

SINTONIA ÓTIMA DE CONTROLADOR PID EM SISTEMA TITO: APLICAÇÃO EM MODELO DE COMPRESSOR

THIAGO ANTONIO MELO EUZÉBIO*, PÉRICLES REZENDE BARROS*

**Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Campina Grande
Av. Aprígio Veloso, Campina Grande, Paraíba, Brasil*

Emails: thiago.euzebio@ee.ufcg.edu.br, prbarros@dee.ufcg.edu.br

Abstract— This paper presents sequential optimal tuning for PID controllers for TITO systems. The sequential method proposed uses PID tuning based on an optimization problem, in which robustness and performance criteria are considered. The application is done on a simulated model of a Surge and Capacity control loops of an industrial compressor.

Keywords— Feedback Systems, PID Control, Optimization.

Resumo— Neste trabalho é apresentado método de Sintonia PID Ótimo Sequencial para sistemas TITO. O método sequencial proposto utiliza da sintonia de controladores PID baseado em um problema de otimização, no qual critérios de desempenho e robustez são considerados. A aplicação é feita em um modelo simulado de malha de Surto e malha de Capacidade de um compressor industrial.

Palavras-chave— Sistemas realimentados, Controle PID, Otimização.

1 Introdução

A formulação de controle mais utilizada na indústria é a proporcional-integral-derivativa (PID). As principais razões do controle PID ser amplamente utilizado são a sua confiabilidade, estrutura relativamente simples e simplicidade de implementação prática. Muitas abordagens têm sido utilizadas para determinar os parâmetros do controlador PID, a maioria delas formuladas para sistemas de única entrada e única saída (SISO).

Apesar da quantidade grande de métodos de sintonia para sistemas SISO, são frequentemente encontrados na indústria processos em que mais de uma variável deve ser controlada, chamados multivariáveis ou processos de múltipla entrada e múltipla saída (MIMO). É mais difícil projetar controladores PID para um processo MIMO do que para um processo SISO, dado que existe uma interação entre as diferentes malhas de controle de um sistema MIMO de tal modo que afeta o seu desempenho.

Uma forma de projeto de sistema de controle para processos MIMO é a de Controle Descentralizado. O controlador descentralizado é uma matriz diagonal onde cada elemento da diagonal é um controlador SISO. Esses controladores SISO são projetados para cada malha individualmente levando-se em consideração as interações de alguma forma. A sintonia desses controladores pode ser feita de modo sequencial. A ideia clássica do método de projeto sequencial é tratar o problema de projeto do controlador descentralizado para um processo MIMO n por n como uma sequência de n projetos SISO. Neste método as malhas são sintonizadas e fechadas sequencialmente, uma após a outra.

Em virtude do algoritmo de sintonia ser sequencial, o projeto de um sistema de controle multivariável se reduz a vários projetos de malha única. Em princípio, qualquer método de ajuste PID SISO pode ser aplicado. No entanto, durante o procedimento de sintonia sequencial, as dinâmicas combinadas das malhas SISO podem apresentar características muito diferentes da respectiva malha, mesmo sem sofrer efeitos externos. Ao menos, a dinâmica é de ordem mais elevada do que o original. Esta diferença é causada pelo fechamento de um subconjunto de malhas. A dinâmica combinada pode ser oscilatória, de fase não mínima, ou de ordem mais alta, ainda que as dinâmicas de todos os elementos da matriz de transferência sejam superamortecido, de fase mínima, e de ordem baixa. Isto é, um método prático de sintonia de malha SISO, se aplicada para sistemas multivariáveis, deve ser capaz de lidar com uma grande variedade de dinâmicas.

No projeto sequencial proposto nesse trabalho, o método de sintonia PID é baseado em um problema de otimização. Neste método, três critérios de desempenho e robustez são considerados. Os parâmetros que minimizam a função de custo são os três ganhos do controlador PID: K_p , K_i , e K_d , além da constante de tempo do filtro derivativo: T_f . O objetivo é o de minimizar a ação de perturbação de carga no processo multivariável. Isso é realizado sob restrições que garantam tanto a estabilidade do sistema quanto limites na atividade de controle. O procedimento sequencial é realizado iterativamente até que todos os parâmetros computados para o controlador PID convirjam.

2 O Método de Sintonia Sequencial em um Sistema TITO

Nesta seção, apresenta-se a metodologia utilizada no projeto sequencial de controladores PID em um processo multivariável. Para isso, considera-se o caso particular da aplicação do método sequencial para processos de duas entradas e duas saídas (TITO). Na Figura 1 tem-se o diagrama de blocos que representa um processo TITO. Admite-se que os modelos das quatro funções de transferência, G_{11} , G_{12} , G_{21} , e G_{22} , que caracterizam o processo são conhecidos.

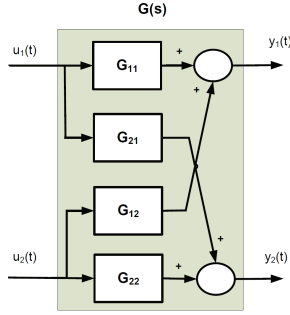


Figura 1: Processo TITO

Deseja-se projetar um controlador descentralizado

$$\mathbf{C}(s) = \begin{bmatrix} C_1(s) & 0 \\ 0 & C_2(s) \end{bmatrix},$$

para controlar

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix},$$

isto sob o procedimento do projeto sequencial. A formulação PID assumida para cada controlador da diagonal principal de $\mathbf{C}(s)$ é definida como:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1 + sT_f} \right). \quad (1)$$

Inicialmente, apenas com a estimativa de G_{11} projeta-se o controlador C_1 utilizando-se alguma técnica de projeto de controlador PID para processos SISO. Ao se aplicar o controlador C_1 ao sistema TITO, passa-se a ter o sistema representado na Figura 2.

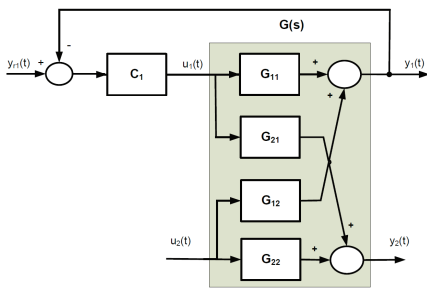


Figura 2: Processo TITO com a malha 1 fechada

Uma vez que C_1 é incorporado ao sistema, a função de transferência entre u_2 e y_2 não é mais

G_{22} . Neste novo cenário, na qual a malha 1 é fechada, tem-se que a dinâmica resultante entre a entrada u_2 e a saída y_2 é representada por:

$$Q_{22} = G_{22} - \frac{G_{21}C_1G_{12}}{1 + G_{11}C_1} \quad (2)$$

Em Q_{22} (2), a dinâmica resultante da malha 2 é a função de transferência direta G_{22} menos um fator que depende das funções de transferência cruzadas G_{21} e G_{12} e da malha fechada 1, representada por G_{11} e C_1 . Assume-se que todas as estimativas dessas funções de transferência são conhecidas. Observe que, desta forma, não há necessidade de se aplicar o controlador C_1 de fato no sistema e criar um procedimento de identificação intermediário para se obter a dinâmica do processo entre u_2 e a saída y_2 com a malha 1 fechada.

A interação entre as malhas é levada em consideração em Q_{22} . Portanto, a partir desta função de transferência, projeta-se o controlador C_2 utilizando-se uma técnica de projeto SISO. Uma vez fechada a malha 2 com o controlador C_2 projetado, tem-se o sistema resultante apresentado na Figura 3.

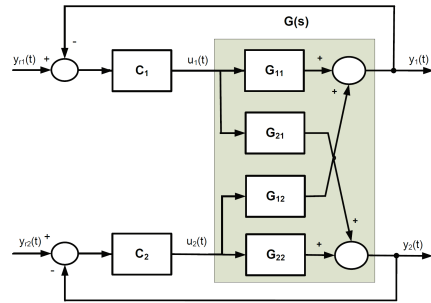


Figura 3: Processo TITO com controlador descentralizado

Agora com a malha 2 fechada, a dinâmica resultante da entrada u_1 para a saída y_1 não é mais G_{11} como no início do projeto sequencial. Essa dinâmica resultante é representada por Q_{11} :

$$Q_{11} = G_{11} - \frac{G_{12}C_2G_{21}}{1 + G_{22}C_2} \quad (3)$$

Desse modo, quando a malha 2 é fechada, a relação entrada-saída de $u_1 - y_1$ é modificada em relação à função de transferência G_{11} . O segundo fator do lado direito de Q_{11} (3) representa uma medida da interação em malha fechada e a mudança na dinâmica para a qual o controlador C_1 foi originalmente projetado. Portanto, o controlador C_1 é reprojetoado, agora baseado em Q_{11} .

A cada nova modificação nos parâmetros do controlador, muda-se também a dinâmica da respectiva malha. Sendo assim, o método sequencial proposto prossegue os reprojetoos dos controladores C_1 e C_2 até que os respectivos parâmetros de controle convirjam.

3 Método de Sintonia Ótima para processos SISO

Neste trabalho optou-se por utilizar do método de sintonia de PID para sistemas SISO desenvolvido em (Kristiansson, 2003). Este método de sintonia utiliza-se de um problema de otimização para obter os parâmetros ótimos do controlador PID. Dentre os motivos de se escolher este método está a liberdade de utilizar modelo do processo de qualquer ordem, sem ser necessário haver redução de modelo. Além disso, o método considera no problema ótimos critérios de desempenho, robustez e da ação de controle, os quais são detalhados nesta seção.

3.1 Formulação do Problema SISO

Considere o sistema SISO representado na Figura 4, onde a planta $G(s)$ é controlada pelo controlador $C(s)$. Existem três entradas, o sinal de referência $r(t)$, o distúrbio do processo $v(t)$ e o ruído de medição $w(t)$. Os sinais de saída são a variável do processo $y(t)$, o sinal de controle $u(t)$ e o erro de controle $e(t) = r(t) - y(t)$.

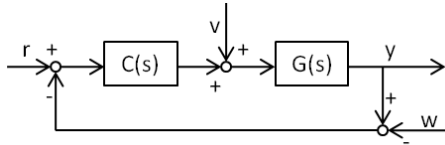


Figura 4: Sistema de controle SISO em malha fechada. A planta $G(s)$ e controlador $C(s)$.

É introduzida ainda a função ganho de malha $L(s) = G(s)C(s)$ e as quatro funções sensibilidade:

Função Sensibilidade

$$S(s) = \frac{1}{1 + L(s)},$$

Função Sensibilidade Complementar

$$T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)},$$

Função Sensibilidade ao Distúrbio

$$S_v = G(s)S(s) = \frac{G(s)}{1 + L(s)},$$

Função Sensibilidade de Controle

$$S_u = K(s)S(s) = \frac{K(s)}{1 + L(s)}.$$

Todas as relações entre sinais de entrada e sinais de saída podem ser formuladas pelas quatro funções sensibilidade. A partir destas relações entre entrada e saída é que são definidos os critérios de projeto para a técnica de sintonia ótima.

3.2 Critério de Desempenho

O Critério de Desempenho utilizado corresponde a uma medição da capacidade do sistema em lidar com distúrbios de carga de baixa frequência. Esse critério é uma alternativa no domínio da frequência ao critério baseado em alguma função do erro como, por exemplo, $IAE = \int_0^\infty |e(t)|dt$, (Astrom and Haggglund, 1995). A formulação do critério utiliza a propriedade da função de transferência entre a saída do sistema em malha fechada e a entrada do processo. Sua definição é dada por:

$$J_v = \left\| \frac{1}{s} S_v \right\|_\infty. \quad (4)$$

Nas regiões de baixa frequência, quando existe ação integral no controlador, $L(s) = G(s)K(s) \gg 1$ e por isso:

$$\frac{G(s)}{1 + G(s)C(s)} \approx \frac{1}{C(s)} \approx \frac{s}{K_i},$$

onde $K_i = K/T_i$ é o ganho integral do controlador PID. Portanto, em baixas frequências, $J_v \approx \frac{1}{K_i}$, neste resultado mostra-se que o critério de desempenho é praticamente independente do modelo do processo. Resultado semelhante é obtido em (Astrom and Haggglund, 2006) para a integral do erro absoluto, desse modo, uma minimização em J_v implica também em uma redução do IAE.

3.3 Critério de Robustez

Nas frequências médias, a margem de fase e a margem de ganho são medidas clássicas de robustez. Entretanto, a restrição do máximo da função sensibilidade

$$\|S\|_\infty = \max_\omega |S(j\omega)| \leq M_S \quad (5)$$

tem sido aceita como uma medida de robustez exclusiva (Panagopoulos et al., 2002). A grandeza M_S é o inverso da menor distância da curva de Nyquist da função ganho de malha ao ponto crítico $(-1, 0)$.

Quando há demandas de um amortecimento maior na resposta ao degrau ou aumento da margem de fase sem haver uma desaceleração na resposta do sistema, é adicionada a restrição na função sensibilidade complementar (Kristiansson and Lennartson, 2006a):

$$\|T\|_\infty = \max_\omega |T(j\omega)| \leq M_T. \quad (6)$$

Para abranger as duas especificações em (5) e (6), é definido o critério da sensibilidade máxima generalizada GM_S . A formulação deste critério é dada por:

$$GM_S = \max(\|S\|_\infty, \alpha \|T\|_\infty). \quad (7)$$

O parâmetro α é igual a M_S/M_T , deste modo o critério GM_S converte a medição em (6) ao nível correspondente de M_S .

3.4 Critério da Ação de Controle

Uma consequência inevitável da malha fechada é a realimentação dos ruídos de medição no sistema, representados pelo sinal $w(t)$ na Figura 4. Estes ruídos são normalmente de alta frequência, tal que geram ações de controle indesejadas e variações na variável de processo. Os efeitos do ruído de medição são capturados pela função de transferência entre o ruído de medição e o sinal de controle, S_u . Portanto, utiliza-se do seguinte critério de custo:

$$J_u = \|S_u\|_\infty = \|K(s)S(s)\|_\infty \quad (8)$$

Nos casos em que o máximo de $|K(j\omega)S(j\omega)|$ ocorre em altas frequências, uma restrição em $|K(j\omega)S(j\omega)|$ implicitamente resulta em uma restrição em $|T|$, já que $|T(j\omega)| = |G(j\omega)||K(j\omega)S(j\omega)|$. Esta é uma restrição da região de média para alta frequência, uma vez que o pico em $|S_u|$ ocorre logo após a largura de banda (Kristiansson, 2003).

3.5 Procedimento de Otimização

O objetivo no problema de otimização é o de computar os parâmetros do controlador PID tal que minimize os efeitos de perturbação de carga. Isto é feito sob a minimização do critério de desempenho J_v . Esta minimização é realizada sob restrições de robustez e de limitação na ação de controle. Dessa forma, as restrições feitas no problema de otimização são impostas sob os critérios GM_S e J_u . Portanto, o problema de otimização pode ser descrito como:

$$\min_{\rho} J_v(\rho), \quad GM_S(\rho) \leq \lambda_1, \quad J_u(\rho) \leq \lambda_2, \quad (9)$$

onde, o vetor ρ é preenchido pelos parâmetros do controlador PID, e λ_1 e λ_2 são constantes. A formulação do PID nesse caso é aquela chamada de formulação de Bode:

$$C(s) = k_i \frac{1 + 2\zeta\tau s + (\tau s)^2}{s(1 + s\tau/\beta)}. \quad (10)$$

Essa formulação é a escolhida para evitar o aparecimento de zeros complexos na solução ótima (Kristiansson and Lennartson, 2006b). Dessa forma, os parâmetros resultantes do PID são o amortecimento ζ e constante de tempo τ dos zeros do controlador, o ganho integral k_i , e a variável $\beta = k_\infty/(\tau k_i)$, onde k_∞ é o ganho do controlador em alta frequência. O vetor ρ é definido, portanto, como:

$$\rho = [k_i \quad \tau \quad \zeta \quad \beta]. \quad (11)$$

A tradução destes parâmetros do controlador PID na formulação de Bode em (10) para os parâmetros da formulação padrão PID em (1) é dada por:

$$\begin{aligned} T_f &= \frac{\tau}{\beta}, \\ T_i &= \frac{\tau}{\beta} (2\zeta\beta - 1), \\ T_d &= \frac{\tau}{\beta} \left(\frac{\beta^2}{2\zeta\beta - 1} - 1 \right), \\ K &= k_i \frac{\tau}{\beta} (2\zeta\beta - 1). \end{aligned}$$

3.6 Sintonia por Regras

Ao se aplicar o método de otimização apresentado nesta seção a um conjunto de processos estáveis e não oscilatórios, chega-se a alguns conjunto de regras de sintonia para o controle PID (Kristiansson and Lennartson, 2006b). Essas regras de sintonia são baseadas em informações do processo na frequência cuja fase é de 150° . Para tanto é definido o parâmetro κ que, para processos estáveis, este parâmetro é definido como:

$$\kappa = \frac{|G(j\omega_{150})|}{G(0)}. \quad (12)$$

Para plantas não oscilatórias e de pelo menos segunda ordem, é utilizado o seguinte conjunto de regras de sintonia:

$$\begin{aligned} \zeta &= 0,75, \\ \frac{1}{\tau} &= \omega_{150} (0,44 + 0,86\kappa_{150}), \\ k_\infty &= \frac{1}{G(0)} \min \left(3 + \frac{2}{\kappa_{150}}, 25 \right), \\ k_i &= \frac{\omega_{150}}{G(0)} \left(\frac{0,45}{\kappa_{150} + 0,07} - 0,1 \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Apesar da simplicidade do uso destas regras fechadas, o projetista perde a liberdade de estabelecer valores aos critérios de desempenho disponíveis no problema de otimização. Desse modo, para a aplicação sequencial sugerida neste trabalho, optou-se por utilizar o problema de otimização apresentado em (9). As regras apresentadas em (13) serão utilizadas para se comparar com o desempenho da sintonia sequencial proposta.

4 Aplicação ao Modelo do Compressor

4.1 O Processo

O processo TITO escolhido para se aplicar o método de sintonia sequencial proposto neste artigo é o de um Compressor Industrial. As duas malhas de controle a serem sintonizadas são a de controle de Surge e a de controle de Capacidade.

A malha de Surge, impede que o compressor opere com vazão inferior a um certo valor mínimo (ponto de controle) escolhido acima daquele em que ocorre a instabilidade chamada de Surge. A forma de atuação do controlador é a de recircular ou aliviar para atmosfera a vazão excedente quando a demanda for inferior ao valor mínimo

correspondente ao setpoint do controle de Surge. Desse modo, fica claro o acoplamento desta malha à malha dita de Capacidade, a qual atua nas condições operacionais de um compressor para que este mantenha a vazão pela máquina ou a pressão de descarga constantes.

Os modelos que representam o processo são aqueles obtidos no trabalho de identificação em (Campos and Teixeira, 2006). Todas as funções de transferência são de segunda ordem:

$$\mathbf{G}(s) = \begin{pmatrix} \frac{-1,87}{48,5s^2+8,96s+1} & \frac{0,21}{12s^2+4,86s+1} \\ \frac{1,59}{10,1s^2+2,22s+1} & \frac{0,66}{5s^2+7,21s+1} \end{pmatrix} \quad (14)$$

4.2 O Projeto Sequencial para o Compressor

No projeto sequencial de sintonia dos controladores PID para o modelo TITO do compressor, optou-se por fazer primeiro a sintonia do controlador PID da malha 1. O método de sintonia SISO usado é aquele apresentado no problema de otimização em (9). Inicialmente, o modelo do processo que servirá de base para a sintonia de C_1 é o G_{11} .

O problema de otimização apresentado em (9) tem por objetivo minimizar a função de custo J_v sob restrições nos critérios GM_S e J_u . Para critério de robustez GM_S , os valores de $M_S = 1,7$ e $M_T = 1,3$ foram os estabelecidos. Já o valor de limite J_u deve ser escolhido a depender do quão agressiva se deseja a malha de controle. Quanto maior o valor de J_u , maior a agressividade da ação de controle e, por isso, menor a robustez do sistema. Na Figura 5 é apresentado a curva de J_v em função de J_u para o processo G_{11} .

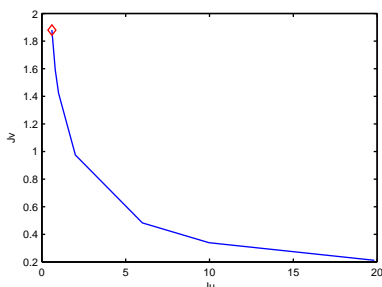


Figura 5: Gráfico de J_v versus J_u para a função de transferência $G_{11} = \frac{-1,87}{48,5s^2+8,96s+1}$

A cada iteração do método sequencial é feito o estudo de J_v versus J_u para o respectivo processo utilizado no problema de otimização. Nesse trabalho, definiu-se que para a Malha de Capacidade, os valores de J_u seriam baixos e, por isso, espera-se uma malha 1 de ação mais lenta. Por outro lado, na malha de Surge, devido à sua necessidade de resposta rápida, estabeleceu-se valores altos para J_u , tal que a malha 2 resultante tenha ação de controle mais agressiva.

Na Tabela 1, é apresentado o resultado de sintonia para cada iteração do método sequencial proposto. Alternadamente, os controladores C_1 e

C_2 são reprojatados em cada iteração, até o momento em que seus respectivos parâmetros converjam. Os valores dos parâmetros do PID são aqueles da formulação de Bode.

Tabela 1: Parâmetros do Controlador PID para cada Iteração do Método Sequencial

Iter.	Modelo	Contr.	k_i	τ	ζ	β
1	G_{11}	C_1	-0,06	6,37	0,71	1,56
2	Q_{22}	C_2	0,87	1,64	2,92	7,04
3	Q_{11}	C_1	-0,09	3,67	0,67	3,17
4	Q_{22}	C_2	1,18	1,26	2,70	6,74
5	Q_{11}	C_1	-0,10	3,52	0,59	3,00
6	Q_{22}	C_2	1,18	1,26	2,70	6,74
7	Q_{11}	C_1	-0,10	3,52	0,59	3,00

Para se fazer um comparativo, é também obtida a sintonia de C_1 e C_2 de acordo com as regras de sintonia em 13. Neste caso o procedimento não é sequencial e os modelos do processo necessários são apenas G_{11} e G_{22} . Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros do Controlador PID para Sintonia por Regras

Proj.	Modelo	Contr.	k_i	τ	ζ	β
1	G_{11}	C_1	-0,39	4,70	0,75	4,78
2	G_{22}	C_2	17,66	0,84	0,75	2,55

4.3 Resultados

Os controladores finais obtidos nas Tabelas 1 e 2 foram aplicados ao modelo do sistema compressor. Nesta simulação, aplicou-se em tempos distintos uma variação em degrau unitário na referência tanto da malha de Surge quanto da malha de Capacidade. Desse modo é possível verificar o comportamento da respectiva malha para esta variação de ponto de operação, assim como a reação para tal mudança da malha acoplada. É aplicado ainda distúrbios externos, também em degrau unitário, tanto na entrada do processo da malha 1 quanto na entrada do processo da malha 2.

Na Figura 6, tem-se o comportamento da saída da malha de Surge, representada pela saída do processo e pela sua respectiva ação de controle. Observa-se que na mudança do ponto de operação da malha de Surge no instante 150 a ação de controle exigida pela sintonia baseada em regras é quatro vezes maior que a ação de controle do PID Ótimo Sequencial. Além disso, a reação é oscilatória da malha de Surge a uma mudança na operação na malha de Capacidade quando a sintonia usada é baseada em Regras.

Do mesmo modo, nota-se na Figura 7 que o comportamento da malha de Capacidade com a sintonia Ótima Sequencial é mais suave que aquela obtida com a sintonia por Regras. No entanto,

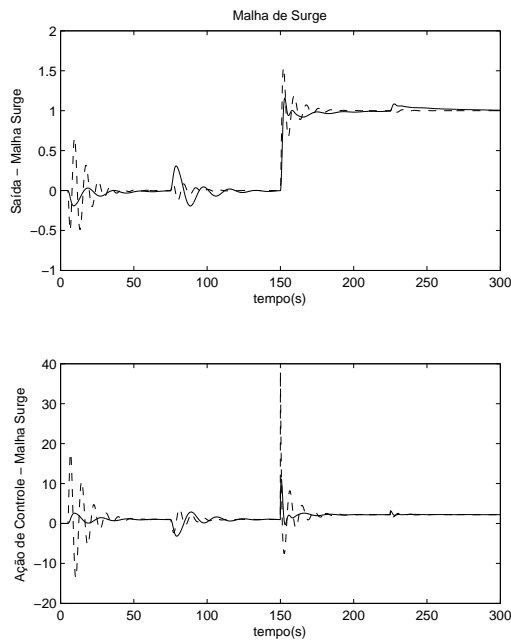


Figura 6: Comportamento da malha de Surge. Controlador PID Ótimo Sequencial (contínua) e Controlador PID sintonizado por Regras (tracejada)

fica também evidente que a ação mais agressiva do controle é vantajosa quando o distúrbio aplicado é externo, o que acontece no instante 75 na malha 1 e no instante 225 na malha 2.

5 Conclusão

Neste trabalho foi proposta a aplicação de sintonia ótima de controle PID de forma sequencial a um sistema TITO. Dentre as vantagens de se utilizar da sintonia ótima para PID, estão a possibilidade de se trabalhar com modelos de processo de ordem elevada, assim como uso de critérios de desempenho e robustez de acordo com as características do processo. Estas vantagens mostraram-se interessantes na aplicação para o Compressor Industrial como visto nos resultados. A incorporação da sintonia ótima ao método sequencial não depende de identificação do sistema a cada iteração, dado que o problema ótimo se utiliza das funções de transferência Q_{11} e Q_{22} apresentadas. Por outro lado, a necessidade de se fazer um estudo entre os critérios de desempenho J_v e da ação de controle J_u a cada iteração do sequencial impede uma maior automatização desse procedimento de sintonia.

Referências

Astrom, K. and Hagglund, T. (1995). *PID Controllers: theory, design and tuning*, ISA - Ins-

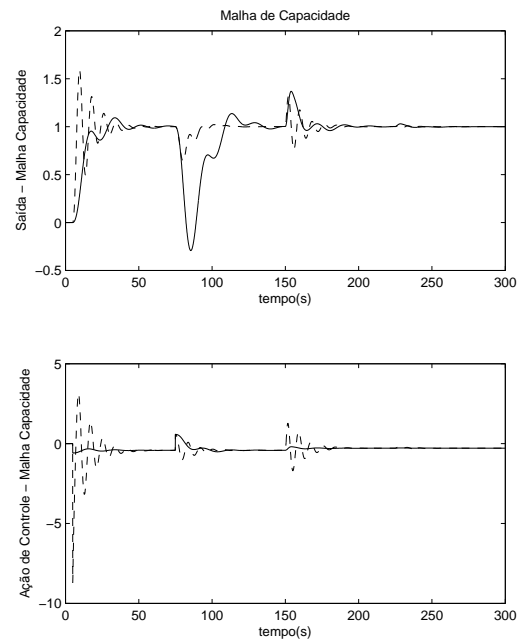


Figura 7: Comportamento da malha de Capacidade. Controlador PID Ótimo Sequencial (contínua) e Controlador PID sintonizado por Regras (tracejada)

trument Society of America, North Carolina.

Astrom, K. and Hagglund, T. (2006). *Advanced PID Control*, ISA - Instrument Society of America, North Carolina.

Campos, M. and Teixeira, H. (2006). *Controles Típicos de equipamentos e processos industriais*, Editora Edgard Blucher LTDA.

Kristiansson, B. (2003). *PID Controllers, design and evaluation*, PhD Thesis, Control and Automation Laboratory, Department of Signals and Systems, Chalmers University of Technology.

Kristiansson, B. and Lennartson, B. (2006a). Evaluation and simple tuning of pid controllers with high-frequency robustness, *Journal of Process Control* **16**: 91–102.

Kristiansson, B. and Lennartson, B. (2006b). Robust tuning of pi and pid controllers using derivative action despite sensor noise, *IEEE Control Systems Magazine* pp. 55–69.

Panagopoulos, H., Astrom, K. and Hagglund, T. (2002). Design of PID controllers based on constrained optimization, *IEE Proceedings Control theory and Applications* **149(1)**: 32–40.