



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

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

Grazielle Amanda do Carmo Café

João Monlevade, MG

2021

Grazielle Amanda do Carmo Café

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

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como pré-requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga

Universidade Federal de Ouro Preto

João Monlevade

2021

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por toda a proteção e cuidado durante todo esse tempo na Graduação, me mostrando que sou capaz, em meu tempo e que posso realizar meus sonhos com dedicação, força, coragem e tranquilidade.

Agradeço aos meus pais, José Geraldo Café e Kátia Aparecida do Carmo Café, por todo cuidado, afeto, ensinamentos, colo e a permissão e possibilidade de tantas experiências incríveis na vida, que me fizeram tornar a mulher que sou hoje.

A minha irmã, Isabelle Café, por todo companheirismo, puxões de orelha para não desistir, por ter ido na frente nos aspectos à graduação e por ter me mostrado que mesmo não sendo fácil, caminhando juntas, podemos ir mais longe. Foi aquela que me incentivou, me deu oportunidade nas realizações de cursos para meu aprimoramento na área de atuação e que eu considero como uma grande amiga.

A minha Tia Dé, que mesmo distante esteve presente com suas orações, mensagens e aquele abraço apertado toda vez que nos vemos. Minha segunda mãe de coração, seus pedidos de benção sempre iluminaram meu caminho.

Ao Ramon, grande amor e amigo que me inspira, me faz sentir capaz de ir além e que sempre cuida de mim em cada detalhe. Obrigada por cada post-it pregado na parede, lembrando do amor que você tem por mim e por me lembrar de acreditar em mim mesma.

Ao meu professor e orientador Márcio que sempre foi uma inspiração na área acadêmica, e que sinto um privilégio em poder ter participado de projetos, Iniciação Científica e agora por fim, este Trabalho de Conclusão de Curso. Acredito que todos os alunos que passaram por você possui o mesmo sentimento de “meu muito obrigado!”.

Aos amigos que me ajudaram nesta trajetória, me dando apoio, conselhos, ajuda nas horas dos estudos; dos antigos amigos que continuam na minha vida e puderam passar por essa fase importante da minha vida mesmo que distantes me enviando palavras de carinho e amor quando mais precisei.

E aos meus anjinhos da guarda, Jade e Quequinha, minhas cachorrinhas que me fazem rir no dia a dia, que são meus alicerces e meus anjos protetores aqui na Terra.

"Que importa o mal que te atormenta, se o sonho te contenta e pode se realizar."
Cinderela

Resumo

Minas Gerais é o estado que mais possui reservas minerais, sendo de suma importância para a economia do estado diante da extração de minério de ferro. A mineração caracteriza a atual configuração da sociedade em que vivemos, dado que diversos produtos são provenientes dessa atividade. Sobretudo, é uma atividade de alto valor energético e a área de controle sugere estudos e pesquisas no ramo, para melhor compreensão de como pode ser realizada a otimização das variáveis de interesse a fim de entregar um produto de qualidade, garantindo estabilidade do processo e atendendo a critérios de desempenho definidos pelo projetista.

Uma das etapas que mais consome energia no processo de mineração é a moagem, e seu custo varia de acordo com o tamanho das partículas de minério resultantes do processo de beneficiamento mineral. A dificuldade de implementação de circuitos de controle em processos de moagem está em sua dinâmica complexa, uma vez que o circuito apresenta múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO, do inglês *Multiple Input Multiple Output*), além do forte acoplamento entre as variáveis, atrasos no tempo e sistemas integradores, pontos a serem discutidos ao decorrer deste trabalho. Como alternativa, o uso de controladores SISO (do inglês, *Single Input Single Output*) mostra-se vantajoso, pois são simples e fáceis de sintonizar. No entanto, dadas as características de múltiplas entradas e múltiplas saídas para os modelos de plantas de moagem, é preciso inserir desacopladores ao processo.

Neste trabalho, busca-se investigar o desempenho de diferentes tipos de desacopladores para sistemas MIMO, utilizando como verificação três modelos distintos de tamanhos de matrizes diferentes, de forma a descrever as dificuldades e os fatores determinantes para cada tipo de desacoplador. Além disso, busca-se avaliar a eficiência por meio dos índices de desempenhos e a averiguação entre o conjunto desacoplador - controlador.

Palavras-chave: Controle Clássico, Sistemas MIMO, Desacopladores, PID, Moagem.

Abstract

Minas Gerais is the state that has the largest number of mineral reserves, being of paramount importance for the state's economy due to the extraction of iron ore. Mining characterizes the current configuration of the society we live in, given that several products come from this activity. Above all, it is an activity of high energy value and the control area suggests studies and research in the field, for better understanding of how the optimization of variables of interest can be performed in order to deliver a quality product, ensuring process stability and meeting performance criteria defined by the designer.

One of the stages that consumes more energy in the mining process is grinding, and its cost varies according to the size of the ore particles resulting from the mineral processing. The difficulty of implementing control loops in milling processes lies in their complex dynamics, since the circuit presents multiple inputs and multiple outputs (MIMO), besides the strong coupling between variables, time delays and integrator systems, points that will be discussed throughout this work. As an alternative, the use of SISO (Single Input Single Output) controllers is advantageous, because they are simple and easy to tune. However, given the multiple input and multiple output characteristics of the milling plant models, it is necessary to insert decouplers into the process.

In this paper, it is sought to investigate the performance of different types of decouplers for MIMO systems, using three different models of different matrix sizes as verification, in order to describe the difficulties and determining factors for each type of decoupler. In addition, it is sought to evaluate the efficiency by means of performance indices and the ascertainment between the decoupler-controller set.

Keywords: Classical Control, MIMO Systems, Decouplers, PID, Grinding.

Lista de ilustrações

1	Diagrama típico de tratamento de minério.	7
2	Exemplo de circuito de moagem.	8
3	Circuito de moagem da mina de cobre de Majdanpek (Sérvia).	9
4	Diagrama esquemático do circuito de controle da planta de moagem. . .	10
5	Fluxograma do concentrado 3 da Samarco.	10
6	Diagrama esquemático do controle em cascata aplicado ao circuito de Remoagem.	11
7	Processo de controle SIMO e MIMO.	15
8	Diagrama de blocos para um sistema multiloop 2x2.	17
9	Desacoplador ideal.	19
10	Desacoplador simplificado.	20
11	Desacoplador invertido.	21
12	Estratégias de controle de feedback.	25
13	Desacoplador estático para o modelo de Ivezić e Petrović (2003).	30
14	Modelo em Simulink para a simulação do modelo de Ivezić e Petrović (2003) para os controladores $C_1(s)$ e $C_2(s)$ com sintonia IMC e desacoplador estático.	32
15	Segunda opção para simulação por meio do Simulink do projeto controlador - desacoplador para o modelo de Ivezić e Petrović (2003).	32
16	Saída $Y_1(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC.	33
17	Saída $Y_2(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC.	33
18	Saída $Y_3(s)$ obtido através do controle sem desacoplador pelo método de sintonia IMC.	34
19	Saída $Y_4(s)$ obtido através do controle sem desacoplador pelo método de sintonia IMC.	35
20	Desacoplador estático para o modelo de Reis (2018).	36
21	Simulação por meio do Simulink do projeto controlador - desacoplador para o modelo de Reis (2018).	39
22	Saída $Y_1(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC	39
23	Saída $Y_2(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC	40
24	Saída $Y_3(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC	40

25	Saída $Y_4(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC	41
26	Saída $Y_1(s)$ obtido através do controle sem desacoplador estático pelo método de sintonia IMC	42
27	Saída $Y_2(s)$ obtido através do controle sem desacoplador estático pelo método de sintonia IMC	42
28	Saída $Y_3(s)$ obtido através do controle sem desacoplador estático pelo método de sintonia IMC	43
29	Saída $Y_4(s)$ obtido através do controle sem desacoplador estático pelo método de sintonia IMC	43

Lista de tabelas

1	Efeitos de cada fator no controlador PID.	23
2	Descrição da obtenção dos parâmetros através da Sintonia IMC.	26
3	Descrição da obtenção dos parâmetros pela sintonia SIMC.	27
4	Índices de desempenho para o desacoplador estático para o modelo de Ivezić e Petrović (2003)	30
5	Índices de Desempenho para o Desacoplador Estático para o Modelo de Reis (2018).	36

Lista de Siglas

IAE	Integral of the absolute value of the error
ISE	Integral of the squared error
ITAE	Integral of the time-weighted absolute error
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MV	Variável Manipulada
SISO	Single Input Single Output
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PV	Variável de processo
$G(s)$	Matriz de transferência do sistema
$D(s)$	Matriz de desacoplamento do sistema
$Q(s)$	Matriz do sistema desacoplado
$C(s)$	Matriz de controladores

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo Geral	2
1.2.2	Objetivos Específicos	2
1.3	Justificação e Motivação	2
1.4	Metodologia	3
1.5	Estrutura do Trabalho	4
1.6	Perguntas dessa Pesquisa	4
2	PROCESSO DE MOAGEM NA MINERAÇÃO	5
2.1	Introdução	5
2.2	O Setor de Mineração	5
2.3	Etapas do Beneficiamento Mineral	6
2.4	Circuitos de Moagem	7
2.5	Modelos de Processo de Moagem	8
2.5.1	Processo de Moagem descrito por Ivezić e Petrovic (2003)	8
2.5.2	Processo de Moagem descrito por Craig e MacLeod (1995)	9
2.5.3	Processo de Moagem descrito por Reis (2018)	9
3	DESACOPLADORES E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE MULTI-VARIÁVEL	13
3.1	Controle de Processos	13
3.2	Sistemas de Controle SISO e MIMO	14
3.2.1	Sistemas SISO	14
3.2.2	Sistemas MIMO	14
3.3	Desacopladores	16
3.3.1	Projeto do Desacoplador	17
3.3.2	Desacoplador Ideal	18
3.3.3	Desacoplador Simplificado	19
3.3.4	Desacoplador Invertido	20
3.3.5	Desacoplador Estático	21
3.3.6	Desacoplador Aproximado na Frequência	22
3.4	Controladores PID	22
3.5	Regras de Sintonia	24
3.5.1	Método do Modelo Interno (IMC)	25

3.5.2	Método da Síntese Direta (SIMC)	26
3.6	Índices de Desempenho	27
4	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	29
4.1	Avaliação dos Desacopladores para o modelo de Ivezić e Petrović (2003)	29
4.1.1	Desacoplador Estático	29
4.2	Projeto dos Controladores para o modelo de Ivezić e Petrović (2003)	31
4.2.1	Controle com Desacoplador Estático por meio da Sintonia IMC	31
4.2.2	Controle sem desacoplador através da Sintonia IMC	34
4.3	Avaliação dos Desacopladores para o modelo de Reis (2018)	35
4.3.1	Desacoplador Estático	35
4.4	Projeto dos Controladores para o modelo de Reis (2018)	37
4.4.1	Controle com Desacoplador Estático por meio da Sintonia IMC	37
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45

1 Introdução

1.1 Contextualização

No Brasil, a atividade mineradora é de função potencial nos setores básicos da economia, sendo uma importante fonte de renda. Alguns fatos importantes é que a mineração está diretamente ligada a influência história, atraindo investimentos e retorno financeiro ao país, influência no PIB nacional e contribuição na geração de empregos. A extração mineral corresponde por uma parte fundamental da economia mineira, o que demonstra a importância da atividade no estado, sobretudo do minério de ferro. Dentro da atividade de beneficiamento do minério de ferro, uma das etapas mais críticas de produção e de grande consumo energético é a moagem.

A moagem é a operação de fragmentação fina, resultando em um produto final adequado à concentração ou a outros processos tais como pelletização, calcinação, lixiviação, dentre outros. Segundo Rosa, Oliveira e Donda (2014), a busca por tecnologias energeticamente eficientes para processos de cominuição (como o processo de moagem) é uma constante nos estudos de processo da mineração, uma vez que estes processos representam um grande percentual dos custos operacionais. Como um exemplo, na Samarco, as etapas de moagem representavam aproximadamente 80% do consumo de energia.

Neste ponto, a atuação do controle de processos se torna crucial e ativa na resolução do desempenho e entrega do processo de moagem. Segundo Franchi (2011), o controle de processos refere-se aos métodos utilizados para controlar as variáveis de processo, em que seus objetivos tangenciam a reduzir variabilidade, aumentar eficiência e a segurança dos processos.

O controle do circuito de moagem é desafiador segundo Pereira Jr. e Euzébio (2017), por se tratar de um sistema multivariável, não linear e por se caracterizar pela existência de forte acoplamento entre variáveis e diferentes atrasos de tempo. Alguns trabalhos na literatura apresentam estratégias de controle para os circuitos de moagem, as quais envolvem uma configuração de controladores operando em cascata, empregando técnicas avançadas de controle. Como por exemplo, em Chen et al. (2007) estuda-se o controle preditivo de modelo restrito (MPC), adotado para lidar com sistema de acoplamento forte. Trabalhos como o de Pereira Jr. e Euzébio (2017) envolvem a aplicação de técnicas com lógica *fuzzy* e o trabalho do Castro (2020) estuda o projeto de controladores PI robusto para processos de moagem empregando desigualdades matriciais lineares (LMIs, do inglês *Linear Matriz Inequalities*).

Entretanto, como cita Euzébio (2018) em seus estudos, testes de controladores

avancados em uma planta de processamento de minerais podem ser complexos e caros e gerar instabilidade de processo. Com isso, os estudos de controladores PID tornam-se importantes na pesquisa por serem simples e de fácil ajuste, sendo bem aproveitados na indústria. Entretanto, para o uso de controladores PI SISO em plantas MIMO é necessário o uso de desacopladores que tornem o sistema descentralizado.

Este trabalho, portanto, visa testar o desempenho de diferentes tipos de desacopladores encontrados na literatura em diferentes sistemas de moagem MIMO. Serão implementados controladores PI ou PID por meio de técnicas de sintonia de controle (como IMC, SIMC, ITAE etc.) e ao final, avaliar a estrutura do controlador - desacoplador - modelo por meio de índices de desempenho (IAE, ITAE, ISE). Ao final dos estudos, espera-se contribuir com a avaliação de pontos que interferem no bom funcionamento de um desacoplador e apresentar novas estruturas de desacoplamento para os modelos em estudo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

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

1.2.2 Objetivos Específicos

Adicionalmente, como objetivos secundários, citam-se:

1. A avaliação do desempenho dos sistemas de controle projetados por meio de índices de desempenho clássicos;
2. A verificação das melhorias introduzidas por cada conjunto de desacoplador e controlador e;
3. O desenvolvimento de novos modelos de desacopladores para sistemas MIMO.

1.3 Justificação e Motivação

Olivier e Craig (2017) realizaram uma pesquisa sobre o grau de automação na indústria de processamento mineral. O objetivo do trabalho foi avaliar o *status* da automação e identificar oportunidades de melhorias de controle no processo industrial. Uma das análises realizada na pesquisa foi a falta de experiência e dificuldade dos operadores em operar um sistema de controle, sendo um inibidor ao desempenho do processo.

Portanto, em um processo industrial, ainda deve-se considerar o conhecimento dos operadores, que estão fortemente presentes na intervenção do processo, e cujas ações são consideradas importantes.

A correta inserção e atuação de um controlador em uma malha de um processo industrial, como a moagem, deve garantir vantagens como o aumento de estabilidade, redução dos gastos energéticos, melhora no aumento da velocidade de resposta do sistema, maximização das taxas de produção e redução dos desperdícios da matéria prima utilizada. Portanto, a busca por um controlador que atenda as necessidades de projeto e que sejam de fácil aplicabilidade pelos operadores deve ser analisada no ambiente industrial.

O processo de moagem caracteriza-se em um sistema com forte acoplamento entre as variáveis por se tratar de um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas, presença de atraso e funções de transferência com integradores. Como citado anteriormente, apresentam-se nas literaturas abordagens de implementação de controle através de técnicas avançadas, como lógica *fuzzy*, controle robusto e controle através de desigualdades matriciais lineares. Contudo, neste trabalho, pretende-se estudar técnicas de sintonia para controladores PID, visto que são mais simples e de fácil ajuste, de mais fácil compreensão aos operadores do sistema, e podem ser bastante aproveitados na indústria. Para o uso dos controladores PI SISO em plantas MIMO utiliza-se o conceito de desacopladores, que tornam o controle descentralizado, buscando-se eliminar os efeitos indesejáveis das interações entre as malhas.

1.4 Metodologia

Para a realização da primeira etapa deste estudo, foi utilizado o método de pesquisa descritiva com a finalidade na busca de publicações recentes sobre o processo de moagem e sua importância, a compreensão dos sistemas MIMO e SISO e quais métodos são utilizados para o seu controle. Além de estudos sobre a utilização de desacopladores em sistemas MIMO e a construção da estrutura de controladores PI e PID.

Os processos de moagem reportados nas pesquisas realizadas anteriormente por Ivezić e Petrović (2003), Craig e MacLeod (1995) e Reis (2018) serão estudados e, por meio de simulações computacionais via *software* MATLAB, serão testados tipos diferentes de desacopladores encontrados na literatura. Posteriormente, com a resposta encontrada, serão realizados testes com o conjunto controle - desacoplador - malha para avaliação.

Na segunda etapa, espera-se desenvolver análises mais criteriosas sobre os pontos que afetam o desempenho dos desacopladores, como atraso do sistema e funções integradoras, além do desenvolvimento e busca de novos tipos de desacopladores.

1.5 Estrutura do Trabalho

O Trabalho de Conclusão de Curso está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** Capítulo introdutório onde são apresentadas a contextualização, a justificativa para o projeto e os objetivos principais e secundários.
- **Capítulo 2:** São apresentados os estudos realizados sobre os processos de moagem e apresentação dos modelos de moagem MIMO a serem utilizados como base de estudo.
- **Capítulo 3:** Apresenta-se o uso de controladores PID SISO na indústria por serem mais simples e fáceis de sintonizar. Neste capítulo, também serão revisados a utilização de desacopladores. Além disso, serão apresentados, a fim de avaliar a eficiência dos desacopladores por meio de índices de desempenho, o uso conjunto dos desacopladores e controladores.
- **Capítulo 4:** Capítulo no qual são apresentados os resultados obtidos através de simulações via *software* MATLAB e SIMULINK para uso dos desacopladores capazes de atuar para cada modelo apresentado. Serão aplicados no conjunto desacoplador - malha técnicas de sintonia para realização do controle.
- **Capítulo 5:** Apresentação das conclusões sobre o trabalho e as etapas futuras a serem desenvolvidas.

1.6 Perguntas dessa Pesquisa

Com base nos objetivos de pesquisa, pode-se questionar acerca da seguinte apresentação desta dissertação:

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?

2 Processo de Moagem na Mineração

2.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica para o conhecimento do processo de moagem, ponto de estudo do trabalho de aplicação deste trabalho. Posteriormente, serão descritos os modelos que serão utilizados como base de desenvolvimento para aplicação dos tipos de desacopladores, a fim de verificar a sua resposta e concordância com o esperado e, adiante, a aplicação das regras de sintonia para controladores PID.

2.2 O Setor de Mineração

O setor mineral brasileiro foi construído sob uma visão estratégica de desenvolvimento nacional, tendo por base uma política e uma legislação fomentadoras (BARRETO et al., 2001). De conhecimento, a mineração é uma atividade econômica essencial ao desenvolvimento do país, com a produção de bens que irão suprir a necessidade de diversas atividades.

O subsolo brasileiro possui importantes depósitos minerais, sendo parte dessas reservas consideradas expressivas quando relacionadas mundialmente (FARIAS, 2002). Cidades como Ouro Preto, localizada no estado de Minas Gerais, no interior do polígono conhecido como ‘Quadrilátero Ferrífero’, importante província mineral, possui uma produção mineral diversificada (Ferro, Dolomito, Calcário, Talco, Manganês, Gemas, Rochas e Cascalho) (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2009).

Segundo Andrew Mackenzie (2015), a mineração é um “mercado altamente competitivo e cíclico, onde o desempenho de lucro acima da média durante o ciclo depende em ser o fornecedor mais eficiente, não em restrição da oferta”. O processo de mineração possui diversas etapas com custo operacionais diferentes, sendo necessários estudos das etapas a fim de tomar decisões competitivas e sustentáveis no mercado para otimização do custo de produção, busca da melhor eficiência e minimização dos custos.

2.3 Etapas do Beneficiamento Mineral

Tratamento ou beneficiamento de minérios consiste de operações (aplicadas aos bens minerais) visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem contudo modificar a identidade química ou física dos minerais. (LUZ; LINS, 2018)

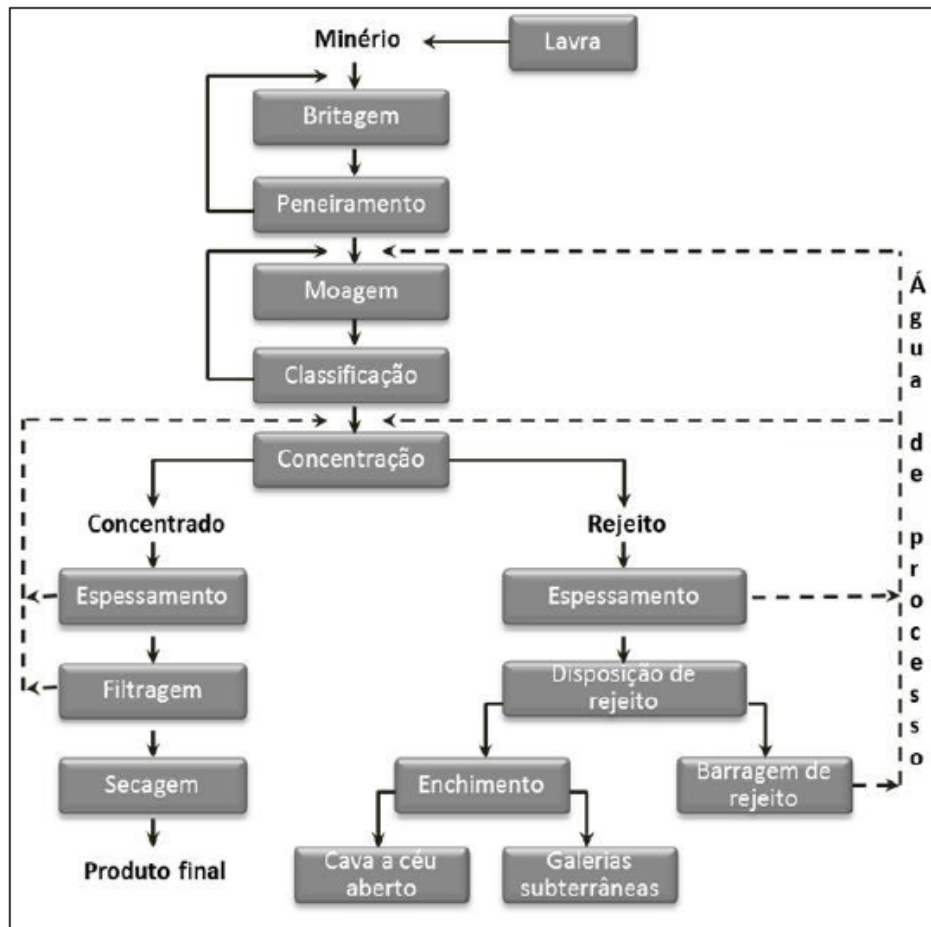
Na literatura “Introdução ao Tratamento de Minérios” de Luz e Lins (2018), é apresentado um diagrama esquemático para identificação dos processos do tratamento de minério, reproduzido na Figura 1. Nesse diagrama, o minério bruto, conhecido como ROM (do inglês, *run-of-mine*) procedente da frente de lavra de uma mina, é submetido às seguintes operações:

1. Britagem e moagem;
2. Peneiramento (separação por tamanhos) e classificação (hidrociclone, classificador espiral);
3. Concentração gravítica, magnética, eletrostática, flotação, floculação seletiva, etc;
4. Desaguamento do concentrado (decantação, espessamento e filtragem);
5. Desaguamento do rejeito (espessamento) seguido de recuperação de água para o processo;
6. Secagem do concentrado em secador rotativo, *spray dryer*, secador de leito fluidizado,
7. Disposição de rejeito em cavas de mina, a céu aberto, galeria subterrânea, barragem de rejeito.

As etapas de britagem e moagem são conhecidas como processo de cominuição, processo no qual é realizado o procedimento de redução do tamanho dos minerais, visando a produção de partículas com tamanho e formato pré-requeridos. O processo de britagem é conhecido como a cominuição inicial e a de moagem como cominuição final.

De forma a especificar as etapas, o termo britagem se aplica à redução do tamanho de forma a obter produtos com granulometria superior a 10 milímetros. Segundo Dutra (2005), os mecanismos envolvidos compreendem basicamente impacto, compressão e cisalhamento. Os equipamentos tradicionalmente utilizados são os britadores giratórios, de mandíbulas, cônicos, de rolos e de impacto (horizontal e vertical). Ao passo que o termo moagem é empregado quando se aplica uma redução visando a obtenção de produtos com granulometria inferior a 10 milímetros. Os equipamentos mais usados são os moinhos tubulares rotativos (bolas e barras), vibratórios, de rolo e de impacto.

Figura 1 – Diagrama típico de tratamento de minério.



Fonte: Luz e Lins (2018).

2.4 Circuitos de Moagem

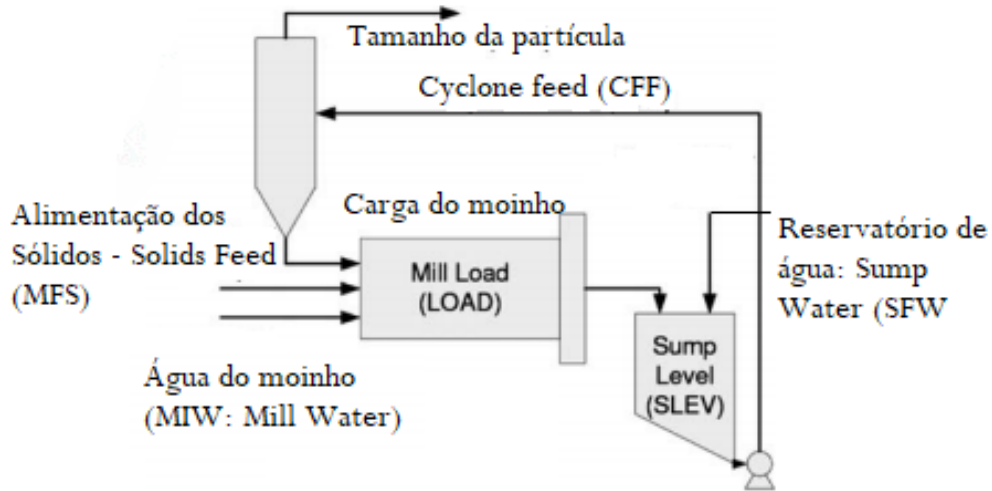
Os circuitos de moagem são os processos unitários mais custosos na indústria de processamento mineral, de modo que seu desempenho econômico seja relevante para análises de desempenho do processo como um todo (WILLS; FINCH, 2015).

Um exemplo de circuito de moagem é apresentado em Coetzee, Craig e Kerrigan (2008). O circuito de moagem de minério ROM é apresentado na Figura 2.

Segundo Reis (2018), grande parte dos circuitos de moagem no Brasil são controlados por controladores de entrada única e saída única PI descentralizados. A vantagem da aplicação SISO está em sua simplicidade de implementação, entretanto, essa abordagem não consegue lidar com os diversos acoplamentos de malhas existentes no circuito.

No trabalho de Chen et al. (2007), cita-se que o circuito de moagem precisa ser controlado de forma estável para alta taxa de recuperação de minério e redução significativa do custo de produção em plantas concentradas. Em diversas literaturas, são desenvolvidos trabalhos utilizando o método MPC (controle preditivo), o qual é capaz de lidar com o

Figura 2 – Exemplo de circuito de moagem.



Fonte: Adaptado de Coetzee, Craig e Kerrigan (2008).

forte acoplamento do sistema, porém apresenta como desvantagem a necessidade de conhecimento especializado dificultando a operação por parte de trabalhadores industriais não especializados.

2.5 Modelos de Processo de Moagem

2.5.1 Processo de Moagem descrito por Ivezić e Petrovic (2003)

O objetivo do artigo em estudo de Ivezić e Petrović (2003) é apresentar uma aplicação de projeto de controle em um circuito de moagem da mina de cobre de Majdanpek, Sérvia. O circuito de moagem do concentrador de Majdanpek é mostrado na Figura 3.

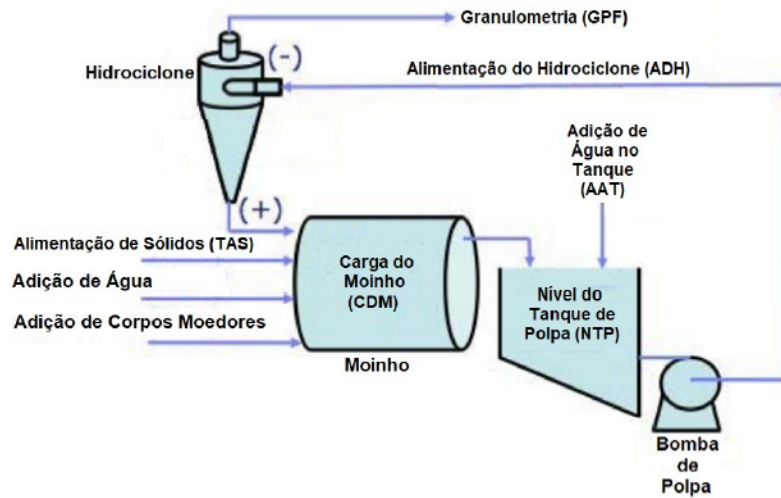
O circuito consiste em dois moinhos de bolas primários e dois moinhos de bolas secundários fechados por hidrociclones. Na alça secundária, existem duas células de flotação unitária que evitam a moagem excessiva de grosseiro, material flutuante de alta densidade.

A dinâmica do processo pode ser representada pelo modelo multivariável em que as variáveis do sistema são (i) a taxa de alimentação de sólidos (ΔTAS) juntamente com a sua diluição por água e (ii) a adição de água no hidrocilone (ΔAAH). As variáveis controladas do processo são (i) a granulometria do produto final (ΔGPF) e (ii) a vazão de alimentação dos hidrocilones (ΔVAH).

O processo da planta é descrito por

$$\begin{bmatrix} \Delta GPF \\ \Delta VAH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-0.9362}{1164s+1}e^{-350s} & \frac{10.252s+2.819 \cdot 10^{-3}}{80218s^2+652s+1}e^{-200s} \\ \frac{36.49}{792s+1} & \frac{1.1405}{179s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta TAS \\ \Delta AAH \end{bmatrix}.$$

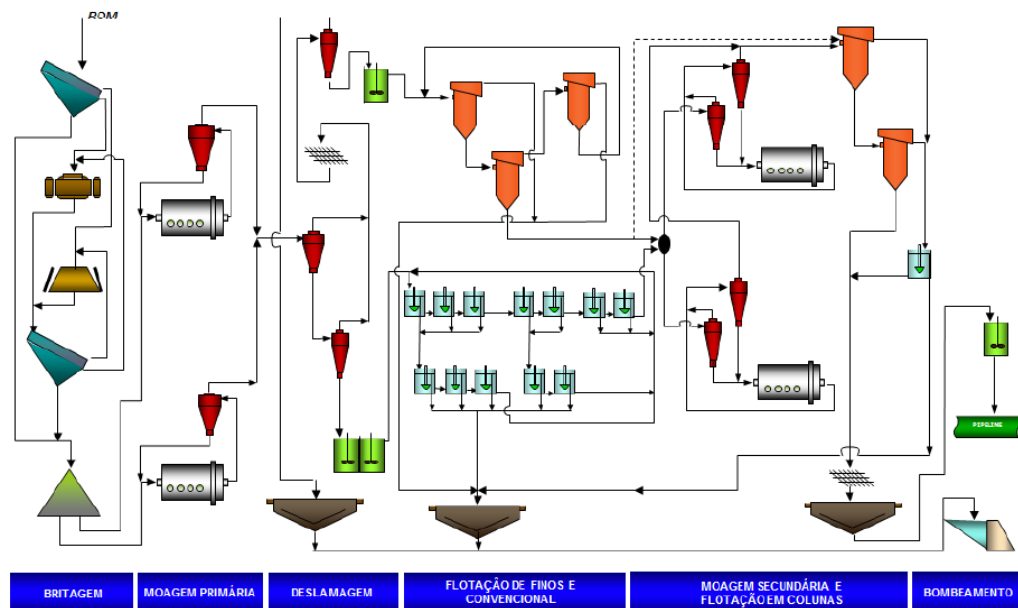
Figura 4 – Diagrama esquemático do circuito de controle da planta de moagem.



Fonte: Craig e MacLeod (1995).

Segundo Reis (2018), o concentrador 3 da Samarco foi projetado para uma capacidade de produção de 10.5 milhões de toneladas de concentrado de minério de ferro por ano. Na Figura 5, está a descrição de cada etapa do processo, apresentando a etapa de estágio da moagem, que consiste em uma moagem primária, com dois moinhos de bolas em paralelo e a moagem secundária (remoagem), alimentada pelo concentrado do circuito de flotação com uma vazão nominal de 1455 t/h por linha.

Figura 5 – Fluxograma do concentrado 3 da Samarco.

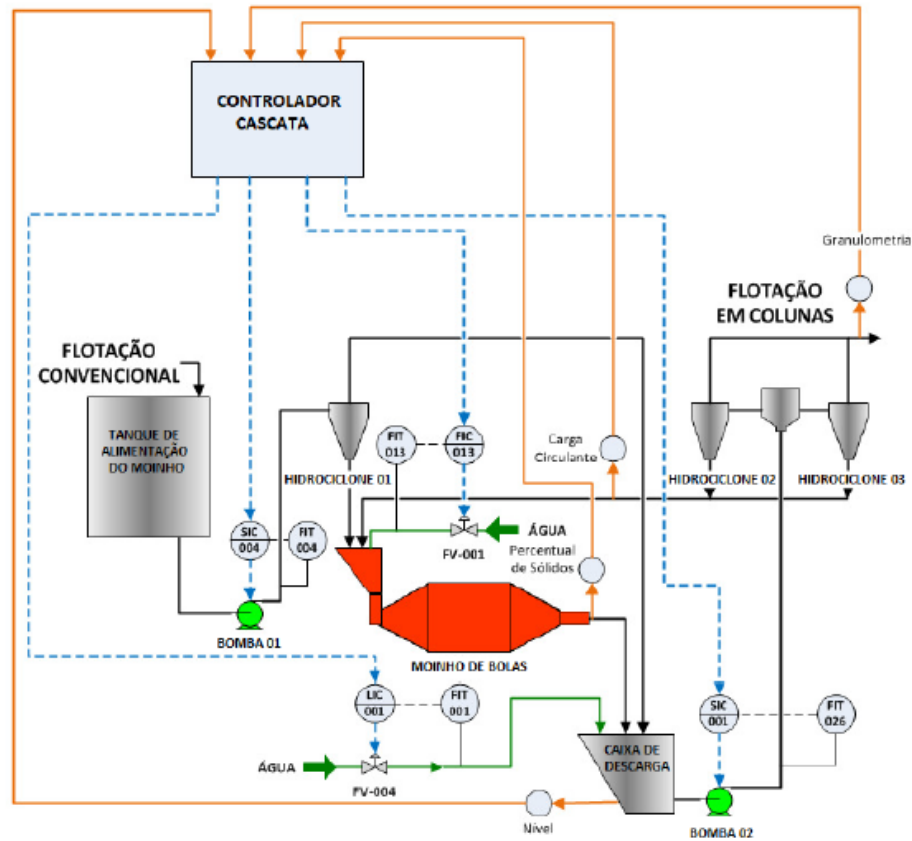


Fonte: Reis (2018)

No concentrador 3 da Samarco, o controle regulatório é baseado apenas na utili-

zação do PID, sendo o controle automático do circuito de remoagem baseado apenas no monitoramento das variáveis de velocidade das bombas, vazão de água para o moinho e nível da caixa da descarga do moinho (REIS, 2018).

Figura 6 – Diagrama esquemático do controle em cascata aplicado ao circuito de Remoagem.



Fonte: Reis (2018).

$$\begin{bmatrix} \Delta PS \\ \Delta CC \\ \Delta GPF \\ \Delta NCM \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0,032}{(2,307s+1)(2,307s+1)}e^{-3s} & \frac{-0,467}{25,385s+1}e^{-3s} \\ \frac{-0,089}{27,692s+1}e^{-9s} & \frac{-0,003}{4,615s+1}e^{-95s} \\ \frac{0,018}{(33,058s+1)(8,48s+1)}e^{-3s} & \frac{0,156}{36,923s+1}e^{-15s} \\ \frac{1,935}{(142,76s+1)(51,083s+1)}e^{-3s} & \frac{0,044}{(128,918s+1)(39,543s+1)}e^{-54s} \\ \frac{-0,041}{(41,011s+1)(5,143s+1)}e^{-6s} & \frac{0,172}{39,231s+1}e^{-3s} \\ \frac{-0,038}{(28,049s+1)(1,951s+1)}e^{-3s} & \frac{0,927}{23,077s+1}e^{-3s} \\ \frac{-0,017}{(32,354s+1)(9,185s+1)}e^{-15s} & \frac{0,156}{27,692s+1}e^{-15s} \\ \frac{0,396}{(132,864s+1)(56,367s+1)}e^{-15s} & \frac{-1,265}{(127,877s+1)(61,354s+1)}e^{-15s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta SP - SIC - 004 \\ \Delta SP - FIC - 013 \\ \Delta SP - LIC - 001 \\ \Delta SP - SIC - 001 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

O novo circuito de remoagem da Samarco proposto por Reis (2018) trata o controle do processo por um circuito em cascata nos quais as malhas internas controlam

a vazão, e as malhas externas, na camada supervisória, geram referências para as malhas internas.

As quatro malhas para o controle de vazão são malhas de um processo SISO e utilizam controladores PI. As malhas são identificadas como (i) SIC-004 que controla a vazão da bomba 1, (ii) a malha FIC-013 que controla a vazão de água no moinho de bolas, (iii) a LIC-001 que controla o nível da caixa de descarga e (iv) a malha SIC-001 que controla a vazão da bomba 02.

As malhas externas do processo têm o objetivo de controlar a granulometria do produto final e a redução da moagem em excesso do material. As variáveis controladas foram definidas como (i) o percentual de sólidos no moinho (%) (ΔPS), (ii) a carga circulante (t/h) (ΔCC), (iii) a granulometria do produto final (%) (ΔGPF) e (iv) o nível da caixa da descarga do moinho (ΔNCM) (CASTRO, 2020).

3 Desacopladores e estratégias de controle multivariável

Neste capítulo será apresentado o estudo das literaturas sobre sistemas SISO (do inglês, *Single Input, Single Output*), MIMO (do inglês, *Multiple Inputs, Multiple Outputs*), desacopladores, controladores PID e suas sintonias de controle e índices de desempenho. Pretende-se com a escolha da sequência para apresentação destes conceitos, facilitar o entendimento do leitor sobre a diferença entre modelos MIMO e SISO, em que sistemas SISO são apresentados por uma única entrada e uma única saída, de mais fácil identificação e controle, em contrapartida que sistemas MIMO possuem múltiplas entradas e múltiplas saídas, com variáveis com forte acoplamento.

Além disso, para o trabalho aqui em estudo, descrever sobre o controle de processo de moagem, ao qual é utilizado o uso de desacopladores, ferramenta utilizada para minimizar os efeitos de que uma variável do sistema exerce sobre outra, tornando-se a implementação de um controle mais fácil. Considerando os modelo de moagem aqui em estudo como $G(s)$ e a resposta do desacoplador de $D(s)$, supõe-se a atender através de sintonias de controle (como IMC, SIMC, ITAE, dentre outras) as especificações mínimas para o controle de uma malha $(G(s) \cdot D(s))$.

3.1 Controle de Processos

Um processo é descrito como um método de mudança ou refinamento de matérias-primas para obter produtos finais (FRANCHI, 2011). O controle de processos refere-se aos métodos utilizados para controlar as variáveis de processo, esperando-se que a resposta mantenha-se o mais próximo possível dos valores considerados ideais ao projeto.

Um problema central de uma estratégia de controle gira em torno de determinar quando, como e quanto mudar o valor de uma variável para obter uma melhor resposta do sistema. Deseja-se portanto, que o produto seja produzido com certas especificações, baseadas em critério de qualidade e uniformidade.

Nesta pesquisa para realização desta dissertação, é estudado o processo de moagem, importante etapa no processo de mineração e de variabilidade de estudo de técnicas nas literaturas.

3.2 Sistemas de Controle SISO e MIMO

Duas definições podem ser descritas para caracterizar uma malha de controle.

3.2.1 Sistemas SISO

Os sistemas de entrada única e saída única (SISO) são modelos que normalmente consistem em polinômios simples a fim de se relacionar uma saída a uma entrada. Nessa configuração são representadas portanto uma variável de entrada (processo) e uma variável de saída (manipulada).

3.2.2 Sistemas MIMO

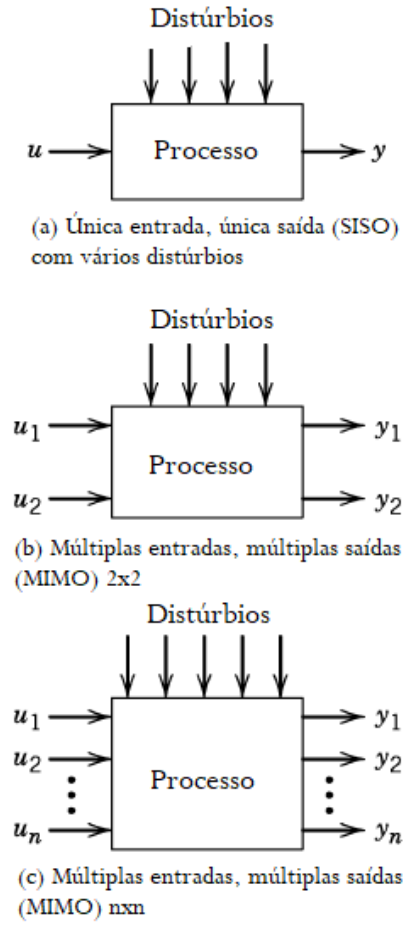
Em muitos problemas práticos de controle, normalmente, várias variáveis devem ser controladas e várias variáveis podem ser manipuladas. Esses problemas são chamados de múltiplas entradas, múltiplas saídas (MIMO, do inglês, *Multiple Inputs, Multiple Outputs*). Para quase todos importantes processos, pelo menos duas variáveis devem ser controladas: qualidade do produto e rendimento.

Uma das características dos problemas de controle MIMO é a presença das interações de processo, ou seja, cada variável manipulada pode afetar ambas as variáveis controladas. Quando existem interações significativas no processo, a seleção da configuração do controle pode não ser óbvia. Nestes casos são aconselhados a considerar estratégias de controle multivariável, como desacoplamento e modelo de controle preditivo.

Seborg D. E. Edgar (2011) apresenta que, problemas de controle MIMO são inerentemente mais complexos do que os problemas de controle SISO porque as interações do processo ocorrem entre variáveis controladas e manipuladas. Em geral, uma mudança em uma variável manipulada u_1 afetará todas as variáveis controladas y_1, y_2, \dots, y_n . Por causa das interações do processo, a seleção do melhor emparelhamento de variáveis controladas e manipuladas para um esquema de controle multi-loop pode ser uma tarefa difícil. Em particular, para um problema de controle com n variáveis controladas e n variáveis manipuladas existem $n!$ possíveis configurações de controle multi-loop. Uma representação esquemática de processos de controle SISO e MIMO são apresentados na Figura 7.

Considerando o problema de controle 2x2 apresentado na Figura 7.b, em que são apresentadas duas variáveis de controle e duas variáveis manipuladas, então quatro funções de transferência do processo são necessárias para caracterizar a dinâmica do processo:

Figura 7 – Processo de controle SIMO e MIMO.



Fonte: Adaptado de Seborg D. E. Edgar (2011)

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = G_{p11}(s) \quad (3.1)$$

$$\frac{Y_1(s)}{U_2(s)} = G_{p12}(s) \quad (3.2)$$

$$\frac{Y_2(s)}{U_1(s)} = G_{p21}(s) \quad (3.3)$$

$$\frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = G_{p22}(s) \quad (3.4)$$

As funções de transferência evidenciadas anteriormente podem ser usados para determinar o efeito de mudança em U_1 ou U_2 em Y_1 e Y_2 . De acordo com o Princípio da Superposição, as mudanças em U_1 e U_2 tem efeito aditivo em cada variável controlada:

$$Y_1(s) = G_{p11}(s)U_1(s) + G_{p12}(s)U_2(s) \quad (3.5)$$

$$Y_2(s) = G_{p21}(s)U_1(s) + G_{p22}(s)U_2(s) \quad (3.6)$$

Essa relação entre entradas - saídas pode ser expressas na notação de vetor - matriz como

$$Y(s) = G_p(s)U(s) \quad (3.7)$$

onde $Y(s)$ e $U(s)$ são vetores de dois elementos

$$Y(s) = \begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix}$$

$$U(s) = \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix}$$

e $G_p(s)$ é a matriz da função de transferência do processo,

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} G_{p11}(s) & G_{p12}(s) \\ G_{p21}(s) & G_{p22}(s) \end{bmatrix}$$

Como exemplo, suponha um esquema de controle multiloop em que dois controladores de feedback devem ser utilizados. As duas configurações de controle possíveis são mostradas na Figura 8.

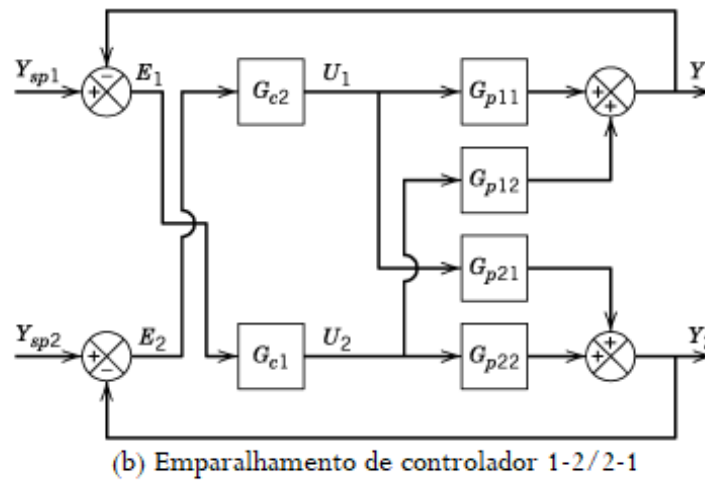
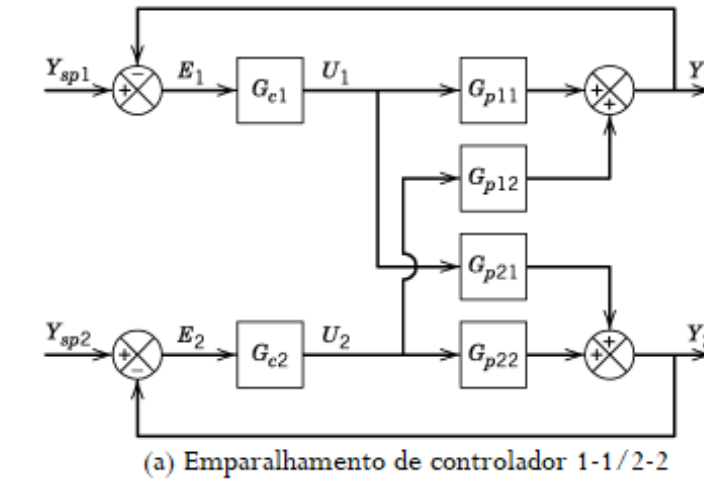
No esquema (a), Y_1 é controlado ajustando U_1 , enquanto Y_2 é controlado ajustando U_2 . Consequentemente, esta configuração será referida como o esquema de controle 1-1 / 2-2. A estratégia alternativa é para emparelhar Y_1 com U_2 e Y_2 com U_1 , o controle 1-2 / 2-1 esquema mostrado na Figura 8.b.

3.3 Desacopladores

Segundo Seborg D. E. Edgar (2011), uma das primeiras abordagens para o controle multivariável é controle de desacoplamento. Adicionando controladores adicionais chamados de desacopladores para uma configuração multi-loop convencional, o objetivo do projeto para reduzir as interações do circuito de controle pode ser realizado. Em princípio, o controle de desacoplamento podem reduzir as interações do circuito de controle, e uma mudança de ponto de ajuste para uma variável controlada tem pouco ou nenhum efeito nas outras variáveis controladas. Na prática, esses benefícios podem não ser totalmente realizados devido a imperfeições modelos de processo.

Nessa sessão serão apresentados os métodos de desacoplamento encontrados nas literaturas: desacoplador ideal, desacoplador simplificado, desacoplador invertido e desacoplador estático e desacoplador aproximado na frequência. Em capítulo posterior, poderão ser analisados as comparações entre os tipos de desacopladores e o que os impedem de obter uma resposta satisfatória. Espera-se em trabalhos futuros, observar e avaliar os pontos

Figura 8 – Diagrama de blocos para um sistema multiloop 2x2.



Fonte: Adaptado de Seborg D. E. Edgar (2011)

que afetam a implementação dos desacopladores, como atraso do sistema e função com integradores. Após implementação dos desacopladores ainda serão realizadas a avaliação destes através dos índices de desempenho, como IAE, ITAE e ISE.

3.3.1 Projeto do Desacoplador

Na abordagem de controle com desacoplamento, a tarefa inicial é o projeto do bloco desacoplador $D(s)$. Considerando um processo TITO $G(s)$ (do inglês, *Two Inputs, Two Outputs*), o desacoplador deve ser projetado de tal forma que o sistema resultante $H(s) = G(s)D(s)$ seja diagonal (dominante)

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

$$\begin{bmatrix} H_{11}(s) & 0 \\ 0 & H_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

em que (3.8)

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

e

$$D(s) = \begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix},$$

logo

$$\begin{bmatrix} H_{11}(s) & 0 \\ 0 & H_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Reescrevendo de forma a explicitar $D(s)$:

$$D(s) = G(s)^{-1}H(s) = \frac{\text{adj}(G(s))}{\det(G(s))}H(s) \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{12}(s)G_{21}(s)} \begin{bmatrix} G_{22}(s)H_{11}(s) & -G_{12}(s)H_{22}(s) \\ -G_{21}(s)H_{11}(s) & G_{11}(s)H_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3.2 Desacoplador Ideal

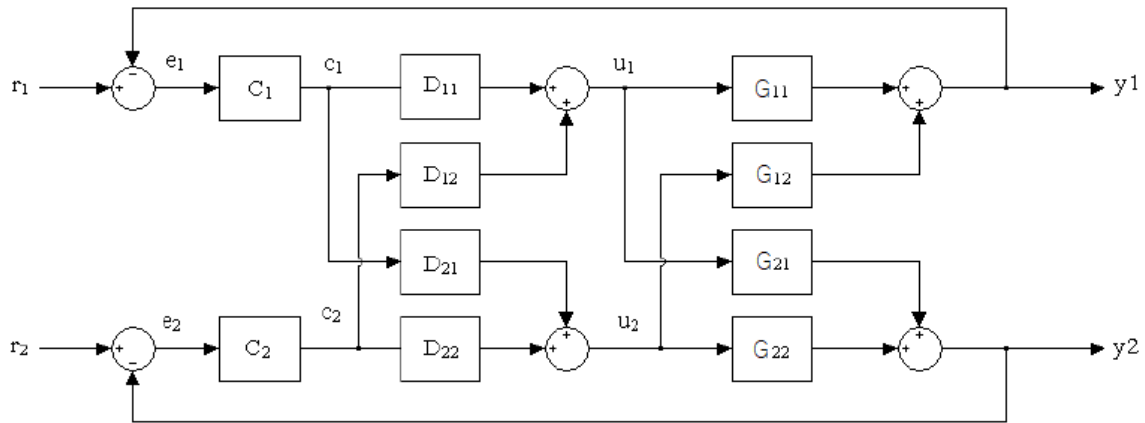
Considerando a equação apresentada em (3.11), equação geral do desacoplador, definindo-se $H_{11}(s)$ e $H_{22}(s)$ temos o projeto do desacoplador $\mathbf{D}(s)$. A escolha ideal é $H_{11}(s) = G_{11}(s)$ e $H_{22}(s) = G_{22}(s)$. Essa escolha leva ao que se chama na literatura de desacoplamento ideal (LUYBEN, 1970). O desacoplador para esse caso é dado por:

$$D(s) = \frac{1}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{12}(s)G_{21}(s)} \begin{bmatrix} G_{22}(s)G_{11}(s) & -G_{12}(s)G_{22}(s) \\ -G_{21}(s)G_{11}(s) & G_{11}(s)G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Com esse desacoplador, os elementos do controlador descentralizado ($C_1(s)$ e $C_2(s)$) podem ser projetados de forma independente para controlar as dinâmicas $H_{11}(s) = G_{11}(s)$ e $H_{22}(s) = G_{22}(s)$, respectivamente. A desvantagem dessa técnica de projeto do desacoplador é que os elementos de $D(s)$ são complexos, o que dificulta a implementação do desacoplador. Além disso, o desacoplador possui um termo com dinâmica em todos os elementos. Com isso, o desacoplador ideal é pouco utilizado na prática (GAGNON; POMERLEAU; DESBIENS; 1998).

No trabalho de Baeta (2006) é representado uma estrutura de um desacoplador ideal que pode ser visualizada na Figura 9, onde r_i representa as entradas de referência, e_i os sinais de erro, C_i as funções de transferência dos controladores, c_i a saída dos controladores, u_i os sinais (variáveis manipuladas) que efetivamente são utilizadas para controle da planta, D_{ij} as funções de transferência dos desacopladores, G_{ij} as funções de transferência que descrevem o processo e y_i representam as saídas do sistema (variáveis de processo).

Figura 9 – Desacoplador ideal.



Fonte: Adaptado de Baeta (2006).

O desacoplador ideal pode não ser possivelmente realizável caso o atraso de tempo do denominador da função de transferência seja maior que o atraso de tempo do numerador, fazendo com que este desacoplador não seja utilizada na prática.

3.3.3 Desacoplador Simplificado

Uma alternativa para o projeto do desacoplador, consiste em definir os termos da diagonal principal do desacoplador iguais a 1, o que facilita sua implementação prática. Esse tipo de escolha é chamada na literatura de desacoplamento simplificado.

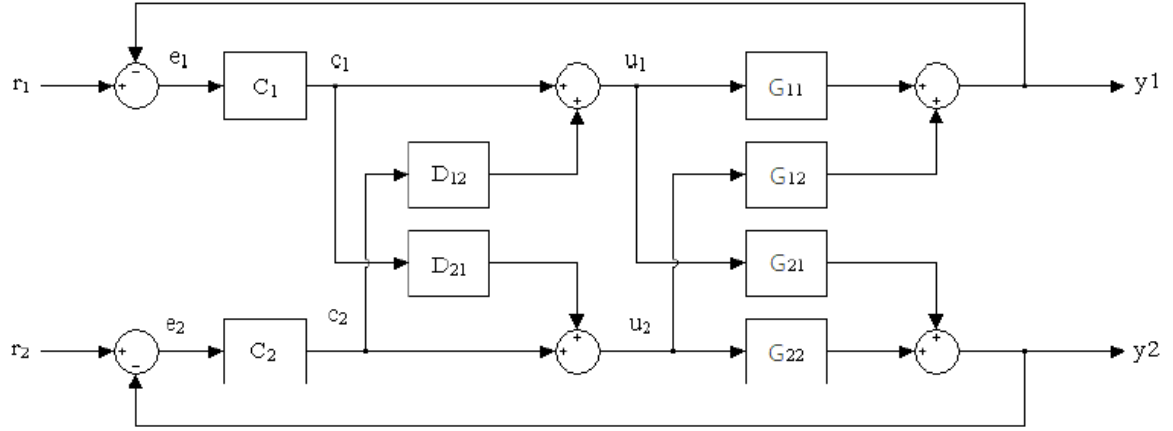
$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & 1 \end{bmatrix}$$

sendo,

$$D_{12} = \frac{-G_{12}}{G_{11}} \quad (3.13)$$

$$D_{21} = \frac{-G_{21}}{G_{22}} \quad (3.14)$$

Figura 10 – Desacoplador simplificado.



Fonte: Adaptado de Baeta (2006).

Através das equações apresentadas em (3.14), distingui-se às equações utilizadas para encontrar o modelo para o desacoplador ideal, sendo estas mais simples. De acordo com Baeta (2006), tanto o desacoplador ideal quanto o simplificado são referidos como desacopladores convencionais.

3.3.4 Desacoplador Invertido

O projeto do desacoplador invertido é baseado na aproximação do processo por um modelo do tipo FOPTD (First-Order plus Time Delay):

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

$$\hat{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{K_{11}}{T_{11}+1} e^{-sL_{11}} & \frac{K_{12}}{T_{12}+1} e^{-sL_{12}} \\ \frac{K_{21}}{T_{21}+1} e^{-sL_{21}} & \frac{K_{22}}{T_{22}+1} e^{-sL_{22}} \end{bmatrix},$$

onde K_{ij} , T_{ij} e L_{ij} são o ganho, a constante de tempo e o atraso de $G_{ij}(s)$.

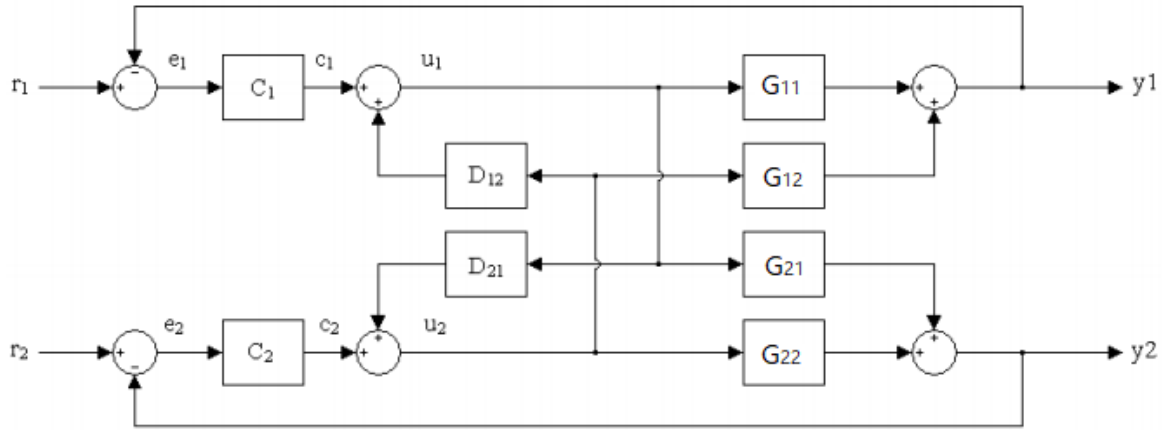
Assim, o desacoplador invertido $D(s)$ é projetado tal que $G(s)D(s)$ seja diagonal dominante. Considerando a estrutura invertida, o desacoplador invertido é dado por (Shinskey, 1996):

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & 1 \end{bmatrix},$$

Pela Equação (3.3.4) encontra-se uma semelhança a equação do desacoplador simplificado. A diferença entre as estruturas se encontra na forma de conectar os elementos

no modelo da planta final, como apresentado pela Figura 11. Segundo Baeta (2006), o caso do desacoplador simplificado, os elementos desacopladores são conectados ao sinal de saída dos controladores enquanto que, no desacoplador invertido, estes elementos estão conectados ao sinal que efetivamente é enviado à planta (variável manipulada).

Figura 11 – Desacoplador invertido.



Fonte: Adaptado de Baeta (2006).

Este desacoplador portanto, tem como objetivo tornar a análise de um sistema MIMO tão simples quanto uma matriz de transferência diagonal, ou seja, que não possui acoplamento entre suas variáveis.

3.3.5 Desacoplador Estático

Todos os desacopladores definidos até aqui são dinâmicos, sendo representados por funções de transferência no domínio de Laplace. Estes desacopladores dependem muito do modelo do sistema e, às vezes, podem não ser fisicamente realizáveis. Isto ocorre, por exemplo, quando a representação do atraso de tempo no denominador das expressões que definem as funções de transferência dos desacopladores é maior que a do numerador. Além disso, a implementação de desacopladores dinâmicos em controladores comerciais com limitações de memória, que ainda são encontrados em ambiente industrial, pode ser muito trabalhosa. (BORIM, 2000).

Neste sentido, um projeto mais simples, onde somente as interações em regime permanente são consideradas, pode ser utilizado. Este projeto leva em conta somente os ganhos das funções de transferência do sistema, que é equivalente a fazer $s = 0$.

Desta forma, tem-se a seguinte equação para o desacoplador estático:

$$D = G(0)^{-1} \quad (3.15)$$

3.3.6 Desacoplador Aproximado na Frequência

Este desacoplador é o mais diagonal possível. Geralmente é obtido escolhendo o desacoplador

$$G(s) = G_0^{-1} \quad (3.16)$$

em que G_0 é uma aproximação real de $G(j\omega_0)$. A frequência da largura de banda é uma boa seleção para ω_0 pois o efeito no desempenho que reduz a interação normalmente é maior nessa frequência.

3.4 Controladores PID

O controlador PID (Proporcional, Integrador e Derivativo) é o controle mais difundido nas unidades industriais do mundo. Além de estar disponível em praticamente todas as plataformas de controle comerciais, ele é um algoritmo robusto, de fácil entendimento e capaz de prover performance satisfatória para uma grande variedade de processos industriais. De acordo com Wei e Craig (2009), o PID também é o mais utilizado em circuitos de moagem.

O controlador PID desempenha um bom desempenho em uma vasta gama de condições de operação e como vantagem, é de fácil ajuste dos parâmetros para obter um bom desempenho.

A função de transferência da configuração paralela clássica do PID é descrita como

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D(s), \quad (3.17)$$

cuja equação no domínio do tempo é

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.18)$$

sendo um termo proporcional K_P , um termo integral K_I e um termo derivativo K_D . Estes termos são parâmetros ou ganhos utilizados para adequar ou ajustar de melhor forma de operação do controlador de acordo com as especificações de desempenho do projeto.

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

$$u(t) = K_C \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.19)$$

com função de transferência dada por

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I(s)} + T_D s \right) \quad (3.20)$$

Para entendimento sobre como os fatores afetam na resposta do sistema, serão descritos a função de cada termo em um processo de controle.

O controle proporcional (P) é o mais simples modo de controle contínuo que pode reduzir às oscilações em malha de controle. Uma questão a ser considerada, entretanto, é que sozinho, ele não é capaz de igualar a variável de processo ao *setpoint* (valor alvo em um sistema de controle, ponto em que se deseja alcançar). Em termos matemáticos, a saída desse controlador é proporcional ao erro, sendo definido como a diferença entre a variável de processo (PV) e o valor desejado (SP).

Por outro lado, a ação de controle integral (I) tem como finalidade remover o erro que permanece no controle regulatório. Enquanto estiver presente, a saída do controlador continua a alterar a MV (variável manipulada) no intuito de eliminar o erro, de modo que

$$MV = \frac{1}{T_I} \int E dt + MV_0 \quad (3.21)$$

sendo MV_0 definido como a saída do controlador antes da integração, ou condição inicial quando o controlador é colocado no automático.

Embora um controlador integral não apresente erro residual em regime permanente, sua resposta a uma variação na entrada (erro) é geralmente muito lenta para ser empregada em situações reais de controle. O controlador PI hoje é um dos mais empregados na indústria, sendo estimados em cerca de aproximadamente 90% de atuação nas indústrias (FRANCHI, 2011).

Enquanto isso, o controlador derivativo (D), busca aplicar um ganho (K_D) para eliminar atrasos na malha de controle.

Por fim, o controlador PID combina os três tipos de ação dos controladores. A configuração básica para a saída do controlador paralelo é

$$MV = K_P E + K_I \int E dt + K_D \frac{dE}{dt} + MV \quad (3.22)$$

A partir das análises posteriores apresentadas, pode-se destacar a funcionalidade de cada ação dos ganhos de um controlador PID, a qual pode ser analisada na Tabela 1.

Tabela 1 – Efeitos de cada fator no controlador PID.

Controlador	Tempo de Subida	Sobressinal	Tempo de Assentamento	Erro Estacionário
Proporcional	Diminuição	Aumento	Sem Alteração	Diminuição
Integral	Diminuição	Aumento	Aumento	Elimina
Derivativo	Sem Alteração	Diminuição	Diminuição	Sem Alteração

Segundo Franchi (2011), portanto, o principal objetivo de um controlador PID é apresentar um período de resposta semelhante ao controlador P, entretanto sem erro. A ação derivativa aumenta a velocidade de resposta necessária para reduzir o tempo de atraso de resposta do controlador resultante da ação integral.

3.5 Regras de Sintonia

As regras de sintonia de controladores PID é o processo de ajuste de parâmetro de controlador para obter uma resposta dinâmica adequada. Em Franchi (2011), cita-se que a busca por parâmetros adequados como K_P , T_I e T_D aliados aos atrasos inerentes do processo, podem tornar a tarefa demorada e trabalhosa.

Segundo Seborg D. E. Edgar (2011), em seu capítulo sobre critérios de desempenho para sistemas de malha fechada, a função de um sistema de controle realimentado é garantir que o sistema de malha fechada tenha uma dinâmica desejável e características de resposta em estado estacionário. São descritos alguns pontos de interesse a fim de satisfazer o critério de desempenho:

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.

No capítulo sobre “Sintonia de Controladores” de Franchi (2011), descreve-se que há um compromisso entre a velocidade de resposta e qualidade de sobressinal após a implementação de um controlador. Cita-se ainda que, em sistemas de controle, geralmente os elementos que medem o desempenho de uma malha de controle são estabelecidos em função da resposta em regime transitório do sistema aplicado a um degrau unitário na referência (*setpoint*). Portanto, considera-se a sintonia do controlador como um problema de otimização que envolve um critério de desempenho relacionado à forma de resposta do controlador e ao erro entre a variável de processo e *setpoint*.

As configurações do controlador PID podem ser determinadas por diversas técnicas, que serão apresentadas a seguir.

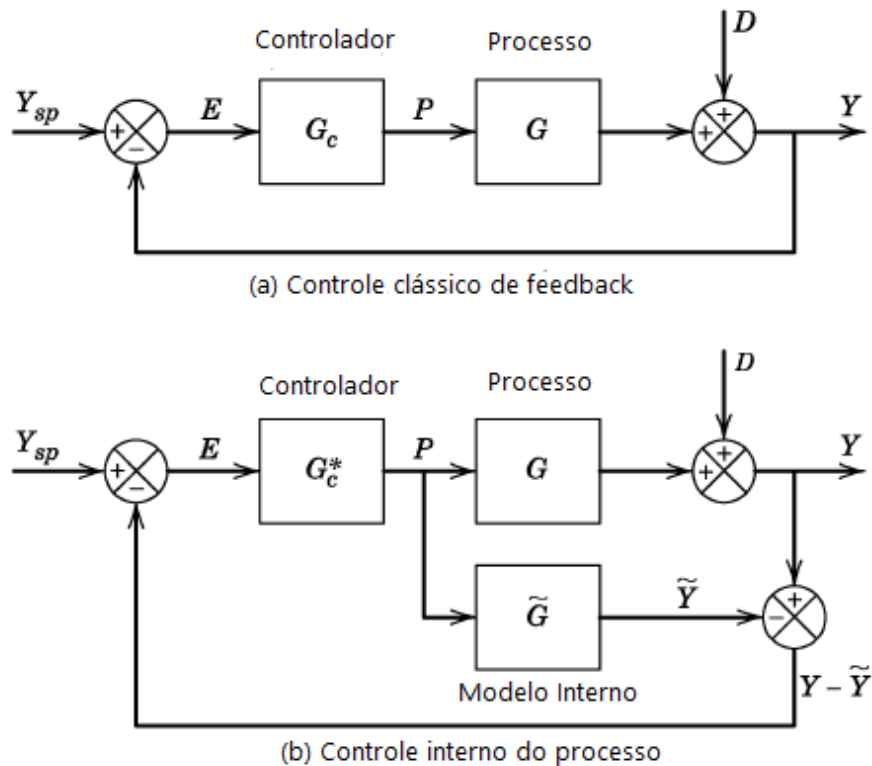
3.5.1 Método do Modelo Interno (IMC)

O Método do Modelo Interno (IMC, do inglês *Internal Model Control*) é baseado em modelos de processo e pode ser utilizado para especificar as definições do controlador antes de o sistema ser instalado. Porém, como citado em Seborg D. E. Edgar (2011), para importantes controles, as configurações iniciais do controlador são normalmente ajustados após a instalação do controlador, realizando uma análise refinada do procedimento, a partir de testes experimentais a fim de obter uma melhor resposta após os testes preliminares (que normalmente não apresentam configuração exata).

O IMC foi desenvolvido por Morari e outros (Garcia e Morari, 1982; Rivera et al., 1986). As vantagens do modelo é que considera-se explicitamente as incertezas do modelo e permite ao projetista avaliar o custo compromisso entre o desempenho e a robustez do sistema de controle a mudanças e erros de modelagem.

Os diagramas de blocos para o controle convencional realimentado e para o controle pelo método IMC são comparados na Figura 12.

Figura 12 – Estratégias de controle de feedback.



Fonte: Adaptado de Seborg D. E. Edgar (2011).

Os dois diagramas de bloco são idênticos caso os controladores $G_c(s)$ e $G_c^*(s)$

satisfazem a relação

$$G_c(s) = \frac{G^*c(s)}{1 - G_c^*(s)\tilde{G}(s)} \quad (3.23)$$

A sintonia envolve definir o principal parâmetro do método IMC, τ_c . Aumentando o coeficiente τ_c , o controlador torna-se mais conservador porque o K_c diminui enquanto T_I aumenta. Existem na literatura algumas 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).

Na Tabela 2, são descritos os modelos das funções de transferências e o respectivo equacionamento para a obtenção dos parâmetros K_C , T_I e T_D .

Tabela 2 – Descrição da obtenção dos parâmetros através da Sintonia IMC.

Caso	Modelo	K_C	T_I	T_D
A	$\frac{K}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{K\tau_c}$	τ	-
B	$\frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau}{K\tau_c}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$
C	$\frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1}$	$\frac{2\zeta\tau}{K\tau_c}$	$2\zeta\tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
D	$\frac{K(1-\beta s)}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1}, \beta > 0$	$\frac{2\zeta\tau}{K(\tau_c + \beta)}$	$2\zeta\tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
E	$\frac{K}{s}$	$\frac{2}{K\tau_c}$	$2\tau_c$	-
F	$\frac{K}{s(\tau s + 1)}$	$\frac{2\tau_c + \tau}{K^2}$	$2\tau_c + \tau$	$\frac{2\tau_c\tau}{2\tau_c + \tau}$
G	$\frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1}$, com $e^{-\theta s} \cong 1 - \theta s$	$\frac{\tau + \theta}{K(\tau_c + \theta)}$	τ	-
H	$\frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1}$, com $e^{-\theta s} \cong \frac{1-\theta s/2}{1+\theta s/2}$	$\frac{2\tau + \theta}{K(2\tau_c + \theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau\theta}{2\tau + \theta}$
I	$\frac{Ke^{-\theta s}}{s}$, com $e^{-\theta s} \cong 1 - \theta s$	$\frac{2\tau_c + \theta}{K(\tau_c + \theta)^2}$	$2\tau_c + \theta$	-
J	$\frac{Ke^{-\theta s}}{s}$, com $e^{-\theta s} \cong \frac{1-\theta s/2}{1+\theta s/2}$	$\frac{2\tau_c + \theta}{K(\tau_c + \theta/2)^2}$	$2\tau_c + \theta$	$\frac{\tau_c\theta + \theta^2/4}{2\tau_c + \theta}$
K	$\frac{Ke^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$, com $e^{-\theta s} \cong 1 - \theta s$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{K(\tau_c + \theta)}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$

3.5.2 Método da Síntese Direta (SIMC)

O Método do Modelo Interno Simples (SIMC, do inglês *Simple Internal Model Control*) é uma evolução do método IMC, que foi desenvolvido por Skogestad (2003).

A sintonia SIMC é focada em processos modelados por sistemas de primeira ou segunda ordem com tempo morto, com τ_c como único parâmetro de sintonia. A escolha de τ_c no método do modelo interno simples visa equilibrar os seguintes efeitos:

1. Resposta rápida e boa rejeição a perturbações favorecidos por valores pequenos de τ_c ;

2. Estabilidade, robustez e uso de pequenas variações no SP, que são favorecidos por valores altos de τ_c .

Sugere-se, portanto,

- $\tau_c = \theta$ para respostas rápidas;
- $\tau_c > \theta$ para maior robustez.

Na Tabela 3 são descritos os modelos das funções de transferências e o respectivo equacionamento para obtenção dos parâmetros K_C , T_I e T_D .

Tabela 3 – Descrição da obtenção dos parâmetros pela sintonia SIMC.

Caso	Modelo	K_C	T_I	T_D
A	$\frac{Ke^{-\theta s}}{\tau_1 s + 1}$	$\frac{\tau_1}{K(\tau_c + \theta)}$	$\min \tau_1, 4(\theta + \tau_c)$	-
B	$\frac{Ke^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1}{K(\tau_c + \theta)}$	$\min \tau_1, 4(\theta + \tau_c)$	τ_2
C	$\frac{Ke^{-\theta s}}{s}$	$\frac{1}{K(\tau_c + \theta)}$	$4(\theta + \tau_c)$	-
D	$\frac{Ke^{-\theta s}}{s(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{1}{K(\tau_c + \theta)}$	$4(\theta + \tau_c)$	τ_2
E	$\frac{Ke^{-\theta s}}{s^2}$	$\frac{1}{K(4(\tau_c + \theta)^2)}$	$4(\theta + \tau_c)$	$4(\theta + \tau_c)$

3.6 Índices de Desempenho

Constata-se, na literatura recente sobre controle automático, uma ênfase acentuada na formulação matemática e na medida do desempenho de sistemas de controle. Por conseguinte, um índice de desempenho pode ser calculado e usado para se medir o desempenho do sistema. A medida quantitativa do desempenho de um sistema é necessária para a operação de sistemas de controle adaptativos modernos, para a otimização paramétrica de sistemas de controle e para o projeto ótimo de sistemas (PINTO, 2014).

Um índice de desempenho é uma medida quantitativa do desempenho de um sistema e é escolhido de modo que a ênfase seja dada às especificações importantes dos sistemas.

Um sistema é considerado um sistema de controle ótimo quando os parâmetros do sistema são ajustados de modo que o índice alcance um valor extremo, comumente um valor mínimo. Um índice de desempenho, para ser útil, deve ser um número sempre positivo ou nulo. Então, o melhor sistema é definido como o sistema que minimiza o índice utilizado. Alguns dos índices mais comuns são:

- Integral do quadrado do erro: ISE (do inglês, *Integral Square Error*)

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt \quad (3.24)$$

- Integral do valor absoluto do erro: IAE (do inglês, *Integral Absolute Error*)

$$IAE = \int_0^T |e(t)|dt \quad (3.25)$$

Para reduzir a contribuição de grandes erros iniciais no valor da integral de desempenho, bem como enfatizar erros que acontecem mais tarde na resposta, tem sido proposto o índice ITAE.

- Integral do tempo multiplicado pelo valor absoluto do erro: ITAE (do inglês, *Integral of Time Multiplied by Absolute Error*)

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)|dt \quad (3.26)$$

- Integral do tempo multiplicado pelo quadrado do erro: ITSE (do inglês, *Integral of Time Multiplied by the Square Value of Error*)

$$ITSE = \int_0^T te^2(t)dt \quad (3.27)$$

Seborg D. E. Edgar (2011) explica que o critério ISE penaliza grandes erros, enquanto o critério ITAE penaliza erros que persistem por longos períodos de tempo. Em geral, o ITAE é o critério mais utilizado, porque geralmente resulta na forma mais conservadora das configurações do controlador. Em contraste, o critério ISE fornece as configurações mais agressivas, enquanto o critério IAE tende a produzir configurações de controlador que estão entre os critérios ITAE e ISE.

4 Simulação e Resultados

Neste capítulo serão descritos os resultados obtidos por meio das simulações realizadas pelo *software* MATLAB®.

1. Como primeiro passo, será realizada a avaliação dos desacopladores para os modelos de moagem de Ivezić e Petrović (2003), Craig e MacLeod (1995) e Reis (2018);
2. Posteriormente, será analisada a eficácia do desacoplador por meio dos índices de desempenho, tais como IAE, ITAE e ISE;
3. Empregando as sintonias para controlador PI (como IMC, SIMC, ITAE), será desenvolvido o controlador para a planta apresentada em cada modelo;
4. Por fim, todo o sistema (controle, planta e desacoplador) será analisado.

Espera-se com esse capítulo compreender os pontos de atuação que não permitem o pleno funcionamento de um desacoplador, e futuramente buscar soluções para os problemas encontrados. Para os desacopladores que responderem adequadamente, buscar construir um sistema de controle para o processo de moagem em estudo.

4.1 Avaliação dos Desacopladores para o modelo de Ivezić e Petrović (2003)

4.1.1 Desacoplador Estático

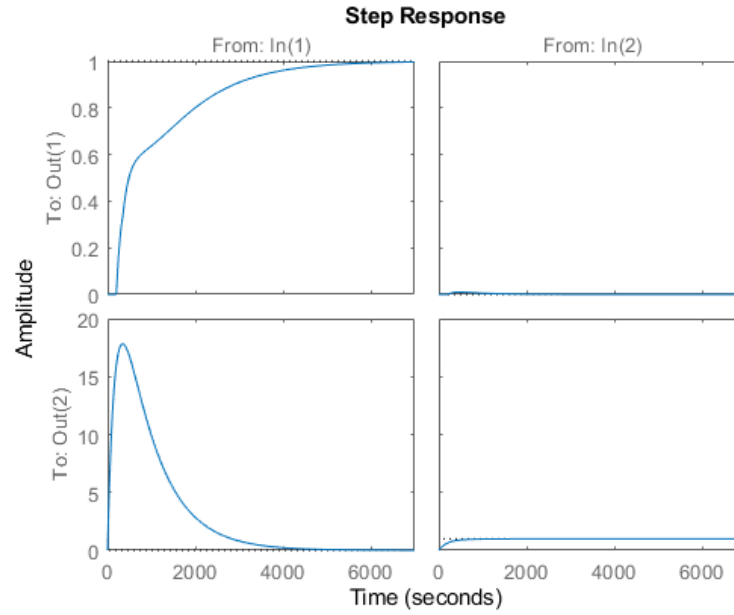
O desacoplador estático caracteriza-se como um desacoplador mais simples, de forma que apenas as interações em regime permanente são consideradas. Levando-se em conta somente os ganhos em regime (ganho DC) das funções de transferência do sistema, ou seja, o equivalente a se fazer $s = 0$, foi obtido para o modelo de Ivezić e Petrović (2003) o seguinte desacoplador estático

$$D(s) = \begin{bmatrix} -0.9743 & 0.0024 \\ 31.172 & 0.7998 \end{bmatrix}.$$

De forma a visualizar a sua resposta ao desacoplamento, uma resposta ao degrau foi implementada e apresentada na Figura 13.

O desacoplador implementado não obteve uma resposta satisfatória. Como você ser visto na Figura 13, para o item D_{12} há um alto pico em aproximadamente 18 de

Figura 13 – Desacoplador estático para o modelo de Ivezić e Petrović (2003).



Fonte: Da Autora.

amplitude e demora para o estabelecimento em regime permanente. Para verificação do desempenho do desacoplador, são apresentados na Tabela 4 os índices de desempenho.

Tabela 4 – Índices de desempenho para o desacoplador estático para o modelo de Ivezić e Petrović (2003) .

Desacoplador	Índice IAE	Índice ITAE	Índice ISE
D_{12}	1321	$1.279 \cdot 10^6$	14834
D_{21}	0.5868	597.9	0.0036096

Analisando a Tabela 4, pela comparação entre os valores dos desacopladores D_{12} e D_{21} , ou seja, os quais se espera o desacoplamento e obtenção dos seus valores tendendo a zero no momento de uma resposta ao degrau, é possível perceber que a melhor resposta foi obtida pelo desacoplador D_{21} que obteve em todos os casos de cálculo dos índices IAE, ITAE e ISE, um menor valor comparado ao outro desacoplador D_{12} , ao qual apresentado na Figura 13 uma resposta não satisfatória.

4.2 Projeto dos Controladores para o modelo de Ivezić e Petrović (2003)

4.2.1 Controle com Desacoplador Estático por meio da Sintonia IMC

A primeira abordagem no controle com desacoplamento a ser realizada é o projeto do bloco desacoplador $D(s)$, encontrada na sessão anterior. Para realizar as técnicas de sintonia PI ou PID serão utilizados o modelo $G(s)$ para definir os parâmetros do controle K_P , K_I e K_D . Com o desacoplamento realizado, precisamos apenas encontrar os controles $C_1(s)$ e $C_2(s)$ advindos das malhas $G_{11}(s)$ e $G_{22}(s)$.

Projetando um controlador C_1 por meio da função de transferência

$$G_{11}(s) = \frac{-0.9362}{1164s + 1} e^{-350s} \quad (4.1)$$

e utilizando o caso G da Tabela 2, define-se

$$K = 1; \quad (4.2)$$

$$\theta = 350; \quad (4.3)$$

$$\tau = 1164; \quad (4.4)$$

$$\tau_c = \theta; \quad (4.5)$$

e encontram-se os parâmetros $K_P = 2.16$, $K_I = 0.00186$ e $K_D = 0$, configurando-se como um controlador PI com uma função de transferência como

$$C_1(s) = \frac{2.163s + 0.001858}{s} \quad (4.6)$$

Projetando um controlador C_2 através da função de transferência

$$G_{22}(s) = \frac{1.1405}{179s + 1} \quad (4.7)$$

e utilizando o caso A da Tabela 2, define-se

$$k = 1 \quad (4.8)$$

$$\tau = 179 \quad (4.9)$$

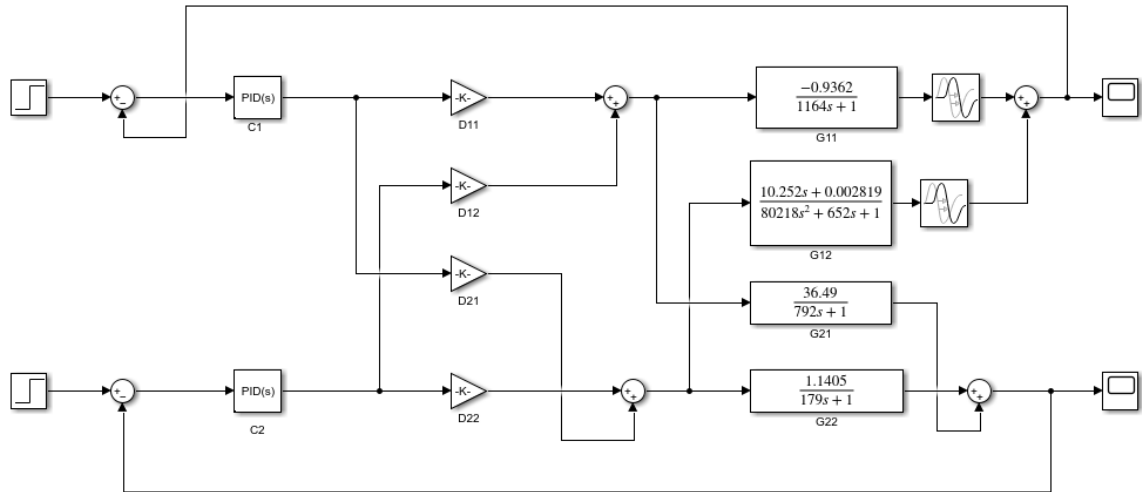
$$\tau_c = 0.1 \cdot \tau \quad (4.10)$$

e encontra-se os parâmetros $K_P = 10$, $K_I = 0.0559$ e $K_D = 0$, configurando-se como um controlador PI, com uma função de transferência para o controlador como

$$C_2(s) = \frac{10s + 0.05587}{s} \quad (4.11)$$

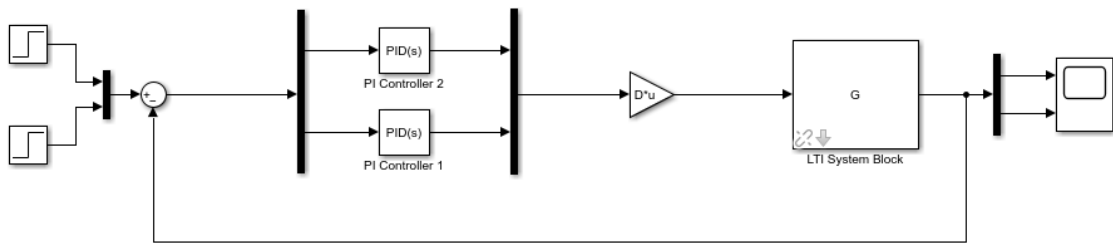
As Figuras 14 e 15 demonstram duas formas de se apresentar a simulação do controle junto ao bloco desacoplador e planta por meio do *software* Simulink. Na Figura 14, é possível visualizar de forma mais detalhada as conexões necessárias.

Figura 14 – Modelo em Simulink para a simulação do modelo de Ivezić e Petrović (2003) para os controladores $C_1(s)$ e $C_2(s)$ com sintonia IMC e desacoplador estático.



Fonte: Da Autora.

Figura 15 – Segunda opção para simulação por meio do Simulink do projeto controlador - desacoplador para o modelo de Ivezić e Petrović (2003).



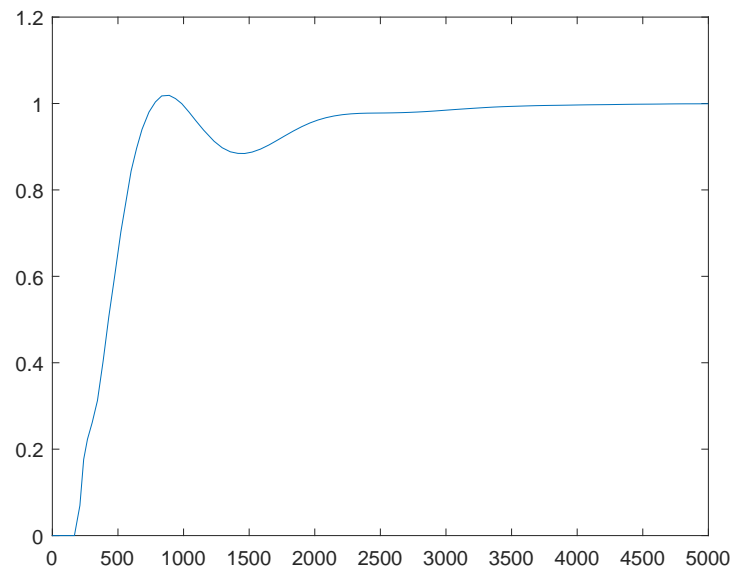
Fonte: Da Autora.

A partir da implementação do sistema no *software* Simulink para visualização da resposta mediante o controlador e desacoplador para o modelo de Ivezić e Petrović (2003), obtemos a resposta de $Y_1(s)$ e $Y_2(s)$ apresentadas nas Figuras 16 e 17.

Como citado no Capítulo 3, o desempenho de uma malha de controle é analisado a partir da resposta em regime permanente do sistema, ao qual foi aplicado um degrau unitário de referência.

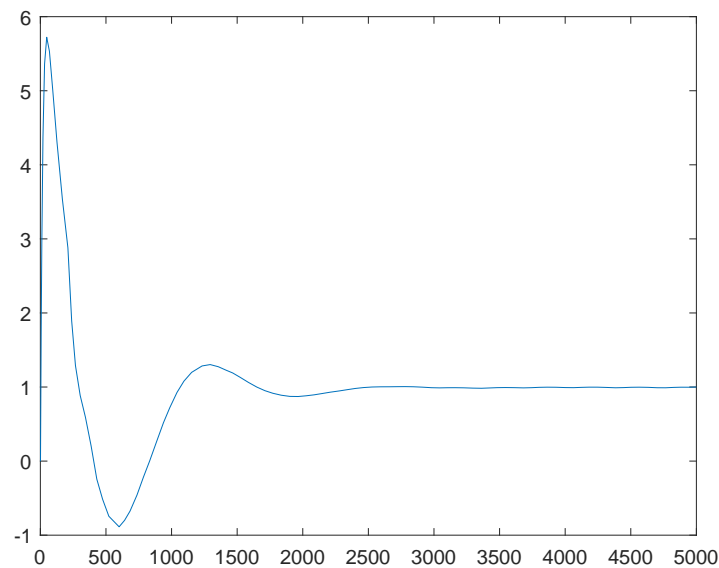
Comparando-se as respostas obtidas, percebe-se o melhor funcionamento do controlador $C_1(s)$, pois na saída $Y_1(s)$, tem-se uma oscilação mas uma rápida resposta ao

Figura 16 – Saída $Y_1(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC.



Fonte: Da Autora.

Figura 17 – Saída $Y_2(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC.



Fonte: Da Autora.

retornar ao *setpoint* definido. Ao contrário, a saída $Y_2(s)$ apresenta um alto pico principal e oscilações antes de retornar ao *setpoint*.

Percebe-se que apesar das diferenças entre as saídas, elas entram em regime permanente com valores muito próximos de tempo de assentamento (em que o tempo necessário

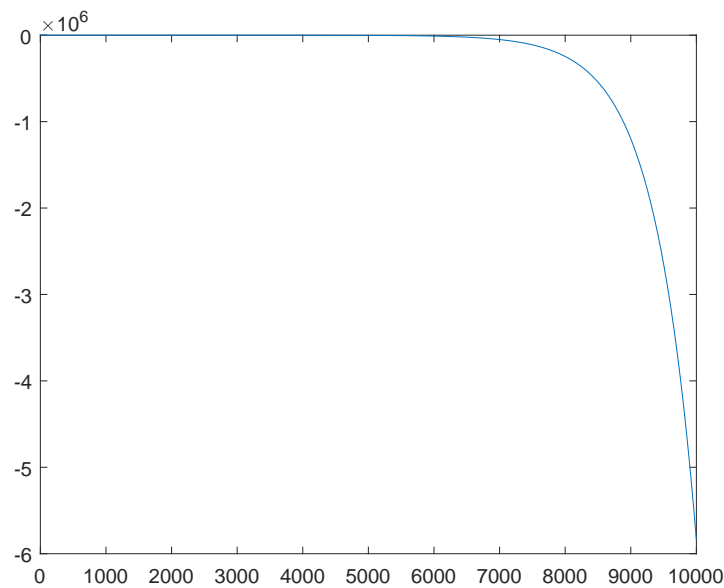
para que as oscilações amortecidas do regime transitório entrem e permaneçam no interior de uma faixa de valores de $\pm 2\%$ em torno do valor de estado estacionário). De forma geral, obteve-se uma resposta condizente e bastante satisfatória para os controles apresentados com a inclusão dos desacopladores estáticos, sabendo que são os tipos de desacopladores mais simples em estudo.

4.2.2 Controle sem desacoplador através da Sintonia IMC

Para fins de comparação, será apresentado a resposta a um degrau para o sistema sem desacoplamento. De forma a manter o mesmo critério de comparação, os parâmetros dos controladores foram mantidos.

Para esta simulação foi reutilizado o sistema apresentado na Figura 15, alterando o bloco do desacoplador para uma matriz identidade 2×2 , de forma que o bloco não afetasse o sistema como anteriormente. As respostas $Y_3(s)$ e $Y_4(s)$ são apresentadas respectivamente nas Figuras 18 e 19.

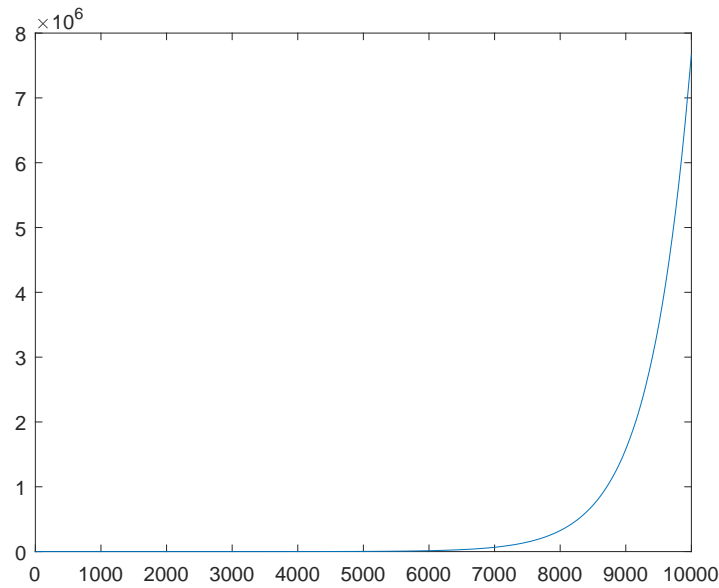
Figura 18 – Saída $Y_3(s)$ obtido através do controle sem desacoplador pelo método de sintonia IMC.



Fonte: Da Autora.

Nas respostas apresentadas é possível analisar que as respostas não obtiveram um resultado estimado como as representadas com a inclusão dos desacopladores nas malhas. A resposta em regime permanente para as duas saídas não tenderam ao *setpoint* como na configuração anterior, tendendo a instabilidade. Pelas respostas obtidas nessa simulação, afirma-se a viabilidade do uso dos desacopladores por serem de fácil implementação e por descreverem uma resposta satisfatória ao sistema de controle.

Figura 19 – Saída $Y_4(s)$ obtido através do controle sem desacoplador pelo método de sintonia IMC.



Fonte: Da Autora.

4.3 Avaliação dos Desacopladores para o modelo de Reis (2018)

4.3.1 Desacoplador Estático

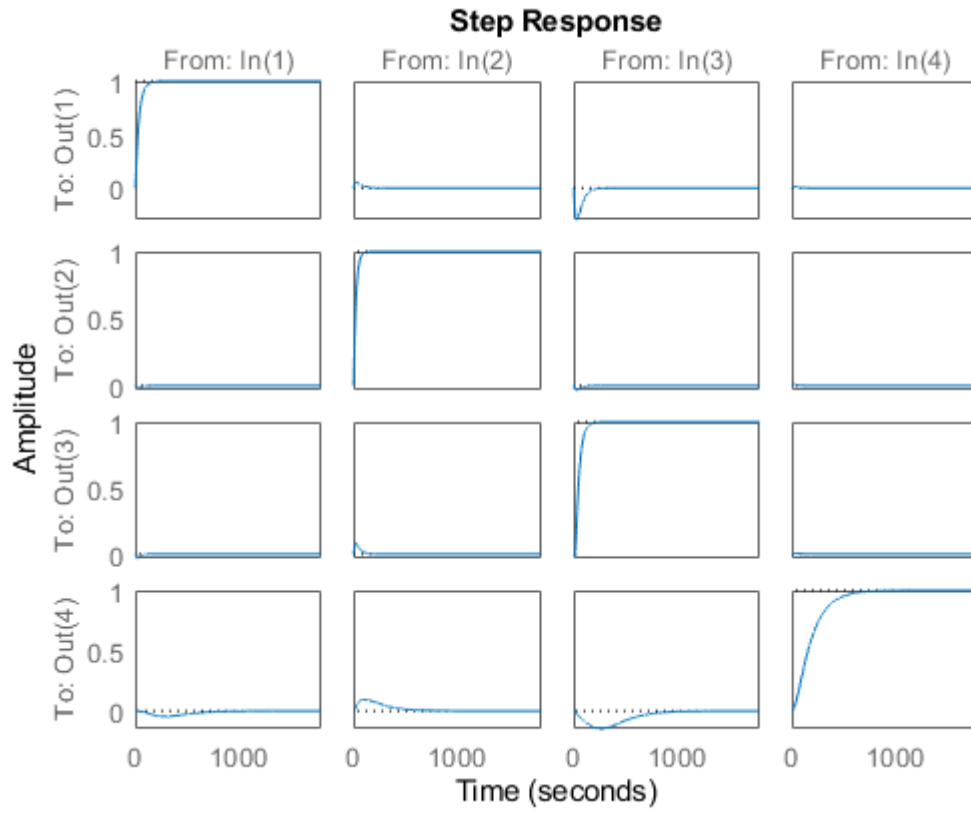
Realizando a simulação para obtenção do desacoplador estático para o modelo de Reis (2018), foram obtidos os seguintes valores da matriz de desacoplador

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

Por meio da Figura 20 é possível visualizar a resposta ao degrau empregando o modelo $G(s)$ e o desacoplador obtido $D(s)$.

O desacoplador implementado obteve uma resposta satisfatória. Analisando a Figura 20, nota-se que, nas respostas fora da diagonal principal, todos os valores tenderam a zero em regime permanente, comprovando o desacoplamento das variáveis. Para verificação do desempenho do desacoplador, na Tabela 5, são apresentados os índices de desempenho.

Figura 20 – Desacoplador estático para o modelo de Reis (2018).



Fonte: Da Autora.

Tabela 5 – Índices de Desempenho para o Desacoplador Estático para o Modelo de Reis (2018).

Desacoplador	Índice IAE	Índice ITAE	Índice ISE
D12	21.4303	1347.1	0.7955
D13	119.8690	8022	23.58
D14	4.3750	234.4377	0.0403
D21	5.3252	321.0576	0.0567
D23	9.9930	594.9371	0.2014
D24	2.7722	123.3734	0.0191
D31	6.8079	314.1401	0.1432
D32	23.5873	1219.3	1.2419
D34	1.6953	86.9582	0.0066
D41	96.2679	3862.1	3.0471
D42	134.3125	3204.3	8.3218
D43	322.6486	119850	32.9674

4.4 Projeto dos Controladores para o modelo de Reis (2018)

4.4.1 Controle com Desacoplador Estático por meio da Sintonia IMC

Como utilizado nas sessões anteriores, para encontrar os parâmetros dos controladores para a planta do modelo de Reis (2018), serão utilizadas as funções $G_{11}(s)$, $G_{22}(s)$, $G_{33}(s)$ e $G_{44}(s)$ para a construção dos controladores $C_1(s)$, $C_2(s)$, $C_3(s)$ e $C_4(s)$, respectivamente.

Projetando o controlador $C_1(s)$ por meio da função de transferência

$$G_{11}(s) = \frac{0.032}{(2.307s + 1)(2.307s + 1)}e^{-3s} \quad (4.12)$$

utilizando o modelo K da Tabela 2 e definindo os parâmetros

$$K = 1; \quad (4.13)$$

$$\theta = 3; \quad (4.14)$$

$$\tau_1 = 2.307; \quad (4.15)$$

$$\tau_2 = 2.307; \quad (4.16)$$

$$\tau_c = \theta; \quad (4.17)$$

e encontram-se os parâmetros $K_P = 0.769$, $K_I = 0.167$ e $K_D = 0.887$, com uma função de transferência para o controlador como

$$C_1(s) = \frac{0.887s^2 + 0.769s + 0.1667}{s} \quad (4.18)$$

Projetando o controlador $C_2(s)$ através da função de transferência

$$G_{22}(s) = \frac{-0.003}{4.615s + 1}e^{-95s} \quad (4.19)$$

utilizando o modelo G da Tabela 2 e definindo os parâmetros

$$K = 1; \quad (4.20)$$

$$\theta = 95; \quad (4.21)$$

$$\tau = 4.615; \quad (4.22)$$

$$\tau_c = \theta; \quad (4.23)$$

encontra-se os parâmetros $K_P = 0.366$, $K_I = 0.00702$ e $K_D = 0.563$, com uma função de transferência para o controlador como

$$C_2(s) = \frac{0.5626s^2 + 0.3657s + 0.007018}{s} \quad (4.24)$$

Projetando o controlador $C_3(s)$ através da função de transferência

$$G_{33}(s) = \frac{-0.017}{(32.354s + 1)(9.185s + 1)} e^{-15s} \quad (4.25)$$

utilizando o modelo K da Tabela 2 e definindo os parâmetros

$$K = 1; \quad (4.26)$$

$$\theta = 15; \quad (4.27)$$

$$\tau_1 = 32.3545; \quad (4.28)$$

$$\tau_2 = 9.185; \quad (4.29)$$

$$\tau_c = \theta; \quad (4.30)$$

encontra-se os parâmetros $K_P = 1.38$, $K_I = 0.0333$ e $K_D = 9.91$, com uma função de transferência para o controlador como

$$C_3(s) = \frac{9.906s^2 + 1.385s + 0.03333}{s} \quad (4.31)$$

Projetando o controlador $C_4(s)$ através da função de transferência

$$G_{44}(s) = \frac{-1.265}{(127.877s + 1)(61.354s + 1)} e^{-15s} \quad (4.32)$$

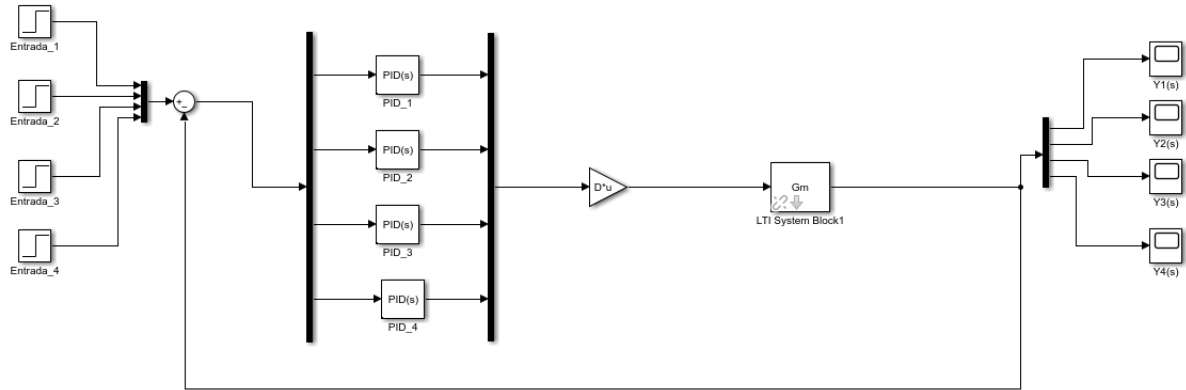
encontra-se os parâmetros $K_P = 6.31$, $K_I = 0.0333$ e $K_D = 262$, com uma função de transferência para o controlador como

$$C_4(s) = \frac{261s^2 + 6.308s + 0.0333}{s} \quad (4.33)$$

Na Figura 21, apresenta-se a simulação do controle junto ao bloco desacoplador e planta por meio do *software* Simulink a fim de obter as respostas do sistema para análise.

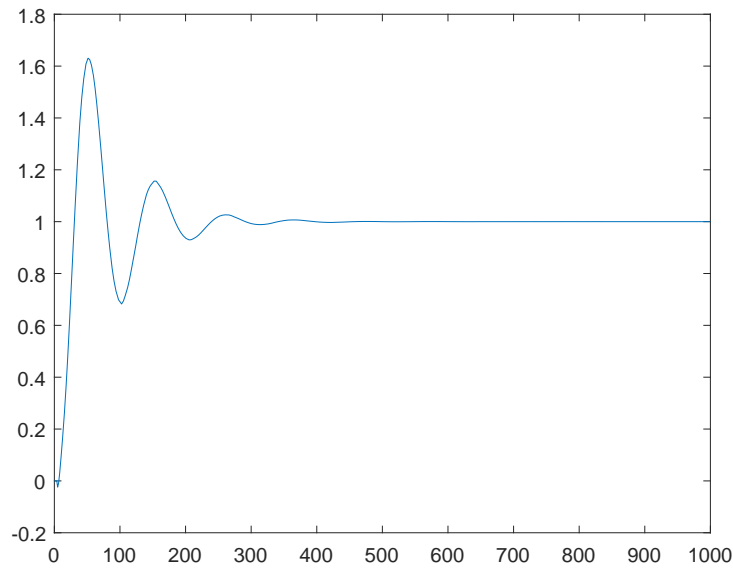
Analisando a Figura 22, percebe-se um alto sobressinal na resposta quando comparada às saídas mostradas nas Figuras 23-25. Uma discussão que será levada à continuidade deste trabalho é uma opção de definir o cálculo dos ganhos K para a construção dos controladores advindos da realização entre a multiplicação dos ganhos entre a malha (do

Figura 21 – Simulação por meio do Simulink do projeto controlador - desacoplador para o modelo de Reis (2018).



Fonte: Da Autora.

Figura 22 – Saída $Y_1(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC



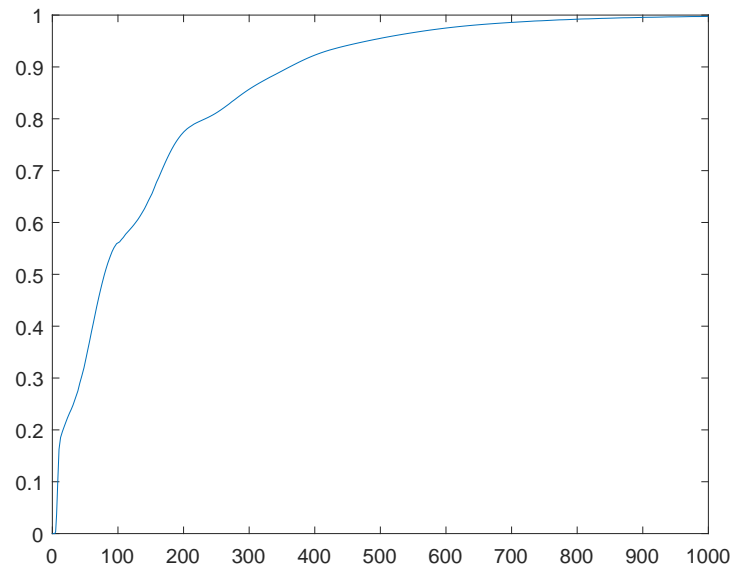
Fonte: Da Autora.

projeto) e do desacoplador, a fim de analisar, talvez, um menor sobressinal como por exemplo para esta resposta.

Em comparação, a saída $Y_2(s)$, apresenta um sistema superamortecido (em que não apresenta resposta oscilatória) mas que demonstra uma resposta mais lenta comparada às outras saídas, em que seu tempo de assentamento varia entre 700 a 800 segundos em que as demais apresentaram um tempo de assentamento entre 300 a 400s.

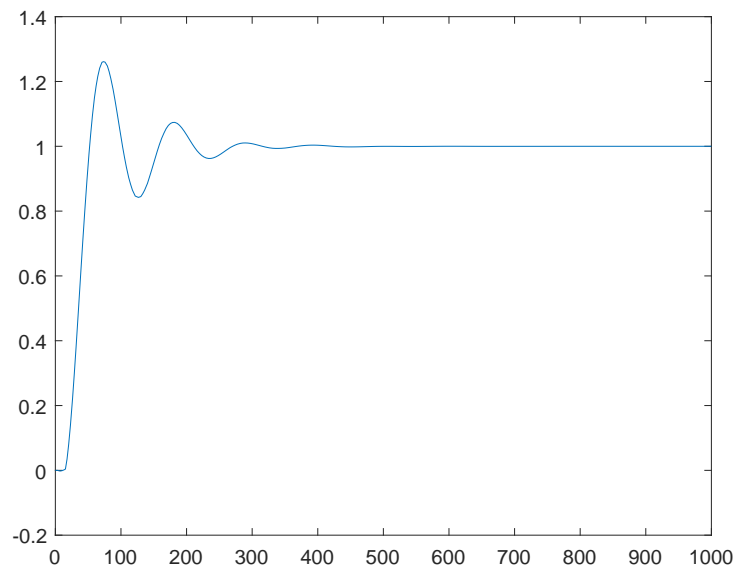
As saídas $Y_3(s)$ e $Y_4(s)$ apresentam uma semelhança visual, ambas apresentam oscilações antes de responderem ao *setpoint* estabelecido, e com um máximo sobressinal

Figura 23 – Saída $Y_2(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC



Fonte: Da Autora.

Figura 24 – Saída $Y_3(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC

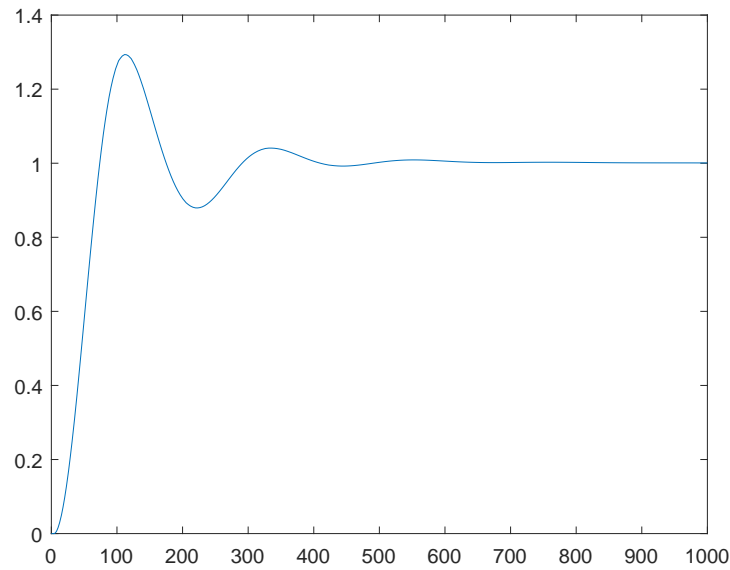


Fonte: Da Autora.

aproximado a 1.3.

De forma geral, os controladores obtiveram um bom resultado com o desacoplador estático. Como descrito, espera-se em trabalhos futuros avaliar e comparar as respostas com outras estratégias de projeto, sobretudo em relação ao máximo sobressinal e o tempo

Figura 25 – Saída $Y_4(s)$ obtido através do controle com desacoplador estático pelo método de sintonia IMC



Fonte: Da Autora.

de assentamento.

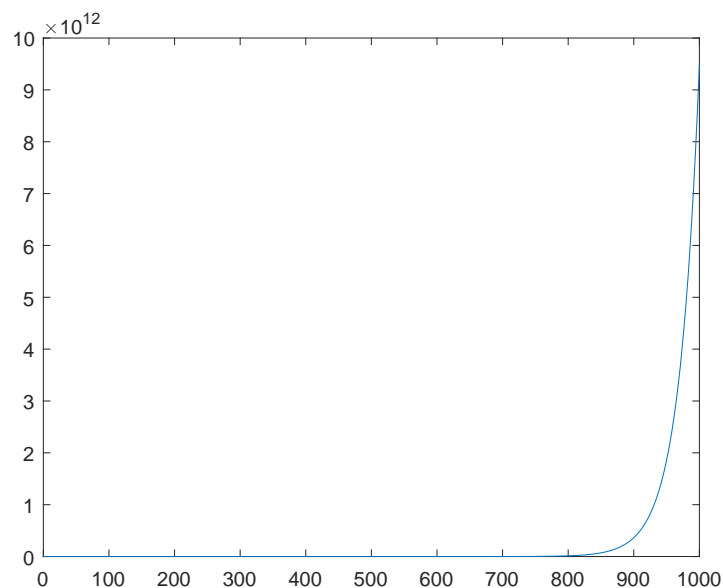
Objetivando apresentar uma comparação entre as respostas obtidas com um sistema sem desacoplador, foram simuladas, como para a sessão anterior, uma simulação considerando a matriz do desacoplador igual à identidade.

Para as quatro saídas $Y_1(s)$, $Y_2(s)$, $Y_3(s)$ e $Y_4(s)$, há uma situação de instabilidade. De forma geral, é possível considerar que a utilização de desacopladores no projetos em estudo apresentam ótimos resultados comparados aos casos em que os desacopladores não são inseridos na malha.

Portanto, para a primeira etapa deste trabalho, pode-se levantar alguns pontos sobre as simulações. Os atrasos dos sistemas nas malhas dos modelos estudados interferiram na construção dos desacopladores apresentados no Capítulo 3 (ideal, simplificado e invertido). Para fins de comparação, portanto, foram realizados as simulações desconsiderando a presença do desacoplador, de modo a visualizar o propósito do uso de desacopladores.

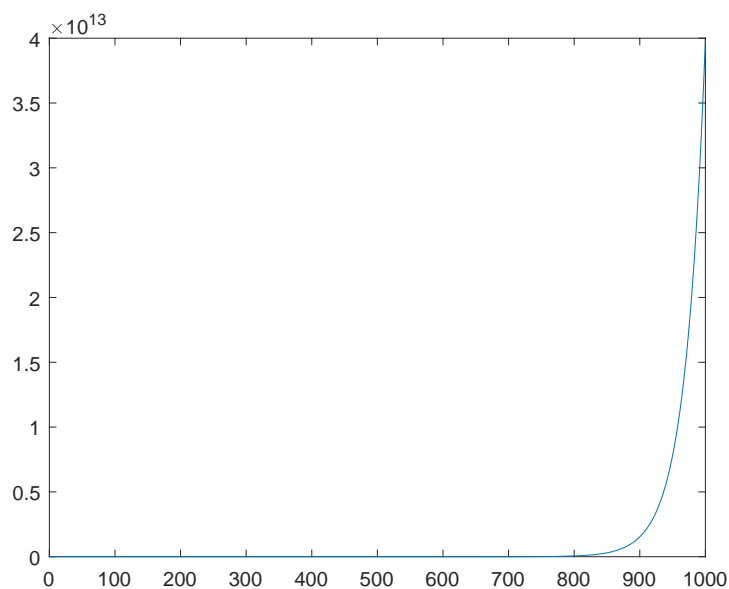
Foi possível perceber também neste capítulo poucos avanços em relação ao modelo de Craig e MacLeod (1995). Acredita-se que o fator que impossibilitou o desenvolvimento dos desacopladores seja a função integradora presente, e espera-se encontrar soluções para este problema na continuidade deste trabalho.

Figura 26 – Saída $Y_1(s)$ obtido através do controle sem desacoplador estático pelo método de sintonia IMC



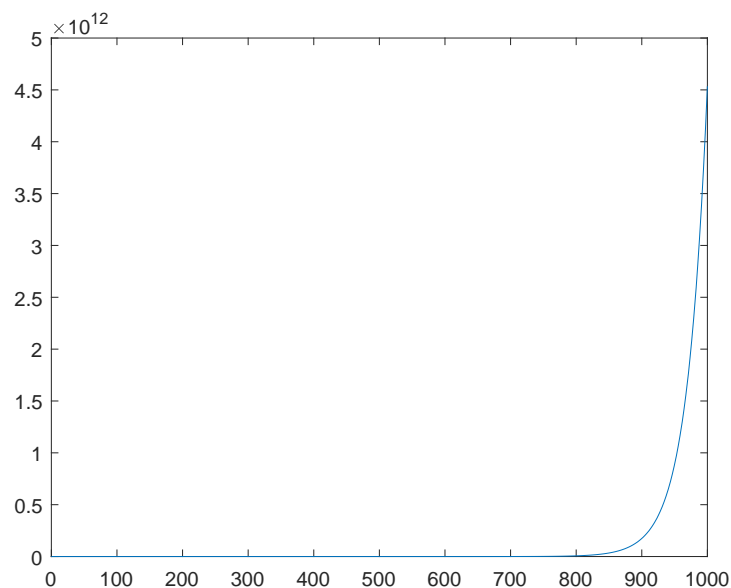
Fonte: Da Autora.

Figura 27 – Saída $Y_2(s)$ obtido através do controle sem desacoplador estático pelo método de sintonia IMC



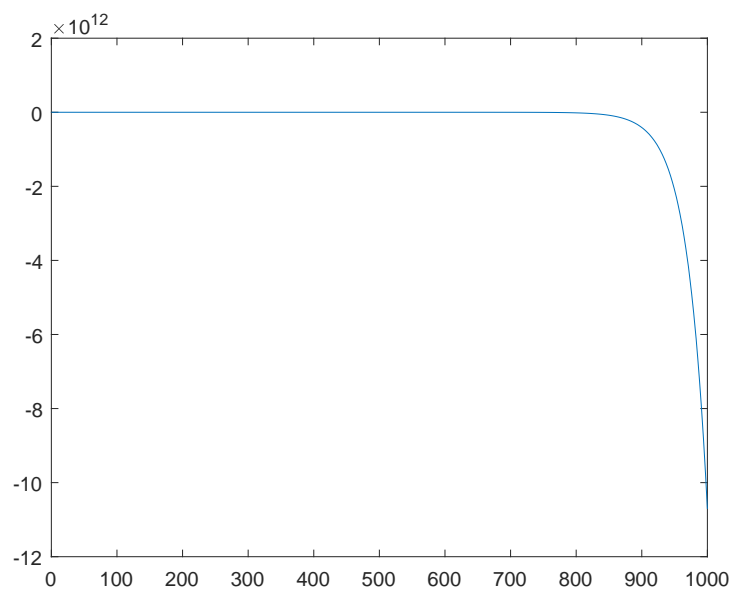
Fonte: Da Autora.

Figura 28 – Saída $Y_3(s)$ obtido através do controle sem desacoplador estático pelo método de sintonia IMC



Fonte: Da Autora.

Figura 29 – Saída $Y_4(s)$ obtido através do controle sem desacoplador estático pelo método de sintonia IMC



Fonte: Da Autora.

5 Conclusão

Nesta primeira etapa da dissertação, foi realizado um método de pesquisa descritiva a fim de buscar na literatura a aplicação de desacopladores em modelos MIMO com o intuito de realizar o desacoplamento das variáveis para aplicação de controladores PI SISO na planta.

No Capítulo 2, foi descrito o processo de moagem na mineração e apresentado os modelos que seriam utilizados para aplicação do conjunto desacoplador - controlador.

No Capítulo 3, são revistos conceitos importantes para compreensão do leitor a fim de entender o desenvolvimento de obtenção de um controlador além das descrições dos desacopladores e suas características.

No Capítulo 4, iniciou-se o desenvolvimento em Matlab e Simulink nos modelos de Ivezić e Petrović (2003) e Reis (2018) por meio da utilização do desacoplador estático e a construção de controladores utilizando a sintonia IMC para os dois casos. Foi realizado ainda uma comparação entre a resposta com um desacoplador na malha e sem o desacoplador obtendo-se como esperado uma melhor resposta ao sistema desacoplado.

Para continuação deste trabalho, podem ser destacadas algumas sugestões de desenvolvimento:

- Desenvolvimento da aplicação dos demais desacopladores aos modelos em estudo;
- Articulação e compreensão sobre métodos de desenvolvimento a fim 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 e MacLeod (1995).

Referências

- BAETA Éric José de S. Implementação e análise comparativa de técnicas de controle pid em sistemas distribuídos e centralizados. 2006. 19, 20, 21
- BARRETO, M. L. et al. Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o brasil. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 2001. 5
- CASTRO, F. F. d. Projeto de controladores pi robusto para processos de moagem empregando desigualdades matriciais lineares. 2020. 1, 9, 12
- CHEN, X. song et al. Application of model predictive control in ball mill grinding circuit. *Minerals Engineering*, v. 20, n. 11, p. 1099–1108, 2007. ISSN 0892-6875. 1, 7
- COETZEE, L. C.; CRAIG, I.; KERRIGAN, E. Nonlinear model predictive control of a run-of-mine ore milling circuit. *IFAC Proceedings Volumes*, Elsevier, v. 41, n. 2, p. 10620–10625, 2008. 7, 8
- CRAIG, I.; MACLEOD, I. Specification framework for robust control of a run-of-mine ore milling circuit. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v. 3, n. 5, p. 621–630, 1995. 10, 3, 9, 29, 41, 44
- DUTRA, R. Beneficiamento de minerais industriais. In: *49º Congresso brasileiro de cerâmica, São Pedro-SP*. [S.l.: s.n.], 2005. 6
- EUZÉBIO, L. R. . Ênio J. . T. Hardware-in-the-loop testing platform of a predictive controller applied to a simulated regrinding circuit. *Automining: International Congress on Automation in Mining*, 2018. 1
- FARIAS, C. E. G. Mineração e meio ambiente no brasil. *Relatório do CGEE/PNUD*, v. 76, p. 2, 2002. 5
- FRANCHI, C. M. *Controle de Processos Industriais: Princípios e Aplicações*. [S.l.]: Saraiva, 2011. 1, 13, 23, 24
- IVEZIĆ, D. D.; PETROVIĆ, T. B. New approach to milling circuit control—robust inverse nyquist array design. *International journal of mineral processing*, Elsevier, v. 70, n. 1-4, p. 171–182, 2003. 6, 8, 11, 3, 9, 29, 30, 31, 32, 44
- LUZ, A. B. d.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. In: . [S.l.]: CETEM/MCTIC, 2018. 6, 7
- OLIVIER, L. E.; CRAIG, I. K. A survey on the degree of automation in the mineral processing industry. In: *2017 IEEE AFRICON*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 404–409. 2
- PEREIRA JR., M.; EUZÉBIO, T. A. M. Controlador *FUZZY* multivariável aplicado a um simulador de circuito de moagem. 2017. 1
- PINTO, J. E. M. G. *Aplicação prática do método de sintonia de controladores PID utilizando o método do relé com histerese*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014. 27

- REIS, L. A. Controle preditivo por modelo de um circuito simulado de remoagem de minério de ferro. 2018. 6, 8, 10, 11, 3, 9, 29, 35, 36, 37, 39, 44
- ROSA, A. C.; OLIVEIRA, P. S. de; DONDA, J. D. Comparing ball and vertical mills performance: An industrial case study. In: *XXVII International Mineral Processing Congress*. [S.l.: s.n.], 2014. v. 8, p. 44. 1
- SEBORG D. E. EDGAR, T. F. . M. D. A. *Process Dynamics and Control*. New York: John Wiley Sons, 2011. 14, 15, 16, 17, 24, 25, 28
- SKOGESTAD, S. Simple analytic rules for model reduction and pid controller tuning. *Journal of Process Control*, v. 13, n. 4, p. 291–309, 2003. ISSN 0959-1524. 26
- WILLS, B. A.; FINCH, J. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2015. 7