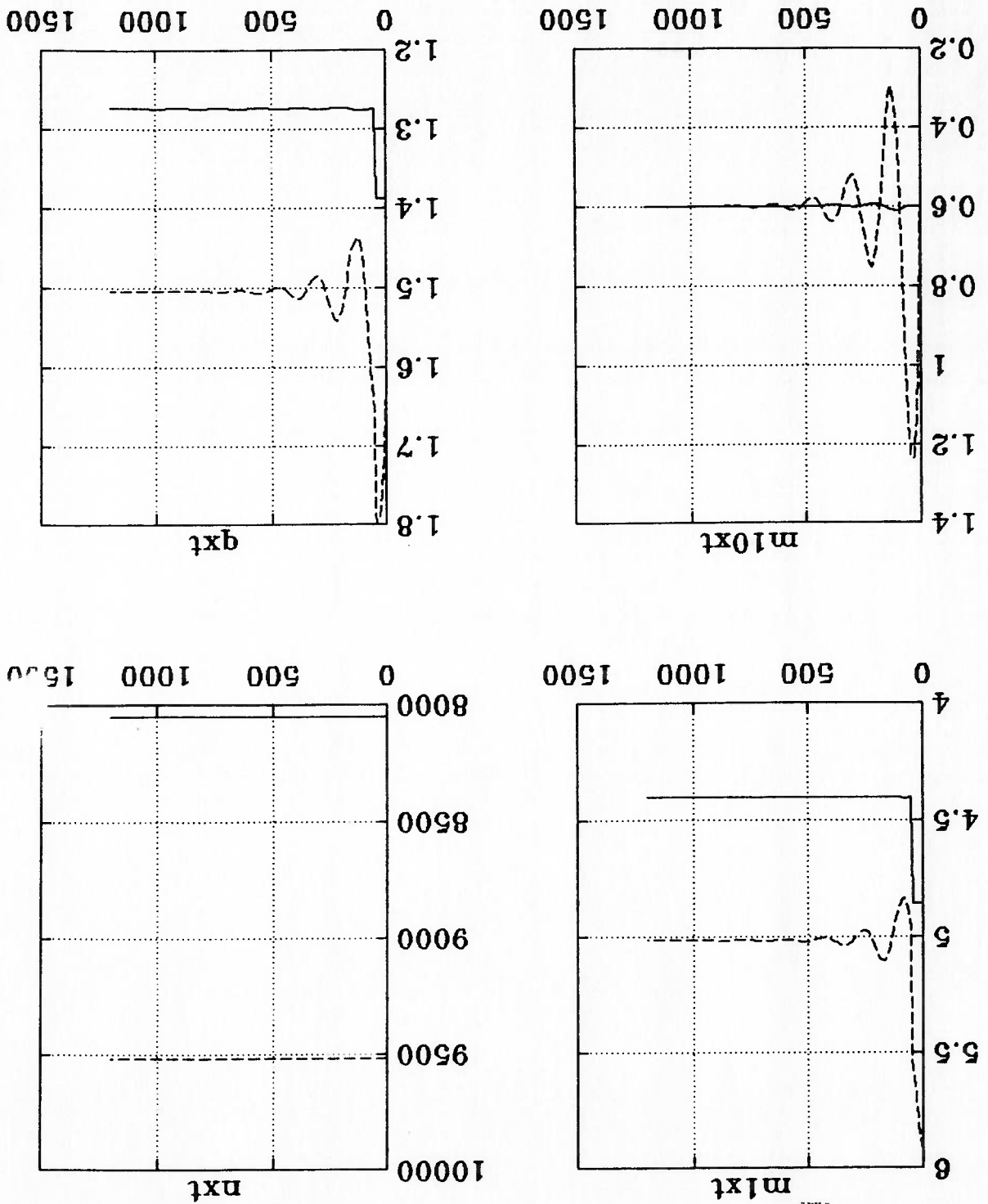


Figura 6.22 f -25% PID URC condição nominal PID URC fora de condição nominal

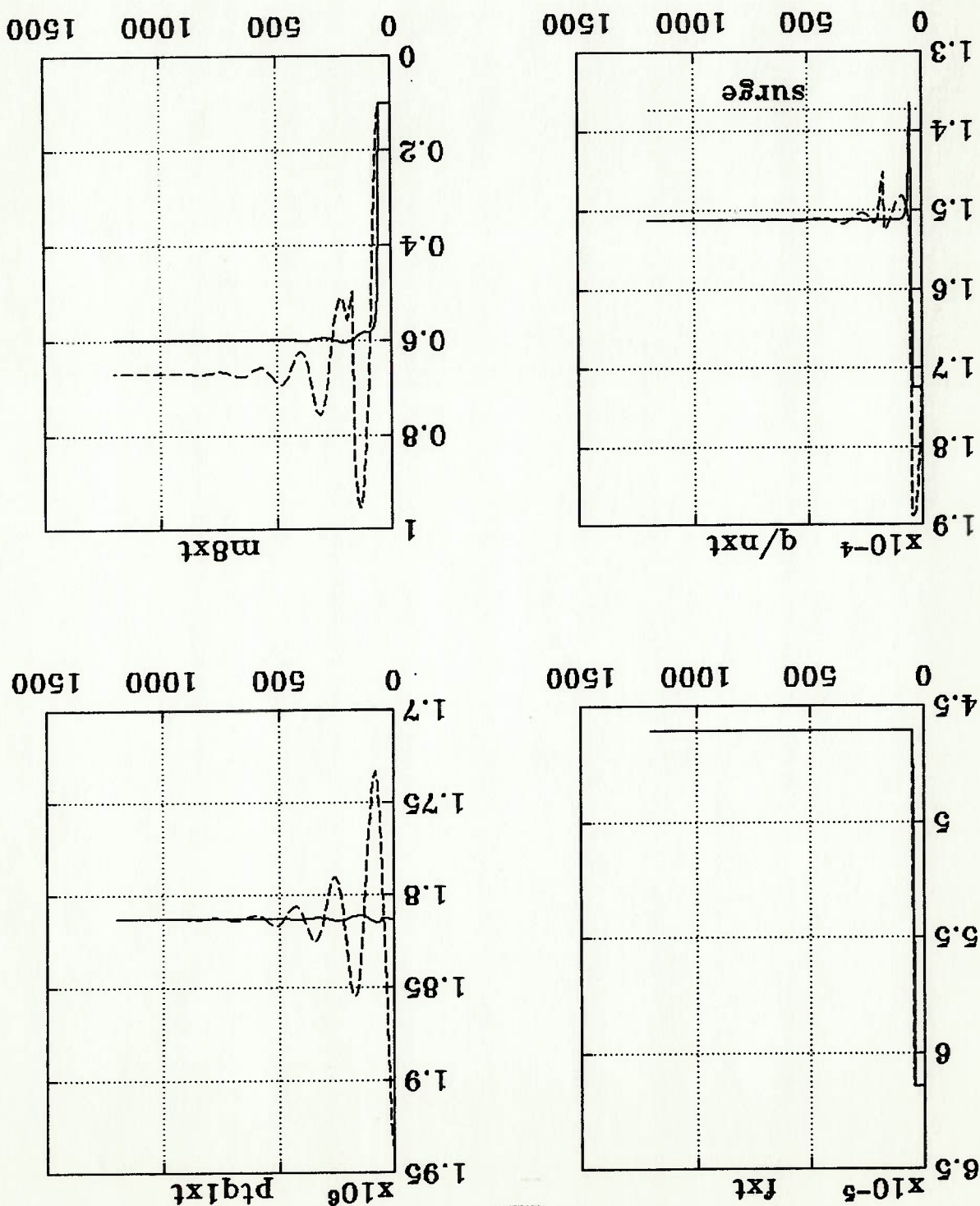


Figura 6.22 f -25% PID URC condição nominal PID URC fora de condição nominal ——— continuação

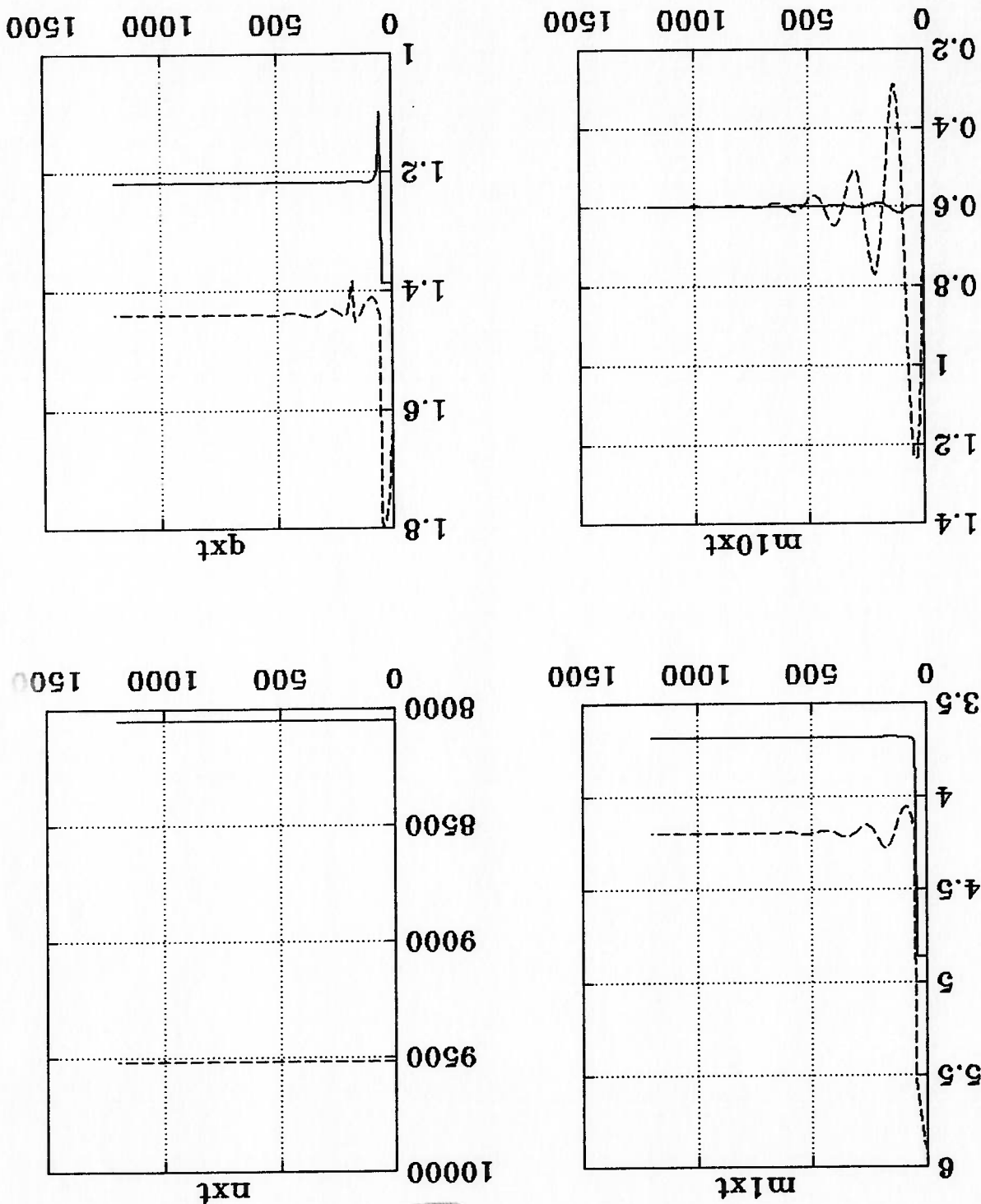


Figura 6.23 f-50% DMC URC condição nominal ——— DMC URC fora de condição nominal ———

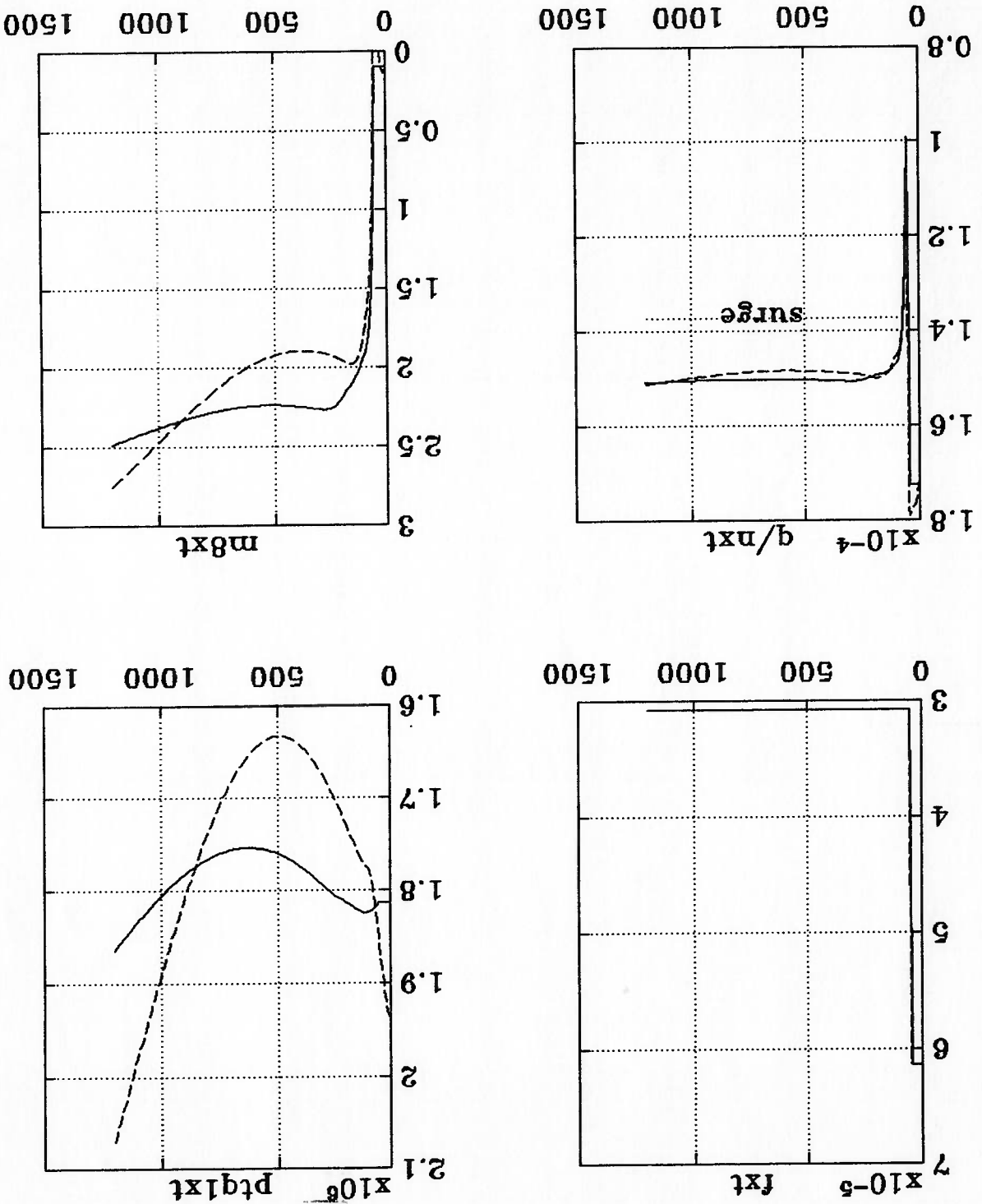


Figura 6.23 f -50% DMC URC condição nominal — DMC URC fora de condição nominal — continuação

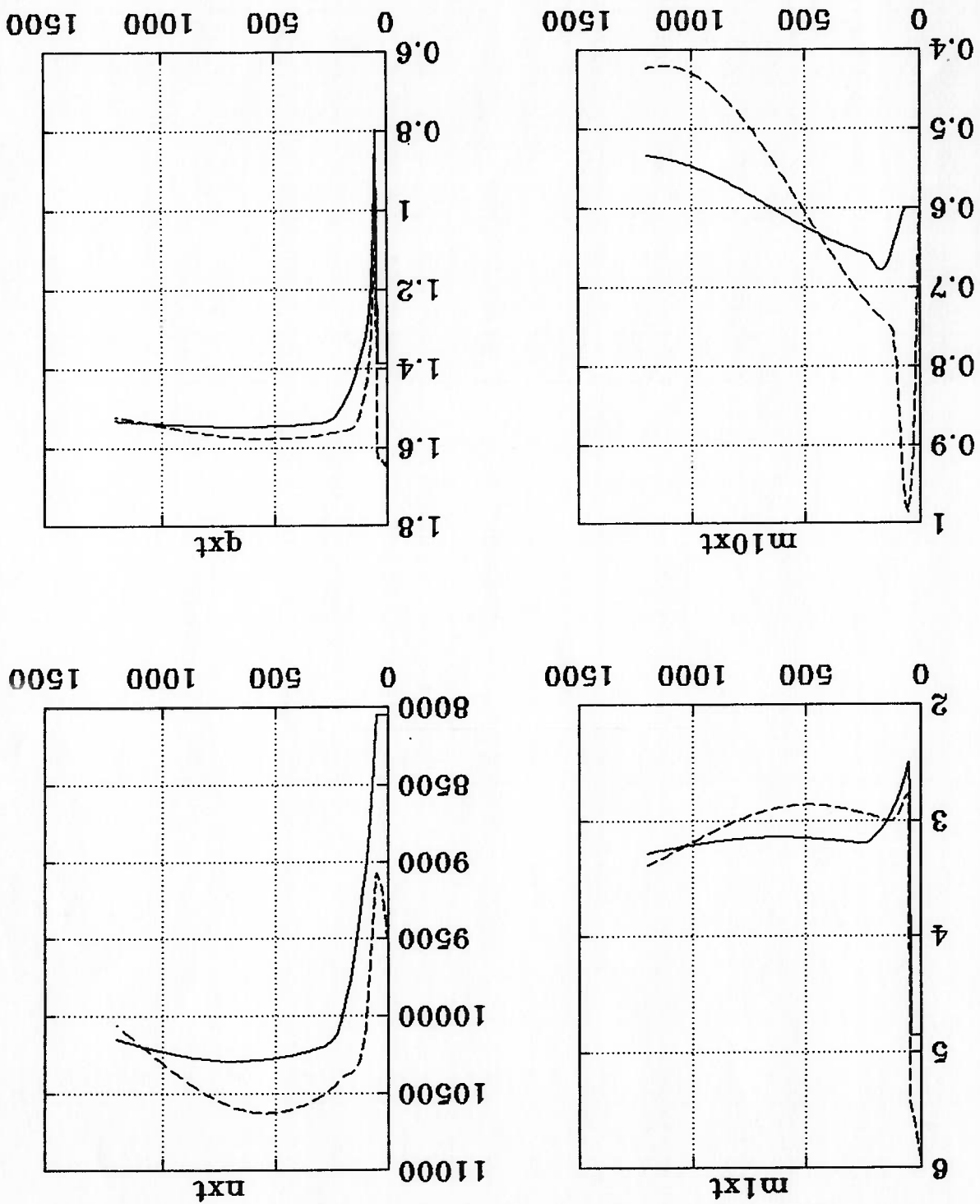


Figura 6.24 f -50% PID URC condição nominal — PID URC fora de condição nominal —

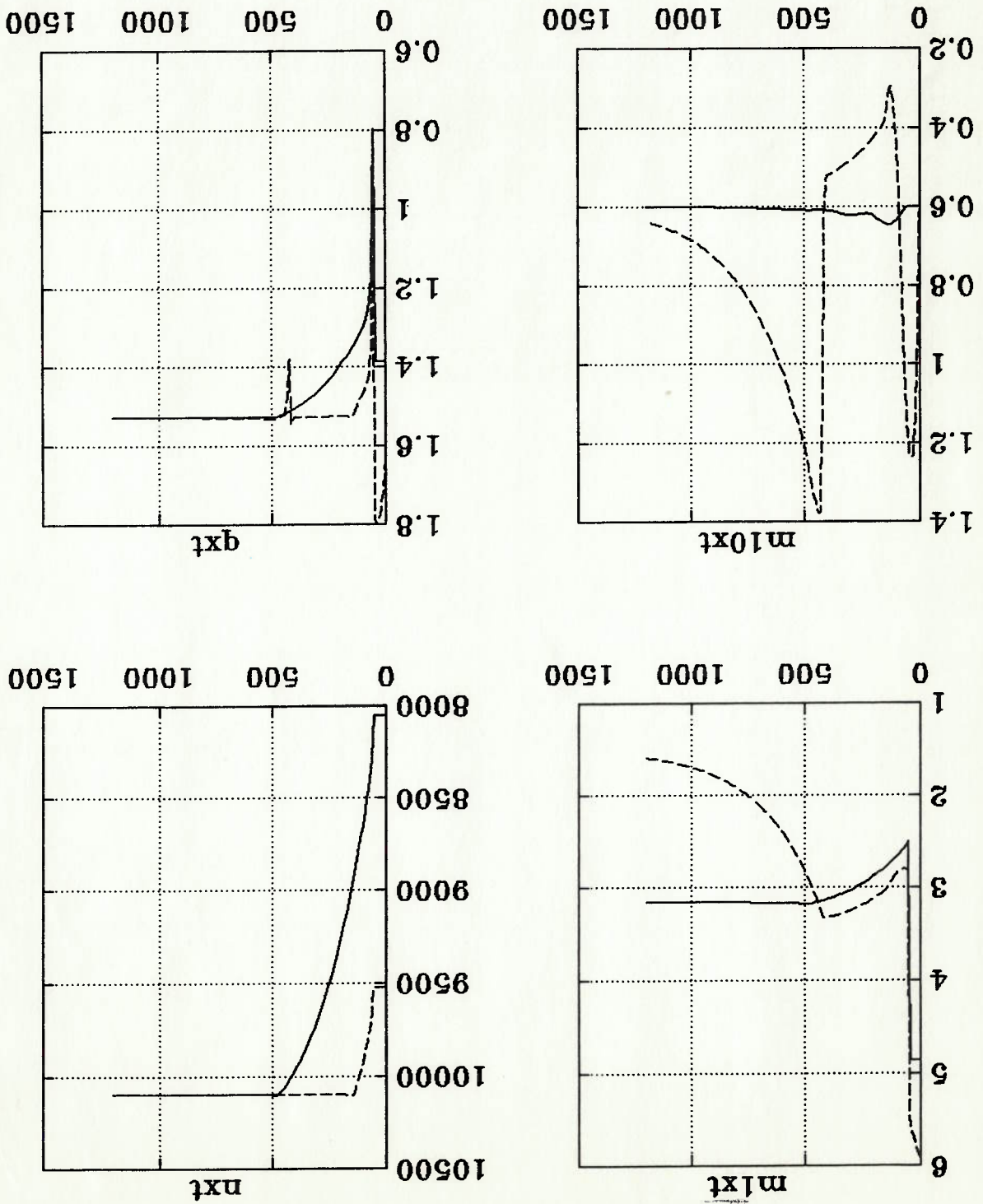
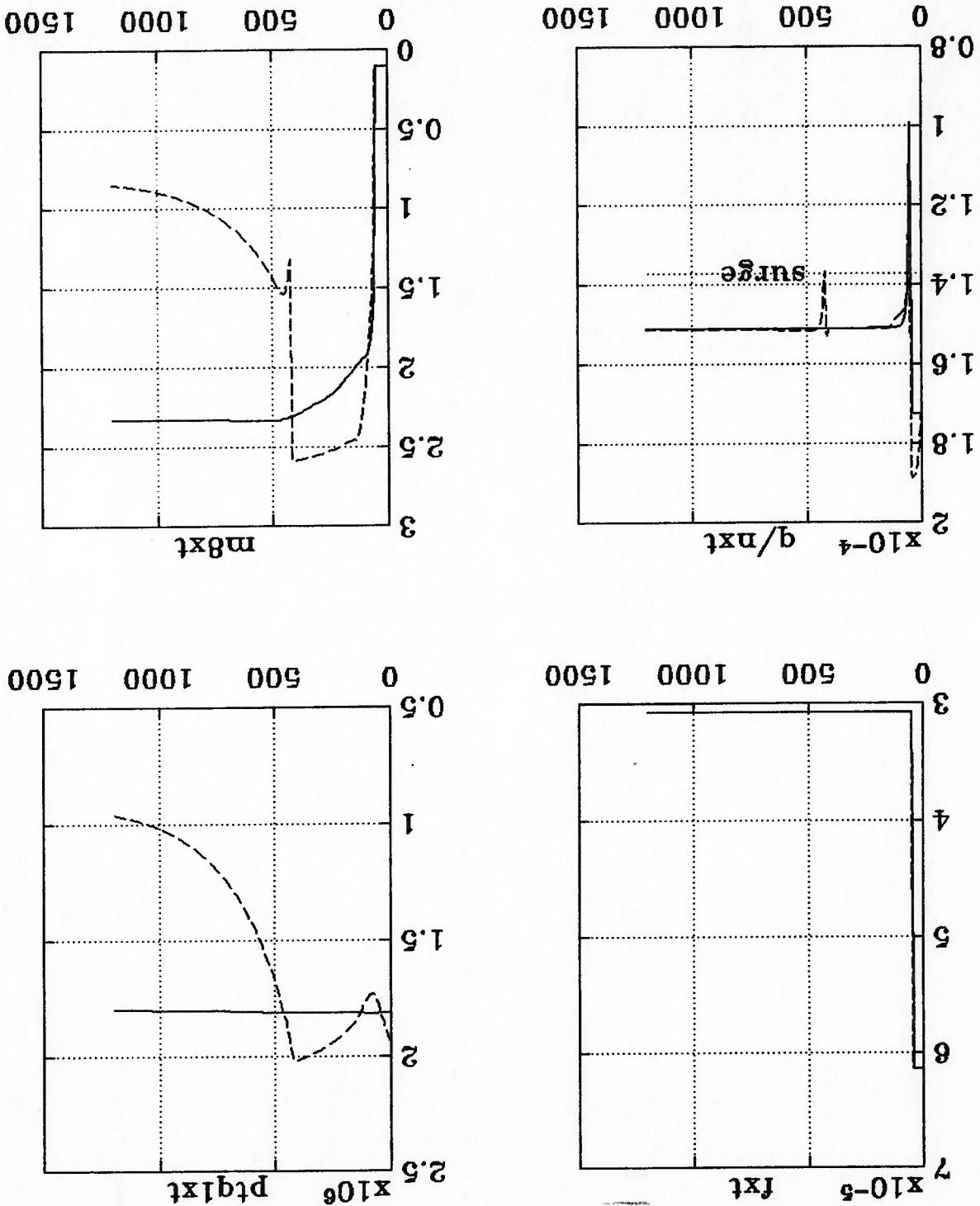


Figura 6.24 f-50% PID URC condição nominal PID URC fora de condição nominal



7.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho: desenvolvemos um modelo de uma instalação com compressor centrífugo (uma unidade de reformação catalítica (URC)) e um método para implementar restrições das variáveis controladas em algoritmos de controle DMC; implementamos o controle DMC com restrições no modelo da URC; também implementamos o controle com malhas PID conjugadas por override no modelo da URC e, finalmente, comparamos o desempenho dos algoritmos PID e DMC no controle da URC.

O modelo desenvolvido da URC apresentou comportamento similar ao da instalação real conforme verificamos através de simulações de transitórios no final do capítulo 3.

O método desenvolvido para implementar restrições das variáveis controladas no DMC consiste em zerar ou atribuir valor diferente de zero aos elementos da matriz de pesos das variáveis controladas, Q , no DMC, cada vez que uma restrição é desativada ou desativada, e recalcular $(A^T Q A + R)^{-1} A^T Q$. A vantagem de usar este método, ao invés de algoritmos que fazem otimização com restrições (QDMC ou LDMC), é o menor tempo de execução do DMC. Enquanto o QDMC e LDMC resolvem problemas de programação quadrática ou linear a cada instante de amostragem, o DMC com restrições somente inverte uma matriz no instante em que uma restrição é violada, nos outros instantes, realiza apenas um produto de matrizes. Portanto o DMC com restrições exige um hardware de menor capacidade que o LDMC e o QDMC. No capítulo 4, demonstramos que o DMC com restrições funciona.

Implementamos o DMC com restrições e o PID com override na URC (capítulos 4 e 5). Ambos os algoritmos funcionaram a contento depois de ajustados, em operação normal como servo e regulador, e conseguiram evitar a violação de restrições. O DMC e o PID apresentaram desempenhos semelhantes em todas as condições de operação. No entanto, o DMC é capaz de manter o compressor próximo de sua eficiência máxima quando os transitórios são menores que os testados. A robustez do DMC é maior que a do PID na situação envolvendo

surge, rotação e vazão críticas; e, igual em todas as outras condições. O DMC com restrições apresenta maior facilidade de implementação de restrições que o PID porque não exige que sejam determinados os pares de variáveis controladas e manipuladas em cada condição de operação da URC. Finalmente, demonstramos que o DMC com restrições para controle da URC pode ser implementado em um hardware com processador 80286 operando em 16 MHz.

O modelo usado neste trabalho para simular a URC, pode ser refinado. Podemos fazer inclusive aquisição de dados na instalação existente para validar e refinar o modelo, desde que a instrumentação adequada esteja disponível.

No sentido de fazermos uma avaliação mais completa das possibilidades do DMC com restrições, podemos implementar algoritmos de controle preditivo que incluam restrições de maneira direta (QDMC e LDMC) no modelo da URC. Estaremos, então, em condições de fazer uma comparação do desempenho do DMC com restrições com o destes algoritmos.

Finalmente, podemos implementar o DMC com restrições em instalações com múltiplos compressores, instalados em série, com restrições intermediário, ou instalados em paralelo. Em tais sistemas a dificuldade de instalar controladores PID é muito maior que na URC, devido ao maior número de variáveis controladas e restrições.

REFERÊNCIAS

1. ODLOAK, DARCI. Controle de Compressores Centrifugos : Apostila de curso de I.B.F. São Paulo, Petróbras, 1988
2. CSANADY, G. T. Theory of Turbomachines. McGraw-Hill Book Company, 1964.
3. FRANKS, ROGER G. E. Modeling and Simulation in Chemical Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 1972.
4. Turbo Pascal 4.0 - Owner's Handbook. Borland International, Inc., 1987.
5. STEPHANPOULOS, GEORGE. Chemical Process Control - An Introduction to Theory and Practice. Prentice-Hall, Inc., 1984.
6. CAMPOS, MARIO C.M. RODRIGUES, PAULO S.B.; LIMA, ENRIQUE. Controle Automático de Compressores Centrifugos. 1º Encontro de Automação da Petróbras, Rio de Janeiro, 1990.
7. CAMPOS, MARIO C. M. Controle de Compressores Centrifugos. Tese de Mestrado Apresentada à COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1990.
8. CUTLER, C.R.; RAMAKER, B.L. Dynamic Matrix Control - A Computer Control Algorithm. AICHE 86th National Meeting. P.51-8. April, 1979.
9. CUTLER, C.R. Dynamic Matrix Control of Imbalanced Systems. ISA Transactions, 21 (12): 1-6, 1982.
10. GARCIA, C.E. Quadratic/Dynamic Matrix Control of Nonlinear Processes: An Application to a Batch Reaction Process. AICHE Annual Meeting, San Francisco, California, 1984.
11. GARCIA, C.E.; PRETT, D.M.; MORARI, M. Model Predictive Control: Theory and Practice - a Survey. Automatica, 25 (3): 335-348, 1989.

12. MARCHETTI, JACINTO L.; MELLICHAMP, DUNCAN A.; SEBORG, DALE E. Predictive Control Based on Discrete Convolution Models. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., 22: 488-495, 1983.
13. MORSHEDI, A.M.; CUTLER, C.R.; SKROVANEK, T.A. Optimal Solution of Dynamic Matrix Control with Linear Programming Techniques (IDMC). Proc. Am. Control Conf., Boston, Massachusetts, pp 199-208, 1985.
14. PRETT, D.M.; GILLETTE, R.D. Optimization and constrained Multivariable Control of a Catalytic Cracking Unit. AICHE 86th National Meeting, P. 51-C, April, 1979.
15. STAROSELSKY, NAUM; LADIN, LAWRENCE. Improved Surge Control for Centrifugal Compressors. Chemical Engineering, May 21, 1979.
16. WHITE, M.H. Surge Control for Centrifugal Compressors. Chemical Engineering, December 25, 1972.
17. ZEE, G.A. VAN. Control System Design for a Centrifugal Compressor Using Dynamic Simulation. IFAC 10th Triennial World Congress, Munique, FRG, 1987.
18. STAROSELSKY, NAUM; LADIN, LAWRENCE. More Effective Control for Centrifugal Gas Compressors Operating in Parallel. International Gas Turbine Conference and Exhibit, Dusseldorf, FRG, June 8-12, 1986.
19. SEBORG, DALE et alii. Process Dynamics and Control. Singapore, John Wiley & Sons, Inc, 1989.
20. WYLEN, GORDON J. VAN; SONNAG, RICHARD E. Fundamentos da Termodinâmica Clássica. 2 ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., 1976.
21. SHAMES, IRVING H. Mecânica dos Fluidos. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., 1973. 2v.

- 22.. STOCKER, W. F. Design of Thermal Systems. Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 1971.
23. PINTO, JOSÉ MAURÍCIO. Controle por Matriz Dinâmica em Coluna de Destilação. Tese de Mestrado Apresentada à COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1990.
24. HERGERT, DOUGLAS. Dominando o Turbo Pascal 5. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna Ltda., 1989.
25. DE KEYSER, R. M. C. et alii. A Comparative Study of Self-adaptive Long-range Predictive Control Methods. Automática, 24(2), pp 149-163.
26. GARCIA, CARLOS E.; MORARI, MANFRED. Internal Model Control - 1. A Unifying Review and Some New Results. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 21: 308-323, 1982.
27. GARCIA, CARLOS E.; MORARI, MANFRED. Internal Model Control - 2. Design Procedure for Multivariable Systems. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 24: 472-484, 1985.
28. GARCIA, CARLOS E.; MORARI, MANFRED. Internal Model Control - 3. Multivariable Control Law Computation and Tuning Guidelines. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 24: 484-494, 1985.
29. NOBLE, BEN. Applied Linear Algebra. Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A., Prentice-Hall, Inc, 1969.