



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

2022

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 à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga

Universidade Federal de Ouro Preto

João Monlevade

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C129a Café, Grazielle Amanda do Carmo.
Análise da eficiência de desacopladores e técnicas de projeto de controladores PI SISO para processos de moagem. [manuscrito] / Grazielle Amanda do Carmo Café. - 2022.
59 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Beneficiamento de minério. 2. Controle automático. 3. Controladores PID. 4. Ferro - Minas e mineração. 5. Minérios de ferro. I. Braga, Márcio Feliciano. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Grazielle Amanda do Carmo Café

Análise da eficiência de desacopladores e técnicas de projeto de controladores PI SISO para processos de moagem

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Aprovada em 21 de junho de 2022

Membros da banca

D.Sc. - Márcio Feliciano Braga - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

D.Sc - Wendy Yadira Eras Herrera - (Universidade Federal de Ouro Preto)

D.Sc - Rodrigo Augusto Ricco - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Márcio Feliciano Braga, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/07/2022



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Feliciano Braga, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/07/2022, às 18:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0356060** e o código CRC **4FA5E9B9**.

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.

“Somos maior, nos basta só sonhar, seguir. Vai, levanta e anda!”

Emicida

Resumo

Minas Gerais é o estado que mais possui reservas minerais, sendo de suma importância para a economia do estado, especialmente a extração de minério de ferro. A mineração caracteriza a atual configuração da sociedade, dado que diversos produtos são provenientes dessa atividade. Sobretudo, é uma atividade de alto valor energético. Nesse sentido, 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 o 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 reside 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 utilizar estratégias sofisticadas para lidar com o problema, como 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 sistemas de moagem, 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 desempenho e a averiguação entre o conjunto desacoplador-controlador. Em busca de controles satisfatórios, foi avaliado em ambiente simulacional para os modelos em estudo, a aplicação do Desacoplador Estático e Controle Descentralizado. Para cada um destes, posteriormente, foi avaliada sua resposta por índices de desempenho e realizado a comparação entre as sintonias de controle, como o Método do Modelo Interno (IMC, do inglês *Internal Model Control*), Método do Modelo Interno Simples (SIMC, do inglês *Simple Internal Model Control*) e o Método da Síntese Direta.

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

Abstract

Minas Gerais is the state that has the most mineral reserves, and it is of the utmost importance for the state's economy, especially 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. In this sense, 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 set by the designer. One of the stages that consumes the most energy in the mining process is grinding, and its cost varies according to the size of the ore particles resulting from the mineral beneficiation process. The difficulty of implementing control loops in milling processes lies in their complex dynamics, once 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 use sophisticated strategies to deal with the problem, such as inserting decouplers in the process. In this paper, it is sought to investigate the performance of different types of decouplers for MIMO systems, using three different milling system models as verification, in order to describe the difficulties and determining factors for each type of decoupler. In addition, it seeks to evaluate efficiency by means of performance indices and ascertainment between the decoupler-controller assembly. In search of satisfactory controls, the application of Static Decoupler and Decentralized Control was evaluated in a simulational environment for the models under study. For each of these, afterwards, their responses were evaluated by performance indexes and a comparison was made between the control tunings, such as the Internal Model Method (IMC), the Simple Internal Model Control Method (SIMC), and the Direct Synthesis Method.

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

Lista de ilustrações

Figura 1 – Circuito de moagem.	2
Figura 2 – Diagrama típico de tratamento de minério.	7
Figura 3 – Exemplo de circuito de moagem.	8
Figura 4 – Circuito de moagem da mina de cobre de Majdanpek (Sérvia). Marcado em amarelo, variáveis manipuladas do sistema e em azul variáveis controladas do processo.	9
Figura 5 – Diagrama esquemático do circuito de controle da planta de moagem. Marcado em amarelo, variáveis manipuladas do sistema e em azul variáveis controladas do processo.	10
Figura 6 – Fluxograma do concentrado 3 da Samarco.	11
Figura 7 – Diagrama esquemático do controle em cascata aplicado ao circuito de Remoagem.	12
Figura 8 – Processo de controle SISO e MIMO.	16
Figura 9 – Diagrama de blocos para um sistema multimalhas.	18
Figura 10 – Desacoplador ideal.	20
Figura 11 – Desacoplador simplificado.	21
Figura 12 – Desacoplador invertido.	22
Figura 13 – Estratégias de controle por realimentação.	27
Figura 14 – Desacoplador estático para o modelo de Ivezić e Petrović (2003).	32
Figura 15 – 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.	34
Figura 16 – Segunda opção para simulação por meio do Simulink do projeto controlador - desacoplador para o modelo de Ivezić e Petrović (2003).	34
Figura 17 – Saídas obtidas por meio do controle com Desacoplador Estático pelo método da sintonia IMC.	35
Figura 18 – Saídas utilizando os métodos de sintonia IMC (em azul), SIMC (em vermelho) e SD (em laranja).	35
Figura 19 – Saídas obtidas pelo controlador sem desacoplador pelo método de sintonia IMC.	36
Figura 20 – Saídas pelo método do Controle Descentralizado utilizando as sintonias IMC (em azul), SIMC (em vermelho) e SD (em laranja).	37
Figura 21 – Comparação entre as abordagens de controle para processos MIMO. A curva em azul refere-se à técnica de Desacoplador Estático e a curva em vermelho refere-se à técnica de Controle Descentralizado.	38
Figura 22 – Desacoplador estático para o modelo de Craig e MacLeod (1995).	39

Figura 23 – Sistema desacoplado para o modelo de Craig e MacLeod (1995).	40
Figura 24 – Controle para o modelo de Craig e MacLeod (1995) utilizando o método IMC.	42
Figura 25 – Comparação entre as sintonias de controle IMC (em azul) e SIMC (em vermelho) para o modelo de Craig e MacLeod (1995).	43
Figura 26 – Em azul, saída $Y_1(s)$ utilizando os ganhos LMI propostos no trabalho de Castro (2020) e em vermelho, saída $Y_1(s)$ proposta com os ganhos pelo método IMC pela autora.	44
Figura 27 – Em azul, saída $Y_1(s)$ utilizando os ganhos LMI propostos no trabalho de Castro (2020) e em vermelho, saída $Y_1(s)$ proposta com os ganhos por intermédio da função de transferência aproximada obtida pelo método IMC.	45
Figura 28 – Saída utilizando o caso de Controle Descentralizado para o método IMC.	46
Figura 29 – Desacoplador estático para o modelo de Reis (2018).	47
Figura 30 – Simulação por meio do Simulink do projeto controlador-desacoplador para o modelo de Reis (2018).	50
Figura 31 – Comparativo entre as saídas do sistema de controle IMC (em azul), SIMC (em vermelho) e Síntese Direta (em laranja) com desacoplador estático.	51
Figura 32 – Saída obtida por meio do controle sem desacoplador pelo método de sintonia IMC.	52
Figura 33 – Saídas através do controle descentralizado utilizando a sintonia IMC. .	53

Lista de tabelas

Tabela 1 – Efeitos de cada fator no controlador PID.	25
Tabela 2 – Descrição da obtenção dos parâmetros através da sintonia IMC.	28
Tabela 3 – Descrição da obtenção dos parâmetros pela sintonia SIMC.	29
Tabela 4 – Descrição da obtenção dos parâmetros pela sintonia Síntese Direta.	29
Tabela 5 – Índices de desempenho para o desacoplador estático para o modelo de Ivezic e Petrovic (2003)	32
Tabela 6 – Comparativo entre as respostas obtidas pelos métodos IMC, SIMC e Síntese Direta para o modelo de Craig e MacLeod (1995).	36
Tabela 7 – Comparação entre as metodologias de controle: Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado	38
Tabela 8 – Índices de desempenho para o projeto desacoplador-controlador entre as técnicas de Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado	38
Tabela 9 – Índices de desempenho para o desacoplador estático para o modelo de Craig e MacLeod (1995)	40
Tabela 10 – Ganhos para o controlador pelo método LMI.	44
Tabela 11 – Índices de Desempenho para o Desacoplador Estático para o Modelo de Reis (2018).	48
Tabela 12 – Comparação entre as metodologias de controle: Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado. Saídas Y_1 e Y_2	53
Tabela 13 – Comparação entre as metodologias de controle: Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado. Saídas Y_3 e Y_4	53
Tabela 14 – Índices de desempenho para o projeto desacoplador-controlador entre as técnicas de Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado	54
Tabela 15 – Índices de desempenho para o projeto desacoplador-controlador entre as técnicas de Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado	54

Lista de siglas

IAE	Integral do erro absoluto, do inglês <i>Integral of the absolute value of the error</i>
ISE	Integral do erro quadrático, do inglês <i>Integral of the squared error</i>
ITAE	Integral do erro absoluto ponderado pelo tempo, do inglês <i>Integral of the time-weighted absolute error</i>
IMC	Modelo de Controle Interno, do inglês <i>Internal Control Model</i>
SIMC	Modelo de Controle Interno Simples, do inglês <i>Simple Internal Control Model</i>
MV	Variável Manipulada
MIMO	Múltiplas entradas, múltiplas saídas, do inglês <i>Multiple Input Multiple Output</i>
SISO	Entrada única, saída única, do inglês <i>Single Input Single Output</i>
P	Proporcional
PD	Proporcional, Derivativo
PI	Proporcional, Integral
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	3
1.2.1	Objetivo Geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Justificação e Motivação	3
1.4	Metodologia	4
1.5	Estrutura do Trabalho	4
1.6	Perguntas dessa Pesquisa	5
2	PROCESSO DE MOAGEM NA MINERAÇÃO	6
2.1	Introdução	6
2.2	O Setor de Mineração	6
2.3	Etapas do Beneficiamento Mineral	6
2.4	Circuitos de Moagem	8
2.5	Modelos de Processo de Moagem	9
2.5.1	Processo de Moagem descrito por Ivezić e Petrović (2003)	9
2.5.2	Processo de Moagem descrito por Craig e MacLeod (1995)	10
2.5.3	Processo de Moagem descrito por Reis (2018)	11
3	DESACOPLADORES E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE MULTI-VARIÁVEL	14
3.1	Controle de Processos	14
3.2	Sistemas de Controle SISO e MIMO	14
3.2.1	Sistemas SISO	15
3.2.2	Sistemas MIMO	15
3.3	Desacopladores	17
3.3.1	Projeto do Desacoplador	18
3.3.2	Tipos de desacopladores	19
3.3.2.1	Desacoplador Ideal	19
3.3.2.2	Desacoplador Simplificado	20
3.3.2.3	Desacoplador Invertido	21
3.3.2.4	Desacoplador Estático	22
3.3.3	Desacoplador Aproximado na Frequência	23
3.4	Projeto de Sistema de Controle Descentralizado para Processos MIMO com Integradores ou Diferenciadores	23

3.5	Controladores PID	24
3.6	Regras de Sintonia	25
3.6.1	Método do Modelo Interno (IMC)	26
3.6.2	Método do Modelo Interno Simples (SIMC)	28
3.6.3	Método da Síntese Direta	29
3.7	Índices de Desempenho	29
4	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	31
4.1	Projeto dos desacopladores e controladores para o modelo de Ivezić e Petrović (2003)	31
4.1.1	Avaliação do Desacoplador Estático	31
4.1.2	Controle com Desacoplador Estático por meio da Sintonia IMC	33
4.1.3	Controle sem desacoplador por meio da Sintonia IMC	36
4.1.4	Avaliação do Projeto de Sistema de Controle Descentralizado para o modelo de Ivezić e Petrović (2003)	37
4.2	Projeto dos desacopladores e controladores para o modelo de Craig e MacLeod (1995)	38
4.2.1	Avaliação do Desacoplador Estático	38
4.2.2	Controle com Desacoplador Estático por meio da Sintonia IMC	40
4.2.3	Avaliação do Projeto de Sistema de Controle Descentralizado para o modelo Craig e MacLeod (1995)	46
4.3	Projeto dos desacopladores e controladores para o modelo de Reis (2018)	47
4.3.1	Avaliação do Desacoplador Estático	47
4.3.2	Controle com Desacoplador Estático por meio da Sintonia IMC	48
4.3.3	Controle sem desacoplador através da Sintonia IMC	50
4.3.4	Avaliação do Projeto de Sistema de Controle Descentralizado para o modelo Reis (2018)	51
4.4	Conclusão Parcial	54
5	CONCLUSÃO	56
5.1	Trabalhos Futuros	57
	REFERÊNCIAS	58

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. A mineração está diretamente ligada à influência histórica, atraindo investimentos e retorno financeiro ao país, influência no PIB nacional e contribuição na geração de empregos (MINERAÇÃO, 2017). 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.

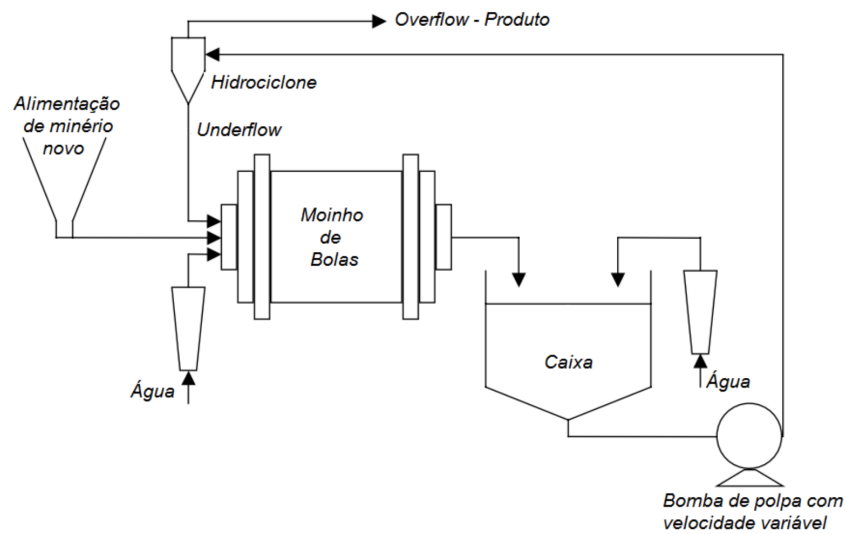
O beneficiamento de minério de ferro é composto por uma série de processos que possuem como objetivo separar e concentrar os minérios desejados. Dentre os processos envolvidos destacam-se aqueles relativos à cominuição (desmonte, britagem e peneiramento, moagem e classificação), os processos de concentração (flotação, gravíticos e magnéticos) e as etapas de separação sólido-líquido (SCHNEIDER et al., 2016). Uma das etapas mais críticas de produção e de grande consumo energético é a moagem (SILVA, 2014).

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 esses processos representam um grande percentual dos custos operacionais, frequentemente em torno de 50% do custo operacional de uma planta de processamento mineral (SCHNEIDER et al., 2016).

Portanto, a atuação do controle de processos se torna crucial no 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. Na Figura 1, um circuito de moagem como exemplo é apresentado. Esse consiste em um moinho de bolas, um tanque e um hidrociclone. A moagem é realizada no interior do moinho pela ação de bolas de aço sobre o minério e uma quantidade de água é adicionada à alimentação de minério para se criar uma polpa, de forma a promover a moagem e um fluxo através do moinho. Para ajustar a densidade da polpa, o tanque é utilizado. A bomba de polpa com

Figura 1 – Circuito de moagem.



Fonte: Pereira Jr. e Euzébio (2017).

velocidade variável é utilizada para transferir o material até o hidrociclone que realiza a classificação do produto. O material que está dentro de uma faixa de tamanho adequado segue para a próxima etapa do processo e o material de tamanho inadequado retorna ao moinho para ser moído novamente (PEREIRA JR.; EUZÉBIO, 2017).

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, do inglês *Constrained Model Predictive Control*), 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 Matrix Inequalities*).

Entretanto, como cita Reis, Lopes Jr. e Euzébio (2018) em seus estudos, testes de controladores avançados em uma planta de processamento de minerais podem ser complexos e caros e gerar instabilidade no 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. Porém, para o uso de controladores PI SISO em plantas MIMO é necessário o uso de desacopladores que tornem o sistema desacoplado.

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 clássicas de sintonia de controladores industriais (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.

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.

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 seja de fácil aplicabilidade pelos operadores deve ser analisada no ambiente industrial (CRAIG, 2017).

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 na literatura abordagens de implementação de controle por meio de técnicas avançadas, como lógica *fuzzy*, controle robusto e controle via 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 PID 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 de buscar 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, desenvolvem-se 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 está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** Capítulo introdutório em que 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. Também é revisada a utilização de desacoplado-

res. Além disso, são 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 por meio 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 sugestões de trabalhos futuros.

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?

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 de aplicação deste trabalho. Posteriormente, são 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). 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, tais como, ferro, dolomito, calcário, talco, manganês, gemas, rochas e cascalho (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2009).

Segundo 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 a otimização do custo de produção, busca da melhor eficiência e minimização dos custos.

2.3 Etapas do Beneficiamento Mineral

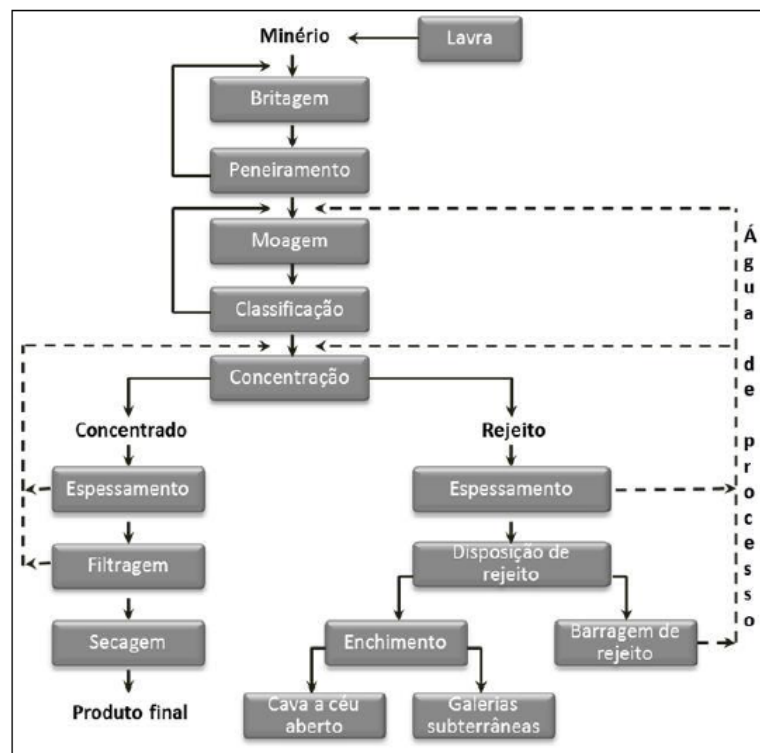
O tratamento ou beneficiamento de minérios consiste de operações (aplicadas aos bens minerais) visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma sem, contudo, modificar a identidade química ou física dos minerais (LUZ; LINS, 2018).

Na literatura “Introdução ao Tratamento de Minérios” de Luz e Lins (2018), é

apresentado um diagrama esquemático para a identificação dos processos do tratamento de minério, reproduzido na Figura 2. 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.

Figura 2 – Diagrama típico de tratamento de minério.



Fonte: Luz e Lins (2018).

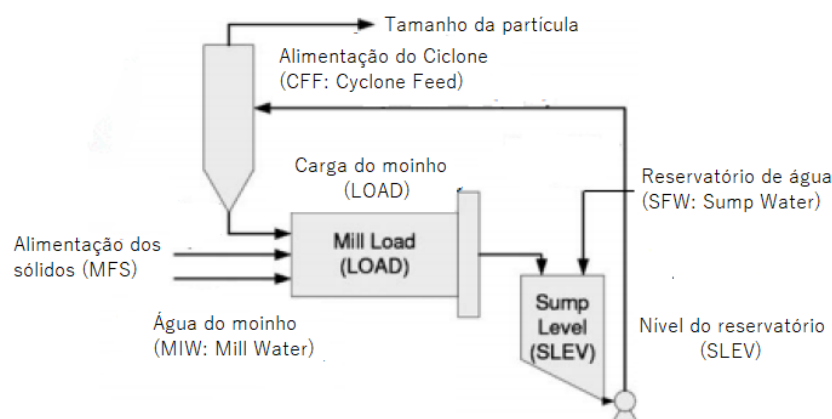
As etapas de britagem e moagem são conhecidas como processo de cominuição, processo no qual é realizado o procedimento de redução do tamanho dos minerais, visando a produção de partículas com tamanho e formato pré-requeridos. O processo de britagem é conhecido como a cominuição inicial e a de moagem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

De forma a especificar as etapas, o termo britagem se aplica à redução do tamanho com o intuito 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). Por outro lado, 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. Neste trabalho, será dedicado os estudos sobre a etapa de moagem.

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). Como exemplo, na Figura 3 é apresentado um exemplo de circuito de moagem de minério descrito em Coetzee, Craig e Kerrigan (2008). As variáveis do moinho que podem ser controladas são o nível do poço (SLEV), o tamanho das partículas (PSE) e a massa de material no moinho (LOAD). As entradas para o moinho que podem ser manipuladas são a taxa de alimentação de água para o poço (SFW), o fluxo da taxa de lama para o ciclone (CFF), a taxa de alimentação de sólidos ao moinho (MFS) e a taxa de água fornecida ao moinho de entrada (MIW).

Figura 3 – Exemplo de circuito de moagem.



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

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.

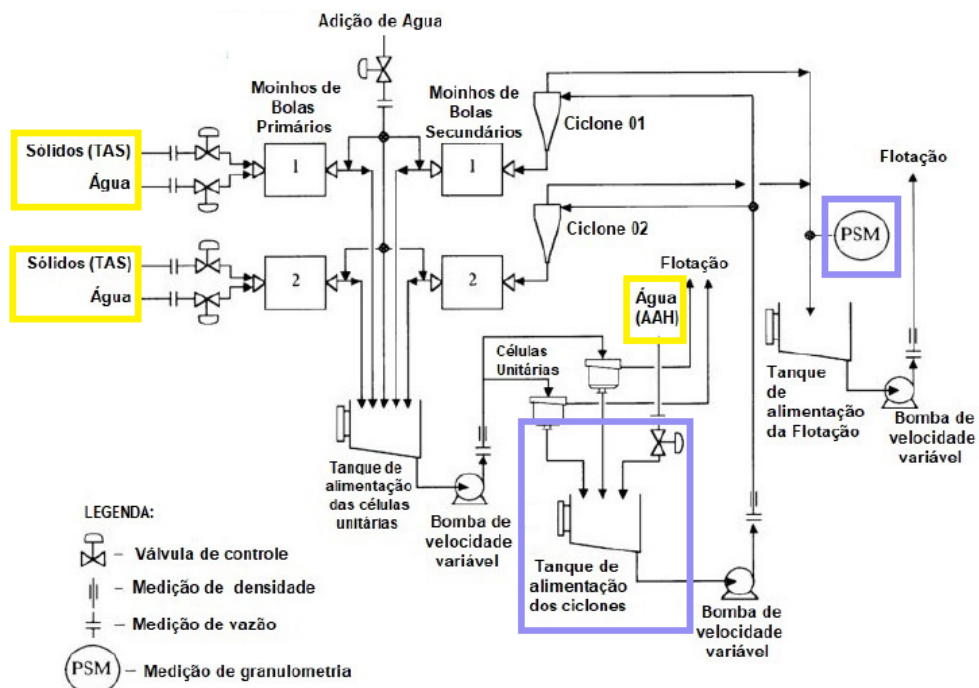
No trabalho de Chen et al. (2007), cita-se que o circuito de moagem precisa ser controlado de forma estável para alta taxa de recuperação de minério e redução significativa do custo de produção em plantas concentradas. Em diversas literaturas, são desenvolvidos trabalhos utilizando o método MPC (controle preditivo por modelo), o qual é capaz de lidar com o 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 Ivezic e Petrovic (2003)

O objetivo do estudo de Ivezic e Petrovic (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 4.

Figura 4 – Circuito de moagem da mina de cobre de Majdanpek (Sérvia). Marcado em amarelo, variáveis manipuladas do sistema e em azul variáveis controladas do processo.



Fonte: Adaptado de Ivezic e Petrovic (2003).

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 manipuladas 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 hidrociclone (ΔAAH). As variáveis controladas do processo são (i) a granulometria do produto final (ΔGPF) e (ii) a vazão de alimentação dos hidrociclones (ΔVAH).

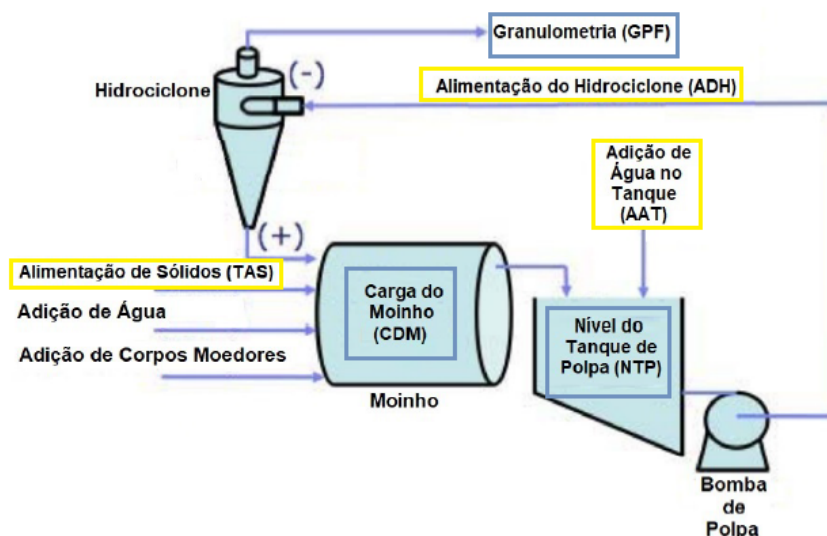
O processo da planta é descrito por

$$\begin{bmatrix} \Delta GPF \\ \Delta VAH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-0.9362}{1164s+1} e^{-350s} & \frac{10.252s+2.819 \cdot 10^{-3}}{80218s^2+652s+1} e^{-200s} \\ \frac{36.49}{792s+1} & \frac{1.1405}{179s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta TAS \\ \Delta AAH \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

2.5.2 Processo de Moagem descrito por Craig e MacLeod (1995)

Em Craig e MacLeod (1995) descreve-se que a moagem do minério a um produto fino é normalmente a primeira e mais cara operação unitária em um processo de extração totalmente cirúrgico. A seleção da estrutura adequada do circuito de moagem e a seleção e dimensionamento do equipamento são muito importantes para determinar a qualidade do produto. Sistemas de controle são extremamente importante em processos de moagem para auxiliar os operadores a operar o circuito de maneira ótima.

Figura 5 – Diagrama esquemático do circuito de controle da planta de moagem. Marcado em amarelo, variáveis manipuladas do sistema e em azul variáveis controladas do processo.



Fonte: Craig e MacLeod (1995).

Neste modelo processo de moagem, descrito na Figura 5, as variáveis manipuladas do sistema multivariável são (i) a taxa de adição de água no tanque (ΔAAT), (ii) a taxa de alimentação de sólidos no moinho (ΔTAS) e (iii) alimentação do hidrociclone (ΔADH). As variáveis controladas dos processo por sua vez foram estabelecidas como (i) a granulometria do produto final (ΔGPF), (ii) a carga do moinho (ΔCDM) e (iii) o nível do tanque de polpa (ΔNTP).

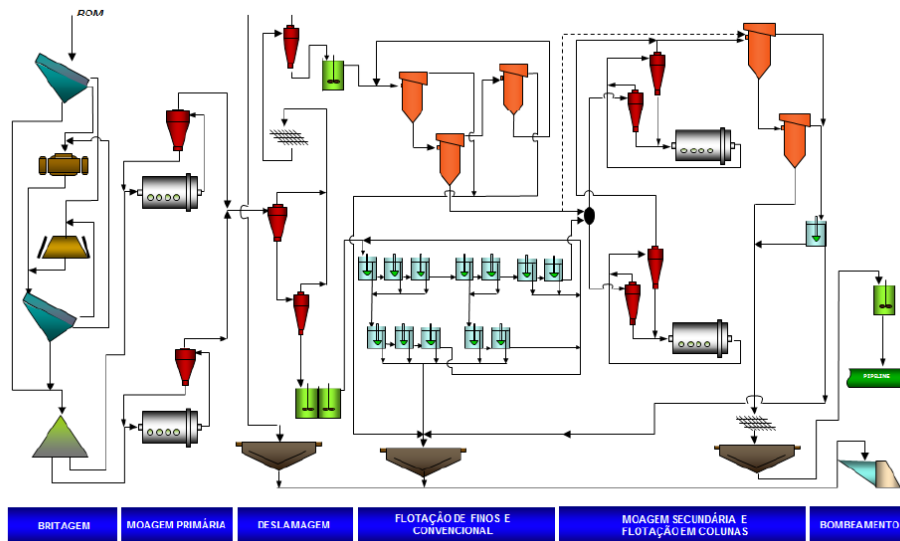
O modelo descrito no trabalho de Craig e MacLeod (1995) foi derivado de testes de perturbação na planta é descrito por

$$\begin{bmatrix} \Delta GPF \\ \Delta CDM \\ \Delta NTP \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.105}{83s+1} e^{-65s} & \frac{-0.082}{1766s+1} e^{-80s} & \frac{-0.0575}{167s+1} e^{-460s} \\ \frac{-0.0468}{1864s+1} e^{-140s} & \frac{1.22 \cdot 10^{-4}}{s} & \frac{0.115}{1981s+1} e^{-120s} \\ \frac{0.00253}{s} & 0 & \frac{-0.00299}{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta AAT \\ \Delta TAS \\ \Delta ADH \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

2.5.3 Processo de Moagem descrito por Reis (2018)

O trabalho de dissertação em Reis (2018) trata da 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. 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 6, é apresentado a disposição correta dos equipamentos de grande porte e por ser caracterizado por uma única linha de deslamagem e flotação mecânica tornam este concentrador simples e compacto.

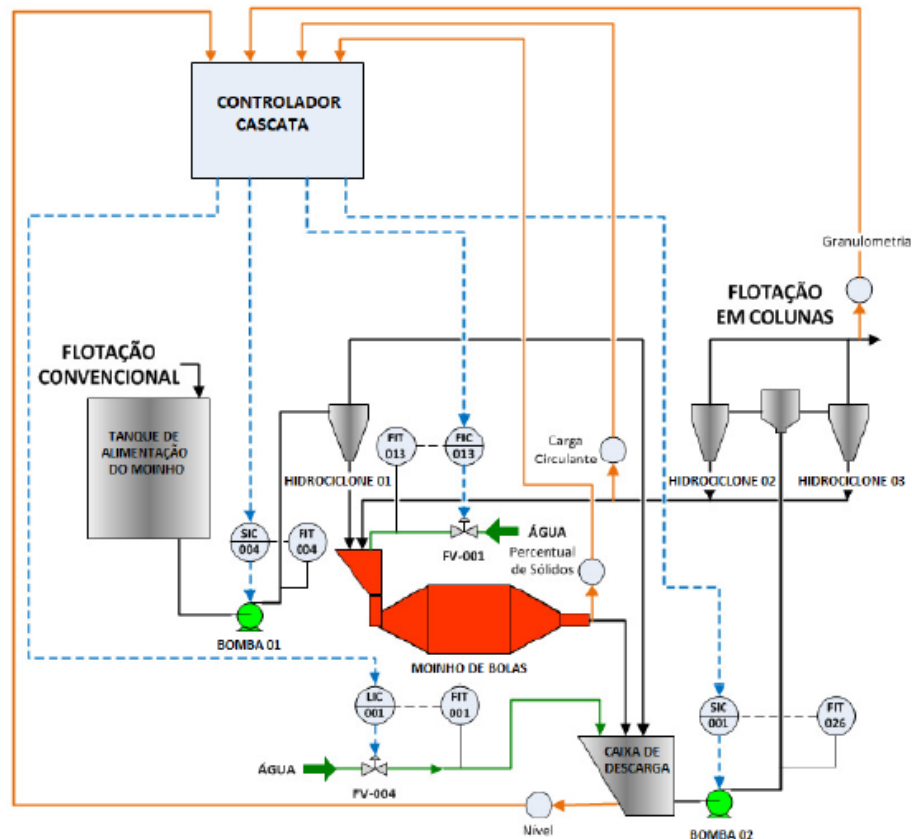
Figura 6 – Fluxograma do concentrado 3 da Samarco.



Fonte: Reis (2018).

A moagem secundária (remoagem) estudado, é controlado por múltiplos controladores PI SISO. O fluxograma de uma linha no circuito de remoagem está representado na Figura 7. O circuito 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.

Figura 7 – Diagrama esquemático do controle em cascata aplicado ao circuito de Remoagem.



Fonte: Reis (2018).

As quatro malhas para o controle de vazão são malhas de um processo SISO e utilizam controladores PI, conforme apresentado na Figura 6. As malhas são identificadas em tracejado azul 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 são 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) de modo que o modelo final é dado por

$$\begin{bmatrix} \Delta PS \\ \Delta CC \\ \Delta GPF \\ \Delta NCM \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0,032}{(2,307s+1)(2,307s+1)} e^{-3s} & \frac{-0,467}{25,385s+1} e^{-3s} \\ \frac{-0,089}{27,692s+1} e^{-9s} & \frac{-0,003}{4,615s+1} e^{-9s} \\ \frac{0,018}{(33,058s+1)(8,48s+1)} e^{-3s} & \frac{0,156}{36,923s+1} e^{-15s} \\ \frac{1,935}{(142,76s+1)(51,083s+1)} e^{-3s} & \frac{0,044}{(128,918s+1)(39,543s+1)} e^{-54s} \\ \frac{-0,041}{(41,011s+1)(5,143s+1)} e^{-6s} & \frac{0,172}{39,231s+1} e^{-3s} \\ \frac{-0,038}{(28,049s+1)(1,951s+1)} e^{-3s} & \frac{0,927}{23,077s+1} e^{-3s} \\ \frac{-0,017}{(32,354s+1)(9,185s+1)} e^{-15s} & \frac{0,156}{27,692s+1} \\ \frac{0,396}{(132,864s+1)(56,367s+1)} e^{-15s} & \frac{-1,265}{(127,877s+1)(61,354s+1)} e^{-15s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta SP - SIC - 004 \\ \Delta SP - FIC - 013 \\ \Delta SP - LIC - 001 \\ \Delta SP - SIC - 001 \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Com isso, busca-se ao realizar o controle nos circuitos de moagem descritos acima, fazer com que as saídas dos processos controlados sigam as referências de controle e que estejam dentro de faixas de operação ótimas (ZHOU *et al.*, 2016). Mesmo que existam na literatura outras abordagens de controle avançado, o controle PID SISO é a tecnologia mais empregada no controle de moinhos (CRAIG, 2012). No próximo capítulo são apresentadas as estratégias de controle multivariável e métodos para realizar o desacoplamento de multimalhas.

3 Desacopladores e estratégias de controle multivariável

Neste capítulo apresenta-se 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. De modo, têm-se que sistemas SISO possuem uma única entrada e uma única saída, de mais fácil identificação e controle, em contrapartida os sistemas MIMO possuem múltiplas entradas e múltiplas saídas, com variáveis fortemente acopladas.

Além disso, para o trabalho em estudo, descreve-se o controle de processo de moagem, no qual emprega-se desacopladores como ferramenta para minimizar os efeitos que uma variável do sistema exerce sobre a outra. Considerando os modelos de moagem em estudo como $G(s)$ e a resposta do desacoplador de $D(s)$, supõe-se que é possível atender por meio de sintonias de controladores (como IMC, SIMC, ITAE, dentre outras) as especificações mínimas para o controle de uma malha ($G(s)D(s)$).

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, é estudado o processo de moagem, importante etapa no processo de mineração.

3.2 Sistemas de Controle SISO e MIMO

Duas definições podem ser descritas para caracterizar a relação entrada-saída de uma malha de controle.

3.2.1 Sistemas SISO

Os sistemas de entrada única e saída única (do inglês, *Single Input Single Output*) 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 (variável manipulada – MV, do inglês, *manipulated variable*) e uma variável de saída (variável controlada ou de processo – PV, do inglês, *process variable*).

3.2.2 Sistemas MIMO

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

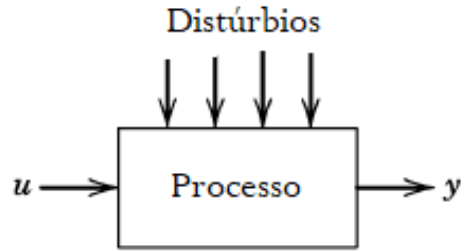
Uma das características dos problemas de controle MIMO é a presença das interações de processo, ou seja, cada variável manipulada pode afetar ambas as variáveis controladas. Quando existem interações significativas no processo, a seleção da configuração do controle pode não ser óbvia. Nesses casos é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

Seborg, Edgar e Mellichamp (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 afeta todas as variáveis controladas y_1, y_2, \dots, y_n .

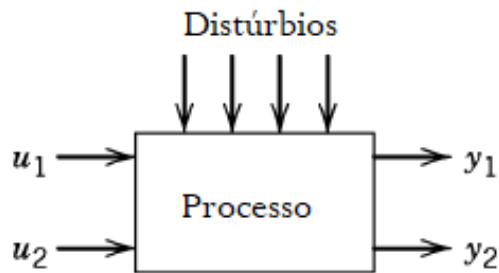
Por causa das interações do processo, a seleção do melhor emparelhamento de variáveis controladas e manipuladas para um esquema de controle multimalhas pode ser uma tarefa difícil. Em particular, para um problema de controle com n variáveis controladas e n variáveis manipuladas existem $n!$ possíveis configurações de controle. Uma representação esquemática de processos de controle SISO e MIMO é apresentada na Figura 8.

Considerando o problema de controle 2×2 apresentado na Figura 8.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. Em (3.1) - (3.4), G_p descreve a função de transferência do processo para cada relação entrada-saída.

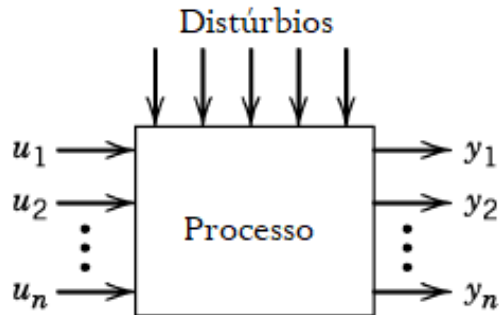
Figura 8 – Processo de controle SISO e MIMO.



(a) Única entrada, única saída (SISO) com vários distúrbios



(b) Múltiplas entradas, múltiplas saídas (MIMO) 2x2



(c) Múltiplas entradas, múltiplas saídas (MIMO) nxn

Fonte: Adaptado de Seborg, Edgar e Mellichamp (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 em (3.1)-(3.4) 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, de modo que

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

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

A relação entre entradas e saídas pode ser expressa em notação matricial como

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

em que $Y(s)$ 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 de transferência do processo

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

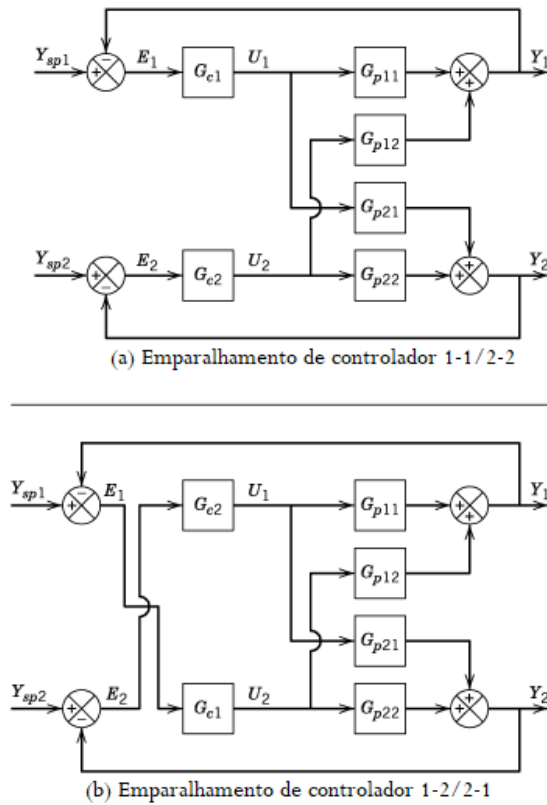
Como exemplo, suponha um esquema de controle multimalhas em que dois controladores por realimentação devem ser utilizados. As duas configurações de controle possíveis são mostradas na Figura 9.

No esquema 9.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 emparelhar Y_1 com U_2 e Y_2 com U_1 , o controle 1-2 / 2-1, esquema mostrado na Figura 9.b.

3.3 Desacopladores

Segundo Seborg, Edgar e Mellichamp (2011), uma das primeiras abordagens para o controle multivariável é o controle de desacoplamento. Adicionando controladores adicionais chamados de desacopladores para uma configuração multimalhas convencional, o objetivo do projeto para reduzir as interações do circuito de controle pode ser realizado. Em princípio, o controle de desacoplamento pode 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 dos modelos de processo.

Figura 9 – Diagrama de blocos para um sistema multimalhas.



Fonte: Adaptado de Seborg, Edgar e Mellichamp (2011).

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 (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 uma matriz de transferência diagonal

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

em que

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

e

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

Logo

$$\begin{bmatrix} H_{11}(s) & 0 \\ 0 & H_{22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_{11}(s) & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & D_{22}(s) \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Reescrevendo de forma a explicitar $D(s)$, tem-se

$$D(s) = G(s)^{-1}H(s) = \frac{\Lambda(G(s))}{\Delta(G(s))}H(s), \quad (3.9)$$

ou ainda

$$D(s) = \frac{1}{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{12}(s)G_{21}(s)} \begin{bmatrix} G_{22}(s)H_{11}(s) & -G_{12}(s)H_{22}(s) \\ -G_{21}(s)H_{11}(s) & G_{11}(s)H_{22}(s) \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

3.3.2 Tipos de desacopladores

Nessa seção, serão apresentados os métodos de desacoplamento encontrados nas literaturas: desacoplador ideal, desacoplador simplificado, desacoplador invertido, desacoplador estático e desacoplador aproximado na frequência.

No capítulo 4, será realizado um comparativo entre os tipos de desacopladores, avaliando-os em termos dos índices de desempenho e o que os impedem de obter uma resposta satisfatória entre o conjunto desacoplador-controlador. Ademais, espera-se observar e avaliar os pontos que afetam a implementação dos desacopladores, como atraso no sistema e funções de transferência com a presença de integradores. Após a implementação dos desacopladores pretende-se avaliar de forma qualitativa o desempenho por meio de índices de desempenho, como IAE, ITAE e ISE.

3.3.2.1 Desacoplador Ideal

Considerando (3.10), equação geral do desacoplador, definindo-se $H_{11}(s)$ e $H_{22}(s)$ tem-se o projeto do desacoplador $D(s)$. 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

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

Com esse desacoplador, os elementos do controlador descentralizado aos quais serão definidos como $C_1(s)$ 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.

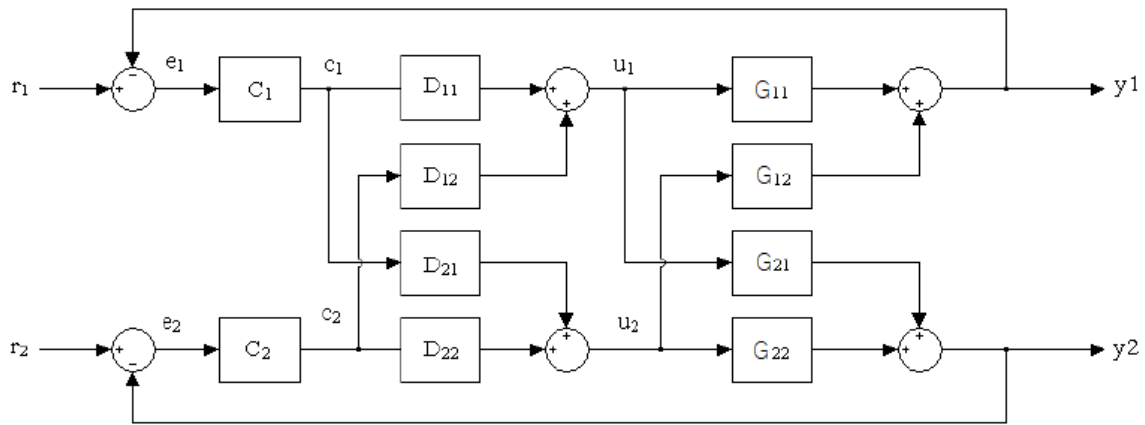
$$C(s) = \begin{bmatrix} C_1(s) & 0 \\ 0 & C_2(s) \end{bmatrix}.$$

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 representada uma estrutura de um desacoplador ideal que pode ser visualizada na Figura 10, em que 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 utilizados 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) onde i e j determinam a relação entrada e saída dos termos da matriz.

Figura 10 – 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 esse desacoplador não seja utilizado na prática.

3.3.2.2 Desacoplador Simplificado

Uma alternativa para o projeto do desacoplador consiste em definir os termos da diagonal principal do desacoplador iguais a 1, como exemplificado em (3.12), o que facilita sua implementação prática. Esse tipo de escolha é chamada na literatura de desacoplamento simplificado, cuja representação é dada por

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

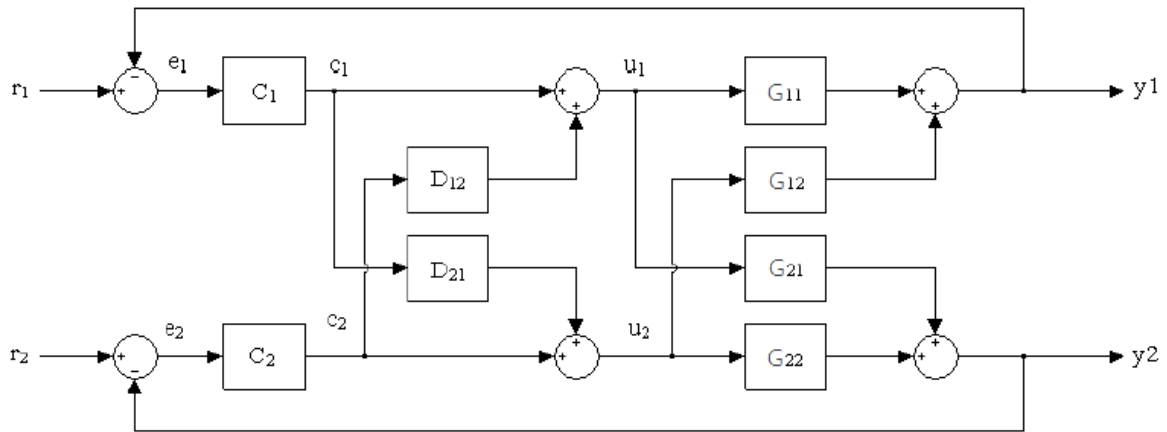
sendo

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

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

Por meio de (3.13)-(3.14), distingue-se as equações utilizadas para encontrar o modelo para o desacoplador ideal, as quais são mais simples. De acordo com Baeta (2006), tanto o desacoplador ideal quanto o simplificado são referidos como desacopladores convencionais. A estrutura do desacoplador simplificado é mostrada na Figura 11.

Figura 11 – Desacoplador simplificado.



Fonte: Adaptado de Baeta (2006).

3.3.2.3 Desacoplador Invertido

O projeto do desacoplador invertido é baseado na aproximação do processo por um modelo do tipo primeira ordem mais atraso de transporte (FOPTD, do inglês, *First-Order Plus Time Delay*)

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

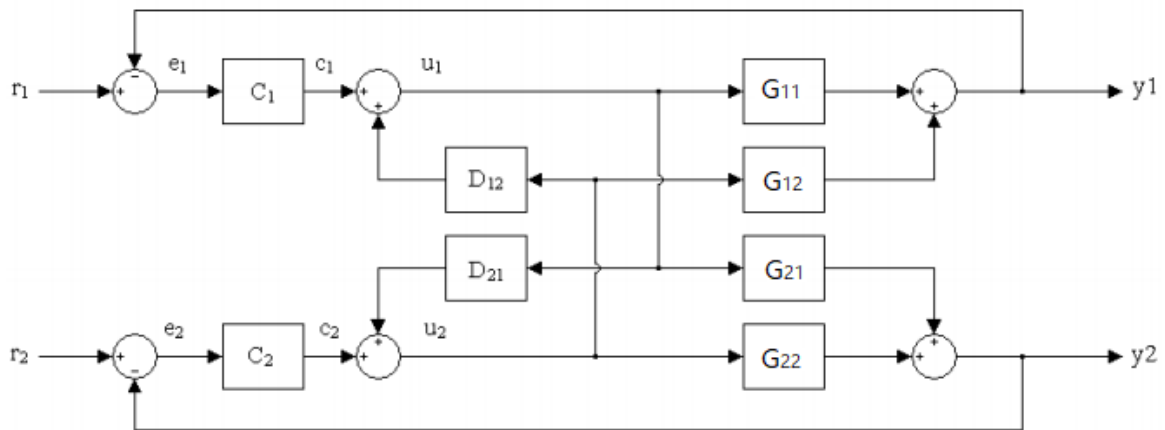
em que K_{ij} , τ_{ij} e L_{ij} são o ganho, a constante de tempo e o atraso de $G_{ij}(s)$, respectivamente.

Assim, o desacoplador invertido $D(s)$ é projetado tal que $G(s)D(s)$ seja diagonal dominante. Considerando a estrutura invertida, o desacoplador é dado pela equação 3.12.

Portanto, percebe-se que o desacoplador simplificado é apresentado da mesma forma que o desacoplador invertido. A diferença entre elas se encontra em suas estruturas, na forma de conectar os elementos no modelo da planta final, como apresentado

pela Figura 12. Segundo Baeta (2006), o caso do desacoplador simplificado, os elementos desacopladores são conectados ao sinal de saída dos controladores enquanto que, no desacoplador invertido, tais elementos estão conectados ao sinal que efetivamente é enviado à planta (variável manipulada).

Figura 12 – 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.

3.3.2.4 Desacoplador Estático

Todos os desacopladores definidos anteriormente são dinâmicos, sendo representados por funções de transferência no domínio de Laplace. Esses 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 transporte 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, em que 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

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

3.3.3 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 Projeto de Sistema de Controle Descentralizado para Processos MIMO com Integradores ou Diferenciadores

Na realização da modelagem de um sistema MIMO de um processo como o da mineração, é comumente necessário o desenvolvimento de métodos eficazes para tratar sistemas que contêm integradores e diferenciadores.

Nas literaturas existentes, foram trabalhadas os métodos da matriz de ganho relativo RGA (do inglês, *Relative Gain Array*) na análise de sistemas com variáveis com integradores de modo a se determinar o emparelhamento da entrada-saída para controles descentralizados. No trabalho de Hu, Cai e Xiao (2010) é proposta uma abordagem para a construção de controladores descentralizados para processos MIMO contendo integradores e/ou diferenciadores por meio do conceito da matriz de ganho normalizado relativo RNGA (do inglês, *relative normalized gain array*).

Ao unir as informações obtidas pelo RGA, RNGA e pelo índice de Nederlinkski (NI), é possível determinar o emparelhamento de entrada-saída que minimiza as interações das malhas cruzadas. Por meio desse método, uma função de transferência equivalente (ETF) é derivada para cada par de entrada-saída quando os outros *loops* estão fechados.

Desta forma, assim como utilizado nos desacopladores, ao se obter as informações obtidas pelo RNGA e RGA, um determinado processo MIMO pode ser decomposto em um conjunto de processos SISO com suas funções de transferência representadas por ETF's na qual a estabilidade do sistema é mantida.

Dada a matriz de transferência $G(s)$, o RGA e o índice NI são determinados por

$$RGA : \Lambda = K \otimes K^{-T} \quad (3.17)$$

$$NI : \frac{\Delta(K)}{\prod_{i=1}^n k_{ii}} \quad (3.18)$$

em que K é a matriz de ganhos descrita por $K = [k_{ij}]_{n \times n}$, \otimes representa o produto de Kronecker e k_{ii} os valores dos ganhos presentes na diagonal da matriz de transferência.

3.5 Controladores PID

O controlador PID (Proporcional, Integrador e Derivativo) é o controlador 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 desempenho 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.

Em diversos estudos realizados, observa-se que o controlador PID apresenta em uma vasta gama de condições um desempenho relativamente positivo. Sobretudo, o PID é uma ferramenta que permite, facilmente, o ajuste dos seus parâmetros para atender a diversos requisitos de desempenho.

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

$$G_c(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s, \quad (3.19)$$

cuja equação no domínio do tempo é

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.20)$$

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

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

$$u(t) = K_C \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.21)$$

com função de transferência dada por

$$G_C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right). \quad (3.22)$$

na qual pode-se encontrar os valores seguindo as seguintes relações

$$K_I = \frac{K_C}{T_I}, \quad (3.23)$$

$$K_D = K_C T_D. \quad (3.24)$$

em que K_C é o ganho proporcional, T_I é o tempo integral e T_D é o tempo derivativo.

Para o entendimento sobre como os fatores afetam na resposta do sistema, pode-se descrever 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 de rastreamento para entradas em degrau, 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.

Embora um controlador integral não apresente erro residual em regime permanente para entradas em degrau, 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 utilizado em 90% da 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 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.

3.6 Regras de Sintonia

As regras de sintonia de controladores PID são um 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 por forma de tentativa e erro,

aliados aos atrasos inerentes do processo, podem tornar a tarefa demorada e trabalhosa. O objetivo geral do ajuste do controlador, depende do que o especialista considera uma boa performance quando o sistema está sujeito a perturbações.

Segundo Seborg, Edgar e Mellichamp (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 em malha fechada tenha uma dinâmica desejável e características de resposta em estado estacionário. São descritos alguns pontos de interesse a fim de satisfazer os critérios de desempenho:

1. O sistema em 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 são apresentadas a seguir.

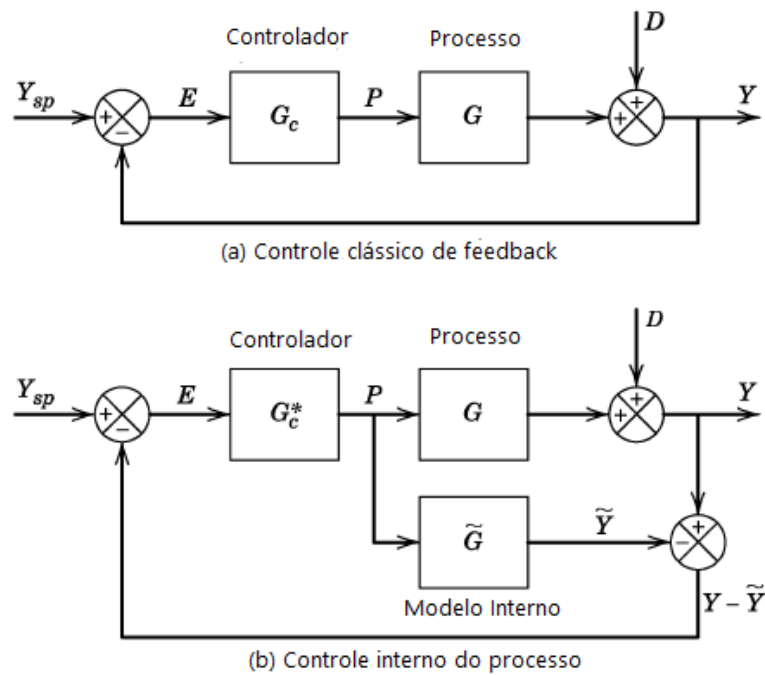
3.6.1 Método do Modelo Interno (IMC)

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, Edgar e Mellichamp (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).

As vantagens é que se considera explicitamente as incertezas do modelo e permite ao projetista avaliar o custo benefício 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 13.

Figura 13 – Estratégias de controle por realimentação.



Fonte: Adaptado de Seborg, Edgar e Mellichamp (2011).

Os dois diagramas de bloco apresentados na Figura 13 são idênticos caso os controladores $G_c(s)$ e $G_c^*(s)$ satisfaçam a relação

$$G_c(s) = \frac{G_c^*(s)}{1 - G_c^*(s)\tilde{G}(s)}. \quad (3.25)$$

A sintonia envolve definir o principal parâmetro do método IMC, τ_c , que é a constante de tempo de malha fechada utilizado como parâmetro de ajuste para o controlador. 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 Fruchauf, 1990);

3. $\tau_c = \theta$ (Skogestad, 2003).

em que θ é o tempo de atraso e τ é a constante de tempo do processo.

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	$\frac{K(1-\beta s)}{\tau^2 s^2 + 2\zeta s + 1}, \beta > 0$	$\frac{2\zeta \tau}{K(\tau_c + \beta)}$	$2\zeta \tau$	$\frac{\tau}{2\zeta}$
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	$\frac{K e^{-\theta s}}{\tau s+1}$, com $e^{-\theta s} \cong 1 - \theta s$	$\frac{\tau + \theta}{K(\tau_c + \theta)}$	τ	-
H	$\frac{K e^{-\theta s}}{\tau s+1}$, 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	$\frac{K e^{-\theta s}}{s}$, com $e^{-\theta s} \cong 1 - \theta s$	$\frac{2\tau_c + \theta}{K(\tau_c + \theta)^2}$	$2\tau_c + \theta$	-
J	$\frac{K e^{-\theta s}}{s}$, 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	$\frac{K e^{-\theta s}}{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)}$, com $e^{-\theta s} \cong 1 - \theta s$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{K(\tau_c + \theta)}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$

3.6.2 Método do Modelo Interno Simples (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,

em que θ é o tempo de atraso.

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	$\frac{Ke^{-\theta s}}{s^2}$	$\frac{1}{K(4(\tau_c + \theta)^2)}$	$4(\theta + \tau_c)$	$4(\theta + \tau_c)$

3.6.3 Método da Síntese Direta

O Método da Síntese Direta é um método que usa um modelo inverso do processo e cancelamento de polos e zeros para buscar o desempenho desejado em malha fechada. Na Tabela 4, são descritos os modelos das funções de transferências e o respectivo equacionamento para a obtenção dos parâmetros K_C , T_I e T_D para o método da síntese direta.

Tabela 4 – Descrição da obtenção dos parâmetros pela sintonia Síntese Direta.

Caso	Modelo	K_C	T_I	T_D
A	$\frac{Ke^{-\theta s}}{s}$	$\frac{2\tau_c + \theta}{K(\tau_c + \theta)^2}$	$2\tau_c + \theta$	-
B	$\frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1}$	$\frac{\tau}{K(\tau_c + \theta)}$	τ	-
C	$\frac{Ke^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{K(\tau_c + \theta)}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$

3.7 Índices de Desempenho

Um índice de desempenho pode ser definido para quantificar o desempenho do sistema de controle sob estudo. 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).

É considerado um sistema de controle ótimo quando os parâmetros 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*)

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt. \quad (3.26)$$

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

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt. \quad (3.27)$$

Para reduzir a contribuição de grandes erros iniciais no valor da integral de desempenho, bem como enfatizar erros que acontecem mais tarde na resposta, propõem-se:

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

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)| dt; \quad (3.28)$$

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

$$ITSE = \int_0^T te^2(t) dt. \quad (3.29)$$

Seborg, Edgar e Mellichamp (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 PID, tais como IMC, SIMC e Síntese Direta, 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 Projeto dos desacopladores e controladores para o modelo de Ivezić e Petrović (2003)

4.1.1 Avaliação do Desacoplador Estático

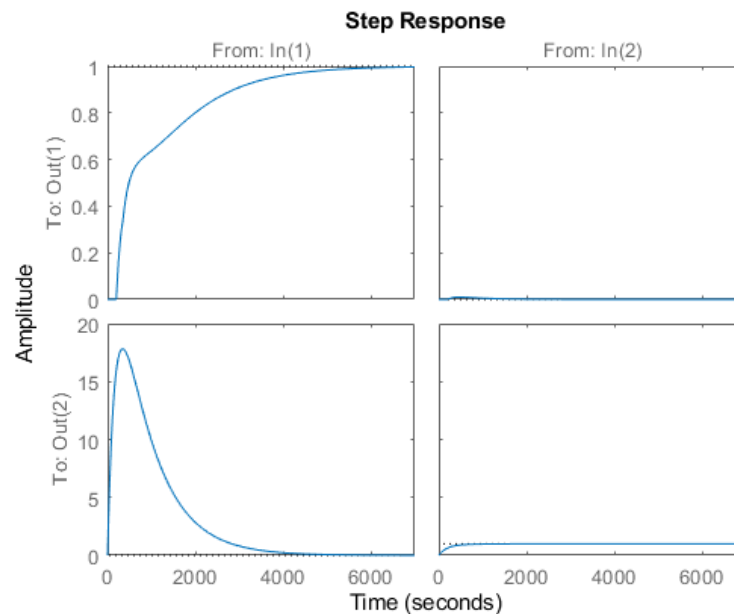
O desacoplador estático caracteriza-se como um desacoplador mais simples, de forma que apenas as interações em regime permanente são consideradas. Ao decorrer do trabalho e da apresentação das simulações realizadas, este foi o único desacoplador que apresentou uma solução adequada ao qual seria possível analisar todo o sistema desacoplador-controle. Pelos modelos apresentarem atrasos de transporte, ao utilizar os outros possíveis desacopladores, isto causou respostas com avanço de transportes, características de não causalidade, gerando uma resposta que não tendesse a estabilidade do sistema.

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 14.

Figura 14 – Desacoplador estático para o modelo de Ivezić e Petrović (2003).



Fonte: Da Autora.

O desacoplador implementado não obteve uma resposta satisfatória. Como pode ser visto na Figura 14, para o item D_{12} há um alto pico de aproximadamente 18 em amplitude e demora para o estabelecimento em regime permanente. Para verificação do desempenho do desacoplador, são apresentados na Tabela 5 os índices de desempenho.

Tabela 5 – 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 5, fazendo um comparativo 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 não apresenta uma resposta satisfatória (vide Figura 14).

4.1.2 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, encontram-se os controladores $C_1(s)$ e $C_2(s)$ advindos das malhas $G_{11}(s)$ e $G_{22}(s)$.

Projetando um controlador $C_1(s)$ por meio da função de transferência advinda do modelo de Craig e MacLeod (1995), mostrada em (2.1)

$$G_{11}(s) = \frac{-0,9362}{1164s + 1} e^{-350s} \quad (4.1)$$

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 por meio da função de transferência advinda do modelo de Craig e MacLeod (1995), mostrada em (2.1)

$$G_{22}(s) = \frac{1,1405}{179s + 1} \quad (4.7)$$

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

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

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

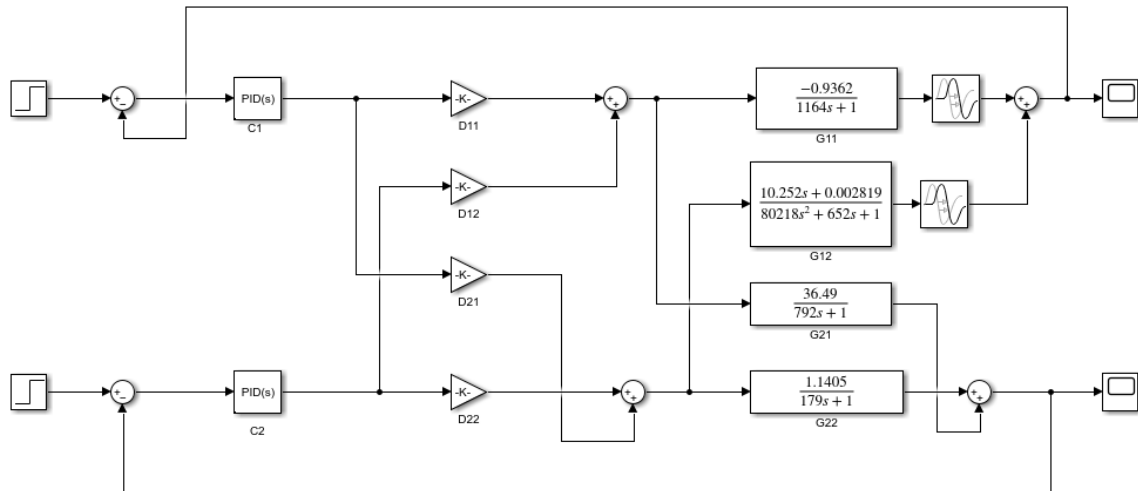
$$\tau_c = 0.1\tau, \quad (4.10)$$

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

$$C_2(s) = \frac{10s + 0,05587}{s}. \quad (4.11)$$

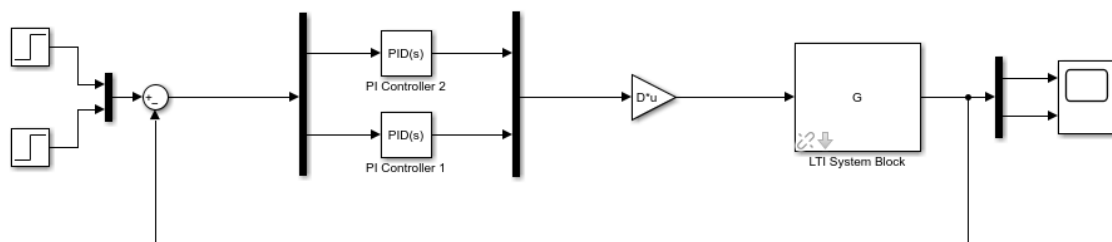
As Figuras 15 e 16 demonstram duas formas de se apresentar a simulação do controle junto ao bloco desacoplador e planta por meio do *software* Simulink. Na Figura 15, é possível visualizar de forma mais detalhada as conexões necessárias.

Figura 15 – 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 16 – Segunda opção para simulação por meio do Simulink do projeto controlador - desacoplador para o modelo de Ivezić e Petrović (2003).

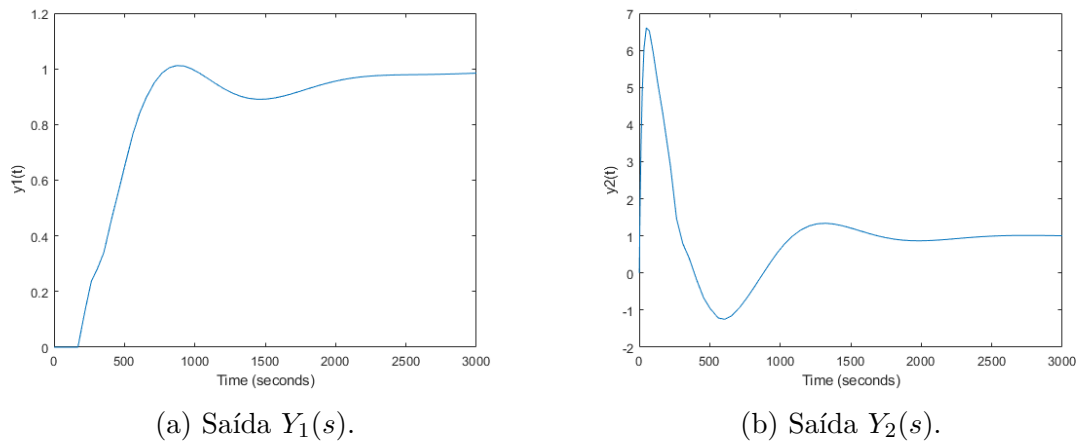


Fonte: Da Autora.

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), obtêm-se as respostas de $Y_1(s)$ e $Y_2(s)$ apresentadas na Figura 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 $Y_1(s)$, apresenta-se uma oscilação, mas é obtida uma rápida resposta ao retornar ao *setpoint* definido. Ao contrário, a saída $Y_2(s)$ apresenta um alto pico principal e oscilações antes de retornar ao *setpoint*.

Figura 17 – Saídas obtidas por meio do controle com Desacoplador Estático pelo método da sintonia IMC.

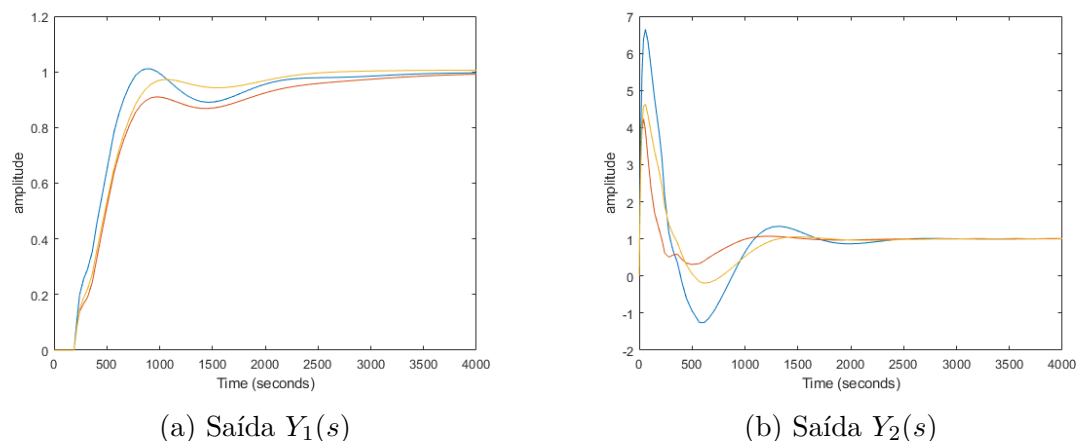


Fonte: Da Autora.

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

A partir dos parâmetros das funções de transferência descritas em (4.2)-(4.5), foram projetados controladores utilizando o Método do Modelo Interno Simples (SIMC) e o Método da Síntese Direta (SD). As respostas obtidas juntamente com o obtido com o Método do Modelo Interno (IMC) são apresentadas na Figura 18.

Figura 18 – Saídas utilizando os métodos de sintonia IMC (em azul), SIMC (em vermelho) e SD (em laranja).



Fonte: Da Autora.

Realizando uma comparação, foram obtidos os valores dos parâmetros de pico e tempo de assentamento das saídas $Y_1(s)$ e $Y_2(s)$ para as sintonias descritas na Tabela 6. Note que o Método SIMC obteve a resposta com o menor máximo sobressinal.

Tabela 6 – Comparativo entre as respostas obtidas pelos métodos IMC, SIMC e Síntese Direta para o modelo de Craig e MacLeod (1995).

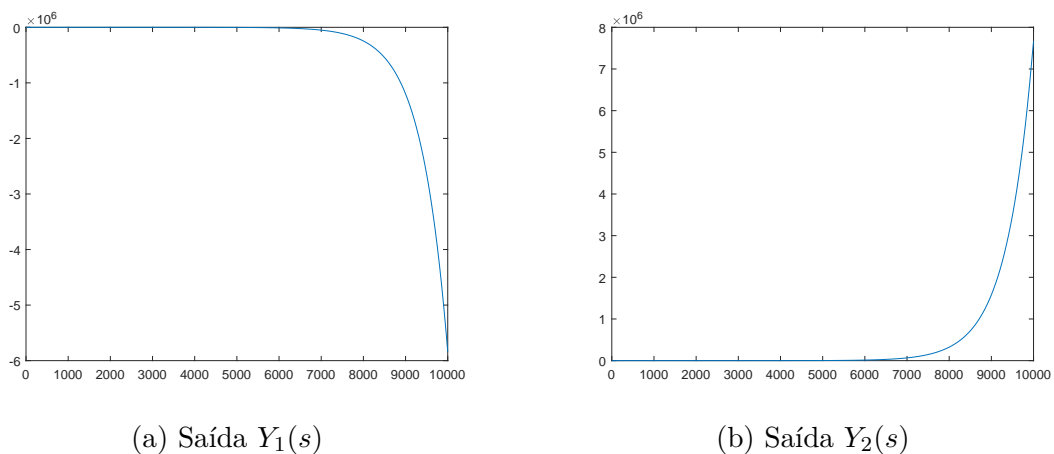
Parâmetro	Y1: IMC	Y2: IMC	Y1: SIMC	Y2: SIMC	Y1: SD	Y2: SD
Pico	1,01158	6,642	0,9103	4,0491	0,972605	4,5692
T_s	2712,66	2469,31	3291,7	2534,56	2210,53	2534,56

Fonte: Da autora.

4.1.3 Controle sem desacoplador por meio da Sintonia IMC

Para fins de comparação, apresenta-se 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 16, 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 na Figura 19.

Figura 19 – Saídas obtidas pelo controlador sem desacoplador pelo método de sintonia IMC.



Fonte: Da Autora.

Nas respostas apresentadas, é possível analisar que as respostas não obtiveram um resultado adequado 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.

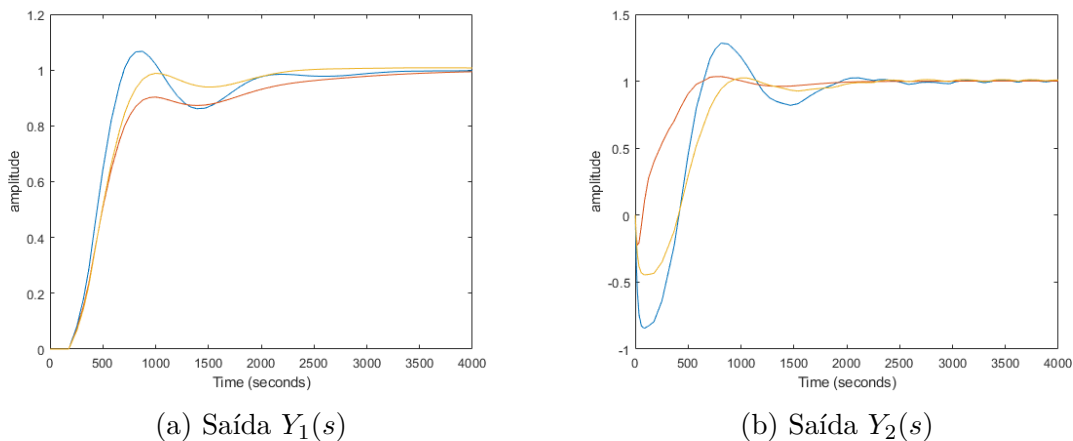
4.1.4 Avaliação do Projeto de Sistema de Controle Descentralizado para o modelo de Ivezić e Petrović (2003)

Utilizando os conceitos abordados no Capítulo 3 sobre o projeto de controlador descentralizado para processos MIMO, calcula-se os termos RGA e NI para obtenção da função de transferência equivalente, obtendo

$$RGA = \begin{bmatrix} 0,9121 & 0,0879 \\ 0,0879 & 0,9121 \end{bmatrix}.$$

e o valor de $NI = 1,0963$. Desta forma, são projetados os controladores a partir das funções de transferência $G_{11}(s)$ e $G_{22}(s)$. Utilizando as formulações propostas pelas sintonias IMC, SIMC e SD, foi possível obter as seguintes saídas apresentadas na Figura 20.

Figura 20 – Saídas pelo método do Controle Descentralizado utilizando as sintonias IMC (em azul), SIMC (em vermelho) e SD (em laranja).

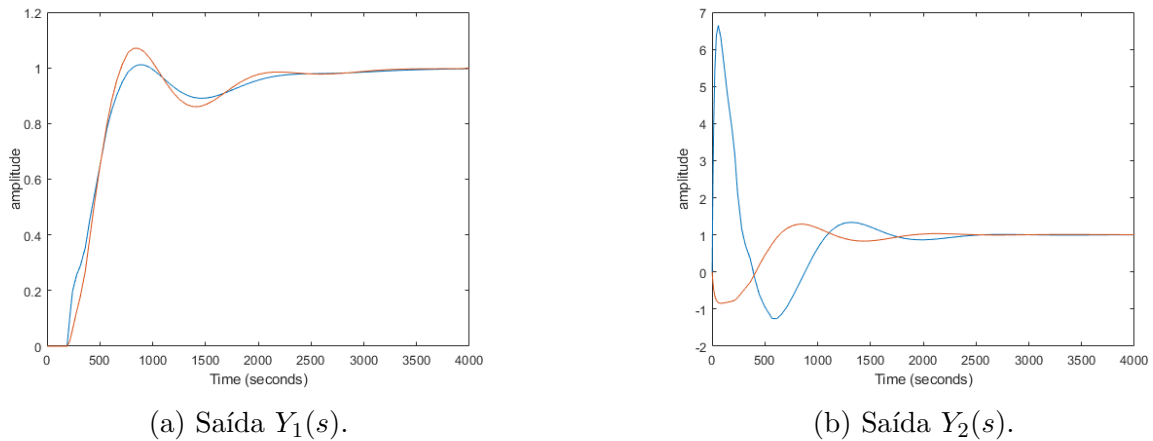


Fonte: Da Autora.

Assim é possível realizar uma análise comparativa entre as abordagens utilizadas para o controle de um processo MIMO. Primeiramente foi utilizado o método de Desacoplamento Estático o qual, de início, não apresentou uma resposta satisfatória. Na Figura 21, são mostradas as respostas para as saídas $Y_1(s)$ e $Y_2(s)$ e para a saída em (b) fica visível que para este caso em específico, o método utilizando o controle descentralizado obteve uma melhor resposta com um baixo sobressinal e rápida resposta em regime permanente como mostra os dados na Tabela 7.

Por fim, uma forma de obter uma comparação entre o sistema desacoplador-controlador é através dos índices de desempenho, apresentados na Tabela 8 o que confirma uma melhor resposta obtida utilizando o método do Controlador Descentralizado.

Figura 21 – Comparação entre as abordagens de controle para processos MIMO. A curva em azul refere-se à técnica de Desacoplador Estático e a curva em vermelho refere-se à técnica de Controle Descentralizado.



Fonte: Da autora.

Tabela 7 – Comparação entre as metodologias de controle: Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado

Parâmetro	Saída $Y_1(s)$		Saída $Y_2(s)$	
	Desacoplador Estático	Controlador Descentralizado	Desacoplador Estático	Controlador Descentralizado
Pico	1,01158	1,07267	6,642	1,27964
Ts	2712,66	2825,9	2469,31	2930,5

Tabela 8 – Índices de desempenho para o projeto desacoplador-controlador entre as técnicas de Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado

Índice	Desacoplador Estático		Controlador Descentralizado	
	$Y_1(s)$	$Y_2(s)$	$Y_1(s)$	$Y_2(s)$
IAE	26,1451	208,6726	29,3704	201,0814
ITAE	12776	372070	13659	313510
ISE	18,7153	325,1454	21,5573	300,1427

4.2 Projeto dos desacopladores e controladores para o modelo de Craig e MacLeod (1995)

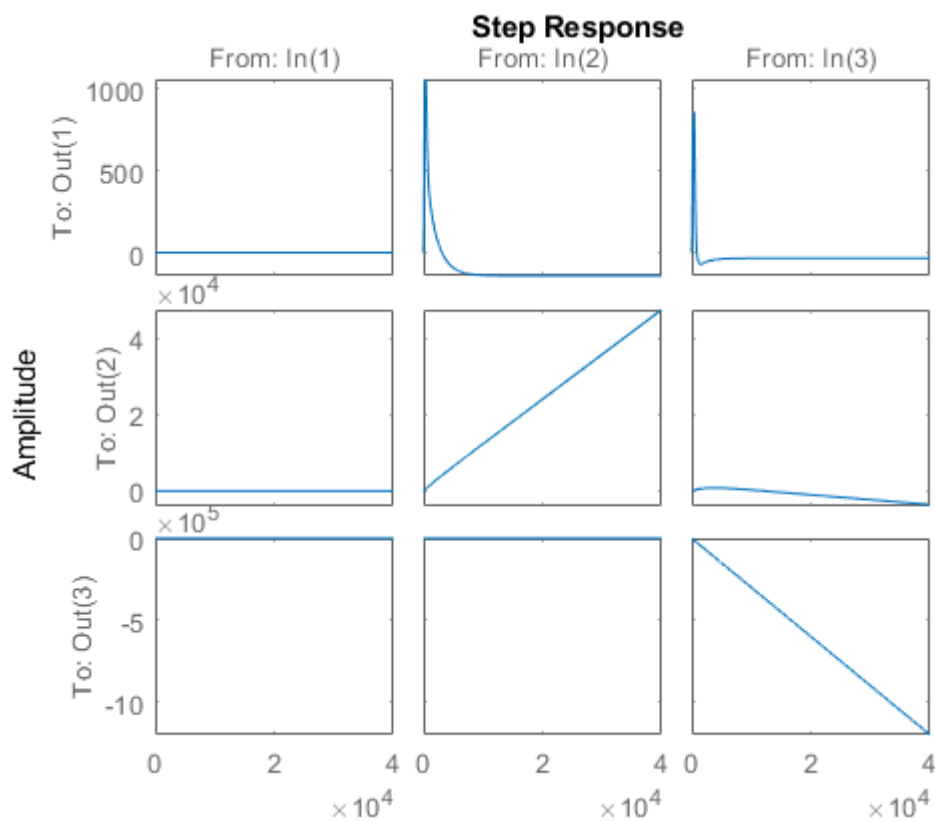
4.2.1 Avaliação do Desacoplador Estático

Pelo modelo de Craig e MacLeod (1995) apresentar característica de funções com integradores, será realizado uma manipulação matemática para a realização da obtenção do Desacoplador Estático. O primeiro passo é realizar a equivalência da variável s a um valor muito pequeno, próximo a zero. Foi escolhido a equivalência de $s = 1e^{-4}$ para teste. Posteriormente, obtém-se a matriz de $D(s)$ igual a

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1,7459 & 11496 & 8079,4 \\ -0,059175 & 9610,4 & -1051,2 \\ 1,4773 & 9727,1 & 16836 \end{bmatrix}.$$

De forma a visualizar a sua resposta ao desacoplamento, uma resposta ao degrau foi implementada e apresentada na Figura 22. Percebe-se que em estado estacionário as funções anti-diagonal, considerando o somatório para cada saída, tendem a zero, como o desejado.

Figura 22 – Desacoplador estático para o modelo de Craig e MacLeod (1995).

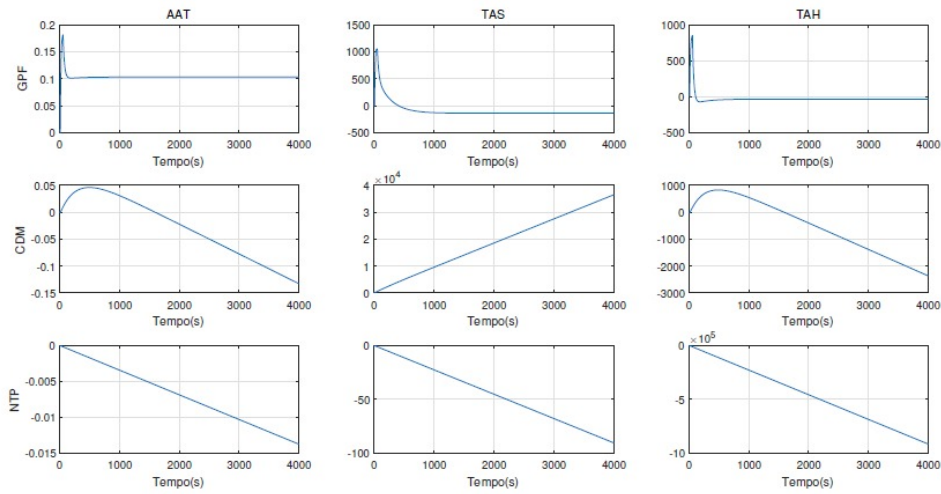


Fonte: Da Autora.

Para uma melhor visualização dos resultados, na Figura 23 é apresentada a resposta com um zoom para melhor compreensão dos valores. Como é abordado no trabalho de Castro (2020), podemos ter como exemplo a saída CDM, em que se somando as contribuições de cada sinal em estado estacionário das entradas, AAT, TAS e TAH, percebe-se que TAS é positiva de ordem de 10^4 e as entradas AAT e TAH possuem grandezas negativas da ordem de 10^1 e 10^3 respectivamente.

Na Tabela 9 são mostrados os índices de desempenho do desacoplador utilizando os índices IAE, ITAE e ISE. É possível perceber que a melhor resposta foi obtida pelo

Figura 23 – Sistema desacoplado para o modelo de Craig e MacLeod (1995).



Fonte: Adaptado de Castro (2020).

desacoplador D_{23} que obteve para os três índices valores tendendo à zero ou menores aos do que os outros desacopladores.

Tabela 9 – Índices de desempenho para o desacoplador estático para o modelo de Craig e MacLeod (1995) .

Desacoplador	Índice IAE	Índice ITAE	Índice ISE
D_{12}	$5,2742 \cdot 10^3$	$1,0476 \cdot 10^8$	$5,5901 \cdot 10^3$
D_{13}	5000	$0,9556 \cdot 10^8$	5000
D_{21}	$0,0074 \cdot 10^8$	$0,0134 \cdot 10^{12}$	$0,0002 \cdot 10^{12}$
D_{23}	0	$0,0001 \cdot 10^{12}$	0
D_{31}	$0,0002 \cdot 10^9$	$0,0003 \cdot 10^{13}$	0
D_{32}	$0,0065 \cdot 10^9$	$0,0173 \cdot 10^{13}$	0

4.2.2 Controle com Desacoplador Estático por meio da Sintonia IMC

Após encontrar a matriz desacopladora, são definidos os parâmetros do controlador K_p , K_I e K_D . Com o desacoplamento, é necessário sintonizar os controladores $C_1(s)$, $C_2(s)$ e $C_3(s)$ a partir das malhas $G_{11}(s)$, $G_{22}(s)$ e $G_{33}(s)$.

Projetando um controlador $C_1(s)$ por meio da função de transferência $G_{11}(s)$ definida em (2.2),

$$G_{11}(s) = \frac{0,105}{83s + 1} e^{-65s} \quad (4.12)$$

é definido os parâmetros

$$K = 0,105, \quad (4.13)$$

$$\theta = 65, \quad (4.14)$$

$$\tau = 83, \quad (4.15)$$

$$\tau_c = 10 \cdot \theta. \quad (4.16)$$

Normalmente nos projetos de controladores é utilizado $\tau_c = \theta$ mas para este caso em específico esta definição não proveu ganhos estabilizantes devido a rapidez da planta com integradores. Desta forma, escolheu-se $\tau_c = 10 \cdot \theta$ como teste simulacional. Assim, encontraram-se os parâmetros $K_P = 5.37$, $K_I = 0.0647$ e $K_D = 0$, configurando-se como um controlador PI com uma função de transferência como

$$C_1(s) = \frac{5,37s + 0,0647}{s}. \quad (4.17)$$

Projetando um controlador $C_2(s)$ por meio da função de transferência $G_{22}(s)$ descrito em (2.2),

$$G_{22}(s) = \frac{0,000122}{s}, \quad (4.18)$$

pode-se definir os parâmetros do controlador como

$$K = 0,000122, \quad (4.19)$$

$$\tau_c = 10 \cdot 65, \quad (4.20)$$

no qual define-se os ganhos de um controlador PI $K_P = 25,2$, $K_I = 0,0194$ e $K_D = 0$, com uma função de transferência como

$$C_2(s) = \frac{25,2s + 0,0194}{s}. \quad (4.21)$$

Projetando um controlador $C_3(s)$ por meio da função de transferência $G_{33}(s)$ descrito em (2.2),

$$G_{33}(s) = \frac{-0,00299}{s}, \quad (4.22)$$

define-se os parâmetros como

$$K = -0,00299, \quad (4.23)$$

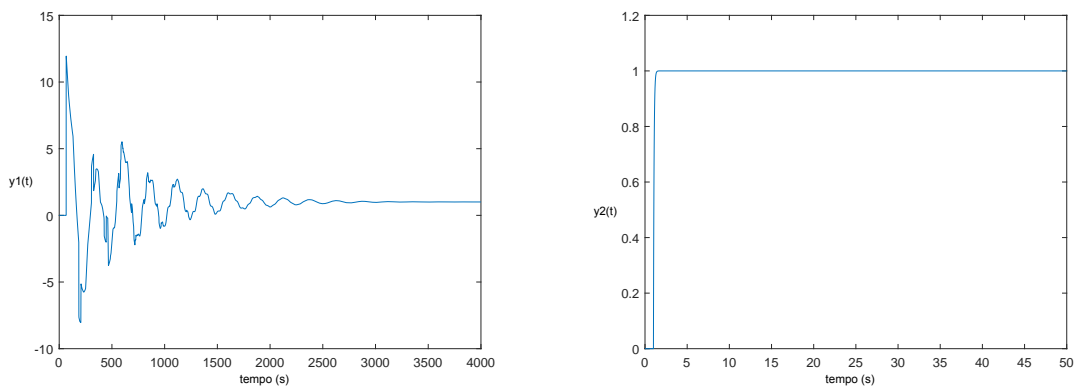
$$\tau_c = 10 \cdot 65, \quad (4.24)$$

e encontram-se os parâmetros $K_P = -1,03$, $K_I = -0,000792$ e $K_D = 0$, configurando-se como um controlador PI com uma função de transferência como

$$C_3(s) = \frac{-1,03s - 0,000792}{s}. \quad (4.25)$$

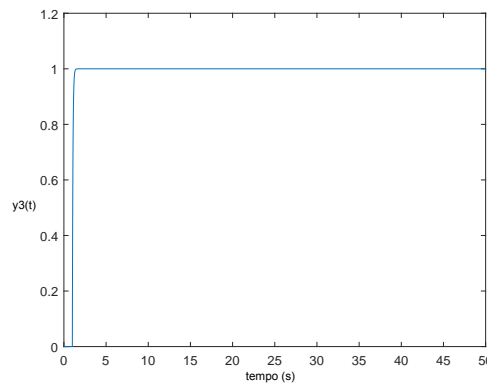
A partir da implementação do sistema no *software* Simulink para a visualização da resposta mediante o controlador e o desacoplador para o modelo de Craig e MacLeod (1995), obtêm-se as respostas $Y_1(s)$, $Y_2(s)$ e $Y_3(s)$.

Figura 24 – Controle para o modelo de Craig e MacLeod (1995) utilizando o método IMC.



(a) Saída $Y_1(s)$.

(b) Saída $Y_2(s)$.



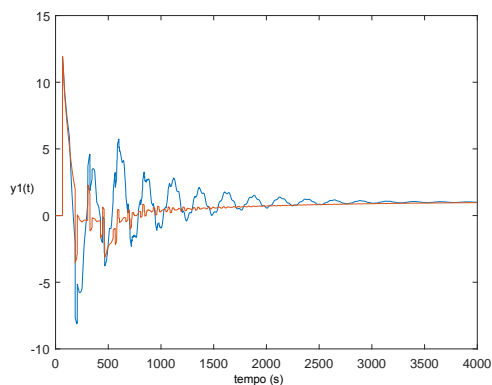
(c) Saída $Y_3(s)$.

Fonte: Da autora.

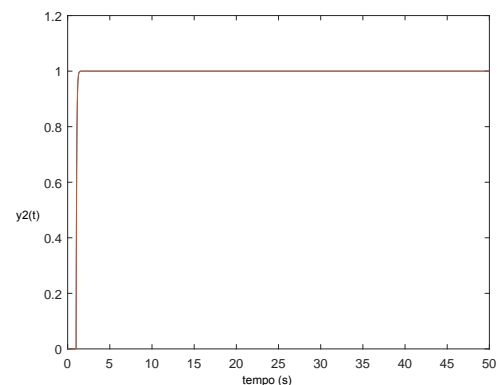
A partir das Figuras apresentadas em 24, é possível realizar uma análise sobre o projeto do desacoplador-controlador para o modelo de Craig e MacLeod (1995). As saídas $Y_2(s)$ e $Y_3(s)$ obtiveram uma resposta satisfatória ao entrarem após um curto período de tempo em regime estacionário. A saída $Y_1(s)$ apresentou uma resposta oscilatória com máximo sobressinal com amplitude 12 e um tempo de aproximadamente 2500s para estacionariedade do sistema. Testes foram realizados alterando o valor de θ , em que com seu aumento, diminui-se o tempo de acomodação.

A partir dos parâmetros definidos anteriormente para o projeto do controlador IMC, foram projetados os controladores utilizando o Método do Modelo Interno Simples (SIMC) e o Método da Síntese Direta (SD). Porém, a resposta obtida para o Método Síntese Direta gerou instabilidade no sistema e não são apresentadas. As saídas para o Método SIMC foram comparadas juntamente ao método IMC e apresentadas na Figura 25.

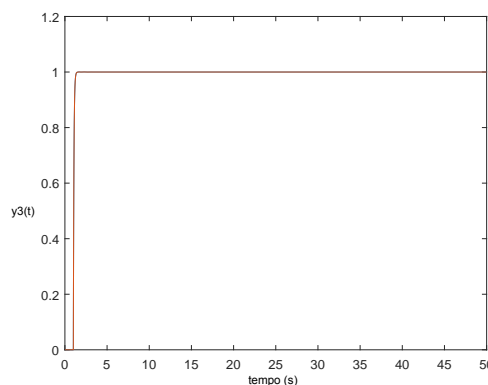
Figura 25 – Comparação entre as sintonias de controle IMC (em azul) e SIMC (em vermelho) para o modelo de Craig e MacLeod (1995).



(a) Saída $Y_1(s)$.



(b) Saída $Y_2(s)$.



(c) Saída $Y_3(s)$.

Fonte: Da autora.

A partir da comparação entre sintonias, para a saída $Y_1(s)$ pelo método SIMC obteve-se melhor resultado pois, apesar de apresentar oscilações como ocorrem no Modelo Interno Simples, possuem um menor pico e um menor tempo de assentamento do sistema.

Para avaliação do controlador e de uma possível melhora da saída do sistema, foi realizada a simulação do sistema juntamente ao Desacoplador Estático abordado no trabalho de Castro (2020). Para o cálculo dos controladores, o sistema foi aproximado para funções de transferência de segunda ordem com atraso e funções integradoras sem atraso de transporte, dadas por

$$T(s) = \begin{bmatrix} \frac{0,0018048(s+0,00389)}{(s+0,00568)(s+0,012)} e^{-65s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0,000122}{s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-0,00299}{s} \end{bmatrix}.$$

e utilizando os ganhos apresentados na Tabela 10 para o projeto dos controladores empregando o método LMI,

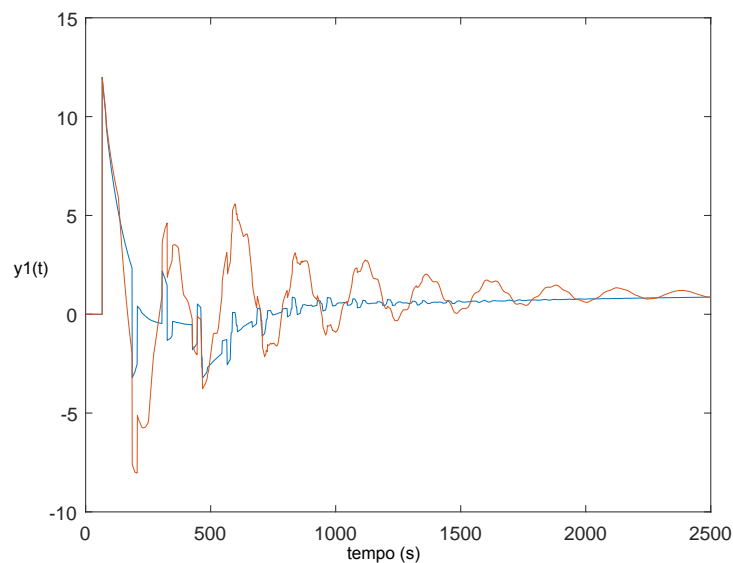
Tabela 10 – Ganhos para o controlador pelo método LMI.

Malha	RLMI	
	K_p	K_i
AAT	0,039707	0,0082491
TAS	8380	1689
TAH	-1214	-524,3

Fonte: Castro (2020).

Desta forma, foi possível realizar a comparação entre as simulações, sendo a primeira delas apresentadas no trabalho de Castro (2020) e a segunda, através do método IMC utilizando todo o sistema para definir os valores dos ganhos dos controladores. Na Figura 26 é evidenciado que a resposta obtida pelo autor Castro (2020) apresentou uma resposta com melhor tempo de assentamento e menos oscilações comparadas ao obtido pela autora com o método IMC neste trabalho.

Figura 26 – Em azul, saída $Y_1(s)$ utilizando os ganhos LMI propostos no trabalho de Castro (2020) e em vermelho, saída $Y_1(s)$ proposta com os ganhos pelo método IMC pela autora.



Fonte: Da autora.

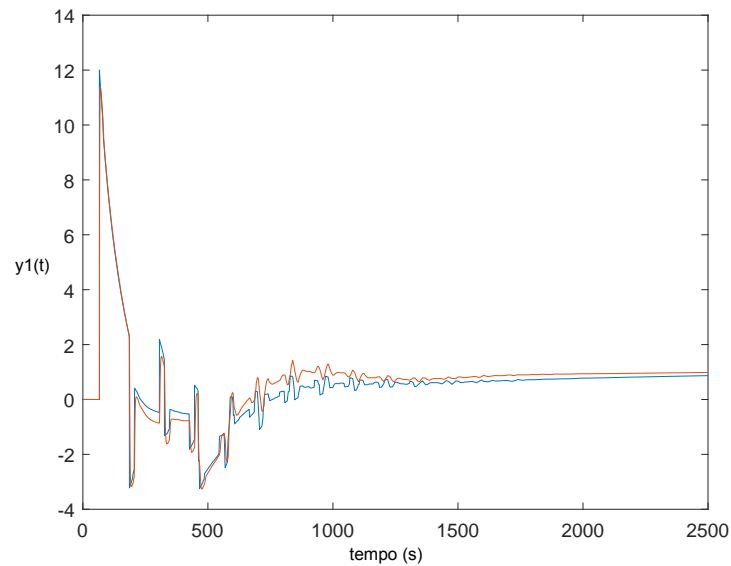
A fim de se obter uma resposta comparativa utilizando a função de transferência aproximada, foi realizado o projeto de controladores utilizando o método IMC, apresentando a resposta apresentada na Figura 27, cujos controladores obtidos foram

$$C_1(s) = \frac{0,033s + 0,0142 + 200s^2}{s}, \quad (4.26)$$

$$C_2(s) = \frac{0,841s + 2,16 \cdot 10^{-5}}{s}, \quad (4.27)$$

$$C_3(s) = \frac{-0,0343s - 8,8 \cdot 10^{-7}}{s}. \quad (4.28)$$

Figura 27 – Em azul, saída $Y_1(s)$ utilizando os ganhos LMI propostos no trabalho de Castro (2020) e em vermelho, saída $Y_1(s)$ proposta com os ganhos por intermédio da função de transferência aproximada obtida pelo método IMC.



Fonte: Da autora.

Pode-se observar com o projeto de controladores IMC proposto uma resposta próxima à apresentada no trabalho de Castro (2020). Portanto, para projetos que possuem integradores em suas funções de transferência, a técnica via Desacoplador Estático aproximado, na qual faz-se s tender a um valor próximo de zero, mostra uma boa solução para o desenvolvimento dos controladores para o planejamento do sistema.

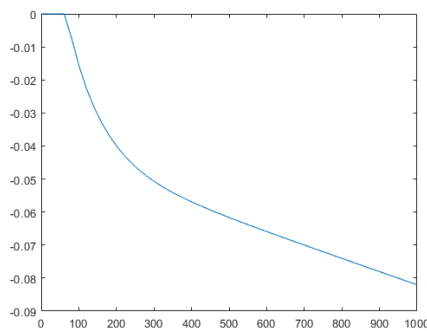
4.2.3 Avaliação do Projeto de Sistema de Controle Descentralizado para o modelo Craig e MacLeod (1995)

Para o modelo em estudo de Craig e MacLeod (1995), foram computados os valores dos termos de NI e RGA para a obtenção da função de transferência equivalente. O NI obteve um valor igual a 323,8489 e

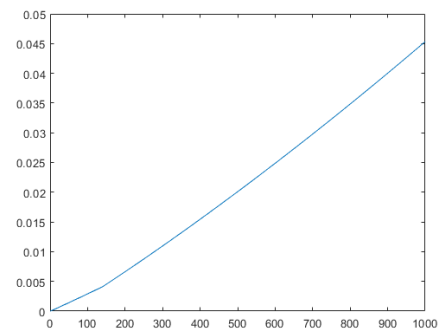
$$RGA = \begin{bmatrix} 0,0031 & 0,9983 & -0,0014 \\ -0,9251 & 0,0017 & 1,9234 \\ 1,9220 & 0 & -0,9220 \end{bmatrix}.$$

Em ??) no qual aborda o uso do método do Controlador Descentralizado, descreve-se que ao calcular o índice NI, os pares de entrada-saída selecionados são reordenados de forma que as funções de transferência recaiam sobre a diagonal. Um dos critérios para o pleno funcionamento do emparelhamento é que o valor de NI seja positivo e próximos de 1,0. Neste caso, foi obtido um valor bem acima do proposto e a saída apresentou uma instabilidade na resposta, como se mostra na Figura 28. Para funções contendo integradores, não foi encontrada uma opção para o desenvolvimento dos controladores que alcançassem uma resposta satisfatória ao utilizar o Controle Descentralizado.

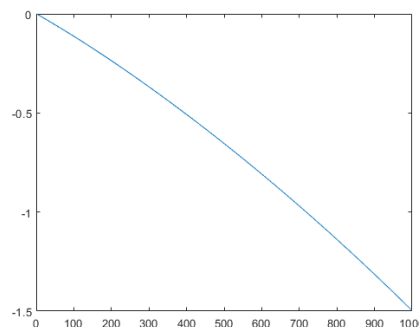
Figura 28 – Saída utilizando o caso de Controle Descentralizado para o método IMC.



(a) Saída $Y_1(s)$.



(b) Saída $Y_2(s)$.



(c) Saída $Y_3(s)$.

Fonte: Da autora.

4.3 Projeto dos desacopladores e controladores para o modelo de Reis (2018)

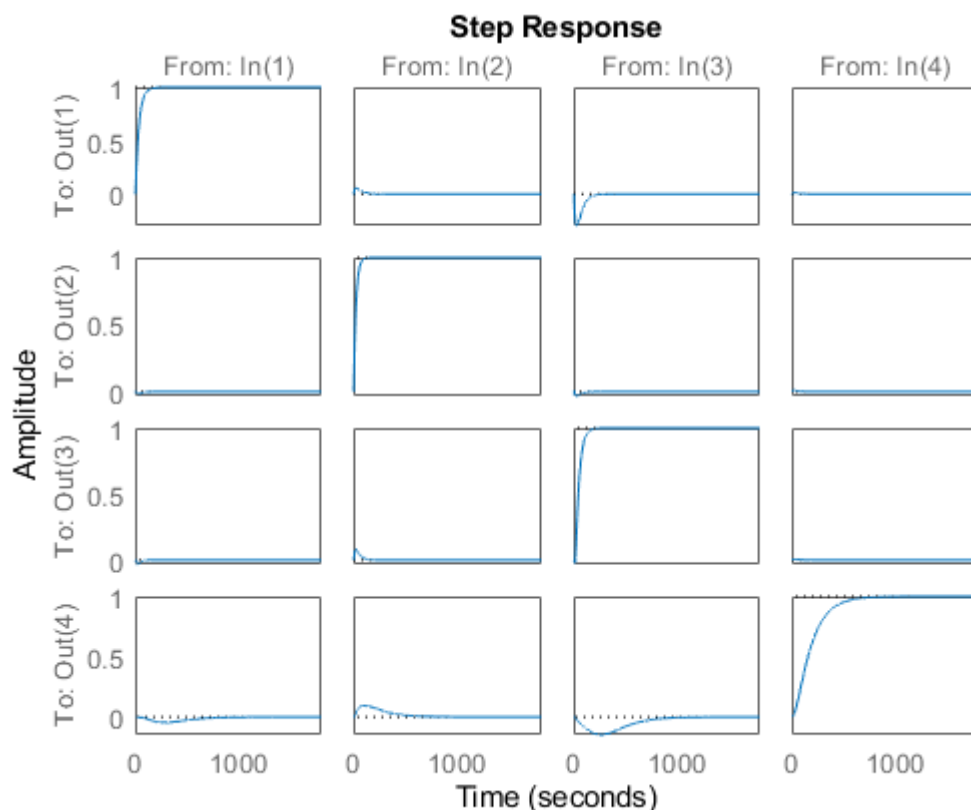
4.3.1 Avaliação do Desacoplador Estático

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 29 é possível visualizar a resposta ao degrau empregando o modelo $G(s)$ e o desacoplador $D(s)$.

Figura 29 – Desacoplador estático para o modelo de Reis (2018).



Fonte: Da Autora.

O desacoplador implementado obteve uma resposta satisfatória. Analisando a Figura 29, nota-se que, nas respostas fora da diagonal principal, todos os valores tenderam a zero em regime permanente, comprovando o desacoplamento das variáveis. Para veri-

ficção do desempenho do desacoplador, na Tabela 11, são apresentados os índices de desempenho.

Tabela 11 – 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

Fonte: Da autora.

4.3.2 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), são 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 $G_{11}(s)$ advinda do modelo de Reis (2018)

$$G_{11}(s) = \frac{0.032}{(2.307s + 1)(2.307s + 1)} e^{-3s} \quad (4.29)$$

e utilizando o modelo K da Tabela 2, define-se os seguintes parâmetros

$$K = 1, \quad (4.30)$$

$$\theta = 3, \quad (4.31)$$

$$\tau_1 = 2,307, \quad (4.32)$$

$$\tau_2 = 2,307, \quad (4.33)$$

$$\tau_c = \theta. \quad (4.34)$$

encontrando assim os ganhos $K_P = 0,769$, $K_I = 0,167$ e $K_D = 0,887$, com uma função de transferência para o controlador como

$$C_1(s) = \frac{0,887s^2 + 0,769s + 0,1667}{s}. \quad (4.35)$$

Seguindo o projeto do controlador, através da função de transferência $G_{22}(s)$ desenvolve-se o controlador $C_2(s)$

$$G_{22}(s) = \frac{-0,003}{4,615s + 1} e^{-95s} \quad (4.36)$$

e utilizando o modelo G da Tabela 2 define-se os parâmetros

$$K = 1, \quad (4.37)$$

$$\theta = 95, \quad (4.38)$$

$$\tau = 4,615, \quad (4.39)$$

$$\tau_c = \theta. \quad (4.40)$$

encontrando os ganhos $K_P = 0,366$, $K_I = 0,00702$ e $K_D = 0,563$, com uma função de transferência para o controlador como

$$C_2(s) = \frac{0,5626s^2 + 0,3657s + 0,007018}{s}. \quad (4.41)$$

Projetando o controlador $C_3(s)$ através da função de transferência $G_{33}(s)$

$$G_{33}(s) = \frac{-0,017}{(32,354s + 1)(9,185s + 1)} e^{-15s} \quad (4.42)$$

e utilizando o modelo K da Tabela 2, define-se os parâmetros

$$K = 1, \quad (4.43)$$

$$\theta = 15, \quad (4.44)$$

$$\tau_1 = 32,3545, \quad (4.45)$$

$$\tau_2 = 9,185, \quad (4.46)$$

$$\tau_c = \theta. \quad (4.47)$$

encontrando os seguintes ganhos $K_P = 1,38$, $K_I = 0,0333$ e $K_D = 9,91$, com uma função de transferência para o controlador como

$$C_3(s) = \frac{9,906s^2 + 1,385s + 0,03333}{s}. \quad (4.48)$$

E por fim, projetando o controlador $C_4(s)$ através da função de transferência $G_{44}(s)$

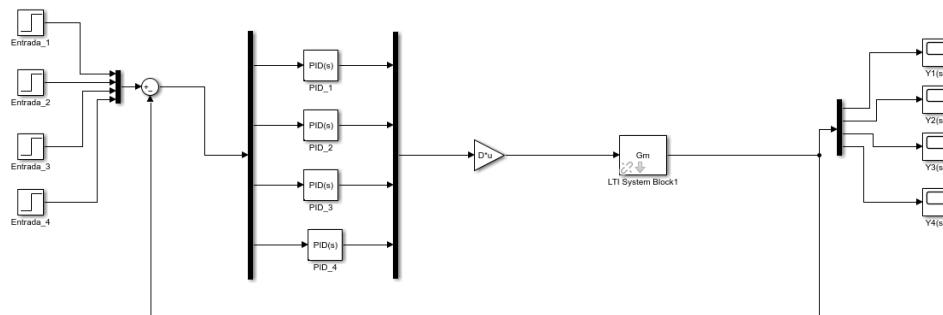
$$G_{44}(s) = \frac{-1,265}{(127,877s + 1)(61,354s + 1)} e^{-15s} \quad (4.49)$$

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

$$C_4(s) = \frac{261s^2 + 6,308s + 0,0333}{s}. \quad (4.50)$$

Na Figura 30, 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.

Figura 30 – Simulação por meio do Simulink do projeto controlador-desacoplador para o modelo de Reis (2018).



Fonte: Da Autora.

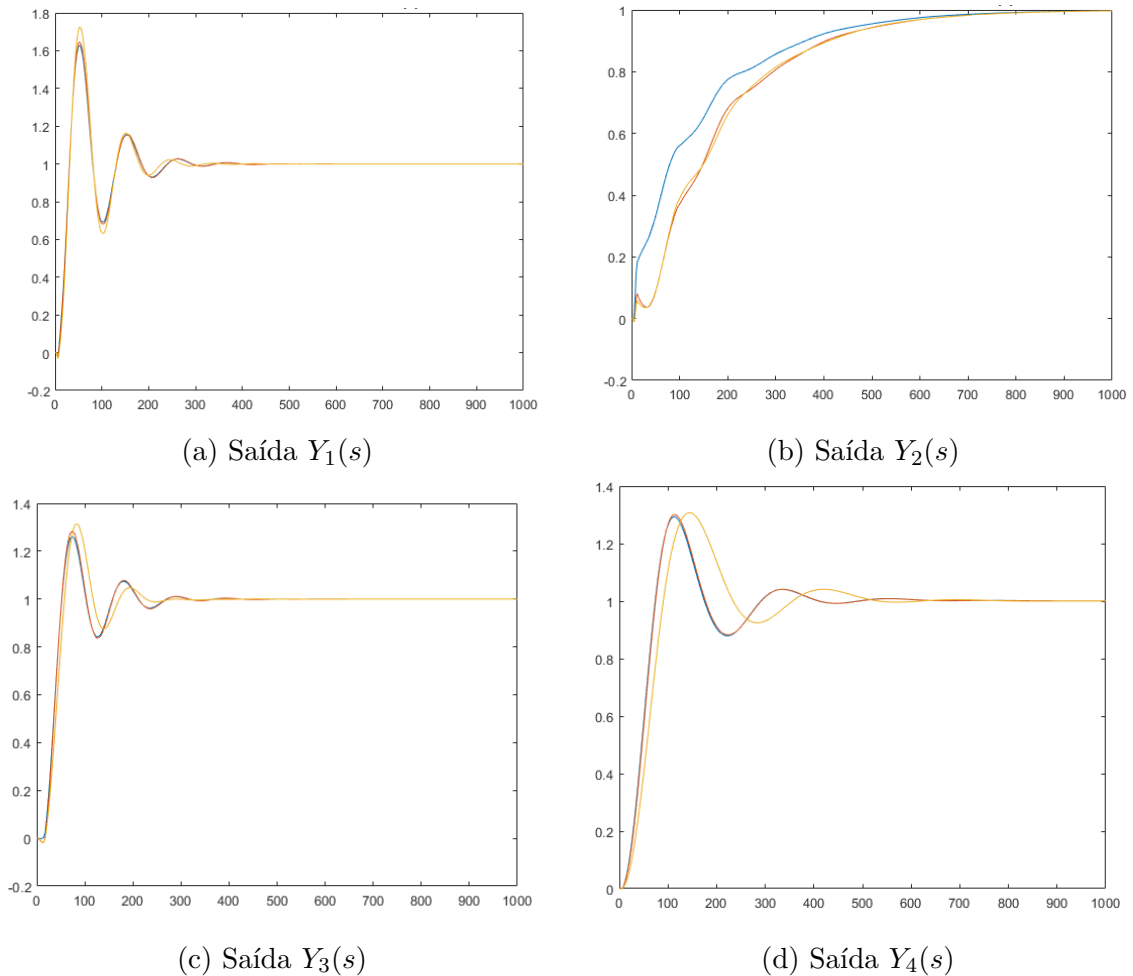
Na Figura 31 são apresentadas as respostas para as saídas dos sistemas comparando-as entre as sintonias IMC, SIMC e Síntese Direta. Em relação a análise sobre as sintonias, a IMC e a SIMC apresentaram bastante similaridade, com uma resposta mais discrepante na saída $Y_2(s)$ em que a IMC possui uma resposta mais acelerada.

Analisando a Figura 31(a), percebe-se um alto sobressinal na resposta quando comparada às saídas mostradas nas Figuras 31(b)-31(d). 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 e 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 aproximado a 1,3.

4.3.3 Controle sem desacoplador através da Sintonia IMC

Objetivando apresentar uma comparação entre as respostas obtidas com um sistema sem desacoplador, aos moldes do que foi feito na Seção 4.1.3, apresenta-se, uma simulação considerando a matriz do desacoplador igual à identidade.

Figura 31 – Comparativo entre as saídas do sistema de controle IMC (em azul), SIMC (em vermelho) e Síntese Direta (em laranja) com desacoplador estático.



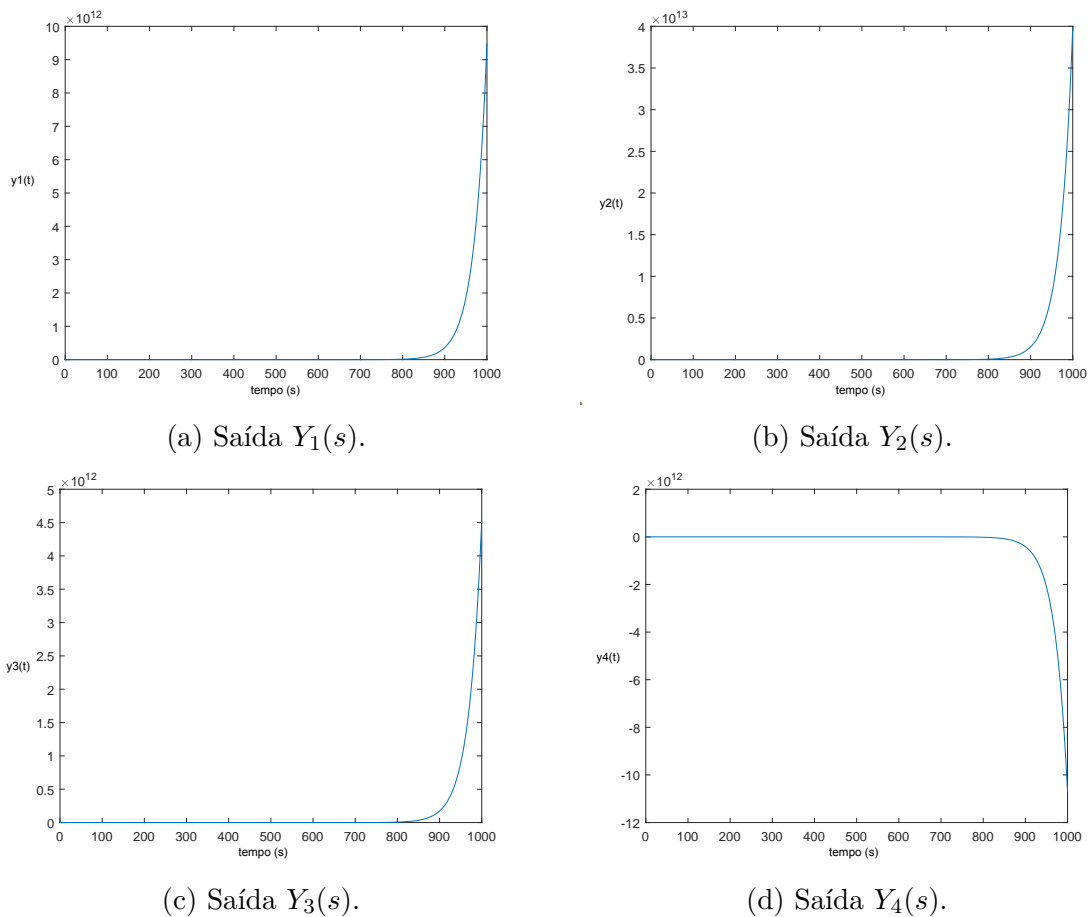
Fonte: Da autora.

Para as quatro saídas $Y_1(s)$ - $Y_4(s)$, 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.

4.3.4 Avaliação do Projeto de Sistema de Controle Descentralizado para o modelo Reis (2018)

Utilizando os conceitos abordados no Capítulo 3 sobre o método de projeto de controladores descentralizados, calcula-se os termos RGA e NI para obtenção da função de transferência equivalente, obtendo o valor de NI igual a 2144,5 e

Figura 32 – Saída obtida por meio do controle sem desacoplador pelo método de sintonia IMC.



Fonte: Da autora.

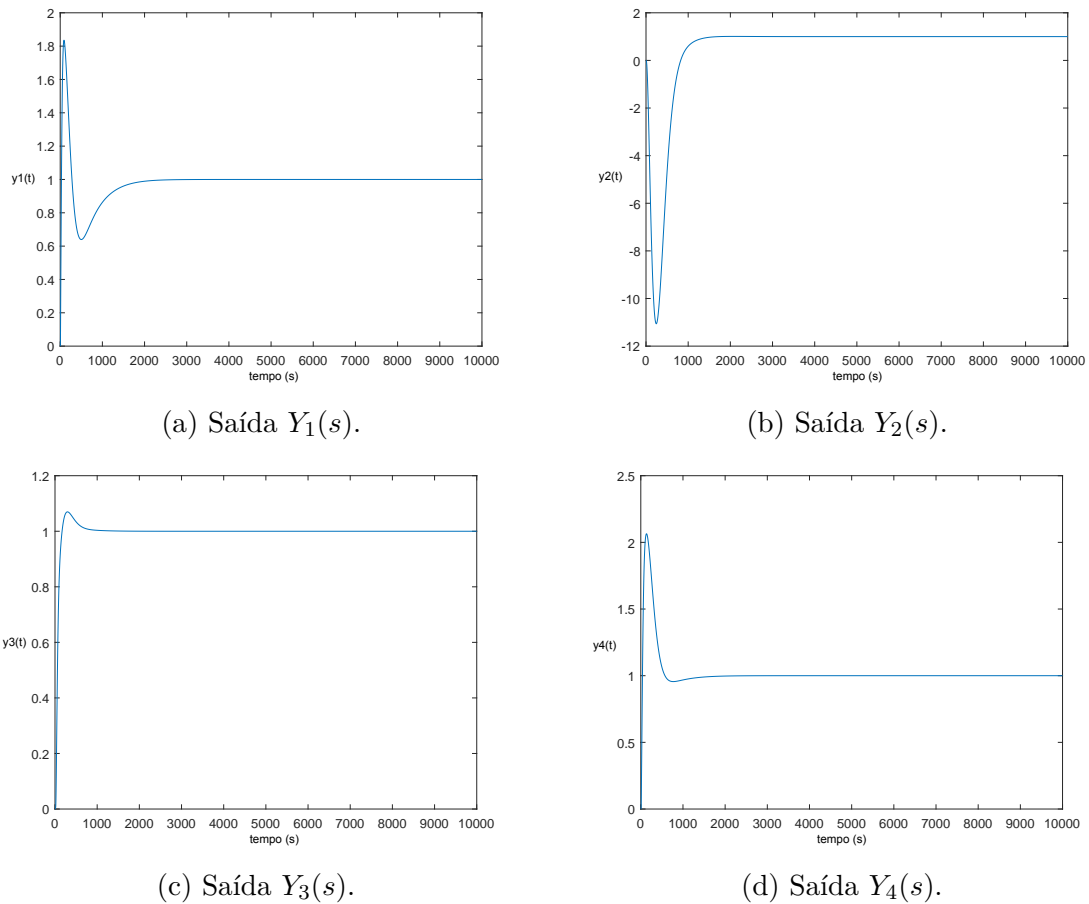
$$RGA = \begin{bmatrix} 0,0768 & 0,0009 & -0,3249 & 1,2471 \\ 0,7495 & -0,0010 & 0,3435 & -0,0919 \\ 0,1082 & 0,4609 & 0,5441 & -0,1132 \\ 0,0656 & 0,5392 & 0,4373 & -0,0420 \end{bmatrix}.$$

Dessa forma, são projetados os controladores a partir das funções de transferência $G_{14}(s)$, $G_{21}(s)$, $G_{33}(s)$ e $G_{42}(s)$. Utilizando a sintonia IMC, foram obtidas as seguintes saídas mostradas na Figura 33.

É possível realizar uma comparação das metodologias desenvolvidas e definir que com o método do Desacoplador Estático obteve melhores resultados, com um menor pico e tempo de assentamento comparado ao método do Controle Descentralizado. Tal avaliação é pertinente uma vez que o valor obtido na simulação do NI estava na casa de 10^3 , situação não desejável, pois a literatura, recomenda que seja um valor positivo e próximo à unidade. Os valores de comparação entre as metodologias são demonstrados nas Tabelas 12 e 13.

E por fim, um método utilizado para avaliar o comportamento de todo o sistema

Figura 33 – Saídas através do controle descentralizado utilizando a sintonia IMC.



Fonte: Da autora.

Tabela 12 – Comparação entre as metodologias de controle: Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado. Saídas Y_1 e Y_2 .

Parâmetro	Saída $Y_1(s)$		Saída $Y_2(s)$	
	Desacoplador Estático	Controlador Descentralizado	Desacoplador Estático	Controlador Descentralizado
Pico	1,62	1,82	1,0	-11,5
Ts	409,87	2190,87	979,67	1879,47

Tabela 13 – Comparação entre as metodologias de controle: Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado. Saídas Y_3 e Y_4 .

Parâmetro	Saída $Y_3(s)$		Saída $Y_4(s)$	
	Desacoplador Estático	Controlador Descentralizado	Desacoplador Estático	Controlador Descentralizado
Pico	1,26	1,07	1,29	2,16
Ts	446,05	1218,64	506,79	1876,89

(desacoplador-controlador), utiliza-se a representação dos índices de desempenho, mostrados na Tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Índices de desempenho para o projeto desacoplador-controlador entre as técnicas de Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado

Índice	Desacoplador Estático		Controlador Descentralizado	
	$Y_1(s)$	$Y_2(s)$	$Y_1(s)$	$Y_2(s)$
IAE	31,1826	407,0349	$7,11 \cdot 10^{27}$	$4,77 \cdot 10^{25}$
ITAE	1646,2	163960	$3.8535 \cdot 10^{30}$	$2.5839 \cdot 10^{28}$
ISE	13,7433	407,0962	$6.06 \cdot 10^{53}$	$2,24 \cdot 10^{49}$

Tabela 15 – Índices de desempenho para o projeto desacoplador-controlador entre as técnicas de Desacoplador Estático e Controlador Descentralizado

Índice	Desacoplador Estático		Controlador Descentralizado	
	$Y_3(s)$	$Y_4(s)$	$Y_3(s)$	$Y_4(s)$
IAE	407,3088	407,9270	$1,14 \cdot 10^{27}$	$9,82 \cdot 10^{27}$
ITAE	164040	164040	$6,20 \cdot 10^{29}$	$5,3350 \cdot 10^{30}$
ISE	407,8365	408,8651	$1,217 \cdot 10^{52}$	$1,054 \cdot 10^{54}$

Os dados indicados na Tabela 14-15 deixam claro uma resposta mais estável quando utiliza-se o desacoplador estático, com menores índices positivos comparados ao se utilizar o controlador descentralizado.

4.4 Conclusão Parcial

Pode-se levantar alguns pontos sobre as respostas obtidas nas simulações neste capítulo. 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 realizadas as simulações desconsiderando a presença do desacoplador, de modo a visualizar o propósito do uso de desacopladores. Portanto, ao decorrer deste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos das simulações para dois casos de estudo: Desacoplador Estático e Controle Descentralizado.

Para o modelo de Ivezić e Petrović (2003), o Desacoplador Estático não obteve uma resposta satisfatória, influenciando posteriormente a resposta juntamente com os controladores, sendo que a saída $Y_2(s)$ apresentou um alto máximo sobressinal em 6,642. Ao realizar a implementação utilizando os conceitos do Controlador Descentralizado, uma resposta com um menor máximo sobressinal e tempo de assentamento foi obtido.

Para o modelo de Craig e MacLeod (1995), o Desacoplador Estático foi o que apresentou uma melhor resposta mas não necessariamente a esperada. Para continuidade da avaliação de todo o sistema foi desenvolvido um projeto de controladores para a planta utilizando um método de aproximação da função de transferência do sistema, a qual foi apresentada no trabalho de Castro (2020). Com esta aproximação, foi possível projetar os

controladores para o caso da função contendo integradores. Algumas manipulações sobre os ganhos dos controladores foram necessárias para a obtenção das respostas apresentadas e espera-se em trabalhos futuros desenvolver outros projetos em cima deste modelo. Entretanto, poucos avanços foram obtidos ao utilizar a técnica do Controle Descentralizado.

Para o estudo do modelo de Reis (2018), uma melhor resposta foi obtida utilizando o método do Desacoplador Estático comparado ao método do Controle Descentralizado, que forneceu parâmetros não condizentes com o estipulado no artigo, com um valor de NI na casa dos 10^3 enquanto se esperava um valor próximo à unidade.

5 Conclusão

A interação entre as malhas de controle é um fator importante que afeta de modo considerável a qualidade do sistema de controle. Para sistemas multivariáveis, a utilização de desacopladores é considerada para realizar o desacoplamento das variáveis, com o objetivo em compensar o efeito indireto das interações. Como primeira etapa realizada neste estudo, foi feita uma pesquisa descritiva na literatura sobre os desacopladores existentes e concluir com a implementação dos controladores PI SISO nas plantas de processo de moagem.

No Capítulo 3 foram apresentados os seguintes desacopladores: desacoplador ideal, desacoplador simplificado, desacoplador invertido, desacoplador estático, desacoplador aproximado na frequência e o método do projeto de sistemas de controle descentralizado para processos MIMO. Para os três modelos do processo de moagem abordados no Capítulo 2, foram realizadas simulações computacionais utilizando o *software Matlab* aplicando os desacopladores na malha. Para os desacopladores ideal, simplificado, invertido e aproximado na frequência, não foram obtidas respostas condizentes com o esperado pelo fato dos modelos apresentarem como característica funções com diferentes tipos de atraso.

Portanto, foi analisado o funcionamento entre o desacoplador estático e o controle descentralizado para os três modelos em estudo, desenvolvendo posteriormente para cada um deles controladores utilizando as sintonias do Método do Modelo Interno (IMC), o Método do Modelo Interno Simples (SIMC) e o Método da Síntese Direta (SD). Para os casos em que o desacoplamento das variáveis foi possível, um comparativo avaliando a saída através do tempo de assentamento e pico, além da avaliação pelos índices de desempenho (IAE, ITAE e ISE) entre os dois métodos foi realizado, a fim de se apresentar as diferenças dos parâmetros encontrados nas saídas.

Assim é possível validar o desempenho dos desacopladores em sistemas MIMO, como foi instigado em uma das perguntas para essa pesquisa. O desacoplador estático caracteriza-se por ser o desacoplador mais simples, de forma que apenas as interações em regime permanente são consideradas. Sua implementação para os modelos do processo de moagem foi possível, levando algumas considerações. Em primeiro, para o modelo de Ivezić e Petrović (2003), um alto sobressinal foi encontrado para a saída $Y_2(s)$. Para o modelo de Craig e MacLeod (1995) com o uso do desacoplador estático uma boa resposta foi gerada aplicado ao desenvolvimento dos controladores, mas levando em consideração uma manipulação matemática anterior à obtenção da matriz desacopladora devido ao comportamento do modelo com atrasos no sistema e funções integradoras. Para o modelo de Reis (2018) o desacoplador estático ofereceu uma ótima solução para o desacoplamento

das variáveis e foi possível implementar os controladores utilizando as técnicas de sintonia, sendo capaz de visualizar com os mesmos parâmetros, respostas ótimas utilizando a sintonia IMC e a SIMC.

O método do controlador descentralizado trabalha no conceito da matriz de ganho normalizado relativo (RGNA) propondo uma abordagem para processos MIMO que possuem características com integradores e/ou diferenciadores. Através do índice de ganho relativo (RGA) e o índice de Nederlinski (NI) é possível determinar o pareamento de entrada-saída de forma a decompor o processo MIMO em um conjunto de processos SISO. Esta abordagem foi descrita para realizar um trabalho em cima principalmente do modelo apresentado em Craig e MacLeod (1995) que possui funções integradoras em seu processo. Entretanto, os índices apontados para este modelo não obteve os valores definidos pelo estudo, e portanto, sua resposta tendeu à instabilidade. Da mesma forma, para o modelo de Reis (2018) com os parâmetros em não acordo com os solicitados pela técnica, obteve-se uma resposta com altos sobressinais e índices de desempenho não tão eficazes como os obtidos ao desacoplador estático. Para o processo de moagem descrito em Ivezić e Petrović (2003), esta técnica apresentou um resultado com menor pico comparado ao obtido pelo desacoplador estático.

Como segundo questionamento levantado, os fatores que impediram o sucesso do desacoplamento se deram em específico pelos atrasos de sistemas presentes em todos os modelos de processos de moagem como também, para o modelo de Craig e MacLeod (1995), apresentar características de funções integradoras. Em relação ao projeto de controladores foi utilizado três tipos de sintonia, sendo elas a IMC, a SIMC e a Síntese Direta. Ao decorrer do Capítulo 4 foram realizadas comparações gráficas entre elas e de forma geral, o método IMC e SIMC apresentou ótimos resultados.

Em conclusão, acredita-se que com o uso de controladores PID, por serem mais simples, de fácil ajuste e bem aproveitados na indústria associados as técnicas de desacoplamento, seja possível reduzir aumentar a eficiência do processo de moagem, reduzindo o consumo de energia.

5.1 Trabalhos Futuros

Espera-se para trabalhos futuros, sugerir:

- Novos métodos de desacoplamento para os modelos;
- inserção de perturbações nos modelos a fim de se observar a reação dos controladores projetados;
- análise das variáveis de controle posterior a implementação desacoplador-controlador.

Referências

- BAETA, J. d. S. *Implementação e Análise Comparativa de Técnicas de Controle PID em Sistemas Distribuídos e Centralizados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. 20, 21, 22
- BARRETO, M. L. et al. *Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o brasil*. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 2001. 6
- CASTRO, F. F. d. *Projeto de controladores PI robusto para processos de moagem empregando desigualdades matriciais lineares*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2020. 10, 2, 12, 39, 40, 43, 44, 45, 54
- 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. 2, 9
- 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. 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. 9, 10, 11, 13, 14, 4, 31, 33, 36, 38, 39, 40, 42, 43, 46, 54, 56, 57
- CRAIG, L. E. O. I. K. A survey on the degree of automation in the mineral processing industry. *IEEE*, 2017. 3
- DUTRA, R. Beneficiamento de minerais industriais. In: *49º Congresso brasileiro de cerâmica, São Pedro-SP*. [S.l.: s.n.], 2005. 8
- FARIAS, C. E. G. Mineração e meio ambiente no Brasil. *Relatório do CGEE/PNUD*, v. 76, p. 2, 2002. 6
- FRANCHI, C. M. *Controle de Processos Industriais: Princípios e Aplicações*. [S.l.]: Saraiva, 2011. 1, 14, 25, 26
- HU, W.; CAI, W.-J.; XIAO, G. Decentralized control system design for MIMO processes with integrators/differentiators. *Industrial & engineering chemistry research*, ACS Publications, v. 49, n. 24, p. 12521–12528, 2010. 23
- 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. 9, 11, 14, 4, 31, 32, 34, 37, 54, 56, 57
- LUZ, A. B. d.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. In: . [S.l.]: CETEM/MCTIC, 2018. 6, 7
- MACKENZIE, A. Bhp planeja cortes mais profundos para enfrentar queda em commodities. *Reuters Brasil*, 2015. 6

- MINERAÇÃO, I. B. de. Qual a importância da mineração para a economia do país? *Portal Técnico e Mineração*, 2017. 1
- OLIVIER, L. E.; CRAIG, I. K. A survey on the degree of automation in the mineral processing industry. p. 404–409, 2017. 3
- PEREIRA JR., M.; EUZÉBIO, T. A. M. Controlador *fuzzy* multivariável aplicado a um simulador de circuito de moagem. v. 47, n. 2, 2017. ISSN 2594-357X. 1, 2
- 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. 29
- REIS, L. A. *Controle preditivo por modelo de um circuito simulado de remoagem de minério de ferro*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2018. 10, 11, 13, 14, 4, 12, 31, 47, 48, 50, 51, 55, 56, 57
- REIS, L. A.; LOPES JR., E.; EUZÉBIO, T. A. M. Hardware-in-the-loop testing platform of a predictive controller applied to a simulated regrinding circuit. *Automining: International Congress on Automation in Mining*, 2018. 2
- 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
- SCHNEIDER, C. L. et al. Beneficiamento de minérios. *Melfi AJ, Misi A, Campos DdA, Cordani UG, org. Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, p. 256–262, 2016. 1
- SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. *Process Dynamics and Control*. New York: John Wiley & Sons, 2011. 15, 16, 17, 18, 26, 27, 30
- SILVA, J. A. de O. *Modelagem do moinho de bolas de rocha fosfática da empresa Anglo American Fosfatos Brazil utilizando a ferramenta Moly-Cop Tools*. Dissertação (Mestrado), 2014. 1
- 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. 28
- 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. 8