

# Análise e Controle de uma Unidade FCC do tipo Kellog Orthoflow F

ROMERO G. DE SOUZA<sup>1</sup>, MAURÍCIO B. DE SOUZA JR.<sup>2</sup> E AMIT BHAYA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Engenharia Elétrica  
COPPE/UFRJ, C.P. 68504, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, RJ 21945-970, BRAZIL  
E-mail: romero@pee.coppe.ufrj.br, amit.bhaya@na-net.ORNL.gov

<sup>2</sup> Escola de Química  
Bloco E/UFRJ, C.P. 68504, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro, RJ 21949-900, BRAZIL  
E-mail: mbsj@eq.ufrj.br

**Resumo**— Este artigo apresenta um estudo sobre um modelo de uma unidade FCC do tipo Kellog Orthoflow, que é composta de um vaso de reação (reator) e um vaso de regeneração (regenerador) com dois estágios. Foi procedida uma análise do emparelhamento entre as entradas e as saídas através do cálculo da matriz de ganhos relativos (RGA), a fim de utilizar controladores PIDs nos pares entrada-saída que foram indicados com acoplamento mais intenso. Para sintonização dos PIDs, foi feita identificação de cada par entrada-saída observando-se o comportamento das saídas e com isso contruindo os subsistemas monovariáveis que foram admitidos como lineares. Cada um destes subsistemas foi tratado isoladamente e os parâmetros dos PIDs foram retirados a partir do uso do Internal Model Control (IMC). Este trabalho foi desenvolvido no âmbito da subrede de Controle de Processos Petroquímicos da CP-RECOPE.

**Abstract**— This paper presents a study of a model of a Kellog Orthoflow FCC unit, composed of a reaction vessel (reactor) and a regenerator vessel (regenerator) with two stages. Input-output was carried out pairing using the RGA (relative gain array), in order to use PID controllers on the strongly coupled in the input-output pairs. A linear SISO subsystem for each such i-o pair was identified using steps response data and used tune a PI controller using the internal model control (IMC) approach-leading to a multiloop controller for the full system. This research was carried out within the ambit of the RECOPE-CP Cooperative Research Network on Petrochemical Process Control.

**Key Words**— FCC Kellog Orthoflow model, PI Control, controller tuning

## 1 Introdução

O modelo de uma unidade FCC do tipo Kellog Orthoflow estudado neste trabalho é baseado no trabalho desenvolvido em [1], [2] e aperfeiçoado pelo grupo de pesquisa da rede RECOPE (<http://www.enq.ufrj.br/recope/FCC/>). O modelo considerado consiste em 29 EDOs, 27 variáveis de estado, 9 entradas e 9 saídas. Dada a complexidade do modelo, optou-se, no trabalho preliminar apresentado neste artigo, por uma estratégia de controle multimalha, ao invés de controle multivariável completo. Em outras palavras, identificar, através de medidas de entrada-saída, (i) quais as variáveis de entrada e saída, par a par, que apresentam o acoplamento mais forte, (ii) utilização destas mesmas medidas para estimar funções de transferência entre estas variáveis emparelhadas, (iii) projeto de controladores PIs para fechar as malhas destes pares, a fim de estabilizar a planta em um determinado ponto de operação pré-especificado. Isto é, pretende-se resolver o problema de regulação através de controle multimalha.

## 2 Descrição do modelo

O modelo estudado neste artigo é baseado em um trabalho de Kurihara[1][2] adaptado para a unidade FCC do tipo Kellog Orthoflow modelo F, onde o craqueamento ocorre no riser e possui dois estágios no regenerador com queima parcial de CO. O modelo possui uma dinâmica complexa, com um grande número de equações e variáveis de estados[4]. Um diagrama esquemático da unidade pode ser vista na fig. 1.

## 3 A RGA para o modelo do FCC do Kellog Orthoflow F

Na unidade estudada, as variáveis de entrada e saída estão fortemente acopladas. Uma maneira de identificar o grau de interação entre as variáveis é através da chamada matriz de ganhos relativos (RGA)[4] definida abaixo:

$$\Lambda = G(0) \otimes (G(0)^{-1})^T \quad (1)$$

onde a operação  $\otimes$  representa multiplicação elemento a elemento.

A matriz de ganhos relativos é formada a partir da matriz de matriz de ganhos estacionário que é definida como sendo:

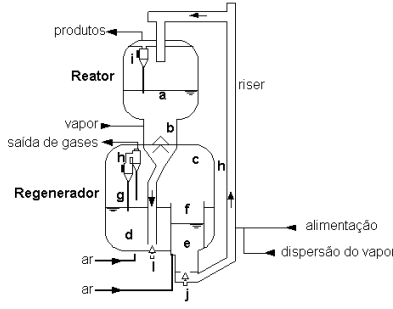


Figura 1. Unidade FCC Kellog Orthoflow tipo F: *a*: riser (reator tubular); *b*: vaso reator; *c*: leito do reator; *d*: primeiro estágio do regenerador na fase densa; *e*: segundo estágio do regenerador na fase densa; *f*: fase geral diluída; *g*: válvula de passagem do catalisador regenerado; *h*: válvula de passagem do catalisador gasto; *i*: ciclones do reator; *j*: segundo estágio na fase diluída; *k*: primeiro estágio na fase diluída; *l*: regenerador; *m*: stripper; *n*: ciclones do regenerador[2]

$$G(0) = \begin{bmatrix} \frac{\Delta y_1}{\Delta u_1} & \frac{\Delta y_1}{\Delta u_2} & \cdots & \frac{\Delta y_1}{\Delta u_n} \\ \frac{\Delta y_2}{\Delta u_1} & \frac{\Delta y_2}{\Delta u_2} & \cdots & \frac{\Delta y_2}{\Delta u_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\Delta y_n}{\Delta u_1} & \frac{\Delta y_n}{\Delta u_2} & \cdots & \frac{\Delta y_n}{\Delta u_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

De acordo com a figura 2, esta unidade possui nove sinais de entrada e nove sinais de saída, as quais foram descritas através de equações dinâmicas do processo.

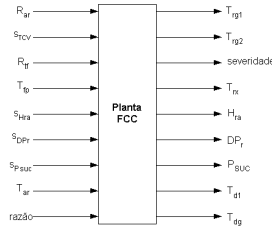


Figura 2. Diagrama da unidade FCC Kellog Orthoflow F:  $R_{ar}$ : (fluxo de ar para o reg.);  $s_{TCV}$ : (sinal de controle);  $R_{tf}$  (fluxo total de alimentação para o riser);  $T_{fp}$  (temp. de alimentação na entrada do riser);  $s_{Hra}$  (sinal de controle LCV);  $s_{DPr}$  (sinal de controle PDCV);  $s_{Psuc}$  (sinal de controle PCV);  $T_{ar}$  (temp. da câmara do reator); *razão* (razão entre  $R_{a1}$  e  $R_{ar}$ );  $T_{rg1}$  (temp. da fase densado 1<sup>o</sup> estágio do reg.);  $T_{rg2}$  (temp. da fase densa do 2<sup>o</sup> estágio do reg.); *severidade*;  $T_{rx}$  (temp. da mistura do craqueamento no riser);  $H_{ra}$  (hold up de catalisador no reator);  $DP_r$  (pressão do reator:  $P_{reg.} - P_{reator}$ );  $T_{d1}$  (temp. da fase diluída do 1<sup>o</sup> estágio do reg.);  $T_{dg}$  (temp. geral da fase diluída);

Na planta estudada, verifica-se que três variáveis de saída são realimentadas formando malhas com três entradas. Por este motivo estas variáveis de entrada e saída são retiradas da pesquisa do emparelhamento. Utilizou-se uma estimativa da RGA, baseada na injeção de um degrau na entrada  $j$ , medindo-se a variação percebida nas saídas  $i$ 's, formando os elementos da coluna  $j$  da RGA através da razão entre a variação obtidas nas saídas  $i$ 's pelo valor do degrau dado na entrada  $j$ . Tendo os valores de cada  $\Delta u_i$  e de cada

$\Delta y_i$ , forma-se a matriz de ganhos estacionários, ou seja, a matriz  $G(0)$ . Encontra-se a RGA deste processo mostrado na tabela 1.

Tabela 1. Matriz de ganhos relativos (RGA) do modelo.

	$R_{ar}$	$s_{TCV}$	$R_{tf}$	$T_{fp}$	$T_{ar}$	ratio
$T_{rg1}$	<b>0.915</b>	-0.259	-1.212	-0.898	1.583	0.870
$T_{rg2}$	-3.051	0.505	1.308	0.069	1.965	<b>0.204</b>
<i>severidade</i>	0.002	0.225	<b>2.575</b>	-2.174	0.371	0.000
$T_{rx}$	0.144	0.092	-1.806	<b>4.025</b>	-1.465	0.010
$T_{d1}$	6.570	-2.088	-2.361	-1.671	<b>0.559</b>	-0.007
$T_{dg}$	-3.580	<b>2.525</b>	2.496	1.649	-2.013	-0.077

Pela definição da matriz RGA, as variáveis de entrada e saída correspondentes a elementos positivos da RGA acima são compatíveis para emparelhamentos entre si.

#### 4 Identificação dos subsistemas da FCC tipo Kellog Orthoflow

A RGA indica quais as entradas e saídas que devem ser emparelhadas a fim de formar subsistemas monovariáveis (SISO) que possam ser controladas a princípio, independentemente. Estes subsistemas, supostos lineares nesta análise, são identificados através da resposta ao degrau. Especificamente, a identificação de cada subsistema é feita a partir das curvas de saída, as quais têm características próximas às curvas de respostas ao degrau de sistemas lineares monovariáveis de segunda ordem:

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

Com estes parâmetros estimados a partir de cada curva, formulam-se as funções de transferência dos subsistemas através de equações que são mostradas abaixo[5]:

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1 - \xi^2}}; \quad \omega_d = \frac{\pi}{T_p}; \quad \omega_n = \frac{4}{\xi T_r} \quad (4)$$

onde  $\omega_d$  é a frequência natural de amortecimento,  $T_p$  é o tempo onde a curva atinge o *overshoot* máximo e  $T_r$  é o tempo de acomodação do sistema, e o valor de  $\xi$  determina os diferentes tipos de resposta ao degrau de um sistema de segunda ordem.

Desta forma, foram obtidas as seguintes funções de transferência de cada um destes subsistemas:

$$\begin{aligned} g_{T_{rg1} - R_{ar}} &= \frac{0.020384}{s^2 + 0.0252s + 0.0049} \\ g_{T_{dg} - s_{TCV}} &= \frac{-0.0069828}{s^2 + 0.03956s + 0.002116} \\ g_{severidade - R_{tf}} &= \frac{-0.002325}{s^2 + 0.065s + 0.0025} \\ g_{T_{rx} - T_{fp}} &= \frac{0.010668125}{s^2 + 0.091s + 0.004225} \\ g_{T_{d1} - T_{ar}} &= \frac{-0.00169632}{s^2 + 0.0588s + 0.0036} \end{aligned} \quad (5)$$

$$g_{T_{rg2}-ratio} = \frac{-0.2823s - 0.0034}{15s^3 + 1.7140s^2 + 0.1560s + 0.0072}$$

Resolveu-se controlar cada um dos subsistemas SISO independentemente, através da estratégia de controle do tipo IMC[6] pois nenhuma das funções de transferência (5)-(9) atende ao critério de ajuste do tipo Ziegler-Nichols. O método IMC possui importantes vantagens: considera explicitamente as incertezas do modelo, e permite ao projetista fazer um balanço entre o desempenho do sistema de controle e sua robustez a mudanças do processo e erros de modelagem.

A partir da estratégia de controle do tipo IMC, são retirados os parâmetros de ajuste para os controladores PIDs com exceção do subsistema  $g_{T_{rg2}-ratio}$ , pelo fato da sua função de transferência possuir ordem três. A tabela 1 fornece os valores dos parâmetros dos PIDs encontrados a partir dos controladores do tipo IMC.

Tabela 2. Parâmetros utilizados nos controladores PID's em cada subsistema

subsistema	$K_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
$g_{T_{rg1}-R_{ar}}$	1.24	5.14	39.89
$g_{T_{dq}-s_{TCV}}$	-5.7	18.70	25.30
$g_{sevcant-R_{if}}$	-27.96	26	15.39
$g_{T_{ra}-T_{fp}}$	8.53	21.54	10.99
$g_{T_{d1}-T_{ar}}$	11.66	16.33	17.01

Para o subsistema  $g_{T_{rg2}-ratio}$ , foi utilizado um controlador IMC, com o valor de  $\tau_c=10$  (valor atribuído para uma determinada velocidade de resposta) e  $r=2$  (eliminar a característica derivativa do controlador):

$$f = \frac{1}{(\tau_c s + 1)^r} \quad (6)$$

onde  $\tau_c$  é a constante de tempo de malha fechada que determina a rapidez da resposta do filtro. O parâmetro  $r$  é um inteiro positivo que é selecionado para que o controlador  $C^*$  seja uma função de transferência própria. O controlador é especificado como sendo:

$$C^* = \frac{1}{\tilde{P}_-} f \quad (7)$$

onde  $\tilde{P}_-$  contém zeros no semi-plano esquerdo. Com isso, formam-se as funções de transferência de cada subsistema como para o subsistema para o subsistema  $g_{T_{rg2}-ratio}$ , temos:

$$T_{IMC}(s) = \frac{2076.1s^3 + 237.26s^2 + 21.59s + 1}{3906.9s^3 - 828.51s^2 - 9.426s} \quad (8)$$

Os controladores achados acima são utilizados para controlar a unidade FCC do tipo Kellog Orthoflow, e os resultados obtidos são descritos na próxima seção.

## 5 Controle da FCC tipo Kellog Orthoflow F utilizando PIDs

Utilizando os controladores projetados pela técnica IMC acima, que supõe a planta linear em torno do ponto de operação, realizaram-se os seguintes experimentos de simulação: (i) Escolhendo um par entrada-saída de cada vez, fecha-se a malha entre este par com o controlador correspondente projetado (linearmente), porém utilizando o modelo completo não-linear. As demais entradas são mantidas nos seus respectivos valores de regime; (ii) Fecharam-se, sucessivamente, as malhas entre as variáveis entrada-saída emparlhadas, monitorando o sistema para possíveis instabilidades.

Como resultado destes experimentos, observou-se que a não linearidade da planta provoca diferenças perceptíveis entre as respostas ao degrau previstas pelos modelos lineares identificados (e. g., ver figura 4) e a respostas da planta. Porém, apesar disso, podemos considerar o projeto dos controladores bem sucedido, uma vez que as figuras 4, 5, 6, 7 e 8 mostram que as perturbações do tipo degrau são rejeitadas, com exceção de um pequeno *offset* observado na figura 6. Pode ser visto o comportamento das saídas diante do controle em cada um destes sistemas SISO.

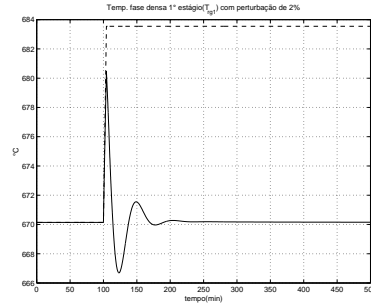


Figura 3. Sinal de saída para o controle do sistema SISO  $g_{T_{rg1}-R_{ar}}$  (—) junto com uma perturbação de 2% (- - -)

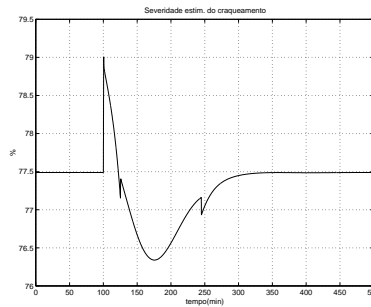


Figura 4. Sinal de saída para o controle do sistema SISO  $g_{sevcant-R_{if}}$

Nestes testes, eliminou-se o modo derivativo dos PIDs, pois como a perturbação foi implementada diretamente na variável medida, a ação

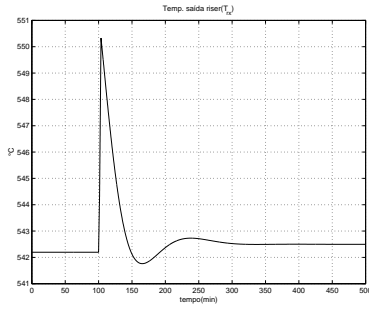


Figura 5. Sinal de saída para o controle do sistema SISO  $gT_{rx} - T_{fp}$

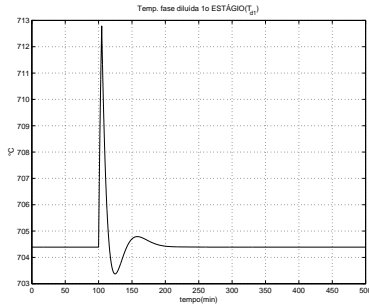


Figura 6. Sinal de saída para o controle do sistema SISO  $gT_{d1} - T_{ar}$

derivativa produz um impulso instabilizando a malha[7]. Para o subsistema  $gT_{dg} - s_{TCV}$  observou-se que modificando o valor do ganho para  $K_c = -2$  e eliminando o modo integrativo obtem-se uma resposta de melhor desempenho.

Foram feitas tentativas de controlar o processo implementando todas as realimentações do controle multimalha, mas foram obtidos resultados insatisfatórios devido a problemas de interações entre as variáveis de entrada e saída. Deste modo, foram utilizados apenas 4 dos 6 pares entrada-saída escolhidos pela RGA e com o critério de escolha das variáveis de entrada e saída analisadas a partir de sua importância na atuação no processo. As figuras 10, 11, 12 e 13 mostram variáveis de entradas e saídas controladas ao passo que nas figuras 14 e 15 mostram as saídas que não foram realimentadas.

Concluído o controle multimalha descrito acima, é utilizado uma heurística para realizar uma nova sintonia (*detuning*). Este *detuning*, que é baseado no fator de interação ( $\lambda$ ), propõe dividir o ganho de cada subsistema SISO pelo seu valor de  $\lambda$  encontrado através da RGA[8]. Nas figuras 15, 16, 17 e 18 é possível ver o comportamento dos sinais de saída diante da nova sintonia, e os sinais de saída anterior à esta mudança e também nas figuras 19 e 20. Os sinais de saída que não foram realimentados ( $T_{dg}$  e  $T_{d1}$ ) também não se desestabilizam. (ver fig. [4] para maiores detalhes).

É possível observar em cada figura que houve um melhor desempenho do controle quando aplicada a heurística, em relação ao controle que foi

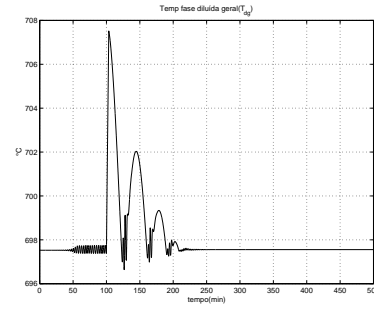


Figura 7. Sinal de saída para o controle do sistema SISO  $gT_{dg} - s_{TCV}$

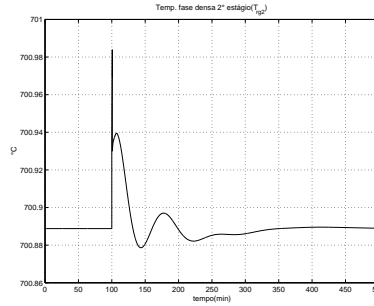


Figura 8. Sinal de saída para o controle do sistema SISO  $gT_{rg2} - ratio$

projetado diretamente pela teoria IMC. Percebe-se que os sinais de saída apresentam um transitório mais rápido e com menos oscilações. As saídas ( $T_{dg}$  e  $T_{d1}$ ), apesar de não serem realimentadas, não tiveram um comportamento instável, permanecendo limitadas porém com *offsets*.

## 6 Conclusão

Para o modelo da unidade FCC do tipo Kellogg Orthoflow F foi feita uma estimativa de RGA bem como funções de transferência entre as variáveis emparelhadas. Com base nisso, foi realizado um controle multimalha utilizando controladores PID projetados pelo método IMC, seguido por uma etapa de *detuning* heurístico.

Foi observado que, apesar das interações e não linearidades presentes na planta que não foram consideradas no projeto do controlador multimalha, ele foi capaz de resolver o problema de estabilizar o sistema em torno de um ponto de operação pré-especificado. No entanto, dando continuidade à pesquisa apresentada neste trabalho, estamos pesquisando o projeto de um controlador multivariável que possa melhorar o desempenho da planta controlada.

**Agradecimentos** — Esta pesquisa foi apoiada pelo projeto “Rede de Pesquisa Cooperativa RECOPE”, da FINEP no âmbito de subrede Controle de Processos Petroquímicos. Agradecemos o apoio das agências CAPES, CNPq e FAPERJ na realização desta pesquisa.

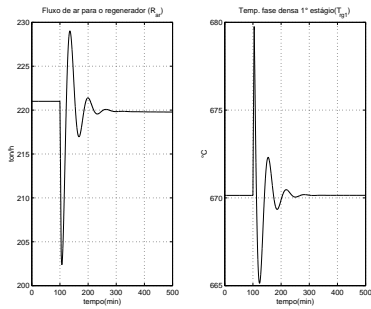


Figura 9. Sinais de entrada e saída  $T_{rg1}$  e  $R_{ar}$

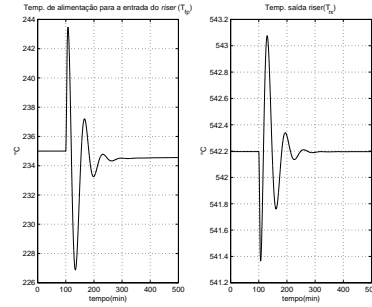


Figura 11. Sinais de entrada e saída  $T_{fp}$  e  $T_{rx}$

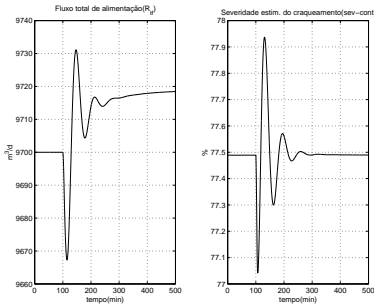


Figura 10. Sinais de entrada e saída  $R_{tf}$  e  $severidade$

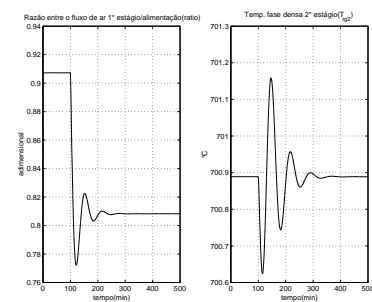


Figura 12. Sinais de entrada e saída razão e  $T_{rg2}$

## 7 Referências

- [1] Kurihara, H., "Optimal control of fluid catalytic cracking processes", Sc.D. Thesis, MIT, 1967.
- [2] Moro, L. F. L. and Odloak, D., "Constrained multivariable catalytic cracking converters", Journal Process Control, Vol. 5, 1, pp. 29-39, 1995.
- [3] Niederlinski, A., "A Heuristic Approach to the Design of Linear Multivariable Interacting Control Systems", Automatica, 7, pp. 691, 1971.
- [4] Souza, R. G., "Análise e controle multivariável de unidades de craqueamento catalítico de leito fluidizado", Tese de mestrado, COPPE/UFRJ, 2001.
- [5] Ogata, K. "Modern Control Engineering", Third edition, Prentice Hall, 1997.
- [6] Morari, M. e Zafriou, E. "Robust Process Control", Prentice Hall, 1989.
- [7] Seborg, D. E., Edgar, T. F. and Mellichamp, D. A., "Process Dynamics and Control, Wiley, 1989.
- [8] McAvoy, T. J., "Connection between Relative Gain and Control Loop Stability and Design", AIChE, vol. 27, 613, pp. 13-619, 1981.

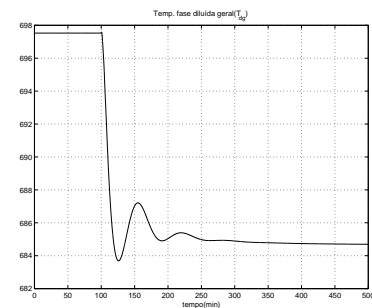


Figura 13. Sinal de saída em aberto  $T_{dg}$

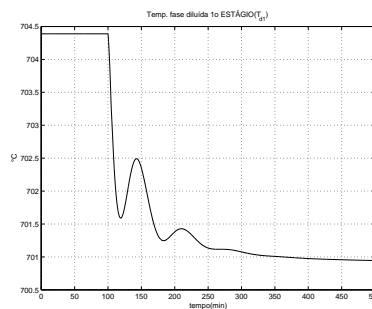


Figura 14. Sinais de saída em aberto  $T_{d1}$

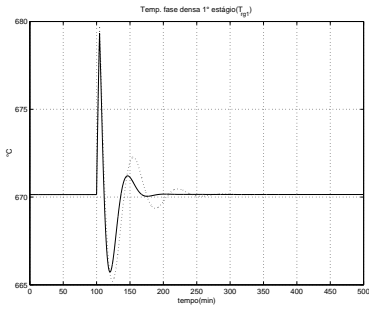


Figura 15. Sinal de saída  $T_{rg1}$  com o *detuning* (—) e anterior ao *detuning*(- - -)

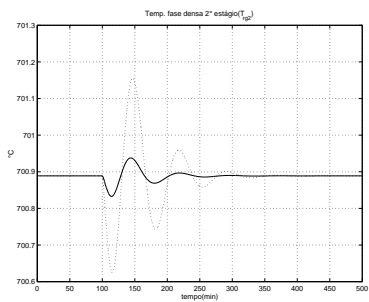


Figura 16. Sinal de saída  $T_{rg2}$  com o *detuning* (—) e anterior ao *detuning*(- - -)

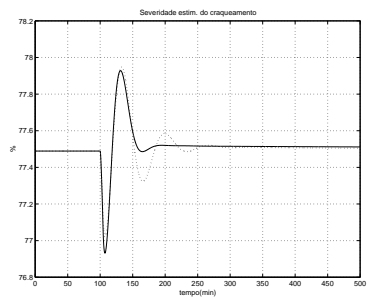


Figura 17. Sinal de saída *sev - cont* com o *detuning* (—) e anterior ao *detuning*(- - -)

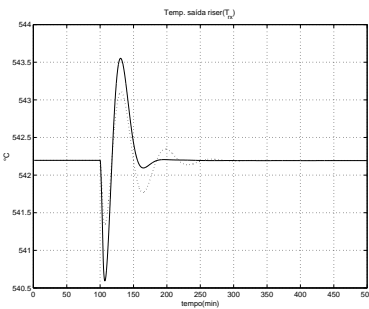


Figura 18. Sinal de saída  $T_{rx}$  com o *detuning* (—) e anterior ao *detuning*(- - -)

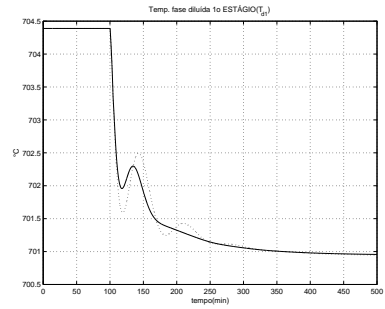


Figura 19. Sinal de saída em aberto  $T_{d1}$  com o *detuning* (—) e anterior ao *detuning*(- - -)

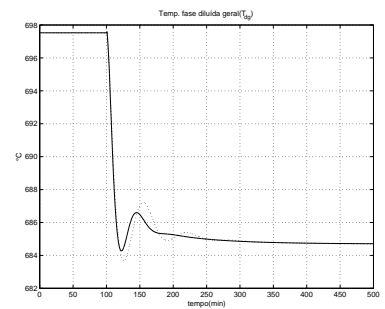


Figura 20. Sinal de saída em aberto  $T_{dg}$  com o *detuning* (—) e anterior ao *detuning*(- - -)