

Análise da Eficiência de Desacopladores e Técnicas de Projeto de Controladores PI SISO para Processos de Moagem

Grazielle Amanda do Carmo Café
Orientador: Prof. Dr. Márcio Braga

Universidade Federal de Ouro Preto

Setembro de 2021

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Processo de Moagem na Mineração
- 3 Desacopladores e Estratégias de Controle Multivariável
- 4 Simulação e Resultados
- 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

- Moagem;
- Modelos MIMO e SISO;
- Controladores PI SISO.

❶ **Objetivo geral:**

- O objetivo principal deste projeto é avaliar o desempenho de desacopladores e de técnicas de controle clássicas para sistemas de moagem.

❷ **Objetivos secundários:**

- ❶ A avaliação do desempenho dos sistemas de controle projetados por meio de índices de desempenho clássicos;
- ❷ A verificação das melhorias introduzidas por cada conjunto de desacoplador e controlador.

- Grau de automação na indústria de processamento mineral;
- Aumento da estabilidade, redução dos gastos energéticos, melhora no aumento da velocidade de resposta de sistema, maximização das taxas de produção e redução dos desperdícios da matéria-prima;
- Experiência e dificuldade de operações.

Perguntas dessa Pesquisa

- 1 Qual o desempenho de desacopladores em sistemas MIMO de moagem? Eles são capazes de desacoplar o sistema?
- 2 Quais os fatores que impediram o sucesso do desacoplamento?
- 3 Após o desacoplamento, foi possível obter uma resposta satisfatória a partir das sintonias de controle PID? Qual o melhor método utilizado?
- 4 Com a aplicação da metodologia apresentada, é possível reduzir o consumo de energia gasto em um processo de moagem?

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Processo de Moagem na Mineração**
- 3 Desacopladores e Estratégias de Controle Multivariável
- 4 Simulação e Resultados
- 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Processo de Moagem

- Atividade econômica essencial ao desenvolvimento do país;
- Processo de moagem: etapa mais crítica na etapa de produção;
- Controle do circuito de moagem: sistema multivariável, não linear, forte acoplamento entre variáveis e diferentes atrasos de tempo.

Processo de Moagem descrito por Reis (2018)

O trabalho de dissertação do Reis (2018), trata-se sobre a aplicação de Controle Preditivo por Modelo (MPC) em um circuito de remoagem com o objetivo de melhorar seu controle de granulometria. Para o estudo, uma linha do circuito industrial de remoagem da Samarco foi utilizada.

$$\begin{bmatrix} \Delta PS \\ \Delta CC \\ \Delta GPF \\ \Delta NCM \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0,032}{(2,307s+1)(2,307s+1)} e^{-3s} & \frac{-0,467}{25,385s+1} e^{-3s} \\ \frac{-0,089}{27,692s+1} e^{-9s} & \frac{-0,003}{4,615s+1} e^{-95s} \\ \frac{0,018}{(33,058s+1)(8,48s+1)} e^{-3s} & \frac{0,156}{36,923s+1} e^{-15s} \\ \frac{1,935}{(142,76s+1)(51,083s+1)} e^{-3s} & \frac{0,044}{(128,918s+1)(39,543s+1)} e^{-54s} \\ \frac{-0,041}{(41,011s+1)(5,143s+1)} e^{-6s} & \frac{0,172}{39,231s+1} e^{-3s} \\ \frac{-0,038}{(28,049s+1)(1,951s+1)} e^{-3s} & \frac{0,927}{23,077s+1} e^{-3s} \\ \frac{-0,017}{(32,354s+1)(9,185s+1)} e^{-15s} & \frac{0,156}{27,692s+1} e^{-15s} \\ \frac{0,396}{(132,864s+1)(56,367s+1)} e^{-15s} & \frac{-1,265}{(127,877s+1)(61,354s+1)} e^{-15s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta SIC004 \\ \Delta FIC013 \\ \Delta LIC001 \\ \Delta SIC001 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sumário

- 1 Introdução
- 2 Processo de Moagem na Mineração
- 3 Desacopladores e Estratégias de Controle Multivariável**
- 4 Simulação e Resultados
- 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Projeto dos Desacopladores

- **Objetivo:** reduzir as interações do circuito de controle;
- **Resultado:** Mudança do ponto de ajuste para uma variável controlada tem pouco ou nenhum efeito nas outras variáveis controladas.

O desacoplador deve ser projetado de tal forma que o sistema resultante $H(s) = G(s)D(s)$ seja diagonal (dominante).

$$H(s) = G(s)D(s) = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & 0 \\ 0 & H_{22}(s) \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} H_{11}(s) & 0 \\ 0 & H_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Desacoplador Estático

- Desacoplador mais simples;
- São consideradas somente as interações em regime permanente;
- Leva em conta somente os ganhos das funções de transferência do sistema (o equivalente a se fazer $s = 0$).

$$D = G(0)^{-1} \quad (3)$$

Controladores PID

- Desempenha um bom desempenho em uma vasta gama de condições de operação;
- Fácil ajuste dos parâmetros para obtenção de um bom desempenho.

O modelo matemático do controlador PID, conforme padrão ISA é dado por

$$u(t) = K_C \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4)$$

com função de transferência dada por

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (5)$$

Regras de Sintonia

- 1 O sistema de malha fechada deve ser estável;
- 2 Os efeitos das perturbações são minimizados, desde que ocorra uma boa rejeição da perturbação;
- 3 Comportamento servo satisfatório: respostas rápidas e suaves às mudanças de *setpoint* são obtidas, ou seja, um bom seguimento do *setpoint*;
- 4 O erro do estado estacionário (*offset*) é eliminado;
- 5 Robustez: o controlador deve ser insensível a mudanças nas condições do processo e a erros no modelo assumido do processo.

Método do Modelo Interno (IMC)

- É baseado em modelos de processo, por exemplo

$$\frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (6)$$

- Pode ser utilizado para especificar as definições do controlador antes de o sistema ser instalado;
- A sintonia envolve definir o principal parâmetro do método IMC (τ_c);
- Escolhas possíveis para o valor de τ_c
 - 1 $\tau_c/\theta > 0.8$ e $\tau_c > 0.1\tau$ (Rivera et al., 1986);
 - 2 $\tau > \tau_c > \theta$ (Chien and Fruehauf, 1990);
 - 3 $\tau_c = \theta$ (Skogestad, 2003).

Sumário

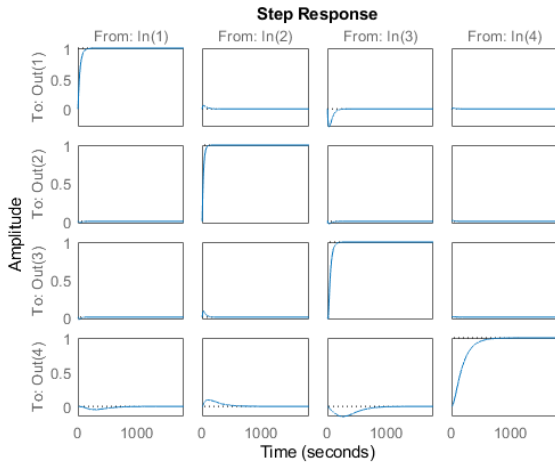
- 1 Introdução
- 2 Processo de Moagem na Mineração
- 3 Desacopladores e Estratégias de Controle Multivariável
- 4 Simulação e Resultados**
- 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Avaliação do desacoplador estático para o modelo

Resultado obtido:

$$D(s) = \begin{bmatrix} 2.0493 & -0.8629 & 6.0088 & 0.3873 \\ -1.1545 & -0.3142 & 2.9546 & -0.0228 \\ -10.6652 & 8.5488 & -32.0073 & 0.8673 \\ -0.2442 & 1.3453 & -0.7256 & 0.0727 \end{bmatrix}.$$

Figura 1: Desacoplador estático para o modelo de Reis (2018)



Controle com Desacoplador Estático via IMC

Figura 2: Simulação através do Simulink do projeto controlador - desacoplador para o modelo de Reis (2018).

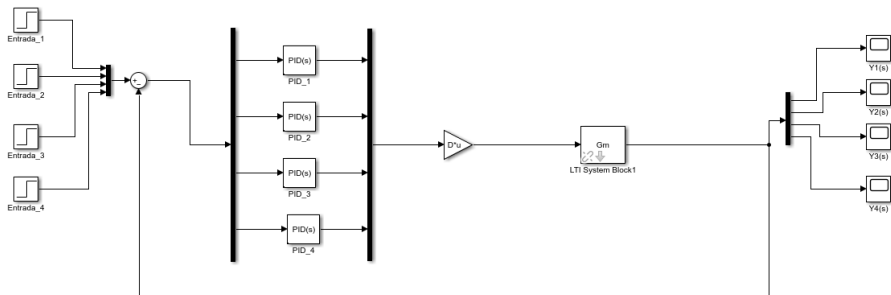


Figura 3: Saída obtida através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC (a) $Y_1(s)$ (b) $Y_2(s)$

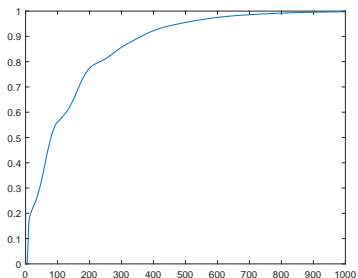
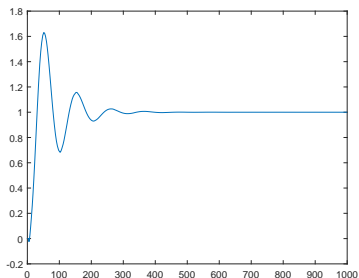
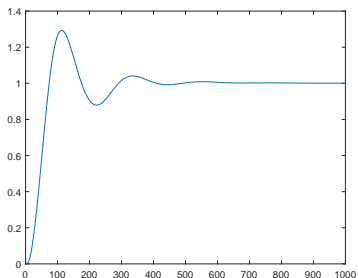
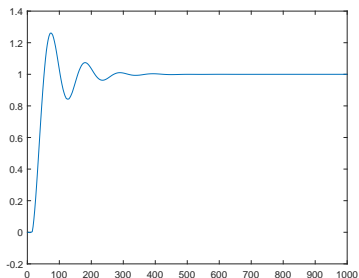
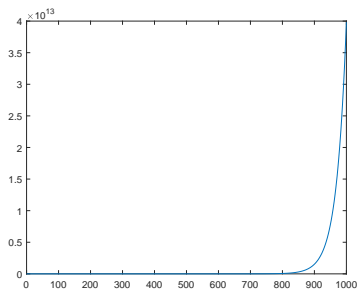
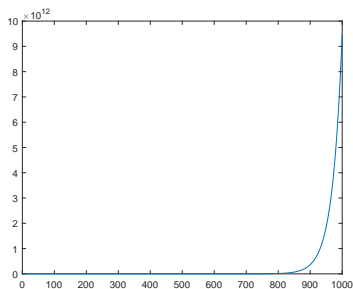


Figura 4: Saída obtida através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC (a) $Y_3(s)$ (b) $Y_4(s)$



Controle sem desacoplador através através da Sintonia IMC para o modelo de Reis (2018).

Figura 5: Resposta ao degrau unitário para a saída (a) $Y_1(s)$ (b) $Y_2(s)$ sem desacoplador



Sumário

- 1 Introdução
- 2 Processo de Moagem na Mineração
- 3 Desacopladores e Estratégias de Controle Multivariável
- 4 Simulação e Resultados
- 5 Conclusão e Trabalhos Futuros**

- 1 Qual o desempenho de desacopladores em sistemas MIMO de moagem? Eles são capazes de desacoplar o sistema?
- 2 Após o desacoplamento, foi possível obter uma resposta satisfatória a partir das sintonias de controle PID?
- 3 Com a aplicação da metodologia apresentada, é possível reduzir o consumo de energia gasto em um processo de moagem?

- Desenvolvimento da aplicação dos demais desacopladores aos modelos em estudo;
- Articulação e compreensão sobre métodos de desenvolvimento com o intuito de obter uma resposta satisfatória em sistemas com atrasos e funções integradoras;
- Pesquisa criteriosa sobre o desacoplador aproximado na frequência;
- Aplicação de demais técnicas de sintonia de controle nos modelos a fim de comparar suas respostas;
- Estudo e implementação do trabalho de Craig (1995).