



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Suavização de Oscilações em Barra Pulverizadora com Input Shaping e Controle Adaptativo Robusto por Modelo de Referência

Gleilson de Medeiros Lima

Orientador: Prof. Dr. Josenalde Barbosa de Oliveira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica da UFRN como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Natal, RN, dezembro de 2023

Suavização de Oscilações em Barra Pulverizadora com Input Shaping e Controle Adaptativo Robusto por Modelo de Referência

Gleilson de Medeiros Lima

Dissertação de Mestrado aprovada em 15 de dezembro de 2023 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Josenalde Barbosa de Oliveira (orientador) EAJ/UFRN

Prof. Dr. Ademar Gonçalves da Costa Júnior IFPB

Prof. Dr. Dian Lourençoni UNIVASF

Prof. Dr. Leonardo Rodrigues de Lima Teixeira EAJ/UFRN

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Lima, Gleilson de Medeiros.

Suavização de oscilações em barra pulverizadora com input shaping e controle adaptativo robusto por modelo de referência / Gleilson de Medeiros Lima. - 2024.

44f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica, Natal, 2024.

Orientação: Dr. Josenalde Barbosa de Oliveira.

1. Agricultura 4.0 - Dissertação. 2. Controle Não-linear - Dissertação. 3. MRAC - Dissertação. 4. VS-MRAC - Dissertação. 5. Controle de Vibrações. I. Oliveira, Josenalde Barbosa de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 681.5

*Aos meus pais Nilson Pereira e
Zilmar Bezerra
minha esposa Ítala Samara e meus
filhos, Nilson Gabriel e Cecília
Gabrielle , pelo carinho e amor
durante a realização deste trabalho.*

Agradecimentos

Quero expressar minha gratidão, especialmente, ao nosso Deus imponente, onipotente, onipresente, soberano e maravilhoso, cuja infinita misericórdia nos guia conforme sua vontade, nos moldando para sermos instrumentos em suas obras, formados pelo seu infinito amor. A ti meu Deus toda honra e toda glória, para sempre seja louvor e em nome de Jesus Cristo nosso senhor, por me capacitar a realizar este trabalho tão abençoado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Josenalde Barbosa de Oliveira, sou muito grato pela orientação e por toda dedicação e todos os conhecimentos adquiridos ao longo dessa jornada.

Aos amigos Prince Azsemergh Nogueira de Carvalho, Wilberto Pires da Cunha Filho e Edson Franklin da Silva por todo apoio ofertado.

À minha família pelo amor e apoio durante esta jornada tão difícil e árdua, que mesmo diante das diversas situações adversas sempre estive ao meu lado, sem vocês não teria conseguido.

Resumo

A necessidade da barra de pulverização agrícola estar paralela ao solo durante a operação requer sistemas de suspensão ativa com controladores que reduzam ao máximo as oscilações associadas ao movimento de rolagem. Este trabalho propõe a integração da técnica input shaping de vibração nula (ZV) com controladores adaptativos baseados em modelo, o MRAC e o VS-MRAC, comparando seus resultados. A robustez do VS-MRAC é evidenciada com ganhos de rastreamento e sinal de controle quando o mesmo é integrado ao input shaping, embora filtragens do sinal de controle seja necessária. O MRAC não apresenta o problema do chaveamento, contudo é mais sensível as perturbações simuladas.

Palavras-chave: Agricultura 4.0, Controle Adaptativo, Controle Não-linear, MRAC, VS-MRAC, Controle de Vibrações.

Abstract

The need for the sprayer boom to be parallel to the ground during operation requires active suspension systems with controllers that minimize oscillations associated with rolling movement. This work proposes the integration of the zero-vibration (ZV) input shaping technique with model-based adaptive controllers, the MRAC and the VS-MRAC, comparing their results. The robustness of VS-MRAC is evidenced with gains in tracking and control signal when it is integrated into input shaping, although control signal filtering should be added. MRAC does not present the switching problem, however it is more sensitive to simulated disturbances.

Keywords: Agriculture 4.0, Adaptive Control, Nonlinear Control, MRAC, VS-MRAC, Vibration Control.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
Lista de Símbolos e Abreviaturas	v
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	5
1.2 Apresentação do trabalho	5
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Fundamentos de Estabilidade e Robustez	7
2.1.1 Pontos de Equilíbrio	8
2.1.2 Conceito de Estabilidade e Instabilidade	9
2.1.3 Estabilidade de Lyapunov	10
2.1.4 Método direto de Lyapunov	11
2.2 Controlador MRAC	11
2.3 Controlador VS-MRAC	14
2.4 Controlador Input Shaping	15
3 Input Shaping, MRAC e VS-MRAC	17
3.1 Definição do Problema	17
3.2 Projeto de Controladores Input Shaping, MRAC e VS-MRAC	20
3.3 Simulações e Resultados	23
3.3.1 Caso 1: Posicionamento da barra a partir do repouso $\beta = 0^\circ$	23
3.3.2 Caso 1: Posicionamento da barra a partir do repouso $\beta = 0^\circ$	24
3.3.3 Caso 2: Rastreamento de referência senoidal MRAC e MRAC-IS	25
3.3.4 Caso 2: Rastreamento de referência senoidal VSMRAC e VSMRAC-IS	25
3.3.5 Caso 3: Rastreamento de referência senoidal com perturbação, controladores MRAC e MRAC-IS	26
3.3.6 Caso 3: Rastreamento de referência senoidal com perturbação, controladores VSMRAC e VSMRAC-IS	27

4 Conclusão	29
4.1 Trabalhos futuros	30
4.2 Trabalhos associados	30
Referências bibliográficas	31

Lista de Figuras

1.1	Movimento de rotação (rolagem) da barra de pulverização em torno do eixo X [Kappaun et al. 2021]	4
1.2	Ideia base do <i>input shaping</i> com dois impulsos	4
2.1	Trajetórias associadas aos conceitos de estabilidade [Slotine Li, 1991]	10
2.2	Diagrama de blocos MRAC	12
2.3	Esquema básico de controlador ZV	15
3.1	Descrição geométrica da suspensão ativa pendular. Adaptada de [Cui et al. 2019a]	17
3.2	Esquema do controlador Input Shaping: Fonte; Ambiente de simulação SIMULINK/MATLAB	20
3.3	Modelo de referência sobre amortecido	21
3.4	Esquema básico de controlador IS+MRAC. Fonte; Ambiente de simulação SIMULINK/MATLAB	22
3.5	Esquema básico de controlador IS+VS-MRAC. Fonte; Ambiente de simulação SIMULINK/MATLAB.	22
3.6	MRAC para $\beta_d = 1^\circ$ com perturbação $3\sin(0.2\pi t)$ para $t \geq 15s$. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.	23
3.7	VS-MRAC para $\beta_d = 1^\circ$ com perturbação $3\sin(0.2\pi t)$ para $t \geq 15s$. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.	24
3.8	MRAC e MRAC-IS para $\beta_d = 3\sin(0.2\pi t)$, ondulação do terreno. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.	25
3.9	VS-MRAC e VS-MRAC-IS para $\beta_d = 3\sin(0.2\pi t)$, ondulação do terreno. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.	26
3.10	MRAC e MRAC-IS, simulação integrada dos dois primeiros casos. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.	27
3.11	VS-MRAC e VS-MRAC-IS para $\beta_d = 3\sin(0.2\pi t)$, simulação integrada dos dois primeiros casos. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.	28

Lista de Tabelas

3.1	Comparação entre o caso 1 MRAC e MRAC-IS	23
3.2	Comparação entre o caso 1 VSMRAC e VSMRAC-IS	24
3.3	Comparação entre o caso 2 MRAC e MRAC-IS	25
3.4	Comparação entre o caso 2 VSMRAC e VSMRAC-IS	26
3.5	Comparação entre o caso 3 MRAC e MRAC-IS	27
3.6	Comparação entre o caso 3 VSMRAC e VSMRAC-IS	28

Capítulo 1

Introdução

Durante duas décadas, de 2002 a 2022, o PIB do agronegócio brasileiro aumentou de forma substancial, atingindo US\$ 500 bilhões em números deflacionados, um salto significativo a partir dos US\$ 122 bilhões registrados em 2002. Esse valor equipara-se ao PIB da Argentina, conforme Sociedade Nacional de Agricultura (SNA, 2023). Ao encerrar 2022, o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea), em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), destacou o biênio 2020-2021 como um dos períodos mais notáveis na história recente do agronegócio nacional.

O agronegócio brasileiro é impulsionado por culturas-chave: a soja, que lidera as exportações; a cana-de-açúcar, essencial para biocombustíveis; o milho, fundamental na alimentação e nas exportações; e o algodão, em crescimento na demanda global.

Essas culturas representam a diversidade e a força do setor agrícola brasileiro, não apenas alimentando e impulsionando a economia interna, mas também fornecendo recursos valiosos para o mercado global. Seu impacto direto no PIB reflete a importância estratégica dessas produções para o desenvolvimento econômico e o posicionamento do Brasil no cenário internacional como um protagonista na oferta global de alimentos e commodities agrícolas.

Diante deste cenário, a pulverização e a aplicação de defensivos agrícolas nas plantações para proteção contra pragas e doenças, representa uma parcela significativa nos custos totais da produção agrícola. Esses custos podem chegar a representar até 50% do total, variando de acordo com a cultura, região e práticas específicas de cada produtor. Nesse sentido, a busca por equipamentos mais eficientes e produtivos é uma necessidade crescente. Máquinas e tecnologias que ofereçam maior rendimento operacional são cada vez mais valorizadas pelos agricultores, visando otimizar o processo de pulverização, reduzir desperdícios e, conseqüentemente, diminuir os custos de produção.

A eficiência na aplicação de defensivos agrícolas não apenas contribui para a redução dos custos, mas também para a preservação do meio ambiente e para a produção de alimentos mais saudáveis, atendendo às demandas do mercado e às preocupações ambientais.

Caso a aplicação seja bem feita, pode refletir no aumento de produtividade nas lavouras, porém, se realizada incorretamente, o produtor poderá ter prejuízos financeiros e comprometer o ambiente. Segundo dados do Instituto Emater, quase 46% das aplicações são desperdiçadas por falha humana. Existem fatores que podem influenciar uma aplica-

ção mais eficiente que devem ser observados: o clima, tipo de produto, o alvo desejado, veículo de aplicação do produto, volume de aplicação, escolha das pontas de pulverização.

As falhas e erros mais comuns são: escolha incorreta do produto inadequado, ausência de regulagem do equipamento, falha na limpeza e manutenção dos bicos, regulagem incorreta do pulverizador e ignorar as condições climáticas. Para auxiliar na aplicação dos defensivos existem diversos tipos de pulverizadores usados para aplicação de produtos líquidos de forma uniforme sobre as culturas agrícolas. Alguns dos principais incluem:

- **Pulverizadores Costais Manuais, eletricos ou motorizados:** São equipamentos carregados nas costas do operador, com capacidade menor, ideais para áreas pequenas ou de difícil acesso.
- **Pulverizadores de Barras:** São montados em tratores ou veículos agrícolas, possuindo barras que lançam os produtos sobre as plantações. Podem ser de barra fixa ou retrátil para se adaptar a diferentes larguras de cultivo.
- **Pulverizadores Estacionários ou Estáticos:** Normalmente encontrados em sistemas de irrigação, onde os líquidos são pulverizados junto com a água de irrigação.
- **Pulverizadores Aéreos:** Utilizados em áreas extensas, são aeronaves especialmente adaptadas para pulverização agrícola, sendo eficazes em grandes plantações.
- **Pulverizadores Autopropelidos:** São veículos equipados com tanques e barras de pulverização, oferecendo maior autonomia e eficiência na aplicação de produtos líquidos.

Cada tipo de pulverizador possui suas vantagens, sendo escolhido de forma mais adequada para diferentes condições de cultivo, tamanhos de área e tipos de produtos a serem aplicados, visando garantir uma distribuição uniforme e eficiente dos insumos nas plantações. O trabalho apresentado irá concentrar os estudos nas barras de pulverização.

Os pulverizadores de barra ou arrasto são equipamentos para aplicação de defensivos agrícolas usados no combate a pragas e doenças na produção.

Para a operação do pulverizador agrícola em terrenos acidentados ou inclinados requer cuidados adicionais para garantir a eficiência e eficácia da aplicação. Deve-se ficar atento à estabilidade do equipamento em terrenos inclinados, para manter a estabilidade do pulverizador. Existem recomendações para operar o pulverizador em terrenos inclinados: Avaliar a inclinação do terreno antes de iniciar a operação, medir a inclinação do terreno e identificar as áreas muito íngremes ou com condições adversas: Evitar operar o pulverizador em terrenos com inclinação muito acentuadas, para não comprometer a estabilidade do equipamento: Ajustar a velocidade para reduzir a velocidade de avanço ao operar em terrenos inclinados, que permite melhorar o controle do equipamento e minimizar os riscos de perda da estabilidade. Deve-se manter a velocidade adequada para garantir a aplicação uniforme e eficiente.

A barra de pulverização é um dos principais implementos acoplado as máquinas agrícolas para esta finalidade. É fato que os movimentos da barra ao longo da operação apresentados na Figura 1.1, principalmente a rolagem em torno do eixo X, impactam o padrão de distribuição dos produtos, podendo gerar áreas sem cobertura e irregulares. Consequentemente a uniformidade e qualidade da pulverização térrea depende da estabilidade do sistema de suspensão e estes requisitos de desempenho são atingidos com a

minimização das oscilações na barra que deve permanecer paralela ao solo durante a operação, quando essas oscilações se tornam intensas, as extremidades da barra podem entrar em contato com o solo, ocasionando possíveis danos, distorcendo assim a distribuição.. Operar um pulverizador agrícola em terrenos inclinados requer cuidados para garantir a segurança e a eficiência da aplicação.

Nas últimas décadas vários estudos foram realizados com barras pulverizadoras, em (Iyer & Wills ,1978) destacaram que a principal fonte de variação na distribuição da pulverização decorre dos movimentos das barras. Eles analisaram as barras de pulverização como corpos rígidos sujeitos a entradas senoidais.

Os estudos de (Ramon & De Baerdemaeker ,1997) propuseram um modelo matemático polinomial visando antecipar a dispersão da pulverização por um único bico em movimento ao longo de uma canaleta extensa de 15m. A discrepância identificada entre os resultados reais e simulados se manteve dentro de uma margem inferior a 7%. Adicionalmente, o estudo constatou que os movimentos descendentes da barra exercem uma influência maior na distribuição do que os movimentos ascendentes.

Em (Sinfort & Herbst ,1996) analisaram o movimento da barra de pulverização e os padrões de aplicação em cenários práticos. Utilizando um simulador com cilindros hidráulicos para avaliar os movimentos da barra e um software para simular o padrão de pulverização, concluíram que as variações mais significativas na consistência da aplicação são atribuídas aos movimentos de rolagem da barra. (Nation 1980) estabeleceu a relação entre a variação na pulverização e o deslocamento do extremo da barra de pulverização durante a aplicação em cultivos de cereais. Ele concluiu que os movimentos verticais aleatórios da barra são mais influenciados pelo movimento de rotação do que pelo movimento vertical propriamente dito.

Já em (Womac et al. ,2001) examinaram como a altura dos bicos e a velocidade de deslocamento do equipamento afetam a consistência da aplicação do líquido em ambientes de campo. Os resultados mostraram coeficientes de variação variando entre 5% e 17% quando a barra estava imóvel, e entre 6% e 37% quando em movimento (velocidades de 6 a 26km/h).

Como solução comum para baixas frequências nas máquinas agrícolas tem-se a suspensão ativa pendular. O ajuste do ângulo α na Figura 1.1 é de interesse prático, como em (Deprez et al. ,2002) que avaliaram o controlador em avanço com alocação de polos e zeros com base no lugar das raízes, sendo o atuador um motor DC em cenário com velocidades de deslocamento entre $2 - 3 \text{ ms}^{-1}$ e 27m de comprimento de barra. Os controladores tem sido projetados com base em modelos identificados de segunda ordem subamortecidos, como em (Deprez et al. ,2002) : (Cui, Mao & Xue ,2019).

Neste último os autores justificam a necessidade de robustez às perturbações não modeladas e incertezas paramétricas incidentes, principalmente com o aumento da velocidade do trator. Uma solução com dois graus de liberdade (2-DOF) foi apresentada por (Cui, Xue, Le, Mao & Ding ,2019), com compensador antecipatório de velocidade e PID em malha fechada, obtendo uma redução efetiva nas oscilações em testes de transitório, rastreamento senoidal e robustez às perturbações. Esta ideia remete à clássica técnica de modelagem de entradas (*input shaping*) para suavização (idealmente cancelamento) de vibrações denominada *posicast* (Smith ,1957), inicialmente apenas em *feedforward*,

mas posteriormente integrada em malha fechada por (Hung ,2003). Consiste basicamente de um controle em malha aberta que realiza a convolução do sinal de entrada com uma sequência de impulsos (Figura 2.1), cujas amplitudes e instantes de aplicação são função da frequência natural ω_n e do coeficiente de amortecimento ζ do sistema (Singh & Singhose 2002).

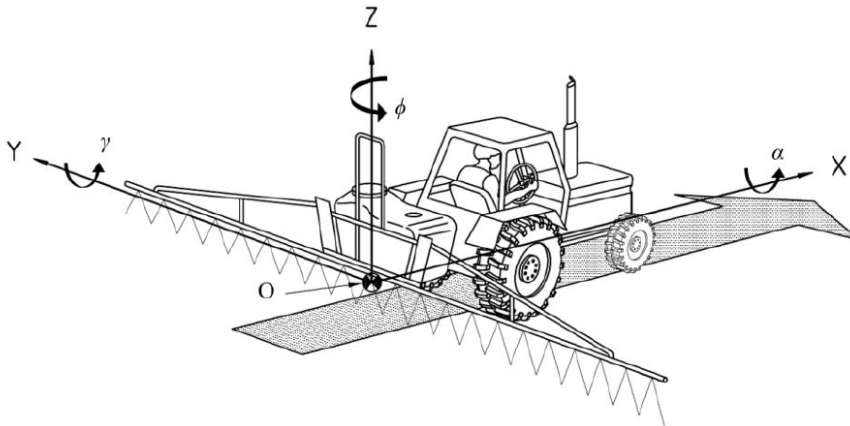


Figura 1.1: Movimento de rotação (rolagem) da barra de pulverização em torno do eixo X [Kappaun et al. 2021]

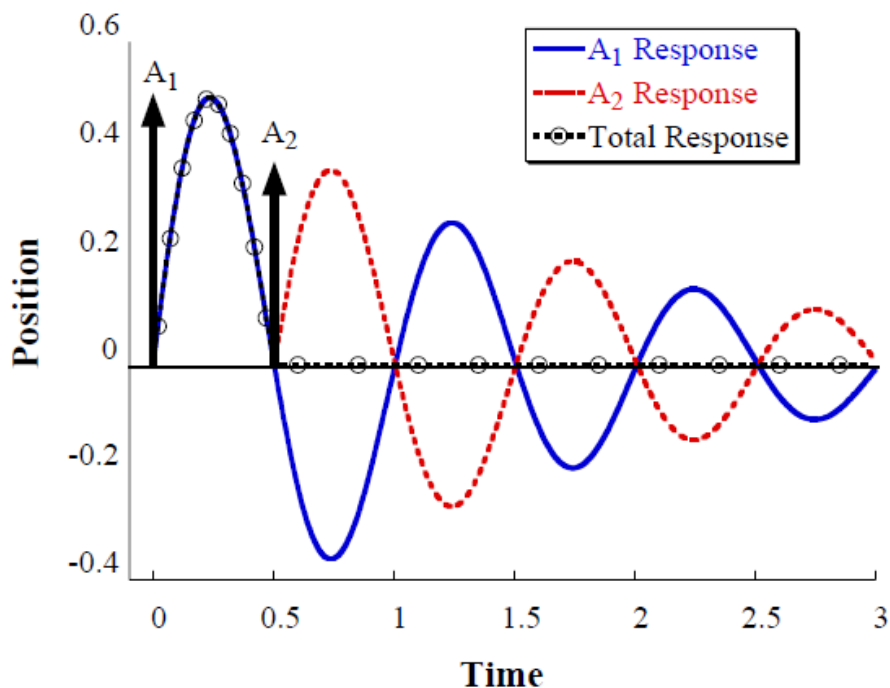


Figura 1.2: Ideia base do *input shaping* com dois impulsos

Desde então vários *shapers* foram propostos e aplicados (Kasprowiak et al. ,2022, Mohammed et al. ,2020), partindo da versão mais simples com apenas dois sinais (*Zero*

Vibration ZV), também denominado *posicast* de meio ciclo. Versões mais robustas à incertezas paramétricas como o *Zero Vibration Derivative (ZVD)* foram comparadas em (Singhose et al. ,1995) e estratégias adaptativas como em (Dhame & Jayasuriya ,2003) e de identificação de frequências (Chatlatanagulchai et al. ,2015, Goubej et al. ,2020):(Chu & Hu ,2016):(Goubej et al. ,2020) foram combinadas nesta mesma perspectiva de agregação de insensibilidade paramétrica e reprojeto em tempo de execução. Não identificou-se contudo aplicações do *input shaping* em sistemas de suspensão de máquinas agrícolas ou de seus implementos, como é o caso de barras de pulverização.

Outras abordagens de *shapers* robustos baseiam-se na integração de controle por estrutura variável e seus modos deslizantes (*sliding modes*, SMC) (Ooten & Singhose 2000, Hu et al. ,2008). O SMC (Utkin et al. 2009) é uma técnica não linear que tem como base uma lei de controle chaveada, função das variáveis de estado do sistema. A união do SMC com o controle adaptativo por modelo de referência (MRAC) originou o denominado VS-MRAC, que depende apenas de medidas da entrada e saída da planta e mantém as características de robustez à incertezas paramétricas, distúrbios e dinâmicas não modeladas (Costa & Hsu ,1992). O VS-MRAC desde então evoluiu consideravelmente em sua abordagem direta e indireta, enfatizando aspectos práticos de implementação e suavização do sinal chaveado de alta frequência (Dias et al. ,2021).

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma solução para suavizar as oscilações em barra pulverizadora com *input shaping* e controle adaptativo robusto por modelo de referência, buscando desenvolver um sistema de controle que reduza as oscilações da barra pulverizadora, melhorando a eficiência da aplicação de defensivos agrícolas e reduzindo os custos de produção.

Ainda neste trabalho apresenta resultados do *input shaping ZV* aplicado ao modelo da suspensão ativa de barra de pulverização conforme (Cui, Mao & Xue ,2019). Em seguida é projetado um controlador MRAC em conjunto com o ZV na configuração 2-DOF, repetir as simulações com outro controlador VS-MRAC também em conjunto com ZV na configuração 2-DOF.

Com isso, evidenciar a robustez dos controladores com ganhos de rastreamento e sinal de controle quando integrado ao *input shaping*, analisando a sensibilidade às perturbações simuladas, com simulação nos problemas de rastreamento de trajetória senoidal e posicionamento angular da barra, sujeito à distúrbios externos. Estes resultados são então comparados ao VS-MRAC padrão em termos de robustez.

1.2 Apresentação do trabalho

Capítulo 1, nesta etapa, o problema das oscilações da barra pulverizadora foi contextualizado, e os objetivos do trabalho foram apresentados, ressaltando a importância de desenvolver um sistema de controle eficaz para reduzir as oscilações e aprimorar a eficiência da aplicação de defensivos agrícolas.

Capítulo 2, a necessidade de sistemas de suspensão ativa com controladores que reduzissem as oscilações ligadas ao movimento de rolagem da barra de pulverização foi discutida, fornecendo embasamento teórico para a abordagem adotada no trabalho.

Capítulo 3, nesta etapa, a integração da técnica de *input shaping ZV* com controladores adaptativos baseados em modelo, como o MRAC e o VS-MRAC, foi descrita, e seus resultados comparados, detalhando a abordagem empregada no desenvolvimento do sistema de controle.

Capítulo 4, os resultados alcançados com a aplicação das técnicas de controle foram apresentados, seguidos de uma análise e discussão, evidenciando as contribuições e limitações do estudo.

Capítulo 5, as conclusões da dissertação foram expostas, enfatizando os principais resultados, contribuições e possíveis direções para futuras pesquisas, consolidando o estudo realizado e aprendizados obtidos ao longo da investigação.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Visto que as técnicas de controle em malha fechada utilizadas neste trabalho são de natureza adaptativa e introduzem não linearidades, conceitos e ferramentas matemáticas de sistemas não lineares são necessárias, notadamente no que se refere aos requisitos de estabilidade e robustez. Uma breve revisão é aqui apresentada.

2.1 Fundamentos de Estabilidade e Robustez

Os atributos considerados fundamentais em um sistema de controle são estabilidade e robustez. Estabilidade implica em manter um dispositivo sob controle, a despeito de interferências, enquanto a robustez se relaciona à sensibilidade a aspectos que não são levados em conta no projeto, como alterações paramétricas, ruídos de medição, dinâmica não projetada. A concepção de sistemas de controle implica, obrigatoriamente, em uma avaliação metódica da estabilidade, com o objetivo de definir os limites para sua aplicação. A operação dentro dos limites de estabilidade é que assegurará a integridade operacional dos sistemas físicos, viabilizando a entrega contínua das demandas de performance pré-definidas para o processo.

A concepção de sistemas de controle adaptativos se baseia em modelos matemáticos isentos de ruído, interferências e dinâmicas não modeladas. Esses modelos, denominados modelos nominais, não refletem os dispositivos com precisão total, seja por dificuldade de medição do comportamento do dispositivo na fase de modelagem, seja porque os modelos são simplificados em função do método de projeto, seja porque a maioria dos métodos de projeto não permite levar em conta não-linearidades no dispositivo nem comportamentos variáveis no tempo, etc. O fato é que os erros nos modelos matemáticos são inevitáveis. A literatura alude a eles como incertezas do modelo (Ioannou & Sun 2012).

O efeito das divergências entre o modelo do sistema e o sistema real sobre a estabilidade pode não ser conhecido até as leis de controle e de adaptação serem implantadas na planta real. É crucial diferenciar incertezas nos valores dos parâmetros do modelo, das oriundas de uma total ausência de informação estrutural. Neste último caso estão sempre aspectos de alta frequência, tais como efeitos de componentes parasitas e suas ressonâncias inescapáveis, as chamadas incertezas não estruturadas. A identificação e consequente estruturação dessas incertezas possibilitaram o desenvolvimento de uma série de trabalhos ligados aos aspectos de robustez de controladores adaptativos (Altin &

Barton ,2018):(Costa & Hsu ,1992). Com frequência, o Método Direto de Lyapunov tem sido usado para caracterizar o comportamento de sistemas dinâmicos não-lineares quanto à estabilidade. De maneira equivalente, a robustez de várias configurações do input shaping também tem sido investigada (Vaughan et al. ,2008):(Conker et al. ,2016), visto haver um compromisso entre robustez e tempo de subida das respostas temporais dos sistemas.

Robustez descreve a habilidade de um sistema em manter um desempenho adequado mesmo quando esta sujeito à perturbações externas e incertezas no modelo nominal utilizado para projetar o controlador. As incertezas podem vir de diversas fontes, tais como erros de modelagem, variações de parâmetros, ruídos, entre outros. Assim, um sistema robusto é aquele que tolera essas incertezas sem sofrer uma degradação significativa na sua performance. É um requisito particularmente importante para operações em ambientes incertos ou adversos, ou que precisam atender à especificações rigorosas de desempenho.

A teoria do controle robusto oferece uma gama de técnicas e abordagens para projetar controladores que conseguem lidar com esses tipos de incertezas. Uma abordagem comum envolve o projeto de controladores H_∞ , que objetiva minimizar o pior caso de erro de rastreamento na presença de incertezas, bem como controladores não lineares como por modos deslizantes (Utkin et al. 2009) utilizado neste trabalho.

2.1.1 Pontos de Equilíbrio

Na análise de sistemas dinâmicos, os pontos de equilíbrio representam estados nos quais o sistema, ao atingi-los, neles permanecerá indefinidamente, a menos que seja perturbado.

Um estado x^* é um estado de equilíbrio (ponto de equilíbrio) do sistema se, uma vez que a trajetória do sistema $x(t)$ se torna igual a x^* , esta permanece igual a x^* para qualquer t . Para facilitar, todas as definições serão feitas considerando o ponto de equilíbrio na origem do R^n , ou seja, $x^* := 0$. Não há perda de generalidade ao fazer isto porque qualquer ponto de equilíbrio pode ser deslocado para a origem via uma mudança de variáveis (Khalil ,1992).

Supondo que um ponto de equilíbrio desejado seja $x \neq 0$. Logo, introduzindo uma nova variável $z := x - x^*$ e substituindo $x := z + x^*$ na equação de sistemas não-lineares autônomos $\dot{x} = f(x)$, um novo conjunto de equações na variável z é obtido, por $\dot{z} = f(z + x^*)$

Pode-se verificar uma correlação biunívoca entre as soluções da equação $x' = f(x)$ e as soluções da equação e , ainda mais, $z = 0$, desta forma, a resolução correspondente quando $x = x^*$ que de fato é um ponto de equilíbrio de f . Portanto, ao invés de estudar o comportamento da equação $x' = f(x)$ na vizinhança de x^* , pode-se estudar o comportamento da equação na vizinhança da origem.

O foco na análise de estabilidade está nesses pontos de equilíbrio. Um ponto de equilíbrio é considerado estável se todas as trajetórias que começam perto dele permanecerem próximas ao centro do ponto. Em contraste, o ponto de equilíbrio é dito assintoticamente estável se todas as trajetórias que iniciam perto dele convergem para ele ao longo do tempo. No entanto, se existem trajetórias que começam perto, mas se afastam à medida que o tempo avança, o ponto de equilíbrio é dito instável.

Essa abordagem fornece ferramentas para analisar a estabilidade dos pontos de equilíbrio sem a necessidade de resolver o sistema de equações diferenciais. Isso é especialmente útil para sistemas não lineares complexos, onde a solução exata pode ser difícil ou até mesmo impossível de encontrar.

2.1.2 Conceito de Estabilidade e Instabilidade

A fim de simplificar a verificação da estabilidade, o ponto de equilíbrio é movido para a origem, permitindo assim o uso imediato da norma. Isso significa que avaliar a estabilidade de um sistema envolve examinar como a norma do estado se comporta ao longo de todo o tempo t . Para as definições a seguir, usaremos algumas notações simplificadas para facilitar o entendimento (Slotine & Li, 1991). Denotamos por B_R a região esférica (ou bola) definida por $|x| < R$ no espaço de estado, e por S_R a superfície esférica em si, definida por $|x| = R$.

Definição 1:

O ponto de equilíbrio $x := 0$ é estável se (Khalil, 1992) para cada $R > 0$, existe $r = f(R) > 0$ tal que

$$|x| < r \Rightarrow |x(t)| < R \quad \forall t \geq 0.$$

Nesse caso, o ponto de equilíbrio é estável. Sendo assim, a estabilidade significa que a trajetória do sistema pode ser mantida próxima da origem. Mais formalmente, a definição diz que a origem é estável, se, para que a trajetória do sistema x não saia de uma esfera de raio r (B_r), um valor R pode ser encontrado de forma que, iniciando o estado no interior da esfera B_r no tempo inicial t_0 , garanta que o estado permanecerá no interior da esfera B_R para todo $t \geq t_0$.

Em diversos contextos de engenharia, a noção de especificação mencionada acima não é suficiente. Por exemplo, ao lidar com a mudança na posição inicial de uma barra de pulverização devido a um distúrbio, não se busca somente manter sua posição dentro de uma faixa determinada pela intensidade desse distúrbio, ou que seria uma deficiência como instabilidade de Lyapunov.

Definição 2:

O ponto de equilíbrio $x := 0$ é assintoticamente estável (Khalil, 1992) se é estável e existe algum $r > 0$ tal que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0 \quad \text{quando} \quad |x(0)| < r.$$

A estabilidade assintótica implica que o equilíbrio é estável e que os estados que começam próximos à origem convergem para ela à medida que $t \rightarrow \infty$. As trajetórias do sistema que têm início no interior da esfera S_r convergem para a origem, definindo assim o domínio de atração do ponto de equilíbrio. Um ponto de equilíbrio com estabilidade de Lyapunov, porém sem ser assintoticamente estável, é referido apenas como estável. A convergência do estado não garante estabilidade. Em alguns sistemas, o estado de equilíbrio é atrativo (as soluções convergem para ele com o tempo infinito), mas não é estável.

Em diversas aplicações de engenharia, não basta apenas verificar a convergência do

sistema em direção ao ponto de equilíbrio ao longo período de tempo . É essencial estimar a rapidez com que a trajetória do sistema converge para esse ponto. Para tal fim, o conceito de estabilidade exponencial pode ser empregado.

Definição 3:

O ponto de equilíbrio $x = 0$ é exponencialmente estável (Khalil ,1992) se existirem dois números estritamente positivos α e λ tais que

$$\forall t > 0, \quad |x(t)| \leq \alpha e^{-\lambda t},$$

dentro de uma esfera S_r em torno do ponto.

Na Figura 2.1 tem-se três curvas representando três aspectos da estabilidade e/ou instabilidade de um sistema. Na curva 1 tem-se um sistema assintoticamente estável. Na curva 2, um sistema estável e na curva 3 um sistema instável.

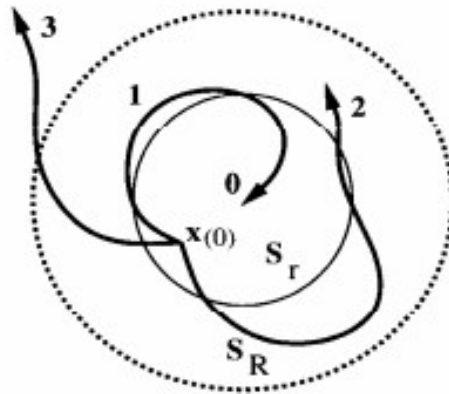


Figura 2.1: Trajetórias associadas aos conceitos de estabilidade [Slotine Li ,1991] .

2.1.3 Estabilidade de Lyapunov

A Teoria da Estabilidade de Lyapunov é um pilar na análise de sistemas dinâmicos, uma parte crucial da matemática aplicada. A ideia central dessa teoria é investigar a estabilidade de soluções de equações diferenciais em torno de um ponto de equilíbrio. A teoria foi desenvolvida pelo matemático russo Aleksandr Mikhailovich Lyapunov.

Nesta abordagem, um ponto de equilíbrio é chamado de estável se, uma vez perturbado, o sistema não se afasta muito desse ponto. No entanto, se o sistema eventualmente retorna ao ponto de equilíbrio, o ponto de equilíbrio é considerado assintoticamente estável. Por outro lado, se o sistema se afasta cada vez mais do ponto de equilíbrio com o tempo, o ponto de equilíbrio é considerado instável.

A ferramenta principal na Teoria da Estabilidade de Lyapunov é a função de Lyapunov. Uma função de Lyapunov é uma função escalar que decresce ao longo do tempo

quando se segue a trajetória de um sistema a partir de um ponto inicial próximo ao ponto de equilíbrio. Essas funções são usadas para provar que um ponto de equilíbrio é estável ou instável. Se a função de Lyapunov for positiva definida e sua derivada no tempo for negativa definida, o ponto de equilíbrio é estável.

A Teoria de Lyapunov tem aplicações em diversas áreas, como engenharia, física, e biologia, pois fornece um quadro para compreender a estabilidade de sistemas complexos. Ela é particularmente útil quando se lida com sistemas não-lineares, para os quais os métodos tradicionais de análise de estabilidade podem não ser aplicáveis.

2.1.4 Método direto de Lyapunov

É baseado na construção de uma função chamada "função de Lyapunov". Esta função é escolhida de tal forma que sempre seja positiva (ou não-negativa), e que sua derivada ao longo das trajetórias do sistema seja negativa (ou não-positiva). Se tal função puder ser encontrada, isso pode ser usado para provar a estabilidade do sistema.

No caso de estabilidade global, a função de Lyapunov é escolhida para ser globalmente positiva definida e sua derivada ao longo das trajetórias do sistema é globalmente negativa definida. Se estas condições são cumpridas, isso indica que o sistema é globalmente estável.

Embora o método direto de Lyapunov seja uma ferramenta poderosa, encontrar uma função de Lyapunov adequada pode ser uma tarefa desafiadora. Não existe um método geral para encontrar estas funções para um sistema arbitrário, e muitas vezes é necessário um conhecimento profundo do sistema e uma dose de criatividade para construir uma função de Lyapunov apropriada. Recentemente a combinação de redes neurais profundas para obter tais funções tem sido objeto de estudo (Rego ,2022);(Grüne ,2021). Se uma função de Lyapunov não puder ser encontrada, isso não significa necessariamente que o sistema é instável. Pode simplesmente ser que uma função de Lyapunov adequada não tenha sido encontrada.

2.2 Controlador MRAC

2.2.1 Controle Adaptativo Direto por Modelo de Referência (MRAC Direto)

A teoria de controle adaptativo oferece uma estratégia para gerenciar sistemas com dinâmicas complexas ou não mapeadas, permanecendo objeto de pesquisas, aplicações e relações com o termo aprendizagem, oriundo da área de computação(Annaswamy & Fradkov ,2021);(Annaswamy ,2023). Essa metodologia é marcada pela presença de um controlador com parâmetros ajustáveis, representados por θ , complementado por um sistema de adaptação que se realinha com as alterações na planta do sistema. O núcleo do controlador adaptativo é a integração de um estimador de parâmetros desconhecidos a uma lei de controle. Essa integração pode ocorrer de duas maneiras distintas. No método de controle adaptativo direto, o modelo da planta, $P(\theta_p)$, é definido com base nos parâmetros do controlador, que são diretamente estimados, eliminando a necessidade de cálculos adicionais relacionados a estimativas dos parâmetros da planta. Em contraste, no controle

adaptativo indireto, primeiramente se estima os parâmetros da planta, que posteriormente são utilizados para determinar os parâmetros do controlador, θ .

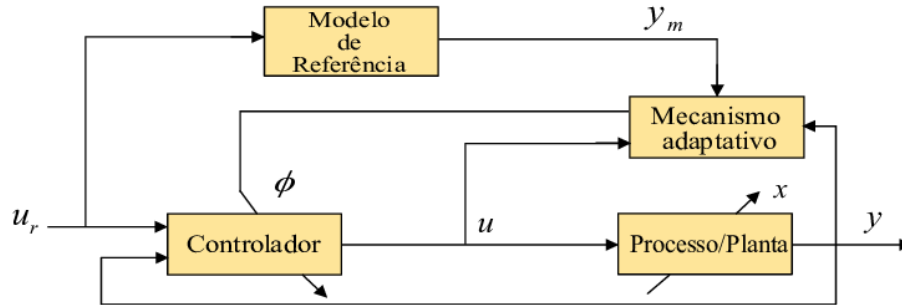


Figura 2.2: Diagrama de blocos MRAC

Com esse modelo, o controlador atende critérios de desempenho preestabelecidos. O estimador de parâmetros é desenvolvido com base nesse modelo parametrizado, $P(\theta_c)$, permitindo estimativas diretas, $\theta(t)$, a partir da entrada e saída da planta. Posteriormente, essas estimativas são empregadas para atualizar os parâmetros do controlador, sem a necessidade de etapas adicionais de cálculo.

Um elemento-chave no MRAC é o modelo de referência, que determina o comportamento desejado da planta em malha fechada. A função de transferência $M(s)$ desse modelo é configurada para garantir que, dada uma referência $r(t)$, a saída $y_m(t)$ simule a resposta desejada $y(t)$ da planta. O controlador de feedback $C(\theta)$ é estruturado para garantir que todos os sinais permaneçam limitados e a função de transferência da planta de r para y se comporte como $M(s)$. Essa equivalência assegura que qualquer erro de saída ou de rastreamento tenda a zero. A condição de "matching" é alcançada cancelando os zeros da função de transferência da planta $W(s)$ e replicando os zeros de $M(s)$, além de reposicionar os polos. No entanto, o cancelamento dos zeros exige que a planta tenha todos os seus zeros no semiplano esquerdo, sendo restrito a modelos de fase mínima.

Sistemas adaptativos meramente baseados em adaptação paramétrica tendem a ter transitório lento e oscilatório e, muitas vezes, não são robustos a perturbações e dinâmicas não modeladas, um problema que tem sido objeto de pesquisa desde os anos 70. Uma inovação relevante veio de (Hsu & Costa, 1989), que integraram o MRAC direto com o SMC utilizando apenas medidas da entrada e saída da planta, visando aprimorar o desempenho transitório e a robustez.

Por fim, antes de revisarmos brevemente o VS-MRAC direto, é essencial entender as premissas básicas do MRAC direto e suas leis adaptativas, bem como a equação clássica do erro, pois esses elementos são fundamentais para o VS-MRAC.

2.2.3 Parametrização e Hipóteses

O modelo de planta SISO (*Angle Input, Single Output*) LTI (*Linear Time-Invariant*) é representado no espaço de estados por:

$$\dot{x} = Ax + bu, \quad y = h^T x, \quad (2.1)$$

onde $x \in \mathcal{R}^n$ é o vetor de estados, u é o sinal de controle, e y é o sinal de saída. O Modelo Entrada/Saída (E/S) é representado pela função de transferência

$$W(s) = k_p \frac{n_p(s)}{d_p(s)} \quad (2.2)$$

sendo o ganho de alta frequência denotado por k_p . Há polinômios mônicos definidos para n_p e d_p , expressos por

$$n_p(s) = \sum_{i=1}^{n-1} \beta_{n-i} s^{n-i} \quad (2.3)$$

$$d_p(s) = s^n + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i s^{n-i}. \quad (2.4)$$

O modelo de referência é definido por:

$$M(s) = k_m \frac{n_m(s)}{d_m(s)}, \quad (2.5)$$

onde y_m é o sinal de saída e k_m é o ganho de alta frequência do modelo de referência. É suposto que o sinal de referência r seja contínuo por partes e uniformemente limitado. Os polinômios mônicos para n_m e d_m são

$$n_m(s) = \sum_{i=1}^{n-1} \beta_{m,n-i} s^{n-i} \quad (2.6)$$

$$d_m(s) = s^n + \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_{m,i} s^{n-i}. \quad (2.7)$$

Algumas hipóteses relativas à planta e ao modelo de referência incluem:

- A planta é monovariável, controlável, observável e tem grau relativo unitário $n^* = 1$.
- O grau n de $d_p(s)$ é conhecido.
- k_m e k_p possuem o mesmo sinal (positivo, sem perda de generalidade).
- O modelo é Estritamente Real Positivo (ERP) e tem o mesmo grau relativo da planta.
- $n_p(s)$, $n_m(s)$, e $d_m(s)$ são polinômios mônicos Hurwitz.
- $d_p(s)$ é um polinômio mônico.

Os objetivos de controle visam a convergência assintótica do erro de saída $e(t) = y(t) - y_m(t)$ para zero, garantindo que, mesmo na presença de distúrbios, todos os sinais no sistema em malha fechada permaneçam limitados e que o erro de saída $e(t)$ se aproxime de zero. No que diz respeito à adaptação, o algoritmo necessitará de $2n$ variáveis. Com acesso apenas à entrada e saída da planta, é criado um conjunto de variáveis de estado, os Filtros de Estado (SVF), que produzem $2n - 2$ sinais filtrados da entrada e saída da planta, conforme referenciado por (Ioannou & Sun 2012).

2.2.1 Sinais auxiliares e lei de controle

Para determinar a equação do erro no MRAC direto e realizar a prova de estabilidade como em (Ioannou & Sun 2012), estabelecem-se os filtros:

$$\dot{v}_1 = \Lambda v_1 + gu, \dot{v}_2 = \Lambda v_2 + gy, \quad (2.8)$$

onde $v_1, v_2 \in R^{n-1}$ e Λ é selecionado de forma que $\det(sI - \Lambda) = n_m(s)$ para $n^* = 1$. O vetor ω , composto por $2n$ variáveis, é chamado de vetor regressor e é representado como:

$$\omega = [v_1^T \quad y \quad v_2^T \quad r]^T \quad (2.9)$$

Assim, a lei de controle u é expressa por:

$$u = \theta^T(t)\omega(t) \quad (2.10)$$

em que $\theta(t)$ é o vetor de parâmetros do controlador definido por:

$$\theta = [\theta_{v_1}^T \quad \theta_n \quad \theta_{v_2}^T \quad \theta_{2n}]^T. \quad (2.11)$$

A lei adaptativa convencional baseia-se no método do gradiente e é dada por:

$$\dot{\theta}_i = -\gamma_i e \omega_i, \quad i \in \{1, 2, \dots, 2n\} \quad (2.12)$$

e γ_i são os ganhos adaptativos.

2.3 Controlador VS-MRAC

Esta técnica teve origem na necessidade de encontrar um controlador que tornasse o sistema em malha fechada robusto em relação às incertezas da planta e perturbações, com desempenho transitório melhor que o obtido com o MRAC. Foi desenvolvido baseado no conceito de adaptação por síntese de sinal, onde o sinal de controle a ser aplicado na planta é gerado a partir de parâmetros nominais do sistema e não envolve adaptação paramétrica explícita, substituindo as leis integrais (2.12) por leis chaveadas. Este fato torna necessária a adição de mais uma hipótese às hipóteses tradicionais do MRAC, ou seja,

- Os majorantes de θ_i , $i \in \{1, 2, \dots, 2n\}$ em (2.11) são conhecidos

Esta hipótese está relacionada ao fato de que as estimativas para os parâmetros do controlador na condição de matching são sistematicamente obtidas a partir das expressões baseadas em parâmetros nominais da planta, sendo na prática uma ideia herdada da projeção paramétrica. As leis chaveadas tornam-se portanto:

$$\theta_i = -\bar{\theta}_i \text{sgn}(e_0 \omega_i), \quad \bar{\theta}_i > |\theta_i^*| \quad i \in \{1, 2, \dots, 2n\}. \quad (2.13)$$

e a prova de estabilidade robusta completa pode ser encontrada em (Costa & Hsu, 1992).

2.4 Controlador Input Shaping

Input Shaping (IS) é uma técnica de projeto de sistema de controle *feedforward* usada para evitar modos oscilatórios em sistemas ressonantes. A ideia básica é moldar o sinal de entrada para o sistema de tal forma que evite excitar os modos ressonantes do sistema. Nessa técnica, o sinal de entrada é modificado adicionando versões atrasadas do sinal de entrada original. Os sinais atrasados são ponderados e combinados de tal forma que o sinal de entrada resultante evita excitar os modos ressonantes do sistema (Singhose et al. ,1995). O sistema de controle resultante é linear e invariante no tempo, mas de dimensão infinita, com um número infinito de zeros complexos, alguns dos quais são colocados exatamente nas localizações dos modos ressonantes da planta. A principal vantagem desse controlador é que é uma técnica simples e eficaz, no entanto, em suas versões básicas é sensível a incertezas paramétricas no modelo. Consideramos o problema

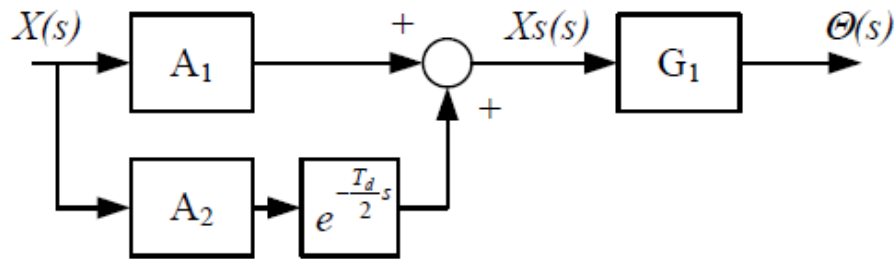


Figura 2.3: Esquema básico de controlador ZV

de projeto de sistema de controle IS *feedforward*, ou modelagem de entrada, de modo que o sistema seja descrito, no domínio de Laplace, por:

$$y(s) = P(s)u(s), \quad u(s) = C(s)r(s), \quad (2.14)$$

onde $r(s)$ é a entrada de referência, $u(s)$ é a entrada de controle, e $y(s)$ é a saída da planta. $C(s)$ é a função de transferência do compensador (*feedforward*), e $P(s)$ é a função de transferência da planta. Embora não seja uma restrição dos métodos discutidos neste trabalho, a planta é assumida como um sistema de segunda ordem com função de transferência canônica dada por:

$$P(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}. \quad (2.15)$$

Para os sistemas em consideração, o fator de amortecimento $\zeta < 1$ de modo a ter polos próximos ao eixo $j\omega$ e com respostas degrau oscilatórias.

Um controlador $C(s)$ usando entradas atrasadas é:

$$C(s) = A_1 + A_2 e^{-sT}. \quad (2.16)$$

Como um sistema de segunda ordem é considerado, apenas um atraso é necessário. A entrada de referência $r(t)$ é, portanto, atrasada por um intervalo de tempo T e somada

com a entrada original usando fatores de escala A_1 e A_2 para produzir o sinal de controle $u(t)$.

Para calcular os parâmetros do controlador, tem-se que a resposta do sistema (2.14) a uma entrada de duplo passo:

$$u(t) = A_1 \text{step}(t) + A_2 \text{step}(t - T) \quad (2.17)$$

é dada por:

$$y(t) = \left(A_1 + \frac{A_1 \omega_n}{b} e^{-at} \sin(bt - \phi) \right) \text{step}(t) + \left(A_2 + \frac{A_2 \omega_n}{b} e^{-a(t-T)} \sin(b(t-T) - \phi) \right) \text{step}(t - T) \quad (2.18)$$

onde a e b são as partes reais e imaginárias dos polos da planta, iguais a:

$$a = \zeta \omega_n, \quad b = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}, \quad (2.19)$$

e a fase dada por $\phi = \tan^{-1}(b/a)$. Ajustando adequadamente a magnitude e o tempo das duas etapas, é possível produzir uma resposta do sistema à segunda etapa que cancela exatamente a resposta à primeira etapa. O resultado é uma resposta de tempo finito precisamente para o valor desejado. A condição para esta ocorrência é que $y(t) = 1$ para todos $t \geq T$, e está satisfeita se:

$$A_1 + A_2 = 1, \quad A_1 = A_2 e^{aT}, \quad bT = \pi \quad (2.20)$$

A função de transferência do sistema de controle (2.16) tem um número infinito de zeros localizados em:

$$s = -\frac{1}{T} \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \pm jn \frac{\pi}{T}, \quad (2.21)$$

onde $n = 1, 3, 5, \dots$. Para os valores de A_1, A_2 , e T que resolvem (2.20), os zeros são dados por:

$$s = -a \pm jnb. \quad (2.22)$$

Para $n = 1$, as localizações dos zeros complexos coincidem exatamente com as dos polos da planta. O fato de os pólos da planta serem cancelados pelos zeros do controlador garante que o método funcione para entradas arbitrárias, e não apenas para entradas escalonadas. No entanto, a lei de controle introduz muito mais zeros do que o necessário para esse propósito.

Capítulo 3

Input Shaping, MRAC e VS-MRAC

3.1 Definição do Problema

O sistema de suspensão ativa deve garantir que a barra siga as ondulações de baixa frequência do terreno de modo a mantê-la paralela ao solo. Os "braços" laterais são conectados ao eixo central por juntas de revolução. A Figura 3.1 adaptada de (Cui, Mao & Xue ,2019) descreve geometricamente o sistema. A barra é suspensa do suporte pela haste OP e o ponto P é o centro de massa. A haste é conectada ao suporte na junta localizada no ponto O , que forma um ângulo ϕ com a vertical. Sob ação apenas de suspensão passiva, a barra gira sobre O , mas sob ação do sistema de controle que varia o comprimento do cilindro l_d , também gira em torno de P . As alturas relativas ao alvo são medidas nas extre-

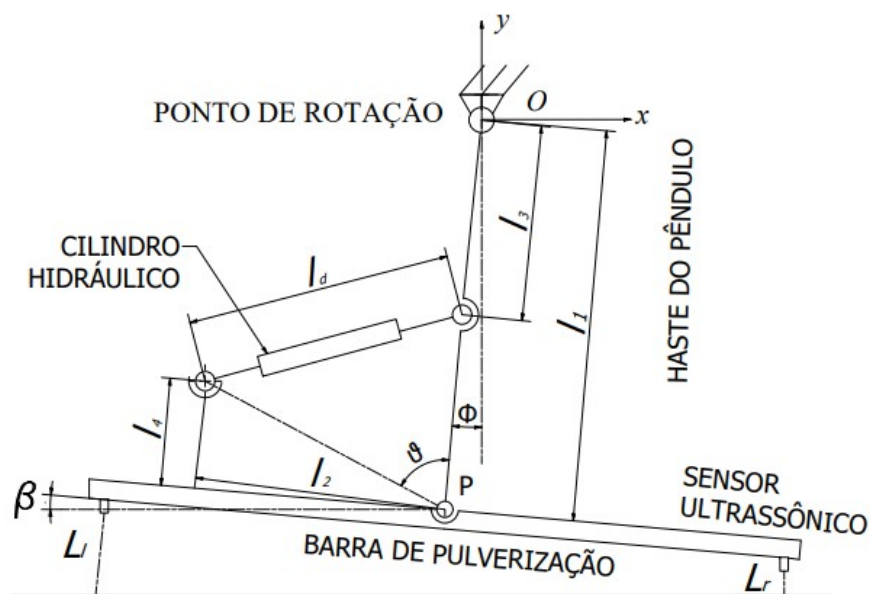


Figura 3.1: Descrição geométrica da suspensão ativa pendular. Adaptada de [Cui et al. 2019a]

midades pelos sensores ultrassom L_l e L_r , que permitem calcular o ângulo de inclinação β da barra em relação ao alvo, dada a distância D_L entre os dois sensores:

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{L_r - L_l}{D_L} \right) \quad (3.1)$$

A cadeia cinemática dos vetores associados aos elos fixos l_i , $i = 1, 2, 3, 4$ é dada por:

$$\vec{l}_1 + \vec{l}_2 + \vec{l}_4 = \vec{l}_3 + \vec{l}_d \quad (3.2)$$

onde l_d é o componente ajustável incorporado ao cilindro. Visto que quando a haste OP está na vertical o comprimento inicial do cilindro é l_{d0} , conclui-se que o deslocamento y_d da haste do pistão é dada por:

$$y_d = l_d - l_{d0} \quad (3.3)$$

Com base na projeção dos eixos X e Y , as seguintes equações algébricas são válidas, por ϕ representando a inclinação do elo do pêndulo OP em relação à vertical, β é a inclinação da barra de pulverização para a posição alvo situada na linha horizontal, e ϑ é o ângulo entre a haste do pêndulo OP e a linha PR .

$$\begin{aligned} -l_1 \sin \phi - l_2 \cos \beta + l_4 \sin \beta &= l_3 \sin \phi - l_d \sin \vartheta \\ -l_1 \cos \phi + l_2 \sin \beta + l_4 \cos \beta &= l_3 \cos \phi - l_d \cos \vartheta \end{aligned} \quad (3.4)$$

Ao eliminar o termo ϑ na equação 3.4, ϕ pode ser escrito como uma função de β e l_d onde a_1 e a_2 são as constantes de linearização.

$$\phi = a_1 l_d + a_2 \beta \quad (3.5)$$

A razão para realizar a linearização decorre do fato de que a amplitude máxima de rotação da lança em direção ao alvo é limitada a 6° , o que resulta em variações extremamente reduzidas nos coeficientes. Assim, esses coeficientes podem ser considerados aproximadamente constantes.

Utilizando o deslocamento do pistão l_d e a inclinação da barra até a posição alvo β como coordenadas generalizadas, é viável determinar a equação de movimento da suspensão da lança aplicando o método de modelagem de Lagrange às coordenadas l_d e β . Isso pode ser expresso na equação:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_L}{\partial \dot{l}_d} - \frac{\partial T_L}{\partial l_d} + \frac{\partial V_L}{\partial l_d} + \frac{\partial D_L}{\partial \dot{l}_d} = Q_{ld} \quad (3.6)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_L}{\partial \dot{\beta}} - \frac{\partial T_L}{\partial \beta} + \frac{\partial V_L}{\partial \beta} + \frac{\partial D_L}{\partial \dot{\beta}} = Q_b \quad (3.7)$$

Então temos que, T_L representa a energia cinética total, V_L denota a energia potencial, D_L é a função de dissipação, e Q_{ld} e Q_b são as forças generalizadas. Q_{ld} está associado à coordenada l_d , enquanto Q_b está vinculado à coordenada β . F é a força aplicada pelo atuador. Fazendo a integração das equações:

$$Q_{ld} = F \quad (3.8)$$

$$Q_{\beta} = 0 \quad (3.9)$$

A energia cinética total T_L do sistema é determinada por I e M , os quais representam o momento de inércia e a massa da lança, respectivamente.

$$T_L = \frac{I}{2}\dot{\beta}^2 + \frac{M}{2}(a_1\dot{l}_d + a_2\dot{\beta})^2 \quad (3.10)$$

A energia potencial V_L do sistema é onde L_1 representa o comprimento do elo do pêndulo OP , g é a aceleração gravitacional, e K é o coeficiente de estresse rotacional equivalente da suspensão em torno do ponto de articulação O .

$$V_L = -L_1 \cos(a_1 l_d + a_2 \beta) M g + \frac{1}{2} K (a_1 l_d + a_2 \beta)^2 \quad (3.11)$$

A função de dissipação de energia da suspensão D_L é dada pela equação (3.12). Assim, C representa o coeficiente equivalente de amortecimento rotacional da suspensão em relação ao ponto de articulação O .

$$D_L = \frac{C}{2} (a_1 \dot{l}_d + a_2 \dot{\beta})^2 \quad (3.12)$$

A utilizando as equações (3.6) e (3.7) juntamente com as equações (3.8)-(3.12) resulta na obtenção da procura de movimento a seguir.

$$\begin{aligned} & ML_1^2 a_1^2 \ddot{l}_d + ML_1^2 a_1 a_2 \ddot{\beta} + Mg L_1 a_1^2 l_d + Mg L_1 s_1 a_2 \beta \\ & + Ka_1 (a_1 l_d + a_2 \beta) + Ca_1 (a_1 \dot{l}_d + a_2 \dot{\beta}) = F \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} & I \ddot{\beta} + ML_1^2 a_1 a_2 \ddot{l}_d + ML_1^2 a_2^2 \ddot{\beta} + M_2 g L_1 a_1 a_2 l_d \\ & + Mg L_1 a_2^2 \beta + Ka_2 (a_1 l_d + a_2 \beta) + Ca_2 (a_1 \dot{l}_d + a_2 \dot{\beta}) = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Geralmente, o controle de posição de um cilindro hidráulico é obtido ao regular o fluxo de óleo hidráulico para o corpo do cilindro. No caso de um cilindro eletro-hidráulico, a manipulação da tensão para as servo-válvulas, controlando a tensão para as servo-valvulas, dessa forma, determina a posição da pressa do atuador. Para conseguir isso, é crucial obter a função de transferência entre o deslocamento do atuador l_d de a rotação de β . Isso é realizado aplicando a transformação de Laplace, conforme a equação (3.14). Reorganizando os termos da equação, obten-se que s é uma variável de Laplace.

$$\frac{\beta(s)}{l_d(s)} = - \frac{ML_1^2 a_1 a_2 s^2 + Ca_1 a_2 s + Ka_1 a_2 + Mg L_1 a_1 a_2}{(I + ML_1^2 a_2^2) s^2 + Ca_2^2 s + Ka_2^2 + Mg L_1 a_2^2} \quad (3.15)$$

A força motriz do cilindro hidráulico pode ser calculada de acordo com a otimização (3.13). No entanto, para o servocontrole de posição do pulverizador, isso não é necessário.

A solução (3.14) revela que o sistema de suspensão pode ser simplificado para um sistema de segunda ordem. Assim, propõe-se a seguinte estrutura de modelo.

$$\frac{\beta(s)}{l_d(s)} = \frac{c_2 s^2 + c_1 s + c_0}{s^2 + b_1 s + b_0} = \frac{-0.0058 s^2 + 67.29 s + 174.2}{s^2 + 0.834 s + 1.993} \quad (3.16)$$

Com zeros em -2.59 e $+11,604$ e polos estáveis em $-0.417 \pm 1.35j$. Este zero instável em $+11,604$ pode ser visto como uma dinâmica parasita que será desconsiderada para o projeto do modelo de referência com grau relativo unitário. Fazendo $c_2 = 0$ e denominando k_p o ganho de alta frequência da planta, (3.16) pode ser escrita como:

$$G(s) = k_p \frac{s + b_1}{s^2 + a_1 s + a_2} = 67.29 \frac{s + 2.588}{s^2 + 0.834 s + 1.993} \quad (3.17)$$

3.2 Projeto de Controladores Input Shaping, MRAC e VS-MRAC

O controlador ZV é projetado conforme (Singh & Singhose 2002), de modo que a amplitude A_1 é dada por:

$$A_1 = \frac{1}{1 + K}, \quad K = e^{\left(\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)} \quad (3.18)$$

e $A_2 = 1 - A_1$. O primeiro pulso é aplicado em $t_1 = 0$ e o segundo pulso de amplitude A_2 é aplicado em $t_2 = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{T_d}{2}$, com $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$ e T_d é o período de amortecimento. Portanto o sinal de comando $X(s)$, neste caso a referência é composto por estas duas partes, Figura 3.5 gerando o sinal $X_s(s)$ (Oliveira & Boaventura-Cunha 2013). Usualmente o subscrito s refere-se neste contexto a *shaped*. Para a planta (3.16), os parâmetros do ZV são: $A_1 = 0.73, A_2 = 0.27, t_2 = 2.33s$. Os parâmetros de A_1 e A_2 foram obtidos a partir de simulações no MATLAB com a função DAMP.

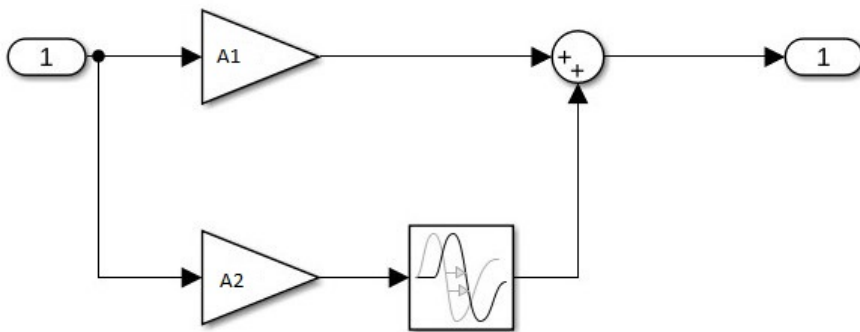


Figura 3.2: Esquema do controlador Input Shaping: Fonte; Ambiente de simulação SIMULINK/MATLAB

A integração em malha fechada de um modelo de referência sobreamortecido e com convergência mais rápida é uma estratégia bastante utilizada. O projeto consiste basicamente em definir este modelo $M(s)$ e estabelecer as leis adaptativas para os parâmetros

do controlador, considerando uma abordagem direta (Ioannou & Sun 2012). Por exemplo, na Figura 3.3 é perceptível a ideia de fazer a planta se comportar como um modelo mais rápido que (3.16) com polos em $-0.8 \pm 0.4j$ e $r = 0.01m$. Além disto, apresenta o resultado de aplicação do ZV em (3.16), com notável redução de overshoot de 49% para 8% e tempo de estabilização de 11s para 6s.

$$M(s) = \frac{y_m}{r} = \frac{67.29}{s^2 + 1.6s + 0.8} \quad (3.19)$$

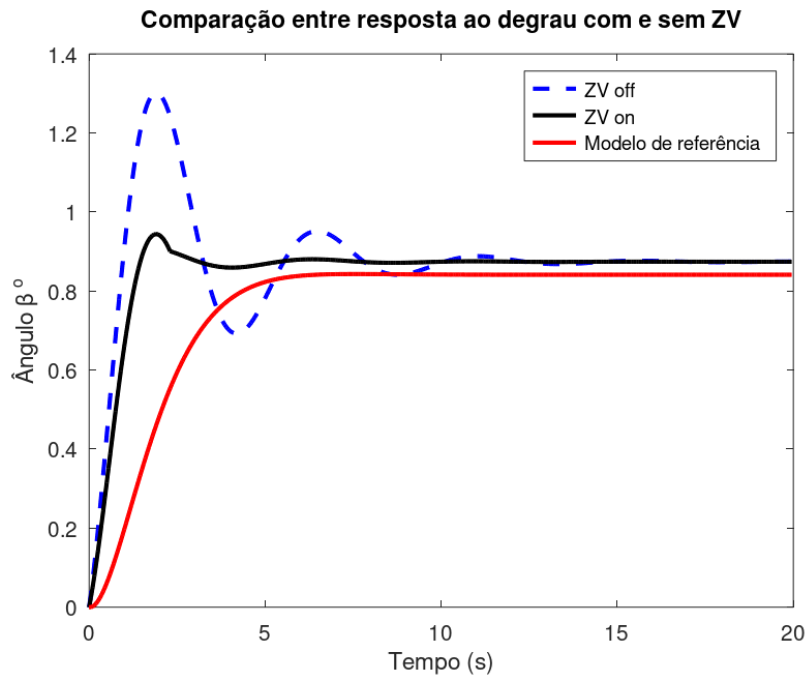


Figura 3.3: Modelo de referência sobreamortecido

O controlador MRAC para sistema de segunda ordem tem sinal de controle u dado por:

$$u = \theta_{v1}v_1 + \theta_2y + \theta_{v2}v_2 + \theta_4r, \quad (3.20)$$

com $\dot{v}_1 = -\lambda_1v_1 + gu$, $\dot{v}_2 = -\lambda_1v_2 + gy$. Neste caso, $\lambda_1 = 0.8$, $g = 0.1$. Com base na teoria de estabilidade de Lyapunov, a lei adaptativa para o vetor de parâmetros do controlador θ é dada por:

$$\dot{\theta}_{v1} = -\gamma_1ev_1 \quad \dot{\theta}_2 = -\gamma_2ey \quad \dot{\theta}_{v2} = -\gamma_3ev_2 \quad \dot{\theta}_4 = -\gamma_4er \quad (3.21)$$

onde $e = y - y_m$ e $\gamma_1 = 0.1$, $\gamma_2 = 0.1$, $\gamma_3 = 0.5$, $\gamma_4 = 0.1$. A modificação em (3.21) para agregar estrutura variável e obter o VS-MRAC consiste em utilizar projeção, ou seja, a hipótese de que limitantes superiores são conhecidos para os parâmetros do controlador, definindo as amplitudes dos relés de modo a garantir uma condição suficiente de estabili-

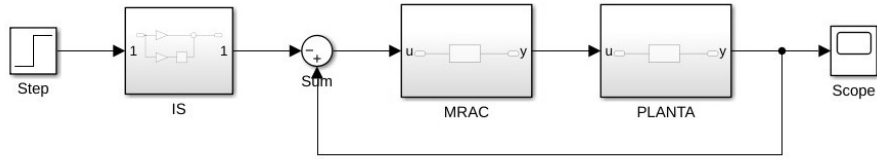


Figura 3.4: Esquema básico de controlador IS+MRAC. Fonte; Ambiente de simulação SIMULINK/MATLAB

dade assintótica, com a condição $\bar{\theta} > |\theta^*|$. Ou seja, as leis chaveadas se tornam:

$$\theta_{v1} = -\bar{\theta}_{v1} \text{sign}(ev_1) \quad \theta_2 = -\bar{\theta}_2 \text{sign}(ey) \quad \theta_{v2} = -\bar{\theta}_{v2} \text{sign}(ev_2) \quad \theta_4 = -\bar{\theta}_{v1} \text{sign}(er) \quad (3.22)$$

e, para a planta em (3.17) e modelo de referência com ganho unitário dado por:

$$M(s) = \frac{y_m}{r} = \frac{s + 0.8}{s^2 + 1.6s + 0.8} \quad (3.23)$$

os relés são projetados com $\bar{\theta}_{v1} = 1.9$, $\bar{\theta}_2 = 0.02$, $\bar{\theta}_{v2} = 0.03$, $\bar{\theta}_4 = 0.02$.

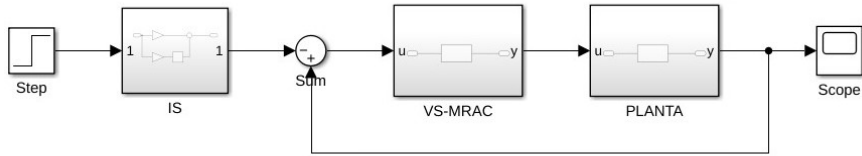


Figura 3.5: Esquema básico de controlador IS+VS-MRAC. Fonte; Ambiente de simulação SIMULINK/MATLAB.

Para a referência $\beta_d = 1^\circ$, foi considerada a adição de perturbação senoidal de amplitude 3° e frequência 0.1 Hz para $t \geq 15s$. A Figura 3.6 apresenta resultados do MRAC e VS-MRAC com ZV. Há uma pequena redução das métricas de somatório do erro quadrático (ISE) e do total do módulo do sinal de controle. A insensibilidade do VS-MRAC ao distúrbio é visível, embora com sinal l_d chaveado.

3.3 Simulações e Resultados

3.3.1 Caso 1: Posicionamento da barra a partir do repouso $\beta = 0^\circ$

As figuras 3.6(a) e 3.6(b) do caso 1 representam a simulação com $\beta_d = 1^\circ$ com perturbação $3\sin(0.2\pi t)$ para $t \geq 15s$.

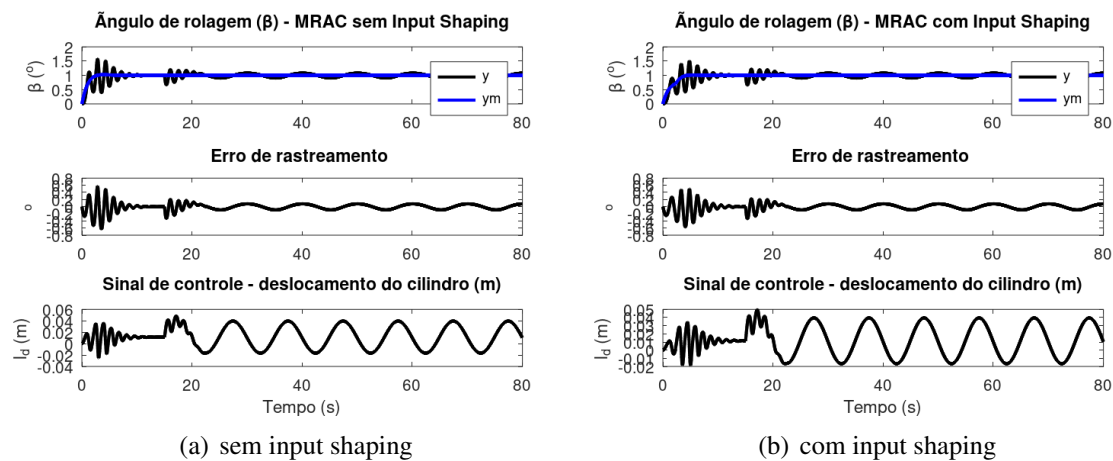


Figura 3.6: MRAC para $\beta_d = 1^\circ$ com perturbação $3\sin(0.2\pi t)$ para $t \geq 15s$. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.

Tabela 3.1: Comparação entre o caso 1 MRAC e MRAC-IS

Controladores	ISE	Total u	Std u
MRAC	99.11	151.17	0.02
MRAC-IS	95.83	149.91	0.02

Para a referência $\beta_d = 1^\circ$, foi considerada a adição de perturbação senoidal de amplitude 3° e frequência $0.1Hz$ para $t \geq 15s$. A Figura 3.6 apresenta resultados do MRAC com Input Shaping e sem Input Shaping. Há uma pequena redução das métricas de somatório do erro quadrático (ISE) e do total do módulo do sinal de controle, conforme Tabela 3.1.

Analisando os resultados, o primeiro caso, figura 3.6(a), (sem Input Shaping) se destaca por proporcionar um controle mais preciso, seguindo a referência constante. Já na simulação 3.6(b) (com Input Shaping), observamos uma vantagem sutil em termos de estabilidade, indicada pelo menor valor de ISE. Portanto, a escolha entre os dois dependerá da priorização entre precisão 3.6(a) e estabilidade em relação ao erro quadrático integral 3.6(b).

3.3.2 Caso 1: Posicionamento da barra a partir do repouso $\beta = 0^\circ$

As figuras 3.7(a) e 3.7(b) do caso 1 representam a simulação com $\beta_d = 1^\circ$ com perturbação $3\sin(0.2\pi t)$ para $t \geq 15s$.

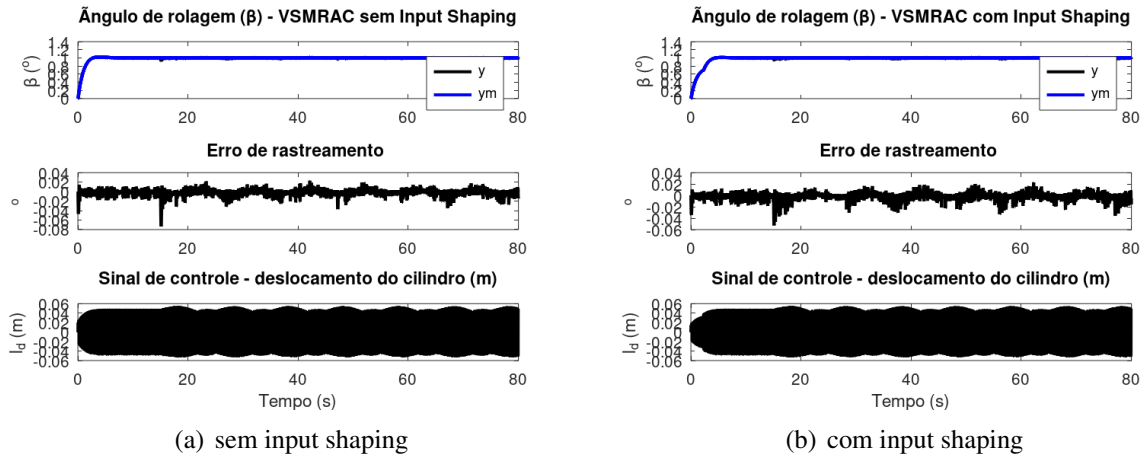


Figura 3.7: VS-MRAC para $\beta_d = 1^\circ$ com perturbação $3\sin(0.2\pi t)$ para $t \geq 15s$. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.

Tabela 3.2: Comparação entre o caso 1 VSMRAC e VSMRAC-IS

Controladores	ISE	Total u	Std u
VSMRAC	0.59	376.89	0.05
VSMRAC-IS	0.55	374.01	0.05

Após uma análise dos resultados, fica claro que o uso do VSMRAC com Input Shaping oferece vantagens significativas em comparação com o VSMRAC sem Input Shaping. Essa constatação é respaldada pelos valores mais baixos de ISE, conforme tabela 3.2, indicando uma resposta mais precisa e estável ao acompanhar a referência constante. A insensibilidade do VS-MRAC ao distúrbio é visível na Figura 3.7(b), embora com sinal l_d chaveado. Além disso, a observação de um sinal de controle total ligeiramente menor no 3.7(b) sugere uma utilização mais eficiente do sistema de controle. Em termos técnicos, ao considerar critérios de precisão e eficiência, sendo assim, a escolha preferencial nesta análise comparativa.

3.3.3 Caso 2: Rastreamento de referência senoidal MRAC e MRAC-IS

Neste cenário, um movimento de rolagem foi simulado com amplitude de 3° à frequência de 0.1Hz conforme (Cui, Xue, Le, Mao & Ding ,2019). As figuras 3.8(a) sem input shaping e 3.8(b) com input shaping representam os resultados das simulações.

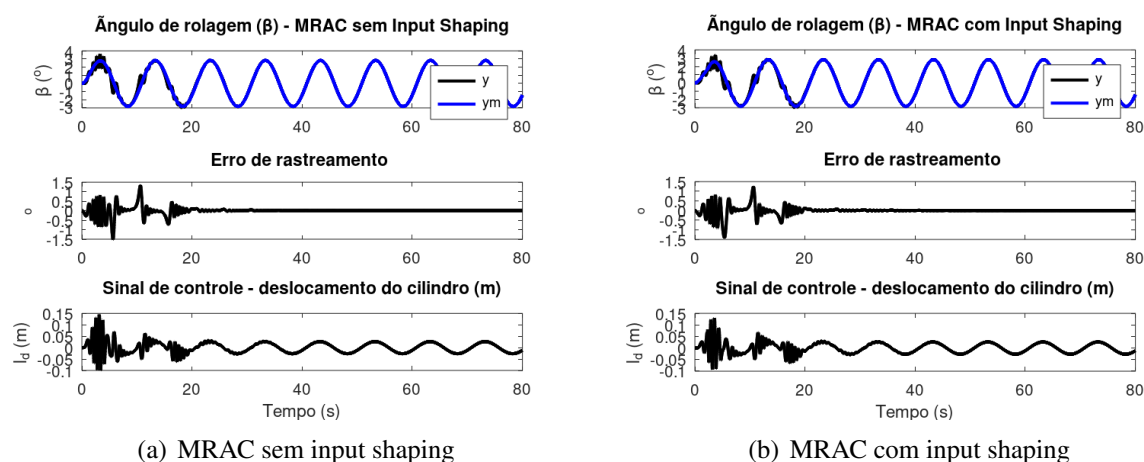


Figura 3.8: MRAC e MRAC-IS para $\beta_d = 3\sin(0.2\pi t)$, ondulação do terreno. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.

Tabela 3.3: Comparação entre o caso 2 MRAC e MRAC-IS

Caso	ISE	Total u	Std u
MRAC	336.92	158.05	0.02
MRAC-IS	335.58	153.46	0.02

Os desempenhos dos Casos 3.8(a) e 3.8(b) do MRAC são bastante parecidos quando se trata de seguir uma referência senoidal com precisão. No entanto, o Caso 3.8(b) (MRAC com Input Shaping) apresenta uma pequena vantagem em termos de ISE e total de sinal de controle, indicando uma possível utilização mais eficiente do sistema de controle em comparação com o Caso 3.8(a) (MRAC sem Input Shaping).

3.3.4 Caso 2: Rastreamento de referência senoidal VSMRAC e VSMRAC-IS

Nesse contexto, as figuras 3.9(a) e 3.9(b) representam as simuações de desempenho do Caso 2, que foi simulado uma rotação com uma amplitude de 3° a uma frequência de 0.1Hz , conforme mencionado por (Cui, Xue, Le, Mao & Ding ,2019).

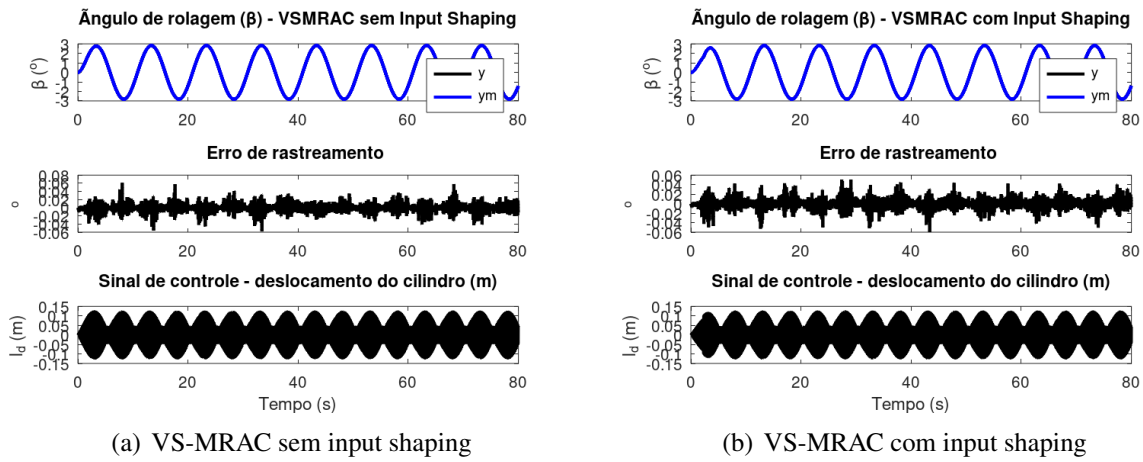


Figura 3.9: VS-MRAC e VS-MRAC-IS para $\beta_d = 3\sin(0.2\pi t)$, ondulação do terreno. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.

Tabela 3.4: Comparação entre o caso 2 VSMRAC e VSMRAC-IS

Caso	ISE	Total u	Std u
VSMRAC	1.01	659.06	0.09
VSMRAC-IS	1.12	653.59	0.09

O desempenho do Caso 3.9(a) VSMRAC sem Input Shaping mostra uma leve superioridade em termos de ISE, sinalizando uma precisão e estabilidade aprimoradas ao seguir a referência senoidal. Entretanto, o Caso 3.9(b) VSMRAC com Input Shaping apresenta um total de sinal de controle um pouco menor, sugerindo uma utilização potencialmente mais eficiente do sistema de controle.

3.3.5 Caso 3: Rastreamento de referência senoidal com perturbação, controladores MRAC e MRAC-IS

Neste caso, o posicionamento inicial da barra a partir da condição do com $\beta = 0^\circ$ é seguido pelo rastreamento de referência senoidal. Inicialmente, para a referência $\beta = 1^\circ$, foi considerada a adição de uma perturbação senoidal de amplitude 3° e frequência de $0,1\text{Hz}$ para $t \geq 15\text{s}$. Em seguida, o sistema continua a simulação com o movimento de rolagem senoidal, mantendo uma amplitude de 3° e uma frequência de $0,1\text{Hz}$.

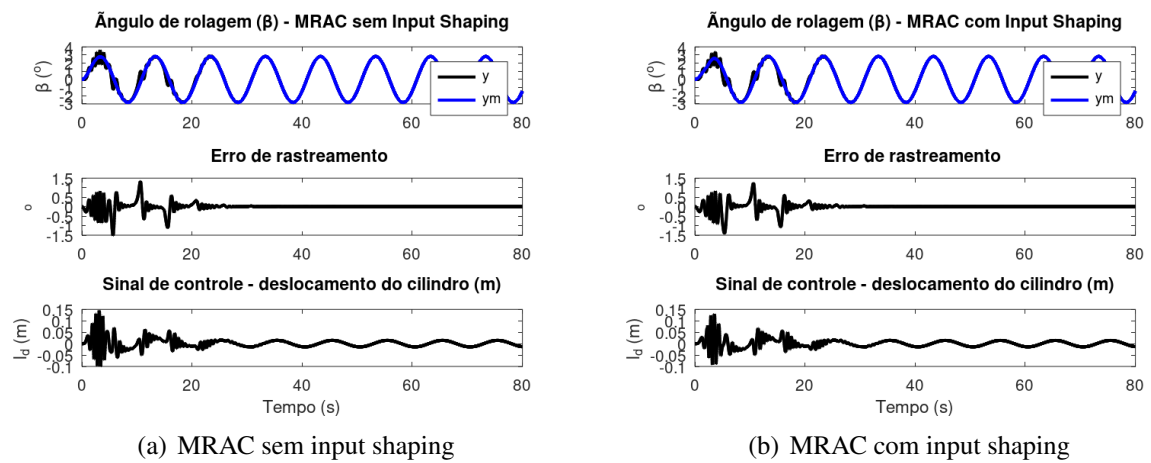


Figura 3.10: MRAC e MRAC-IS, simulação integrada dos dois primeiros casos. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.

Tabela 3.5: Comparação entre o caso 3 MRAC e MRAC-IS

Caso	ISE	Total u	Std u
MRAC	378.17	109.82	0.02
MRAC-IS	376.51	104.88	0.02

Ao analisar o desempenho de 3.10(a) do MRAC, observamos que ambos possuem boa resposta a referência senoidal, mesmo diante do distúrbios após 15s, observamos uma notável semelhança. Embora ambos demonstrem valores próximos, sugerindo uma precisão comparável na trajetória senoidal, o Caso 3.10(b), que incorpora o Input Shaping, destaca-se ao apresentar ligeiras vantagens em termos de ISE e total de sinal de controle.

Esses resultados indicam uma resposta um pouco mais eficiente, mesmo diante do desafio do distúrbio, quando o Input Shaping é aplicado.

3.3.6 Caso 3: Rastreamento de referência senoidal com perturbação, controladores VSMRAC e VSMRAC-IS

As figuras 3.11(a) e 3.11(b) do caso 3 representam a simulação com VS-MRAC e VS-MRAC-IS para $\beta_d = 3\sin(0.2\pi t)$.

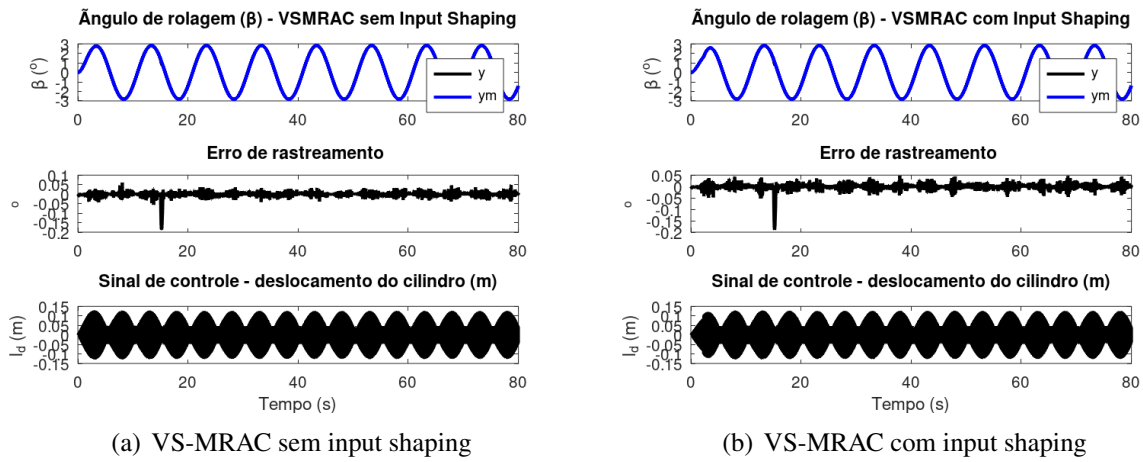


Figura 3.11: VS-MRAC e VS-MRAC-IS para $\beta_d = 3\sin(0.2\pi t)$, simulação integrada dos dois primeiros casos. O sinal de saída do modelo de referência (y_m) representado pela cor azul e a saída da planta (y) pela cor preta.

Tabela 3.6: Comparação entre o caso 3 VSMRAC e VSMRAC-IS

Caso	ISE	Total u	Std u
VSMRAC	1.78	650.34	0.09
VSMRAC-IS	1.88	644.78	0.09

Ao analisar os resultados dos Casos 3.11(a) e 3.11(b) do VSMRAC em resposta a uma referência senoidal com distúrbio após 15s, percebemos que eles apresentam desempenhos muito semelhantes. Ambos demonstram valores próximos de ISE, indicando uma precisão comparável na trajetória da referência senoidal mesmo diante de distúrbios.

Contudo, o Caso 3.11(a) mostra pequenas vantagens em termos de ISE. É relevante destacar que o Caso 3.11(b) revela uma eficiência ligeiramente superior, evidenciada pelo total de sinal de controle um pouco menor. Essa eficiência se mantém mesmo em condições desafiadoras de distúrbio. Assim, a escolha entre os casos dependerá da priorização entre uma resposta temporal ponderada e a eficiência do controle. Em resumo, ambos os casos exibem robustez, a decisão final será influenciada pelos objetivos específicos do sistema em questão.

Capítulo 4

Conclusão

Este trabalho apresentou o efeito do controle *feedforward* Input Shaping (*IS*) para redução de oscilações em modelo matemático de barra de pulverização, em problemas de posicionamento angular e seguimento de trajetória senoidal replicando o movimento do trator em operação. A eficácia desse processo depende significativamente da estabilidade da barra durante a operação, uma vez que os movimentos, especialmente as rotações em torno do eixo X, podem impactar a distribuição dos produtos, resultando em áreas sem cobertura e irregularidades.

A incorporação da técnica de Input Shaping (*IS*) geralmente se destaca como um impulsionador notável no aprimoramento das métricas de desempenho. Essa estratégia demonstra consistentemente uma capacidade de reduzir substancialmente os valores associados às métricas de erro e ao controle total do sistema, evidenciando seus benefícios no aperfeiçoamento do comportamento dinâmico do sistema em diferentes cenários. Contudo, as combinações com os controladores MRAC e VSMRAC, traz melhorias significativas no desempenho do sistema, reduzindo o overshoot, estabilizando mais rapidamente e mostrando robustez diante de perturbações, apontando redução de erro de rastreamento e sinal de controle.

A preferência pela implementação do VSMRAC em comparação com o MRAC revela resultados significativamente superiores, em particular na métrica de ISE. Essa constatação aponta para uma eficácia mais pronunciada na adaptação do VSMRAC às complexidades do sistema, sugerindo uma escolha mais vantajosa na busca por um controle adaptativo eficiente.

Em análise abrangente, constata-se que a introdução de distúrbios após 15s impacta negativamente as métricas de desempenho em todos os casos avaliados. No entanto, é digno de nota que a aplicação de Input Shaping (*IS*) parece desempenhar um papel crucial na atenuação desses efeitos adversos, contribuindo para a manutenção de um desempenho mais robusto e estável do sistema em face de perturbações temporais.

Estratégias como input shaping, sendo aplicadas para suavizar vibrações indesejadas, em malha aberta, a redução é significativa. Ao integrar-se com controladores MRAC e VSMRAC em malha fechada o benefício do ZV é em parte compensado pela realimentação, necessitando de reprojeto em tempo de execução com base na saída da planta para maior efeito.

4.1 Trabalhos futuros

Na continuação para trabalhos futuros poderá ser implementado o controlador VSAPPC (Alocação Adaptativa de Polos e Estrutura Variável) pois o mesmo possui filtragem integrada em sua lei de controle. O controlador VSAPPC proposto em (Silva & Araujo 2005) é validado em termos de robustez (Santos 2007) e tem sido aplicado com sucesso (Ribeiro et al. ,2014), melhorando e otimizando processos de plantas industriais. Adicionalmente, a integração de outras estratégias de Input Shaping podem ser avaliadas, que incorporam maior robustez, como Zero Vibration Derivative (ZVD) e variantes.

4.2 Trabalhos associados

O referido trabalho foi baseado no artigo (Lima & Oliveira 2023), apresentado no Congresso Brasileiro de Agroinformática (SBIAGRO 2023).

Referências Bibliográficas

- Altin, B. & K. Barton (,2018), ‘Rohrs’ example revisited: on the robustness of adaptive iterative learning control’, *Asian Journal of Control* **20**(3), 993–1002.
- Annaswamy, A.M. (,2023), ‘Adaptive control and intersections with reinforcement learning’, *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems* **6**, 65–93.
- Annaswamy, A.M. & A.L. Fradkov (,2021), ‘A historical perspective of adaptive control and learning’, *Annual Reviews in Control* **52**, 18–41.
- Chatlatanagulchai, W., S. Chotana & C. Prutthapong (,2015), ‘Direct adaptive input shaping using on-line frequency information and extremum-seeking optimization’, *Kasetsart Journal - Natural Science* **49**(4), 626–638.
- Chu, Z. & J. Hu (,2016), ‘An improved recursive least square–based adaptive input shaping for zero residual vibration control of flexible system’, *Advances in Mechanical Engineering* **8**(4), 1–14.
- Conker, C., H. Yavuz & H. Bilgic (,2016), ‘A review of command shaping techniques for elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators’, *Journal of Vibration Engineering* **18**(5), 2947–2958.
- Costa, R. & L. Hsu (,1992), ‘Robustness of vs-mrac with respect to unmodelled dynamics and external disturbances’, *Adaptive Control and Signal Processing* **6**(1), 19–33.
- Cui, L., H. Mao & X. Xue (,2019), ‘Hydraulic-drive roll movement control of a spray boom using adaptive robust control strategy’, *Advances in Mechanical Engineering* **11**(2), 1–15.
- Cui, L., X. Xue, F. Le, H. Mao & S. Ding (,2019), ‘Design and experiment of electro hydraulic active suspension for controlling the rolling motion of spray boom’, *Int J Agric and Biol Eng* **12**(4), 72–81.
- Deprez, K., J. Anthonis, H. Ramon & H. Brussel (,2002), ‘Development of a slow active suspension for stabilizing the roll of spray booms, part 2: controller design’, *Biosystems Engineering* **81**(3), 273–279.
- Dhame, A.G. & S. Jayasuriya (,2003), Increasing the robustness of the input-shaping method using adaptive control, *em ‘Proceedings of American Control Conference’*, Vol. 2, pp. 1578– 1583.

- Dias, S., K. Queiroz & A. Araújo (,2021), Controlador adaptativo robusto para o processo de tanque quádruplo, em 'XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente', pp. 1392–1399.
- Goubej, M., Toms Vyhlídal & Milos Schlegel (,2020), 'Frequency weighted h2 optimization of multi-mode input shaper', *Automatica* **121**, 109202.
- Grüne, L. (,2021), 'Computing lyapunov functions using deep neural networks', *Journal of Computational Dynamics* **8**(2), 131–152.
- Hsu, L. & R.R. Costa (,1989), 'Variable structure model reference adaptive control using only input and output measurement: Part i', *Int. J. of Control* **49**(2), 399–416.
- Hu, Q-L., Z. Wang & H. Gao (,2008), 'Sliding mode and shaped input vibration control of flexible systems', *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems* **44**(2), 503–519.
- Hung, J.Y. (,2003), 'Feedback control with posicast', *IEEE Trans on Ind Electronics* **50**(1), 94–99.
- Ioannou, P. & J. Sun (2012), *Robust Adaptive Control*, 2nd^a edição, Dover, New York.
- Iyer, R.M. & B. Wills (,1978), 'Factors determining the design of tractor-mounted sprayer booms - sprayer nozzle characteristics', *Journal of Agricultural Engineering Research* **23**(1), 37–43.
- Kasprowiak, M., A. Parus & M. Hoffmann (,2022), 'Vibration suppression with use of input shaping control in machining', *Sensors* **22**(2186), 1–22.
- Khalil, Hassan K. (,1992), *Nonlinear Systems*, Macmillan.
- Lima, Gleilson & Josenalde Oliveira (2023), 'Suavização de oscilações em barra de pulverização com input shapping e controle adaptativo robusto por modelo de referência', pp. 358–365.
URL: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbiagro/article/view/26579>
- Mohammed, A., K. Alghanim & M.T. Andani (,2020), 'An adjustable zero vibration input shaping control scheme for overhead crane systems', *Shock and Vibration* **2020**(7879839), 1–7.
- Nation, H. J. (1980), 'The performance and stability of spray booms', *Journal Agricultural Engineering Resource* **27**(1), 61–70.
- Oliveira, P.B.M. & J. Boaventura-Cunha (2013), Gantry crane control: a simulation case study, em '2013 2nd Experiment@ International Conference (exp.at'13)', pp. 58–63.
- Ooten, E.A. & W. Singhose (2000), Command generation with sliding mode control for flexible systems, em '6th International Workshop on Advanced Motion Control', pp. 64–68.

- Ramon, H. & J. De Baerdemaeker (,1997), ‘Spray boom motions and spray distribution: part 1, derivation of a mathematical relation’, *Journal of Agricultural Engineering Research* **66**(1), 23–29.
- Rego, R.C.B. (,2022), Lyapunov-based Intelligent Control, Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação UFRN.
- Ribeiro, R., R. Sousa, E. Santos Jr. & T. Rocha (,2014), ‘Enhanced power quality compensation of shunt active power filters without harmonic detection schemes’, *Eletrônica de Potência* **19**(4), 332–342.
- Santos, M.B. (2007), Avaliação de robustez, desempenho e aplicação do controlador adaptativo por posicionamento de polos e estrutura variável, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação UFRN.
- Silva, F.C. & A.D. Araujo (2005), Variable structure adaptive pole placement control, em ‘Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control’, pp. 2859–2864.
- Sinfort, C. & A. Herbst (,1996), ‘Evaluation of the quality of spray distribution from boom sprayer in practical condition’, *Bulletin OEPP/EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization)* **26**, 27–36.
- Singh, T. & W. Singhose (2002), Input shaping/time delay control of maneuvering flexible structures, em ‘Proceedings of the 2002 American Control Conference’, Vol. 3, pp. 1717–1731.
- Singhose, W.E., N.C. Singer & W.P. Seering (,1995), Comparison of command shaping methods for reducing residual vibration, em ‘Proceedings of European Control Conference’, pp. 1126–1131.
- Slotine, Jean-Jacques E. & Weiping Li (,1991), *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Smith, O.J.M. (,1957), Posicast control of damped oscillatory systems, em ‘Proceedings of the IRE’, pp. 1249–1255.
- SNA (,2023), ‘Pib do agronegócio brasil alcança us\$500 bilhões’, Disponível em: <https://www.sna.agr.br/pib-do-agronegocio-brasil-alcanca-us-500-bilhoes>. Acesso em: 05 de janeiro 2024.
- Utkin, V., J. Guldner & J. Shi (2009), *Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems*, 2ndª edição, CRC Press, Boca Raton.
- Vaughan, J., A. Yano & W. Singhose (,2008), ‘Comparison of robust input shapers’, *Journal of Sound and Vibration* **35**(4), 797–815.

Womac, A. R. R., A. Etheridge, D. Seibert, Hogan & S. Ray (,2001), 'Sprayer speed and venturi-nozzle effects on broadcast application uniformity', *Transactions of the ASAE* **44**(6), 1437–1444.